

РАДИОАКТИВНАЯ ВСЕЛЕННАЯ

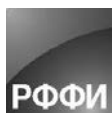
М. И. Панасюк

РАДИОАКТИВНАЯ ВСЕЛЕННАЯ



Фрязино
2019

УДК 52
ББК 22.6
П16



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту 19-12-40001\19, не подлежит продаже.

П16 **Панасюк М. И.**

Радиоактивная Вселенная. — Фрязино: Век 2. 2019. — 272 с.
ISBN 978-5-85099-200-2

Книга является научно-популярным изданием, посвященным актуальным проблемам астрофизики и космических лучей. Она затрагивает как фундаментальные, так и прикладные аспекты этих быстроразвивающихся направлений, которые связаны с изучением происхождения частиц, существующих во Вселенной, и процессов, в которых они приобретают гигантские энергии. Рассмотрены также механизмы воздействия космических лучей и радиационных полей на биообъекты, в том числе, человека, и на системы космических аппаратов. Книга рассчитана на школьников старших классов и студентов младших курсов университетов, выбирающих свой путь в науке.

ББК 22.6

The book is a popular scientific publication devoted to topical problems of modern Astrophysics of cosmic rays — the study of particles that are born in the Universe and acquire giant energy through space accelerators, as well as Space physics in the part of radiation fields study in space. It touches upon both fundamental and applied aspects of these rapidly developing areas of modern astrophysics, which are related both to the study of the nature of particle's origin existing in the Universe, as well as to the consideration of the processes they have, affecting both on humans, biological objects and spacecraft systems in outer space. The book is designed for high school students and junior University students who choose their path in science.

На обложке картина автора «Неспокойное Солнце».

ISBN 978-5-85099-200-2

© М. И. Панасюк, текст, илл.
© Век 2, 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Нет более умиротворяющей картины, чем ночное звёздное небо. Тысячи звёзд, видимые человеческим глазом на фоне иссиня чёрного неба, создают впечатление абсолютного покоя, настраивая мысль человека на эту волну. Нагромождение звёзд, превращающее местами хаос в порядок, названный человеком созвездиями, заставляет думать о едином начале этого творения природы. И слабые мерцания звёзд лишь дополняют картину спокойствия и порядка.

А ближайшая к нам звезда — Солнце с закатами и восходами, мягким и ровным светом, ласкающим глаза человека, вселяет ещё большую уверенность в стабильности нашего мира.

Наверное не случайно человек, обладая теми органами чувств, которые даны ему от природы, ограждён от того, что находится за пределами видимой ему картины космоса.

Реальная же картина, как учёные её сейчас представляют, мало похожа на ту, что нарисована выше.

Вселенная бурлит... Взрываются звёзды, сталкиваются галактики, чёрные дыры поглощают вещество, многие звёзды вращаются с сумасшедшей скоростью и фонтанируют громадные потоки энергии в окрестное пространство. Это ещё не полная картина нашей беспокойной Вселенной.

И даже ничем не выделяющееся среди прочих звёзд наше Солнце — средняя по размеру звезда извергает в ближайший к нам космос, Солнечную систему, огромные массы вещества, вызывая настоящие, гигантские по масштабам взрывы, эквивалентные по мощности миллионам атомных бомб, созданных человеком. А ведь именно такой представлял себе Вселенную Михайло Ломоносов:

«Когда бы смертным столь высоко
Возможно было возлететь,
Чтоб к Солнцу бrenно наше око
Могло приблизившись возреть;
Тогда б со всех открылся стран
Кипящий вечно Океан.
Там огненны валы стремятся
И не находят берегов;
Там вихри пламенны крутятся
Борючись множество веко;
Там камни как вода кипят,
Горящи там дожди шумят».

Глаз человека на Земле этого не видит. Но человек может их изучать с помощью различных приборов, созданных им самим. Для исследования Вселенной ученые размещают их на земле и под землей, под водой и над облаками, запускают их в космос.

А как эти бурные процессы во Вселенной сказываются на окружающем нас космическом пространстве, которое человек осваивает; на атмосфере, которой он дышит; на тех техногенных системах, которые он создаёт и, наконец, на нём самом?

Одним из «продуктов» бурь во Вселенной являются космические лучи (КЛ) – атомы и элементарные частицы, образующиеся во Вселенной. Они имеют громадный диапазон по шкале энергий, разгоняются до энергий, недоступным современным ускорителям, созданных человеком на Земле. Среди этих частиц и самые легкие элементы, такие как водород, но встречаются и сверхтяжелые, находящиеся на краю таблицы Менделеева.

Выяснение источников, механизмов ускорения и транспорта КЛ – актуальная проблема современной астрофизики, которая теперь является частью более широкого направления, названного «физика астрочастиц», объединяющего взаимосвязанные исследования: заряженного компонента – ядер КЛ, гамма-астрономию и астрофизику нейтрино. Космические лучи были открыты почти 100 лет назад. За это время физики ответили на многие вопросы, касающиеся природы этого феномена Вселенной. Сейчас ясно, что их происхождению мы обязаны процессам в космосе, связанным, в первую очередь, с большим выделением энергии.

Источниками космических лучей могут быть звёзды вдали от нашей Солнечной системы, как в Галактике, так и за её пределами. Но, помимо дальних астрофизических объектов, наше Солнце, ближайшая к нам звезда, является мощнейшим источником космических лучей.

Космические лучи заполняют всю нашу Галактику и, конечно, окосолнечное пространство. Путешествуя в пространстве, часть из них достигает Земли. Эти частицы, обладая значительной энергией, могут представлять определённую опасность для спутников, экипажей космических кораблей, пассажиров высотных самолётов, для бортовой электроники. Но этот перечень далеко не полон. Уже есть доказательства, что космические лучи, проникая вглубь земной атмосферы, оказывают самое непосредственное влияние на погоду. Далеко не все физические процессы, объясняющие происхождение космических лучей, поняты, и не всё ясно с их воздействием на окружающее Землю пространство, на биологические и техногенные системы. Каждый день приносит новые факты, рождает новые гипотезы, заставляет по-новому взглянуть на, казалось бы, уже известные физические явления.

Наука за последние десятилетия шагнула далеко вперед в познании окружающего нас космоса, и учёные стараются и, порой безуспешно, объяснить и связать в единую цепочку, казалось бы, несовместимое...

Как раз об этом написана книга. Она призвана дать читателю представление о взаимосвязи многих процессов, происходящих и происходивших во Вселенной, и некоторых природных, техногенных и биологических явлениях в среде обитания человека – на Земле и около неё.

В основе книги популярное изложение лекций автора на физическом факультете МГУ, как для студентов, уже выбравших для себя специальность в области астрофизики космических лучей и физики космоса, так и студентов младших курсов и школьников, стоящих перед выбором своего будущего направления в физике.

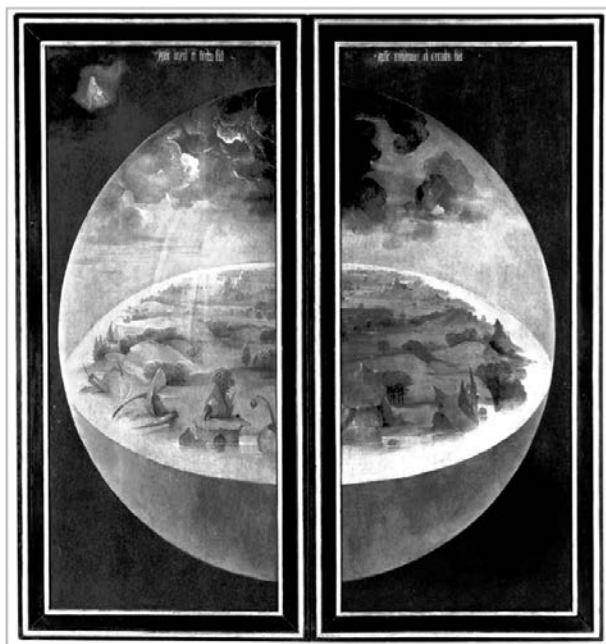
Автор выражает глубокую благодарность своим коллегам: В.А. Беднякову Э.А. Богомолу, Д.Б. Гнеденко, А.С. Ковтюху, А.Ф. Июдину, Л.А. Кузьмичеву, Э.Й. Кэбину, Л.И. Сарычевой и Ю.И. Стожкову, за полезные предложения и замечания к предыдущей книге «Странники Вселенной или эхо большого взрыва», послужившей основой настоящей.

Часть 1. Высокоэнергичная Вселенная

История космологии — это история наших заблуждений...
Мы находимся на маленькой планете во Вселенной,
не можем никуда выйти и поставить эксперимент.
Всё, что мы можем сделать, это взять немного света,
который достиг нас,
и понять, что собой представляет Вселенная.

М. Чаун, астроном

Только в наши дни приборы, созданные человеком, покидают Солнечную систему, расположенную на огромном расстоянии от центра нашей Галактики. Маловероятно, что в обозримом будущем возможно «приборное соприкосновение» с другими галактиками, не говоря о путешествиях к ним человека. Но, тем не менее, наши знания о Вселенной обогащаются благодаря регистрации высокоэнергичного излучения, достигающего окрестностей нашей планеты из далеких и древних ее областей, недостижимых для человека. О нём и пойдет речь в этой части книги.



Иероним Босх. Сад земных наслаждений. Сотворение мира. Внешняя створка.(1500-е).
Национальный музей Прадо. Мадрид, Испания.

Глава 1. После Большого взрыва

Наука выигрывает, когда её крылья раскованы фантазией.

М. Фарадей

В одном мгновении видеть вечность...

Уильям Блейк

О том, как устроена Вселенная, мы можем судить благодаря созданным человеком приборам, позволяющим заглянуть на невообразимо далёкие расстояния, которые трудно представить. Если сравнить их с принятой в астрономии единицей длины — *световым годом* (1 световой год = $9,5 \cdot 10^{12}$ км или $\sim 0,3$ парсека (1 парсек $\sim 3,1 \cdot 10^{13}$ км)), то расстояния до видимых приборами источников можно оценить в 5000 миллионов парсеков или 15 миллиардов световых лет! Наблюдаемая сегодня Вселенная — огромные объединения звёзд — галактики, мелкими вкраплениями заполняющие пустое, на первый взгляд, пространство. Но, на самом деле, всё пространство Вселенной заполнено тем, что мы называем веществом и излучением.

Вначале о веществе. Вещество состоит из атомных ядер — нуклидов. В ядре находятся протоны и нейтроны. Их называют нуклонами. Нуклид — это отдельный вид атомов какого-либо химического элемента с ядром, состоящим из определённого числа протонов (Z) и нейтронов (N). Число протонов Z в химическом элементе определяет его зарядовое число (или атомный номер), а сумма $A = Z + N$ — массовое число. Зарядовое число Z равно заряду ядра в единицах элементарного заряда и одновременно равно порядковому номеру соответствующего ядра химического элемента в таблице Менделеева. Последняя величина приблизительно равна средней массе атома в периодической таблице Менделеева. Фактически два параметра ядра — Z и A — определяют характеристики нуклида и самого вещества.

Так, например, водород, наиболее распространённый и лёгкий элемент во Вселенной, имеет $Z=1$ (его обозначение ^1H), а среди наиболее тяжёлых и редких элементов — уран имеет $Z=92$ (^{92}U). Одной из задач астрофизики как раз и является выяснение происхождения и распространённости отдельных нуклидов во Вселенной, а их примерно 300.

Возраст Вселенной более 10 миллиардов лет. Как она возникла?

1.1. Убегающие галактики

Космос проходит бесконечные циклы Больших взрывов и расширений. Возможно, Большой взрыв — не начало времени, а лишь начало последнего цикла из бесконечной серии нагреваний, расширения, застоев, опустошения и вновь расширения.

П. Стейнхард, астроном

Великим физикам прошлого И. Ньютону и А. Эйнштейну (рис. 1.1) Вселенная представлялась статичной. Дело в том, что «опасаясь» её неминуемого гравитационного схлопывания, И. Ньютон предположил, что галактик бесконечно

много. А. Эйнштейн в своей теории относительности искусственно ввел «космологический член», обеспечивающий отталкивание небесных тел с большими массами. Это было в 1917 г. Но в том же переломном 1917 году американец В. Слайфер опубликовал работу о разбегании космических туманностей, а вслед за ним советский физик А. Фридман в 1924 г. выступил с теорией «разбегающихся» галактик — нестационарной Вселенной. Это было революционным переворотом в физическом представлении о нашем мире.



Рис.1.1. Альберт Эйнштейн (1879–1955). Лауреат Нобелевской премии по физике за 1921 год. На снимке — памятник великому физiku в Вашингтоне,

Прошло еще несколько лет, и американец Эдвин Хаббл обнаружил в 1929 г. явление разбегания галактик. Гипотеза А. Фридмана получила экспериментальное подтверждение по наблюдениям так называемого *красного смещения* в спектре галактик. Оказалось, что скорость разбегания галактик пропорциональна расстоянию до них. Из экспериментального факта разбегания галактик был оценён возраст Вселенной. Он оказался около 15 миллиардов лет! Так началась эпоха современной космологии.

Естественно возникает вопрос: а что было в начале? Всего около 20 лет понадобилось ученым, чтобы вновь полностью перевернуть представления о Вселенной.

Ответ предложил в 40-е годы наш соотечественник — выдающийся физик Георгий Гамов. История нашего мира началась с Большого взрыва (рис. 1.2). Именно так думает большинство астрофизиков и сегодня.

Большой взрыв — это стремительное падение изначально огромной плотности, температуры и давления вещества, сконцентрированного в очень малом

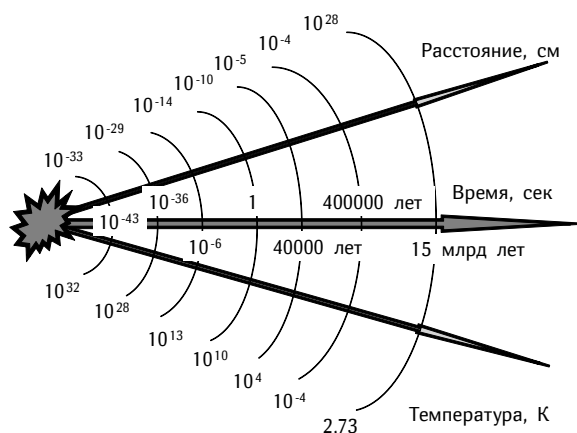
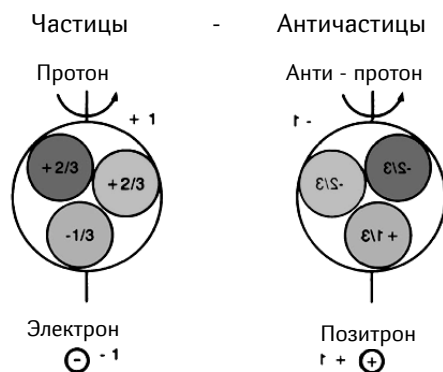


Рис. 1.2. Диаграмма Большого взрыва — сотворения мира. До 10^{-34} с господствовала эпоха Великого объединения всех трёх фундаментальных взаимодействий, закончившаяся слиянием кварков в адроны. Считается, что сразу после Большого взрыва наступила эра доминирования излучения над веществом (радиационная эра) — все частицы были в это время с нулевыми массами, т.е. ничем не отличались от фотонов. Лишь через 40 000 лет вещество начало преобладать над излучением, что привело к образованию атомов. Эра вещества продолжается до наших дней.

объёме Вселенной. В начальный момент Вселенная имела гигантскую плотность и температуру. На первой секунде своего существования мир имел плотность $\sim 10^5$ г/см³ и температуру 10^{10} К. Современная температура в центре Солнца в тысячу раз меньше.

В течение короткого промежутка времени после Большого взрыва – всего 10^{-36} с – крохотная Вселенная была заполнена фундаментальными частицами. Эти частицы, в отличие от нуклидов, протонов и нейтронов – неделимы. Из них и состоят, собственно, протоны и нейтроны – основа ядерной материи. Это – фундаментальные фермионы, взаимодействующие друг с другом посредством единого, на тот период развития Вселенной, фундаментального взаимодействия. Как происходило такое взаимодействие? Через частицы. Они называются фундаментальными бозонами. Их четыре: фотон (гамма-квант), глюон и два бозона – W и Z . А сами фундаментальные фермионы – это шесть видов кварков и шесть видов лептонов.

Рис. 1.3. Частицы (протон и электрон) и их антиподы – антипротон и позитрон. Если электрон и позитрон отличаются друг от друга только электрическим зарядом, то протон и антипротон – разной внутренней структурой – кварками и антикварками. Спин (физическая величина, описывающая вращательное движение) у этих частиц и античастиц одинаков.



Именно эта группа частиц из 12 фермионов, взаимодействующих друг с другом посредством 4-х бозонов, по сути, и есть зародыш Вселенной. Но это ещё неполная картина. Среди кварков и лептонов были их антиподы – античастицы, отличающиеся от обычных частиц знаком некоторых характеристик взаимодействия. В простейшем случае это электрический заряд (см. рис. 1.3).

Например, один из лептонов – электрон может быть как отрицательно заряженным, так и положительно (в этом случае его называют позитроном). Античастицы существуют практически у всех частиц, за исключением фотона (γ) и Z -бозона – для них античастицами являются они сами.

Сверхвысокие начальные температуры Вселенной приводили к столкновениям частиц и их взаимному превращению. Так, из пары фотонов могли образоваться электрон и позитрон, а столкновение последних (процесс взаимодействия частицы и античастицы называется аннигиляцией) привести к рождению вновь пары фотонов:

$$(2\gamma) \rightarrow (e^+, e^-),$$

$$(e^+, e^-) \rightarrow (2\gamma).$$

Возможно и появление новых частиц – нейтрино (ν) и антинейтрино ($\bar{\nu}$):

$$(e^+, e^-) \rightarrow (\nu, \bar{\nu}).$$

А взаимодействие нейтрино со своей античастицей приводило вновь к появлению электрона и позитрона.

Взаимные превращения частиц в условиях сверхвысоких температур напоминали «кипящий суп», в котором число частиц и античастиц было равным. В 1933 г. П. Дирак выдвинул идею о существовании антивещества и антимиров. Означает ли это, что наряду с Вселенной существует и Антивселенная? Сейчас делаются попытки найти хотя бы антивещество. Но об этом в последующих главах книги.

А пока вернёмся к расширяющейся Вселенной первых мгновений её существования.

Современная физика полагает, что частицы — фермионы и бозоны, появившиеся сразу после Большого взрыва, неделимы. «Полагает» — означает, что нет пока никаких сведений об их внутреннем строении. Фермионы и бозоны были безмассовыми вплоть до 10^{-10} сек развития Вселенной и составляли так называемый «кипящий суп» крохотной Вселенной. Они взаимодействовали друг с другом по единому закону Великого объединения.

Начавшись на 10^{-43} с при огромных плотностях (10^{92} г/см³) и температурах (10^{32} К) на 10^{-34} с эпоха Великого объединения рухнула. Характер взаимодействия частиц начал меняться. Охлаждение Вселенной продолжалось в течение 1 микросекунды. За это время частицы, наполняющие крохотную Вселенную, размером не более 10^{-14} см, приобретают массу, их энергия увеличивается, и появляются новые частицы — «настоящие» кварки с массой — кирпичики той материи, из которой и состоит современная Вселенная. Стало возможным слияние кварков в более массивные частицы — адроны и антиадроны.

Но Вселенная продолжала остывать, и это привело к уменьшению числа адронов по сравнению с числом лептонов. Среди лептонов имеются нейтрино. В этот период жизни Вселенной (ей исполнилось примерно 10 с) нейтрино, практически не обладающие массой, оказались на свободе — это реликтовые нейтрино. Ожидается, что они сохранились до сих пор.

Тем временем, *аннигиляция* частиц продолжалась, что вызвало увеличение числа фотонов. Вселенная стала состоять практически из одного излучения — фотонов и нейтрино. Это была радиационная эра в её развитии. Дальнейшее уменьшение температуры за счёт расширения Вселенной и уменьшение энергии излучения привело к тому, что через десятки тысяч лет после Большого взрыва вещество начало преобладать над излучением, и практически перестало с ним взаимодействовать. А через сотни тысяч лет после Большого взрыва Вселенная как будто «забыла» о своём исходном состоянии.

Но нам достались «свидетели» той эпохи — реликтовые нейтрино и реликтовые фотоны. Если вторые уже «пойманы» (о них пойдёт речь ниже), то задача экспериментального обнаружения реликтовых нейтрино чрезвычайно сложна, и её пока не удаётся решить.

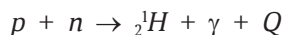
1.2. Сотворение вещества

Когда я был моложе, я думал,
что наука и космология
могут объяснить строение Вселенной.
Сейчас я так не думаю.

Яков Зельдович

Радиационная эра развития Вселенной — чрезвычайно важный период. Именно в это время начали возникать самые легкие ядра — водород, тритий, гелий, литий — основа химических элементов, заполняющих периодическую таблицу Менделеева. Этот процесс носит название нуклеосинтеза. Согласно современным представлениям образование более тяжелых ядер на этом этапе оказывается невозможным. Более тяжелые ядра образовались лишь через миллиарды лет после Большого взрыва в процессе звездной эволюции.

Протон, самое лёгкое ядро, появилось через десятки секунд после рождения Вселенной. В это время температура и плотность Вселенной были достаточно высоки для синтеза дейтерия — стабильного изотопа водорода, состоящего из протона и нейтрона. Эта реакция синтеза сопровождалась генерацией фотонов и выделением энергии:



Здесь $Q = 2,2$ МэВ ($\text{МэВ} = 10^6$ эВ) — энергия, выделяемая в этой реакции синтеза. Затем, в течение очень короткого промежутка времени, произошла цепочка реакций превращения дейтерия ${}^2_1\text{H}$ в тритий ${}^3_1\text{H}$ и, наконец, дейтерий и тритий образовали гелий ${}^4_2\text{He}$ — второй по распространённости элемент во Вселенной. Расчёты показывают, что в этот момент его образовалось приблизительно 24% от всех нуклидов Вселенной. Именно такое среднее содержание гелия мы наблюдаем и в наши дни, в условиях современной Вселенной. Заметим, что цепочка реакций синтеза лёгких ядер происходит с большим выделением энергии. В попытках человека на Земле создать мощнейшие генераторы энергии — термоядерные реакторы и водородные бомбы, именно эти реакции были взяты за основу их создания.

Но вернёмся к модели расширяющейся Вселенной. Когда возникли звёзды? Предполагается, что процесс звездообразования начался 1 млрд лет назад в результате образования неоднородностей в распределении вещества во Вселенной и гравитационного взаимодействия между отдельными его сгустками.

Последние исследования на космических телескопах действительно обнаруживают в далёких областях Вселенной повышенные концентрации вещества — их называют «газовыми» или «молекулярными» облаками. Именно здесь наблюдается повышенное количество звёзд. Безусловно, процесс образования звёзд очень медленный (по человеческим меркам) — сотни тысяч и миллионы лет.

Модели формирования звёзд сводятся к первичному формированию так называемой протозвезды — разогретому до 10^6K сгустку вещества, состоящему из ионов и свободных электронов. Вещество протозвезды сжимается, темпера-

тура растёт. Происходит осаждения вещества из окружающего пространства – аккреция, и внутри протозвезды начинаются реакции термоядерного синтеза.

Эти реакции развиваются, когда масса протозвезды достигает 0,1 массы Солнца. Этот период жизни звезды характеризуется «выгоранием» в термоядерном котле лёгких элементов и образованием тяжёлых. В этом плане процесс формирования звёзд – важный этап процесса образования элементов во Вселенной.

При температуре протозвезды $\sim 10^6\text{K}$ происходят реакции горения дейтерия ${}_2^1\text{H}$ с образованием трития ${}_1^3\text{H}$. Образование трития приводит к увеличению размера протозвезды. Температура её начинает расти из-за гравитационного сжатия и возникают условия для последовательного синтеза более тяжёлых элементов, вплоть до кремния и железа. Водород в этой топке горит дольше всех других элементов. Звезда расходует энергию в течение этой фазы, но она не тускнеет, а сжимается, т.к. энергии горения не хватает на преодоление гравитационного сжатия.

Затем во внешней оболочке звезды гелий переходит в углерод, кислород и азот. Этот период времени занимает несколько миллионов лет, постепенно сокращаясь по мере выгорания лёгких элементов. Не более 1% общей массы звезды превращается в энергию

Число фаз горения зависит от первоначальной массы звезды. Если она больше 8 масс Солнца, то произойдут все фазы горения вплоть до железа. Синтез новых элементов в термоядерном котле может закончиться на железе – если оно не вступит в дальнейшие превращения.

Термоядерный синтез и горение звезды продолжают миллиарды лет, пока у неё не выгорит основная масса водорода. После этого происходит сильное разбухание наружной оболочки звезды, и она переходит в состояние красного гиганта, спектр излучения которого смещен в сторону длинных волн (в связи с охлаждением оболочки). В этом состоянии преимущественно выгорают более тяжёлые элементы. С течением времени красный гигант теряет устойчивость, оболочка сбрасывается и уплотняется внутренняя часть. Возникает планетарная туманность с рассеянной диффузной оболочкой большого радиуса и плотным ядром в центре (рис. 1.4).

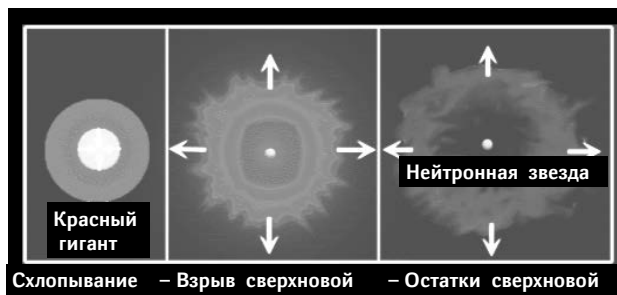


Рис. 1.4. Превращение красного гиганта в нейтронную звезду.

1.3. Гибель звезд

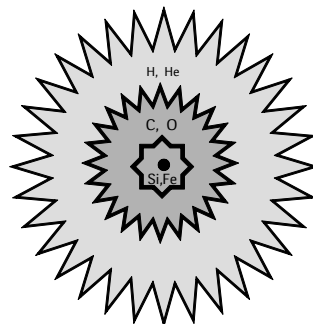
Только пепел знает, что значит сгореть дотла...

Иосиф Бродский

Ну а далее может произойти, пожалуй, одно из наиболее интересных и величественных событий во Вселенной. По мере истощения термоядерных циклов в звезде начинают преобладать гравитационные силы, которые заставляют звезду сжиматься — коллапсировать. Процесс вновь сопровождается повышением температуры. Становится возможным развал ядер железа в центральной части звезды на нейтроны, протоны и более тяжёлые ядра гелия (альфа-частицы).

Кроме того, происходит превращение пары (p , e^-) в (ν , $\bar{\nu}$). Нейтрино слабо взаимодействует с веществом и покидает разваливающуюся звезду. Потоки нейтрино уносят львиную долю энергии сгорающей звезды. Выход нейтринного потока сокращает время жизни звезды — циклы горения элементов сокращаются. Создается своеобразный нейтринный импульс — свидетельство взрыва звезды. В результате образуется своеобразная «лукообразная» структура звезды с очень малым по размеру железным ядром и внешней оболочкой из более лёгких элементов (рис. 1.5).

Рис. 1.5. Многослойная структура «горящей» звезды — ядра красного гиганта и превращение её в нейтронную. Горение начинается с лёгких элементов и заканчивается на кремнии, сере и железе. Формируется «железная» звезда, которая взрывается вследствие гравитационного коллапса. Это момент вспышки сверхновой. Более 90% первоначальной массы звезды уносится в пространство. От первоначального красного гиганта остаётся нейтронная звезда.



Затем может произойти собственно коллапс. Он происходит, если масса железного ядра превышает некоторый предел. Начиная с этого момента, звезда коллапсирует и превращается в нейтронную звезду или пульсар с гигантской плотностью вещества. На разных стадиях температура и время горения вещества различаются (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1. Времена горения звезды и испускания частиц.

Элемент	Температура 10^9K	Время горения	Испускаемые частицы
Водород	0,02	7×10^6 лет	Фотоны, нейтрино
Углерод	0,8	600 лет	Нейтрино
Кремний	3,5	1 сутки	Нейтрино

Требуется всего несколько секунд, чтобы звезда перешла в совершенно новое состояние, новый объект. Процесс может пойти дальше — к образованию *чёрной дыры*. Коллапс связан с высвобождением энергии, передающейся наружу, к внешним оболочкам, и сопровождающейся резким повышением температуры до миллиардов градусов. Это и есть взрыв сверхновой — для наблюдателя яркая вспышка звезды на небосклоне.

Взрывная, или ударная волна, распространяющаяся от остатков сверхновой, летит через звёздное пространство, создавая локальные неоднородности в распределении плотности вещества — местами разряжения, а местами уплотнения вещества. Вещество, которое образуется при взрыве самой сверхновой, рассеивается в объёме гигантского пространства галактик и перемешивается с более ранними остатками от взрывов других сверхновых с тем, чтобы вновь, в результате длительной эволюции, превратиться в звёзды, часть которых вновь должна взорваться. Затем могут образоваться новые звёзды, и процесс начнётся сначала.

Есть ещё один вариант последовательности событий. Красный гигант, испытывая периодические осцилляции из-за потери вещества, может не перейти на стадию взрыва сверхновой, а превратиться в белого карлика — стационарную, постепенно остывающую звезду. Это может произойти, если по мере прекращения термоядерных реакций на стадии красного гиганта, масса звезды станет меньше массы Солнца. Напротив, если же масса звезды достигнет нескольких масс Солнца, то процесс пойдёт по сценарию взрыва сверхновой.

На рис. 1.6 показана диаграмма эволюции типичной звезды, иллюстрирующая сказанное выше. Вот такой «взрывообразный» круговорот происходит с нашей Вселенной... Трудно представить, но всё, что есть на Земле — и живая природа, и неживая — исходно состояло, по сути, из «пыли», остатков вещества взрывающихся звёзд.

Взрыв сверхновой — это поистине замечательное событие, не сравнимое по своей энергетике ни с одним достоверно наблюдаемым и «поддающимся»



Рис. 1.6. Циклический процесс эволюции звёзд. Вслед за начальным сжатием оболочки звезды происходит её расширение — образование красного гиганта, в котором последовательно сгорают лёгкие элементы и превращая её в массивную «многослойную» звезду с железным ядром, которая может взорваться как сверхновая или превратиться в белого карлика. Сверхновая превращается в нейтронную звезду или пополняет веществом межзвёздное пространство. Космические лучи — часть этого вещества.

физическим оценкам процессом в окружающем нас мире. Достаточно сказать, что взрыв сверхновой сопровождается выделением энергии, оцениваемой в 10^{52} – 10^{54} эрг. Это пока рекордное энерговыделение астрофизических объектов, реально наблюдаемых и достаточно хорошо изученных.

А наше Солнце, ближайшая к нам звезда?

Нашей звезде – Солнцу тоже грозит такая же участь – превратиться в пепел? Ведь даже в Библии (Книга пророка Исаии, 60:19) сказано:

«Не будет уже Солнце служить тебе светом дневным, и сияние Луны – светить тебе».

Превращение нашего Солнца в красный гигант (см. рис. 1.6) неминуемо. Однако пройдет очень много времени, прежде чем это случится. Время горения внешних оболочек звезды (когда выгорают лёгкие элементы)

на многие порядки превышает время выгорания более тяжёлых. Сейчас на Солнце сгорает водород, и пройдет очень много времени, прежде чем температура в центре нашей звезды достигнет величины, при которой станет возможным горение более тяжёлых элементов. Оценки показывают, что гравитационного коллапса Солнца следует ожидать не ранее, чем через 5 млрд лет. Мы ещё вернёмся к проблеме сверхновых в последующих разделах книги, т.к. именно они ответственны за многие физические явления во Вселенной, оказывающие влияние, в том числе и на жизнь на нашей планете.

Таким образом, сразу после Большого взрыва, а затем в процессе формирования звёзд и при взрывах сверхновых, во Вселенной происходит превращение вещества – формирование его ядерного состава. Можно отметить, что именно модель Большого взрыва, краткий набросок которой был дан выше, способна описать эволюцию элементов во Вселенной и количественно продемонстрировать их распространённость на сегодняшний день.

Наиболее распространённым элементом во Вселенной, как это уже было сказано, является водород. На втором месте находится гелий – его не более 25% от количества водорода. Многие данные о содержании гелия в различных астрофизических объектах Вселенной свидетельствуют в пользу модели его происхождения в первые минуты после Большого взрыва.

Вслед за гелием в периодической системе элементов находятся более тяжёлые элементы: литий (Li), бериллий (Be) и бор (B). Эти элементы, в отличие от водорода и гелия, должны скорее разрушаться, чем образовываться, при первоначальных гигантских температурах Вселенной. И действительно, по сравнению с водородом и гелием, их чрезвычайно мало в межзвёздном пространстве и в составе звёзд. Ещё более тяжёлые ядра – вплоть до железа (Fe) – образуются в результате слияния (реакций синтеза) в недрах горящих звёзд. Их относительная распространённость диктуется законами ядерных реакций, приводящих к их формированию, и свойствами самих атомных ядер. Синтез элементов тяжелее железа также происходит в результате ядерных реакций, но отличающихся от реакций характерных для более лёгких элементов. Отсюда видно, что изучение распространённости элементов во Вселенной – один из путей изучения тех физических процессов, которые происходят на разных стадиях её развития.

1.4. Наш мир – темный и светлый или жизнь в вакууме

Даже то пространство, где негде есть,
как звезда в эфире, приходит в ветхость.

Иосиф Бродский

Прошло около 14 миллиардов лет после Большого взрыва, и мы наблюдаем современную Вселенную. Из чего она состоит? Вселенная содержит не менее 10^{11} галактик и её размер $\sim 10^{23}$ км. Средняя плотность вещества и энергии во Вселенной определяется в первую очередь из радиоастрономических наблюдений и с довольно хорошей точностью: $\sim 10^{-29}$ г/см³. Сравните это с первоначальной плотностью Вселенной после Большого Взрыва – 10^{54} г/см³!

Рассмотрим вкратце структуру ближайшей к нам области Вселенной – Галактики (с большой буквы!) – среду нашего обитания.

Наша Галактика – Млечный Путь – принадлежит к так называемым галактикам спирального типа (S – галактики), представляющим собой вращающийся диск из водородного газа, пыли и звёзд, с ярко выраженными спиральными рукавами (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Галактика – скопление звёзд, в основном, в спиральных рукавах. В одном из них находится наша Солнечная система.

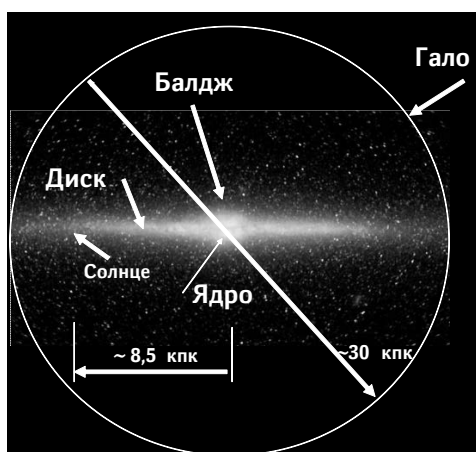


Рис. 1.8. Структура нашей Галактики – Млечного Пути с её характерными размерами.

Это сложный астрономический объект, состоящий из ядра, утолщения в центральной части, – балджа (от английского слова «bulge» – «вздутие»), гало и, собственно, самого диска (рис. 1.8). В плотном ядре в центре диска, в балдже, находятся, в основном, старые звёзды и в нём нет газа и пыли. В центре нашей Галактики находится чёрная дыра. Орбитальная рентгеновская обсерватория «Chandra» зафиксировала мощную рентгеновскую вспышку в центре Галактики, что позволило определить размер чёрной дыры – не более расстояния от Земли до Солнца.

На волне моей памяти

Я вспоминаю год 1964, когда я, будучи студентом 2 курса физфака, слушал выступление на факультетском семинаре академика Анатолия Алексеевича Логунова, посвященном изложению его точки зрения на специальную теорию относительности А. Эйнштейна. В своей лекции он затронул вопросы гравитации и, в частности, проблему существования черных дыр во Вселенной. Точка зрения Анатолия Алексеевича, развившаяся в его интерпретации гравитации, не допускала существования черных дыр. Для нас, студентов младших курсов, такой вывод не представлял что-нибудь удивительного, принимая во внимание авторитет этого выдающегося ученого, а также тот факт, вернее отсутствие в то время достаточного количества экспериментальных фактов существования этих удивительных астрофизических объектов. Однако на этом семинаре присутствовал другой выдающийся физик — академик Яков Борисович Зельдович, который сразу же по окончании выступления А.А. Логунова встал и сказал: «Толя, мне очень понравился твой доклад, но в отношении черных дыр ты не прав, — они существуют!». Насколько я знаю, свое неверие в существование черных дыр Анатолий Алексеевич сохранил до конца своей жизни.

Сегодня мы живем в эпоху, когда существование черных дыр не только не подвергается сомнению, но и является «центром притяжения» научных изысканий огромного количества научных групп во всем мире.

Теперь мне кажется, что в том, что ученые придерживаются различных точек зрения, нет ничего плохого и удивительного. Напротив, именно существование различных точек зрения на одну и ту же проблему — залог прогресса науки. Гораздо хуже, когда авторитет личности «давит» на окружающих, не позволяя произрастать новым идеям. Наука не может существовать и развиваться без права на ошибку. К сожалению, такая парадигма прогресса науки устраивает далеко не всех. Но, что поделать, такова сущность людей — мыслящих существ, разброс мировоззрений которых достаточно широк и не может быть описан однозначным решением уравнения, которое называется жизнь.

Диск Галактики заполнен газом, пылью и, в основном, молодыми звёздами. Поперечник диска имеет размер ~ 30000 парсек (пк), балджа ~ 4000 пак. В спиральных рукавах диска сосредоточены почти все звёзды и большая часть газово-пылевой материи.

Диск окружен сферическим гало. Его размер на порядок превышает поперечный размер диска. В гало находятся редкие звёзды и скопления звёзд — кластеры, насчитывающие многие сотни тысяч звёзд. Кроме этого, в гало есть тёмная материя («dark matter»), которая была идентифицирована по гравитационным эффектам. Тёмная материя составляет основную массу Галактики, образуя гало в ней.

Солнце находится в спирали Ориона на расстоянии ~ 8500 пк от центра Галактики. Солнце — относительно молодая звезда — ему 5 млрд лет. Млечный путь, по крайней мере, вдвое старше, чем Солнце, возраст звёздных кластеров может насчитывать 10 млрд лет.

Общее число звёзд в диске Галактики — 10^{11} (сто миллиардов). Помимо звёзд Галактика включает и межзвёздную среду. Основным компонентом межзвёздной среды является межзвёздный газ, состоящий в основном из водорода ($\sim 90\%$) и межзвёздной пыли ($\sim 1\%$). В составе межзвёздной среды магнитные поля, электромагнитные излучения. Галактика вращается неоднородно: на периферии скорость её вращения меньше, чем в центральных областях. Период обращения нашей Солнечной системы вокруг центра Галактики составляет приблизительно 200 млн лет. Запомним эту цифру. Мы к ней ещё вернемся во второй части этой книги.

Средняя плотность вещества в диске $\sim 10^{-24}$ г/см³ (грубо — 1 атом водорода на см³). Существуют большие отклонения от этой величины — плотные облака, протяжённостью до десятков парсек с плотностями от 100 до 1000 атомов/см³.

Вещество, находящееся в Галактике в атомарном состоянии, под действием ультрафиолетового излучения звёзд ионизируется (нейтральные атомы «теряют» свои электронные оболочки). Так, например, до 90% водорода составляют его ионы — протоны.

Масса ярких звёзд, межзвёздной пыли и газа, молекулярных облаков, планет сосредоточена почти целиком в протонах и нейтронах (85% приходится на протоны, а 15% — на нейтроны). Нейтроны, будучи нестабильными частицами, существуют только внутри ядер. Всё это составляет так называемую барионную материю.

Обратимся теперь к вопросу о количественных соотношениях между различными формами материи в современной Вселенной. Рис. 1.9 иллюстрирует ответ на эту проблему, конечно, на уровне наших знаний на сегодня. Из диаграммы, приведённой на этом рисунке, видно, что лишь около 4% состава Вселенной относится к тому, из чего, как мы полагаем, образован наш мир. Это барионная материя. Всё остальное, а это практически 96% — тёмная материя и тёмная энергия — пока малопонятные для нас материальные субстанции Вселенной. Мы знаем, что они определённо существуют. Но мы не знаем, что это такое. Мы только строим гипотезы и пытаемся осуществить эксперименты, в надежде доказать их справедливость.



Но факт остаётся — у нас пока нет аргументов в пользу окончательного выбора гипотезы, объясняющей состав тёмного вещества и тёмной энергии во Вселенной.

Рис. 1.9. Структура материи во Вселенной. Барионной материи не более 4%. Остальное, по данным измерений спутника WMAP, — «тёмная материя» и «тёмная энергия», природа которых неизвестна.

Тёмная энергия, согласно современным воззрениям, — это как раз та сила, которая заставляет Вселенную расширяться. Если привычная для нас гравитация заставляет тела притягиваться друг к другу, то тёмная энергия — скорее антигравитация, способствующая разлёту тел во Вселенной. По-видимому, сразу после Большого взрыва расширение Вселенной происходило с замедлением, но после этого «тёмная энергия» преодолела гравитацию, и вновь началось ускорение — расширение Вселенной. Это не гипотеза, а экспериментальный факт, обнаруженный из измерения красного смещения и уменьшения яркости далёких сверхновых звёзд: они тусклее, чем им следовало бы быть из картины замедления расширения Вселенной. Эффект «красного смещения» — регистрируемое наблюдателем увеличение длины волны в спектре наблюдаемого источника — один из замечательных экспериментальных астрономических результатов. Космологическое «красное смещение» наблюдаемых галактик было предсказано А. Эйнштейном и по сей день является одним из доказательств расширения Вселенной.

Окунаясь в эпоху ранней космологии, можно вспомнить, что именно великий А. Эйнштейн, стараясь сохранить статичность Вселенной, ввёл, ставшую исторической, космологическую константу Λ , уравнивающую силы притяжения небесных тел. Но вслед за открытием «красного смещения» он вычеркнул константу Λ из своих уравнений. Видимо А. Эйнштейн был неправ, отказавшись от неё: ведь Λ — это и есть та тёмная энергия, которая интригует современных астрофизиков.

Не ясно, повезло или нет человечеству, но оно живёт в период развития Вселенной, когда тёмная энергия преобладает, способствуя расширению. Но этот процесс, вероятно, не вечен и через временной отрезок, сопоставимый с возрастом Вселенной (10–20 млрд лет) история может повернуть вспять — наш мир начнёт сжиматься. Наступит или нет момент «Большого схлопывания» — альтернативы Большого взрыва, безусловно, большой вопрос современной космологии. Есть ли на это основания? Вопрос не простой. Тем не менее, ряд ученых полагают, что это так. И среди них А. Линде. Согласно его гипотезе «схлопывание» нашей Вселенной уже возникло где-то в середине времени существования Вселенной.

Но не так давно, в 90-х годах прошлого века, исследователи обратили внимание на то, что скорость «убегания» особого класса звезд, так называемых «сверхновых» выше расчетных. Получается, что галактики все-таки разбегаются? Не случится ли такого, что наша Галактика — Млечный путь улетит так далеко от других галактик, что потеряется в далеком океане вечной темноты?

Учёные сумели доказать существование расширяющейся Вселенной — это красное смещение оптического излучения Галактики и реликтовое излучение, о котором пойдёт речь ниже.

Модель «разбегания Вселенной» — ____космической инфляции очень привлекательна, но, вновь заметим, не все так думают. И некоторые ученые полагают, что она не столь важна для космологической модели мироздания. Возможно, учёным удастся в будущем обнаружить и «предвестников» надвигающегося

сжатия Вселенной. Одним из основных препятствий к признанию инфляционной модели долгое время было отсутствие прямых экспериментальных доказательств существования *гравитационных волн*, предсказываемых ею.

Гравитационные волны были предсказаны еще А.Эйнштейном в далеком 1916 году, когда он развивал свою *общую теорию относительности*. Согласно Эйнштейну распространение гравитационных волн, это, по сути, — рябь пространства, распространяющаяся со скоростью света. Ожидаемая амплитуда гравитационных волн должна быть чрезвычайно мала. Но они могут быть зарегистрированы, если источником таких волн становится слияние сверхмассивных объектов, например, расположенных относительно недалеко друг от друга звезд (рис. 1.10), а также созданы сверхчувствительные установки для регистрации гравитационных волн. Удивительно, но принцип действия такого детектора чрезвычайно прост: можно измерить колебания большой металлической болванки, с которой взаимодействует гравитационная волна, сжимая и расширяя её. Не напоминает ли это вам звон колокола?

Первое косвенное указание на существование гравитационных волн было получено в 1974 году благодаря наблюдению за тесной системой двух нейтронных звёзд. За это открытие Р.Халс и Д.Тейлор получили в 1993 году Нобелевскую премию по физике. Но, тем не менее, ввиду очень слабого «полезного сигнала» на фоне посторонних шумов, необходимо было создать установку, чувствительную к таким слабым сигналам. Принцип работы такой установки, состоящий в ис-

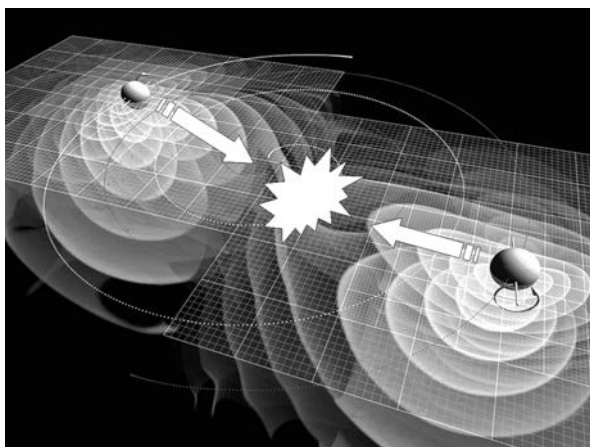


Рис. 1.10. Слияние двух астрономических объектов («двойная система»), приводящее к генерации гравитационных волн.

пользовании хорошо известного интерферометра Майкельсона, был предложен советскими физиками М.Е.Герценштейном и В.И.Пустовойтом в 1962 г.

Именно этот принцип использовали американские физики К.Торн, Б.Бариш и Р.Вайсс при создании лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Идея использования интерферометра сводится, прежде всего, к эффективному выделению слабого полезного сигнала гравитационных волн на фоне шумов.

И вот, наконец, в феврале 2016 года, после многолетних ожиданий физиков всего мира коллаборация LIGO объявляет о первой достоверной регистрации гравитационных волн от слияния двойной системы — двух чёрных дыр с массами 36 и 29 солнечных масс на громадном расстоянии около от Земли: 1,3 млрд световых лет. Нобелевская премия 2017 г.

Другой экспериментальный факт — отклонение света от далёких галактик в гравитационных полях Вселенной привёл астрофизиков к выводу о существовании скрытой тёмной материи где-то вблизи нас. Именно тёмная материя изменяет траектории световых лучей на большую величину, чем этого следовало ожидать в присутствии лишь видимых близлежащих галактик. Учёные изучили распределение на звёздном небе более 50 000 галактик в попытке построить пространственную модель структуры тёмной материи. Все полученные результаты неумолимо свидетельствуют в пользу её существования, причём Вселенная — это в основном и есть тёмная материя. Современные оценки говорят о том, что её около 23%.

Здесь мы вновь повторим: нам не известно, из каких частиц состоит тёмная материя. Скорее всего, это элементарные частицы с ненулевой массой, которые подчиняются законам гравитации и практически не взаимодействуют с другими частицами. Возможно, у них есть «антиподы» — античастицы, но они не могут с ними аннигилировать в силу «слабости» такого взаимодействия.

Во многих научных лабораториях мира сегодня ставятся различные эксперименты по поиску самой тёмной материи или её «следов» — других, вторичных частиц, возникающих в результате их пусть и неэффективного, но взаимодействия, с обычным веществом. Сегодня, однако, мы не можем констатировать, что эти эксперименты успешны.

Мы ещё вернёмся к этой проблеме в последующей главе книги, а пока обратимся вновь к привычной для нас форме вещества, состоящей из барионов (протонов и нейтронов) и электронов — «барионной материи». О ней мы знаем гораздо больше. Более чем за столетний период развития физики — от открытия элементарных частиц и строения атома до результатов исследований в этой области, а также и в астрофизике, наука получила в своё распоряжение множество новых результатов о строении привычного нам вещества.

1.5. «Большой взрыв» на Земле

Время больше пространства.
Пространство — вещь.

Иосиф Бродский

Реалистична ли эта картина первых мгновений жизни Вселенной? Что могут представить физики в качестве доказательств? Здесь надо отвлечься от эпохи Большого взрыва и вспомнить другую эпоху — середину прошлого века.

Конец Второй мировой войны ознаменовался другим взрывом — атомной бомбы, который вызвал в научном сообществе тоже своего рода «Большой взрыв» интереса к проблемам строения вещества. Не затрагивая военного значения этого исторического момента, можно сказать: для физики это явилось началом активного развития мощного научного направления — физики частиц. Весь послевоенный период развития физики — это бурный натиск на изучение структуры вещества. И немалую роль здесь сыграли атомные проекты СССР и США. Именно благодаря им ядерная физика, а затем и физика частиц полу-

чили мощный импульс своего развития. Физика частиц, или физика высоких энергий, изучает природу вблизи нулевой границы пространственно-временной шкалы, приближаясь к эпохе Большого взрыва и, как это ни парадоксально, теснейшим образом связана с космологией и астрофизикой – науками, изучающими природу у верхних границ этой шкалы.

Такая взаимосвязь объясняется тем, что многие важнейшие объекты во Вселенной (пульсары, чёрные дыры) и Вселенная в целом на ранних стадиях эволюции – это объекты *квантовой физики*. Основные параметры и времена эволюции таких объектов тесно связаны с характеристиками *фундаментальных частиц* и их взаимодействий. Чем полнее мы знаем свойства частиц, тем точнее можем просчитать свойства объектов космических масштабов.

Квантовая физика очень точная наука. Она основана на *соотношении неопределённости* и вычислениях вероятности событий, но для большого числа частиц (больших масс вещества) измеряемые величины вычисляются намного точнее, чем в классической физике.

Чтобы проникнуть в глубину материи и изучить её внутреннее строение, нужно создать большие концентрации энергии. Чем меньше объект изучения, тем больше требуется энергии, чтобы изучить его характеристики. Это следует из квантовой механики, согласно которой все частицы микромира имеют, подобно фотонам, *корпускулярно-волновую природу* и описываются *соотношениями де Бройля*. Для релятивистских протонов и антипротонов, которые используются для «просвечивания» ядер и других субатомных частиц в современных экспериментах, длина волны де Бройля

$$\lambda = hc/E,$$

где E – энергия частицы, h – постоянная Планка и c – скорость света.

Кварки и лептоны имеют размер менее 10^{-16} см. Согласно М.Планку, основоположнику квантовой физики, для «внедрения» в такие размеры необходимы гигантские энергии, которые, в свою очередь, требуют создания циклопических по размерам установок на Земле.

Это ускорители, которые разгоняют частицы до необходимых энергий. Они стали основным инструментом исследования внутренней структуры ядра и частиц, и их фундаментальных взаимодействий. Именно с развития атомных проектов в двух крупнейших странах мира и началось строительство гигантских ускорителей для изучения структуры материи.

Наиболее мощный на сегодня ускоритель Большой Адронный Коллайдер (LHC – Large Hadron Collider) в Европейском центре космических исследований (CERN), в Швейцарии (рис. 1.11). Он способен достичь максимальной суммарной энергией столкновения протонов в 14 ТэВ ($14 \cdot 10^{12}$ эВ). Длина кольца ускорителя – 27 км, так что площадка БАК сопоставима с размером Москвы. Энергии, достижимой на таком современном ускорителе, как БАК, будет достаточно, чтобы изучать частицы с размерами, характерными для фермионов и бозонов, – 10^{-16} см и менее. Физика микромира это физика высоких энергий.

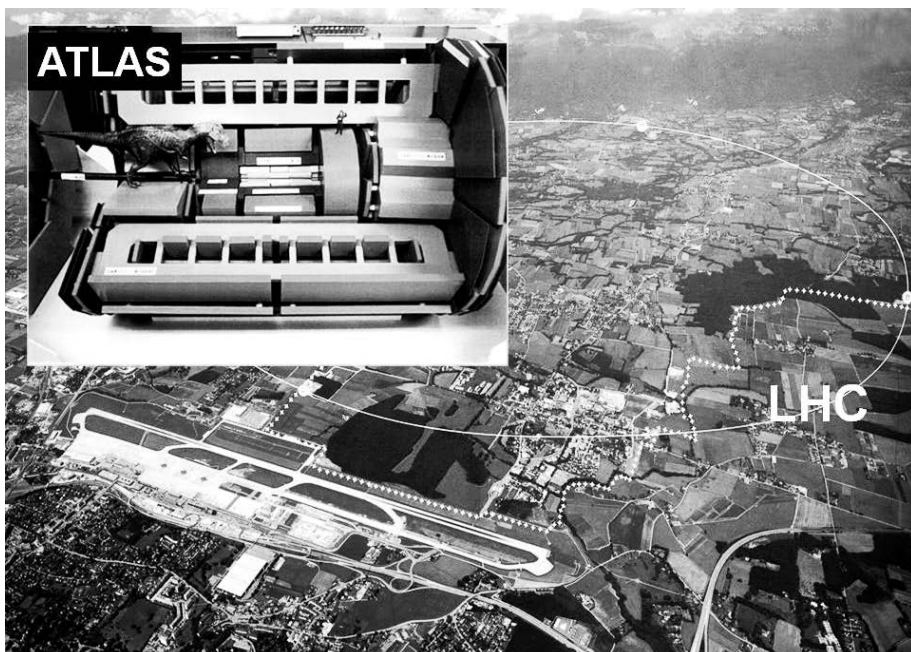


Рис. 1.11. Большой адронный коллайдер (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (CERN) в Женеве. Длина его подземного туннеля – 27 км. Слева внизу показан Женевский аэропорт. Вверху слева показан один из детекторов – ATLAS. На фоне человека и динозавра читатель легче может представить его гигантские размеры.

Наиболее выдающийся научный результат, полученный на этом уникальном ускорителе со дня его запуска, это, конечно, открытие бозона Хиггса. Эта фундаментальная частица, предсказанная еще в 1964 г. британским ученым Питером Хиггсом, была обнаружена в 2012 г. одновременно на двух экспериментальных установках БАКа. Значение этого результата невозможно переоценить: именно эта частица, именуемая часто «частицей Бога», ответственна за *инертную массу* таких элементарных частиц, как бозоны. С помощью поля Хиггса объясняется наличие инертной массы частиц-переносчиков одного из основных механизмов взаимодействия элементарных частиц – *слабого взаимодействия* бозонов и отсутствие массы у частиц-переносчиков *сильного и электромагнитного*



основных механизмов взаимодействия элементарных частиц – *слабого взаимодействия* бозонов и отсутствие массы у частиц-переносчиков *сильного и электромагнитного*

Рис.1.12. Питер Хиггс (слева) и Франсуа Энглер, удостоенные Нобелевской премии 2013 г. за предсказанный ими квант-поля – элементарную частицу, названную бозоном Хиггса. Бозон Хиггса открыт в экспериментах на Большом адронном коллайдере в 2012 г.

ного взаимодействия. Этот результат был по достоинству оценен Нобелевским комитетом: в 2013 г. П. Хиггсу и Ф. Энглеру (рис. 1.12) за открытие бозона Хиггса была вручена Нобелевская премия.

На волне моей памяти...

Я несколько раз был в ЦЕРНе. Не будучи непосредственно связанным по роду своих занятий с ускорительной физикой частиц, я всякий раз удивлялся и восхищался не столько той могущественной установкой, созданной трудом человека, но, скорее тем духом и атмосферой сплочённого многотысячного интернационального коллектива ученых, поставивших перед собой единую цель познания микромира. Это действительно удивительно, порой даже не вполне понятно специалистам, работающих в одиночестве, или в составе малых научных коллективов, как можно организовать такую работу? Безусловно, это «новация» XX века, получившая развитие и в XXI-ом: создание огромных международных коллабораций для решения конкретных актуальных научных проблем. Работа таких коллабораций напоминает муравейник или рой пчел: на фоне кажущегося хаоса движений и действий появляется конкретный результат работы (а для нашего случая — физики, — творчества). Вот и возникает вопрос, что здесь превалирует: «организация сверху» или «самоорганизация коллектива». Наверное, и то, и другое. Это взаимодополняющие, комплементарные явления в условиях правильно работающего коллектива.

Результат работы замечательного коллектива ЦЕРН не дал себя долго ждать: объявленная заранее основная научная цель БАКа — поиск и идентификация бозона Хиггса, была достигнута в кратчайшие сроки.

Что касается самой установки — БАКа, то здесь можно только восхищаться плодом многолетнего труда людей из многих стран мира, объединивших свои финансовые и научные возможности для создания поистине циклопической установки, аналогов которой человек никогда не создавал.

Конечно, в плане достижения больших энергий частиц возможности наземной физики высоких энергий не безграничны. Вряд ли в ближайшем будущем в ускорительных экспериментах достижимы значительно более высокие энергии, чем те, которые предполагается получить на БАКе.

Возникает вопрос: а существуют ли в природе частицы с энергиями, превышающими «ускорительные»? Ответ утвердительный — да. Сама природа нам предоставила возможность иметь дело с частицами поистине фантастических энергий. Оказалось, что во Вселенной существуют природные ускорители, разгоняющие частицы до энергий в десятки тысяч, а возможно, в миллионы раз превышающие возможности современных наземных установок.

Эти частицы — **космические лучи**. О них и пойдёт речь далее.

Глава 2. Земная и неземная радиация, или открытие космических лучей

В космосе ничего не пропадает.

Станислав Лем

2.1. Радиоактивность Земли

Еще в далеком 1785 году французский физик Шарль Огюстен де Кулон доложил Парижской академии наук о явлении спонтанного разряда электрически заряженных тел в воздухе. А в 1835 г. Майкл Фарадей и в 1879 г. Вильям Крук заметили, что этот эффект зависит от давления газа и высказали предположение, что причина тому ионизация воздуха – превращение атомов и молекул воздуха в заряженные ионы. Именно этот эффект – ионизация атмосферного воздуха и привел к открытию в начале XX века нового природного феномена, который сейчас называется космические лучи.

В 1896 г. французский физик Анри Беккерель обнаружил, что некоторые химические элементы нестабильны – они могут превращаться в другие элементы. Такое превращение сопровождается испусканием частиц. А. Беккерель обнаружил радиоактивное излучение случайно. Он исследовал люминесценцию солей урана: положив это вещество рядом с фотопластинками, он через некоторое время неожиданно для себя обнаружил их засвеченными.

Неизвестное ему излучение оставило следы в фотопластинках! (мы к этому методу детектирования еще вернемся, он широко использовался в XX веке для регистрации космических лучей).

К 1900 году А. Беккерель понял, что причина засветки его фотопластинок не люминесцентное свечение и не уже известные рентгеновские лучи. Интересным фактом явилось то, что интенсивность обнаруженного им излучения была постоянной во времени. А. Беккерель стал первым, кто на себе испытал пагубность его воздействия: после долгого присутствия радиоактивных пластинок в своем кармане он обнаружил на своем теле болезненные раны. И он стал первым, кто предложил защиту от этого излучения – свинцовый футляр радиоактивных пластинок. Можно считать, что А. Беккерель стал родоначальником не только радиационной биологии, которая в XX веке начала бурно развиваться в связи с осуществлением атомных проектов в СССР и США, но и космической.

Но радиоактивным это излучение предложила назвать Мария Кюри. В 1903 году Антуану Беккерелю, Пьеру и Марии Кюри за открытие радиоактивности была присуждена Нобелевская премия по физике «В знак признания выдающихся заслуг, выразившихся в открытии самопроизвольной радиоактивности».

Но не только фотопластинки могли «визуализировать» невидимое человеческому глазу радиоактивное излучение. Существовал и другой прибор, сейчас известный многим из школьных опытов в физическом кабинете, – электроскоп, который позволял определить присутствие электрически заряженных

частиц, находящихся вблизи него. Прибор разряжался в присутствии веществ, излучавших частицы при радиоактивном распаде. По скорости разряда электроскопа определяли уровень мощности радиации. Стало ясно, что на степень ионизации воздуха оказывает влияние присутствие радиоактивных веществ. Эксперименты по изучению радиоактивности с помощью электроскопов вблизи поверхности земли, проводившиеся в начале прошлого века, убедительно показывали, что излучение идет в направлении от нее. Естественно, был сделан вывод, что это связано с радиоактивными элементами, находящимися в недрах нашей планеты.

Но оказалось, что не только радиоактивные элементы в недрах нашей планеты являются источниками излучений.

2.2. Неземная радиация: трудный путь познания

Первые свидетельства возможности существования «неземного» излучения были получены английским физиком Чарльзом Вильсоном (рис. 2.1) в 1900 г. и независимо его друзьями из Германии Юлиусом Элстером и Хансом Гайтлером. Возникающий под действием электрического поля остаточный ток в электроскопе, обнаруженный ими, мог быть объяснён ионизацией газа от гамма-излучения, связанного с естественной радиоактивностью почвы и присутствием в воздухе эманации радия — радиоактивного элемента.

Однако существование этого тока в условиях сильной экранировки его электроскопа несколькими сантиметрами металла подвигло Ч. Вильсона высказать предположение о внеземной природе излучения, ответственного за ионизацию газа и, как следствие, генерацию остаточного тока. Ч. Вильсон полагал, что источником этого излучения могут быть частицы высокой энергии, возникающие в верхних слоях атмосферы за счёт ускорения электронов в электрическом поле грозowych облаков. Однако в попытках подтвердить неземное происхождение обнаруженного им явления Ч. Вильсон потерпел неудачу. Его эксперименты по изучению радиоактивного излучения под землей, в скальном туннеле, не дали ожидаемого уменьшения интенсивности излучения.

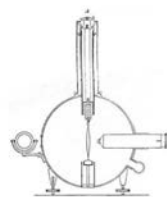
Удивительно, но эта физическая модель генерации частиц высокой энергии была забыта на многие годы. О ней вспомнили только в конце XX века в связи с обнаружением в верхних слоях атмосферы так называемых «земных гамма-всплесков». Мы вернемся к этому интереснейшему физическому явлению в Главе 16.

Среди первых исследователей, начавших изучение «неземного» излучения, был иезуитский священник Теодор Вульф (рис. 2.2). Будучи священником, он служил в Голландии и потом в Риме. Именно он, совмещая богоугодную деятельность с научной, в 1910 г. изучал ионизацию атмосферы



Рис. 2.1. Чарльз Томсон Риз Вильсон — шотландский физик, лауреат Нобелевской премии за 1927 год.

Рис. 2.3. Иезуитский священник Теодор Вульф, изучая ионизацию атмосферы, обнаружил избыточный ее уровень на высоте Эйфелевой башни.



и для этого с помощью усовершенствованного им электроскопа забирался на высоту 320-метровой Эйфелевой башни, где и проводил свои измерения. Вопреки его ожиданиям, оказалось, что она оставалась значительной – всего лишь вдвое меньше величины на уровне земли. Т. Вульф предположил, что повышенный уровень ионизации наверху вызван частицами, идущими из земной атмосферы. Он опубликовал статью в солидном журнале *Physikalische Zeitschrift*, но научный мир её не принял.

Практически одновременно с ним и другой исследователь – Д. Гоккель заметил такой же эффект, выполняя измерения на воздушном шаре и поднимаясь на высоты до 4 км.

Итальянский ученый Доменико Пачини (рис. 2.3) также заинтересовался природой загадочного излучения и провел, начиная с 1906 г., серию экспериментов по изучению ионизации на горах, на поверхности земли и под водой.

В 1910 г., в одном из своих экспериментов, разместив приборы в нескольких километрах от береговой линии и в море, на глубине 3-х метров, он заметил избыточное излучение, которое не могло быть связано с радиоактивностью земной коры. Интересно, что он пытался связать это излучение с пролетом в тот год кометы Галлея! Вероятно, он верил в существование неземного источника ионизации воздуха, иначе не написал бы в своей работе, опубликованной в феврале 1912 года, что из его экспериментов 1910 года следует существование «значительной доли всепроникающей радиации, существующей в воздухе, происхождение которой не может быть связано с прямым воздействием активных субстанций верхних слоев поверхности Земли...»

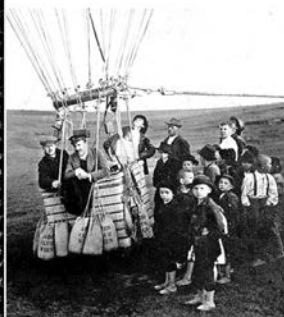
Наиболее результативным для разгадки происхождения нового типа радиации оказался эксперимент с электроскопами для исследования ионизации на высотах до 5000 м австрийского физика Гесса (1911–1912 гг.) (рис. 2.4).



Рис. 2.3. Итальянский ученый Доменико Пачини проводил измерения с электроскопом, начиная с 1906 г. в горах, на уровне моря и под водой.

Рис. 2.4. Виктор Франц Гесс на австрийской почтовой марке и рядом с гондолой аэростата после проведения своих экспериментов по исследованию ионизации атмосферных газов (1912 г.).

Нобелевская премия 1936 года за открытие космических лучей (совместно с Карлом Андерсоном).

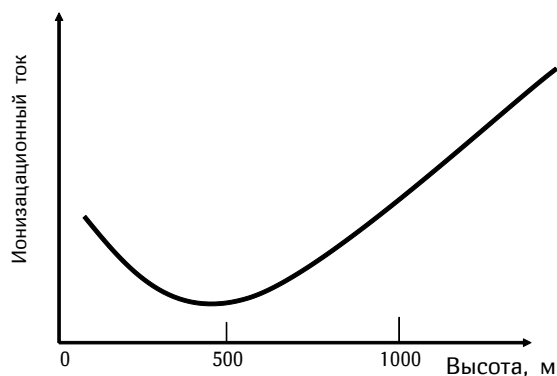


Он знал об экспериментах Т. Вульфа и, следуя его предложению о проверке полученных экспериментальных результатов по ионизации атмосферы, решил их продолжить и развить. Он создал надежную для высотных полетов аппаратуру и сумел запустить ее, используя аэростаты. Он осуществил серию из 10-ти аэростатных полетов. В том числе, он и сам летал вместе с аппаратурой. Именно в этих экспериментах, рискуя жизнью, В. Гесс обнаружил, что ионизационный ток в электроскопе сначала падает (вследствие ослабления влияния радиоактивности Земли), а затем, начиная с высоты около 1000 км, растет (рис. 2.5). Причем при этом его величина превосходила наблюдаемые значения около поверхности Земли.

В. Гесс назвал это излучения «durchdringende henstrahlung» — «проникающее излучение». Он полагал, что это так называемые «ультра-гамма-лучи». В начале XX века гамма-излучением называли компоненту радиоактивного излучения ядер, которая не испытывала отклонения при движении в магнитном поле, в отличие от альфа- и бета-излучения. Во время одного из полетов В. Гесса произошло солнечное затмение, но он не увидел уменьшения ионизации (по другим источникам, он пришел к такому выводу на основании ночных запусков аэростатов, что, впрочем, несколько не умаляет сам факт его научного достижения). Виктор Гесс писал: «Результаты моих наблюдений лучше всего объясняются предположением, что из мирового пространства на границу атмосферы падает излучение очень большой проникающей способности».

Он также сделал правильный вывод, что источником излучения не может быть Солнце.

Рис. 2.5. Примерно так выглядела кривая изменения ионизации воздуха с высотой в экспериментах В. Гесса. Вначале скорость ионизации падала вследствие уменьшения влияния радиоактивности самой Земли, а затем, по неизвестной причине, начинала расти.



Этот вывод встретил недоверие со стороны коллег. Но позднее Вернер Кольхерстер, взлетев на аэростате на высоту более 9 км, действительно подтвердил эксперименты В. Гесса: ионизация воздуха росла с высотой. Кроме этого, он обнаружил, что неизвестное излучение поглощается в атмосфере слабее, чем радиоактивное от земли. Впоследствии, в 1924 г., это было подтверждено в опытах наших отечественных физиков Л. В. Мысовского и Л. Тувима. Они, изучая поглощение «неземного» излучения в воде, нашли, что оно было значительно слабее, чем поглощение гамма-квантов, и пришли к выводу о большей проникающей способности космического излучения. Кроме этого, они определили, что это излучение изотропно, т.е. равномерно проникает в атмосферу Земли.

Лишь много лет спустя, в 1936 г., за открытие космических лучей В. Гессу совместно с К. Андерсоном была присуждена Нобелевская премия. Результаты экспериментов В. Гесса послужили началом нового направления — физики космических лучей.

Сам термин «космические лучи» был дан этому новому виду излучений американским физиком Робертом Миллиkenом (рис. 2.6), который в 1922–1926 гг. продолжал исследования радиации в воздухе, достигнув высоты измерений на шарах-зондах 15,5 км. Он показал, что интенсивность космических лучей меняется с высотой, следуя вполне определённой закономерности, связанной с эффективностью их поглощения в атмосфере.

Р. Милликену принадлежит идея происхождения космических лучей в меж-

звёздном пространстве, но не в самих звёздах. Она была основана на наблюдениях независимости «ультра-радиации» — космических лучей, как он их назвал, наблюдаемых в определённом месте, — от положения на небе Солнца и Млечного Пути. Это было вполне справедливо, согласно современным представлениям, но лишь отчасти... Р. Милликен вслед за В. Гессом также полагал, что космическое излучение — это гамма-кванты, или гамма-лучи. Р. Милликен ошибался, считая, что эти лучи представляют собой элек-

Драматично сложилась судьба В. Гесса. В 1938 г. он бежал с семьёй от нацистов, оккупировавших Австрию, в Америку. В 1946 г. американцы привлекли его к работам по определению уровней радиации атмосферных осадков, выпадавших после американских взрывов атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки. Вот так, на закате своей научной карьеры он вновь столкнулся с проблемой радиоактивности воздуха на больших высотах, но не природного, а антропогенного происхождения.

тромагнитное излучение наподобие рентгеновского излучения и света. Поэтому он по аналогии и назвал неизвестный вид проникающего излучения «космическими лучами». Это было в 1932 г.



Термин «космические лучи» прижился за более, чем 100-летнюю историю этого направления физики. Однако космические лучи не имеют ничего общего с лучом света, а скорее напоминают разряженный газ, состоящий из частиц, редко взаимодействующих друг с другом.

Рис. 2.6. Роберт Милликен

Наш отечественный выдающийся физик – Дмитрий Владимирович Скобельцын (рис. 2.7) был первым, кто смог «увидеть» сами частицы. Для этого он использовал *камеру Вильсона*, позволявшую регистрировать треки – следы отдельных частиц. Поместив её в магнитное поле, он обнаружил следы слабо отклоняющихся в магнитном поле частиц (рис. 2.8). Это и были космические лучи – частицы из далёких областей Вселенной, собственно, их «фотография».

То, что они не отклонялись магнитным полем, означало, что их энергия была значительной. Д.В. Скобельцын обнаружил также, что такие объекты часто появляются в камере Вильсона группами. Это стало первым наблюдением ливней космических лучей (более подробно об этом в следующей главе).

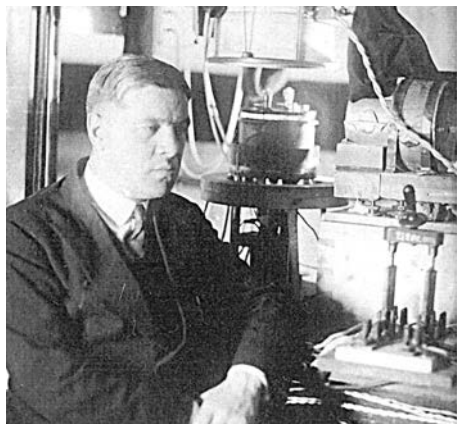


Рис. 2.7. Дмитрий Владимирович Скобельцын один из первых отечественных исследователей космических лучей.



Рис. 2.8. Такой увидел космическую частицу Д. Скобельцын в камере Вильсона. Трек частицы был в виде прямой линии.

Большая энергия неизвестных частиц была подтверждена через пару лет немецкими физиками Вальтером Боте и Вернером Кольхёрстером, собственно, и доказавших, что загадочно «неземное» излучение состоит из заряженных частиц большой энергии. В своих опытах они продемонстрировали, что частицы этого излучения свободно проникают через золотую пластинку толщиной в несколько сантиметров. В. Боте и В. Кольхёрстер изобрели специальный метод совпадений, при котором показания двух отдельных счётчиков частиц регистрировались только при одновременном их срабатывании. Это и позволило им зафиксировать прохождение частицы через золото. Позднее их большая энергия была подтверждена и в опытах со свинцовыми экранами итальянским физиком Бруно Росси.

Во время первой мировой войны В. Боте служил в германской армии. Отсюда, видимо, был его безмерно строгий нрав в общении с учениками. В 1915 г. он был взят в плен русскими и отправлен в Сибирь, где изучал русский язык и сумел продолжить свои занятия теоретической физикой, которую он начал изучать в Берлинском университете. Предложенный В.Боте метод совпадений, за который он в 1954 году получил Нобелевскую премию по физике, стал одним из наиболее активно используемых в ядерной физике, физике космических лучей и физике элементарных частиц.

Заметим, что В. Кольхёрстер, его ученик, тоже, как и В. Гесс, летал с приборами на аэростатах и подтвердил его выводы о «неземном» происхождении излучения вдали от земной поверхности. Таким образом, к началу 30-х годов прошлого века было доказано, что в атмосферу нашей планеты вторгаются космические частицы с околосветовыми скоростями.

Так какие объекты во Вселенной являются источниками космических лучей? Первыми гипотезу предложили астрономы – американец Фриц Цвикки и немец Вальтер Бааде (рис. 2.9) в 1934 г. Они высказали идею о «новых» и «сверхновых» звездах – источниках космических лучей, опубликовав свою гипотезу в 1934 г. в журнале *Physical Review*.



Рис. 2.9. Франц Цвикке (слева) и Вальтер Бааде первыми обратили внимание на сверхновые звёзды, как возможные источники космических лучей.

Насколько плодотворной оказалась эта идея можно судить о продолжающемся до наших дней потоке научных публикаций, связанных как с теорией ускорения частиц при взрывах сверхновых звёзд, так и с экспериментами, направленными на поиски подтверждений этой гипотезы. Таково вкратце начало истории открытия космических лучей. Путь к открытию был извилист и тернист. Потребовались годы упорных исследований, чтобы только приблизиться к пониманию физической сути нового природного феномена – космических лучей, непрерывно бомбардирующих нашу планету. В последующие годы на основе огромного количества экспериментов под водой, под землей, на земле, в атмосфере и в космическом пространстве был накоплен значительный материал о характеристиках этого явления, позволивший глубже проникнуть в его тайны. Об этом пойдёт речь в следующих главах этой книги.

На волне моей памяти

Я учился в 5-м классе и, конечно, не мог ещё серьёзно размышлять о своей будущей профессии. Однако, тот факт, что отец был физиком, наряду с безусловно великими космическими событиями конца 50-х и начала 60-х, сыграло определяющую роль в выборе моей профессии. Это было благодатное время для физики – атомный проект, термояд и космос не могли не волновать школьников. Прошло ещё несколько лет и, когда академик Сергей Николаевич Вернов, – тогда член-корреспондент, заведующий кафедрой космических лучей на физфаке МГУ, спросил меня при по-

ступлении на его кафедру: «чем бы Вы хотели заниматься?», я ответил: «первичными космическими лучами», наивно полагая, что если они первичные, то существуют где-то далеко от Земли и, поэтому, мне позволяют работать со спутниковыми экспериментами.

И действительно, — позволили. Однако, окунувшись в работу, я понял, что был далёк от понимания космических лучей в их классическом представлении. Я стал заниматься радиационными поясами — частицами, захваченными в магнитное поле Земли.

Глава 3. Как поймать космические лучи?

История научных исследований, подобно истории географических открытий, знает немало примеров, когда неожиданное открытие совершенно заслоняло первоначальную цель.

Б. Росси, физик.

XX век ознаменовался интенсивными исследованиями космических лучей в разных средах: под водой, на поверхности Земли или вблизи неё, на аэростатах, а позднее, с началом космической эры, и с помощью космических аппаратов. И во всех этих средах есть свои особенности регистрации космических лучей. Начнем с атмосферы. Как она влияет на посланцев космоса? Помогает или мешает она нам исследовать космические лучи?

3.1. Космические лучи в атмосфере

Свойство атмосферы поглощать космические лучи было обнаружено еще в первых экспериментах В. Гесса. Попадая в атмосферу Земли, космические частицы (в основном протоны и ядра элементов более тяжёлых, чем водород) испытывают столкновения с её атомами и молекулами. В результате происходит расщепление ядер и образование многочисленных вторичных частиц. Среднее расстояние, которое успевает пройти в атмосфере, например, протон — наиболее легкое ядро, соответствует примерно 1/13 части её толщи: он может неоднократно вступать в процессы взаимодействия с ядрами воздуха, прежде чем окончательно погибнуть. Отсюда следует, что на меньших высотах вблизи Земли, или в терминах физиков, изучающих космические лучи, — на «больших глубинах» в атмосфере, существует лишь вторичный компонент космических лучей.

Состав вторичного компонента обусловлен физическими процессами взаимодействия первичной частицы с ядрами атмосферы. Такой процесс взаимодействия частиц называется каскадным. Схема взаимодействия протонов космических лучей с атмосферой показана на рис. 3.1. В актах взаимодействия первичной частицы космических лучей рождаются практически все известные элементарные частицы, они и представляют вторичный компонент.

В первоначальном акте взаимодействия основную роль играют элементарные частицы — рождаются пионы или π -мезоны, среди которых есть нейтральные π^0 и заряженные $\pi^\pm$. Взаимодействуя с ядрами воздуха, заряженные $\pi^\pm$ мезоны генерируют новые ливни до тех пор, пока их энергия не снизится до $\sim 10^9$ эВ. В первом акте взаимодействия обычно рождается более 50 новых частиц. В результате распада $\pi^\pm$ -мезонов образуются мюоны (μ -мезоны) и нейтрино (ν). В составе вторичного излучения присутствуют нейтроны. Эта часть каскада носит название адронного ливня.

Нейтральные мезоны (π^0) — их примерно одна треть — распадаются на гамма-кванты, которые в кулоновском поле ядер порождают электроны и пози-

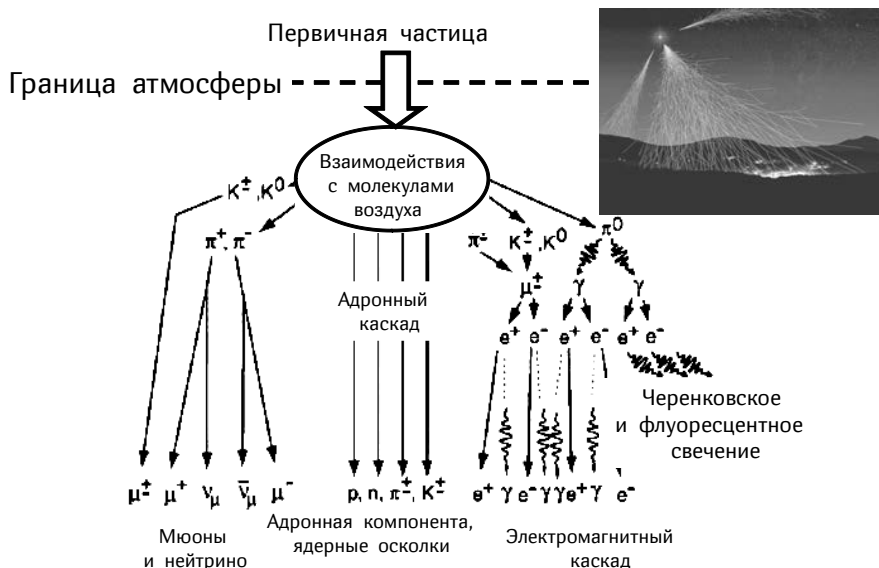


Рис. 3.1. Каскадный процесс взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой – рождение вторичного компонента (так называемые «широкие атмосферные ливни»).

троны. Тормозное излучение электрон-позитронной пары приводит к появлению низкоэнергетичных гамма-квантов – фотонов. Этот ливень называется электромагнитным. Адронный ливень сам производит нейтральные пионы, тем самым обеспечивая дополнительный вклад в электромагнитный каскад. На уровне моря остаётся не более 1% от их первоначального потока первичных частиц.

Наряду с заряженными первичными частицами в атмосферу могут попадать космические гамма-кванты высоких энергий. В этом случае ливень частиц будет чисто электромагнитным.

Вторичные заряженные частицы – электроны и позитроны, рожденные в каскадном процессе, могут создавать черенковское и флуоресцентное свечение атмосферы.

Процесс образования новых частиц носит лавинообразный характер до тех пор, пока конкурирующие потери энергии не станут доминировать. На некоторой высоте над Землёй формируется максимум числа частиц ливня. Число частиц в ливне огромно – в максимуме оно пропорционально энергии первичной частицы и может достигать миллиарда.

3.2. Ловушки частиц

Открытие каскадного процесса рождения вторичных частиц, появляющихся генетически связанными группами, связано с именем Д.В.Скобельцына. Он впервые «увидел» ливни космических лучей в опытах с камерой Вильсона, обнаружив следы одновременно рождённых двух или трёх частиц внутри нее. По сути, это были первые наблюдения множественных процессов в ядерной физике высоких энергий.

Затем, в 1938 г. Пьер Оже, французский физик (рис. 3.2) поместил пару детекторов в Альпах и зарегистрировал их одновременное срабатывание. Это было первым указанием на существование каскадного процесса — генерацию ливней вторичных частиц (их называют «широкими атмосферными ливнями» — ШАЛ), рождающихся в атмосфере под действием космических лучей. Оже их назвал «снопы частиц», а «ливнями» их назвал английский физик Патрик Блеккет. П. Оже удалось определить энергию частицы, вызвавшей ШАЛ — около 10^{15} эВ. Эта величина была на 7 порядков больше измеренной до него энергии частиц.

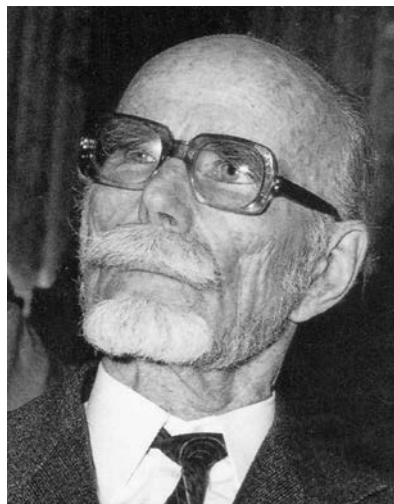


Рис. 3.2. Пьер Оже.

В дальнейшем исследования были продолжены Б.Росси, который изучал «каскадную кривую» — зависимость между числом рождённых вторичных частиц от толщины вещества, пройденной первичной частицей. Эти эксперименты стали основой нового направления в экспериментальной физике космических лучей — метода ШАЛ. Рассмотрим его более подробно.

В физике космических лучей экспериментальная задача сводится к определению ряда важнейших физических параметров частиц, среди которых — энергия, масса (зарядовое число) и зарядовое состояние. По массе мы идентифицируем саму частицу, т.е., например, для ядер определяем их место в периодической таблице элементов, а, определив энергию, можно построить энергетическое распределение потоков частиц данного типа — энергетический спектр. Знание зарядового состояния важно для ионов. Однако космические лучи высоких энергий — это полностью ионизированные атомы, свободные от своих электронных оболочек. Исключение составляет так называемый «аномальный» компонент космических лучей. Но об этих частицах речь пойдёт ниже.

Помимо этого, исследователям бывает необходимо знать и направление прихода частиц или пространственное распределение их траекторий движения. Это надо не только для определения местоположения источников космических лучей на небесной сфере, но в ряде случаев, для изучения их движения в магнитных полях: последнее важно для заряженных частиц, траектории которых могут существенно отклоняться от прямой линии в процессе распространения в межзвёздной среде. Можно попытаться решить и обратную задачу — по рассчитанным траекториям заряженных частиц построить топологию межзвездных магнитных полей. Кроме этого, для Земли, имеющей собственное магнитное поле, проблема изучения пространственного распределения частиц космических лучей имеет особое значение для интерпретации данных наземных экспериментов.

На заре исследований космических лучей применявшиеся детекторы были достаточно простыми и использовали принцип ионизации газов при прохождении через них заряженных частиц. Первые детекторы – ионизационные камеры и счетчики Гейгера – Мюллера регистрировали электрический импульс, создаваемый частицей, т.е. сам факт прохождения частицы через детектор, но не могли определить их природу.

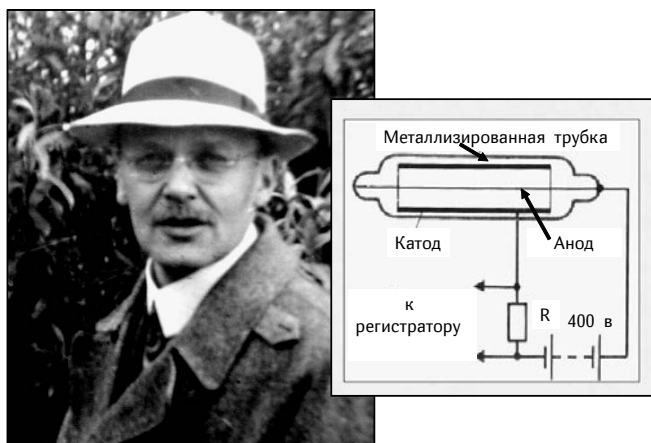


Рис. 3.3. Ханс Гейгер в 1908 г. изобрел счетчик радиоактивных излучений, названный его именем.

Здесь надо остановиться и отметить, что счетчики радиоактивного излучения, изобретенные немецким физиком Хансом Гейгером и усовершенствованные позднее Ф. Мюллером, сыграли выдающуюся роль в истории не только ядерной физики, но и в космических исследованиях, физике элементарных частиц и в прикладных направлениях, связанных с обеспечением радиационной безопасности.

В простейшем случае счетчики Гейгера – Мюллера представляют собой металлическую трубку с тонкой металлической нитью, натянутой внутри по её оси (рис 3.3). Нить служит анодом, трубка – катодом. Трубка заполнена разреженным газом: аргоном или неоном. Между катодом и анодом создается напряжение в сотни вольт. Работа счётчика основана на *ударной ионизации*. Такой счетчик может регистрировать γ -кванты. Попадая на стенки счётчика, они выбивают из него электроны, которые, в свою очередь, сталкиваясь с атомами газа внутри счетчика, выбивают из атомов электроны и создают положительные ионы и свободные электроны. Электрическое поле между катодом и анодом ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. В результате формируется электрический импульс на резистивной нагрузке между анодом и катодом, который и является откликом на факт прохождения кванта.

Этот счетчик Х. Гейгер изобрел в 1908 г., т.е. за два года до экспериментов В. Гесса. Возможно, В. Гесс не знал об этом изобретении. Но если бы у него была возможность его применения, то, возможно, путь к выяснению природы космических лучей был бы короче...

Сейчас этот детектор успешно применяется не только в исследованиях радиации на Земле, но и в космосе. С его помощью были открыты радиационные пояса Земли в 1958 г., а позже и радиационные пояса у далеких планет-гигантов в нашей Солнечной системе.

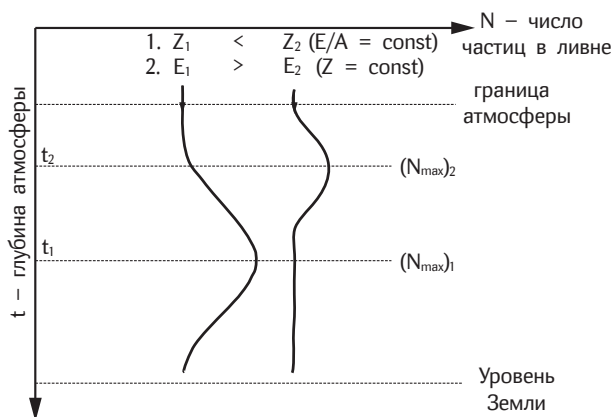
Будучи простым и надежным, он стал основным счетчиком в дозиметрах, обеспечивающих мониторинг радиационной обстановки как для обеспечения безопасности гражданского населения, так и в военной сфере.

Выше отмечалось, что в результате взаимодействия космического излучения с ядрами атомов атмосферы рождаются новые частицы — вторичные протоны, ядра более тяжёлых элементов, нейтроны, электроны, гамма-кванты, мюоны и нейтрино. Вклад этих компонентов в суммарный поток излучения на разных высотах зависит как от состава первичного излучения, так и от его энергетического распределения. Физические характеристики каскадного процесса впервые были подробно исследованы российскими физиками — Д.В. Скобелцыным, Н.А. Добротинным и Г.Т. Зацепиным в 1949 г. в горах Памира, где на большой высоте располагались детекторы, позволявшие регистрировать вторичные частицы каскада — ливня частиц (рис. 3.4).

Теория каскадного процесса, впервые разработанная Г.Т. Зацепиным, позволила разработать методы определения параметров первичной частицы, вторгающейся в атмосферу, по анализу событий в детекторах, вызванных вторичными частицами. Оказалось, что максимум интенсивности частиц в ливне («максимум ливня») зависит как от энергии первичной частицы, так и от её типа (рис. 3.5).



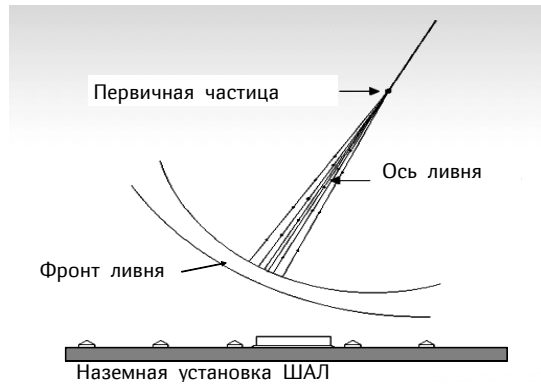
Рис.3.4. Георгий Тимофеевич Зацепин с сотрудниками создал установку для изучения широких атмосферных ливней в горах Памира.



Определение положения максимума ливня частиц играет большую роль в экспериментах с ШАЛ космических лучей. Максимум ливня

Рис. 3.5. Качественная картина формирования каскадов вторичных частиц в атмосфере. Видно, что более энергичные, а также более лёгкие частицы с той же энергией формируют максимум ШАЛ (N_{max}) на больших глубинах атмосферы, т.е. ближе к земной поверхности.

Рис. 3.6. Регистрация частиц космических лучей наземными установками. Детекторы размещаются на большой площади с тем, чтобы зарегистрировать максимально возможное число вторичных частиц каскада ШАЛ.



содержит в среднем $\sim 1-1,6$ частицы на каждые 10^9 эВ энергии первичной частицы. Это означает, что с ростом энергии число частиц в максимуме увеличивается. Высота образования максимума над поверхностью Земли, или, точнее, глубина t , отсчитываемая от верхней границы атмосферы ($X_{\max}$), изменяется по логарифмическому закону с изменением энергии первичной частицы (т.е. пропорциональна $\lg E$). Величину $X_{\max}$ можно вычислить, интегрируя плотность воздуха вдоль траектории частицы от точки входа в атмосферу. Следовательно, $X_{\max}$ измеряется в г/см^2 – произведение плотности вещества (г/см^3) на длину пути в нём частицы (см).

При вертикальном пролёте частицы, её траектория пересекает $\sim 1000 \text{ г/см}^2$ вещества от границы атмосферы до уровня моря. Частица с энергией 10^{15} эВ достигнет глубины примерно в середине толщи атмосферы. Глубина максимума ливня будет увеличиваться с увеличением энергии частицы. Однако глубина максимума зависит и от типа влетающей частицы. Для более массивной частицы, но с той же энергией, $X_{\max}$ будет наблюдаться выше над землёй. Первое адронное взаимодействие для протонов происходит на глубине атмосферы $\sim 70 \text{ г/см}^2$, для более тяжёлых ядер с той же энергией – на меньших глубинах (бóльших высотах). Это различие качественно демонстрируется на рис. 3.5, где приведены распределения числа частиц в ливне для частиц с зарядами Z_1 и Z_2 ($Z_1 < Z_2$), но с одинаковыми энергиями и для частиц с $Z = \text{const}$, но с разными энергиями.

Для различных компонентов каскадного процесса характер прохождения частиц через атмосферу обладает своими особенностями. Комбинируя методы экспериментальных измерений, чувствительных к тому или иному компоненту вторичного излучения, с одной стороны, и, применяя расчётные модели прохождения частиц через атмосферу, – с другой, исследователям удастся приблизиться к определению физических параметров первичной частицы. Приблизиться, потому что остаётся всё-таки некоторая неопределённость, иногда значительная, в цепочке измерений и моделирования, связанная с незнанием некоторых параметров, заложенных в моделях.

Выше отмечалось, что ливни, вызванные первичной частицей с энергией $\sim 10^{15}$ эВ, проникают на глубину, равную примерно половине толщины атмосферы. Очевидно, что порог по энергии регистрируемых первичных частиц будет зависеть от высоты, на которой будут размещены детекторы: чем выше они расположены, тем ниже порог.

Однако, метод ШАЛ не «работает» в области энергий менее $\sim 10^{14}$ эВ. Каскад вторичных частиц при таких энергиях не развивается: т.е. частицы таких и меньших энергий очень быстро поглощаются в атмосфере.

На рис.3.6 показана схема регистрации ШАЛ наземными установками. Обычно детекторы расположены на некотором расстоянии друг от друга и регистрируют вторичные частицы ливня по совпадениям. Распределение плотности частиц в ливне похоже на блин, который распространяется со скоростью, близкой к скорости света. Измеряя время прихода фронта частиц ливня, можно вычислить направление прихода первичных частиц. Энергия ливня определяется по суммарной плотности вторичных частиц на расстояниях до 600 м от оси ливня.

Измеряя только, например, адронный компонент ливня, невозможно определить величину $X_{\max}$. Можно измерить другой компонент — мюонный, каскад которого развивается на глубинах отличных от адронного. По разнице показаний мюонных и адронных детекторов, а также привлекая каскадные модели, можно определить $X_{\max}$.

Как можно «увидеть» рождение и гибель ливня?

Практически одновременно с развитием измерений космических лучей методом ШАЛ, в 1937 г. появился метод ядерных эмульсий. Частицы, попадая в вещество пленки, на поверхность которой нанесён чувствительный к рентгену и заряженным частицам слой фотоэмульсии, вызывают каскад вторичных частиц — результат взаимодействия первичной частицы с ядрами фотоэмульсии (рис. 3.7). После проявления треки частиц становятся видимыми. Анализируя толщину, размеры и пространственное положение треков под микроскопом,



можно определить и типы частиц, и их энергии. Метод ядерных эмульсий получил широкое распространение в физике космических лучей.

Рис.3.8. Регистрация космических лучей методом измерения черенковского излучения. Заряженные частицы, летящие со скоростью, превышающей скорость света (по сравнению с вакуумом), излучают фотоны, которые могут быть зарегистрированы наземными установками — коллекторами света с параболическими зеркалами.

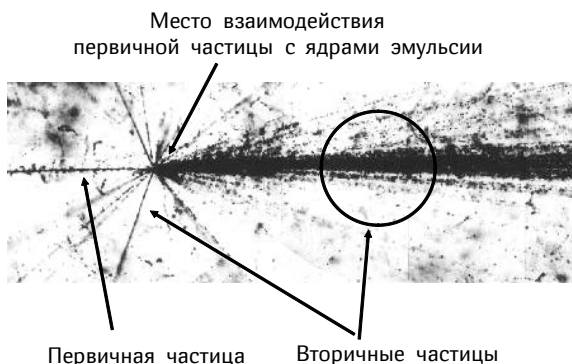


Рис. 3.7. Пример визуализации ливня от частицы при её торможении в фотоэмульсии. Следы первичной и вторичных частиц становятся видимыми после проявления плёнки.

Благодаря именно его применению в 40-х годах прошлого века удалось обнаружить многие ядра — вплоть до железа — в составе первичного космического излучения.

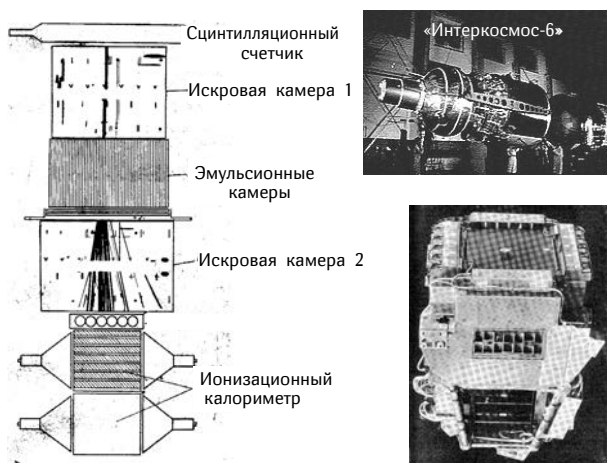
Альтернативным методом измерения энергии частиц в ШАЛ является измерение черенковского свечения. Известно, что скорость распространения частиц в среде с показателем преломления больше единицы, может превышать фазовую скорость света. Это справедливо для частиц ШАЛ при их распространении в воздухе. В результате происходит генерация черенковского излучения (рис. 3.8). Свечение видно в узком конусе в направлении распространения ливня и может быть зарегистрировано наземными оптическими детекторами. Этот метод позволяет измерить $X_{\max}$ непосредственно. Подобные детекторные наземные установки уже созданы и успешно работают: например Telescope Array в США и «Тунка» у нас, в России. Данные таких детекторов не только дополняют результаты «классических» установок (ШАЛ), но и служат независимой проверкой их результатов.

Из приведённого выше рассмотрения возможностей регистрации космических лучей высокой энергии очевидно, что именно каскадный процесс образования вторичных частиц лежит в основе метода определения природы первичной частицы. Атмосфера служит именно тем «рабочим телом» гигантского детектора, который позволяет регистрировать космические лучи высоких энергий. Однако, этот метод эффективен в области энергий более $\sim 10^{15}$ эВ. А в области меньших энергий?

Здесь атмосфера уже не может служить «генератором» вторичных частиц, они в большинстве своём погибают в верхних слоях атмосферы. Как же измерить энергию частицы в этой области энергий? Рассмотрим эту проблему более подробно.

3.3. Космические лучи вдали от Земли

Какие приборы существуют для определения энергии частицы за пределами атмосферы?



О методе РЭК (рентген-эмульсионные камеры) было рассказано выше. Он действительно применяется при небольших энергиях: установки достаточно большой площади с использованием РЭК могут быть установлены на аэростатах, самолётах и спутниках с тем, чтобы «при-

Рис. 3.9. Прибор, установленный на спутнике «Интеркосмос-6», в состав которого входили рентген-эмульсионные камеры.

близиться» к первичным частицам. Но и этот метод имеет свои ограничения, в первую очередь по времени экспозиции РЭК: в течение длительного времени детектор РЭК зарегистрирует столь много частиц (т.е. «засветится»), что различить отдельные треки в нём станет невозможным — после проявления фотоэмульсия будет чёрной. Тем не менее, он успешно применялся в космических экспериментах. Одним из них был эксперимент на борту спутника «Интеркосмос-6».

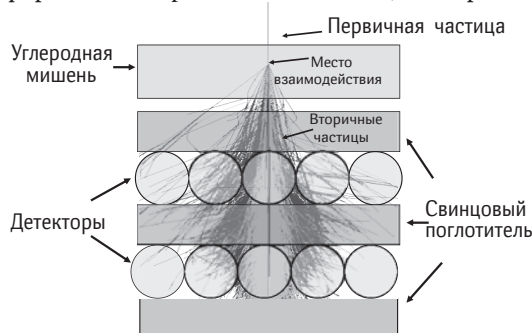
Спутник был запущен в 1972 году в рамках международной программы «Интеркосмос». На нем был установлен почти 6-тонный прибор для детектирования космических лучей высокой энергии (рис. 3.9), в состав которого входила большая стопка РЭК, позволявшая регистрировать треки космических частиц, пролетающих через нее. После относительно непродолжительного полета экспонированный в космосе эмульсионный блок был возвращен на Землю и проявлен в наземной лаборатории.

В этом уникальном пионерном эксперименте были получены данные не только о характеристиках взаимодействия ядер первичных космических лучей высоких энергий с атомными ядрами фотоэмульсии, но впервые зарегистрировано космическое ядро с энергией $5 \cdot 10^{15}$ эВ (5 ПэВ), а также электроны с энергией более 10^{12} эВ. Более подробно о частицах в этих диапазонах энергий будет рассказано далее, но здесь заметим, что в наши дни XXI века современные космические эксперименты только начали «приближаться» к столь высоким энергиям.

В 50-х годах был изобретён принципиально новый прибор — ионизационный калориметр, позволивший сделать настоящий рывок в исследованиях не только космических лучей, но и элементарных частиц в наземных экспериментах на ускорителях.

Идея изобретения и создания калориметра для изучения космических лучей принадлежит российским учёным — Науму Леонидовичу Григорову, Владимиру Сергеевичу Мурзину и Илье Давидовичу Раппопорту из Московского государственного университета.

Принцип действия прибора достаточно прост. Калориметр состоит из мишени, внутри которой не только поглощается вся энергия первичной частицы, но и все вторичные частицы (рис. 3.10). По сути, мишень — это «мини-атмосфера» для первичной частицы, которая генерирует каскад вторичных частиц.



Мишень — многослойная. В зазорах между веществом мишени устанавли-

Рис. 3.10. Один из видов ионизационного калориметра, позволяющего регистрировать космические лучи высокой энергии. Прибор состоит из углеродной мишени, в которой происходит генерация вторичных частиц — нейтральных пионов, которые, распадаясь, формируют поток фотонов. Они регистрируются слоями детекторов, расположенных между поглотителями и свинцом под мишенью.

Рис. 3.11. Первый в мире ионизационный калориметр, созданный советскими и армянскими физиками и размещенный на горе Арагац на высоте 3200 м (г. Нор Амберд) Фотографии 60-х годов. В кружке – сотрудник лаборатории.



ливаются детекторы различного типа, которые регистрируют вторичные частицы. Обработывая сигналы с различных слоёв установки, восстанавливается весь ливень вторичных частиц и, тем самым, параметры первичной частицы. Ионизационный калориметр в данном виде – это детектор полного поглощения, позволяющий проследить всю историю генерации ливня.

Ионизационный калориметр, по существу, – это прибор для измерения энергии первичной частицы по тому же принципу, что и в методе ШАЛ, но с существенным отличием: детекторы калориметра «видят» вторичные частицы, регистрируют их, определяют их параметры и параметры первичной частицы.

В методе ШАЛ далеко не все частицы регистрируются наземными установками. Здесь параметры первичной частицы приходится восстанавливать, используя различные модели прохождения частиц через вещество. Поэтому, в отличие от метода ШАЛ, измерения космических лучей калориметрами носят названия «прямых» экспериментов.

Впервые ионизационные калориметры для измерений космических лучей были созданы для высокогорных исследований, а затем запущены в космос. Первый в мире большой ионизационный калориметр был создан советскими и армянскими учеными на горе Арагац на высоте 3200 м в 50-х годах прошлого века (рис. 3.11) предоставив важную информацию о параметрах космических лучей на высотах в непосредственной близости к «первому акту» их взаимодействия с атмосферными частицами (рис. 3.5).

Но ученые стремились «поймать» первичные частицы космических лучей, до взаимодействия с атмосферой. История первых космических экспериментов с калориметрами знаменательна и уникальна.

Уже говорилось, что при энергиях менее $\sim 10^{15}$ эВ метод ШАЛ не работает и только «прямые» эксперименты на аэростатах и спутниках с приборами типа калориметров могут обеспечить изучение спектров частиц в этой области. Аэростаты имеют ограниченную длительность полётов, а значит небольшую статистику зарегистрированных событий и, следовательно, ограничения по максимальной энергии частиц. Спутники с более длительным сроком проведения экспериментов могут заполнить эту брешь.

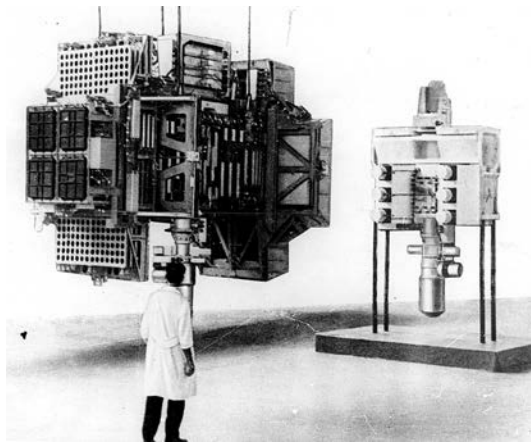
Советским учёным в 60-е годы неожиданно представилась возможность использовать спутники для изучения космических лучей. Это было время, когда особенно высокими темпами наращивался ракетно-ядерный потенци-

Рис.3.12. Легендарные «Протоны» — первые многотонные калориметры, запущенные в космос на советских боевых ракетах.

ал СССР и США. Испытания баллистических ракет следовали одни за другими.

И в этот период «холодной войны» учёным из МГУ С.Н. Вернову и Н.Л. Григорову удалось убедить военных разместить ионизационные калориметры на баллистических ракетах при испытательных пусках вместо макетов ядерных боеголовок. Предложение было принято, и перед учёными открылась действительно уникальная, до сих пор не имеющая аналогов возможность, запустить в космическое пространство многотонную аппаратуру для исследований частиц высокой энергии. Возможность была максимально использована — было запущено четыре экспериментальных установки «Протон» разных модификаций (рис. 3.12).

Вплоть до 60-х годов прошлого века в энергетическом спектре космических лучей оставалось «белое пятно» — незаполненная экспериментальными



Факты....

Все мы знаем о мощных ракетах «Протон» (УР-500), созданных еще в 60-е годы прошлого века, но до сих пор доставляющие грузы на околоземные орбиты. Они были разработаны в 1961–1967 годах конструкторским бюро (ныне ГНППЦ им. М.В. Хруничева) выдающегося советского конструктора Владимира Николаевича Челомея. Эта ракета может выводить на геостационарную орбиту грузы весом более 3-х тонн. Ракета разрабатывалась в двух вариантах: как военная межконтинентальная баллистическая ракета с дальностью полета до 12000 км, способная доставлять мощные термоядерные заряды, и в варианте ракеты-носителя для запусков на орбиту тяжёлых спутников. «Протон» стал одним из наиболее используемых ракет-носителей в нашей стране. Первый старт состоялся 16 июля 1965 г. Выведение прошло успешно, и на орбите оказался тяжёлый научно-исследовательский спутник «Протон-1», на борту которого и находился калориметр для исследований космических лучей высокой энергии (рис. 3.12).

Ракета «Протон» кроме своего «фирменного» обозначения УР-500, в первом запуске имела и собственное имя — «Геркулес» (по другим источникам — «Атлант»). Однако это имя не прижилось, и в открытой печати вскоре было изменено на «Протон» — по названию спутников, осуществивших первые в мире эксперименты по регистрации космических лучей до энергий 10^{15} эВ.

данной области при энергиях менее $\sim 10^{15}$ эВ. В экспериментах на «Протонах» впервые был перекрыт спектр частиц в широчайшем диапазоне энергий: от $\sim 10^{12}$ эВ до $\sim 10^{15}$ эВ. Прямой эксперимент, выполненный на спутниках с помощью калориметров, сомкнулся с результатами наземных экспериментов ШАЛ. Это был огромный успех нашей науки!

Современные приборы для изучения космических лучей — довольно сложные системы, способные с большой точностью восстанавливать параметры первичной частицы. Калориметры их составная часть.

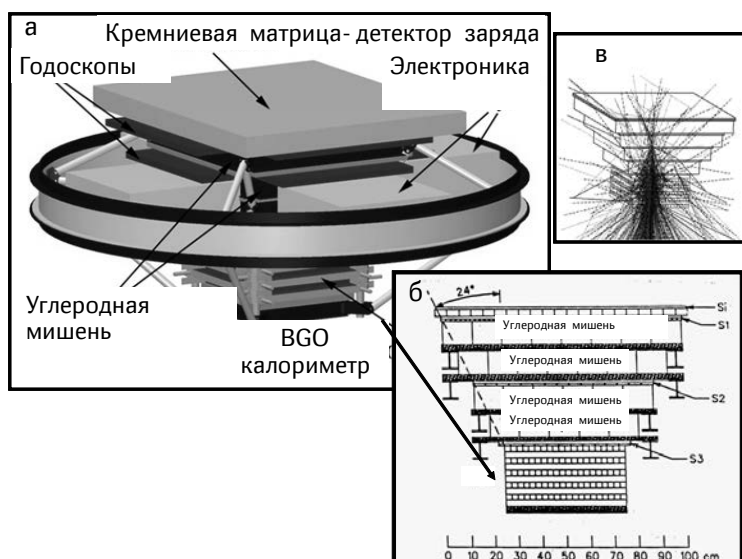


Рис.3.13. Прибор АТИС, летавший в Антарктиде. На врезках «а» и «б» — общий вид и состав прибора, состоящего из нескольких детекторов, а на «в» — модельный каскад частиц, возникающий при взаимодействии первичного протона с одним из детекторов.

На рис. 3.13 показан один из современных приборов для исследования космических лучей. Этот прибор использовался в двух аэростатных экспериментах АТИС в Антарктиде в 2000 и 2002 годах. Он состоит из набора различных детекторов и мишеней и позволяет идентифицировать энергию, заряд, массу частицы и её траекторию. Энергия определялась ионизационным калориметром, сделанным из тяжёлого материала – BGO (германата висмута), который является сцинтиллятором – детектором ядерных излучений. На входе установки размещалась матрица полупроводниковых детекторов для определения заряда (массы) первичной частицы и места её попадания в установку. Траектория частиц восстанавливалась в процессе обработки сигналов от частиц, одновременно попавших в верхний и нижний слои системы. Такой прибор насчитывает тысячи отдельных детекторов и, соответственно, тысячи отдельных

электронных каналов обработки информации. Он позволяет регистрировать космические лучи до энергий $\sim 10^{14}$ эВ/нуклон с разделением по массам отдельных элементов от протонов до железа. Ограничение

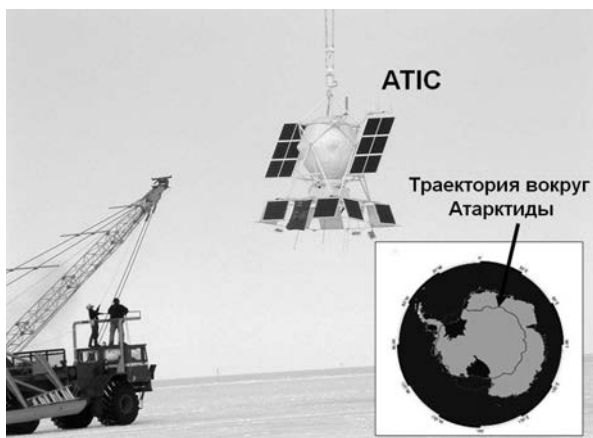


Рис. 3.14. Аэростаты могут летать в Антарктиде до 4-х недель. Прибор АТИС дважды совершил путешествия вдоль побережья Антарктиды, собирая информацию о космических лучах.

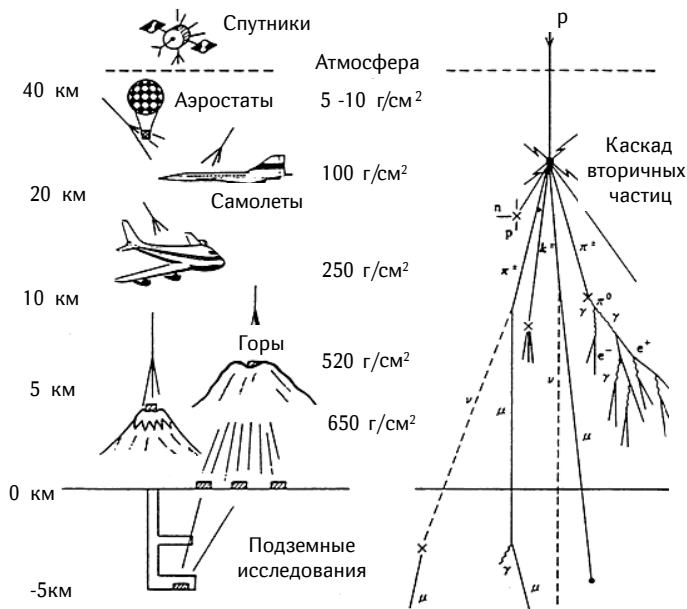


Рис. 3.15. Космические лучи изучаются во всех средах. Первичные частицы могут регистрироваться только на спутниках, широкие атмосферные ливни — на уровне моря (на земле) и в горах, а «проникающий» компонент ливней — мюоны — под землей.

по максимальной энергии в этой установке связано с размерами детекторов (верхний детектор имеет размер $\sim 1\text{м}^2$) и временем экспозиции — длительностью полета самого аэростата.

В Антарктиде в летний период (по южному полушарию) наблюдаются постоянно дующие ветра в течение довольно длительного времени. Этим и воспользовались учёные, запуская аэростаты на далёком континенте. Аэростаты с научными приборами обигают южный континент за 2–3 недели. Во многих случаях этого достаточно, чтобы набрать статистику для получения достоверных результатов по частицам космических лучей. Именно так было проведено 2 полёта аэростатов в Антарктиде с прибором АТЭС в гондоле (рис. 3.14).

В этой главе лишь кратко изложены экспериментальные методы изучения космических лучей. В действительности методов очень много и читатель может почерпнуть сведения о них в специальной литературе. Важно отметить, что они применяются в различных средах (рис. 3.15): в космосе, в атмосфере, на земле и под землей. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, но именно их совокупность позволяет учёным построить наиболее полную картину физических характеристик космических лучей.

Мы еще вернёмся к методам измерений космических лучей, а пока посмотрим каковы их основные физические характеристики? Почти за столетнюю историю исследований этих странников Вселенной накоплен действительно огромный экспериментальный материал, позволяющий судить не только об их природе, но и о природе космических объектов, ответственных за их рождение. Об этом и пойдёт рассказ далее...

Глава 4. Что мы знаем о космических лучах

Если эксперимент подтверждает теорию,
это приятно. Если не подтверждает —
это интересно.

Я.Б. Зельдович

4.1. Крутая траектория познания состава космических лучей

Вопрос о составе космических лучей и есть, по сути, вопрос об их природе. Первые исследователи космических частиц полагали, что это гамма-излучение — фотоны, падающие на атмосферу из космоса. Эта гипотеза преобладала довольно продолжительное время. Однако исследование каскадов вторичных частиц, наблюдающихся в атмосфере, не подтвердили эту гипотезу.

В Главе 2 уже отмечалось, что первыми, кто предположил, что космические лучи — это поток заряженных частиц, были В.Боте и В.Кольхёрстер. Они проделали ряд опытов с детекторами радиоактивного излучения на земле и обнаружили, что частицы, регистрирующиеся их прибором, обладают большей проникающей способностью по сравнению с фотонами и не могут быть рождёнными при взаимодействии фотонов со стенками детекторов. Однако их выводы из результатов экспериментов окончательно не воспринимались, т.к. в то время физика процессов взаимодействия частиц с веществом не была в достаточной мере ясна.

Большую роль в выяснении природы космических лучей сыграли камеры Вильсона, позволившие визуализировать треки частиц. Эксперименты Д.В. Скобельцына с применением камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, и последующие опыты Б. Росси показали, что таинственные частицы космического излучения обладают достаточно большой энергией, способны проникать сквозь большие толщи вещества и при этом испытывают сложные взаимодействия как в атмосфере (ШАЛ), так и в материале самих детекторов. Поэтому в течение длительного времени оставался открытым вопрос о природе первичного излучения, т.е. о природе тех частиц, которые падают непосредственно на атмосферу.

И здесь на помощь пришла идея использовать геофизические свойства нашей планеты. Давайте вспомним, что наша планета магнит. Именно существование магнитного поля Земли сыграло решающую роль в определении состава того первичного излучения, которое и интересовало учёных-космиков.

Магнитное поле Земли в первом приближении имеет так называемую дипольную форму: у него есть северный и южный полюса, а его напряженность изменяется в зависимости от расстояния — чем дальше от Земли, тем поле слабее, а при заданном расстоянии оно усиливается по мере приближения к полюсам (рис. 4.1).

Нейтральные частицы (фотоны, нейтроны) пересекают магнитное поле, «не замечая» его. Другое дело — заряженные частицы, их траектории будут ис-

кривляться. Причём радиус кривизны траектории в магнитном поле будет зависеть от энергии, а точнее — импульса (произведения массы частицы на скорость — mv).

Из теории движения заряженной частицы в магнитном поле (равенство силы Лоренца центростремительной силе) известно соотношение:

$$mv/Z = Br_L \text{ или } E(\text{эВ})/Z = 300 Br_L (\text{гаусс} \cdot \text{см}),$$

здесь m — масса частицы, v — ее скорость, а B — индукция магнитного поля и r_L — ларморовский радиус частицы. Это магнитная жёсткость: $R = mv/Z$. Она широко используется в физике космических лучей¹ для описания движения частиц в магнитных полях.

Именно она и определяет параметры траектории частицы в магнитном поле. Из формулы для магнитной жёсткости видно, что траектория зависит и от заряда частицы Z : для однократно заряженной частицы, например, протона, радиус кривизны r_L в магнитном поле B будет больше, чем, например, для двукратно заряженного иона гелия — альфа-частицы с той же энергией.

Отсюда ясно, что наше магнитное поле может служить прибором, созданным самой природой, для определения состава падающих на Землю частиц (рис. 4.1).

Первыми, предложившими использовать магнитное поле Земли в качестве естественного сепаратора заряженных и нейтральных частиц, были те же В. Боте и В. Кольхёрстер. Именно они на основе своих экспериментов показали, что первичный компонент космического излучения состоит из заряженных частиц, а не нейтральных.

Голландский физик Дж. Клей, путешествуя в 1927 г. от г.

Лейдена до Суэцкого канала, обнаружил уменьшение интенсивности космического излучения. Это было первым указанием на существование так называемого широтного эффекта космических лучей — изменения их интенсивности в зависимости от широты: на экватор, вследствие дипольного характера магнитного поля Земли проникает гораздо меньше частиц, чем на высокие широты.

Не все этому поверили. Р. Миллиken (именно он назвал неизвестное космическое излучение космическими лучами), не обнаружив заметного эффекта изменения интенсивности частиц между Боливией и Пасаденой в Калифорнии (в 1928 г.), продолжал настаивать на фотонной гипотезе происхождения космических лучей.

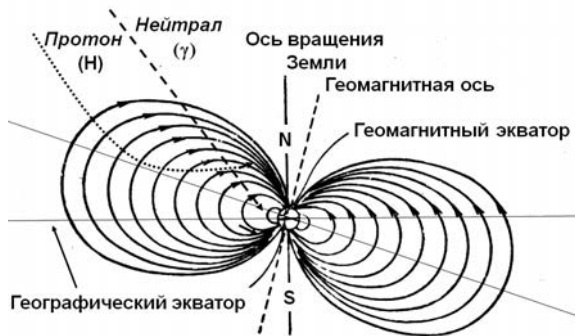


Рис. 4.1. Магнитное поле Земли имеет форму диполя. Ось диполя смещена относительно оси вращения Земли на $\sim 11^\circ$. Поэтому географический экватор не совпадает с геомагнитным.

¹ Формулы приводятся для нерелятивистской частицы, движущейся перпендикулярно магнитному полю.

Но организованные в 1932 г. многочисленные эксперименты американского физика Артура Комптона дали убедительные и окончательные аргументы в пользу альтернативной гипотезы о составе космических лучей.

Факты...

А. Комптон известен своими исследованиями в области рентгеновских лучей. В 1922 г. он показал, что рентгеновские лучи могут полностью отражаться от гладких твердых поверхностей. Другими словами, рентгеновские лучи подобны свету. Его работы стали основой физики рентгеновских лучей как одного из направлений оптики. А. Комптон получил в 1927 г. Нобелевскую премию по физике «за открытие эффекта, названного его именем». Он разделил награду с Ч. Вильсоном. К. Сигбан из Шведской королевской академии наук отмечал, что эффект Комптона «ныне настолько важен, что в будущем ни одна атомная теория не может быть принята, если она не согласуется с ним и не следует законам, установленным его первооткрывателем». Но не только своими работами в области «чистой науки» известен А.Комптон. В 1941 г. он возглавил комитет Национальной академии наук, созданный с целью изучения возможного использования атомной энергии в военных целях. Благоприятный отзыв этой группы собственно и привел к утверждению Манхэттенского проекта. С 1942 по 1945 г. Комптон был директором одного из подразделений этого проекта, известного как металлургическая лаборатория Чикагского университета. Здесь под руководством Энрико Ферми был построен первый ядерный реактор.

Позднее, в 1936–38 годах, наш физик — Сергей Николаевич Вернов осуществил измерения широтного эффекта космических лучей, проведя стратосферные эксперименты на шарах-зондах в Индийском океане на теплоходе «Серго» (рис. 4.2). Он подтвердил результаты, полученные А.Комптоном по исследованию широтного эффекта и его вывода о том, что космические частицы заряжены. Оказалось, что на экваторе поток космических лучей был в 4 раза меньше потока, наблюдавшегося на высоких широтах. Более того, он пришёл к выводу, что большая часть первичной космической радиации состоит из электронов и позитронов. Отметим, что незадолго перед этим, в 1932 г., американский физик Карл Андерсон

открыл позитрон. Этот вывод был неверным. Уже в 1946 году С.Н. Вернов отказывается от него, после тщательного исследования прохождения частиц через атмосферу на больших высотах.



Рис. 4.2. Вернов (слева) и Н.А. Добротин в экспедиции в Индийском океане в 1937 г. на теплоходе «Серго».

Факты...

На самом деле первым, кто увидел позитрон, был Д. В. Скобельцын. Работая с камерой Вильсона (см. главу 3) в 1927–1928 г.г., он, наряду со следами электронов, похожими на закрученные спирали, наблюдал появление необычных треков — спиралей, но закрученных в другую сторону, по сравнению с электронными. Это были следы позитронов. Не очень понятно, почему Д. В. Скобельцын опубликовал эти результаты в журнале Nature только 1934 г. Но факт состоит в том, что К. Андерсон опередил его, опубликовав результат своих исследований в 1933 г. в журнале Physical Review. В 1936 г. за открытие позитрона ему была присуждена Нобелевская премия (совместно с В. Гессом). Это случай, который учит тому, что оправданный риск и достижение истины в научных исследованиях должны идти совместно.

Широтная асимметрия космического излучения не единственная в пространственном распределении частиц, наблюдаемых на Земле. Следует ожидать асимметрии восток–запад, если первичные частицы не нейтральны, а заряжены. Положительно заряженные частицы должны отклоняться к востоку, а отрицательные — к западу. Б. Росси провёл первые эксперименты для проверки этой гипотезы (1931 г.) и не обнаружил заметного эффекта. Т. Джонсон, осуществляя подобные эксперименты в Мексике в 1933 г., обнаружил восточно-западную асимметрию прихода первичных частиц. Это явилось указанием на то, что первичное излучение состоит из положительно заряженных частиц. Неожиданный результат! Ведь большинство физиков до этого полагали, что если первичное излучение и является заряженными частицами, то это электроны.

В 1940 г. М. Шайн, анализируя результаты стратосферных экспериментов по прохождению космического излучения через свинцовую защиту разной толщины, пришёл к выводу, что оно состоит «скорее всего, из протонов». Этот вывод был правильным и получил подтверждение в работах по исследованию процессов взаимодействия космических лучей с атмосферой и в экспериментах 1949 года по исследованию восточно-западной асимметрии С. Н. Вернова, который ничего не знал о работах М. Шайна.

Следующий шаг в познании природы космического излучения был сделан с помощью детекторов, позволявших оценить массу частицы и её энергию. Это рентген-эмульсионные камеры — детекторы на основе чувствительных к воздействию заряженных частиц фотоэмульсий (см. рис. 3.7). Одновременно две группы исследователей из США под руководством Э. Нея, Г. Брадта и Б. Питерса провели исследования с помощью эмульсий, экспонировав их на высоте 29 км. Они обнаружили в них треки тяжёлых частиц, принадлежащих к первичному космическому излучению. Так были обнаружены в космических лучах частицы тяжелее протонов. Но их было значительно меньше. И это сейчас понятно — наша Вселенная почти полностью состоит из водорода.

Ну, а как быть с электронами, позитронами и фотонами в первичном излучении, составлявших основу гипотезы о происхождении космических лучей вплоть до 1940 года? Их тоже нашли в первичном излучении. Но в несравненно меньших количествах.

Так, порой очень замысловато и драматично, пролегла траектория движения науки к тому, что сейчас кажется очевидным...

4.2. Космическая материя – космические лучи: из чего она состоит?

К космическим лучам относятся как заряженные, так и нейтральные частицы: атомы различных элементов от водорода до самых «тяжёлых» представителей периодической системы Менделеева, а также такие элементарные частицы, как нейтроны, электроны, мезоны и другие. Диапазон их энергий крайне велик – достаточно сказать, что он простирается более чем на 14–15 порядков величины. Потоки космических лучей сильно меняются в зависимости от энергии, при малых энергиях их значительно больше, чем при высоких и сверхвысоких энергиях.

Атомы космических лучей лишены электронных оболочек, т.е., по сути, это полностью ионизованные атомы, или «голые ядра». Причина этого – взаимодействие с веществом в процессе их движения во Вселенной. Взаимодействуя с нейтральными частицами, они теряют свои электронные оболочки (так называемый процесс *перезарядки*). Как показывают расчеты, средний путь, который проходят частицы от места генерации, достаточен, чтобы потерять все орбитальные электроны за счёт взаимодействий с космической средой.

Естественно задаться вопросом: как химический состав космических лучей соотносится с составом звезд во Вселенной, с составом ближайшей к нам звезды – Солнца? Ответ дан в таблице 4.1, где приводится относительное содержание различных элементов в составе космических лучей, на Солнце и в звёздах.

Можно видеть, что состав космических лучей приблизительно соответствует распространённости элементов во Вселенной за исключением двух случаев: во-первых, в космических лучах наблюдается значительно больше лёгких ядер (Li, Be, B) и, во-вторых, – тяжёлых ядер, вблизи железа.

Таблица 4.1. Содержание некоторых элементов в космических лучах, на Солнце и в звёздах относительно ядер кислорода (O).

Элемент	КЛ	Солнце	Звёзды
H	685	1445	925
He	48	91	150
Li	0,3	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
Be-B	0,8	$< 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
C	1,8	0,6	0,3
N	$< 0,8$	0,1	0,2
O	<u>1,0</u>	<u>1,0</u>	<u>1,0</u>
Mg	0,32	0,05	0,04
Si	0,12	0,06	0,04
Fe	0,14	0,05	0,06

Как сформировался именно такой состав космических лучей? Почему существуют различия в составе звёзд и частиц, приходящих к нам из Вселенной? Об этом пойдёт речь далее, а пока продолжим рассмотрение их состава.

Помимо ядер различных элементов в составе космических лучей имеются электроны. При равных энергиях интенсивность электронов в ~ 100 раз меньше, чем протонов. В отличие от протонов и более тяжёлых ядер, максимальная энергия электронов находится, вероятно, где-то в районе $10^{12} - 10^{13}$ эВ, т.к. ожидается, что при больших энергиях их поток должен резко уменьшаться из-за *синхротронных потерь и обратного комптон-эффекта*, возникающих при взаимодействии электронов с магнитным полем.

Существуют ли античастицы в составе космических лучей? Их присутствие могло бы свидетельствовать о наличии во Вселенной значительного количества антивещества. Сейчас имеются лишь надёжные экспериментальные данные о существовании в составе космических лучей антипротонов в ограниченном диапазоне энергий.

Поиск античастиц с массами тяжелее антипротонов — задача будущих экспериментов. Пока можно лишь отметить, что в космическом эксперименте AMS-02 на борту Международной космической станции обнаружено всего несколько частиц, которые могут быть изотопами антигелия-3. Если удастся с хорошей достоверностью определить реальное содержание античастиц в космических лучах, то это будет очень важным результатом для проверки современных космологических теорий.

4.3. Энергия ядер космических частиц

Космические лучи имеют громадный диапазон энергий: от $\sim 10^6$ до, по крайней мере, $\sim 10^{21}$ эВ. Для упрощения в «энергетической терминологии» используют следующие единицы:

10^3 эВ кэВ — килоэлектронвольт

10^6 эВ МэВ — мегаэлектронвольт

10^9 эВ ГэВ — гигаэлектронвольт

10^{12} эВ ТэВ — тераэлектронвольт

10^{15} эВ ПэВ — петаэлектронвольт

10^{18} эВ ЕэВ — эксаэлектронвольт

10^{21} эВ ЗэВ — зитаэлектронвольт

Для ядер, тяжелее протона, также часто используют единицы эВ/нуклон, т.е. это — полная энергия частицы, разделённая на число нуклонов в ядре. По сути, это скорость частицы.

Для того, чтобы представить масштаб величин энергий космических лучей, достаточно взглянуть на таблицу 4.2, из которой видно, что максимальная измеренная энергия космических лучей превышает энергию, доступную в наземных экспериментах, на 7 порядков.

Энергия самой энергичной частицы из Вселенной, зарегистрированной в наземных экспериментах ($3 \cdot 10^{20}$ эВ) приближается к энергиям макромира — она сопоставима с кинетической энергией шайбы массой 200 г брошенной клюшкой профессионального хоккеиста!

Таблица 4.2. Энергия различных видов излучений

Вид излучений	Энергия, эВ
Ультрафиолет от Солнца	≈ 1
Электроны в телевизионном кинескопе	$\approx 10^4$
Максимальная энергия пучка протонов, полученная в наземных ускорителях	$\approx 1,4 \cdot 10^{13}$
Максимальная измеренная энергия космических лучей	$\approx 3 \cdot 10^{20}$

Важнейшей характеристикой космических лучей является энергетический спектр — зависимость между потоком частиц (F) и их кинетической энергией (E). Направленный дифференциальный поток определяется количеством частиц dN с энергией в диапазоне от E до $E + \Delta E$, падающих на единицу площади в единицу времени t и в единице телесного угла $d\Omega$.

В отличие от дифференциального, интегральный — поток частиц проинтегрированный по энергии.

Ввиду большого диапазона изменения потоков и энергий космических лучей энергетические спектры частиц принято изображать в двойном логарифмическом масштабе, т.е. $\lg F(E) = f(\lg E)$. Наиболее часто для аппроксимаций используется степенная функция, т.е. $\lg F(E) \propto \lg E^{-\gamma}$, где γ — показатель спектра. В двойном логарифмическом масштабе степенная функция имеет вид прямой линии с наклоном γ .

Рассмотрим некоторые обобщающие сведения об энергетических спектрах космических лучей.

Если просуммировать потоки F всех частиц космических лучей (без разделения по Z), измеренных в различных экспериментах (рис. 4.3), то мы получим в двойном логарифмическом масштабе практически прямую линию для наклона спектра в виде

$$F(E) \propto E^{-\gamma}$$

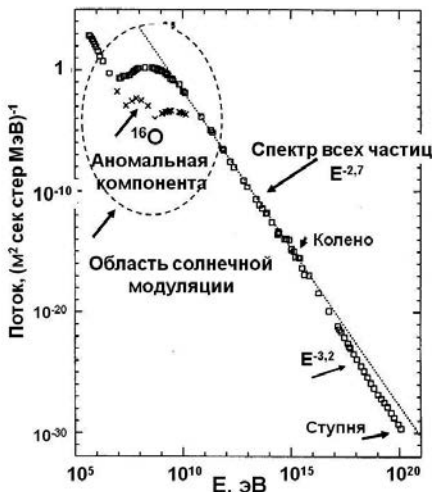


Рис. 4.3. Дифференциальный энергетический спектр «всех частиц» космических лучей, т.е. без разделения их на отдельные компоненты. При энергиях более 10^{10} эВ он имеет наклон $E^{-2,7}$, испытывая изменение (показатель степени увеличивается) в районе колена ($\sim 10^{15}$ эВ). При этих энергиях потоки частиц очень стабильны, а в области энергий менее $\sim 10^{10}$ эВ испытывают значительные вариации под действием солнечной активности. Предельная зарегистрированная энергия космических частиц в районе «ступни» составляет $3 \cdot 10^{20}$ эВ.

т.е. показатель γ практически постоянен и равен примерно 2,7 в широком (10 порядков!) диапазоне энергий. На самом деле это не так. И вскоре мы это увидим.

Интересно отметить, каковы потоки частиц при различных энергиях. Так, при энергии в ПэВ-ной области – 1 частица на 1 м^2 в 1 год, но при близких к максимальным энергиям, при нескольких ЕэВ, это 1 частица на 1 км^2 в 1 год.

Из экспериментальной физики известно, что для получения достоверного результата необходимо набрать достаточную статистику событий, т.е. зарегистрировать число событий с ошибкой, значительно меньшей по сравнению с измеряемой величиной. Известно, что ошибка Δn измерений числа n событий может быть выражена формулой $\Delta n = n^{1/2}$. Можно себе представить, какого размера должна быть установка и сколько времени должен продолжаться эксперимент, если на верхней границе спектра потоки частиц КЛ столь малы! Очевидно, что это должны быть установки с эффективной площадью регистрации частиц в тысячи квадратных километров. И даже при таких масштабах физикам придётся ждать многие месяцы и, возможно, годы для регистрации хотя бы одной частицы в ЗэВ-ной области энергии.

Выше мы рассмотрели спектр «всех частиц» космических лучей, без его дифференциации на различные компоненты.

На рис. 4.4 показаны энергетические спектры ряда элементов (H, He, C и Fe) – отдельных компонентов КЛ. Здесь представление спектра ограничено ПэВ-ной областью энергий. Обращает внимание наличие максимума в спектре различных ядер при энергиях в 300–500 МэВ. Это так называемый модуляционный пик. О нём будет рассказано в последующих главах.

Обратите внимание, что показатель наклона γ практически одинаков для всех частиц со значением $\gamma \approx 2,7$ до энергий $\approx 1 \text{ ПэВ}$. При этих энергиях, а точнее при энергии $\approx 3 \text{ ПэВ}$, в спектре наблюдается излом – «колено», по терминологии физиков-космиков. Этот излом обнаруживается, прежде всего, в спектре «всех частиц» (т.е. суммарном спектре всех компонентов космических лучей). При энергиях за ПэВ-ной областью спектр становится более крутым ($\gamma \approx 3,2$) вплоть до энергий $\sim 1 \text{ ЕэВ}$.

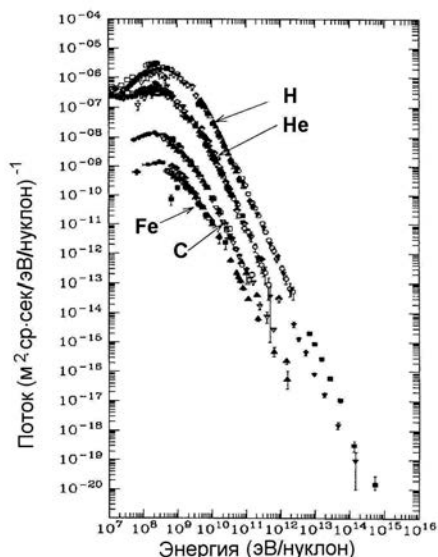
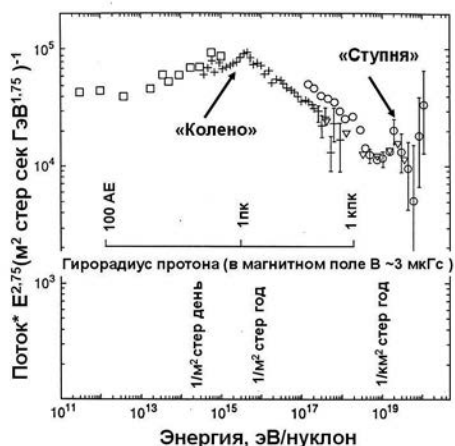


Рис.4.4. Дифференциальные энергетические спектры отдельных компонентов космических лучей (в представлении энергия/нуклон). При энергии около 400 МэВ/нукл наблюдается модуляционный пик.

Рис. 4.5. Дифференциальный энергетический спектр «всех частиц». Хорошо видно «колено» при $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ и «ступня». Потоки частиц резко уменьшаются с увеличением энергии: при $E \sim 10^{19}$ эВ наблюдается лишь 1 частица, падающая на площадку в один км² в год. Приведена шкала гирорадиусов (ларморовских радиусов) протонов в магнитном поле напряжённостью в 3 мкГс. При ультравысоких энергиях $> 10^{19}$ эВ радиусы траекторий протонов должны превышать размеры нашей Галактики.



На рис. 4.5 показан суммарный спектр «всех частиц» космических лучей (без разделения на компоненты), в котором «колено» отчётливо видно при энергии ≈ 3 ПэВ. Данное представление спектра отличается от приведенного на рис. 4.3 только тем, что для наглядности шкала ординат — поток, умножена на коэффициент $E^{2.75}$. Это позволило искусственно представить спектр всех частиц более плоским и, тем самым, более детально показать имеющуюся особенность в спектре («колено») при $E = 3$ ПэВ и «ступню» при $E > 1$ ЕэВ.

Мы вернёмся к теме «колена» и «ступни» в спектре КЛ в последующих разделах, где будем рассматривать методы измерений КЛ и вопросы их происхождения. Пока лишь отметим, что область «колена» примерно соответствует границе предельных возможностей наземных и высотных экспериментов. В области энергий меньших «колена» исследования космических лучей доступны лишь с помощью приборов, устанавливаемых на аэростатах и спутниках, т.е. в верхней атмосфере и в космическом пространстве, а при энергиях больших колена — с помощью наземных методов — измерений ШАЛ.

Открытие «колена» в спектре всех частиц космических лучей в 1956г. принадлежит нашим соотечественникам из Московского государственного университета, работавшим под руководством Г. Б. Христиансена (рис. 4.6). Эта, как оказалось в последующих этапах изучения космических лучей, важная и



Рис. 4.6. Г.Б. Христиансен, первооткрыватель излома («колена») в энергетическом спектре космических лучей. Вместе с Г.В. Куликовым он в 1956 г. обнаружил эту замечательную особенность космических лучей.

наиболее исследованная характеристика, получила название «астрофизическое колено Христиансена».

Уже отмечалось, что в области энергий более ~ 1 ПэВ метод наземных измерений ШАЛ наиболее эффективен для изучения космических лучей. В области меньших энергий «работают» уже прямые методы. На рис. 4.3 квадраты слева от «колена» – космические экспериментальные данные советских «Протонов», перекрывшие большой диапазон энергий вплоть до «колена».

Здесь надо оговориться. Дело в том, что компиляция энергетических спектров, показанная на рис. 4.5, из эпохи 90-х годов прошлого века. Их можно интерпретировать теперь как «нулевое», лишь приблизительное описание энергетического спектра «всех частиц» космических лучей. С тех пор прошло достаточно много времени, и мы стали свидетелями значительного прогресса в экспериментальных возможностях изучения космических лучей. С началом XXI века стали доступны экспериментальные методы исследований космических лучей, по своим возможностям успешно конкурирующие с ускорительными детекторами частиц. Особенно это относится к диапазону энергий до «колена», где прогресс в создании уникальных космических детекторов очевиден. Но об этом будет рассказано далее, а сейчас обратимся к спектрам космических лучей за «коленом».

Сегодня наши представления об этом диапазоне энергий сводятся к следующему. В двойном логарифмическом масштабе спектр «всех частиц» космических лучей может быть описан суперпозицией нескольких спектров: каждый последовательный участок отличается от предыдущего изменением показателя наклона спектра и, как это установлено к настоящему времени, характерным изменением их массового состава. На рис. 4.7 приведен энергетический спектр космических лучей по данным нескольких современных экспериментальных установок.

Астрофизическое колено Христиансена здесь обозначено как E_1 . В настоящее время, благодаря измерениям на наземных установках ШАЛ установлено,

что при энергиях $>E_1$ начинается обогащение ядерного состава космических лучей тяжелыми ядрами. На рис. 4.7 в области энергий $>E_1$ спектр представлен по данным наших отечественных наземных уста-

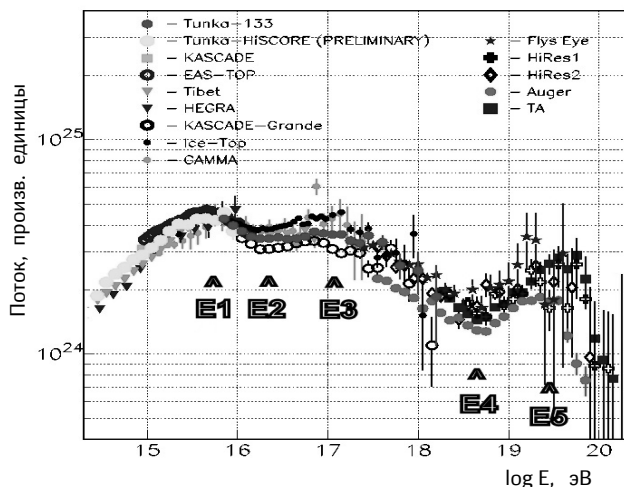


Рис. 4.7. Дифференциальный энергетический спектр космических лучей по данным различных современных экспериментальных наземных установок.

новок Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE в сравнении с другими экспериментами. Более сложный характер спектра космических лучей в этой области энергий, чем это предполагалось ранее, является одним из главных результатов, полученных в последние годы на различных современных установках: Тунка-133, KASCADE – GRANDE, Ice-Cube, а также Якутской. Здесь в спектре космических лучей наблюдаются две статистически обеспеченные особенности. При $E_2 \approx 2 \cdot 10^{16}$ эВ показатель наклона энергетического спектра уменьшается, т.е. спектр становится более жестким, а при энергии $E_3 \approx 3 \cdot 10^{17}$ эВ показатель наклона опять увеличивается примерно на величину 0,3 – спектр смягчается. Уже при энергиях $E_4 > 3 \cdot 10^{18}$ эВ наклон кривой спектра всех частиц вновь становится более жестким – появляется так называемая «ступня». Отметим, что по данным уже многих наземных установок установлено, что именно в этой области наблюдается появление более легкой фракции космических лучей при энергиях $> 10^{18}$ эВ. А при энергиях больше $E_5 \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ наблюдается резкое уменьшение потока космических лучей. Означает ли это «конец» энергетического спектра космических лучей? Об этом мы расскажем далее.

На волне моей памяти

Мое непосредственное соприкосновение с физикой космических лучей высоких энергий произошло на фоне драматических событий в нашем институте. В конце 80-х нам удалось вновь, после эпохальных «Протонов», осуществить крупномасштабные эксперименты по изучению космических лучей с помощью калориметрической методики на спутниках. Это были установки «Сокол-1» и «Сокол-2», размещенные на двух спутниках, созданных в знаменитом Центральном специальном конструкторском бюро в Самаре под руководством Генерального конструктора Дмитрия Ильича Козлова. Эти установки – в значительной степени усовершенствованные детекторы частиц по сравнению с «Протонами» – результат многолетней работы коллектива сотрудников института. Основная цель этих экспериментов состояла в изучении химического состава космических лучей до «астрофизического колена Г.Б. Христиансена» при энергиях до 10^{15} электронвольт.

Запуск прошел успешно и, несмотря на то, что «Соколы» на орбите проработали недолго, была получена очень интересная информация о составе и энергетическом спектре космических лучей. Однако в вопросах интерпретации некоторых данных мнения ведущих специалистов, стоявших во главе проекта, – Наума Леонидовича Григорова и Игоря Павловича Иваненко кардинально разошлись. Расхождение касалось существенной и важной части данных – формы энергетического спектра протонов. Дело в том, что Григоров «видел» излом спектра протонов при энергии около 10^{12} эВ, замеченный им еще в данных «Протонов», а команда во главе с Иваненко отрицала существование этого излома. Многомесячные дискуссии в попытке выяснить существо возникшей проблемы, зачастую превращающиеся в громогласные обвинения в некомпетентности сторон, ни

к чему не привели. Были опубликованы две различные точки зрения и выводы одних и тех же результатов экспериментов.

Для меня был важным этот опыт «неразрешения» научных конфликтов — допустимо ли выносить «сор из избы»? Сейчас я уверен, что наука без свободы развиваться не будет, собственно, как и любое творчество. Это своего рода смелость научных коллективов, допускающих существование различных подходов и точек зрения, что, несомненно, в значительной степени способствует научному прогрессу. Но здесь важно не переступать тонкую грань научной дискуссии и не переходить на уровень бытовых обвинений.

А что касается конкретно мнения Наума Леонидовича, он оказался верен своим выводам до конца жизни, публикуя многочисленные работы на тему «нового колена» в энергетическом спектре протонов.

Вероятно, неприятие окружающими его выводов толкало его на генерацию новых идей по постановке космических экспериментов по изучению космических лучей этого, важнейшего для понимания их природы, интервала энергий. Ведь если бы это «колено Григорова» действительно существовало, это означало бы смену наших представлений о галактических источниках этих частиц или о характере ядерных взаимодействий при этих энергиях.

Но будущие эксперименты, осуществленные уже после ухода этого замечательного ученого не только не подтвердили его выводов, но показали их прямую противоположность: спектр протонов в этом диапазоне энергий, измеренный с помощью прецизионных экспериментов ATIC, PAMELA и AMS -02, не становился более крутым, согласно Григорову, а наоборот, — более жестким. Однако я думаю, будь Григоров жив, он бы непременно продолжил бы искать узкие места и в этих экспериментах. Все дело в том, что Григоров был настоящим физиком — его физическая интуиция, знания, наряду с инженерной подготовкой, были безграничны по своим возможностям. Он — прямая противоположность современным «интерпретаторам», не «чувствующих» самого прибора. Однако известно, что и гении ошибаются...

Глава 5. Откуда вы, странники Вселенной?

Каждый дурак знает, что до звёзд не достать,
а умные, не обращая внимания на дураков, пытаются.

Г.-Х. Андерсен

Вопрос об источниках космических лучей, безусловно, волновал и первых исследователей, продолжает волновать и современных учёных. Можно сразу сказать, что сегодня стройного и исчерпывающего объяснения происхождения космических лучей нет. Исследования продолжаются...

5.1. Поиск звёзд на небе

Подчеркнём основные вопросы, на которые следует получить ответы для выяснения природы космических лучей:

1) Какие астрофизические объекты ответственны за генерацию космических лучей; где они расположены – в нашей Галактике или за её пределами?

2) Как можно ускорить частицы до максимально наблюдаемых, т.е. до ЗэВ-ных энергий; существуют ли частицы больших энергий?

Эти два вопроса являются, пожалуй, основополагающими для физики космических лучей.

Идея галактического происхождения космических лучей доминировала на всём протяжении их исследований. Во главу угла здесь ставились, прежде всего, энергетические соображения. В нашей Галактике и в других галактиках сосредоточены мощнейшие астрофизические объекты, способные обеспечить необходимой энергией те частицы, которые, путешествуя в космическом пространстве, достигают Земли.

Выше уже отмечалось, что вещество находится в Галактике в атомарном состоянии и под действием ультрафиолетового излучения звёзд ионизируется (от нейтральных атомов отрываются электроны и они становятся ионами, имеющими электрический заряд). Так, например, до 90% водорода составляют его ионы – протоны. Часть энергии этого ионизированного газа – плазмы – конвертируется в магнитную энергию, так возникает магнитное поле межзвёздной среды. Электрическая проводимость этой среды столь велика, что магнитное поле «следует» за потоками плазмы: физики в этом случае говорят о «вмороженности» магнитного поля в межзвёздную плазму.

Движение плазмы с магнитным полем далеко от однородного, ламинарного потока, оно в большей степени хаотичное, т.е. турбулентное. Однако есть доказательства существования почти однородного крупномасштабного поля вдоль магнитного поля спиральной дуги.

Какова средняя величина напряженности B межзвёздного магнитного поля? Отметим, что величина B имеет принципиальное значение для проблемы генерации космических лучей – она связана с предельной энергией ускоренных частиц (об этом мы поговорим в следующем разделе). В 1953 г. С.Чандрасекар и Э.Ферми оценили интенсивность магнитного поля в $6 \cdot 10^{-6}$ Гаусс =

6 мкГс на основе исследования баланса между магнитными и гравитационными эффектами в спиральном рукаве Галактики. Согласно современным оценкам, $B \approx 3 \text{ мкГс}$. Считается, что в гало магнитное поле значительно меньше. Однако существуют и другие точки зрения. Так, например, утверждается, что в нашей Галактике, вблизи Солнечной системы $B \approx 6\text{--}7 \text{ мкГс}$, а в других галактиках где-то между 1 и 10 мкГс.

Если космические лучи рождаются в Галактике, заполняют её и удерживаются в ней, то можно оценить соотношение плотности кинетической энергии самих космических лучей, магнитного поля и распределённого в Галактике вещества. Плотность энергии магнитного поля $\sim B^2/8\pi$, где B — напряжённость межзвёздного магнитного поля Галактики. Оценки показывают, что они близки по величине и составляют $\approx 1 \text{ эВ/см}^3$ (или $\approx 10\text{--}12 \text{ эрг/см}^3$). Отсюда следует первый вывод, что космические лучи — существенная часть материи Галактики.

Можно оценить мощность источников, необходимую для получения такой плотности энергии космических лучей в объёме Галактики. Оказалось, что при размерах нашей Галактики с её толщиной, равной 300 пк и радиусом 15 кпк, величина мощности $\approx 10^{41} \text{ эрг/с}$. С какими астрофизическими объектами сопоставима эта гигантская мощность энергии? Может ли Солнце производить столько энергии? Действительно, Солнце генерирует космические лучи во время солнечных вспышек, но предельная энергия космических лучей, ускоряемых на Солнце, до 10 ГэВ. При этом в среднем оно испускает не более 10^{26} таких частиц в секунду (в основном, протонов). Отсюда оценка мощности Солнца $\approx 10^{23} \text{ эрг/с}$. В Галактике около 10^{11} звёзд типа Солнца, т.е. предельная мощность всего конгломерата звёзд не должна быть больше 10^{34} эрг/с .

И всё же в нашей Галактике есть необходимые источники энергии, это сверхновые звёзды.

5.2. Сверхновые старые звёзды

Это удивительно, но задолго до выяснения состава самого космического излучения появилась идея о сверхновых, как его источниках. Об этом упоминалось в Главе 2. Именно в начале 1930-х Фред Цвикки в лекциях для аспирантов Калифорнийского технологического института стал называть экстремально яркие вспышки «сверх-новыми». Термин прижился, хотя со временем лишился дефиса. Так что идее о сверхновых, как о звёздах, порождающих космические лучи, уже почти 90 лет.

Когда человек впервые увидел сверхновую?

Наиболее ранняя запись, которая идентифицируется как запись наблюдений сверхновой SN185 (англ.), была сделана китайскими астрономами в 185 году нашей эры.

4 июля 1054 г. в созвездии Тельца вспыхнула звезда по своей яркости сравнимая с Венерой. Она была видна даже днём и оставалась видимой более года. Этот факт отмечен в китайских хрониках. Почти на 900 лет позднее было замечено, что Крабовидная туманность занимает на небе то же самое положение, что и появившаяся звезда в 1054 г. Это могло означать, что газовое об-

Рис. 5.1. Изображение Крабовидной туманности в рентгене. Это газообразная туманность в созвездии Тельца, являющаяся остатком сверхновой SN1054.



лако, сформированное после взрыва звезды, распространяясь в радиальном направлении, с течением времени сформировало объект, который современные астрономы наблюдают как Крабовидную туманность. Современные радиоастрономические данные о дискретных сигналах из этой области подтверждают эту гипотезу: в центре туманности находится *пульсар* — быстро вращающаяся нейтронная звезда диаметром 28–30 км. Её период вращения всего три сотых доли секунды, электромагнитное излучение — от радио- до гамма-диапазона. Расстояние до Крабовидной туманности не менее 6500 световых лет (рис. 5.1). В рентгеновском и гамма-диапазоне свыше 30 кэВ этот пульсар является сильнейшим постоянным источником излучения в нашей Галактике. Крабовидную туманность первым наблюдал астроном Джон Бевис в 1731 году, и именно он отождествил ее с взрывом звезды.

Наиболее масштабное явление наблюдалось в 1937 г., когда в галактике IC4182 появилась сверхновая с яркостью излучения, во много раз превышающей яркость самой галактики.

Другие сверхновые звёзды — SN1572 и SN1604 были видны невооружённым глазом и имели большое значение в развитии астрономии в Европе, так как были использованы в качестве аргумента против аристотелевской идеи, гласившей, что мир за пределами Луны и Солнечной системы неизменен. Иоганн Кеплер начал наблюдение SN1604 17 октября 1604 года. Это была вторая сверхновая, которая была зарегистрирована на стадии возрастания блеска (после SN1572, наблюдавшейся Тихо Браге в созвездии Кассиопеи). 23 февраля 1987 г. в Большом Магеллановом облаке (Сверхновая 1987A) — на расстоянии ~50 000 пк ($\approx 150\,000$ световых лет).

К настоящему времени астрономы насчитали более 900 сверхновых и практически все они наблюдались в других галактиках! Но эта цифра подвергается сомнению ввиду того, что она не отражает результаты систематического поиска. Сейчас обсерватории мира, следящие за «подозрительными» галактиками, обнаруживают ежегодно от 20 до 60 сверхновых.

А в нашей Галактике? Сколько вспышек сверхновых наблюдалось в «нашем доме»? Внутри нашей Галактики за последние сотни лет вспыхнули, по крайней мере, две сверхновые, звезда Тихо Браге в созвездии Кассиопея в 1572 г. (рис. 5.2) и звезда Кеплера SN1604 в 1604 г. Она оказалась последней звездой, взорвавшейся в нашей Галактике, — после нее сверхновые загорались лишь

Рис. 5.2. Историческая сверхновая, которую наблюдал датский астроном Тихо Браге (1546–1601 гг.) в 1572г. Оказалось, что это сверхновая I типа.

за пределами Млечного Пути. Ее яркость была столь велика, что превосходила яркость всех звезд и планет, за исключением Венеры. Тщательное исследование китайских астрономических записей свидетельствует, что до Сверхновой 1054 г. были ещё, по крайней мере, 3 взрыва сверхновых звёзд: в 185, 369 и 1006 гг. Из этого следует, что в нашей Галактике взрывы сверхновых происходят 1 раз в 3–4 столетия. Но на самом деле они происходят чаще. Возможно, некоторые взрывы сверхновых происходят в удалённых частях Галактики, оставаясь незамеченными наблюдателями с Земли.



Всего, начиная с 185 г., в нашей Галактике по разным источникам зафиксировано 10 вспышек сверхновых звезд. Но данные радиоастрономии свидетельствуют о существовании в нашей Галактике 46 остатков сверхновых. Полагая, что вероятность взрывов одинакова во всей Галактике, получится от 1 до 5 появлений сверхновых за столетие. Астрономы утверждают, что интересным кандидатом в сверхновые в Галактике может быть красный гигант Betelgeuse (или Alpha Orionis), в созвездии Орион. Что ж, если эта статистика верна, осталось ждать недолго.

Существуют 2 типа сверхновых. Сверхновые типа II вспыхивают в несколько раз чаще, чем сверхновые типа I, обладают большей яркостью и массой по сравнению со сверхновыми типа I. Скорость расширения газовой оболочки, возникающей при взрыве сверхновой типа II, достигает ~5000 км/сек, а для сверхновых I типа – 1000–2000 км/сек. Если масса сверхновых I типа близка к солнечной массе, то для сверхновых II она оценивается в 30 солнечных масс. Сверхновые I располагаются в популяциях старых звёзд, в то время как сверхновые II типа – среди молодых, в рукавах спиральных галактик.

Полагают, что для обоих типов сверхновых энергия взрыва обеспечивается гравитационным коллапсом умирающей, старой звезды.

Вспышка сверхновой это гибель старой звезды в процессе её эволюции. Поэтому, сверхновая вовсе и не звезда, а газопылевое облако, расширяющееся в пространстве. В главе 1 уже рассказывалось, что теория эволюции звёзд предполагает следующий сценарий: по мере выгорания водорода и других лёгких элементов в процессе термоядерной реакции внутри звезды – красного карлика – происходит синтез более тяжёлых элементов, а затем, вследствие истощения мощности термоядерных реакций, начинают преобладать гравитационные силы. Происходит коллапс. Звезда сбрасывает свою оболочку из лёгких элементов, а внутренняя часть, более тяжёлая, превращается в нейтрон-

Рис. 5.3. Изменение светимости сверхновых звезд от времени и изображение сверхновой SN 1987 по наблюдениям 1991 г.



ную звезду, состоящую из нейтронов с железной внешней оболочкой. Ударная волна разгоняет вещество оболочки до скоростей, превышающих параболическую скорость (скорость освобождения), поэтому оболочка отрывается от звезды и сбрасывается в межзвездное

пространство. Именно так, в конечном счете, и происходит взрыв звезды. Что видит человек на Земле в это время? Взрыв звезды проявляется в резком увеличении ее светимости, которая постепенно уменьшается — звезда «гаснет».

В результате взрыва сверхновой высвобождается $\approx 10^{51}$ эрг в виде кинетической и электромагнитной энергии. Взрыв последней сверхновой, SN1987, оценивается в $\approx 10^{52}$ эрг. Можно отметить, что такое количество энергии наше Солнце вырабатывает за миллиарды лет! Светимость сверхновой звезды возрастает в десятки миллионов раз, что может превышать светимость всей Галактики. На рис. 5.3 вы можете видеть остатки сверхновой SN 1957 через 4 года после того, как ее впервые заметили.

Если сверхновые в Галактике взрываются один раз в 30–40 лет, то выделяемая при этом средняя мощность составляет $\approx 10^{42}$ эрг/сек. Сопоставим это с полученной выше оценкой $\approx 10^{41}$ эрг/сек мощности, необходимой для поддержания наблюдаемой плотности энергии космических лучей.

Сколько энергии нужно, чтобы «поддерживать» существование космических лучей во Вселенной? Решением этого вопроса занялись Виталий Лазаревич Гинзбург и Сергей Иванович Сыроватский, работавшие в знаменитом Физическом институте им. П.Н. Лебедева в Москве. Именно они показали, что достаточно всего 10% мощности взрыва сверхновой, чтобы космические лучи могли «существовать» в Галактике. Именно эти энергетические соображения являются отправной точкой при рассмотрении наиболее явных кандидатов — сверхновых звезд на роль источников космических лучей во Вселенной.

Тем не менее, многие полагают, что не только сверхновые могут быть источниками космических лучей во Вселенной. И даже есть те, кто отрицает их роль в генерации космических частиц во Вселенной. Но такая уж роль науки — тернистый и извилистый путь познания, когда доказательства сменяются отрицанием или когда появляется нечто новое, затмевающее все предыдущее.

Мы еще вернемся к источникам космических лучей, а пока давайте разберемся, как взрывы сверхновых звезд могут ускорять космические лучи.

Глава 6. Пушки Вселенной

Ничто не происходит без достаточного основания.

М.В. Ломоносов.

Помимо высвобождения огромной энергии, взрыв сверхновой звезды сопровождается генерацией крупномасштабных магнитных полей — своеобразных магнитных облаков в окрестности места взрыва и ударной волной — расширяющейся с высокой скоростью в межзвёздном пространстве плазменной оболочкой. Именно с этим явлением, в первую очередь, и связан процесс ускорения частиц во Вселенной.

6.1. Космический ускоритель — Пэватрон

Впервые идею ускорения космических лучей в результате множественных отражений от движущихся магнитных облаков выдвинул Э.Ферми в 1949 г. Вкратце этот механизм ускорения можно представить следующим образом.

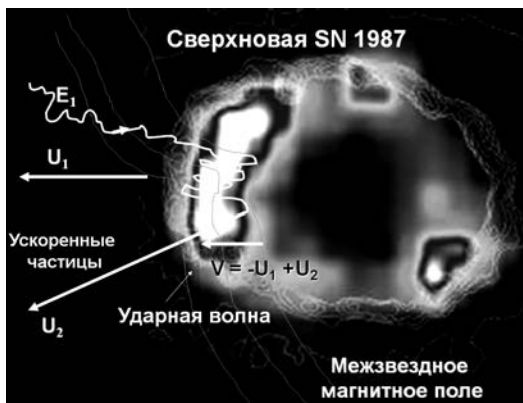
Космические частицы, блуждая во Вселенной, сталкиваются с магнитными облаками в межзвёздной среде. Можно показать, что при многократных, случайных столкновениях энергия частиц будет увеличиваться. Причём энергетический спектр частиц будет степенным, что согласуется с результатами экспериментальных исследований космических лучей. Это механизм ускорения Ферми первого порядка.

Наиболее эффективно ускорение космических лучей происходит не на ранней фазе взрыва сверхновой, а на последующих, более поздних стадиях, по мере расширения плазменной оболочки.

Не так давно ученым удалось измерить скорость распространения оболочки от взрыва одной из сверхновых — RCW 86, расположенной вблизи созвездий Циркуль и Centaвр, с помощью наземного телескопа ESO в Чили и космического — «Чандра». Она оказалась близка к $1/3$ скорости света. Интерес к этой сверхновой был обусловлен и тем, что ее «родительская» звезда наблюдалась еще древними китайским астрономами. Она была видна невооружённым глазом в течение 8 месяцев.

Процесс ускорения частиц в замкнутом объёме расширяющейся оболочки продолжается до тех пор, пока магнитное поле внутри не сравняется с внешним, межзвёздным магнитным полем. После этого начинается процесс «утечки» космических лучей из замкнутого объёма оболочки сверхновой в галактическое пространство. Возникает диффузия частиц на магнитных неоднородностях межзвёздной среды, обусловленных существованием здесь дрейфующих плазменных облаков. Частицы «забывают» о своём происхождении и распределение их скоростей в пространстве становится изотропным, т.е. они распространяются без выделенного направления движения. Электроны, преимущественно высокоэнергичные, в процессе распространения теряют энергию вследствие генерации синхротронного излучения, а ядра — в результате столкновений. Это означает, что с течением времени, по мере распространения частиц в

Рис.6.1. Остатки взрыва сверхновой звезды SN1987. На рисунке показана качественная картина механизма ускорения частиц Ферми I рода на ударной волне — внешней оболочке сверхновой, распространяющейся в Магеллановом Облаке. Снимок получен рентгеновским телескопом на спутнике «Chandra».



межзвёздной среде, их химический состав и энергетическое распределение изменяются. Следовательно, состав и энергетические спектры космических лучей, наблюдаемые нами в районе Земли, должны отличаться от спектров, характерных для источника — сверхновой, на ранней фазе её развития.

А тем временем всё новые и новые сверхновые звёзды взрываются во Вселенной, пополняя «свежими» частицами межзвёздное пространство. Так качественно выглядит процесс генерации космических лучей в галактиках.

Однако этот механизм слишком медленный, т.е. частицы набирают энергию за достаточно длительное время. Оценки показывают, что за несколько миллионов лет их энергия увеличиться не более чем в несколько раз.

Версия более эффективного ускорительного механизма типа Ферми была предложена в 70-х годах Гермогеном Филиппычем Крымским и другими исследователями. В рамках этого механизма частицы дополнительно ускоряются за счёт взаимодействия с сильной ударной волной, распространяющейся в среде межзвёздного газа (рис. 6.1).

К каким количественным оценкам приводит нас процесс ускорения частиц вблизи фронта ударной волны сверхновой? Представим себе частицы с энергией E_1 , которые движутся из области изотропного распределения через фронт волны в её внутреннюю область. В результате взаимодействия частиц с ударными волнами сверхновой они увеличивают кинетическую энергию. Некоторые частицы остаются за волной, не испытывая ускорения, но другая часть, ускоренная до величины E_2 , пересекает ударную волну в обратном направлении. В результате одного цикла происходит приращение энергии ΔE частицы на величину:

$$\Delta E/E = 4(U_1 - U_2)/3c,$$

где U_1 — скорость ударного фронта, U_2 — скорость газа за фронтом, причём ($U_2 < U_1$) и c — скорость света. Затем частицы, оказавшиеся перед волной, захватываются ею. Возникает новый цикл ускорения. Многократное повторение этого процесса может привести к значительному увеличению энергии частицы.

Подробный анализ такого механизма приводит к следующей формуле, демонстрирующей верхний достижимый предел ускорения частиц: $E_{\max} = BLZ$, где B — напряженность магнитного поля, L — характерный размер области ускорения для протонов, Z — зарядовое число ядра.

Для межзвёздного магнитного поля $B \approx 3$ мкГс формула даёт оценку $E_{\max} \approx Z \cdot 10^{14}$ эВ. Таким образом, согласно этой модели протоны космических лучей могут быть ускорены до энергий не выше 0,1 ПэВ. Однако здесь заложена некоторая неопределённость, связанная с отсутствием надёжных сведений о величине B . Возможно, значение B несколько превышает принятое сейчас в ряде моделей значение $B \approx 3$ мкГс. В этом случае $E_{\max}$ будет больше, чем приведенная выше оценка.

Есть одна трудность в основе предложенных механизмов ускорения типа Ферми. В них рассматривается модель распространения ударной волны в межзвёздной среде, уже содержащей частицы высоких энергий. Другими словами, теоретиками задается некий «предускоренный» спектр частиц, или «спектр инжекции», происхождение которого, вообще говоря, неясно.

Важное следствие данной модели состоит в том, что энергетические спектры ядерных компонентов в районе $E_{\max}$ должны испытывать так называемый «скейлинг» – с увеличением заряда ядра Z или его массы сама величина $E_{\max}$ в размерности полной энергии должна быть разной для различных ядер. С увеличением Z $E_{\max}$ увеличивается. Эти выводы качественно демонстрируются на рис. 6.2, где показан экспериментальный энергетический спектр «всех частиц» и модельные представления энергетических распределений отдельных компонентов космических лучей.

Что это означает для физики космических лучей? Мощность сверхновых звёзд ограничивает возможность ускорения частиц областью энергетического спектра в районе «колена» (~ 3 ПэВ). Но из экспериментальных данных следует, что спектр «всех частиц» продолжается вплоть до ЗэВ-ных энергий. Следует принять во внимание следующее соображение. В реальности происходит процесс взаимодействия частиц с ударными волнами от многих сверхновых звёзд, распространяющихся в галактиках. Поэтому $E_{\max}$ может ещё больше возрасти. Теоретические оценки показывают, что в условиях взаимодействия космических лучей с конгломератом ударных волн $E_{\max}$ может достигать величины ~ 10 – 100 ПэВ/нуклон, но не больше.

Экспериментальным доказательством ускорения частиц на фронте ударной волной от вспышки сверхновой явля-

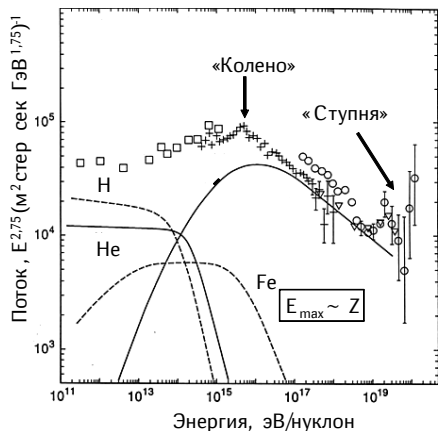


Рис. 6.2. Экспериментальные энергетические спектры всех частиц (различные знаки) и модельные расчёты ускорения различных компонентов (H, He и Fe) космических лучей в остатках сверхновой. Каждый компонент испытывает излом, соответствующий максимальным возможностям космического Пэватрона в соответствии с законом $E_{\max} \propto Z \cdot 10^{14}$ эВ, т.е., чем тяжелее частицы, тем при больших энергиях должно наблюдаться «колено» для конкретного типа частиц. Спектр частиц при больших энергиях («новый компонент») может быть связан с частицами внегалактического происхождения и с существованием во Вселенной ускорительного механизма более мощного, чем взрывы сверхновой.

ется, пожалуй, замечательная фотография остатков сверхновой SN1987, полученная рентгеновским спектрометром на спутнике «Чандра» (см. рис. 6.1). На этом снимке яркие области представляют собой нетепловое рентгеновское излучение. Это синхротронная эмиссия — излучение, вызванное взаимодействием электронов с окружающим магнитным полем на фронте ударной волны. Магнитные поля искривляют траектории движения частиц, и они излучают электромагнитные волны. Энергия синхротронного излучения зависит от напряжённости магнитного поля в районе ударной волны и ускорения заряженной частицы. Поэтому наблюдаемое свечение в рентгене остатков сверхновых действительно демонстрирует ускорение частиц на фронте разлетающейся ударной волны.

Итак, основными кандидатами на роль ускорителей космических лучей во Вселенной выступают сверхновые звёзды. Их взрывы действительно создают условия для ускорения частиц — галактических космических лучей до ПэВ-ных энергий, т.е. это своего рода **Галактический ускоритель — Пэватрон**.

Но сверхновые, как другие объекты Вселенной, — разные. Разные, прежде всего, по таким характеристикам как энергия взрыва, светимость, скорость разлёта оболочки, её состав и пр. Так, взрыв сверхновой, наблюдавшийся в 1997 г. (звезда SN1997), по своей энергии ($\sim 3 \cdot 10^{52}$ эрг) в десятки раз превосходил среднее значение, характерное для сверхновых. В последние годы открыты, по крайней мере, 3 сверхновых, обладающие огромными скоростями разлёта оболочек, превышающими 30 000 км/сек. Они получили название гиперновых, т.е. звёзд со сверхмощной энергетикой взрыва. Вполне возможно, что это отдельный класс звёзд, отличающийся от «обычных» сверхновых. Очевидно, что от энергии взрыва в первую очередь зависит максимальная энергия космических лучей (доля энергии остатка сверхновой, «передаваемая» космическим лучам, может достигать десятков процентов).

Поэтому, если принять гипотезу рождения космических лучей в результате множественных взрывов сверхновых и гиперновых, можно ожидать зависимости формы результирующего энергетического спектра частиц от статистического распределения взрывов звёзд различного типа. В связи с этим интересно заметить, что оценки приводят к заключению, что всего лишь несколько процентов гиперновых при средней частоте их взрывов, не превышающей одного в 10 тысяч лет, могут обеспечить наблюдаемый поток космических лучей.

Есть ещё один наблюдательный факт — временная корреляция взрывов сверхновых, связанная с тем, что существуют повышенные концентрации таких звёзд в скоплениях. Происходящий в таких скоплениях взрыв одной сверхновой порождает взрывы близлежащих звёзд-соседей. Срабатывает своеобразный триггер, вызывающий «вселенскую» лавину взрывов. При этом в межзвёздной среде распространяется «суперпузырь» остатков гибнущих звёзд...

Такие «суперпузыри» могут разгонять космические частицы до энергий, значительно превосходящих энергию «колена» или, другими словами, традиционного Пэватрона — одиночной сверхновой со средней энергией взрыва. К тому же и магнитное поле в окрестности «суперпузыря» может превышать значения,

Рис. 6.3. Сталкивающиеся галактики NGC 4038/9. Можно предположить, что здесь существуют гораздо более мощные ударные волны, чем в остатках сверхновых.

характерные для средней межзвёздной величины. Некоторые исследователи полагают, что в этих областях поле достигает величин 30–45 мкГс, вместо 3 мкГс, характерных для «обычного» межзвёздного поля.

Во Вселенной, вне пределов нашей Галактики, существуют объекты, где можно ожидать более мощные ударные волны, чем сопровождающие взрывы сверхновых, например, в сталкивающихся галактиках (рис. 6.3).

Хотя такие события происходят во Вселенной очень редко, возможно один раз в сотни миллионов лет, тем не менее, в этих областях можно ожидать ускорения частиц до энергий, превышающих возможности ударных волн от сверхновых. Однако пока мы не располагаем экспериментальными доказательствами такого процесса.

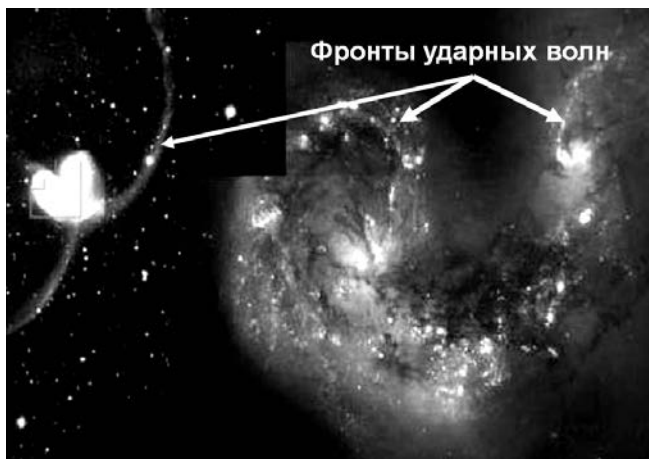
Теперь вернёмся вновь к составу космических лучей.

6.2. Превращения звёздного вещества или о месте рождения и возрасте космических лучей

Частицы космических лучей имеют релятивистские энергии, они преодолевают просторы Вселенной со скоростями, близкими к скорости света. Рождаясь в источнике, космические лучи «наследуют» тот состав вещества, из которого состоит сам источник. Поэтому, изучая космические лучи, можно судить о химическом составе тех звёзд, которые их образуют. Однако, не всё так просто.

Космические лучи, распространяясь во Вселенной, пронизывают довольно большое количество вещества — межзвёздной пыли, ионизированных облаков и др. Встречая на своём пути другие частицы, они могут вступить в ядерные взаимодействия с ними. Результат — рождение новых частиц. Поэтому очевидно, что состав частиц космических лучей, которые долетают до Земли, может отличаться от того, который образовался в источнике. Это и наблюдается в экспериментах у Земли.

В составе космических лучей мы наблюдаем явный избыток таких элементов, как Li, Be, B, Sc, Ti и ряд других. Особенно много, по сравнению с естественной распространённостью элементов во Вселенной, лёгких — Li, Be и B. Их вообще не следовало бы ожидать в космических лучах, т.к. они должны были «исчезнуть» при рождении — выгореть в результате термоядер-



ных реакций уже при температурах в несколько миллионов градусов. Расчётное относительное содержание этих элементов по отношению к водороду всего 10^{-13} . В табл. 4.1 приводится состав (относительно кислорода) элементов в КЛ и средняя их распространённость во Вселенной (звездах). Как видно, состав ГКЛ явно не согласуется с реальной распространённостью этих элементов.

Модель, которая может объяснить это различие, заключается в следующем. В отличие от других ядер эти частицы не образуются в результате нуклеосинтеза при горении звёзд. Их источник — ядерные реакции, превращающие более тяжёлые ядра в Li, Be, B. Это происходит при взаимодействии протонов ГКЛ с веществом межзвёздной среды.

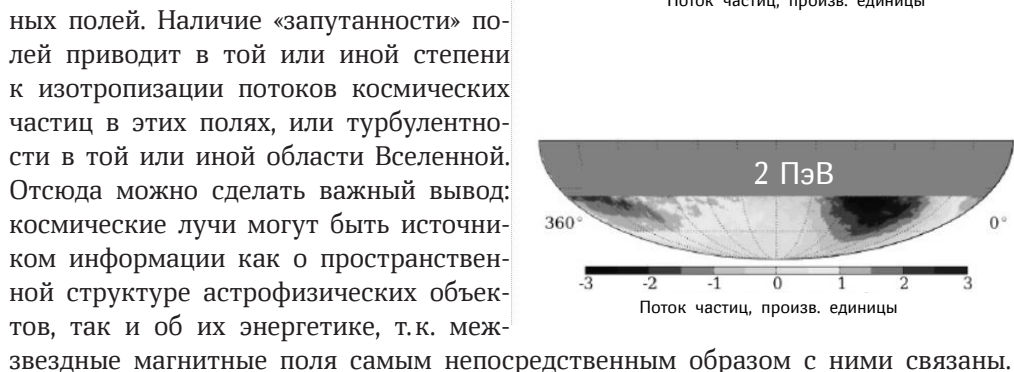
Однако, в связи с образованием вторичных частиц в составе космических лучей, которыми, по сути, и являются Li, Be и B, в процессе их распространения возникает проблема. Она заключается в том, что того количества вещества, с которым должны были бы взаимодействовать первичные частицы из источника, чтобы создать вторичные, просто нет в нашей Галактике. Полная масса всего вещества сквозь всю Галактику в несколько тысяч раз меньше, чем это необходимо для эффективного образования новых частиц.

Ответ заключается в том, что космические лучи, едва появившись на свет, начинают блуждать, запутываться в Галактике. Это им довольно легко сделать, т.к. повсюду в Галактике встречаются неоднородности магнитного поля, заставляющие частицы изменять свои первоначальные траектории, т.е. рассеиваться. Движение частиц приобретает характер диффузии. Модель этого процесса довольно хорошо разработана, что позволяет сравнить её результаты с экспериментом.

Как указывалось выше, минимальная толщина вещества, необходимая для рождения вторичного компонента космических лучей $\sim 5 \text{ г/см}^2$. Исходя из этой величины, можно вычислить длину пути, а затем, зная скорость частицы, определить время её жизни. Однако вещество в Галактике распределено неравномерно: его плотность в диске значительно превышает плотность в гало. Получается некоторый разброс расчётных времен жизни или возраста космических лучей: от сотни миллионов до трёх миллионов лет. Именно такое время — миллионы лет наши странники проводят в Галактике, прежде чем мы сумеем их зарегистрировать на Земле или вблизи неё. Поэтому нет ничего удивительного в том, что космические лучи могут «забыть» о своём месте происхождения во Вселенной: их направление прихода к Земле не совпадает с направлением на источник. Поток космических лучей становится изотропным, т.е. приход их с разных направлений равновероятен. И, тем не менее, анизотропия космических лучей в эксперименте наблюдается.

На рис. 6.4 приведена экспериментально наблюдаемая анизотропия траекторий космических лучей в диапазоне энергий по данным установки, расположенной в Антарктиде, — IceCube. Совершенно очевидно, что пространственное распределение прихода частиц из космоса в окрестности Земли (в данном случае из южной полусферы звездного неба) очень неоднородно. О чем свидетельствует данная картина? Конечно, о структуре межзвёздных магнит-

Рис. 6.4. Анизотропия космических лучей с энергией 400 ТэВ и 2 ПэВ по наблюдениям на Южной обсерватории Ice Cube. Наличие анизотропии потоков космических лучей — очевидно и она связана с неоднородностями магнитных полей во Вселенной.



6.3. Поиски Пэватронов: о чём говорят результаты экспериментов?

Чем дальше эксперимент от теории,
тем ближе он к Нобелевской премии.

Ф. Жоллио Кюри

Что пытаются найти и доказать в своих экспериментах физики? Безусловно, найти доказательства обсуждаемым моделям происхождения космических частиц или... опровергнуть их, или найти подходы к созданию новых.

Галактический Пэватрон — космический ускоритель, разгоняющий частицы в результате взрывов сверхновых, является, пожалуй, наиболее популярным в настоящее время среди физиков. Давайте посмотрим, насколько эксперименты подтверждают эту модель.

В предыдущих главах мы видели, что для изучения космических лучей применяются различные методики. Их можно разделить на 2 класса: метод широких атмосферных ливней (ШАЛ), работающий в области сверхвысоких и ультравысоких энергий (за ПэВ-ной областью), и прямые измерения частиц меньших энергий на аэростатах и спутниках с использованием детекторов, в основе которых лежит калориметрический метод. Оба эти метода перекрывают гигантский диапазон энергий — от сотен МэВ и фактически до предельных, ультравысоких — 10^{20} – 10^{21} эВ.

О чём свидетельствуют эксперименты, основанные на методе ШАЛ?

Мы уже видели (см. рис. 4.5), что в районе «колена» спектры всех частиц по данным ШАЛ довольно хорошо согласуются друг с другом, демонстрируя переход от пологого спектра с $\gamma \approx 2,7$ к более крутому ($\gamma \approx 3,2$). Сегодня экспериментаторы настаивают на том, что спектр всех частиц КЛ может быть опи-

сан *суперпозицией* нескольких спектров: каждый последовательный участок спектра ядер КЛ отличается от предыдущего изменением показателя спектра и, как это установлено в настоящее время, характерным изменением их массового состава (см. рис. 4.6).

Уже известное «астрофизическое колено Христиансена» — изменение наклона спектра всех частиц КЛ при энергии около $3 \cdot 10^{15}$ эВ обозначено на этом рисунке как E_1). В настоящее время, благодаря измерениям на наземных установках ШАЛ, установлено, что при $E > E_1$ начинается обогащение состава КЛ тяжелыми ядрами, что не противоречит теоретическим модельным представлениям о регулярном ускорении частиц КЛ на ударных волнах, образующихся при взрывах сверхновых звезд в Галактике.

Напомним, что максимальная энергия ускоренных частиц не может превышать энергию около $E_{\max} \sim BLZ \approx 10^{14}$ эВ, где B — напряженность межзвездного магнитного поля, оцениваемая в несколько микрогаусс, L — характерный размер области ускорения в магнитных полях межзвездной среды и Z — заряд ядра частицы. Однако современные модели, основанные на эффекте усиления локального магнитного поля в ударных волнах от взрывов сверхновых, позволили увеличить $E_{\max}$ вплоть до $\approx 10^{17}$ эВ за счет особого механизма усиления магнитного поля в расширяющейся оболочке сверхновой звезды.

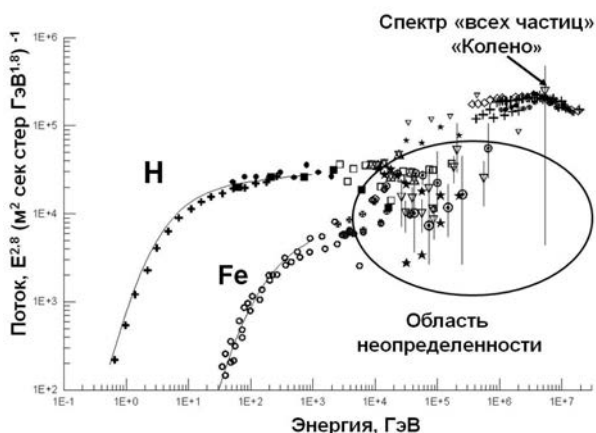
Вариации показателя наклона энергетического спектра КЛ могут свидетельствовать о различных эффектах в КЛ, связанных как с их ускорением, транспортом и потерями, так и с пространственным распределением их источников в межзвездной среде. Тем не менее, экспериментальные данные в области энергий до 10^{18} эВ (характерное, зависящее от Z изменение наклонов спектра и изменение ядерного состава) не противоречат основной парадигме об их галактической природе и определяющей роли сверхновых звезд как основных ускорителей КЛ вплоть до энергий около 10^{17} – 10^{18} эВ. В то же время они могут служить основой для дальнейшей модификации стандартного механизма ускорения космических лучей в остатках сверхновых, а также механизмов их транспорта.

И тем не менее, только экспериментальные данные, и в первую очередь энергетические спектры частиц, по крайней мере от водорода (протонов) до железа, могут окончательно доказать справедливость гипотезы ускорения частиц в остатках сверхновых. Качественно это демонстрируется результатами расчётов на рис. 6.2, где изображены спектры отдельных типов ядер в районе «колена». Это и надо доказать в ходе экспериментов.

Какова ситуация с экспериментальными данными до «колена», т.е. там, где работают только «прямые» методы измерений космических лучей?

На рис. 6.5 наряду со спектром «всех частиц», приведены спектры двух компонентов — протонов (H) и железа (Fe), полученных «прямыми» методами — измерением космического излучения калориметрами и детекторами различного типа. Вблизи «колена» данные рассеяны из-за малой статистики событий. Число частиц, зарегистрированных детекторами, недостаточно для достоверных выводов. Это следствие как малой длительности экспозиции на аэростатах и

Рис. 6.5. Экспериментальные спектры протонов (H) и железа (Fe) до «колена» не вносят определённости в форму спектра в районе «колена» из-за недостаточной статистики. Требуется проведение экспериментов в области энергий, близких к «колену», с помощью установок большей площади.



спутниках, так и недостаточной площади (светосилы) самих детекторов для надёжной регистрации частиц в области энергий в десятки ТэВ и выше.

Выше уже отмечалось, что диапазон энергий космических лучей до «колена» доступен космическим экспериментам в космосе, в высоких слоях атмосферы и, отчасти, на высотах гор.

Начиная с 2000 г., были осуществлены несколько экспериментов «прямыми» методами». Кроме уже описанного выше (см. Главу 3) аэростатного эксперимента АТИС в Антарктиде, были запущены в космос сложные современные приборы: PAMELA в 2006 г., AMS-02 в 2011 г., наш отечественный «Нуклон» в 2014 г., а также аэростатный CREAM в 2007 г.

Вслед за «Нуклоном» в 2015 г. были запущены CALET и DAMPE в 2015 г. В чем причина интереса экспериментаторов к этому диапазону энергий?

Надо отметить, что после многих лет изучения эта область энергий оставалась относительно неисследованной. Со времени запуска советских «Протонов» в 60-х годах не было ни одного эксперимента с тяжелыми калориметрами, которые помогли бы вновь «прорваться» в область энергий в районе «колена». Те эксперименты, которые были осуществлены в период до 2000 г. не смогли дать исчерпывающих и однозначных сведений об энергетических спектрах частиц и, что важно, об их массовом составе. Эти параметры чрезвычайно важны для ответа на ключевые вопросы о природе космических лучей — процессах ускорения, транспорта и гибели.

С другой стороны, развитие ядерно-физических методов регистрации частиц позволило создать детекторы, позволяющие с большой точностью измерять их параметры.

К каким же результатам привели эти эксперименты?

В первую очередь они показали более сложную форму спектра, чем это представлялось ранее. «Новейшая» история исследований космических лучей началась с экспериментов АТИС (см. Главу 3). Именно в этом эксперименте впервые было показано, что в ТэВ-ной области энергий спектры протонов и гелия — разные (рис. 6.6). Более того, было доказано, что потоки протонов при энергиях более 10 ТэВ сравниваются!

Данные факты не укладывались в стандартную модель ускорения и распространения космических лучей. Эти результаты были подтверждены в ходе

Рис 6.6. Дифференциальные энергетические спектры протонов и ядер гелия по данным различных экспериментов. При энергиях в ТэВ-ной области наблюдается изменение наклона как спектров протонов, так и ядер гелия. Стрелкой отмечена энергия (несколько сот ГэВ), начиная с которой наблюдается изменение спектров как протонов, так и ядер гелия, а кружком – энергия, при которой потоки протонов и ядер гелия выравниваются

эксперимента PAMELA: действительно, спектры протонов и гелия имели разные наклоны и, как было установлено участниками эксперимента, это изменение начинается при энергиях от 100 до 200 ГэВ.

Если теперь вы вновь обратите внимание на спектры космических лучей на рис. 4.3 и 4.4, то становится очевидным, что масштаб представления спектров частиц на этих графиках не отражает реальной формы спектра космических лучей – спектр имеет более сложную форму, отличную от единого степенного закона. Сейчас это экспериментаторам очевидно, при энергиях в ТэВ-ной области спектр «ломается» (рис. 6.7). Но понадобились годы упорной работы, создание новых прецизионных приборов, чтобы это установить.

Что происходит со спектром КЛ до «колена»? Не является ли это следствием наличия множественных источников КЛ в нашей Галактике – сверхновых звезд с разными параметрами? Тогда то, что мы наблюдаем в их спектральных характеристиках, – суть суперпозиция действий сверхновых разного типа.

В области за «коленом», используя метод ШАЛ, энергетические распределения частиц различных масс можно получить только на основе моделирования процессов развития ливней в атмосфере. Нельзя сейчас утверждать, что разработанные модели адекватно описывают все реально существующие физические процессы в ливне частиц. В моделях существуют неопределённости,

приводящие к неоднозначности конечных результатов. Поэтому нет ничего неожидан-

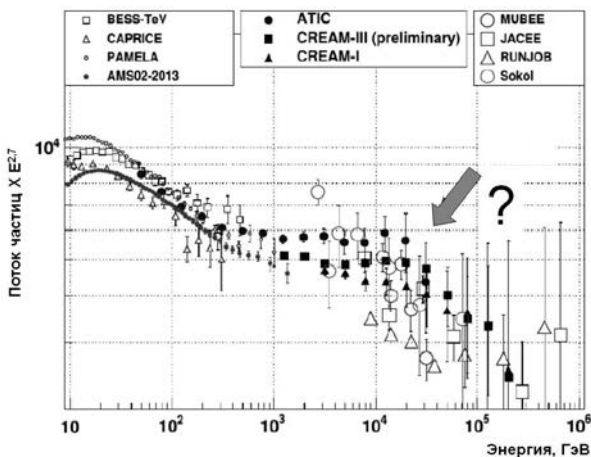


Рис.6.7. Дифференциальные энергетические спектры протонов по данным современных экспериментов. Очевидно отличие спектра от единой формы с постоянным показателем наклона для диапазона энергий от нескольких сотен ГэВ до десятков ТэВ. Вероятно, при энергии около 10 ТэВ намечается изгиб спектра протонов (отмечено стрелкой). Однако при энергиях, приближающихся к колену при $3 \cdot 10^{15}$ эВ, форма спектра пока не определена.

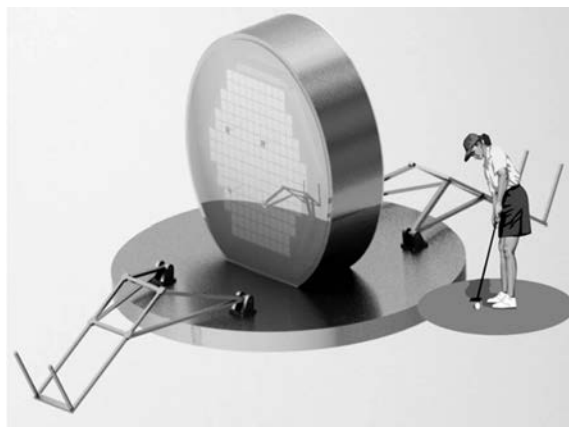
Рис. 6.8. Энергетическая зависимость «средней массы» космических лучей $\langle \ln A \rangle$. Тенденция к утяжелению ядерного состава частиц с ростом энергии явно присутствует, однако неопределенности и особенности в экспериментальных данных, особенно при энергиях меньшей энергии «колена», существуют.

ного в том, что при попытках выделить спектры частиц с разными Z , их формы могут различаться.

На рис. 6.8 приведена зависимость от энергии E «средней массы» частиц $\langle \ln A \rangle$ ($\langle \ln A \rangle$ — расчётная величина, применяемая для оценки химического состава частиц, чем она больше, тем больше в потоке тяжёлых частиц). Обратите внимание на область перед «коленом» — данные прямых измерений имеют здесь неоднозначный характер, нельзя сделать окончательного вывода о том, какова зависимость $\langle \ln A \rangle$ от энергии при таких энергиях, как десятки ТэВ и выше.

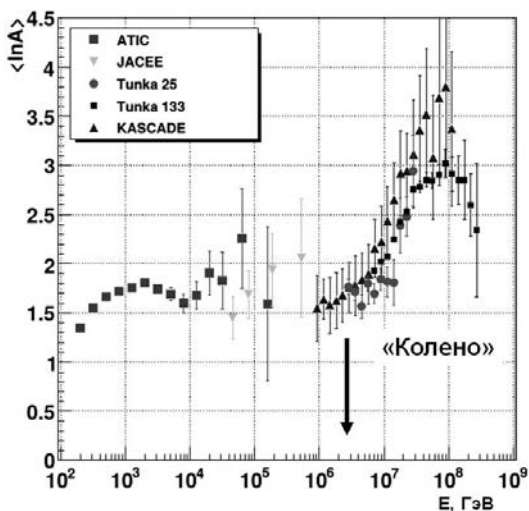
В области за «коленом» к зависимости $\langle \ln A \rangle$ от энергии тоже есть вопросы, связанные с адекватностью моделирования ШАЛ, однако тенденция к увеличению $\langle \ln A \rangle$ с ростом энергии очевидна. Вспомним (см. вновь рис. 6.2), что модели ускорения космических лучей на остатках сверхновых приводят именно к выводу об «утяжелении» состава космических лучей в районе «колена», т.е. средняя масса должна расти с ростом энергии.

Каковы перспективы дальнейших исследований в области «колена»? Безусловно, кардинально решить проблему мог бы запуск в космос большого прибора достаточной площади для измерений вплоть до ~ 10 ПэВ всех основных компонентов космического излучения. Проблема в том, что такой прибор должен весить не менее 10 тонн.



И проекты такие есть. Например, проект ОЛВЭ — «Обсерватория Лучей Высокой Энергии» (рис. 6.9).

Рис. 6.9. ОЛВЭ — крупномасштабная установка для изучения космических лучей в диапазоне энергий в районе «колена» и за ним. Её вес — до 12 тонн.



На волне моей памяти

В 90-х произошло событие, которое на многие годы определило дальнейшую направленность моей научной работы. Это было наше участие в международном эксперименте ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter). История его появления, на мой взгляд, очень нетипична.

После нашего успеха в проекте по изучению аномальных космических лучей, радиоактивного изотопа ^7Be и галактических космических лучей в азростатном эксперименте TIS, мы решили «закрепить успех», инициировав крупный многотонный эксперимент по изучению химического состава космических лучей в районе «Астрофизического колена Христиансена» с помощью космического калориметра. На Международной конференции по космическим лучам в Риме мы с Н.Л. Григоровым собрали совещание, в котором приняли участие представители России, США и Германии. Эта инициатива поддерживалась американской стороной.

Надо сказать, что это была уже вторая попытка инициировать такой проект. Предыдущий «подход» состоялся несколькими годами ранее, но он оказался неудачным. На аналогичном международном совещании под председательством Р.З. Сагдеева во время Международной конференции по космическим лучам в Москве предложение Н.Л. Григорова по осуществлению этого проекта было отклонено по инициативе председателя.

Мы пригласили на совещание Александра Евгеньевича Чудакова, возглавлявшего в то время Совет Российской академии наук по космическим лучам. И неожиданно для всех и в довольно «выразительной» форме Александр Евгеньевич выступил резко против, не особенно мотивируя свое мнение. Это, конечно, был провал совещания и самого проекта. Для меня все это было очень странным и неожиданным, для иностранных коллег очевидным — «у русских нет согласия».

Сейчас, спустя много лет я думаю, почему российский проект рухнул? И не нахожу другого ответа, кроме одного, все дело в «роли личности в истории». Действительно выдающийся ученый, добившийся многих замечательных результатов, Н.Л. Григоров всей своей научной карьерой доказал окружающим невозможность своей работы в коллективе соотечественников. Видимо именно этого и опасались лидеры нашей космической науки, не поддержав этот проект.

Проект «большого калориметра» рухнул, но..., через некоторое время, появился на свет другой — ATIC, но уже во главе с США — Луизианским университетом. Инициировал его, ставший на многие последующие годы нашим коллегой и другом, профессор Джон Вефел. Это был очень удачный проект для физики космических лучей. Но профессор Григоров был с самого начала «в оппозиции» к нему, не вступив в нашу коллаборацию. Тем не менее, его критические замечания сыграли определенную положительную роль в развитии проекта.

Годы нашей работы в международном коллективе проекта АТІС были чрезвычайно плодотворным. АТІС появился, как я уже рассказывал, на «обломках» нашей идеи осуществления крупномасштабного эксперимента с большим калориметром. Небольшая по численности, но очень сплоченная команда АТІС под руководством Вефела сумела в очень короткие сроки осуществить четыре полета аэростатов с нашей установкой в Антарктике.

Проект поддерживался НАСА и, в немалой степени благодаря поддержке сотрудника этой организации, курировавшего направление физики космических лучей, Вернона Джонса. Я хотел бы здесь подчеркнуть, что наше, российское участие в этом проекте стало возможным исключительно благодаря тому, что именно специалисты НИИ ядерной физики МГУ смогли внести достойный вклад в осуществление эксперимента. Наш институт принимал ключевое участие в разработке и изготовлении «железа» для этого эксперимента — полупроводниковой матрицы детектора заряда. А это, в свою очередь, стало возможным только благодаря тому, что часть сотрудников нашего института участвовала в проекте Большого адронного коллайдера в Женеве как на стадии разработки, так и в последующем, в обработке информации. Мы сумели создать технологию производства полупроводниковых детекторов, необходимых для физики высоких энергий. Именно этот факт и сыграл ключевую роль по включению нашего института в состав коллаборации.

...Бытует такое мнение среди научных сотрудников, что участие в коллаборациях — легкий путь для достижения индивидуальных научных достижений. Но, как правило, оппоненты коллабораций «забывают», что само участие в коллаборациях — признание достижений конкретного коллектива и научного сотрудника, сделанного на основе коллективной научной экспертизы самой коллаборации. И не стоит это недооценивать.

6.4. Электронный компонент космических лучей

До сих пор мы обсуждали свойства ядер в космических лучах. А что нам известно про лептонный компонент космических лучей, среди которого электроны и позитроны — не менее интересный объект исследования, чем ядра?

В отличие от ядер, электронов очень мало, не более ~1% полного потока космических лучей. Дело в том, что электроны подвержены очень эффективным потерям энергии в процессе их путешествия во Вселенной. Это и ионизация, и тормозное, и синхротронное излучения, а также комптоновское рассеяние. Именно из-за потерь энергии электроны чрезвычайно «чувствительны» к магнитному полю и межзвёздной материи. Эти поля ограничивают возможность распространения электронов на далёкие расстояния от источников. Ограничения связаны с синхротронными потерями и обратным комптоновским рассеянием: при больших энергиях спектр электронов претерпевает изменения — поток частиц должен уменьшаться с увеличением их энергии. Ожидает-

Рис. 6.10. Спектр электронного компонента космических лучей — синхротронное обрезание при энергиях более 1 ТэВ (отмечено стрелкой).

ся, что это обрезание — «колено» в спектре электронов, будет наблюдаться при энергиях порядка ТэВ, т.е. значительно меньших, чем для ядерного компонента.

До самого последнего времени мы не могли категорично утверждать, что спектр электронов действительно обрезан при энергиях более ~1 ТэВ — статистика в этой области была мала, хотя тенденция формы спектра к обрезанию наблюдалась.

И такие результаты, наконец, появились в 2017 г. Обрезание спектра электронов космических лучей за пределами 1 ТэВ определенно существует! Это удалось показать по результатам регистрации электронов и гамма-квантов в наземных и космических экспериментах (рис. 6.10).

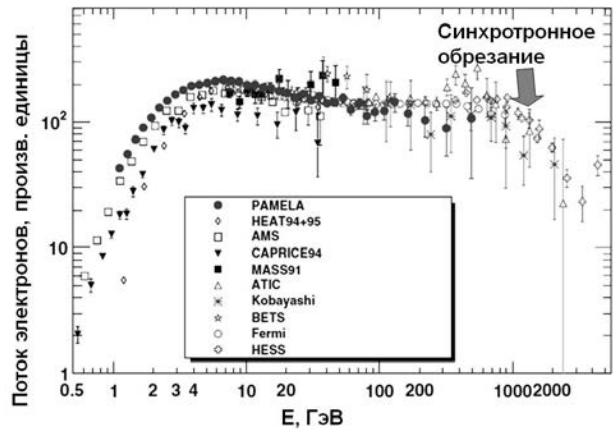
Представим себе, однако, что обрезания спектра электронов не оказалось. Что бы это означало? Этот факт с определённой уверенностью указал бы, что на близких от нас расстояниях действительно существуют источники, генерирующие такие электроны. Наиболее очевидные источники — опять-таки сверхновые, но расположенные на расстояниях менее 430 парсек от нашей Солнечной системы. Это недалеко. Очевидно, что таких сверхновых — кандидатов в источники электронов должно быть очень мало. Оценки показывают, что частота их появления не более 2–5 за последние 300 тысяч лет!

Почти все они в нижеприведённой таблице 6.2. Здесь приведены расстояния до этих звёзд и рассчитанная максимальная энергия генерируемых электронов.

Таблица 6.2. Звёзды — кандидаты в источники электронов космических лучей высоких энергий

Звёзды	Расстояние, парсек	Расчётная макс. энергия электронов, ТэВ
Vela	420	15
Monogem	300	3
Loop 1	170	1,7
Geminga	150	1,0

Они действительно, могли бы «поднять» электронный спектр с «колена» — не дать ему «загнуться» при $E \sim 1$ ТэВ. Но этого не произошло. Но означает ли это, что близких источников космических лучей вообще нет? Пока можно лишь заметить, что нужны дальнейшие исследования, чтобы «закрыть» эту проблему.



6.5. Редкие и драгоценные частицы

Сверхновые порождают космические лучи. Их материалом был, в основном, водород и гелий, появившиеся в эпоху самого Начала — Большого взрыва. А остальные элементы? Про литий Li, Be В рассказано выше. А что с остальными, очень тяжелыми и редкими, заполняющими оставшуюся часть Периодической таблицы? Экспериментальных работ в этой области пока мало. В области зарядов $Z > 40$ зарядовое распределение измерено с низкой статистикой (10–30 событий на одно четное ядро до $Z=60$). Большая часть из них не имела отношения к изотопному составу (только на спутнике ACE он измерен до $Z=32$). В области зарядов $Z > 32$ изотопный состав не изучался совсем. Что касается элементного состава, то он приведен на рис. 6.11. Экспериментальные трудности связаны, как это видно из зарядовых спектров, приведённых на этом рисунке, с чрезвычайно низкими потоками этих редких элементов.

Известно, что они могли появиться как в ходе эволюции звезд, так и при распространении частиц в межзвездной среде. Среди них много нестабильных *изотопов* с разными периодами полураспада. Причем среди сверхтяжелых есть и с довольно коротким периодами. Такие изотопы своего рода «изотопные часы», позволяющие по длине пробега определить расстояние до источника. Так, например, для ^{93}Zr или ^{150}Gd периоды полураспада «всего» 1,5 и 1,8 млн лет, что дает нам оценки их пробегов немногим более 1 кпк. Это относительно недалеко. Поэтому, изучая такие сверхтяжелые изотопы мы, по сути, изучаем *локальную межзвездную среду*, вблизи нашей Солнечной системы, а не удаленные области Галактики в поисках ускорителей и адекватных физических механизмов распространения частиц. Конечно, их изучение важно с точки зрения развития и моделей нуклеосинтеза, такие элементы могли возникнуть уже после эпохи взрыва основной сверхновой, на ее более поздней стадии эволюции. На спутнике ACE была обнаружена аномалия в распространённости изотопов $^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$: она оказалась в 5(!) раз выше, чем в солнечной плазме. Такого рода данные очень важны для выяснения источников космических лучей. В данном случае возможная модель их генерации связывается с ускорением частиц ударными волнами не остатков сверхновых, а из-за их распространения в «суперпузырях» Галактики, обогащенных тяжелыми элементами. Если это так, то это один из возможных дополнительных источников космических лучей.

Поэтому исследование сверхтяжелых элементов в космических лучах — чрезвычайно актуальная задача, она нацелена на решение фундаментальных проблем астрофизики космических лучей.

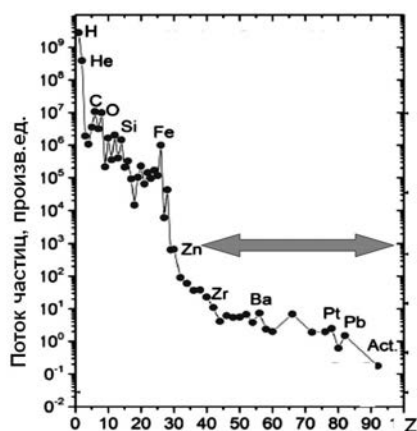


Рис. 6.11. Элементный состав космических лучей вплоть до сверхтяжёлых. Их количество очень мало по сравнению с водородом и гелием.

Глава 7. Мистерия обрезания

Вся правда проходит три стадии:
первая: это – удивительно;
вторая: это то, против чего все;
третья: это принимается как само по себе очевидное.

А. Шопенгауер

Итак, экспериментальные данные указывают на возможность существования в природе частиц с энергиями в «ЗэВы». Именно такую осторожную формулировку применяют учёные к полученным до настоящего времени результатам экспериментов. Но в ожидании новых данных мысль исследователей не стоит на месте и в равной мере рассматривает как возможности их присутствия в природе, так и отсутствия таких частиц... И, тем не менее, они существуют. Эксперимент это доказывает.

А что нам говорит теория? Теория приводит нас к выводу, что частиц с энергией более $5 \cdot 10^{19}$ эВ вблизи нашей планеты вообще не должно быть! Безусловно, возникает вопрос и о самом существовании в природе объектов, способных ускорить частицы до столь гигантских энергий. Рассмотрим эту проблему более подробно.

Насколько велика энергия самой энергичной частицы из Вселенной, зарегистрированной в наземных экспериментах? Стоит заметить, что энергия такой субатомной частицы ($3 \cdot 10^{20}$ эВ) приближается к энергиям макромира: она может разогнать шайбу массой 200 г до скорости 80 км/ч! Где найти такие ускорители – «Зеватроны» во Вселенной?

Частицам с энергией $E > 3 \cdot 10^{18}$ эВ присвоили свое наименование: КЛПВЭ – Космические Лучи Предельно Высоких Энергий.

7.1. Хиллас против Зеватронов

Заряженные частицы космических лучей отклоняются в межзвездных магнитных полях. Даже для частиц с энергиями из ультрарелятивистской области – ЕэВ (10^{18} эВ) и выше на галактических расстояниях заметно отклонение от прямой линии. В магнитном поле с напряжённостью ~ 3 мкГс ларморовские радиусы для частиц с энергией $> 10^{20}$ эВ порядка 1000 парсек (см. рис. 4.5). Это больше, чем толщина диска Галактики (см. рис. 1.7). Поэтому почти с уверенностью можно говорить, что частицы ультравысоких энергий рождаются за пределами нашей Галактики.

Но если всё же допустить, что «Галактический Зеватрон» существует где-то рядом с нами, мы могли бы его «увидеть» по характерному изменению анизотропии потоков частиц с увеличением энергии: по мере приближения к ультравысоким энергиям направления прихода частиц должны всё больше и больше совпадать с галактической плоскостью. Статистически значимых экспериментальных результатов, подтверждающих такую модель, нет. А есть ли вообще во Вселенной кандидаты в «Зеватроны»?

Если не отходить далеко от основного механизма ускорения астрофизических частиц на межзвёздных неоднородностях магнитного поля и/или на ударных волнах (см. главу 6), то, как мы видели, существует проблема ограничения максимальной энергии ускоряемых частиц — $E_{\max}$, определяемой размером области ускорения, скоростью ударной волны, величиной напряженности магнитного поля и зарядом ускоряемой частицы.

Существует так называемая диаграмма Хилласа (рис. 7.1), демонстрирующая возможности астрофизических объектов претендовать на роль космических «Зэватронов». Если частица ускоряется в окрестности какого-либо астрофизического объекта, то её ларморовский радиус должен быть меньше размера этого объекта. Этим геометрическим соотношением и определяется максимально допустимая энергия ускоряемых частиц, т.к. ларморовский радиус, как это мы видели выше, зависит от энергии частицы. Но, с другой стороны, можно показать, что $E_{\max}$ определяется и скоростью распространяющейся ударной волны. Здесь существует прямая зависимость — чем больше скорость волны, тем больше $E_{\max}$.

На диаграмме Хилласа прямыми линиями показаны соотношения магнитное поле B — размер астрофизического объекта L (или ускорительной области), которые необходимы для достижения предельного значения энергии протонов $E_{\max} = 10^{20}$ эВ при двух значениях скоростей ударных волн (в единицах $b = v/c$ — «безразмерная» величина скорости в единицах скорости света) $b = 1/300$ (сплошная линия) и 1 (штриховая), а для ядер железа только при $b = 1$ (точечная линия). Здесь же (на рис. 7.1) в масштабе B и L показаны основные астрофизические кандидаты в «Зэватроны».

Рис. 7.1. Диаграмма Хилласа, демонстрирующая возможности различных астрофизических объектов как ускорителей частиц. Сплошные линии — оценки размеров (в парсеках) и величины магнитного поля (в гауссах) объектов, способных разогнать протоны до энергий в 10^{20} и 10^{21} эВ при скорости ударной волны в 300 раз меньшей, чем скорость света. Точечная кривая — то же для ядер железа. Тёмными пятнами отмечены наблюдаемые размеры и магнитные поля различных астрофизических объектов. Вероятно, что при заданных предположениях о характере самого механизма ускорения (типа Ферми) в известной нам Вселенной нет явного кандидата на роль «Зэватрона». Для сравнения здесь же показаны характеристики работающих на Земле крупнейших ускорителей «Tevatron» и LHC.



Рассматривая в качестве кандидатов на источники космических лучей ультравысоких энергий разные астрофизические объекты, следует принять во внимание возможность замедления частиц в процессе их распространения от источника. В приведённых на рис. 7.1 зависимостях E не учтены возможные потери.

В первую очередь следует учитывать синхротронные потери. Эти потери пропорциональны B^2 , поэтому для компактных астрофизических объектов, в которых магнитное поле чрезвычайно велико, они должны быть весьма ощутимы.

Таковыми объектами могут быть *нейтронные звёзды*. В них магнитное поле может достигать фантастических величин – 10^{12} – 10^{15} Гс (для примера, на поверхности Земли в районе экватора магнитное поле 0,3 Гс). Поэтому из-за синхротронных потерь нейтронные звёзды вряд ли могут быть кандидатами на роль источника частиц с энергией $>10^{20}$ эВ.

Только внешние области радиогалактик и межгалактическая среда имеют достаточно слабые магнитные поля и не создают существенных синхротронных потерь.

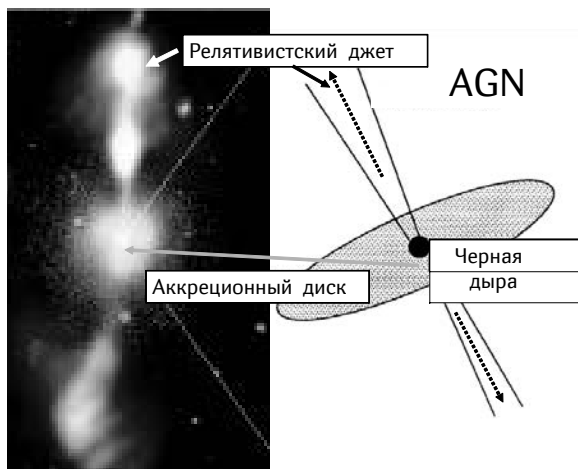
Другой объект – гамма-всплески (Gamma Ray Bursts – GRB) – наиболее мощное в природе явление: в очень короткий промежуток времени – от 0,1 до 100 сек – всплески высвобождают энергию в виде гамма-квантов порядка 10^{52} эрг. Частота всплесков оценивается на уровне ~ 1 – 2 в день. Для полного объёма Вселенной выделение энергии гамма-всплесками составляет величину $\sim 3 \cdot 10^{44}$ эрг Мпк $^{-3}$ в год, что совпадает с полной энергией космических лучей с $E > 10^{19}$ эВ.

GRB могут ускорять протоны и другие заряженные частицы до очень больших энергий. Очень вероятно, что ускорение частиц происходит на ультрарелятивистских ударных волнах, распространяющихся от источника в виде сферы или конуса, однако детали такого ускорения ещё не разработаны. Мы вернемся к их рассмотрению в Главе 9.

Активные галактические ядра (AGN – Active Galactic Nuclei) – другие очень интересные астрофизические объекты. Это целый класс галактик: квазары, блазары, сейфертовские галактики, радиогалактики и ряд других, которые характеризуются очень интенсивным радиоизлучением. Для наблюдателя с Земли они выглядят как звёзды и имеют огромное энерговыделение: от 10^{42} до 10^{48} эрг/сек, что намного больше, чем энерговыделение всего Млечного Пути. Поэтому Активные ядра – один из наиболее ярких известных объектов во Вселенной. Они могут менять свою яркость в течение очень короткого промежутка времени, указывая на то, что эмиссия идёт от объекта протяжённостью не более нескольких световых месяцев.

В течение продолжительного времени считалось, что звёзды – основной источник излучения галактик. В них происходят реакции термоядерного синтеза, и они излучают энергию нагретого газа. Напротив, в Активных ядрах излучение нетепловое, оно в основном в радио- и гамма-диапазонах спектра электромагнитного излучения. Активные галактические ядра можно наблю-

Рис. 7.2. Активные ядра галактик (AGN): слева наблюдаемые, а справа — в модельном представлении. Предполагается, что активные ядра могут быть мощными источниками частиц, генерируемых в релятивистских струях — джетах. Источником энергии является поглощение вещества чёрной дырой, расположенной в центре AGN, из аккреционного диска.



дать в телескопы, в отличие от обычных галактик, они находятся на расстояниях в миллиарды световых лет. Современное объяснение этого астрофизического феномена состоит в том, что ядра в активной стадии содержат сверхмассивные чёрные дыры, в 10^9 масс Солнца. Они окружены аккреционным диском (рис. 7.2). Продолжительность жизни активных ядер невелика, они умирают приблизительно в течение 100 миллионов лет — чёрная дыра «поглощает» всё окружающее её вещество, создавая вокруг себя пустоту.

Наиболее развитые теории предполагают генерацию гамма-квантов на ударных волнах в релятивистских струях (джетах), распространяющихся наружу. Огромная светимость ядер активных галактик также объясняется аккрецией вещества. Большое разнообразие Активных ядер во Вселенной, можно объяснить разнообразием ориентацией джетов относительно наблюдателя на Земле. В блазарах, например, ось джета направлена на нас.

Из анализа наблюдений следует, что радиоисточники образуются в результате выделения энергии в ядре галактики, но не в результате взрыва, а более длительного непрерывного процесса — выбросов струй плазмы с релятивистскими скоростями в двух противоположных направлениях. Возможно, что такая картина обусловлена дипольным характером магнитного поля самого ядра галактики. Наблюдаемая повышенная яркость внешних краёв структуры связана, вероятно, с существованием плазменных облаков на периферии объекта, которые вращаются вокруг ядра и подвергаются внешнему давлению межгалактического газа. Такая «торообразная» структура наблюдается для источника Лебедь А — самого мощного внегалактического источника радиоизлучения в созвездии Лебедя.

Из анализа наблюдений следует, что радиоисточники образуются в результате выделения энергии в ядре галактики, но не в результате взрыва, а более длительного непрерывного процесса — выбросов струй плазмы с релятивистскими скоростями в двух противоположных направлениях. Возможно, что такая картина обусловлена дипольным характером магнитного поля самого ядра галактики. Наблюдаемая повышенная яркость внешних краёв структуры связана, вероятно, с существованием плазменных облаков на периферии объекта, которые вращаются вокруг ядра и подвергаются внешнему давлению межгалактического газа. Такая «торообразная» структура наблюдается для источника Лебедь А — самого мощного внегалактического источника радиоизлучения в созвездии Лебедя.

Полагают, что максимальная энергия частиц, ускоряемых в Активных ядрах — $E_{\text{max}} \sim (E_H)^{1/2}$, где E_H — энергия центрального источника. Но для протонов и других частиц мы вновь сталкиваемся с проблемой ограничения энергии частиц из-за потерь. В данном случае сильные радиационные поля вокруг Активного ядра могут служить препятствием для роста энергии.

Ещё один астрофизический объект на роль кандидата космических лучей ультравысоких энергий — «горячие пятна» радиогалактик («hot spots»).

С точки зрения возможности ускорения частиц представляется очень интересным наблюдательный факт в радиоастрономии — обрезание частотного спектра радиоволн в районе $\sim 3 \cdot 10^{14}$ Гц у многих компактных источников: радиоквazarов, джетов и горячих спотов. Такое ограничение в спектре радиоволн можно интерпретировать как результат синхротронных потерь в магнитном поле релятивистских электронов в окрестности ударных волн, которые частицы пересекают в разных направлениях.

По синхротронному обрезанию можно оценить энергию и протонов, которая оказывается близкой к 1 ЗэВ! Разные по мощности радиогалактики ускоряют протоны до различных энергий. Свечение наиболее мощных радиогалактик соответствует энерговыделению $\sim 3 \cdot 10^{47}$ эрг/сек, что приводит к максимальной энергии ускоряемых протонов даже больше, чем 1 ЗэВ.

Как эффективные ускорители частиц «горячие пятна» радиогалактик впервые были предложены в 1964 г. В. Гинзбургом и С. Сыроватским, причём ближняя радиогалактика М87 в созвездии Вирго рассматривалась в качестве основного кандидата. Галактика М87 действительно достаточно близкая к нам (15–25 Мпк) и достаточно мощная, чтобы объяснить происхождение частиц вплоть до ультрарелятивистских энергий. Но проблема в том, что надо одновременно объяснить и изотропию потоков. Изотропию может создать множество галактик, разбросанных во Вселенной. Однако М87 остаётся единственной достаточно мощной радиогалактикой на близких расстояниях. Других, таких же мощных и более близких, не обнаружено. Например, Галактика Сеп А хотя и ближе к нам, но слабее М87, а NGC315 слишком далеко.

Таким образом, основной вывод, следующий из диаграммы Хилласа, состоит в том, что во Вселенной не видно яркого кандидата на роль ускорителя частиц до энергий 10^{20} – 10^{21} эВ.

Существует и другая сложность в проблеме поиска источников космических лучей ультравысоких энергий, резко ограничивающая пространственную область поиска.

Но, прежде чем перейти к сути, рассмотрим вновь... Большой взрыв.

7.2. Реликтовое излучение и «конец» спектра космических лучей

Современная стандартная космологическая модель (см. рис. 1.2) определяет начало эволюции с момента, когда размер Вселенной был всего 10^{-33} см (планковская длина), температура — 10^{32} К (планковская температура), а характерные энергии частиц — 10^{28} эВ (планковская энергия). В этот момент все частицы имели скорости, близкие к скорости света. Затем Вселенная начала расширяться. Доказательством расширения Вселенной является красное смещение спектров излучений галактик, обнаруживаемое по эффекту Доплера. Помимо красного «смещения» существуют и другие факты, свидетельствующие в пользу гипотезы о Большом взрыве.

В 1946 г. Г. Гамов и Р. Алфер, и в 1948 г. Р. Герман предсказали, что одним из следствий Большого взрыва должен быть остаточный радиошум с темпе-

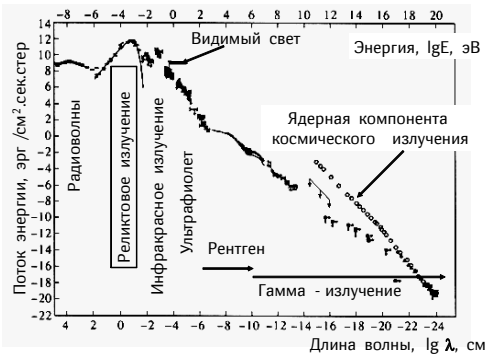
ратурой $\sim 3\text{--}5\text{K}$. Появление этого излучения относится к концу радиационной фазы развития Вселенной, когда излучение и материя находились в термодинамическом равновесии. Эта фаза привела к объединению нуклонов и электронов в атомы водорода. Электроны всё в большей степени оказывались связанными в атомы и «подвижность» фотонов увеличивалась – начался процесс отделения излучения от материи. Можно показать, что распределение потоков фотонов в тот период времени действительно должно было соответствовать температуре абсолютно чёрного тела. Затем наступила фаза материи, продолжающаяся до настоящего времени.

После образования атомов вещество становится прозрачным для фотонов, и они начинают своё блуждание по Вселенной, продолжающееся по сей день. Но этот свет претерпевает существенные изменения. Расширение Вселенной сопровождается смещением цветов спектра в сторону красного. Это смещение называется красным и связано с эффектом Доплера – увеличением длины волны при удалении источника. Как результат – излучение фотонов становится микроволновым, невидимым для глаза. Но оно может быть зарегистрировано с помощью радиотелескопов. Это удалось сделать сотрудникам фирмы «Bell» из США В. Пензиасу и К. Вильсону в 1961 г.

Впоследствии начались поиски этого радиоизлучения: на воздушных шарах – на высотах 30–40 км и выше – на спутниках. Трудность измерений заключалась в нежелательных эффектах атмосферы – взаимодействию излучения с молекулами газа, а также температурных колебаний. В 1989 г. был запущен спутник COBE (Cosmic Background Explorer) специально для исследований космического фонового излучения. Излучение со спектром, полностью совпадающим со спектром излучения при температуре 2,7K, действительно обнаружили. Это изотропное коротковолновое излучение в диапазоне длин волн (λ) от миллиметров до сантиметров с максимумом на $\lambda = 0,2\text{ см}$ (рис. 7.3). Его открытие сыграло решающую роль в подтверждении модели горячей Вселенной, изотропии её расширения и однородности. Авторы открытия, В.Пензиас и К.Вильсон, в 1976 г получили за него Нобелевскую премию.

Средняя энергия фотонов этого излучения очень мала – в 3000 раз меньше энергии фотонов видимого света. Поток реликтового излучения велик: его плотность около 400 фотонов/см³ или 10⁹ фотонов на каждый атом во Вселенной.

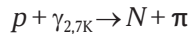
Рис. 7.3. Спектры энергии фонового рентгеновского и гамма-излучения (тёмные значки), а также ядерной компоненты космических лучей (светлые значки). В области длин волн от 10² см до 10⁻² см отчётливо виден пик реликтового микроволнового излучения. Спектр ядер космических лучей приводится для сравнения. Он демонстрирует верхний предел – максимально возможные потоки гамма-квантов в этом диапазоне энергий (или длин волн).



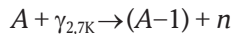
Так было обнаружено остаточное, после Большого взрыва, излучение Вселенной — продукта горячей Вселенной на её ранней фазе развития. Отсюда его другое название — реликтовое.

В 1966 г. К. Грейзен, Г.Т. Зацепин и В.А. Кузьмин, рассматривая процесс взаимодействия космических лучей с этим излучением, пришли к выводу о существовании «обрезания» потока частиц при ультравысоких энергиях. Этот эффект получил название «ГЗК-обрезания», по первым буквам фамилий авторов. Его суть вкратце сводится к следующему.

Взаимодействие протонов космических лучей с реликтовым излучением приводит к появлению новых частиц, например, р-мезонов, электрон-позитронных пар и др.:



Подобный процесс дезинтеграции должен наблюдаться и для тяжёлых ядер. Их взаимодействие с реликтовым излучением приводит к расщеплению ядер:



В результате энергия протонов (ядер) быстро уменьшается до величины, ниже которой рождение новых частиц уже становится невозможным. Оценки, сделанные К. Грейзенем, В.А. Кузьминым и Г.Т. Зацепиным, дают значение $E_{\max} \approx 5 \cdot 10^{19}$ эВ для максимальной энергии протонов (это значение отмечено стрелкой на рис.6.7) и расстояния $d_{\max} > 50$ Мпк, за пределами которого не могут находиться источники этих частиц. Подобные оценки, проведённые в 1999 г. Ф. Стеккером и П.Соломоном для ядер, дают значение $E_{\max} \approx 10^{20}$ эВ и $d_{\max} > 100$ Мпк.

Область размером в 50–100 Мпк — это очень малая часть всей Вселенной. И это значит, что частицы с энергией, превышающей ГЗК-предел, могут прилететь только из ближайших (< 100 Мпк) ее областей. Если, скажем, рассмотрим частицу с энергией 10^{24} эВ, стартовавшую где-то на расстоянии 200 Мпк, то преодолев это расстояние, её энергия не может быть выше 10^{20} эВ.

50 Мпк — расстояние, которое определяет максимальное время жизни частицы, путешествующей со

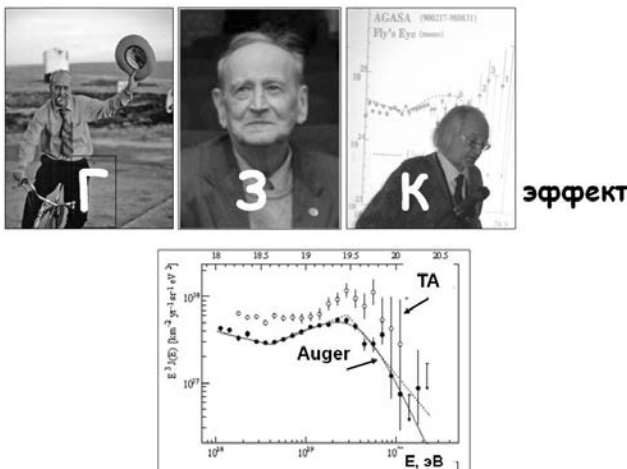


Рис. 7.4. Авторы модели ГЗК-обрезания космических лучей при энергии $5 \cdot 10^{19}$ эВ (слева направо: К. Грейзен, Г.Т. Зацепин и В.А. Кузьмин). Внизу экспериментальные данные установок AUGER и TA, свидетельствующие о наличии изменения наклона спектра при энергиях больше $5 \cdot 10^{19}$ эВ.

скоростью света во Вселенной, вне зависимости от того, как велика была её первоначальная энергия.

В этом и заключается огромная трудность современной астрофизики космических лучей: мы не только не видим на небе явных кандидатов — астрофизических объектов, способных ускорить частицы до энергий более 10^{20} эВ, но и вынуждены резко ограничить диапазон их поисков ближней к нам областью пространства внутри 50–100 Мпк. А это, очевидно, снижает шансы их обнаружить.

Где здесь выход?

Столкнувшись с трудностями, астрофизики решили подойти к решению проблемы с другой стороны. Но об этом позже, а сейчас рассмотрим результаты экспериментов в этой области энергий.

7.3. Поиски «Зватронов»: о чём говорят результаты экспериментов?

Из спектров, показанных на рис. 4.7, видно, что при энергиях больших $E_2 \approx 2 \cdot 10^{16}$ эВ показатель наклона энергетического спектра уменьшается: т.е. спектр становится более жестким, а при энергии $E_3 \approx 3 \cdot 10^{17}$ эВ значение показателя наклона спектра опять увеличивается примерно на величину 0,3 — спектр смягчается. Уже при энергиях $E_4 > 3 \cdot 10^{18}$ эВ наклон спектра всех частиц вновь становится более жестким — появляется так называемая «ступня».

Прежде всего, заметим, что по данным уже многих наземных установок установлено, что именно в этой области наблюдается появление более легкой фракции КЛ, преимущественно протонов, что может быть указанием на появление внегалактического компонента при $E > 10^{18}$ эВ. Безусловно, утверждение о «внегалактическом компоненте» космических лучей в данном диапазоне энергий — предположение. Но если на относительно узком диапазоне энергий происходит изменение наклона спектра (как в данном случае при 10^{18} эВ), то наиболее вероятной причиной должно быть все-таки изменение состава частиц в источнике. В данном случае галактический компонент «иссыкает», а появляется внегалактический, с совсем новым составом КЛ, более легким. Протоны — наиболее распространенный элемент во Вселенной, и трудно предположить, что состав вещества в других галактиках резко отличается от состава вещества в нашей Галактике.

Приведенные выше результаты измерений спектральных характеристик КЛ до энергии 10^{18} эВ не противоречат данным и других современных наземных установок: KASCADE — GRANDE, Ice-Cube, а также Якутской.

Но в этой области энергий существует принципиальная трудность экспериментального изучения этих частиц. Дело в том, что средний наклон спектра КЛ в диапазоне $E > 10^{15}$ эВ довольно крутой (см. рис. 4.7), и поток космических лучей меняется в широком диапазоне: от 1 частицы на 1 м^2 в 1 сек при энергии $\sim 10^{10}$ эВ и до 1 частицы на 1 км^2 в 100 лет при энергии несколько превышающей 10^{20} эВ. Именно этот фактор ставит перед экспериментом трудную задачу — создание установок большой площади для достижения прием-

Рис. 7.5. Джон Линсли, первым зарегистрировавший ШАЛ КЛПВЭ с максимальной на начало 60-х годов энергией, — $6 \cdot 10^{19}$ эВ.



лемой статистики измерений. Это особенно критично для частиц КЛ с предельно высокими энергиями (КЛПВЭ) — $E > 10^{18}$ эВ.

Первое событие — регистрация широкого атмосферного ливня (ШАЛ) столь высокой энергии ($6 \cdot 10^{19}$ эВ) произошла в 1963 г. на американской установке Volcano Ranch, Дж. Линсли и др. (рис. 7.4). Затем аналогичный ливень с энергией первичной частицы 10^{20} эВ был зарегистрирован на Якутской установке в 1989 г. Он даже получил собственное имя «Ариан», в честь одного из создателей этой установки Ариана Кузьмина. А самая большая энергия частицы, зарегистрированная в космических лучах, — $3,2 \cdot 10^{20}$ эВ. Это произошло в ноябре 1991 г. на установке HiRes в США. Через три года, в 1994, частица с энергией $2 \cdot 10^{20}$ эВ была зарегистрирована на установке AGASA в Японии.

Именно тогда стало очевидным, что во Вселенной есть астрофизические объекты, способные ускорить ядра КЛ до столь больших энергий. Но, как отмечалось в предыдущих разделах этой главы, во Вселенной не все так просто...

История экспериментальных исследований КЛПВЭ достаточно интересна и драматична, чтобы остановиться на ней более подробно.

Установки с большой эффективной площадью детектора стали создаваться в 60–70-е годы прошлого столетия. Среди них, построенная в Якутске — ШАЛ-13, площадью в 13 км^2 . Ее первые результаты на основе небольшой статистики были опубликованы в 1971 г. Данные установки ШАЛ-13 и существовавших в то время зарубежных Volcano Ranch и SUGAR не позволяли сделать вывод о наличии ГЗК-обрезания, статистика событий ШАЛ КЛПВЭ была недостаточна для получения однозначного заключения. Но к началу 80-х, на фоне увеличенной статистики данные Якутской установки уже не противоречили реликтовому обрезанию КЛПВЭ. С другой стороны, данные установок SUGAR и Haverah Park свидетельствовали об отсутствии такого обрезания. Они регистрировали довольно значительное количество событий с энергией более 10^{20} эВ. В 1985 г. данные Якутской установки о смягчении спектра при энергиях более 10^{19} эВ были подтверждены установкой Fly's Eye в США, которая регистрировала ШАЛ КЛПВЭ по флуоресцентному свечению в атмосфере — калориметрическим методом.

В Японии установка большой светосилы начала создаваться на базе компактной установки Акено в 80-е годы. В 1985 г. начались наблюдения на Акено-20, площадь которой составляла около 20 км^2 , а 1992 г. была запущена установка AGASA с площадью $\approx 100 \text{ км}^2$. Данные этой установки были впечатляющие: было зарегистрировано достаточно много событий ШАЛ КЛПВЭ при $E > 10^{20}$ эВ. Они смогли заинтриговать научную общественность отсутствием предсказанного теорией эффекта реликтового обрезания спектра КЛПВЭ. Но они принципиально отличались от результатов установки HiRes (модернизирован-

ная Fly's Eye в США) и от Якутской, которые указывали на существования обрезания спектра КЛПВЭ.

В конце 80-х появились идеи строительства крупномасштабных наземных установок для обеспечения высокой статистической значимости измерений на «конце» спектра КЛ. Проект ШАЛ-1000, инициированный в России Г.Б. Христансеном в 90-е годы, не был реализован по экономическим причинам.

А в 2000 г. приступила к работе вновь построенная крупная установка Pierre Auger Observatory (Auger), предложенная Дж. Крониным и А. Ватсоном в Аргентине, а также Telescope Array (TA) на базе флуоресцентной установки HiRes в штате Юта в США.

И вот, наконец, в 2007 г. на конференции по космическим лучам в Мексике две международные коллаборации, работающие на установках Auger и TA, одновременно объявляют о наличии статистически значимого изменения наклона спектра КЛПВЭ при энергиях более 10^{19} эВ. Именно эти результаты дали мощный импульс как к дальнейшим исследованиям КЛПВЭ, так и интерпретации уже полученных данных. Здесь, однако, заметим, что наши якутские ученые утверждали об этом еще в 70-е.

Основными физическими характеристиками КЛ, необходимыми для верификации теоретических моделей, являются: энергетический спектр, ядерный состав и анизотропия. Необходимо учитывать, что при распространении в межзвездной среде частицы КЛПВЭ теряют свою энергию во взаимодействиях с фоновыми излучениями (главным образом, это процессы фоторасщепления ядер и фоторождения пионов протонами). Это может привести к искажению первоначального состава и энергетического спектра частиц, ускоренных в источниках, и тем самым, затруднить выяснение природы КЛ.

Остановимся более подробно на тех экспериментальных данных по измерениям КЛПВЭ, которые есть на сегодня, и проблемах, связанных с их интерпретацией.

Энергетический спектр КЛПВЭ — известен?

Что нам известно о нем сегодня?

Взгляните на рис. 7.6. На нем представлены скомпилированные результаты измерений дифференциального энергетического спектра КЛ при энергиях более 10^{16} эВ, широко обсуждаемые сегодня.

Несмотря на то, что как по данным установок Auger и HiRes изменение наклона спектра всех частиц с пологого на более крутой действительно наблюдается ($-4,3$ (Auger), $-4,7$ (HiRes)) и положение области изменения спектрального индекса близко к теоретической оценке ГЗК-обрезания — $5 \cdot 10^{19}$ эВ, вопросы к точности определения спектральных характеристик КЛПВЭ по данным этих установок всё же остаются. Это нетрудно видеть из данных, приведенных на рис. 7.6: данные Якутской установки не противоречат реликтовому обрезанию спектра КЛ. Но по интенсивности Якутский спектр выше, чем на других установках. В настоящее время энергетический спектр Якутской установки хорошо совпадает со спектром AGASA, за исключение области в районе

Рис. 7.6. Дифференциальный энергетический спектр КЛ по данным разных наземных установок (график предоставлен М.И. Правдиным из ИКФИА, Якутск).

10^{20} эВ и выше. Поток КЛПВЭ по данным Auger меньше, чем по результатам HiRes. Еще большее различие наблюдается в сравнении с современными данными Якутской установки.

Наряду со статистической неопределенностью, можно отметить отличие в определении абсолютной интенсивности частиц КЛПВЭ по данным наземных установок.

О чем это говорит? В первую очередь, о необходимости совершенствования моделей взаимодействия частиц, используемых при анализе экспериментальных данных. Процесс восстановления типа и энергии первичной частицы по экспериментальным данным требует знания процессов взаимодействия адронов в области предельно высоких энергий КЛ. Основная проблема здесь – отсутствие данных по сечениям взаимодействия частиц при столь больших энергиях. На сегодняшний день таких сведений нет. Очевидно, что граница спектра КЛПВЭ достигает, по крайней мере, $3 \cdot 10^{20}$ эВ, что примерно на три порядка выше эквивалентной энергии, которая получена на Большом адронном коллайдере. Поэтому современные модели адронных взаимодействий опираются на данные, известные при более низких энергиях и, соответственно, результаты, полученные в рамках той или иной расчетной модели, могут существенно различаться.

Массовый состав КЛПВЭ – известен?

Первые опубликованные данные по ядерному составу КЛПВЭ, полученные на установках Auger и TA, противоречили друг другу: по данным Auger состав характеризовался доминированием протонов при энергиях $E < 3 \cdot 10^{18}$ эВ и обогащением более тяжелыми элементами при переходе к большим энергиям, а по данным TA состав интерпретировался только доминированием протонов в КЛПВЭ. После создания совместной рабочей группы по анализу данных Auger и TA результаты измерений состава сблизились (рис. 7.7).

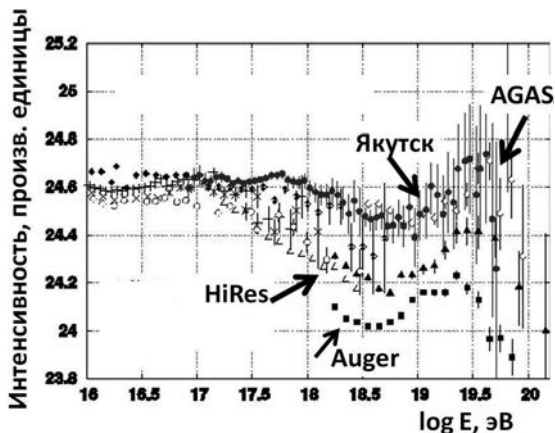
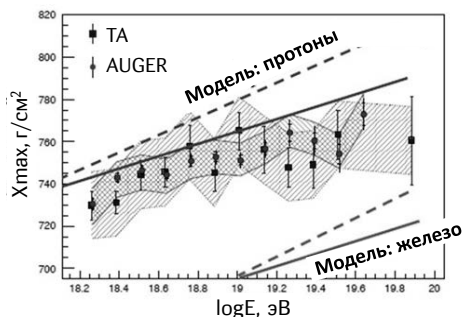
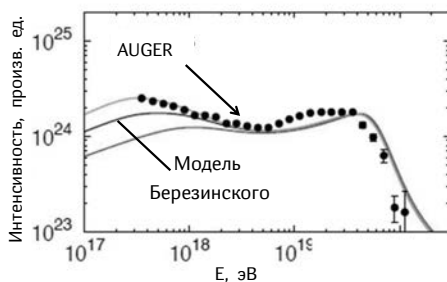


Рис. 7.7. Современные результаты совместного анализа данных установок Auger и TA: отмечается согласие в пределах ошибок измерения данных по глубине максимума $X_{\max}$ ШАЛ КЛПВЭ и утяжеление состава по мере увеличения энергии частиц.

Рис. 7.8. Формирование «dip» структуры при различных модельных параметрах (линии) для однородно распределенных источников КЛПВЭ на примере экспериментальных данных установки Auger (точки).



Экспериментальные данные установок Auger, ТА и Якутска позволили выявить новую особенность формы энергетического спектра КЛПВЭ (рис.7.8) — появление «ступни», т.е. локального ужесточения спектра в диапазоне 10^{18} – $5 \cdot 10^{19}$ эВ, обусловленного, согласно модели В.А.Березинского, потерями протонов в поле реликтового излучения в процессе образования электрон-позитронных пар. Эта спектральная особенность — «dip» — «провал», так он был назван В.А.Березинским, непосредственно примыкает к области обрезания спектра за пределами энергий $5 \cdot 10^{19}$ эВ. В этой связи накладываются ограничения на возможность выводов, касающихся ядерного состава частиц: существование данного механизма потерь частиц, может иметь место только при доминировании легкого компонента — протонов КЛПВЭ.

Следует заметить, что опубликованные недавно данные установки Auger для КЛПВЭ в диапазоне энергий 10^{18} – 10^{19} эВ, относящиеся к области «ступни» и основанные на изучении корреляции между глубиной максимума $X_{\max}$ ШАЛ и числом мюонов, указывают скорее на «смешанный» состав КЛПВЭ, чем на чисто протонный. Данные другой установки — ТА не противоречат модели «dip»: согласно этим данным вклад протонов $> 50\%$ в смешанном потоке КЛПВЭ. Здесь, однако, следует отметить, что наблюдение исключительно тяжелого компонента вблизи Земли едва ли возможно вследствие процесса образования вторичных частиц в процессе фоторасщепления первичного компонента КЛПВЭ.

Где находятся источники КЛПВЭ?

Среди потенциальных источников КЛПВЭ рассматриваются разные астрофизические объекты. В первую очередь, это активные ядра галактик (AGN), «звездообразующие галактики», сейфертовские галактики и «гамма-всплески» (GRB). Среди AGN наиболее вероятный кандидат на источник КЛПВЭ — так называемые «радиогалактики» — особый класс AGN с интенсивным локализованным синхротронным излучением. Это тип астрофизических объектов, в которых кинетическая энергия струй, инжектированных из центра AGN, достаточна для ускорения частиц с характерными энергиями для КЛПВЭ. Выбор именно этих астрофизических источников обусловлен допущением, что в них выполняется условие Хилласа, согласно которому ларморовский радиус частицы КЛПВЭ не должен превышать размер области ускорения (это же условие определяет и максимальную энергию галактических КЛ (до 10^{17} эВ), ускоряемых в остатках сверхновых).

Поиск источников КЛПВЭ по направлениям прихода ШАЛ возможен только в случае протонов и легких ядер. Действительно, ларморовский радиус протонов с $E = 10^{19}$ эВ в галактическом магнитном поле напряженностью в единицы микрогаусс (характерная величина для межзвездного пространства) составляет около 50 кпк, что более чем в 2 раза превышает размеры Галактики. Для ядер железа при равных энергиях с более легкими ядрами соответствующий ларморовский радиус меньше. Поэтому тяжелые ядра должны сильно отклоняться от первоначального направления их выхода из источника, и они не могут рассматриваться, в отличие от протонов, на роль «астрономических инструментов» исследования дальней Вселенной.

Поиск возможных источников КЛПВЭ с $E > 5,7 \cdot 10^{19}$ эВ на северной установке ТА привел к обнаружению избытка ШАЛ КЛПВЭ (всего было зарегистрировано 10^9 ШАЛ, приходящих из локализованной области в северном полушарии в интервале зенитных углов около 20°), названный участниками коллаборации ТА «hot spot» — «горячее пятно» (рис. 7.9). Интерес к этому экспериментальному факту был велик ввиду того, что непосредственно в области «горячего пятна» не наблюдаются какие-либо значимые астрофизические объекты, которые можно рассматривать в качестве источников легких ядер КЛПВЭ.

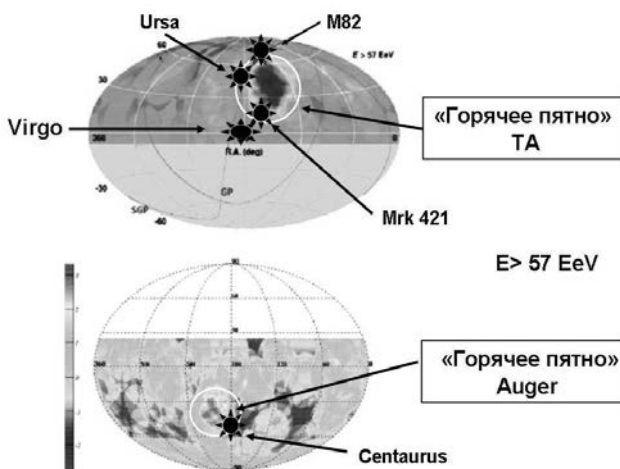
В ряде работ в качестве возможного источника КЛПВЭ северного (ТА) «горячего пятна» рассматривалась звездообразующая галактика М82 (рис. 6.14) с расположенной в ней среднего размера (10^2 – 10^4 масс Солнца) черной дырой. Среди возможных ускорительных механизмов КЛПВЭ в подобных галактиках рассматриваются, как правило, процессы ускорения на ударных волнах, связанных с аккрецией вещества на черную дыру. Тем не менее, «рядом» с «горячим пятном», обнаруженным ТА, расположены также мощный звездный кластер Ursa (на расстоянии 20 Мпк) и блазары Mrk421. Эти объекты также могут рассматриваться в качестве источников КЛПВЭ. Все они расположены «рядом», но не в месте локализации «горячего пятна». И этот факт надо объяснить.

Следует отметить, что наличие «горячего пятна» в этой части Вселенной не исключает, что ШАЛ инициирован не легкими, а тяжелыми ядрами, для которых ларморовский радиус меньше, чем для протонов. В этом случае появление «горячего пятна» можно рассматривать как результат искривления траектории движения тяжелых заряженных частиц КЛПВЭ в галактических магнитных полях.

Коллаборация Auger исследовала анизотропию КЛПВЭ в направлении созвездия Центавра А (Cen A) — наиболее близкой к Земле радиогалактике (рис. 7.9), которая на протяжении длительного времени также рассматривается в качестве вероятного источника частиц КЛПВЭ. Всего было локализовано 157 событий ШАЛ КЛПВЭ с $E > 5,7 \cdot 10^{19}$ эВ. Некоторое количество событий ШАЛ (около 9%) действительно было обнаружено с проявлением узкой угловой направленности в пределах 15° в направлении на Cen A.

Отсутствие пространственного совпадения между северным и южным «горячими пятнами» с расположением на небе мощных астрофизических объектов типа перечисленных выше, свидетельствует скорее в пользу более тяжело-

Рис. 7.9. Анизотропия (отмечена кружками) ШАЛ КЛПВЭ по данным установок Auger и TA в проекции на северное и южное полушария звездного неба. Звездами показаны звездные скопления и астрофизические объекты, наиболее близко расположенные к «горячим пятнам»



го состава КЛПВЭ, чем легкого. Это важный вывод относительно самой природы КЛПВЭ, однако он нуждается в дальнейшей верификации.

Возникает вопрос, если данные установок, регистрирующих КЛПВЭ, не представят очевидных доказательств существования корреляции между выделенной анизотропией КЛПВЭ (координатами «горячих пятен») и расположением астрофизических объектов, то означает ли это «закрытие» моделей их генерации, связанных с ускорением в таких источниках (модели типа «сверху – вниз» – «top – bottom»)? Пока преждевременно это обсуждать. Следует лишь заметить, что на этот случай существуют альтернативные модели генерации КЛПВЭ (модели «снизу – вверх»), а именно: распад гипотетической сверхтяжелой частицы темной материи либо аннигиляция топологических дефектов типа космических струн (см. раздел 7.4).

Несколько комментариев относительно возможности картографирования астрофизических объектов с помощью частиц ультравысоких энергий. Нельзя забывать о существовании магнитных полей в космосе. Заряженные частицы отклоняются в них. Даже для протонов с энергией 10^{20} эВ, путешествующих с расстояний меньше 100 Мпк, отклонения от прямой будут весьма заметны: так, при среднем межгалактическом поле $B \approx 1$ нГс (наногаусс, т.е. 10^{-9} Гс) отклонение может достигать 2° (рис. 7.10). Этот факт, создающий дополнительную ошибку измерения, следует учитывать при позиционировании объектов.

Другое дело – нейтрино. Если бы удалось регистрировать нейтрино ультравысоких энергий, то это существенно помогло бы поиску объектов. В этом случае можно было бы говорить о развитии нового направления в астрономии – нейтринном.

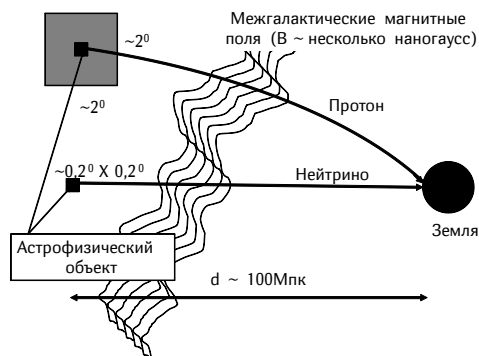


Рис. 7.10. Возможности нейтринной астрономии для изучения астрофизических объектов на расстояниях ~ 100 Мпк значительно выше, чем протонной. В отличие от протонов ультравысоких энергий, отклоняющихся под действием межзвёздного магнитного поля, нейтрино распространяются практически по прямолинейным траекториям. Как результат – «разрешение» астрофизического объекта во втором случае будет выше.

Из вышеприведенных экспериментальных данных, полученных из анализа ШАЛ КЛПВЭ, следует, что основная проблемы их интерпретации и сравнения с существующими моделями сводятся к недостаточной статистической и, возможно, систематической точности измерений. Крупнейшая созданная на сегодня установка Auger в Южной Америке имеет эффективную площадь около 3000 км². Очевидно, что создание таких гигантских установок сталкивается не только с затратным инфраструктурным их обеспечением, но и ограниченным количеством мест на поверхности Земли, способных обеспечить их эффективное использование. К последним факторам относятся и климатические условия, и обеспечение безопасности и доступность для работы персонала.

Масса вопросов возникнет, если связь направлений прихода КЛПВЭ с конкретными астрофизическими объектами будет обнаружена. Например, каков спектр космических лучей конкретного источника, насколько мощен «Зэватрон», генерирующий такие энергии? Чем отличаются разные источники? Но не менее интересно, если будут обнаружены кластеры событий, не имеющих своих «родительских» астрофизических объектов на звёздном небе. В этом случае следует сделать вывод, что источником космических лучей не может быть вещество Вселенной.

Тогда что же? Тёмная материя, вакуум? Пока это слишком преждевременные вопросы, но ведь мысль нельзя остановить...

7.4. Сверху — вниз, или вперед к экзотике

Неоднозначность в интерпретации современных экспериментальных данных по КЛПВЭ в части их ядерного состава приводит к необходимости рассмотрения и альтернативных ГЗК-обрезанию механизмов формирования энергетического спектра. Действительно, если обогащение тяжелыми элементами состава КЛПВЭ с ростом энергии подтвердится, то этот факт может указывать на спектр частиц, зависящий от Z (или жесткости) частиц. В свою очередь, это может быть указанием на доминирование процесса ускорительных механизмов частиц в астрофизических объектах, подобных предлагаемых для галактических космических лучей — ускорению в остатках сверхновых звезд, но для объектов значительно большей энергоемкости. В этом случае эффект ГЗК может быть и не доминирующим на краю энергетического спектра КЛПВЭ, а его форма — суть отображение «иссякающей мощности внегалактического источника КЛПВЭ», по аналогии со сверхновыми для галактических источников? Экспериментальной верификацией этих двух сценариев формирования спектра КЛПВЭ может быть только прецизионные измерения их ядерного состава, что в настоящее время недоступно.

Если рассмотренный выше процесс поиска источников на основе измерений параметров частиц на Земле можно определить как снизу — вверх, то подход к решению проблемы, описанный ниже, является полной противоположностью первому: сверху — вниз. Это означает: да, учёные признают, что ультрарелятивистских частиц от «Зэватронов», находящихся на недалёких расстояниях, нет. Однако есть совсем другие частицы, ещё необнаруженные, кото-

рые и создают регистрируемый на Земле поток частиц при энергиях больше 10^{20} эВ. Что это за частицы?

Основная идея заключается в том, что частицы ультравысоких энергий могут быть продуктом распада ещё более энергичных частиц, возможно, абсолютно другой природы. Существует большое число предложений происхождения ультрарелятивистских частиц космических лучей. Большей частью они основаны на стандартной модели эволюции Вселенной, описание которой до первой микросекунды её развития мы привели выше. Итак, эти предложения заключаются в следующем.

Прежде всего, вернёмся к проблеме эволюции Вселенной (см. рис. 1.2).

До планковского момента времени в супермалой Вселенной существовал «квантовый хаос»: было разрушено понимание пространства – времени, не было вектора времени, определяющего прошлое и будущее. Эта была эпоха суперсимметрии или эпоха Великого объединения – объединения всех четырёх фундаментальных взаимодействий – *сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного*. Дальнейшее расширение Вселенной связано с её остыванием.

Через 10^{-36} сек наступил конец Великого объединения, в этот момент отделяется сильное взаимодействие. Это соответствует характерной энергии $E = 10^{24}$ эВ и расстоянию 10^{-29} см. Это весьма знаменательный момент времени в жизни Вселенной: помимо конца объединения фундаментальных взаимодействий, до этого момента в составе Вселенной существовали все мыслимые фундаментальные частицы.

Причём эти частицы оказываются объединёнными в суперполя, внутри которых находятся пары частиц, отличающихся спином. Это так называемые SUSY – суперсимметричные партнёры. Их довольно много (см. табл. 7.1). Суперполя находятся в суперпространстве, ограниченном размером 10^{-29} см. Основные SUSY-партнёры приведены в таблице.

Таблица 7.1. Частицы и их партнёры

Частица	Спин	Партнёр	Спин
Кварк	1/2	Скварк	0
Лептон	1/2	Слептон	0
Нейтрино	1/2	Снейтрино	0
Фотон	1	Фотино	1/2
Глюон	1	Глюино	1/2
W-бозон	1	Вино	1/2
Z-бозон	1	Зино	1/2
Хиггс	0	Хиггсино	1/2
Гравитон	2	Гравитино	3/2

Сейчас суперсимметричные частицы пытаются найти на ускорителях. Согласно первому из возможных сценариев частицы рождаются парами и, в конце концов, должны распадаться с образованием стабильной частицы.

Вернёмся к проблеме космических лучей предельно высоких энергий.

Именно история Большого взрыва на его первоначальной фазе развития позволяет ввести в рассмотрение новые нестабильные сверхмассивные частицы. Продуктом распада этих частиц, среди прочих, являются в основном лептоны и кварки, а также энергичные фотоны и лёгкие лептоны с малой долей протонов, а также нейтрино, часть из которых, собственно, и составляет космические лучи ультравысоких энергий. Такой распад должен был произойти сравнительно недавно — не позже 150–300 млн лет назад, т.к. его продукты также должны подвергаться воздействию реликтового излучения. Масса неизвестных пока частиц должна значительно превышать наблюдаемые энергии (10^{20} эВ).

Как мы видели выше, такая гипотеза хорошо соответствует теории Великого объединения, предусматривающей существование тяжёлых частиц в диапазоне 10^{24} – 10^{25} эВ. И, наконец, отношение объёмной плотности этих частиц по среднему времени распада должно соответствовать наблюдаемому потоку космических лучей.

Другой вариант связан с существованием сверхмассивных частиц (с массой, превышающей массу протонов и нейтронов в тысячу раз) — основного компонента *тёмной материи*. Эти частицы, будучи незаряженными, путешествуют по прямым линиям, не отклоняясь в электрических и магнитных полях Вселенной. На них воздействуют только гравитационные поля. Считается, что Гало Галактики большей частью состоит из тёмной материи. Таким образом, представляется вероятным, что «экзотические» частицы, из которых состоит тёмная материя — реальный кандидат на близлежащий «Зэватрон», расположенный в нашей Галактике. Как отмечалось выше, в теории суперсимметрии ожидается существование многих частиц — основы тёмной материи. В некоторых моделях суперсимметрии постулируется, что это нейтральные частицы, имеющие массу покоя от нескольких ГэВ до нескольких десятков ГэВ с большим временем жизни.

Возможно существование двух видов тёмной материи: горячая и холодная. Горячая тёмная материя состоит из релятивистских частиц, например, можно предположить, что из нейтрино, но тогда их масса должна быть ≈ 10 эВ. Но, насколько мы знаем сегодня, их масса не превышает 1 эВ. Частицы холодной тёмной материи посредством гравитации могут концентрировать барионную материю. Эта часть материи на ранней фазе развития могла служить «зародышем» для образования вещества.

Кандидатов на роль частиц, из которых состоит холодная тёмная материя, довольно много. Эти частицы должны слабо взаимодействовать со средой, иначе они не дожили бы до более поздних фаз развития Вселенной. Такие слабодействующие частицы получили название WIMP (Weakly Interacting Massive Particle). Следует отметить, что теоретики дают оценку вероятности взаимодействия этих частиц с веществом на много порядков меньше вероятности взаимодействия нейтрино, самой, пожалуй, слабодействующей из открытых на сегодня частиц (в Главе 11 об этих частицах будет рассказано более подробно). К WIMP могут относиться массивные стабильные нейтрино.

Теоретические оценки показывают, что с космологической точки зрения приемлемы только нейтрино с массой менее 100 эВ и с энергией от нескольких ГэВ до нескольких ТэВ.

В настоящее время разрабатываются смешанные модели тёмной материи, в которых 30 % приходится на горячую и 70 % на холодную её часть. Будучи незаряжёнными, WIMP-частицы не отклоняются магнитным полем, поэтому, измеряя анизотропию их прихода, можно попытаться определить направления на потенциальные источники.

Ещё механизм рождения неизвестных частиц может быть связан с так называемыми *топологическими дефектами*, которые, собственно, и генерируют эти частицы. Здесь топологические дефекты — коллапс — переход от симметричной фазы Великого объединения к разрушающейся, на ранней стадии её развития (10^{-36} сек). Такая модель согласуется с принятой сейчас моделью расширяющейся Вселенной.

В момент нарушения симметрии могут рождаться космологические реликты. Среди них — монополи.

Современные теории позволяют оценить массу монополей. Монополи очень тяжёлые образования, их масса может достигать 10^{17} ГэВ = 10^{23} эВ (это масса бактерии!). Ранняя Вселенная — единственное место, где могли бы появиться эти гипотетические частицы. В расширяющейся Вселенной происходит уменьшение плотности монополей, но затем, в постинфляционный период, их количество вновь может увеличиться.

На фазе доминирования вещества во Вселенной монополи могут принять участие в формировании крупномасштабных астрофизических объектов. Однако их практически не должно быть в галактических дисках. В большей степени они могут присутствовать в Гало и в скоплениях галактик. Не очень всё ясно со временем их жизни. Если монополи распадаются, они производят большое количество нейтрино и фотонов с характерной энергией $\approx 10^{24}$ эВ и малая их доля переходит в протоны.

Такие вторичные протоны могут появляться на разных расстояниях от нашей Солнечной системы. Если эта гипотеза верна, космические лучи ультравысоких энергий — это распадающиеся космологические реликты, формирующие каскад фотонов и нейтрино, фон которых и наблюдается. Если время их жизни сопоставимо со временем жизни Вселенной, то они могут распадаться где угодно, и этим может объясняться изотропность потоков космических лучей.

Согласно теории, в первые минуты образования Вселенной появилось большое количество и других реликтовых частиц — нейтрино, которые так же, как и реликтовое микроволновое излучение, должны странствовать в межзвёздном пространстве. Согласно этой гипотезе, мы живём в «нейтринном море».

Оказывает ли это море влияние на нас? Мы этого пока не знаем. Можем ли мы зарегистрировать реликтовые нейтрино? Вероятно, да. Но об этом далее.

Реликтовое излучение — пожалуй, самое главное свидетельство эволюции Вселенной, оно появилось, когда прошло менее одной тысячной доли жизни Вселенной!

Какие предполагаемые источники нейтрино ультравысоких энергий рассматриваются сейчас?

Один источник уже упомянут выше: это топологические дефекты. Современные модели предсказывают, что поток массивных нейтрино, возникающих при топологических дефектах и имеющих энергии более 10^{20} эВ, достаточен для регистрации на установках с площадью, скажем, более 100 000 км² (это больше, чем площадь установки «Auger»).

Активные галактические ядра — наиболее мощные из известных постоянных эмиттеров энергии во Вселенной могут быть источниками и нейтрино ультравысоких энергий. Так, согласно модельным представлениям, квазары действительно могут излучать нейтрино с энергией более $4 \cdot 10^{19}$ эВ.

Выше мы вкратце описали ситуацию, сложившуюся с экспериментальным и теоретическим изучением частиц предельно высоких энергий. Похоже, что «космики» столкнулись здесь с очень сложной проблемой, находящейся на стыке космологии, астрофизики и физики элементарных частиц. Пока не хватает экспериментальных данных, чтобы «зацепиться» за ту или иную теоретическую модель, но, похоже, что и теоретические исследования могут выйти на новые направления.

Однако уже теперь ясно, что в проблеме КЛПВЭ ученые вплотную подошли к проблеме ранней истории Вселенной после Великого объединения. Интересно, что сама форма спектра в области ГЗК-обрезания несёт информацию об эволюции Вселенной миллиарды лет тому назад. Поэтому нужна большая статистика событий в этой области энергий, чтобы однозначно определить вид спектра.

Не случайно Нобелевский лауреат 2003 г. В.Л. Гинзбург внёс проблему исследований космических лучей ультравысоких энергий в реестр важнейших задач физики и астрофизики XXI столетия.

В каких же направлениях будут идти эксперименты по исследованию космических лучей на краю спектра? Есть ли принципиально новые подходы к экспериментальному изучению частиц из этой области энергий для совершения качественного скачка по увеличению статистики регистрируемых событий? Сейчас мы можем ответить утвердительно. Об этом пойдет речь в следующей главе.

ГЛАВА 8. Космическое око

История научных исследований, подобно истории географических открытий, знает немало примеров, когда неожиданное открытие совершенно заслоняло первоначальную цель.

Б.Росси, физик

Итак, как можно увеличить площадь детекторов для регистрации космических лучей? Как перейти от нескольких тысяч квадратных километров (установка «Pierre Auger») и, скажем, к десяткам тысяч, а может быть и к сотням?

Идея здесь состоит в том, чтобы использовать земную атмосферу в качестве такого детектора и регистрировать ШАЛ не с поверхности земли, а из... космоса.

8.1. Ультрафиолетовый след космической частицы

Такие измерения можно осуществить, используя явление *флуоресценции*. Термин «флуоресцентное» относится к процессам возбуждения атомов с последующим испусканием ими фотонов. Так происходит генерация света.

Ещё в 40-х годах прошлого века были изобретены люминесцентные лампы. В них использовался эффект возбуждения атомов ртути при воздействии электрического тока. При возвращении в нормальное состояние атомы ртути испускали фотоны, которые при взаимодействии с фосфорным покрытием стенок колбы лампы конвертировались в видимый свет. Подобное явление может наблюдаться и в атмосфере Земли. Заряженные частицы могут возбуждать атомы воздуха и приводить к эмиссии света в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Как результат, возникают так называемые атмосферные сцинтилляции.

Детальное экспериментальное изучение атмосферных сцинтилляций как метода детектирования ядерных взрывов в атмосфере началось в начале 60-х годов в связи с атомной программой США. Ядерный взрыв порождает множество заряженных частиц и эти частицы, распространяясь в атмосфере, вызывают её свечение, в том числе и в ультрафиолетовом диапазоне. По количеству зарегистрированного света можно было судить

о мощности испытываемых бомб. Интересно, что у истоков этих экспериментов стояли Б. Росси (рис. 8.1) и К. Грейзен, участники американского атомного проекта, а в последующем известные физики в области космических лучей.

Однако и космические лучи могут также вызвать свечение атмосферы. Приоритет в идее регистрации сцинтилляций атмосферы под воздействием космических лу-

Рис.8.1. Бруно Росси, итальянский физик. Во времена «Манхэтэнновского проекта» он вместе с К. Грейзеном предложил использовать флуоресцентное свечение атмосферы под действием радиации для оценки мощности атомных бомб.



Рис. 8.2. А.Е. Чудаков первым предложил использовать флуоресцентное свечение атмосферы, вызванное воздействием космических лучей.



чей принадлежит нашему соотечественнику – А.Е. Чудакову (рис. 8.2). Именно он впервые предложил этот метод в 1962 г. для измерений мощных ливней первичных космических лучей.

В главе 3 мы уже рассказывали, что первичные частицы, попадая в атмосферу, вызывают каскад, состоящий из вторичных частиц различного сорта (рис. 3.1). Среди них больше всего электронов. Максимум их числа пропорционален энергии первичной частицы (см. рис. 3.4). Электроны, распространяющиеся в атмосфере, ионизируют воздух и возбуждают энергетические уровни атомов и молекул (последнее означает переход электронов с низких стабильных оболочек в более высокие метастабильные состояния). Через короткий промежуток времени атомы воздуха (в основном азота) возвращаются в своё нормальное состояние, испуская фотоны на длинах волн от 330 до 450 нм, т.е. в ультрафиолетовом диапазоне. Этот ультрафиолетовый, или флуоресцентный свет, изотропен и его интенсивность пропорциональна энергии ливня на данной глубине атмосферы. При больших потоках частиц ливня свечение оказывается весьма значительным и может быть зарегистрировано в прозрачной атмосфере даже на удалённых расстояниях от оси ливня.

Так, первичная частица с энергией в 10^{19} эВ создаёт в атмосфере ливень, состоящий из 10^{16} вторичных электронов. Каждая вторичная частица создает на одном метре пробега около четырех фотонов. Ливень распространяется со скоростью света на расстояние от 10 до 100 км в зависимости от угла наклона входа частицы в атмосферу. В начале появляется небольшой ливень в виде диска в верхних слоях атмосферы (его излучаемая мощность 100 киловатт!), который двигается по прямой со скоростью света и постепенно увеличивается в размерах. Затем, по мере гибели электронов, происходит его затухание. Если «собрать» весь свет – зарегистрировать все фотоны вдоль траектории ливня (или же определить максимум интенсивности света), то эта величина будет пропорциональна энергии первичной частицы. Положение максимума (глубина ливня) может дать информацию о массе частицы.

Особый случай представляют собой флуоресцентные ливни, возникающие на максимальных глубинах в атмосфере, вблизи уровня земли. Такие ливни могут быть созданы только нейтрино, т.к. большая толща атмосферы не даёт возможности проникнуть ливням, создаваемыми первичными ядрами, на столь низкие высоты. А для слабо взаимодействующей частицы – нейтрино, напротив, требуется прохождение очень больших толщ вещества прежде, чем она сможет создать ливень.

Каскад заряженных частиц ШАЛ, наряду с флуоресцентным свечением, вызывает мощное черенковское излучение фотонов в направлении строго по

вектору распространения ливня (черенковский конус излучения, см. рис.3.7). По мощности черенковское излучение значительно сильнее, чем флуоресцентное. Сигнал от черенковского свечения может быть использован для определения энергии при регистрации наклонных ливней, вызванных нейтрино. Вероятно, возможно будет зарегистрировать и обратно отражённый черенковский свет от земной поверхности. В этом случае его регистрация будет очень полезна для селекции «полезных» событий, вызванных реальными частицами, от фоновых, нежелательных импульсов света. Другими словами, черенковский сигнал может быть использован в качестве триггера — разрешительного сигнала на регистрацию и анализ информации о флуоресцентном свечении ливня ШАЛ.

Как мы видим, атмосфера представляет собой уникальный по своим возможностям детектор, прежде всего своими размерами, и здесь ей нет равных. Но какими методами можно зарегистрировать светящийся в ультрафиолете след от ливня частицы из области ультрарелятивистской энергии?

Если в качестве детектора использовать коллектор, например, зеркало или систему линз для сбора света от светящегося следа ливня, а в фокусе этого коллектора установить мозаику фотоприёмников, то можно зарегистрировать и «запомнить» след вспышки света в ночной, безлунной атмосфере. Конечно, это можно сделать только безлунной ночью. Таким способом может быть определена и энергия, и масса первичной частицы.

Этот метод весьма перспективен по сравнению с наземными методами для регистрации космических лучей в области ультравысоких энергий. Дело в том, что в «погоне» за статистикой регистрируемых событий, учёные создают наземные установки всё больших и больших площадей, а из экономических соображений детекторы вынуждены располагать на значительных расстояниях друг от друга. Так, например, в проекте «Pierre Auger» детекторы разделены расстоянием около 2 км. С увеличением расстояния между детекторами основная часть потока частиц проходит вдали от детекторов. Поэтому требуется моделирование пространственной геометрии ливня, а это снижает точность расчёта энергии первичной частицы. Как мы увидим далее, оптические флуоресцентные установки свободны от этого недостатка.

В середине 60-х годов К. Грейзен из Корнельского университета в США поставил первый наземный эксперимент по регистрации флуоресцентного свечения атмосферы под воздействием космических лучей. А в 1967 г. им была создана первая полномасштабная установка. Её основой был коллектор с линзами Френеля. Однако эксперимент К. Грейзена окончился неудачей: слишком уж грязной была атмосфера в районе Нью-Йорка. Вслед за К. Грейзеном Д. Линсли и Л. Скарси из г. Альбукерке в США осуществили более успешный эксперимент на установке «Королева пустыни» («Desert Queen») в более чистом небе штата Нью-Мексико. А затем была запущена флуоресцентная установка Fly's Eye («Мушиный глаз») в штате Юта, США, теперь это стереосистема из двух оптических коллекторов — HiRes. Последняя установка позволила продвинуться в сторону ЗэВ-ных энергий.

Однако значительно большими возможностями будет обладать коллектор ультрафиолетового света, если его поднять высоко над землей на аэростате или запустить на космическом аппарате на орбиту вокруг Земли. Космический метод измерений КЛПВЭ впервые был предложен Дж. Линсли (рис. 8.3) и его коллегой Р. Бенсоном в 1981 г.

Они назвали свой проект «Air watch» — «Взгляд с неба». Кстати, именно Дж. Линсли опубликовал сведения о первом событии — регистрации частицы с $E = 10^{20}$ эВ на установке Volcano Ranch в США. В чём же суть космического метода?

8.2. Зеркало на орбите

На рис. 8.3 демонстрируется схема этой идеи.

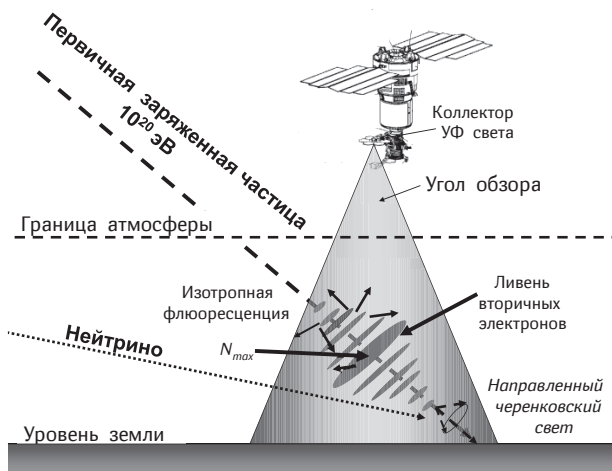


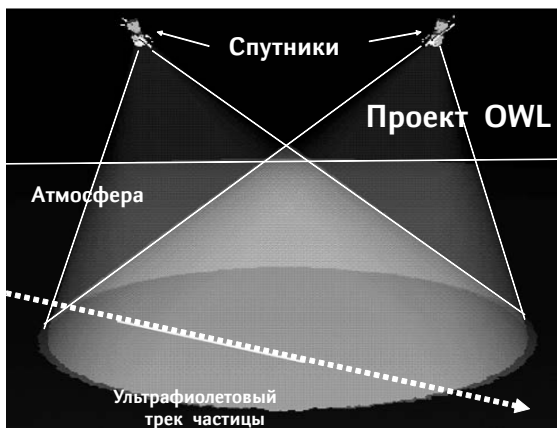
Рис. 8.3. Принцип космического метода измерения энергии заряженных частиц с ультравысокой энергией. Коллектор ультрафиолетового света, размещённый на спутнике, позволяет «собрать» свет, генерируемый вторичными электронами ШАЛ в ночной атмосфере Земли. Энергия первичных частиц определяется по количеству света (фотонов), собранного фотоумножителями — детекторами, размещёнными в фокальной плоскости зеркала. Если ливень будет проходить под малым углом к поверхности Земли, то это может означать, что он вызван нейтрино, а не заряженными частицами.

Прибор, состоящий из коллектора света (им может быть параболическое зеркало или система оптических линз) в фокусе которого размещена мозаика фотоумножителей, будет регистрировать «след» ультрафиолетового свечения, созданный вторгшейся в атмосферу заряженной частицей. Распространяющийся вдоль оси ливня и отражающийся от земной поверхности «черенковский» свет даст дополнительную информацию о высоте максимума ШАЛ ($N_{\max}$). По сути — аналог наземных измерений, но перевёрнутый с ног на голову. Отсюда его преимущества.

Оценки показывают, что при относительно умеренных габаритах космических телескопов и при относительно низких орбитах космических аппаратов можно регистрировать КЛПВЭ на площадях, сопоставимых и значительно превосходящих возможности наземных установок.

Если спутник запустить, например, на орбиту высотой ~ 400 км и разместить на нём коллектор света с углом зрения $\sim 60^\circ$, то в этом случае площадь пятна на земле составит более $10\,000$ км². Согласитесь, это очень большая площадь, вряд ли достижимая для наземных установок.

Рис. 8.4. Космический проект OWL («Сова») позволил бы получить стерео-изображение ультрафиолетового трека в атмосфере и значительно увеличить светосилу метода.

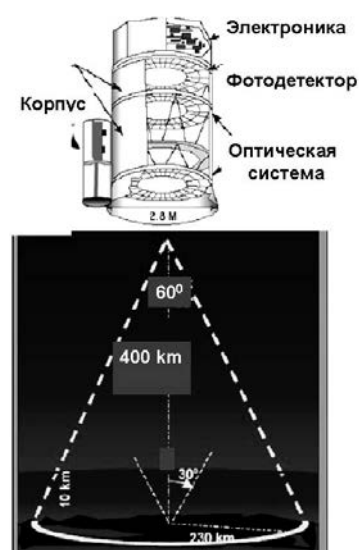


Вскоре после публикации идеи Дж. Линсли в 80-х годах появился проект космической установки, основанной на схеме оптического телескопа OWL — Orbiting Wide-angle Light collectors (Орбитальный широкоугольный коллектор света), состоящего из

3-х линз Френеля с широким полем зрения (рис. 8.4). Он предусматривал запуск двух спутников на орбиту высотой 600–1200 км с коллекторами ультрафиолетового света. Подобный тандем позволил бы не только увеличить площадь и объём «детектора» ночной атмосферы, но и получить стереоизображение трека — ливня частиц. Оценки приводят к светосиле такой «установки» — $2,5 \cdot 10^5$ км²-стер, рекордной для изучения частиц ультравысоких энергий.

Он не был осуществлен, но на его основе появился другой проект, предложенный итальянским физиком Ливио Скарси — Extreme Universe Space Laboratory (EUSO). Схема этого телескопа приведена на рис. 8.5. С помощью такого орбитального широкопольного телескопа с апертурой 60° возможно наблюдение КЛПВЭ на площади атмосферы не менее 10^4 км² при высоте орбиты космического аппарата около 400 км. Это соответствует геометрическому фактору установки около $2 \cdot 10^4$ км²-стер-год.

Реализация проекта масштаба EUSO предоставила бы в руки учёных огромные новые возможности для исследований космических лучей в этой интереснейшей области энергий. Достаточно назвать следующие цифры: при энергии 10^{20} эВ AGASA способна регистрировать одно событие в год, HiRes — 1 в месяц, Auger — 2 события в неделю, а EUSO — в среднем одно событие в час. Этот проект, однако, также не осуществлен к настоящему времени.



Другой подход к созданию орбитальных детекторов для регистрации КЛПВЭ был предложен в Московском университете. Он основан на конструкции телескопа, состоящего из зеркала-концентратора с фотоприемником, расположенным в

Рис. 8.5. Космический проект EUSO Европейского космического агентства для регистрации космических лучей ЗэВ-ных энергий по их ультрафиолетовым трекам с помощью оптического коллектора света с широкой апертурой, размещённого на борту Международной космической станции.

фокусе. Изображение такого телескопа, ставшего основой отечественных проектов ТУС («Трековая УСтановка») и «КЛПВЭ»: приведено на рис. 8.6. Эксперимент ТУС начал осуществляться в 2016 г. на спутнике «Ломоносов», запущенном 28 апреля 2016 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой около 500 км. Зеркало телескопа ТУС френелевского типа диаметром 1,5 м концентрирует поток УФ излучения на фотоприемник, состоящий из 256 фотоумножителей, которые формируют изображение трека ШАЛ. Проекция каждого пикселя на нижние слои атмосферы составляет 5×5 км, общая площадь обзора — 80×80 км².

Основная цель эксперимента ТУС — проверка самой возможности регистрации частиц КЛПВЭ с использованием атмосферы Земли в качестве гигантского детектора. Сложность проведения такого эксперимента заключается в наличии большого количества источников фона, как транзитного, так и квазистационарного УФ излучения. К первым относятся транзитные световые события — (TLE) (см. Главу 16) в верхних слоях тропосферы (на высоте в десятки км), вспышки молний в приземном слое атмосферы, УФ следы метеоров и нейтральных пылинок, а также биолюминесценция. Среди квазистационарных УФ излучений в атмосфере можно отметить авроральные свечения, антропогенные источники света. Наличие такого «многокомпонентного» атмосферного фона делает нетривиальной задачу выявления УФ-сигналов реальных ШАЛ КЛПВЭ. Для регистрации частиц они представляют нежелательный фон, мешающий изучать КЛПВЭ. Однако исследования, например, TLE, представляют особую отдельную научную цель экспериментов на «Ломоносове», т.к. физические эффекты, связанные с ними, пока недостаточно изучены.

Уже первые месяцы работы спутника «Ломоносов» позволили накопить достаточно большой объем полезной информации по наблюдению разнообразных атмосферных явлений. Разработчиками аппаратуры была создана специальная программа управления работой ТУС, позволяющая с помощью разных временных режимов работы приемника излучения изучать различные по своей

природе световые явления в атмосфере. Так, например, наиболее «медленный» режим работы ТУС с характерным временем экспозиции в единицы миллисекунд позволял регистрировать



Рис. 8.6. Телескоп ТУС на борту спутника «Ломоносов», запущенный в 2016 г., стал первым в мире экспериментом по регистрации частиц КЛПВЭ из космоса. На нижней правой панели — один из сигналов — кандидатов в КЛПВЭ, зарегистрированный телескопом ТУС на фоне других световых транзитов в атмосфере (см. главу 11).

УФ вспышки от пролетов отдельных метеоров в атмосфере, а наиболее быстрых — всего 0,8 мкс — УФ-треки от частиц КЛПВЭ.

За время работы спутника команде «Ломоносова» удалось зарегистрировать сотни мощных ультрафиолетовых вспышек в атмосфере Земли разной длительности. Как правило, многие из них связаны с грозowymi областями на средних и низких широтах и дают одновременный сигнал во всем поле зрения прибора вследствие рассеяния излучаемого свечения в облака.

Что касается наиболее быстрых вспышек, которые могут быть связаны с генерацией в атмосфере УФ фотонов от ШАЛ частиц КЛПВЭ при их пролете в атмосфере, то исследователям из МГУ удалось выделить несколько событий, которые могут быть интерпретированы как «наиболее вероятные кандидаты КЛПВЭ». Таким образом, ученым из МГУ удалось впервые доказать принципиальную возможность регистрации частиц КЛПВЭ из космоса.

ТУС — первый тестовый космический эксперимент по изучению КЛПВЭ из космоса, и его результаты чрезвычайно важны для осуществления будущих, более масштабных космических миссий Следующий, более масштабный проект, основанный на том же принципе, — «КЛПВЭ» (К-EUSO) («Космические Лучи Предельно Высоких Энергий») предназначен для реализации на Международной космической станции. По сравнению с телескопом ТУС диаметр его зеркала-концентратора увеличен до 10 м².

Наши американские коллеги в настоящее время инициировали проект запуска пары спутников с ультрафиолетовыми коллекторами (проект РОЕММА «Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics» — «Зонд для многоканальной астрофизики»), схема которого подобна проекту OWL. Безусловно, реализация таких масштабных проектов приведет к получению значительно большей статистики событий по сравнению с возможностями современных проектов. Но и проекты типа OWL или РОЕММА — не предел. Поместив оптический детектор на геостационарном спутнике (высота орбиты около 36 000 км), мы сможем создать «детектор» космических лучей с предельно возможной для земных условий светосилой — зеркало, размещённое на нём, сможет охватить целое полушарие!

Есть ещё одно важное приложение космических экспериментов с оптическими детекторами: они могут регистрировать нейтрино ЗэВ-ных энергий (см. рис. 8.4). Но об этом далее — в Главе 11.

На волне моей памяти

История реализации проектов по регистрации КЛПВЭ из космоса, к сожалению, не очень удачна. С самого начала ее преследовали трудно-разрешимые проблемы, которые приводили и к задержкам, и к отмене намеченных планов. Первые руководители проектов — итальянский ученый Ливيو Скарси и американский — Еши Такахаши не дожили даже до первых реальных шагов к его воплощению.

Я вспоминаю первое совещание по проекту, которое организовал Л. Скарси на Сицилии. В дальнейшем его участники составили основу

большой международной коллаборации EUSO. Мы (специалисты МГУ) тоже были приглашены к участию в проекте. Помню энтузиазм его участников. Это было в начале 2000-х. Планировалось осуществление эксперимента на МКС, причем на российском сегменте. Но что-то не получилось у наших итальянских коллег в их отношениях с Национальным космическим агентством, и они обратились в Европейское космическое агентство, но уже без нас, российских участников. Безусловно, это было примером не очень хороших партнерских отношений. На этом фоне мы приняли решение продолжать проект, но уже самостоятельно. Так родился проект ТУС.

В команде EUSO произошла трагедия – скончался Л. Скарси – главный идеолог и сторонник методики наблюдений КЛПВЭ из космоса. Европейское агентство не приняло проект EUSO. Это были первые сильные удары по коллаборации. Но она выжила: проект возглавил Е. Такахаши и, будучи этническим японцем, решил обратиться за поддержкой в Японское космическое агентство. Такахаши вновь пригласил нас к участию в проекте.

Проект стал называться JEM – EUSO (первые три буквы – название японского модуля на МКС). Но неожиданно Такахаши умирает. В Японии происходит техногенная катастрофа – взорвалась атомная станция Фукусима, что не могло не сказаться на бюджете Японского космического агентства. Работа по проекту JEM – EUSO замедляется, а через некоторое время японская сторона отказывается от роли головной организации. Руководство коллаборацией принял на себя известный физик П. Пикоцца из Италии. Пикоцца обращается к нам с предложением взять на себя основные функции по реализации проекта JEM – EUSO на российском модуле МКС. Мы активно начали работать, имея в виду инициированный нами новый проект для МКС – КЛПВЭ, более масштабный, чем ТУС. А проект ТУС вступил в завершающую стадию и нам удалось его запустить во время первого пуска с космодрома «Восточный» в 2016 г. А проект EUSO, трансформировавшийся в настоящее время в проект КЛПВЭ (или K-EUSO), находится на первоначальном этапе своего развития.

Космические эксперименты имеют длительные сроки реализации (и EUSO, и ТУС развивались более 15 лет) в силу многих причин. Среди них и финансовые, и политические, и научная конкуренция. И одной из возможностей их преодоления является диверсификация путей достижения главной цели – получения намеченного научного результата.

Глава 9. Гамма-изображение Вселенной

Реальное путешествие в поиске открытий
состоит не только в поиске новых ландшафтов,
но и в поиске новых глаз.

Марсель Пруст

Первооткрыватели космических лучей, столкнувшись с внеземной радиацией, предположили, что это гамма-излучение. И в этом была только часть правды. Теперь мы знаем, что пионеры исследования космического излучения натолкнулись на вторичный компонент космических лучей, рождённый в атмосфере. Наряду с частицами в нём присутствовало и гамма-излучение. Что такое гамма-излучение?

Гамма-излучение – это высокоэнергичные кванты электромагнитного поля, называемые также фотонами. Как и другие виды излучений – от радиодиапазона до ультрафиолетового, его можно описать либо на «волновом» языке, используя для этого понятие длины волны или частоты, либо использовать энергетические единицы.

Если обратиться ко всему волновому (или энергетическому) диапазону электромагнитного излучения (см. рис. 7.3), то можно видеть, что гамма-излучение, иногда говорят: жесткое излучение, находится на самом правом его краю, вслед за радио-, инфракрасным и ультрафиолетовым. Самая низкоэнергичная часть жесткого излучения (менее 100 кэВ) носит название рентгеновского.

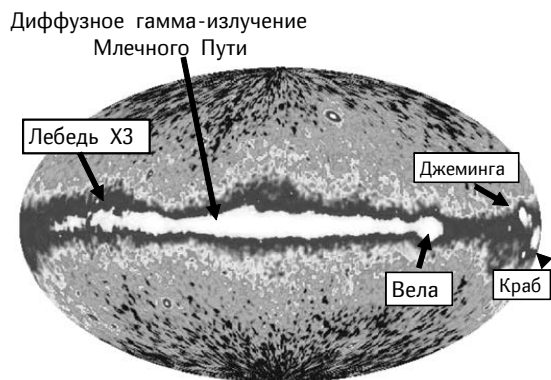
Вселенную изучают во всех диапазонах энергий и длин волн. Каждый вид излучений несёт свою полезную и взаимодополняющую информацию, необходимую для создания полной картины Вселенной. В этой главе мы обратимся к самому высокоэнергичному участку электромагнитного спектра – гамма-излучению. Фотоны, в отличие от заряженных частиц, не взаимодействуют с галактическими магнитными полями. В связи с этим гамма-излучение является уникальным инструментом для исследований объектов Вселенной.

Гамма-излучение может появиться в результате взаимодействия космических лучей с веществом среды, через которую они проходят. Это может быть атмосфера. Ранее мы видели, что действительно, в составе ШАЛ присутствие гамма-излучения весьма заметно. Это гамма-излучение – продукт распада π^0 -мезонов, образовавшихся в результате взаимодействия космических лучей с ядрами атомов атмосферы. Оно составляет лишь небольшую долю тех ливневых частиц в атмосфере, которые генерируются первичными космическими лучами. Однако среди самих первичных частиц есть и гамма-кванты, рожденные во Вселенной. Это излучение было открыто в начале 60-х годов на спутниках. Его невозможно зарегистрировать наземными методами: практически всё оно поглощается (за исключением самой высокоэнергичной части) в атмосфере.

9.1. Гамма-фотография Млечного Пути

Гамма-излучение, приходящее к нам из Космоса, разделяется на два различных класса. Первый класс — диффузный, более или менее равномерно заполняющий нашу Галактику. Второй — дискретный, так называемые, гамма-всплески, которые рождаются в локальных астрофизических объектах не вполне пока ясной природы. О них пойдёт речь ниже.

Рис. 9.1. Карта всего неба в гамма-лучах — результат измерений на космической обсерватории CGRO. Диффузное гамма-излучение, исходящее из Млечного Пути — результат взаимодействия галактических космических лучей с межзвёздной средой. Отчётливо видны локальные астрофизические объекты, неразличимые в оптических наблюдениях.



На рис. 9.1 представлено изображение нашей Галактики в гамма-излучении. Это весьма неожиданный результат компьютерной обработки измерений излучения с энергией в сотни МэВ прибором EGRET на космической обсерватории CGRO (Космическая гамма-обсерватория им. А.Комптона). Это постоянные гамма-источники. «Светящаяся» Галактика на этом снимке не может быть объяснена только известными наблюдаемыми небесными телами. Интересен здесь тот факт, что в оптическом диапазоне не видно очевидных источников такого излучения. Наблюдения с помощью оптических телескопов дают, скорее, обратную картину — в тех местах, где следовало бы ожидать множество локальных ярких объектов, генерирующих гамма-излучение, их нет.

Картина «Гамма-Галактики», полученная в далеком диапазоне электромагнитного излучения, дает совершенно новую информацию о ближайшей к нам области Вселенной. Прежде всего, она впервые представила доказательства того, что здесь, в Галактике, действительно развиваются крупномасштабные процессы высвобождения гигантских энергий. Видимый свет звезд, наблюдаемый в телескопы — это лишь небольшая доля их энергии. Огромное облако гамма-излучения нашей Галактики формирует гало, распространяющееся во внешнее пространство от Млечного Пути, что как раз и есть свидетельство бурных процессов в нашей части Вселенной.

Для объяснения наблюдаемого гамма-излучения от гало Млечного Пути нет единственного механизма. Некоторые типы процессов, приводящих к генерации гамма-излучения, показаны на рис. 9.2. Одним из них является столкновение высокоэнергичных электронов с низкоэнергичными фотонами видимого света или с фотонами инфракрасного диапазона. Такие фотоны могут появиться, например, в результате эмиссии быстро вращающихся нейтронных звёзд. Согласно этому механизму, электроны космических лучей передают часть сво-

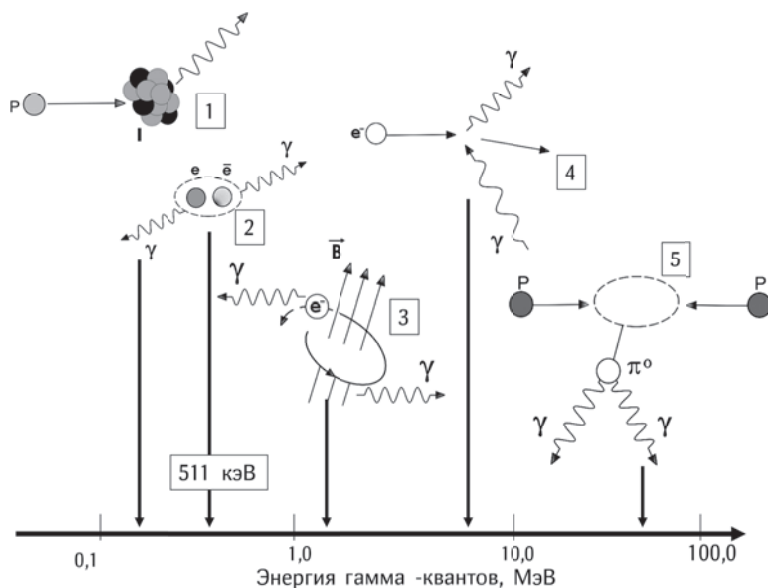


Рис. 9.2. Основные физические механизмы генерации космического гамма-излучения. В области малых энергий (менее 1 МэВ) наблюдается мягкое гамма-излучение, возникающее при взаимодействии космических протонов с ядрами. Возбуждённые ядра переходят в основное состояние, с излучением гамма-квантов (механизм 1). В этой же области энергий происходит генерация дискретной линии 511 кэВ в результате аннигиляции электронов и позитронов (2). Движение электронов в магнитных полях сопровождается синхротронным излучением гамма-квантов при более высоких энергиях (3). Рассеяние электронов на фотонах малой энергии (например, на реликтовом излучении) приводит к так называемому обратному комптоновскому рассеянию гамма-квантов (4). В области МэВ-ных энергий преобладает эффект генерации гамма-излучения при распаде нейтральных пионов, возникающих при столкновениях протонов космических лучей (5).

ей энергии фотонам, ускоряя их до энергий гамма-квантов («обратный Комптон-эффект»). Недавно обнаружено, что и другие спиральные галактики обладают такими же скрытыми инфракрасными гало. Своим существованием они обязаны «путешествующим во Вселенной космическим лучам».

Другой механизм рождения гамма-излучения — упомянутый выше распад π^0 -мезонов, которые появляются, в свою очередь, в результате взаимодействий космических лучей (протонов высокой энергии) с межзвёздной средой. Можно предположить, что скорость генерации или поток π^0 -мезонов в межзвёздной среде будет таким же, как и поток космических лучей, если все космические лучи сумеют провзаимодействовать с ядрами среды. В ядерной физике обычно говорят о длине свободного пробега частицы до взаимодействия: т.е. длина свободного пробега, определяемая толщиной вещества и типом частицы, должна быть достаточной для осуществления взаимодействия. Расчёты показывают, что в реальности не все космические лучи, заполняющие Галактику, взаимодействуют с веществом в межзвёздном пространстве. Так, в направлении центра Галактики поток гамма-излучения составляет сотые доли процента от потока космических лучей. В направлении же, перпендикулярном галактическому диску, их поток будет более чем на порядок меньше.

Характеристики процессов, приводящих к генерации космического гамма-излучения, хорошо известны. Поэтому, измеряя его потоки с помощью приборов, установленных на спутниках, можно получить информацию не только о самих космических лучах, порождающих гамма-излучение, но и о среде их распространения. В этом случае информация о распределении потоков гамма-квантов позволяет нам «увидеть» сами потоки космических лучей, их порождающих.

Мы видим, что космические лучи играют ключевую роль в формировании космического гамма-излучения. Следует ожидать появления наиболее мощных потоков гамма-излучения в тех областях Вселенной, где взрываются сверхновые. Там разлетающиеся ударные волны сверхновых должны генерировать огромное количество «свежих» космических лучей, которые и создают гигантские облака гамма-излучения в окрестности. Подобное явление зарегистрировано космической обсерваторией Chandra (см. рис.6.1) в менее энергичном диапазоне – рентгеновском.

Взрыв сверхновой SN1987A, наблюдавшийся 23 февраля 1987 г., оказался очень удобным для наблюдений гамма-излучения от этой звезды, т.к., оказалось возможным измерить энергетический спектр гамма-квантов. В нём были обнаружены две спектральные линии 847 и 1288 кэВ, которые принадлежат нестабильному изотопу кобальт-56 (с периодом полураспада 77 дней), образовавшемуся, в свою очередь, из изотопа никеля-56. Конечным продуктом этих реакций было железо-56. По интенсивности гамма-линий была определена общая масса железа, образовавшаяся во взрыве – примерно 0,07 массы Солнца. Таким образом, мы видим, что измерение гамма-излучения является ещё одним важным источником информации о содержании химических элементов в облаке взорвавшейся звезды.

Среди последних достижений в исследованиях космического гамма-излучения следует отметить следующие два, которые имеют непосредственное отношение к проблеме поиска их источников.

Не так давно астрофизики обратили внимание на существование огромных «пузырей» гамма-излучения, заполняющих северную и южную полусферы нашей Галактики (см. рис. 9.3). Если предположить, что источником этого излу-

чения являются космические лучи, то эти образования должны свидетельствовать о том, что «пузыри» — области во Вселенной, где происходит очень

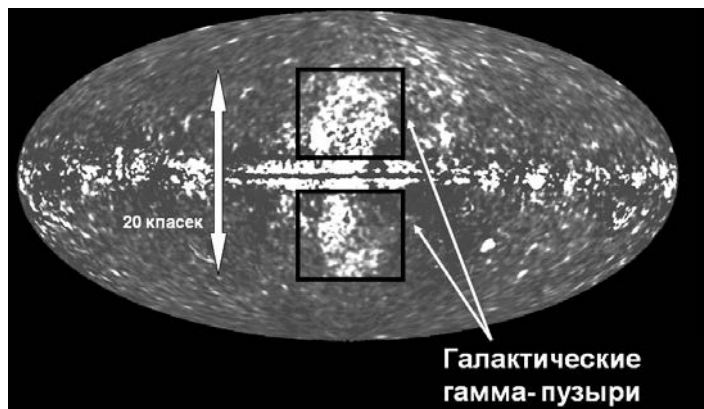


Рис. 9.3. Галактические «пузыри» гамма-излучения могут быть областями эффективного ускорения космических лучей.

эффективное ускорение частиц. Диапазон энергий гамма-квантов в «пузыре» — 1–100 ГэВ, т.е. энергия космических протонов, их рождающих должна быть того же порядка. Но какова природа «пузырей»? Одной из возможных версий является гипотеза о скоплении в этой области ударных волн, распространившихся в эту область из черной дыры, расположенной в центре нашей Галактики,

Специалисты полагают, что черная дыра в центре нашей Галактики пассивна. Иными словами, мы сейчас наблюдаем то, что много лет назад происходило здесь, а именно: окрестное вещество перестало стягиваться в черную дыру. Как результат, она не стритуся джетам замагниченной плазмы (см. далее рис.9.6). Напротив, то количество блазаров, которые сейчас наблюдают космические гамма-телескопы, а их более 1600, свидетельствуют о существовании во Вселенной «активных черных дыр», которые, вероятно, являются более типичными астрофизическими объектами во Вселенной, чем черная дыра в центре нашей Галактики. Следует упомянуть, что космический аппарат Fermi обнаружил всего несколько неактивных галактик за все время своих наблюдений с 2008 г. Почему так устроен мир?

ки, во время активных процессов в ней. Иными словами, источником энергии ускоренных космических лучей здесь должна быть черная дыра.

Другой пример также непосредственно связан с черной дырой в центре Галактики. Когда наземный гамма-телескоп HESS был наведен на центр Галактики, он обнаружил потоки гамма-квантов, достигающих энергий около 1 ПэВ. Иными словами, центр Галактики может быть эффективным «Пэватроном» — ускорителем частиц вплоть до таких энергий.

Здесь надо сделать важное замечание. Какова максимальная энергия гамма-квантов, наблюдаемая в экспериментах?

Сейчас хорошо изучено гамма-излучение некоторых источников вплоть до ТэВ-ной области энергий. Безусловно, при таких энергиях необходимо применять наземные установки, которые регистрируют гамма-кванты по их черенковскому свечению в атмосфере. Для сравнения, верхний предел измерений гамма-излучения на космической обсерватории CGRO составил 20 ГэВ.

Среди ТэВ-ных источников гамма-излучения Маркарян — наиболее мощный в этом диапазоне энергий. Это довольно интересно, так как процесс взаимодействия двух гамма-квантов ($\gamma\gamma$), приводящий к рождению электрон-позитронной пары (e^+e^-) в присутствии реликтового излучения должен бы ограничивать поток гамма-квантов сверхвысоких энергий. Но дальше ещё загадочней: есть сведения, что из созвездия Лебедь-ХЗ до нас тоже доходят гамма-кванты с энергией в ПэВ'ы... Или... это ошибка эксперимента?

Подавляющее число экспериментов по наблюдениям гамма-источников свидетельствуют о максимальной энергии гамма-квантов, не превышающей десятки — сотни ТэВ. А спектр галактических космических лучей простирается, как мы это знаем, до энергий 10^{17} эВ. Как объяснить этот наблюдаемый факт? Пока мы не знаем, и надеемся на дальнейшие исследования.

Не только космические лучи, но и такие мощные астрофизические объекты как *нейтронные звезды* или *пульсары* сами могут быть источниками космического гамма-излучения, они обладают достаточной для этого энергией. Действительно, ряд источников космического гамма-излучения ассоциируется с ло-

кальными астрофизическими объектами, такими как нейтронные звезды. Здесь хорошо изученный объект — пульсар в созвездии Краба. Этот источник излучает гамма-кванты вплоть до энергий ~ 200 ТэВ. Или пульсар Вела, находящийся на расстоянии около 300 пк, он мощный генератор электромагнитного излучения в диапазоне от радиоволн до энергий гамма-квантов.

Одной из загадок астрофизики является объект в созвездии Близнецов. Он получил название Джеминга (Jeminga, от английского словосочетания — Gemini gamma ray). Это один из наиболее мощных источников гамма-излучения. Лишь после нескольких лет исследований этого объекта удалось обнаружить его оптический двойник — им оказался очень слабый астрофизический объект. Скорее всего, это нейтронная звезда с периодом 0,24 сек на расстоянии всего (!) 380 пк. Это максимально близкая к нам нейтронная звезда.

Однако гораздо более интригующей с точки зрения астрофизики является гипотеза происхождения гамма-излучения, связанная с темной материей. Все больше и больше появляется теорий в попытке объяснить существование темной материи. Это немудрено: темная материя — это большая часть нашего мира. Еще не обнаруженные массивные слабо взаимодействующие частицы WIMP'ы — один из кандидатов для темной материи — в отличие от частиц космических лучей не взаимодействуют с электромагнитным излучением, но они могут сталкиваться друг с другом, порождая гамма-излучение. Вот вам и альтернативное объяснение гало гамма-излучения нашей Галактики — доминирующая темная материя создает гамма-свечение Млечного Пути.

Аннигиляция вещества с антивеществом — ещё один источник гамма-излучения. Это известно. Но есть проблема — найти, доказать существование во Вселенной самого антивещества. И будущие исследования космического гамма-излучения, несомненно, должны способствовать этому.

Гамма-кванты энергичнее фотонов видимого света в десятки миллионов раз. Энергетический спектр гамма-излучения (см. рис. 7.3) чрезвычайно широк — от 10^5 – 10^6 эВ (мягкое гамма-излучение) до гамма-излучения ультравысоких энергий (10^{14} – 10^{17} эВ). Форма спектра, как это видно из рис. 7.3, достаточно гладкая, однако при хорошем разрешении в нём можно различить отдельные спектральные линии. Например, аннигиляционную линию 511 кэВ, соответствующую взаимодействию электронов и позитронов.

Картину Галактики, как она изображена на рис. 9.1, невозможно получить на Земле — эти гамма-кванты, как отмечалось выше, поглощаются атмосферой. «Картина» Вселенной в гамма-диапазоне не только более информативна, но и представляет качественно новую информацию астрофизикам, она позволяет увидеть ряд локальных крупных астрофизических объектов в Галактике, ответственных за генерацию гамма-излучения. Среди них, например, Вела — крупное созвездие на краю Млечного Пути, или Лебедь X3. Они прекрасно различаются в 100 МэВ-ном гамма-излучении. Именно поэтому возникло мощное направление в космических исследованиях — гамма-астрономия, позволяющая гораздо глубже заглянуть в недра Вселенной, чем это позволяет сделать обычная, оптическая астрономия.

Данный краткий экскурс показывает существующее сейчас разнообразие теоретических подходов к объяснению уже лежащей на столах астрофизиков экспериментальной картины космического гамма-излучения. Безусловно, это свидетельство в пользу быстроразвивающейся науки.

9.2. Загадочные всплески гамма-излучения

На рис. 9.1 мы видели картину диффузного гамма-излучения нашей Галактики. Но, оказывается, существуют дискретные, очень кратковременные вспышки излучений в различных диапазонах длин волн: оптическом, гамма, ультрафиолетовом, получившие названия гамма-всплесков. Они на много порядков мощнее гамма-излучения Галактики, изображенного на рис. 9.1. Гамма-всплески — самое мощное событие во Вселенной — космический взрыв, во время которого выделяется энергия более 10^{53} эрг/с, примерно столько же, сколько при взрыве сверхновой звезды, но за одну секунду. До сих пор природа гамма-всплесков, наряду с ускорением КЛПВЭ, остается одной из загадок современной астро-

физики. Считается, что их источники находятся на очень больших, так называемых, космологических расстояниях и связаны с коллапсом массивных звезд. Для понимания природы гамма-всплесков очень важны одновременные наблюдения в оптическом и гамма диапазонах. До сих пор удавалось зарегистрировать в основном оптическое «послесвечение», т.е. отклик межзвездной среды на проходящую через нее ударную волну, возникающую во время взрыва. Зарегистрировать же оптическое излучение непосредственно в момент самого гамма-всплеска очень трудно, поскольку заранее неизвестно, из какой области Вселенной приходит это излучение.

Открытие гамма-всплесков было, пожалуй, одним из замечательных событий в астрофизике XX века. Их обнаружение тесным образом связано с военными космическими программами эпохи холодной войны в 60-х годах. В тот период развёртывалась система космических средств для обнаружения наземных ядерных взрывов. Американские специалисты из Лос-Аламоса запустили серию спутников «Vela» с детекторами для регистрации гамма-излучения, генерируемого при взрывах атомных бомб...

Идея космического слежения за наземными взрывами атомных бомб весьма проста: по временной задержке импульсов гамма-излучения в нескольких детекторах, размещённых на орбите и направленных на Землю, можно определить место, где произведён взрыв. Однако космический ядерный мониторинг дал совершенно неожиданный результат: всплески приходили не от Земли, а из космического пространства! Более того, их нельзя было идентифицировать ни с одним из объектов Солнечной системы. Некоторое время обнаруженное явление было даже засекречено.

Учёных удивляла довольно большая частота наблюдений гамма-всплесков. Заметим, что впервые этот факт был обнаружен в ходе экспериментов на отечественных космических аппаратах серии «Венера», выполненных под руководством Е.П. Мазеца из Ленинградского Физико-технического института. Если в первые годы исследований гамма-всплесков их наблюдали от 10 до 20 в год, то теперь, по мере освоения более чувствительных детекторов, их частота оценивается на уровне 300 в год. Проведённая корректировка числа событий на карту всего неба, даёт ещё большую величину — около 800 гамма-всплесков год.

Всплески отличаются разнообразием своих временных масштабов — их длительность находится в интервале от десятков миллисекунд до десятков секунд (см. рис. 9.4).

Энергетический спектр гамма-всплесков, также как и у космических лучей, падающий — с увеличением энергии поток монотонно снижается. Он простирается от десятков кэВ до ГэВ-ных энергий, а иногда наблюдаются даже ТэВ-ные частицы.

С самого начала экспериментального исследования гамма-всплесков делались попытки их отождествления с какими-либо астрофизическими объектами. Однако надёжных «привязок» ни в рентгеновском, ни в оптическом диапазонах в 70–80-х годах сделать не удалось.

Статистический анализ гамма-всплесков, проведенный в уже упомянутом выше эксперименте «Конус» Е.П. Мазеца на АМС «Венера 11» и «Венера 12», показал, что действительно в распределении излучения нет какого-то выделенного направления, т.е. оно является изотропным. Это было первое замечательное свойство гамма-всплесков, открытое в самом начале их исследований. С другой стороны, изучение зависимости частоты их появления от величины потока показало, что она отличается от характерного для однородно-заполненного пространства.

Дальнейшие эксперименты на орбитальной гамма-обсерватории имени Артура Комптона (CGRO — Compton Gamma Ray Observatory) на огромной статистике (более 2000 всплесков) установили, что распределение гамма-всплесков не однородно. Как следствие, был сделан вывод, что источник гамма-всплесков не может быть связан с нашей дискообразной Галактикой. Оставались две возможности: либо их источники находятся в гало, образуя что-то наподобие сферической короны, либо разбросаны по всей Вселенной (см. рис. 9.5).

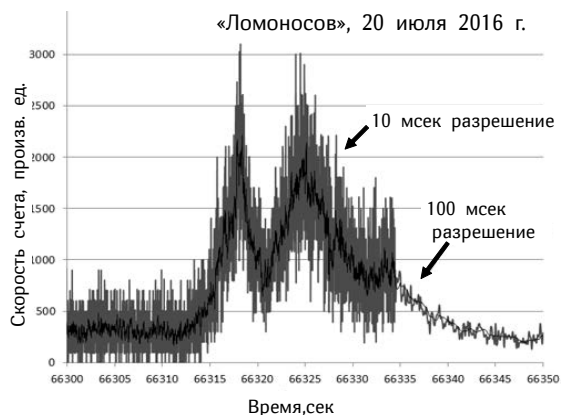


Рис. 9.4. Гамма-всплеск по наблюдениям на спутнике «Ломоносов» с разным временным разрешением (10 мс и 100 мс). Очевидно проявление тонкой структуры в миллисекундном диапазоне.

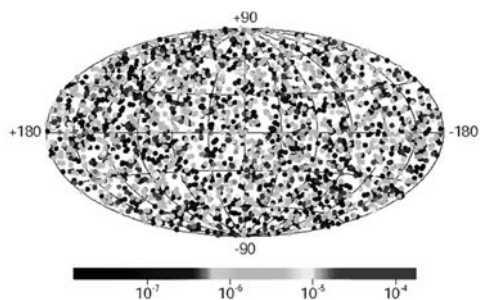


Рис. 9.5. Распределение дискретных источников гамма-всплесков на карте звездного неба по данным эксперимента BATSE на спутнике CGRO. Отсутствует какая-либо ярко выраженная концентрация источников к галактической плоскости или к центру Галактики. Нет и концентрации источников в направлении известных ассоциаций астрофизических объектов. Распределение гамма-всплесков изотропно.

Одно время галактические модели гамма-всплесков доминировали в сознании астрофизиков, прежде всего исходя из энергетических соображений: требуемые в таких моделях значения энерговыделения — светимости источников (до 10^{40} эрг/сек) — ненамного превосходили мощность уже известных рентгеновских источников: тесных двойных звёзд, барстеров. Если же встать на космологическую позицию, т.е. предположить, что источники гамма-всплесков находятся в удалённой Вселенной, скажем, на расстояниях более 15 млрд световых лет, то в этом случае вывод должен быть ошеломляющим — энерговыделение гамма-источников должно превосходить возможности наиболее мощных известных астрофизических объектов — квазаров.

Мощность квазаров значительно меньше, чем энерговыделение наиболее мощных гамма-всплесков. Для последних оно может достигать 10^{52} эрг/с и более. Подобные значения энерговыделений наблюдаются при взрывах сверхновых, и основная доля энергии заключена в импульсном потоке нейтрино. Но сверхновые взрываются значительно реже, нежели наблюдаются гамма-всплески. Кроме этого, энерговыделение происходит на более длительных масштабах времени. Для гамма-всплесков выдвинут другой механизм генерации — слияние двойных звёзд. Вкратце процесс их эволюции описывается следующим образом.

Процесс слияния звёзд заканчивается в тот момент, когда ядро одной из них сжимается до предела — момента отделения её внешней оболочки и начала переработки в термоядерной реакции горения гелия (водород уже перешёл в гелий на более ранней фазе эволюции звёзд). В результате образуются так называемые звёзды Вольфа-Райе, в которых за время порядка ста тысяч лет весь гелий сжигается, и звезда взрывается как сверхновая, образуя нейтронную звезду. Вторая звезда повторяет жизненный путь первой и через некоторое время образуется пара двух нейтронных звёзд. Затем, через 10–12 млрд лет, происходит слияние этих звёзд с выделением гигантской энергии.

Однако эта модель, привлекательная, в первую очередь, с энергетической точки зрения, испытывает большие трудности. Следует объяснить происхождение популяции нейтронных звёзд во внешней оболочке гало, так как избыточной концентрации гамма-всплесков вблизи галактической плоскости не наблюдается. К тому же, не наблюдается гало из нейтронных звёзд у близлежащих галактик. Так, например, нет никаких указаний на то, что ближайшая к нам Туманность Андромеды — источник значительного потока гамма-всплесков.

Поиски источников гамма-всплесков на звёздном небе продолжались. Успех пришёл в конце 90-х годов, когда европейцы запустили спутник BeppoSAX, — рентгеновскую обсерваторию, названную в честь известного итальянского астронома Джузеппе (Беппо) Оккиалини. Идея заключалась в сопоставлении положения гамма-всплеска с рентгеновским источником, ошибка позиционирования которого значительно меньше. И в 1997 г. действительно был зафиксирован гамма-всплеск, сопровождавшийся рентгеновским послесвечением. Точность определения координат была достаточна для наведения на это место наземных оптических телескопов и космического — «Хаббла».

Здесь был обнаружен удивительный объект с изменяющейся яркостью свечения в оптическом диапазоне. Затем были зарегистрированы другие гамма-всплески, связанные с аналогичными оптическими объектами. Измерив по доплеровскому смещению расстояние до них, учёные пришли к выводу, что они находятся на границе видимой части Вселенной. Таким образом, появилась необходимость связи гамма-всплесков с конкретными источниками, удалёнными на космологические расстояния и являющимися, вероятно, самыми мощными во Вселенной. Напомним, эти источники должны высвобождать $\sim 10^{51}$ – 10^{54} эрг в течение типичной продолжительности всплеска — 10–100 сек.

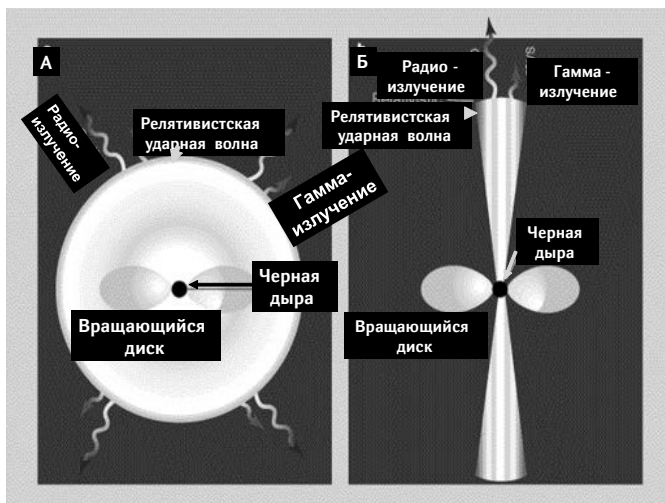
Что же это за источники, способные генерировать такие гигантские потоки энергии? Имея большой опыт создания мощных взрывных устройств — атомных и термоядерных бомб, учёные быстро пришли к аналогии с рукотворными взрывающимися звёздами: при взрыве атомной бомбы импульс гамма-излучения, предшествующий разлёту раскалённого плазменного шара, является одним из основных поражающих факторов.

Взоры вновь обратились к нейтронным звёздам. Чем они привлекательны? Имея мощнейшие магнитные поля (см. диаграмму Хилласа, рис. 7.1) — до $\sim 10^{12}$ Гс, и, возможно, более, быстрые скорости вращения — сотые доли секунды и большую светимость (т.е. энерговыделение), они являются достойными кандидатами на роль источников гамма-всплесков. Электрическое поле, генерируемое из-за быстрого вращения намагниченной звезды, должно ускорять частицы до гигантских энергий. Это «локальная» модель, объясняющая происхождение всплесков «вблизи» нас, на расстояниях ближе 100–200 пк (меньше толщины галактического диска).

В последнее время обсуждается связь рождения гамма-всплесков с взрывами внегалактических сверхновых особого класса — гиперновых. Это довольно редкий класс сверхновых, связанных с предшественницей — звездой Вольфа-Райе — массивной звездой, лишённой водородной и гелиевой оболочки. Коллапс таких звёзд возможен один раз в 100 тысяч лет, что значительно реже, чем наблюдаемый коллапс обычных сверхновых (1 раз в 30–50 лет в нашей Галактике). При взрыве ядра в центре такой звезды образуется чёрная дыра размером в десять масс Солнца, окружённая массивным аккреционным диском и мощным магнитным полем до 10^{15} Гс. Однако взрывы сверхновых происходят значительно реже, чем наблюдаемые гамма-всплески.

В этой модели (рис. 9.6) генерация потоков радиоизлучения и гамма-квантов происходит в узком конусе в полярных областях умирающей звезды — гиперновой. Коллапс массивной звезды Вольфа-Райе в чёрную дыру происходит за сверхкороткое время — триллионные доли секунды. Образовавшиеся при этом электрические поля могут конвертироваться в электроны и позитроны, которые затем быстро аннигилируют. Возникает огромный энергетический импульс, приводящий к нагреву звезды до температуры в миллиарды градусов. Сама звезда пока ещё находится вне чёрной дыры. Горячее вещество звезды моментально, со скоростью света, расширяется, это и есть взрыв. Результатом взрыва является гамма-вспышка, которую мы и наблюдаем вблизи Земли.

Рис. 9.6. Модели рождения гамма-всплесков в результате коллапса звезды Вольфа-Райе. Звезда погибает в течение очень короткого промежутка времени, превращаясь в чёрную дыру (А). Гамма-излучение, распространяющееся в узких полярных конусах, результат этого взрыва (Б).



В этой модели гамма-излучение распространяется в виде узких, направленных в противоположные стороны конусов от взрывающегося астрофизического объекта.

А если конус не будет направлен в сторону наблюдателя? Тогда будет регистрироваться лишь рентгеновское, более длительное послесвечение взорвавшегося объекта.

Похоже, что один такой случай, в 2001 г., наблюдался. Надо отметить, что за более чем 30-летнюю историю наблюдения гамма-всплесков все рентгеновские и оптические послесвечения наблюдались после самих гамма-всплесков. Однако при нескольких тысячах зарегистрированных гамма-всплесков послесвечение наблюдалось лишь в 20 событиях. В эксперименте, упомянутом выше, «одинокое» послесвечение — чрезвычайно редкое явление.

Итак, модели генерации гамма-всплесков претерпели и продолжают претерпевать очень быструю эволюцию. Вначале это были модели, связанные с нейтронными звёздами в диске и в гало Галактики, затем — слияние двойных звёзд на космологических расстояниях, и теперь — взрывы гиперновых. Является ли эта гипотеза окончательной? Скорее всего, нет. Уже обсуждаются и другие подходы к возможной интерпретации рождения гамма-всплесков. Так, одна из новых моделей переносит нас к ранней эпохе эволюции галактик: к квазарам и активным ядрам галактик, где массивные звёзды в 100–500 масс Солнца коллапсируют в чёрные дыры. Но в этой модели далеко не всё очевидно, и пока астрофизики склоняются к тому, что вряд ли этот механизм может быть доминирующим.

Недавние астрономические наблюдения показали, что повышенная частота формирования новых звёзд происходит как раз в местах возможной локализации гамма-источников. В этих местах наблюдается повышенная плотность вещества — так называемые гигантские молекулярные облака. Факты свидетельствуют в пользу того, что гамма-источники связаны с эволюцией массивных звёзд. Однако вновь следует оговориться: это пока гипотеза, требующая большего объема наблюдательных данных.

Более того, в связи с этим существует важная проблема, ждущая своего решения — проблема частоты наблюдений гамма-всплесков. Её суть в том, что

наблюдаемая частота их появления на три порядка выше частоты рождения звёзд, например, Вольфа-Райе, в нашей Галактике.

Другой важный аспект этой проблемы заключается в том, что астрофизические объекты, ответственные за генерацию гамма-всплесков, должны быть и мощнейшими источниками джетов — узконаправленных струй космических лучей — электронов и ядер. Последние исследования гамма-излучения (например, на космической обсерватории «Интеграл») действительно наглядно демонстрируют существование таких узких, симметричных и направленных в разные стороны двойных джетов гамма-излучения («twin-jets»). Этот результат имеет важное приложение и для ускорения космических лучей, которые могут ускориться ударными волнами, распространяющимися вдоль джетов! Тем самым мы отходим от идеи сферически-симметричного ускорителя космических частиц, связанного с взрывом сверхновой и разлётом её остатков в виде шарообразной структуры.

Может ли такой источник стать конкурентом механизма генерации космических лучей от «обычных» сверхновых, покажет время: пока нет ни наблюдательных данных, ни моделей, позволяющих строго судить об этом.

Так что нужны и новые идеи, и новые результаты экспериментов в этом чрезвычайно важном направлении астрофизики.

Глава 10. Частицы из зазеркалья

Зачем среди ночной поры
встречаются антимир?

Андрей Вознесенский

В теории Большого взрыва есть проблемы. Как отмечалось выше, в первые мгновения после Большого взрыва, в период Великого объединения, у всех частиц нет масс, и характер их взаимодействий между собой одинаков. В этот момент Вселенная была симметричной: число частиц и античастиц было абсолютно одинаковым. Однако мы живём в материальном мире, состоящем из вещества. Почему?

10.1. Другое состояние вещества

Является ли типичным для Вселенной то состояние вещества, которое существует на нашей планете и в её окрестностях? «Наши» атомы состоят из нуклонов — протонов, заряженных положительно, нейтральных нейтронов, упакованных в ядра, и отрицательных электронов, расположенных на внешних оболочках вокруг ядра. Вещества из антиатомов вблизи нас нет.

Однако сомнение в исключительности нашего материального мира зародилось после предсказания англичанина П. Дирака о возможности существования электрона с положительным зарядом. Такая частица (позитрон) действительно была открыта в 1932 г. в экспериментах К. Андерсона с космическими лучами в камере Вильсона.

Надо отметить, что изучение космических лучей в середине XX века сопровождалось фейерверком открытий новых элементарных частиц. В 1936 г. были открыты мюон — мю-мезон (μ^-) и его античастица — μ^+ , а в 1947 г. — отрицательный и положительный пионы (π^+ , π^-).

Затем, уже на ускорителях, в 1955 и 1956 гг., были обнаружены отрицательные «кирпичики» ядра — антипротон и антинейтрон. Ну, а сейчас мы знаем, что практически у всех известных частиц есть их античастицы.

Нобелевскому лауреату П. Дираку принадлежат слова о том, что и Земля, и Солнечная система, преимущественно населённая отрицательными электронами и положительными протонами, скорее случайность, а не закономерность во Вселенной. Возможно, другие звёзды и галактики состоят из антиматерии. Поэтому обнаружение античастиц в космических лучах стало популярной, если не навязчивой идеей среди космиков.

Вместе с тем, из господствовавших до середины 60-х годов представлений в физике элементарных частиц об эквивалентности ядерных взаимодействий между нуклонами (протонами и нейтронами) и антинуклонами (антипротонами и антинейтронами) следует существование ядер из антинуклонов — кирпичиков, из которых состоит антивещество.

Вещество и антивещество не могут существовать вместе — они аннигилируют. Взаимодействие электронов и позитронов приводит к образованию гам-

ма-квантов, а нуклонов и антинуклонов — к образованию нейтральных пионов (π^0). Эти частицы нестабильны и распадаются на гамма-кванты с довольно значительной энергией — более 70 МэВ.

Так существует ли антивещество во Вселенной? Если нет, то почему? Почему исчезла симметрия мира? Безусловно, это исключительно актуальные вопросы астрофизики.

Поиски античастиц в космических лучах — способ доказать присутствие антивещества во Вселенной. В течение многих лет попытки найти их были безуспешными. Вопрос об антимирах оставался открытым. К тому же, в 1967 г. А.Сахаров и в 1970 г. В.Кузьмин публикуют работы, действительно ставившие под сомнение саму возможность наблюдения антивещества в современной Вселенной.

Для пояснений вновь необходимо вернуться к Большому взрыву.

На самых начальных стадиях эволюции Вселенной количество вещества и антивещества, или барионов и антибарионов, было равным. Затем, во время начала сверхбыстрого расширения Вселенной, когда она вышла из состояния теплового равновесия, возник совсем небольшой, оцениваемый в 10^{-9} – 10^{-10} , дисбаланс между веществом и антивеществом в пользу вещества — Вселенная приобрела так называемый барионный заряд.

Вслед за моментом появления крохотного дисбаланса всё остальное вещество и антивещество исчезло в результате аннигиляции, а тот первичный остаток и стал исходным материалом для современной Вселенной. Тепловое равновесие Вселенной восстановилось, но асимметрия вещества и антивещества осталась. Поэтому мы живём в мире, состоящем из вещества.

Справедливости ради надо отметить, что существует и другая точка зрения на эту проблему, а именно: Вселенная была асимметричной по отношению к частицам и античастицам с самого начала, с исходного момента Большого взрыва. Но вернемся к экспериментам...

10.2. Погоня за антивеществом

Поиски космических античастиц продолжались. Удача улыбнулась Э.Богомолову из Ленинградского Физико-технического института в 1969–1974 гг. Используя магнитный спектрометр, он в ходе стратосферных полётов на аэростатах зарегистрировал первые антипротоны.

Какой информацией об античастицах из космоса мы обладаем сейчас?

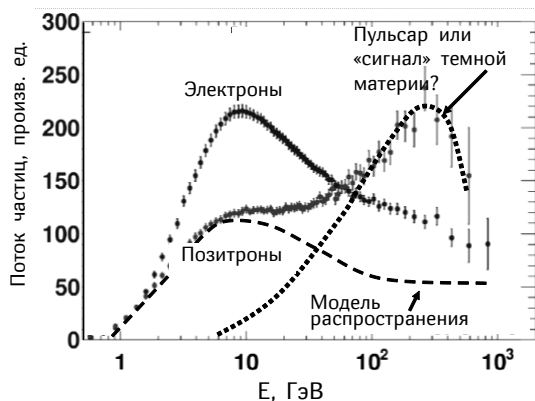
Результаты можно видеть на рис. 10.1. Эксперименты по измерению античастиц проводились на аэростатах, на высотах около 40 км, в космосе, на нескольких спутниках. Основной вывод, который следует из всех осуществлённых экспериментов, это то, что наблюдаемые антипротоны и позитроны являются вторичными продуктами взаимодействия космических лучей с межзвёздной средой и с земной атмосферой. Действительно, антипротоны и позитроны могут появиться в результате взаимодействия «обычных» космических лучей с веществом межзвёздной среды. Поэтому факт их регистрации в космосе ещё не является прямым доказательством существования антиматерии. Могут ли

Рис.10.1. Энергетический спектр антипротонов по данным современных экспериментов. В отношении их природы поставлена точка: они вторичного происхождения — продукты взаимодействия космических лучей с межзвездной средой. Сплошные линии — модели, описывающие взаимодействия космических лучей и их распространение в среде.

существовать в природе частицы в первозданном виде, т.е. достигшие Солнечной системы и окрестностей Земли, не испытав взаимодействий с межзвёздной средой? Это большой вопрос для астрофизики космических лучей и, как мы увидим далее, на него пока нет ответа...

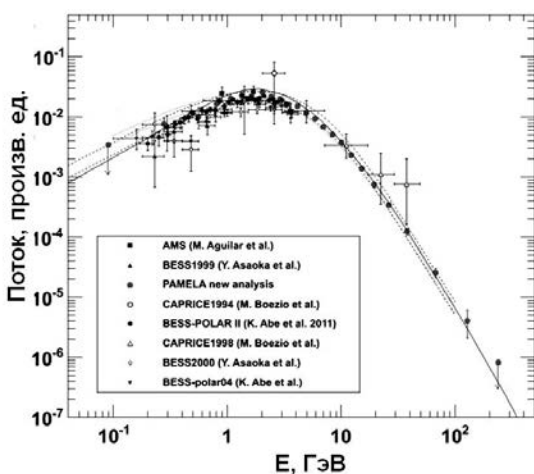
Каков же итог наблюдений? Вот он: как на Земле, так и в ближнем космическом пространстве отсутствует сколько-нибудь заметное количество первичных антипротонов, антивещества. Позитроны наблюдаются, но их присутствие вполне можно объяснить столкновением других частиц. То же самое применимо к антипротонам — они появляются в результате взаимодействия первичных космических лучей либо с межзвёздной средой, либо с атмосферой. Но этот вывод справедлив лишь до определённых энергий. Что будет в области больших энергий, мы не знаем.

На самом деле, если бы оказалось, что при больших энергиях (более 10 ГэВ) наблюдался бы избыток антипротонов, это могло быть свидетельством в пользу существования WIMP'ов, — частиц тёмной материи. Уже упоминалось, что WIMP'ами могут быть парные нейтралы. При их аннигиляции и возникают антипротоны и позитроны. Поэтому обнаружение антипротонов в области высоких энергий может оказаться ключом к разгадке природы тёмной материи. Как мы видели, этого не случилось. Тем не менее, эта интрига сохранялась вплоть до конца 2000-х: только аэростатные эксперименты CAPRICE и BESS, а затем космические PAMELA и AMS-02 поставили в этой проблеме точку.



Гораздо более интересная ситуация складывается вокруг измерений позитронов.

Рис.10.2. Энергетические спектры электронов и позитронов. Спектры позитронов проявляют особенность при энергиях в несколько сот ГэВ, которую можно интерпретировать как проявления свойств темной материи, либо действием пульсара.



На рис. 10.2. вы можете видеть современные данные по измерениям электронов и позитронов (Данные AMS-02).

Нетрудно видеть, что: 1) энергетические спектры электронов и позитронов разные; 2) для позитронов спектр отличается от ожидаемого по модели распространения.

Что это может означать? Здесь можно рассмотреть два сценария: или эти частицы суть продукты распада все тех же частиц темной материи (возможно существует дополнительный поток античастиц в результате экзотического процесса аннигиляции суперсимметричных нейтрино), либо это проявление активности мощного пульсара (пунктир на рис.10.2). Действительно, мощным источником позитронов в нашей Галактике может быть чёрная дыра, расположенная в её центре. Космическая гамма-обсерватория CGRO зарегистрировала поток гамма-квантов из центра нашей Галактики (рис. 10.3), который может эмитироваться в результате аннигиляции позитронов и электронов.

Если всё же предположить, что во Вселенной существуют протяжённые области антивещества, то они не могут быть расположены ближе, чем на расстояниях ~ 10 Мпк. Если бы антивещество находилось ближе, то мы должны были бы наблюдать значительный поток гамма-излучения, возникающий в результате аннигиляции вещества и антивещества. Однако, такого излучения нет. С другой стороны, если вещество и антивещество отделены друг от друга во Вселенной, следовало бы ожидать существование неоднородностей в спектре реликтового излучения (см. рис. 7.3). А оценка таких «пустот» во Вселенной из неоднородностей спектра реликтового излучения приводит к их размерам до 15 Мпк, что делает картину о разделении вещества и антивещества мало-реалистичной.

Тем не менее, это всё лишь модельные предположения. Нужны более точные эксперименты, чтобы доказать отсутствие антивещества во Вселенной. Или присутствие? Наверное, последнее предположение пока нельзя полностью исключить.

Основной недостаток аэростатных экспериментов в их малой продолжительности, что не даёт возможности экспериментаторам продвинуться в область высоких энергий. Спутники позволят осуществить более длительные эксперименты и, что очень важно, выйти за пределы атмосферы, т.е. избавиться от компонентов антивещества, вызванных взаимодействием космических лучей с атмосферными ядрами.



Рис. 10.3. Эмиссия гамма-излучения в районе массивной чёрной дыры в центре Галактики по данным космической гамма-обсерватории CGRO. Джеты излучения, наблюдающиеся на снимке, могут быть результатом аннигиляции позитронов и электронов с энергией 511 кэВ. Источником этих частиц может быть тёмное вещество, состоящее, возможно, из гипотетических WIMP'ов. Они свидетельствуют, возможно, о мощном процессе аннигиляции в центре Галактики.

Однозначным свидетельством в пользу существования антивещества во Вселенной могло бы явиться наблюдение антигелия в космических лучах. Антигелий и другие антиядра могут возникать в результате термоядерных реакций в антизвёздах, аналогично тем, что протекают в обычных звёздах. Кроме того, антигелий мог остаться после Большого взрыва – на этот счёт есть теоретические расчёты.

В последнее время осуществлены два космических эксперимента, направленные на поиски антивещества в космическом пространстве: PAMELA и AMS-02.

Кстати, первоначально аббревиатура AMS означала «Antimatter Magnetic Spectrometer» – «Магнитный Спектрометр (поиска) Антивещества». Но, вероятно, разработчики AMS-02 вовремя решили, что такое название – не очень хорошая реклама будущему сверхдорогому космическому эксперименту. Они его изменили на «Alpha Magnetic Spectrometer», подразумевая первую, главную роль своего эксперимента.

В основе обоих – магнитные спектрометры, позволяющие разделять частицы по знаку их заряда. И в PAMELA, и в AMS-02 (рис. 10.4) используются постоянные магниты. В этих сложных приборах используются различные детекторы ядерных излучений, позволяющие разделять частицы по массам, скоростям и энергиям. По сравнению с экспериментом PAMELA, AMS-02 имеет большую светосилу, что позволило продвинуться в сторону больших энергий

по сравнению с PAMELA, и снизить порог чувствительности по регистрации антигелия.

Итог? По последним данным эксперимента AMS-02 отношение антигелия к «обычному» гелию 10^{-9} , т.е. ничтожно.

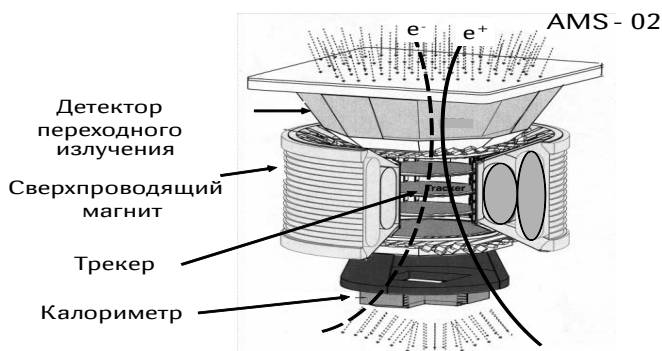


Рис. 10.4. В оборудование спектрометр AMS-02 на Международной космической станции входит ряд сложнейших приборов и сверхпроводящий криогенный магнит (однако, он был заменен незадолго до запуска на потоянный). Наличие магнита позволяет разделять частицы по заряду – для электронов и позитронов траектории будут искривлены в разные стороны, что делает возможным разделение сигналов от них в «позиционно-чувствительном» детекторе-трекере. Другие детекторы обеспечивают разделение частиц по массам, энергиям и скоростям.

А может прав был поэт: «...Знакомый лектор мне вчера сказал: «Антимиры? – Мура!» (Андрей Вознесенский).

Но нам, астрофизикам, все же надо ответить на вопрос: «Почему это так?»

Глава 11. Частицы Полтергейста

В каждой бездне есть своя бездна

Р. Эмерсон, поэт и философ

В этой главе речь пойдёт о нейтрино — частицах, прилетающих к нам из далёких областей Вселенной. Их ещё называют астрофизическими, чтобы отличить от тех, которые имеют другое происхождение, например, солнечное или атмосферное.

11.1. Приключения «неуловимых»

У этой частицы замечательная история открытия. В отличие от многих других «собратьев» её обнаружили не в экспериментах, а в теоретической работе по изучению бета-распада нейтрона. Это сделал В. Паули. Нейтрон — нестабильная элементарная частица, и за время немногим более десяти минут она распадается на протон, электрон и ещё что-то. Этим «что-то», что уносит недостающую энергию в реакции распада нейтрона ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$), должен был быть, по правильному заключению Э. Ферми, «лёгкий нейтрон», наречённый им «нейтрино». Сам В. Паули не верил в возможность быстрого обнаружения нейтрино. По гипотезе автора её открытия она не обладает массой покоя и имеет чрезвычайно малую эффективность взаимодействия с веществом. Эта частица может пересечь неимоверно толстый слой вещества, «не заметив» его. Поэтому нейтрино трудно обнаружить. Но всё же можно. Возможности регистрации нейтрино возрастают при увеличении мощности источников самих этих частиц. Но где взять мощные источники на Земле?

Ядерный взрыв — один из таких источников. В процессе деления нейтроном изотопа урана-235 образуются два осколка ядра, которые превращаются в стабильные ядра через ряд промежуточных ядерных превращений, в которых и рождаются довольно энергичные нейтрино с энергией в несколько МэВ. При взрыве атомной бомбы происходит образование огромного потока нейтрино. Конечно, можно этим было воспользоваться ещё в 1945 г., когда американцы взорвали первую атомную бомбу. И Ф. Рейнис, первым обнаруживший нейтрино, думал пойти этим путём. Но пошёл путём более безопасным — поиском нейтрино от другого источника — ядерного реактора. Расчёты приводят к величине потока нейтрино более 10^{19} частиц для реакторов мощностью более 500 МВт. Это большая величина, вселяющая надежду на успех в эксперименте.

Ф. Рейнис назвал свой эксперимент на реакторе «Проект Полтергейст» (1953–56 гг.), подчёркивая стремление физиков поймать невидимые «барабашки». Он установил вблизи реактора детектор-мишень — 400 литров жидкого хлористого кадмия, в котором должны были происходить реакции взаимодействия протонов и нейтрино. За три месяца экспериментаторы «поймали» несколько десятков частиц. Это было экспериментальным подтверждением открытия, сделанного В. Паули на бумаге...

Б. Понтекорво ещё в 1946 г. предложил другой метод регистрации нейтрино: захват этих частиц изотопом хлора-37 (^{37}Cl) с образованием изотопа аргона-37 (^{37}Ar). Если «выловить» образовавшийся аргон-37 из детекторной мишени, то, подсчитав его количество, можно определить поток падающих на него нейтрино. Но... результат был отрицательным — изотопы аргона не были обнаружены.

Это явилось первым указанием на то, что нейтрино может быть разным. И действительно, американка Ц. Ву показала, что в реакциях с участием нейтрино нарушается их зеркальная симметрия.

Теперь мы знаем, что существуют разные нейтрино: электронное, которое рождается в паре с позитроном, мюонное — в паре с мюоном и тау-нейтрино. И все эти нейтрино ещё имеют свои античастицы.

Но вернёмся к Вселенной. Ведь нейтрино есть и там. Откуда они?

11.2. Нейтринное море реликтов

Большой взрыв, как гласит теория, образовал множество частиц — «кипящий суп» и в нём нейтрино. По мере расширения Вселенной и остывания этого «супа» энергии уже не стало хватать на рождение тяжёлых частиц (протонов, нейтронов) и их античастиц, что при существовании постоянно действующей аннигиляции привело к «вымиранию» тяжёлых частиц, из которых состоит нынешнее вещество. Уже к середине первой секунды после Большого взрыва доминировали лишь лёгкие частицы: фотоны, электроны, позитроны и нейтрино.

Скорость образования нейтрино и антинейтрино регулируется двумя противоположными процессами: балансом пар — электронов и позитронов с одной стороны, а также нейтрино и антинейтрино с другой:

$$e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$$

$$\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-.$$

Баланс наблюдается при высоких температурах, но при охлаждении нейтрино «обретают свободу» — Вселенная становится для них прозрачной. Это эпоха излучения в эволюции Вселенной. Она наступила через десятки доли секунды после Большого взрыва.

После «освобождения» количество нейтрино должно оставаться постоянным вплоть до наших дней. По мере расширения Вселенной их энергия изменяется из-за красного смещения, так же как и энергия реликтового электромагнитного излучения (см. Главу 7). Концентрация реликтовых нейтрино и реликтового электромагнитного излучения должна быть примерно равна ~ 400 частиц в кубическом сантиметре. Это очень много. Но «поймать» их очень тяжело. В отличие от реликтового излучения, реликтовые нейтрино пока не обнаружены. Современные экспериментальные методы не могут зарегистрировать нейтрино столь малых (не более 30 эВ!) энергий. А обнаружение их было бы грандиозным достижением. Вселенная «прозрачна» для них, и, изучая эти частицы, мы могли бы взглянуть в наше далёкое прошлое, непосредственно в период до начала синтеза существующих химических элементов.

Но есть ещё одна интригующая проблема, связанная с этими реликтами. Это проблема массы нейтрино или, для данного рассмотрения, проблема баланса массы Вселенной.

Здесь необходимо сделать небольшое отступление и сказать несколько слов о проблеме массы нейтрино. С открытием нейтрино была провозглашена «безмассовость» этой частицы. Но это требовало экспериментального подтверждения. Не вдаваясь в подробности очень сложных экспериментов по определению массы нейтрино, заметим, что за более чем 50-летнюю их историю, масса нейтрино в экспериментах неуклонно «стремится» к нулю. Б. Понтекорво в 1948 г. оценил верхний предел массы нейтрино менее, чем в 1200 эВ. А в современных экспериментах российского физика В.М. Лобашёва получен верхний предел в 2,5 эВ.

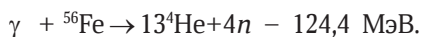
Но всё же, если даже масса нейтрино существует, то масса всех реликтовых нейтрино во Вселенной должна бы превысить массу обычного вещества во Вселенной во много раз! Но, если масса всех известных типов нейтрино — не менее 100 эВ.

Но пока это гипотеза «нейтринного моря» Вселенной, которая могла бы приоткрыть тайну «тёмной материи», или скрытого вещества во Вселенной, имеет столько же сторонников, сколько и противников.

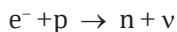
11.3. Нейтрино сверхновых

Выше упоминалось, что взрыв сверхновой — это коллапс звезды, как правило, красного гиганта, на поздней стадии её эволюции (рис.1.4). Этот период связан с последовательным горением вначале лёгких элементов, а затем тяжёлых, вплоть до железа, в термоядерном котле сверхновой. Начиная с фазы горения углерода, основным излучением звезды становится нейтринное. Именно с испусканием нейтрино связаны последующие фазы горения и сжатия звезды. С началом выхода нейтрино резко сокращается время горения звезды (см. табл. 1.1).

Коллапс звезды — превращение красного гиганта в нейтронную звезду или чёрную дыру сопровождается дополнительным образованием нейтрино за счёт двух процессов. Первый — известный в ядерной физике процесс фоторасщепления под воздействием гамма-квантов атомных ядер — распад тяжёлого ядра на более лёгкие с образованием нейтронов и поглощением энергии:



Нейтроны, образующиеся в этой реакции, распадаются и образуют антинейтрино. Кроме того, ещё одним источником антинейтрино в момент коллапса звезды является захват электронов протонами или тяжёлыми ядрами:



Оказывается, что не все нейтрино выходят из коллапсирующей звезды, часть из них «запираются» внутри неё. Образуется «нейтриносфера» звезды.

Процесс коллапса звезды с образованием «нейтриносферы» чрезвычайно сложен как с физической точки зрения, так и тем, что требует мощного компьютерного моделирования. Описание его находится в развитии. Отметим здесь лишь то, что «освобождение» нейтрино из коллапсирующей звезды связано, вероятно, с образованием и прохождением ударной волны через нейтриносферу. Расчёты показывают, что «запертые» нейтрино высвобождаются за очень короткое время — не более 10 мс. При этом нейтрино уносят примерно 5% энергии взрыва. На этом рождение новых нейтрино не заканчивается. После взрыва начинается образование «тепловых» нейтрино в процессе охлаждения нейтронной звезды. Всё это длится всего несколько секунд... Таков, вкратце, механизм рождения нейтрино во время взрыва сверхновой.

Наблюдалось ли что-либо подобное в эксперименте? Вернёмся к наиболее изученной сверхновой SN1987A.

11.4. Нейтринная астрономия сверхновой SN1987A

Пока мы ожидаем вблизи нас вспышки очередной сверхновой, масса научных публикаций посвящена наиболее знаменательному астрофизическому событию ушедшего XX столетия — наблюдению взрыва сверхновой SN1987A. Впервые в истории были осуществлены экспериментальные наблюдения «живых» нейтрино от этого объекта.

Действительно, нейтринные импульсы были зарегистрированы на нескольких детекторах: на японских установках Kamiokande II и IMB, под горой Монблан в Италии, и у нас на Баксане. Детекторы были разными: в японских установках использовались водные черенковские детекторы, а на Баксане и под Монбланом — жидкие сцинтилляторы. Интересно, что три эксперимента — Kamiokande II, IMB и Баксан дали примерно одно и то же время прихода нейтринного сигнала, а Монблан — с более чем 4-часовой задержкой. Сразу отметим, что причина этого эффекта не вполне ясна, и она сейчас интенсивно обсуждается.

Вернёмся к основному нейтринному импульсу. Он был зарегистрирован спустя всего несколько часов после наблюдения оптической вспышки. Это свидетельство в пользу компактности объекта. По величине потока нейтрино была оценена мощность взрыва. Она оказалась равной $3 \cdot 10^{58}$ эрг. Заметим вновь (см. Главу 5), что эта энергия достаточна, чтобы «разогнать» космические лучи до ПэВ-ных энергий. Интересно, что из наблюдений нейтрино от SN1987A по оценке времени распространения от источника, можно оценить их массу. Это было сделано. Она оказалась равной примерно 30 эВ, что больше, чем в современных наземных экспериментах.

Но не только сверхновые источники нейтрино во Вселенной. К числу «астрофизических» нейтрино относятся также частицы, рождающиеся в результате столкновений адронного компонента (преимущественно протонов) космических лучей с ядрами. В результате этих реакций могут рождаться нестабильные пионы и каоны. Эти частицы, распадаясь, служат ещё одним источником нейтрино. Но этот тип реакции не единственный, приводящий к рождению

нейтрино. Пионы могут появляться и в результате взаимодействий протонов космических лучей с фотонами низких энергий. Таким образом, мы видим, что происхождение и фонового гамма-излучения и фоновых потоков нейтрино обязано генерации в межзвёздной среде пионов. Это, так называемое, «пионообразование» космическими лучами. В этом плане и нейтрино и фоновое гамма-излучение являются вторичными продуктами взаимодействия космических лучей с межзвёздной средой. Оба эти «продукта» должны возникать одновременно, но затем, в процессе распространения, в отличие от гамма-излучения, нейтрино будет распространяться на более далёкие расстояния во Вселенной по сравнению с гамма-квантами. Последние «теряются» в результате более сильной эффективности взаимодействия со средой. Следовательно, если говорить о «нейтринной астрономии» — методе исследования Вселенной с помощью нейтрино, — она должна обладать большими возможностями по сравнению с гамма-астрономией. Отсюда уверенность, что с помощью нейтринной астрономии можно «видеть» более удалённые источники во Вселенной.

11.5. Капканы для неуловимых

Заканчивая этот раздел о необычайно интересных космических частицах — нейтрино, следует заметить, что здесь не рассмотрены ещё два важнейших их источника. Это — атмосферные нейтрино и солнечные. Атмосферные нейтрино образуются в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли. К солнечным мы вернёмся ниже, а пока кратко рассмотрим атмосферные.

Это вторичные частицы, участники каскадного процесса развития ливней вторичных частиц в огромном слое вещества — атмосфере. Безусловно, необходимо знать энергетический спектр этих частиц с тем, чтобы «отделить» эту нейтринную компоненту от космических нейтрино галактического и внегалактического происхождения, а также от реликтовых. Спектр атмосферных нейтрино можно рассчитать по исходному спектру космических протонов и других компонентов ядерного излучения. Это было сделано во многих работах. Качественное представление всех трёх энергетических спектров показано на рис. 11.1. В области малых энергий потоки атмосферных нейтрино самые мощные и, конечно, они являются весьма неприятным фоном в экспериментах

по поиску космических нейтрино.

Как создать детекторы, способные зарегистрировать неуловимые, слабо

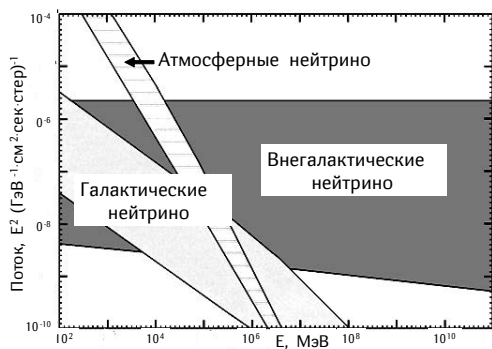


Рис. 11.1. Энергетические спектры различных компонентов нейтринного излучения: атмосферного, Галактического (от взрывов сверхновых звёзд и из Галактического диска) и астрофизического (от внегалактических источников).

взаимодействующие с веществом частицы, которых, к тому же, в области высоких энергий чрезвычайно мало?

Один из первых детекторов нейтрино был создан американцем Р. Дэвисом в 1968 г. В его детекторе содержалось 615 тонн жидкого вещества — перхлорэтилена, содержащего, как это следует из названия, хлор-37 (напомним, что идея этого метода принадлежала Б. Понтекорво). Оказывается, этот элемент может вступать во взаимодействия с нейтрино, а продуктами реакции будут изотоп аргона (^{37}Ar) и электроны:



Измеряя число образовавшихся атомов ^{37}Ar , можно оценить падающий на детектор поток нейтрино. Эксперимент был осуществлен американским исследователем Р. Дэвисом и направлен на изучение солнечных нейтрино. И Дэвис обнаружил их. За эти исследования ему вместе с М. Кошибой в 2002 г. была присуждена Нобелевская премия.

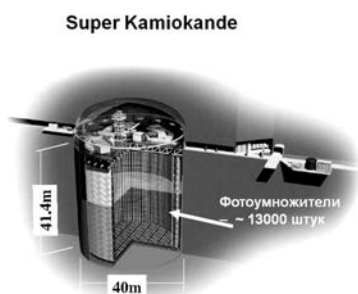
Другой тип реакций (галлий – германиевый) был реализован на подземной установке в Андырчи, у нас на Северном Кавказе (эксперимент SAGE), и под горой Монблан, в Гран-Сассо, Италия (эксперимент GALLEX). Так же, как и в хлор – аргоновом методе, по выделенным атомам ^{71}Ge судят об исходном потоке нейтрино.

Детекторы для регистрации нейтрино размещают под землёй, чтобы избавиться от нежелательного фона мюонов, образующихся в широких атмосферных ливнях и глубоко проникающих под Землю. Чем глубже размещен нейтринный детектор под землей, тем меньше нежелательный фон от этих частиц. Так, например, эксперимент Р. Дэвиса осуществляется в бывшей золоторудной шахте, на глубине 1400 м.

Но для регистрации нейтрино есть и другой метод — использование воды в качестве «рабочего тела» детектора.

Известно, что если частица движется в среде с показателем преломления больше 1, то при релятивистских скоростях возникает черенковское излучение. В данном случае, черенковское излучение релятивистских мюонов — продукта взаимодействия нейтрино с веществом. Разместив под водой фотоприёмники, можно определить поток падающих на установку нейтрино.

Самый большой такой детектор создан в 1996 г. в Японии, это международный эксперимент Super Kamiokande. О гигантских размерах этого детекто-



ра можно судить по следующим цифрам. Рабочий объём детектора — 50 тысячи тонн воды. Более 10 тысяч фотоумножителей измеряют черенковское излучение (рис 11.2). Основная цель эксперимента, как и в галлий-германи-

Рис. 11.2. Super Kamiokande — крупнейшая нейтринная установка в Японии. Она представляет собой огромный бак, наполненный водой, окружённый тысячами детекторов и опущенный глубоко под землю.

евых (SAGE и GALLEX) и хлорном эксперименте Дэвиса, — регистрация солнечных нейтрино.

Для астрофизических нейтрино нужны ещё большие объёмы «рабочего тела» детектора. Почему бы не использовать чистую, прозрачную воду естественных водоёмов? Под воду на длинных стержнях можно опустить герметически упакованные приемники света — фотоумножители, которые будут регистрировать черенковское излучение. На рис.11.3 показан принцип работы таких подводных детекторов.

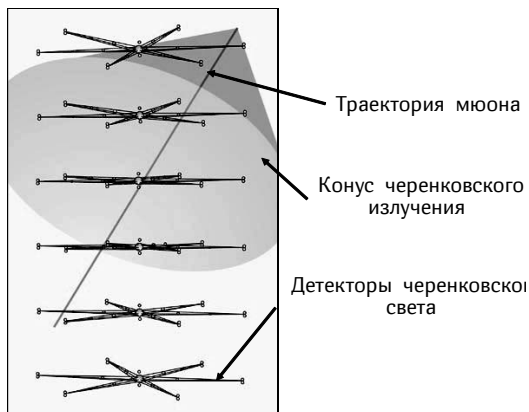


Рис.11.3. Принцип работы подводного детектора нейтрино. Черенковский свет в виде конуса, генерированный релятивистскими мюонами (прямая линия), регистрируется «башней» в несколько этажей из детекторов — герметически упакованных фотоумножителей.

Наш Байкал — уникальный водоём с очень прозрачной водой. Там уже работает установка НТ-200 («Нейтринный телескоп», рис.11.4) Похожий эксперимент ANTARES создан вблизи Сардинии, в Средиземном море.

Есть ещё один, уже начавший свою работу эксперимент по поиску нейтрино с использованием гигантского природного рабочего тела детектора.

Это — Ice Cube во льдах Антарктиды. Здесь внутри скважин глубиной от 1 до 3 км размещены детекторы, улавливающие черенковский свет, распространяющийся во льдах (рис.11.5).

Преимущество этого проекта в очень низком фоне по сравнению с водными детекторами. Природные водные и ледяные детекторы, пожалуй, наиболее чувствительные приборы для изучения астрофизических нейтрино, сулящих физикам большие перспективы в исследованиях.

Взаимодействие нейтрино с веществом рабочего тела установки приводит к генерации огромного количества фотонов, которые и регистрируются светочувствительным детектором. Важно то, что чем больше энергия нейтрино, тем больше размер световой вспышки.

Для астрофизических нейтрино с энергией, скажем, около 1 ПэВ она достигает сотни метров. Поэтому и размеры рабочего тела установки должны быть гигантскими.

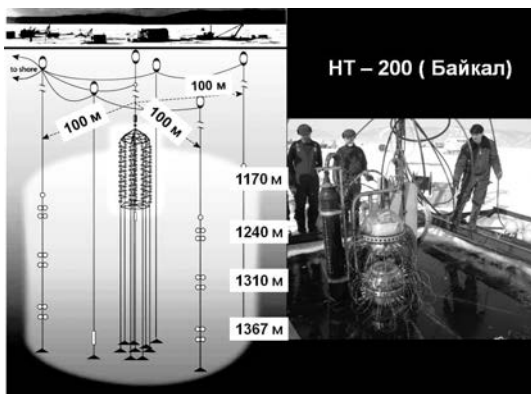


Рис.11.4. Установка НТ-200 по регистрации нейтрино на Байкале. Зимой, со льда на глубину около 1,5 км опускаются длинные стринги с детекторами для регистрации черенковского света.

Рис.11.5. Современная установка для регистрации нейтрино в Антарктиде — Ice Cube. Ее размеры поражают — для сравнения на рисунке показана Пизанская башня.

Основной детектор — 86 стрингов с закрепленными на них 5160 оптическими детекторами.

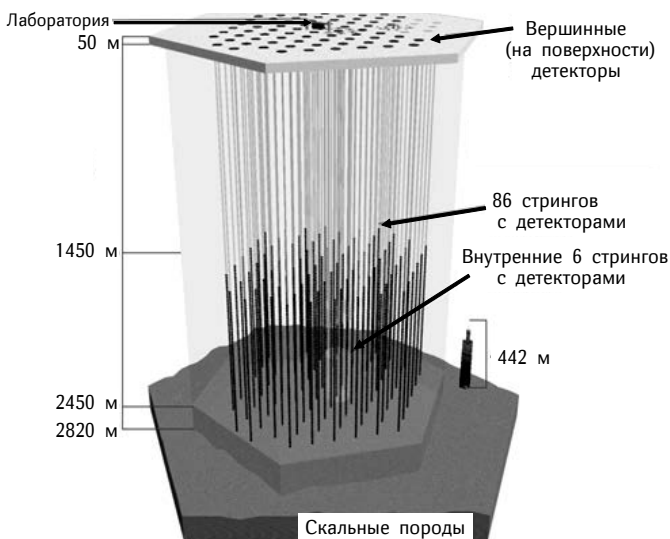
В случае проекта Ice Cube это именно так: рабочее тело в нем порядка кубического километра! И на ней может быть зарегистрировано всего несколько событий в год.

Ситуация сегодня такова — многие из описанных проектов остаются на бумаге или ожидают увеличения финансирования, а установка Ice Cube (рис.11.5) предоставила ученым уникальные и важнейшие результаты, суть которых сводится к простому заключению: астрофизические нейтрино действительно существуют! Это произошло в 2013 г., когда коллаборация Ice Cube впервые объявила, что она «видит» именно астрофизические нейтрино (было зарегистрировано пара нейтринных событий с энергией больше 1 ПэВ). Проблема заключалась в том, чтобы всем доказать, что эти частицы именно астрофизические — достаточно большой энергии по сравнению с атмосферными, которые в данном случае являются нежелательным фоном (см. рис. 11.1). Если в 2013 г. достоверность этих результатов еще была невелика, то в 2017 г. об этом можно было утверждать абсолютно уверенно: авторы утверждают о регистрации уже 37 событий на основе 3-летней длительности измерений. Впрочем, среди этих событий есть определенное количество и атмосферных. Тем не менее, можно было уверенно объявить об открытии астрофизических нейтрино. Что и было сделано.

А совсем недавно, в 2018 г., ученым из Ice Cube удалось отождествить направления прилета нескольких нейтрино от одного известного *блазара*. Собственно, этот факт — свидетельство рождения нейтринной астрономии.

11.6. О нейтрино предельно высоких энергий

О таких нейтрино уже упоминалось в Главе 8 в связи с космическим методом регистрации частиц ультравысоких энергий по измерению флуоресцентного свечения (проекты TUC, EUSO, POEMMA). Если в подобных экспериментах удастся зарегистрировать косые (входящие в атмосферу под малым углом) ливни в ночной атмосфере, то это будет означать, что источником свечения в атмосфере являются именно нейтрино с энергиями более 1 ЕэВ. Такие ливни



могут быть созданы только ими, т.к. ливень от заряженной частицы просто не пробьёт столь большую толщу атмосферы.

Нейтрино ультравысоких энергий носят название «космологических», в отличие от астрофизических, солнечных и реликтовых. Вполне возможно, что у них были общие «родители» с заряженными частицами в районе «ступни» — всё те же топологические дефекты и неизвестные тяжёлые частицы...

Описанными выше методами не исчерпываются возможности учёных зарегистрировать «неуловимых». Как уже мы видели, военные разработки с успехом находят применение в фундаментальной физике.

Со времён холодной войны остались системы обнаружения подводных лодок — подводные гидрографы — регистраторы акустических сигналов, размещённые на больших подводных пространствах. Так, база США в Атлантике вблизи Багамских островов занимает подводное пространство площадью 250 км². Именно здесь планировалось создать подводную акустическую установку. Ливень частиц при взаимодействии с водой создаёт короткий (длительностью около 100 мкс) акустический сигнал, который может быть зарегистрирован гидрографом (рис. 11.6). В этом суть метода, который впервые был предложен нашим физиком Г.А. Аскарьяном.

Такой метод работает, если энергия нейтрино достаточно велика. Расчёты показывают, что частицы должны иметь энергию не менее 10¹⁶ эВ (10 ПэВ). Таким образом, в руках учёных окажется детектор гигантских масштабов, способный пролить свет на физику высокоэнергичных нейтрино.

Существует ещё один довольно перспективный метод регистрации частиц ультравысоких энергий с применением черенковского излучения. Напомним,

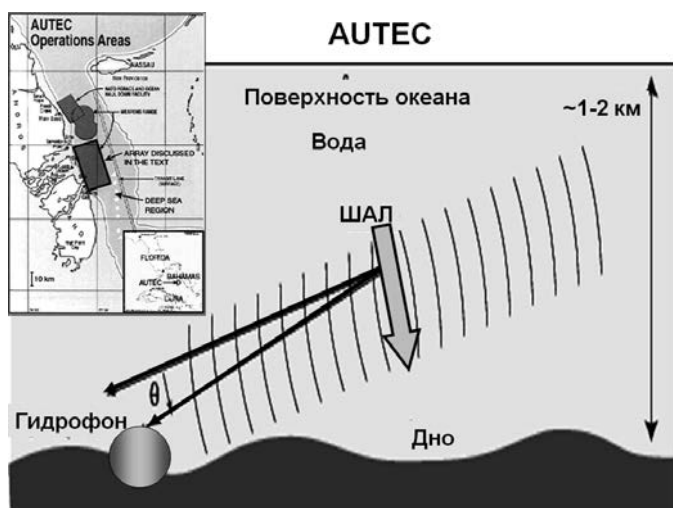
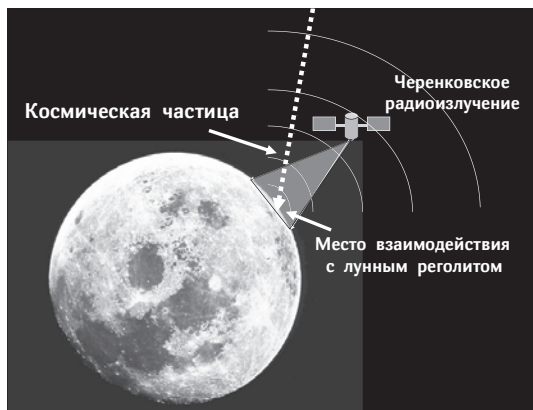


Рис. 11.6. Акустический метод регистрации высокоэнергичных (>10 ПэВ) нейтрино. В проекте AUTC вблизи Багамских островов под водой на площади в 250 км² будут размещены 52 гидрографа, способные улавливать короткие акустические сигналы от ШАЛ.

что частица, движущаяся в среде с показателем преломления $n > 1$ со скоростью $v > c/n$, будет излучать широкий спектр электромагнитных волн от оптического до радиодиапазона. За радиодиапазон «несут ответственность» частицы ливневого каскада с довольно значительной энергией порядка 30 МэВ, которые, как ожидается, существуют среди вторичных частиц. Надо отметить, что генерация электромагнитного черенковского излучения в ради-

Рис. 11.7. Регистрация нейтрино по черенковскому излучению, возникающему в результате взаимодействия космической частицы (например, нейтрино) с лунным грунтом — реголитом. Черенковское излучение в радиодиапазоне может быть зарегистрировано приёмными устройствами на борту окололунного спутника.



одиапазоне может происходить не только в атмосфере, но и в горных породах. Этот метод также был предложен Г. Аскарьяном в 1961 г.

Отсюда очевидны методы, которые могут быть использованы для регистрации частиц ультравысоких энергий. Во-первых, можно поместить антенны на спутнике и «ловить» сигналы, идущие из атмосферы Земли. Но можно попытаться с этой же целью регистрировать радиоизлучение, возникающее при взаимодействии частиц ультравысоких энергий с лунной поверхностью — реголитом. Для этого можно использовать радиотелескопы на Земле или радиоантенны на лунных спутниках (рис. 11.7).

Расчёты показывают, что на лунном спутнике с высотой орбиты в десятки километров можно регистрировать частицы с энергиями в 10^{19} – 10^{20} эВ. Надо заметить, что «лунная программа» исследования космических лучей ультравысоких энергий выгодно отличается от околоземной — на Луне нет радиопомех, созданных техногенной деятельностью человека.

Заключение к 1 части книги, или «возьмемся за руки друзья!»

Сегодня мы знаем, что частицы космических лучей имеют громадный диапазон по шкале энергии: от $\sim 10^8$ до, по крайней мере, $\sim 10^{21}$ эВ. Атомы КЛ лишены электронных оболочек, т.е. по сути, это полностью ионизованные атомы, «голые ядра». Причина этого явления — взаимодействие с веществом в процессе их переноса во Вселенной. Взаимодействуя с нейтральными частицами, они теряют свои электронные оболочки. Расчеты показывают, что средний путь, который проходят атомы от места их генерации до Земли, достаточен, чтобы потерять все орбитальные электроны за счёт взаимодействий с космической средой. Массовый состав КЛ также широк: от протонов, потоки которых доминируют, до сверхтяжелых элементов.

Можно констатировать, что, несмотря на более чем вековой период исследований, полного понимания их природы пока нет.

Выяснение источников КЛ, механизмов ускорения и транспорта, является актуальной проблемой современной астрофизики, которая теперь является частью направления, названного «физика астрочастиц» («astroparticle physics»), объединяющая, как мы теперь это отчетливо понимаем, взаимосвязанные исследования: ядер КЛ и элементарных частиц, гамма-астрономию и астрофизику нейтрино.

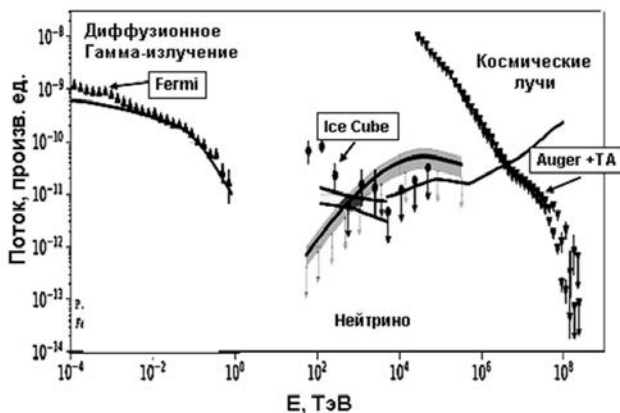
Частицы КЛ самых больших энергий (КЛПВЭ) рождаются вне пределов нашей Галактики и, путешествуя по Вселенной, «не замечают» межзвездных магнитных полей. То же происходит с гамма-квантами и нейтрино. Именно поэтому они несут информацию о порождающем их источнике. Открытие гравитационных волн открыло еще один «канал» астрофизических исследований. В этом плане один из «мессенджеров» — астрофизика космических лучей — неотъемлемая часть проблем «многоканальной астрономии» («multimessenger astronomy») и комплементарна как к гамма-астрономии, так и к нейтринной. А в будущем, с очевидностью, и к гравитационной.

Каков современный статус взаимосвязи астрофизики космических лучей, нейтринной и гамма-астрономии? Это наглядно качественно демонстрируется экспериментальными данными и модельными представлениями, приведенными на рис. I-1 и I-2.

В перспективе чрезвычайно важно «перекрыть» энергетические диапазоны измерений космических лучей (различных ядер, электронов и позитронов), гамма-квантов и нейтрино. Это необходимо, чтобы можно было сравнить различные модели их происхождения и распространения, выделить компоненты космических излучений, представляющие интерес именно для развития «многоканальной астрономии». Важна информация, а собственно она и есть суть конечной цели — отождествления источников и физических механизмов, ответственных за высокоэнергичные процессы во Вселенной.

Обращая внимание на ланные, приведенные на рис. I-1 и I-2, следует, тем не менее, отметить, что мы в начале пути. Сегодня мы больше знаем об энергетических распределениях всех ядер в космических лучах, чем спектры гамма-излучения и нейтрино.

Остается актуальной проблема существования гамма-излучения при энергиях более десятков — сотен ТэВ. При высоких энергиях энергетический спектр нейтрино нам известен лишь приблизительно. Что касается измерений анизотропии (рис. I-2), то связать воедино наблюдения КЛПВЭ, гамма- и нейтринного излучений пока не удастся. Пока мы не видим определенной связи как между отдельными «компонентными измерениями» так и их четкой привязки к известным астрофизическим объектам. В отличие от кос-



мическим астрофизическим объектам. В отличие от кос-

Рис. I.1. Энергетические спектры всех компонентов космических лучей (показаны только данные AUGER и TA установок по измерениям КЛПВЭ, нейтрино по данным Ice Cube и диффузного гамма-излучения по данным спутника Fermi. Сплошные линии — различные модельные представления энергетических распределений.



Рис. 1.2. Анизотропия регистрации космических лучей, нейтрино и гамма-квантов предельно высоких энергий, доступных к настоящему времени в экспериментах.

мических лучей, наблюдения и гамма-квантов, и нейтрино скорее похожи на изотропные распределения.

Все это подчеркивает вывод о том, что «многоканальная астрономия» в начале пути, и в этом перспектива дальнейших исследований в этой области. Так что слова из песни Б. Окуджавы, внесенные в заголовок, здесь как нельзя кстати.

Заканчивая эту часть книги, автор теперь обращает внимание читателя на «близлежащие» к нашей планете окрестности Вселенной, где существуют астрофизические явления не менее интересные, чем в ее дальних областях. Это область гелиосферы, ограниченная 100 астрономическими единицами, где основные физические процессы определяются существованием нашей близлежащей звездой — Солнцем.

Часть 2. Солнечный дом

Как наша прожила б планета,
Как люди жили бы на ней
Без теплоты, магнита, света
И электрических лучей.

А. Мицкевич

Мы живем внутри «бутылки», заполненной многочисленными небесными телами и излучениями, среди которых планеты, плазма, магнитные поля, энергичные частицы и пыль. Эта бутылка – наш дом и он называется гелиосфера. В отличие от «высокоэнергичной Вселенной», описанной выше, человек с помощью созданных им космических аппаратов достиг границы гелиосферы, расположенной в 16 миллиардов км от нашей «домашней» звезды – Солнца. Именно в основном космическая техника позволила специалистам открыть и понять множество новых физических явлений в нашем солнечном доме. Очень интересными и порой неожиданными оказались исследования радиации. О них и пойдет речь в этой части книги.

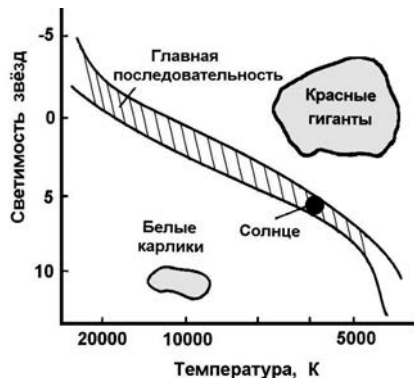


Микалбюс Константинас Чюрлёнис. «Солнце» (1907 г.)

Вселенная представляется мне большой симфонией, люди – как ноты. ...Вспомнил я тогда время, когда мир был похож на сказку. Солнце светило в сто раз ярче. На берегах темных озер высились гигантские леса ореховых деревьев. Под шелест золотых листьев летел страшный птеродактиль. Летел он, дыша угрозой, поднимая невероятный шум. Пролетел – и исчез в двенадцати лучах сверкающей радуги, вечно стоящей над тихим океаном.

(Соната Солнца. Аллегро. М. Чюрлёнис, 1909).

Рис. 12.1. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела. Зависимость между светимостью звёзд (по отношению к светимости Солнца) и поверхностной температурой. Солнце — жёлтый карлик находится приблизительно в середине главной последовательности.



Отсюда следует, что каждые четыре протона, превращаясь в ядра гелия, высвобождают энергию около 26 МэВ или $\sim 6 \cdot 10^{18}$ эрг на 1 г водорода (с учетом энергии, уносимой нейтрино).

Углеродные реакции (соединение водорода и азота с образованием гелия) реализуются в глубине Солнца, где температура достаточно высока. Таким образом происходит преобразование ядерной энергии в тепловую.

Эволюция нашей Звезды такова, что углеродные реакции в её недрах неизбежно приводят к увеличению её гелиевого ядра и преимущественному протеканию ядерных реакций в достаточно тонком наружном слое. Медленный рост относительно тяжёлого ядра при возрастании его температуры должен привести к доминированию углеродных реакций и превращению жёлтого карлика в красный гигант (см. рис. 1.5).

Что будет дальше? Наше Солнце станет ярче, будет тяжелеть из-за преобладания ядерных реакций с образованием всё более тяжёлых элементов. Из красного гиганта она постепенно превратится в белого карлика или... ей может быть заготовлена судьба сверхновой (см. рис. 1.7): наша Звезда взорвётся и даст жизнь новым звёздам.

Но пока Солнце светит, оно определяет множество разнообразных процессов, происходящих в окрестности. Рассмотрение их выходит за рамки данной книги, но ниже мы обратим внимание на те, которые влияют на характеристики космических лучей — странников Вселенной, попадающих в «сферу влияния» нашего светила.

Солнце имеет довольно сложную структуру (рис. 12.2). В его сердцевине плотность велика и достигает ~ 150 г/см³. Это в 8 раз больше, чем плотность золота. Следующий за сердцевинной звезды поверхностный слой носит название фотосферы и имеет очень малую толщину — не более 400 км. Фотосфера, или по-гречески «светящаяся сфера» — весьма нео-

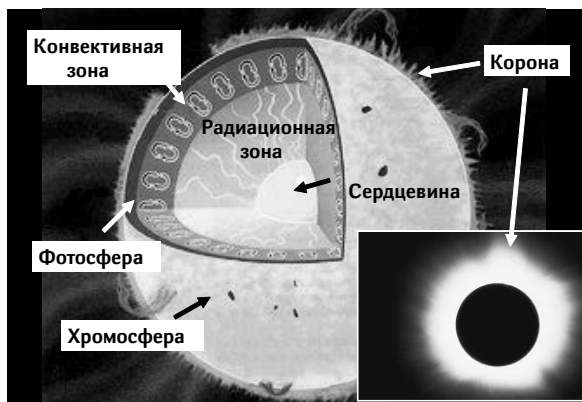


Рис. 12.2. Структура основных областей Солнца. На врезке солнечная корона, сфотографированная в год мощной солнечной активности с использованием коронографа.

бычная оболочка Солнца. Она тонка и непрозрачна. Именно она излучает в окружающее пространство свет и тепло. Эта оболочка гораздо холоднее области, находящейся под ней — конвективного слоя. Если в конвективном слое температура достигает миллиона градусов, то в фотосфере всего несколько тысяч. За фотосферой следует хромосфера, или «окрашенная сфера». Она нагрета сильнее фотосферы и, если её разглядывать в телескоп с Земли, можно различить красноватый оттенок языков пламени, вырывающихся из этой области. Ну, а выше хромосферы расположена корона Солнца. Фотосфера, хромосфера и корона — составляющие единой атмосферы Солнца. Эта область чрезвычайно динамична. Подчас языки пламени расширяющейся солнечной короны вырываются на многие миллионы километров и изменяют физические свойства межпланетной среды, находившейся до этого момента в спокойном, стационарном состоянии.

Плотность внешних оболочек очень низка мала — во много раз меньше плотности воздуха. Средняя плотность звезды — $1,9 \text{ г/см}^3$, т.е. вещество Солнца в среднем в два раза более плотное, чем вода. Солнце, как и большинство звёзд Вселенной, состоит в основном из водорода — во внешних оболочках звезды его количество достигает $\sim 70\%$ (остальное вещество — гелий ($\sim 28\%$) с небольшими добавками более тяжёлых элементов).

Эти оболочки различаются своей температурой. Чем дальше от центра Солнца, тем меньше становится температура его оболочек, достигая величины $\sim 5000 \text{ К}$ в фотосфере. Но затем температура вновь начинает расти! Этот факт — предмет современных исследований. И, как показывают измерения, температура короны почти в тысячу раз выше, чем фотосферы, достигая 2 млн градусов Кельвина

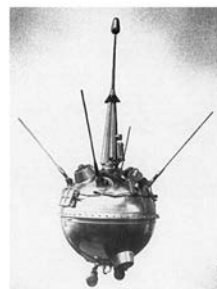
Солнце является мощным источником полностью ионизированного газа — плазмы в нашей Солнечной системе. Этот газ, постоянно «вылетающий» из солнечной атмосферы, носит название солнечного ветра. Рассмотрим более подробно это замечательное явление.

12.2. Спринклер Солнечной системы

Спринклер, или поливалка, должна быть хорошо известна читателю. Трава в саду растёт хорошо, если её поливать. Поливалка — спринклер, вращаясь, разбрасывает водяные струи в радиальном направлении и образует в пространстве так называемые спирали Архимеда. Великий грек Архимед обратил внимание на особую форму траектории тела, подвергающегося одновременно радиальному и вращательному движению.

История открытия солнечного ветра занимательна и поучительна. Ещё М.В. Ломоносов говорил о внеземном электричестве, связанном с нашим светилом. В начале прошлого века К. Биркеленд, пожалуй, стал первым, кто сказал, что из особых областей Солнца — пятен происходит постоянное истечение плазмы. Солнечные пятна связаны с активными физическими процессами, происходящими в его атмосфере. Иногда они заканчиваются мощными локальными выделениями энергии — взрывами. Эти взрывы получили название солнеч-

Рис.12.3. Константин Иосифович Грингауз первым экспериментально доказал факт постоянного истечения плазмы – солнечного ветра из Солнца, установив плазменную ловушку на борт советского космического зонда «Луна-2» в 1959 г.



Луна-2, 1959

ных вспышек. И к ним мы вернёмся ниже, а пока обратимся к истории открытия солнечного ветра.

К. Биркеленд настаивал на постоянном истечении плазмы из солнечных пятен, а другие физики, С. Чепмен и С. Ферраро, тридцатью годами позже стали утверждать о спорадической генерации плазменных потоков на Солнце только во время вспышек. Но затем, в 1940 г. Д. Хофмайстер и Л. Бирман вновь вернулись к идее постоянного истечения плазмы от Солнца на основе наблюдений кометных хвостов – они всегда были обращены в сторону, противоположную Солнцу. Естественным было предположение о постоянстве давления солнечных частиц на кометное вещество полётных хвостов. Это явно нетривиальный результат: Солнце непрерывно эмитирует во внешнюю среду вещество, из которого оно состоит.

Полным доказательством этого могли бы стать только прямые эксперименты по регистрации частиц солнечного ветра. Задача была решена с началом экспериментов на космических аппаратах.

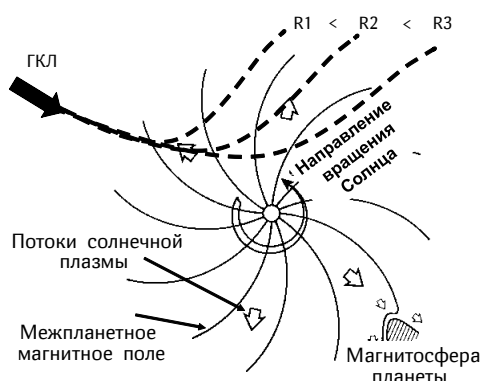
В 1959 г., вслед за запуском первых околоземных спутников, началась лунная эпопея космических исследований. Первые советские полёты к Луне ставили своей целью прямое попадание в наш естественный спутник.

На второй «лунник» – станцию «Луна-2» наш соотечественник – Константин Иосифович Грингауз поставил специальный детектор для регистрации солнечной плазмы. Его детектор постоянно «ощущал» поток частиц вдоль всей траектории полёта к Луне. Это было первым экспериментальным доказательством постоянного истечения плазмы от Солнца. Затем американский «Mariner-2», направленный в сторону Венеры, подтвердил результаты К.И. Грингауза. Непрерывность истечения солнечного ветра была доказана.

После многих лет экспериментальных исследований мы теперь мы знаем, что солнечный ветер это ионизированный газ – плазма солнечной короны состоит из электронов и протонов с малой примесью тяжёлых ионов. Плотность этих частиц очень велика (до миллиарда частиц в см^3) и резко убывает с высотой. Это вещество, родителем которого являются недра Солнца, здесь, в короне, оказывается уже слабо связанным со звездой, и начинает жить своей собственной жизнью. Именно с постоянным истечением плазмы связан разогрев самой внешней оболочки Солнца, однако детали этого явления пока не вполне ясны.

Частицы солнечного ветра разгоняются до значительных скоростей: вблизи Земли их средняя скорость около 400 км/с (3 миллиона километров в час).

Рис.12.4 Постоянно вытекающий солнечный ветер «вытягивает» магнитное поле Солнца в межпланетное пространство, создавая межпланетное магнитное поле. Магнитные поля планет (магнитосферы) представляют собой препятствия для солнечного ветра.



Во время солнечных вспышек из активных областей вырываются потоки высокоскоростной плазмы, они распространяются в Солнечной системе со скоростями ~ 1000 км/с и более. Рекордная скорость солнечного ветра, зарегистрированная, кстати, недавно, во время экстремальных солнечных событий октября-ноября 2003 г., достигала, например, более 2000 км/с.

Солнце представляет собой сложный плазменный астрофизический объект, тело которого пронизывает множество «кровеносных сосудов» — направленных струй частиц, создающих электрические токи. Известно, что электрический ток образует внешнее магнитное поле, напряжённость которого зависит от силы тока. Магнитные поля на Солнце очень нестационарное явление, обусловленное сложной динамикой и пространственным распределением самих токовых систем в недрах Солнца.

Если сравнить энергию выносимого солнечного ветра с энергией магнитного поля, то, оказывается, что солнечная плазма гораздо более мощный компонент. Более того, магнитное поле становится «вмороженным» в плазму. Это подразумевает, что динамика солнечных частиц определяет структуру магнитных полей и на расстояниях, далёких от Солнца.

Плазма как бы вытягивает магнитное поле Солнца наружу, формируя внешнее магнитное поле. Нельзя, конечно, не учитывать и того, что и в самой внешней среде существуют токи, генерирующие свои магнитные поля, которые вместе с вынесенным наружу магнитным полем Солнца формируют единое межпланетное магнитное поле. Его пространственная структура довольно сложна, но в первом приближении она повторяет структуру потоков плазмы, т.е. архимедовы спирали (рис. 12.4).

На Солнце величина индукции магнитного поля изменяется от 1 Гс в полярных областях до 3000 Гс в районе активных пятен. С увеличением расстояния от Солнца она быстро падает и на орбите Земли её величина в сотни и тысячи раз меньше.

12.3. Активная жизнь нашей звезды

Динамизм внешних оболочек Солнца — солнечная активность, наводит на мысль об изменчивости поведения центрального тела нашей Солнечной системы. Это так, но... как посмотреть... Действительно, есть понятие «солнечной постоянной» — полное количество излучения, падающего в течение одной минуты на единицу площади в один квадратный сантиметр на орбите Земли. Вели-

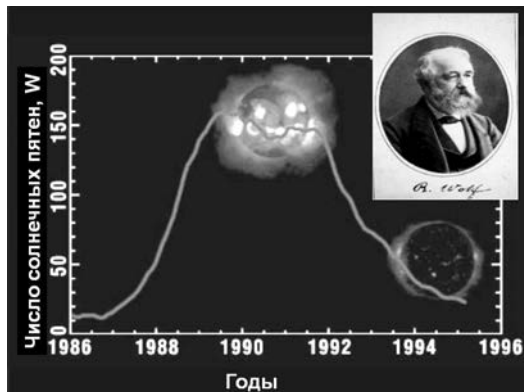
Рис. 12.5. Р. фон Вольф предложил для описания мощности солнечной активности использовать количество пятен, видимых на поверхности Солнца.

чина солнечной постоянной составляет 1,97 так называемой Большой калории. Интригующим для науки является тот факт, что солнечная постоянная неизменна во времени с точностью 1%! Но это в среднем. Если мы посмотрим на динамику отдельных видов излучений Солнца, то вывод о постоянстве здесь не применим.

Теперь мы многое знаем о солнечных пятнах – областях в фотосфере Солнца, отличающихся более низкой температурой (примерно на 1500 градусов). Они возникают там, где прежде «горели» небольшие «факелы» – локальные извержения солнечной плазмы.

Два астронома, Г.Швабе в Германии и Р. фон Вольф в Швейцарии (рис.12.5), решили заняться подсчётом солнечных пятен и обнаружили, что число их на диске меняется с удивительной цикличностью. Каждые 11 лет (приблизительно, конечно) число солнечных пятен достигает своего минимума или максимума. Был введён так называемый индекс солнечной активности – число Вольфа $W = f + 10g$. В этой формуле f – число пятен, а g – число групп пятен, видимых на Солнце. Так был открыт солнечный цикл. Отсчёт циклов ведётся с XVIII века, поэтому мы сейчас живём в эпоху конца 24 цикла (рис. 12.6).

Но цикличность изменения числа солнечных пятен – не единственная закономерность активного Солнца. Оказалось, что пятна образовавшись на средних широтах, «сползают» со временем к экватору, практически исчезая в годы минимума солнечной активности. Эта закономерность получила название «диаграммы бабочки» и гораздо полнее описывает цикл солнечной активности по числу пятен (рис. 12.7).



Изучение активности Солнца началось, вероятно, с тех «тёмных мест» на его поверхности, которые были замечены людьми сотни лет назад и получивших название «солнечных пятен». Солнечные пятна и их движение по диску Солнца открыты Галилеем в 1611 г. Если вспомнить об отечественных исследователях пятен на Солнце, то первым из них был, наверное, патриарх Никон. Именно в его летописи (XVII век) мы находим слова о том, что «места черны по Солнцу, аки гвозди...»

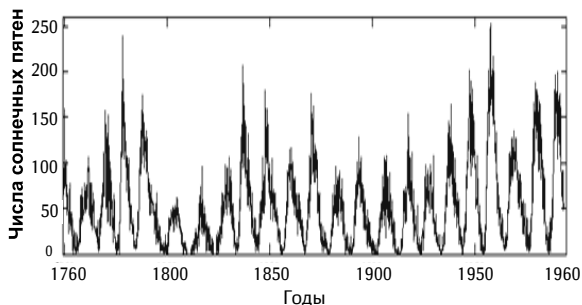


Рис. 12.6. Периодичность активности Солнца по измерениям числа солнечных пятен (закономерность Швабе – Вольфа). Средний период между двумя последовательными циклами составляет 11,1 лет, хотя отдельные периоды продолжались от 7 до 17 лет.

Пятна обладают ещё одним характерным свойством: они концентрируют очень сильные магнитные поля, превышающие средние поля в окрестности в тысячи раз. Появление магнитного поля есть следствие существования электрических токов. Более сильное поле генерируется более мощным током. Токи, вызывающие наблюдаемые в пятнах поля, могут достигать огромных величин — 10^{12} Ампер (напомним, что 10^9 — это миллиард).

Отсюда возникает понятие активной области на Солнце: это тот участок в фотосфере Солнца, где факелы порождают пятна с концентрированными магнитными полями и гигантскими электрическими токами. При близком расположении пятен может происходить перезамыкание полей, и они приобретают более сложную структуру. Если посмотреть на Солнце «глазами» наземного магнитографа, то можно увидеть причудливую картину извивающихся магнитных силовых линий, покрывающих всю поверхность Солнца. Однако эта причудливость не мешает выявить области усиленной напряжённости магнитного поля, соответствующего местам расположения пятен. Другими словами, «магнитная картинка» Солнца во многом повторяет оптическую — тёмные пятна на светлом диске.

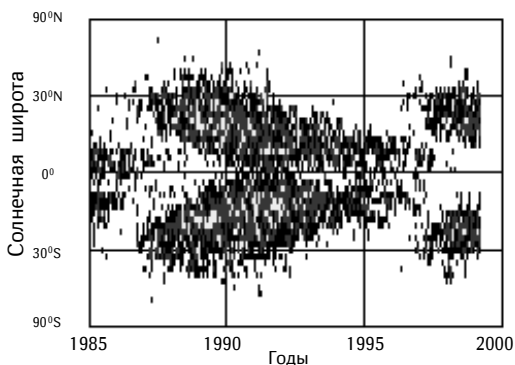


Рис. 12.7. Распределение числа солнечных пятен по диску Солнца, напоминающее крылья порхающей бабочки (Закон Шпёлера).

12.4. Солнечные бури и солнечные ускорители

Взаимное сосуществование плазмы и магнитных полей в атмосфере Солнца сложно и многообразно. Но два процесса их взаимодействия во многом определяют структуру активных областей. Потоки ионизированных, т.е. заряженных частиц, подвергаются воздействию магнитного поля, которое заставляет их двигаться по спиралевидным траекториям вокруг силовых линий. С другой

стороны, концентрированные потоки плазмы, обладая большой энергией, контролируют поведение самого поля. Как

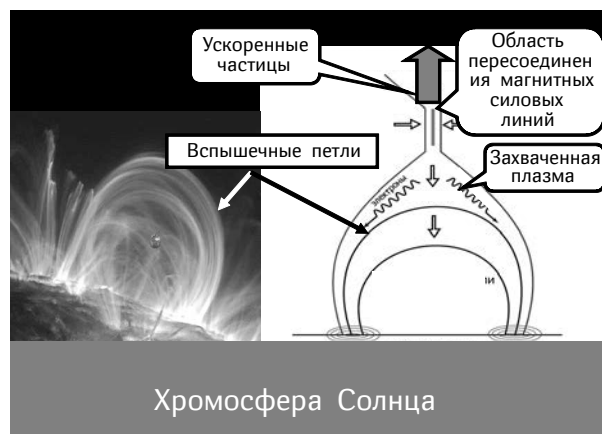


Рис. 12.8. Две активные области на Солнце связаны друг с другом петлевыми структурами, близкими к дипольному магнитному полю. Свечение петель есть не что иное, как движение разогретой плазмы вдоль магнитных петель. Наиболее яркие участки (вблизи фотосферы Солнца) соответствуют более высоким температурам плазмы.

результат, подчас в атмосфере Солнца мы наблюдаем сложную арочную или петлеобразную структуру магнитных полей и плазмы (рис. 12.8).

Иногда потоки солнечной плазмы вылетают из хромосферы, увлекая за собой магнитные поля. Это так называемые протуберанцы. Особенно сильным проявлением солнечной активности являются вспышки.

Британские астрономы А. Каррингтон и Р. Ходжсон были первыми, кто в 1859 г. подробно описали мощнейшую вспышку на Солнце. Они увидели увеличение яркости пятен в «белом свете». В «белом свете» означает, что они наблюдали вспышку без применения специальных светофильтров, настолько мощной она была. Отметим также, что А. Каррингтон был первым, кто документально «связал» проявление вспышечной активности на Солнце с изменением магнитного поля Земли — геомагнитной бурей.

Солнечная вспышка — это мощное выделение энергии на Солнце. Оценки показывают, что энергия солнечной вспышки может достигать $\sim 10^{25}$ Дж. Конечно, это далеко до энергии взрыва сверхновой (10^{45} Дж), но на многие порядки превосходит рукотворную взрывную энергию атомных бомб, созданных человеком (энергия, выделяемая при взрыве 50-килотонной бомбы $\sim 2 \cdot 10^{14}$ Дж).

Однако мощные потоки плазмы и сильные магнитные поля — не единственные проявления солнечных вспышек. Во время вспышек на Солнце наблюдатели на Земле и на спутниках регистрируют целую гамму различных явлений. Это: рентгеновское излучение, результат тепловой эмиссии плазмы в короне, нагретой до 10^7 К; радиоизлучение в гигагерцовом (10^9 Гц) и терагерцовом (10^{12} Гц) диапазонах длин волн, возникающее вследствие движения релятивистских электронов в магнитных полях; жёсткое гамма-излучение, как продукт ядерных реакций, происходящих в атмосфере Солнца. И, наконец, это солнечные энергичные заряженные частицы (протоны, электроны, ядра). Их часто называют солнечными космическими лучами (СКЛ). Эти частицы приобретают значительные энергии как в результате действия различных ускорительных механизмов в атмосфере Солнца, так и в процессе распространения в межпланетной среде.

Какая максимальная энергия частиц, генерируемых на Солнце во время мощных солнечных событий? Измерения показывают, что энергия этих частиц может достигать ~ 10 ГэВ = 10^{10} эВ и более. Это значительно меньше, чем энергии частиц, генерируемых при взрывах сверхновых (~ 1 ПэВ = 10^{15} эВ и более), но, тем не менее, величины их потоков перекрываются во время самых мощных событий с низкоэнергичной частью спектра космических лучей, приходящих к нам из Галактики.

Ускорение этих частиц может происходить на самой ранней фазе развития вспышки, т.е. внутри солнечной атмосферы. Сейчас ясно, что солнечная вспышка носит взрывной характер и сопровождается эрупцией солнечного вещества в межпланетное пространство. Быстрые изменения магнитных полей (как по напряжённости, так и по пространственной конфигурации) приводят к генерации мощных индукционных электрических полей, которые, собственно, и могут разгонять частицы до наблюдаемых энергий.

Однако, следует принимать во внимание и возможность существования, наряду с солнечным ускорителем, расположенным вблизи Солнца, дополнительного механизма разгона частиц.

Развитие космических методов наблюдений Солнца в различных диапазонах длин волн позволило получить «картинки» активных процессов с очень хорошим временным и пространственным разрешением. Специалисты-солнечники обратили внимание на существование ещё одного процесса, связанного с активизацией Солнца, но, вероятно, отличного от солнечной вспышки.

Это «корональные инжекции массы» («Coronal Mass Ejection» – CME). Они представляют собой магнитные облака плазмы, свободно распространяющиеся в межпланетном пространстве. Удивительно то, что в 90% вспышек CME не наблюдаются, что наводит на мысль о независимости физического процесса, их вызывающего, от генератора солнечных вспышек. Однако какая-то связь всё же есть, т.к. только 60% CME происходит без вспышек. В максимуме цикла солнечной активности может наблюдаться до 2-х CME в день. В минимуме эти явления гораздо реже – не более 1-го в неделю.

Какое же отношение CME могут иметь к ускорению солнечных частиц до высоких энергий? Дело в том, что, распространяясь в межпланетной среде, эти «магнитно-плазменные» облака нарушают спокойную структуру «вялотекущего» солнечного ветра с вмороженным в него магнитным полем Солнца. По сути, в межпланетной среде происходит распространение ударной волны, ограниченной в пространстве размерами облака CME.

Если это так, то мы вновь сталкиваемся с космическим ускорителем, очень типичным для Вселенной. Как и ударные волны от сверхновых, ударные волны CME могут ускорять частицы посредством стохастического механизма типа Ферми (рис. 12.9). Как показывают расчёты Е.Г. Бережко, мощности таких явлений в межпланетном пространстве вполне достаточно для ускорения частиц до сотен МэВ.

Как частота солнечных бурь (вспышек на Солнце, корональных инжекций масс) соотносится с солнечной активностью? Действительно, в годы, близкие к максимуму цикла солнечной активности, наблюдается большее число солнечных событий, чем, скажем, в глубоком минимуме.

Так, в максимуме можно наблюдать порой до нескольких вспы-

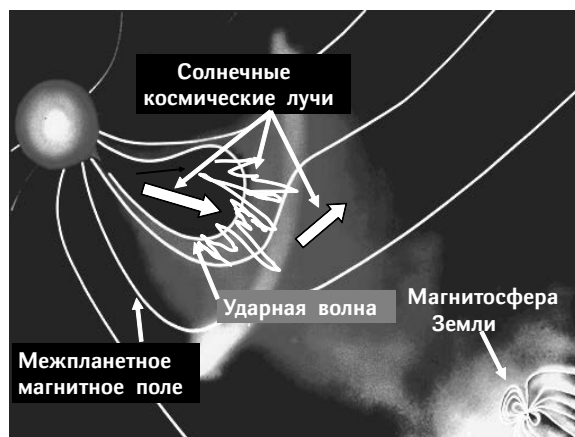
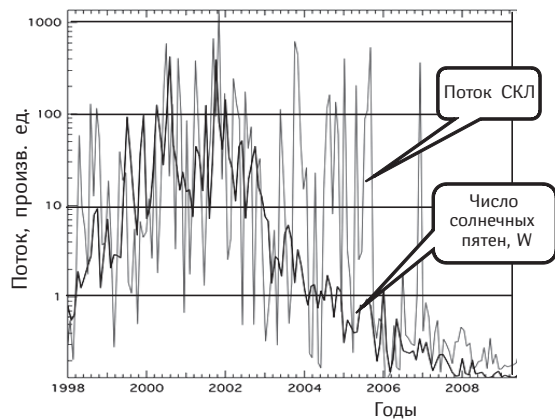


Рис. 12.9. Корональная инжекция солнечного вещества представляет собой магнитно-плазменное облако, распространяющееся в межпланетном пространстве. Ударная волна, следующая вместе с инжектированным облаком, может ускорять окружающие её частицы до высоких энергий, формируя тем самым потоки солнечных космических лучей.

Рис. 12.10. Связь вариаций потоков СКЛ с числом солнечных пятен. Почему яркие проявления генерации СКЛ происходят очень часто на спаде солнечной активности? Вопрос на сегодня — открытый.



шек в день. Однако, отмечено, что в годы, близкие к минимуму, особенно на фазе спада цикла солнечной активности, проявление вспышечной активности Солнца и инъекций масс (порой по своим параметрам достигающих экстремальных значений) — нередкие события (см. рис. 12.10). Только в течение последнего периода спада активности, с 2000 по 2005 гг., их было несколько. Последнее событие — 20 января 2005 г., когда мощная активная область на Солнце произвела потоки столь энергичных частиц — солнечных космических лучей, которые не наблюдались с 1989 г. И это произошло практически в минимуме цикла солнечной активности. Поэтому вопрос о связи циклов солнечной активности и её проявлениях в виде таких высокоэнергетических процессов в межпланетной среде, как солнечные вспышки и корональные инъекции массы, остаётся открытым.

Насколько мощны и интенсивны солнечные бури на нашем жёлтом карлике? Смотря с чем сравнивать. Например, вспышечная активность Солнца меньше вспышечной активности самых активных красных карликов во Вселенной на 4 порядка величины. Так что мы живем рядом с заурядной звездой. Скорее всего, это одно из условий существования жизни в нашей Солнечной системе.

12.5. Состав (элементный и зарядовый) солнечных космических лучей

Состав солнечных космических лучей не идентичен составу галактических космических лучей. Средний элементный состав ГКЛ и СКЛ можно увидеть на рис. 12.11. Различие определяется, в первую очередь, отсутствием в солнечных

частицах лёгких элементов — Li, Be и B. Эти элементы, будучи вторичными в космических лучах (предполагается, что они «выгорают» в термоядерных реакциях в звезде), просто не успевают рождаться в ядерных реак-

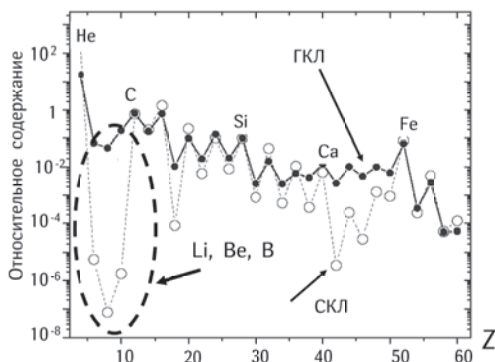


Рис. 12.11. Средняя распространённость элементов (атомных ядер) тяжелее водорода в галактических и солнечных космических лучах.

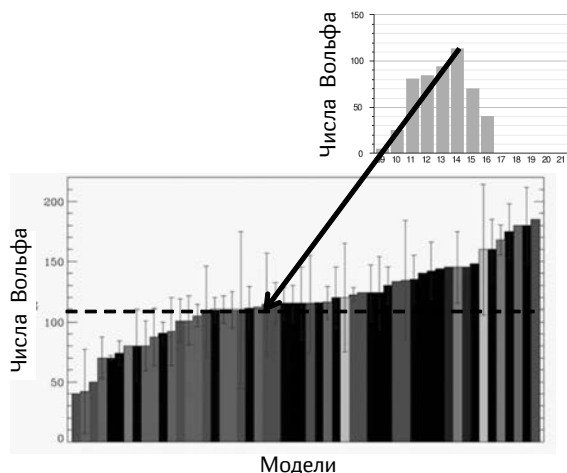
циях при прохождении частиц СКЛ от Солнца до Земли. Кроме того, элементный состав СКЛ может меняться при их проникновении внутрь магнитного поля Земли, т. к. эффективность проникновения зависит от их жёсткости, а сама жёсткость определяется типом частицы и её скоростью (см. далее Главу 13).

Есть еще одно принципиальное отличие СКЛ от ГКЛ: это – их ионизационное состояние. В отличие от ГКЛ, далеко не все атомы элементов, входящих в состав ГКЛ, – «голые» ядра (т.е. атомы без электронных оболочек). Если водород и гелий в СКЛ имеют максимальное зарядовое состояние (у них соответственно одна и две электронных оболочек), то, то более «массивные атомы» в СКЛ – не полностью «ободранные». Так, например, усредненное зарядовое состояние железа в СКЛ всего около $13+$, вместо $26+$, как в ГКЛ. Зарядовое состояние частиц СКЛ определяется температурой солнечной короны и, частично, процессом их взаимодействий со средой при распространении в Солнечной системе. В отличие от СКЛ, частицы ГКЛ, путешествуя в течение многих лет во Вселенной, успевают «растерять» свои электронные оболочки, превратившись в «голые» ядра.

12.6. Прогноз солнечной активности

Прогноз солнечной активности на длительной временной шкале – дело (пока!) неблагоприятное. Существует много методов и моделей прогноза солнечной активности, но далеко не все они подтверждаются. Среди таких методов – и моделирование, основанное физике процесса, и моделирование на базе статистических методов обработки данных в ретроспективе.

На рис. 12.12 приводятся результаты прогноза максимума солнечной активности для 24 цикла (по числу солнечных пятен) более чем 50 моделей, опубликованных в научной печати. Этот график был назван «прогноз пианино». Нетрудно видеть, что различие в оценках существенно: от чисел Вольфа около 40 до 180. На самом деле, максимум 24 цикла уже миновал, и мы имеем возможность сравнить прогноз и реальные значения. Максимум соответствовал уровню чисел Вольфа около 115, т.е. в середине распределения прогностических моделей.



Это наглядное представление того, как научная солнечная общественность понимает сегодня проблему солнечной активности. И в этом нет ничего плохого: все впереди, есть перспектива.

Рис. 12.12. Результаты 54 прогностических моделей солнечной активности и реальные данные (панель сверху) для 24-го цикла. Только 2 или 3 модели дали результат, близкий к реальному.

Глава 13. Солнечный дом космических странников

Вся Вселенная содержит послание.
Расшифруй его.

И язык его — это здесь и сейчас.

Ошо (Бхагаван Шри Раджнин), мудрец.

Итак, наша звезда является постоянным источником плазмы и магнитных полей. Плазма с вмороженным в неё магнитным полем распространяется в радиальном направлении от Солнца, заполняя гелиосферу — межпланетное пространство, в котором находятся планеты нашей Солнечной системы, крупные астероиды, прилетающие к нам кометы и другие более мелкие объекты Вселенной. Безусловно, солнечный ветер должен оказывать влияние на все эти тела, но это отдельный предмет космической физики.

Сейчас же зададимся вопросом, что может произойти с солнечным ветром и магнитным полем на далёких расстояниях, там, где солнечная система «кончается»?

13.1. Плазменная бутылка солнечной системы

В связи с этим вопросом вспомним структуру нашей Галактики (см. рис. 1.6). Солнечная система совершает круговое движение вокруг центра Галактики на расстоянии около 25 000 пк. Скорость движения солнечной системы относительно межзвёздной среды составляет «всего» 25 км/с. Межзвёздная среда не пуста, она заполнена нейтральным газом, магнитными полями и космическими лучами. И они противодействуют движущемуся на них потоку частиц солнечного ветра. Учитывая, что плотность частиц солнечного ветра падает обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца и используя оценки для плотностей нейтралов, космических лучей и магнитного поля в межзвёздной среде, можно получить оценку расстояния до той границы, где давление частиц солнечного ветра сравнивается с давлением межзвёздной среды. Эта граница получила название гелиопаузы. Она определяет искомую границу нашей солнечной системы (рис. 13.1).

Можно показать, что эта пограничная область формирует в пространстве нечто наподобие бутылки,

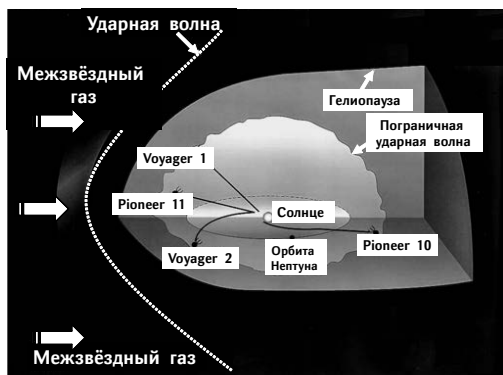


Рис. 13.1. Структура гелиосферы. Внутри гелиопаузы преобладает динамическое давление солнечной плазмы, за ней — нейтрального газа, космических лучей и магнитных полей. Предполагается, что как до гелиопаузы, так и за ней должны образовываться ударные волны.

или кокона, обращённого в направлении «вверх по потоку» в межзвёздном пространстве. А внутри этого кокона, как показывают расчёты, должна образоваться пограничная ударная волна (termination shock). За ней скорость солнечного ветра резко замедляется.

Как далеко от Солнца гелиопауза и ударная волна? Расчёты дают оценку расстояния до ударной волны – не менее 70–100 а.е.

Более сорока лет назад в направлении от Солнца, к границе гелиосферы, были запущены четыре космических аппарата: «Pioneer-10, -11» и позднее «Voyager-1, -2». И наконец, после длительного путешествия они в первом десятилетии XXI века оказались у цели – вблизи ожидаемой границы нашей Солнечной системы.

По мере приближения к предполагаемой ударной волне, детекторы заряженных частиц на зондах «Voyager» начали регистрировать необычные флуктуации их потоков. Это могло бы быть свидетельством ускорения на ударной волне частиц солнечного происхождения, долетевших до этих расстояний. И здесь мы вновь сталкиваемся с ускорением частиц на ударных волнах! Однако у такой интерпретации экспериментальных данных в то время появились и противники, утверждавшие, что доказательств существования ударной волны «Voyager-1, -2» не представили. Надо было ждать новых экспериментальных данных по мере удаления космических аппаратов.

Доказательства существования границы гелиосферы могут дать сведения о поведении потоков космических лучей, попадающих в гелиосферу из межзвёздного пространства.

Космические лучи, рождаясь и распространяясь во Вселенной, попадают и в Солнечную систему, где их параметры должны изменяться. Что увидели «Voyager-1, -2», приближаясь к границе Солнечной системы? Это был волнующий момент для всей космической науки. Ученые получили шанс впервые заглянуть за пределы нашего солнечного дома.

Что можно было ожидать? Как должны были измениться потоки космических лучей по мере приближения к границе Солнечной системы?

Очевидно, что только часть космических частиц из далеких областей Вселенной смогут преодолеть барьер в виде ударной волны на своем пути – часть

из них должна отклониться и вернуться обратно в межзвёздное пространство. Если действительно ударная волна существует. А если нет?

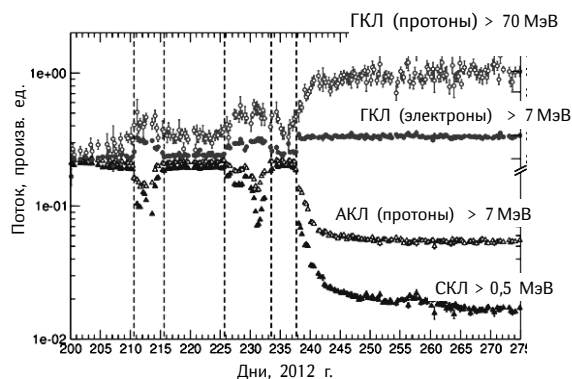


Рис. 13.2. Вариации потоков ГКЛ, аномальных космических лучей (АКЛ) и солнечных по данным зонда «Voyager-2» при пересечении границы гелиосферы (примерно 238 день 2012 г.)

Именно поэтому, то время, когда первые космические аппараты, созданные человеком, приближались к расстоянию порядка 100 а.е. стало, по сути, моментом истины для ученых.

То, что увидели ученые, глядя на данные по ГКЛ в этой области, полностью совпало с их предположениями: потоки ГКЛ на расстояниях, где ожидалось пересечение с ударной волной, начали увеличиваться. Иными словами, космические аппараты вылетели за пределы области, «контролируемой» нашим светилом, и внедрились в межзвездное пространство. На рис. 13.2 наглядно демонстрируется этот важный научный результат. Очевидно, это был ожидаемый, но выдающийся успех всей космической науки за весь период космических исследований!

Теперь давайте посмотрим, что происходит с космическими лучами, которым удалось проникнуть в наш солнечный дом. Оказывается, здесь их «не ждали».

13.2. Солнечная метла

Обратите внимание на рис. 12.4. Своеобразный «спринклер» — архимедовы спирали солнечной плазмы с замороженным в них магнитным полем будут, безусловно, взаимодействовать с заряженными частицами, попадающими в гелиосферу из внешнего пространства. Межпланетное магнитное поле будет искривлять траектории галактических космических лучей, стремясь уменьшить интенсивность входящих в это пространство частиц. Известно, что на частицу, попавшую в магнитное поле, будет действовать *сила Лоренца*, величина которой зависит от её скорости и зарядового состояния. Для описания движения частиц в магнитном поле используется величина жёсткости R , являющейся отношением импульса частицы (mv) к её зарядовому состоянию (Q). Частицы с одинаковой жёсткостью имеют одинаковые траектории в магнитном поле. С увеличением жесткости частицы сила Лоренца уменьшается. Поэтому, чем больше импульс частицы, или её жёсткость, тем менее эффективно воздействует магнитное поле на частицу. Следовательно, для галактических космических лучей можно ожидать ослабление их потока только в низкоэнергетической части спектра.



Чем вам не метла? Это явление называется модуляцией космических лучей. Эффективность модуляции зависит не

Рис. 13.3. Модуляция космических лучей (нижняя панель) по наблюдениям на станциях расположенных в экваториальной и в полярной (где пороговая жёсткость частиц меньше) областях. Вверху показано изменение солнечной активности (по числам Вольфа) за тот же период времени.

только от расстояния до Солнца, но и от солнечной активности. В периоды более сильной активности Солнца, когда потоки плазмы более мощные, а магнитное поле более неоднородное, мы будем наблюдать менее интенсивные потоки галактических космических лучей внутри гелиосферы. И наоборот, в минимуме цикла солнечной активности потоки космических лучей будут максимальны. Это наглядно демонстрируется сравнением кривых, отображающих число солнечных пятен и потоков космических лучей (рис. 13.3). Они, как говорят физики, находятся в «противофазе» — минимум солнечной активности соответствует максимуму потока космических лучей и наоборот.

Эффективность модуляции потока зависит от расстояния. Чем дальше от Солнца, тем меньше будут изменения потоков космических лучей.

Космические аппараты, летят со 2-й космической скоростью и, как и все планеты Солнечной системы, в плоскости эклиптики. Для того чтобы космическому аппарату вылететь из неё, нужен дополнительный импульс. Его можно создать двигателем, а можно... гравитационным манёвром. Именно так был «запрограммирован» космический аппарат Ulysses. Его запустили не в сторону Солнца, а в обратном направлении. Долетев до Юпитера, самой массивной планеты Солнечной системы, под действием гравитационного поля этой планеты он резко изменил траекторию своей орбиты, вылетел из плоскости эклиптики и полетел в сторону Солнца. Он несколько раз пролетел над полюсами Солнца, предоставив учёным уникальную информацию о структуре плазмы, магнитных полей и космических лучей вне плоскости эклиптики.

Именно анализируя такие данные, т.е. зависимость степени модуляции галактических космических лучей от радиального расстояния, исследователи приходят к оценкам положения внешней границы области модуляции на расстояниях менее 100 а.е.

Теперь попытаемся вообразить трёхмерную, объёмную картину области эффективной модуляции космических лучей. Мы мало об этом знаем. Предполагается, что эта область имеет форму эллипсоида, приплюсненного в перпендикулярных от плоскости эклиптики направлениях. Вблизи Солнца такая структура эллипсоида диктовалась предположением существования более однородного магнитного поля Солнца вблизи его полюсов. Так было до начала миссии космического аппарата Ulysses, запущенного в начале 90-х. Это был первый космический аппарат, вылетевший за пределы плоскости эклиптики. Оказалось, что степень модуляции космических лучей над полюсами вовсе не такая эффективная, как это предполагалось ранее (рис. 13.4). Модуляционная картина

плюсненного в перпендикулярных от плоскости эклиптики направлениях. Вблизи Солнца такая структура эллипсоида диктовалась предположением существования более однородного магнитного поля Солнца вблизи его полюсов. Так было до начала миссии космического аппарата Ulysses, запущенного в начале 90-х. Это был первый космический аппарат, вылетевший за пределы плоскости эклиптики. Оказалось, что степень модуляции космических лучей над полюсами

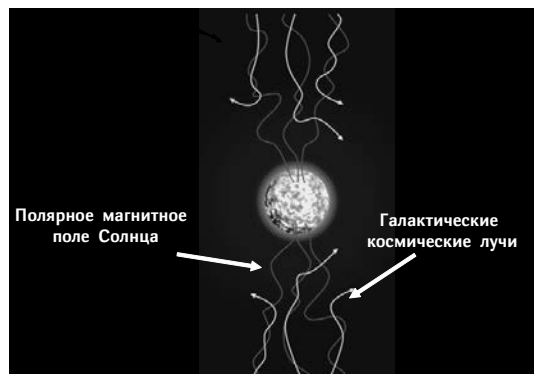
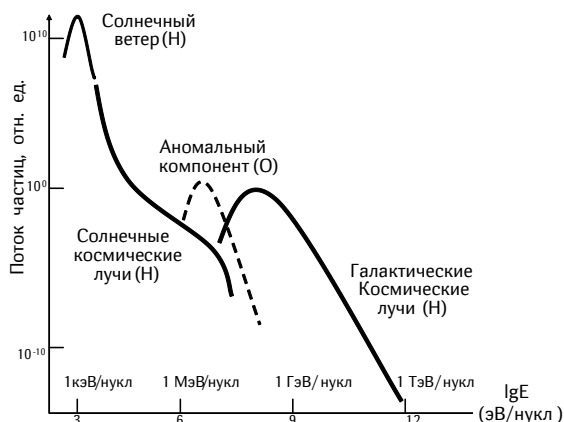


Рис. 13.4. Структура магнитного поля Солнца по данным космического аппарата Ulysses, облетевшего Солнце через Южный и Северный полюсы. Модуляция космических лучей вне плоскости эклиптики оказалась такой же, как и в ней, из-за хаотичной структуры магнитного поля.

Рис. 13.5. Примерная форма энергетических спектров солнечных и галактических космических лучей (для всех частиц) и аномальной компоненты (для кислорода). Аномальный компонент космических лучей «виден» только в минимуме солнечной активности.



галактических космических лучей оказалась мало отличающейся от той, которая наблюдается в плоскости эклиптики. А это значит, что упомянутый выше модуляционный эллипсоид не такой уж и приплюснутый...

Если теперь обратиться к энергетическому спектру галактических космических лучей (см. рис. 13.5), то можно увидеть характерный максимум в спектре при энергии около 400 МэВ/нукл. Его появление как раз и связано с модуляцией космических лучей внутри гелиосферы: частицы с энергиями меньшими ~400 МэВ/нукл «выметаются» из Солнечной системы нашей звездой. В годы максимума солнечной активности падение потоков слева от максимума спектра больше, а в минимумах меньше. Вот так наша звезда защищает нас от потока ускоренной во Вселенной межзвёздной пыли...

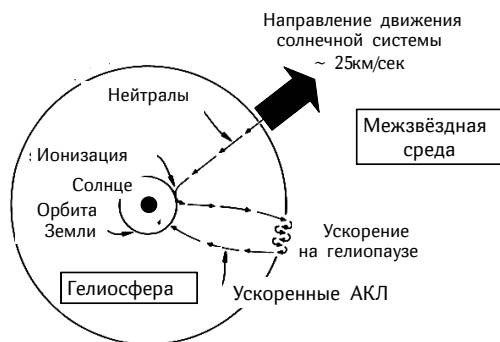
13.3. Аномальные частицы в гелиосфере

Гелиосфера заполнена разнообразными частицами — это и галактические частицы, проникающие в неё извне, из межзвёздного пространства, и солнечные: плазма солнечного ветра и солнечные космические лучи. Однако есть ещё один компонент, открытый в начале 70-х годов.

Исследователи космических лучей обратили внимание на то, что в энергетическом спектре частиц имеется характерная особенность — локальный максимум при энергиях 10–15 МэВ/нуклон (рис. 13.5). Интересным оказался факт его существования не для всех частиц, а только для кислорода, гелия, неона и ряда других элементов. Т.е. химический состав этих частиц существенно отличался от состава других частиц (как солнечного, так и галактического происхождения). Было также обнаружено, что этот компонент космических лучей подвергается солнечной модуляции, однако гораздо более мощной, чем в случае «обычных» галактических частиц. Именно в силу этих обстоятельств такие частицы получили название «аномальных космических лучей» (АКЛ). Встал вопрос об их происхождении.

Американский астрофизик Л. Фиск вскоре после экспериментального обнаружения АКЛ предложил весьма оригинальную гипотезу (рис. 13.5) их происхождения. Она состояла в том, что эти частицы рождаются из межзвёздной пыли, «подхватываемой» нашей гелиосферой из межзвёздного пространства. Эти частицы проникают в гелиосферу, т.к. она движется в галактическом про-

Рис. 13.6. Механизм образования аномальных космических лучей по Л. Фиску.



странстве со скоростью 25 км/с, и та часть нейтральных пылинок, которая достигает окрестности Солнца, ионизируется за счёт его ультрафиолетового излучения и обмена зарядами с плазмой солнечного ветра. Частицы становятся заряжёнными. Но их энергия пока очень мала по сравнению с аномальными космическими лучами (сопоставима с энергией частиц солнечного ветра). Эти частицы надо ускорить.

Л. Фиск предположил, что вместе с плазмой солнечного ветра они начинают путешествие к внешним областям гелиосферы вдоль архимедовых спиралей. Ну, а там, на границе, их ожидает ударная волна. Логика мыслей очевидна: если есть ударная волна, то следует ожидать ускорения частиц. Однако проблема заключается в том, что надо доказать существование самой ударной волны на границе гелиосферы (как об этом упоминалось выше, здесь есть пока разные точки зрения), смоделировать взаимодействие частиц с ней и попытаться получить ту форму энергетического спектра и те энергии частиц, которые реально наблюдаются в эксперименте. Пока здесь есть ряд вопросов, ответы на которые ещё не получены. Однако, в целом, концепция Л. Фиска, пожалуй, верна. Это следует из того, что экспериментально доказано, что эти частицы, в отличие от галактических и солнечных, имеют заряд, близкий к $1+$. Это означает, что атомы элементов, входящих в состав АКЛ, «ободраны» не полностью — практически все их электронные оболочки сохранены, не хватает лишь одной или двух...

И это весьма важно, т.к. может произойти лишь в одном случае, если источники этих частиц где-то совсем близко от нашей гелиосферы. Расчёты показывают, что они должны располагаться не далее 0,2 пк. Это совсем рядом. Именно нейтральная пыль межзвёздного газа из этой области и пополняет околосолнечное пространство «аномальными частицами».

Как было доказано, что эти частицы имеют такой низкий заряд? Для этого использовали магнитное поле Земли в качестве «сепарирующего детектора» частиц с разными зарядами. К этому вопросу мы вернёмся ниже в связи с рассмотрением проблемы проникновения космических лучей в магнитное поле Земли.

И все-же, возвращаясь к основной гипотезе происхождения аномального компонента, необходимо отметить два обстоятельства, которые сохраняют актуальность проблемы.

Во-первых, на самом деле зонды Voyager не увидели характерных для ускорения на ударных волнах степенных спектров кислорода, ожидаемых из модельных расчетов, а во-вторых, не исключается появление АКЛ за счет источ-

ников внутри самой гелиосферы. Кислород, азот — характерные ионы в составе АКЛ, присутствуют не только в атмосфере нашей планеты, но и в составе, как оказалось, атмосфер других планет. Как мы это увидим далее, ряд планет Солнечной системы имеют магнитные поля, подверженные изменениям из-за изменяющейся солнечной активности во время планетарных магнитных бурь. Во время таких событий планеты могут выбрасывать в гелиосферу потоки своего атмосферного вещества. Так эти частицы могут заполнять гелиосферу, а те, которые будут ближе к Солнцу, — ионизироваться. Ну а далее... по стандартной гипотезе Фиска.

Не исключен также эффект так называемой эрозии внешних оболочек атмосфер планет под воздействием потоков солнечного ветра — процесса, приводящего к потерям планетами своих «воздушных» оболочек». Этот механизм активно обсуждается в последнее время.

Итак, частицы высокой энергии, заполняющие гелиосферу, имеют различное происхождение. Некоторые из этих частиц галактического и внегалактического происхождения, рождающиеся при взрывах сверхновых звезд или в других астрофизических объектах Вселенной. Помимо этих источников, Солнце в периоды усиления своей активности генерирует энергичные частицы, которые могут иногда достигать энергий галактических. И, наконец, локальная межзвёздная среда забрасывает нам пыль, из которой рождаются новые энергичные частицы.

Мы живём на небольшой планете, и космические лучи, оказавшиеся внутри гелиосферы, могут достигнуть и её окрестностей. Давайте вместе с космическими лучами начнём приближаться к Земле...

На волне моей памяти...

В 1987 г. на конференции по космическим лучам ко мне подошел невысокого роста американец и спросил, не мог бы я его познакомить с профессором Григоровым. Это был Джим Адамс из Военно-морской лаборатории США в Вашингтоне. Так началась наша дружба и многолетнее сотрудничество с этим замечательным человеком и прекрасным специалистом. В то время его интересовала проблематика аномальных космических лучей.

Это направление исследований интересовало и нас. Еще в эпоху существования социалистического лагеря, на спутнике «Интеркосмос-6» (см. Главу 3) наши сотрудники совместно с румынскими коллегами обнаружили некоторые «странности» в поведении высокоэнергичных тяжелых ионов: наши детекторы регистрировали их под радиационными поясами, где они существовать не должны. Предполагалось, что все космические лучи — «голые» ядра. Поэтому они не могли преодолеть магнитный барьер планеты в силу своего высокого зарядового состояния. К тому времени мы продолжали эксперименты по исследованию этих аномальных ионов космических лучей на наших спутниках «Космос».

Так вот, Джим предложил нам осуществить совместный проект по изучению АКЛ на американском IMP-8 и на российских спутниках серии «Космос». У американцев на борту их спутника был установлен полупроводниковый детектор профессора Дж. Симпсона из Чикагского университета для измерений ядер космических лучей, а у нас, на «Космосах», для тех же целей — твердотельные детекторы. После возвращения космического аппарата на Землю, твердотельные детекторы обрабатывались по специальной технологии, что позволило нам определять физические параметры этих космических частиц. Идея проекта была довольно простой: — на основе измерений АКЛ (ионов кислорода) вне и внутри магнитосферы Земли попытаться определить их зарядовое состояние. Другим методом определить заряд кислородных ионов не представлялось возможным. В том случае, если заряд ионов окажется близким к $1+$, это было бы доказательством их происхождения из нейтралов межзвездного происхождения согласно теоретической модели Леонарда Фиска, опубликованной ранее.

Это была увлекательная совместная работа довольно большой группы американских и российских специалистов в течение нескольких лет в 90-х. Мы добились успеха, показав, что действительно ионы кислорода на околоземных орбитах и вне магнитосферы имеют заряд, близкий к минимальному. Это было большим достижением. По сути, мы доказали, что в окрестности нашей планеты присутствует межзвездное вещество. Дополнением к этому заключению стало обнаружение захваченных в геомагнитную ловушку этих «аномальных» ионов. Было опубликовано несколько работ. Нас приглашали выступить с докладами на международных конференциях. Именно в это время мы, сотрудники МГУ, ощутили важность, плодотворность и необходимость международного сотрудничества в космических исследованиях.

Вслед за этим проектом у нас родились идеи новых. Изучение галактических космических лучей интересовало и наших коллег, и когда мы предложили им идею аэростатного эксперимента в этой области, она была подхвачена американцами и в кратчайшие сроки осуществлена. Это был эксперимент TIC («The Thin Ionization Calorimeter»). Мы в институте сделали прибор, доставили его в Канаду, а американские коллеги осуществили подготовку к его запуску и подбор после окончания. Конечная стадия эксперимента не обошлась без приключений: Джим Адамс потратил не один час на поиски приземлившейся в глухой канадской тайге гондолы аэростата и его эвакуацию. После мы вместе в Москве смотрели фильм об этом, снятый Джимом, и живо обсуждали «этапы пройденного пути».

Наше плодотворное сотрудничество с американцами на этом этапе стало возможным благодаря энтузиазму и веры в успех таких людей как Дж. Адамс и Н.Л. Григоров. Также огромную и неоценимую поддержку нашей совместной работе над проектами нам оказал сотрудник Нацио-

нального управления по аэронавтике США (НАСА) Вернон Джонс. Трудно сказать, смогли бы мы достичь успеха без его постоянной помощи и поддержки со стороны НАСА, где в то время под его руководством планировались эксперименты по изучению космических лучей.

Причина поддержки и внимания Вернона к нашей группе обнаружилась неожиданно... на одном банкете, организованном НАСА в честь нашей команды. Вернон во время своего тоста сказал: «...на самом деле я давно знаю профессора Григорова. Еще, будучи студентом университета в Луизиане, я учился физике космических лучей по работам профессора Григорова; благодаря его трудам я стал заниматься астрофизикой космических лучей, и не только я».

Григоров присутствовал на этом банкете. Мне показалось, что это признание со стороны нашего американского коллеги стало его звездным часом. Признания, недостаток которого он ощущал в нашей стране.

Эта было началом нашего сотрудничества с американцами, продолжавшееся в общей сложности около 20 лет. Проекты по изучению космических лучей на аэростатах стали основой для нашего следующего, более масштабного совместного проекта ATIC (The Advance Thin Ionization Calorimeter), который принес ряд замечательных результатов в области физики космических лучей, опередив такие проекты, как PAMELA, CREAM и AMS-02 (см. Главу 6).

Глава 14. Магнитная броня планет

Изобретательность природы гораздо больше
изобретательности человека

Ричард Фейнман

Приближаясь к Земле, космические лучи встречают два мощных препятствия. Одно из них — атмосфера планеты. Взаимодействие космических лучей с атмосферой было рассмотрено в Главе 3. Лишь незначительная доля первичных частиц достигает Земли. Как правило, космические лучи образуют широкие атмосферные ливни — каскады вторичных частиц, которые в основном гибнут в атмосфере.

Однако есть ещё одна преграда для заряжённых частиц, несущихся в сторону Земли. Это её магнитное поле.

14.1. Магнитное поле Земли и ее магнитосфера

У английской королевы Елизаветы был придворный врач У. Гильбер. Он впервые доказал, что Земля является вращающимся магнитом.

Форма магнитного поля Земли очень близка к дипольной (рис. 14.1), т.е. оно весьма неоднородно в пространстве: вблизи полюсов силовые линии практически параллельны друг другу, поле по сравнению с экваториальными областями на тех же расстояниях r от центра Земли и уменьшается с расстоянием согласно закону r_e^{-3} .

Напряжённость магнитного поля определяется магнитным моментом нашей планеты. Интересно заметить, что величина магнитного момента медленно меняется со временем (так называемые, вековые вариации). Оно уменьшается по величине, и наша планета может остаться на какое-то время без магнитного поля.

Теорий, касающихся возникновения магнитного поля, несколько: от вращающегося расплавленного шара до термоядерного реактора, наподобие солнечного, в центре нашей планеты. Разнообразие теорий указывает на нерешённость данной проблемы.

Магнитное поле Земли существует не в вакууме, а в среде, наполненной потоками солнечной плазмы и межпланетным магнитным полем. Безусловно, они взаимодействуют друг с другом. Для сол-



Рис. 14.1. Проникновение космических лучей в дипольное магнитное поле Земли. Частицы с большей жесткостью $R1$ проникают глубже внутрь магнитного поля, и часть их достигает атмосферы. В районе полюсов частицы проникают внутрь магнитного поля в широком диапазоне R . Внутри дипольного поля возможно формирование замкнутых траекторий (захват частиц).

нечного вещества и магнитного поля Земля с её собственным магнитным полем представляет собой реальную преграду: они вынуждены «обтекать» её. В результате такого «обтекания» магнитное поле Земли, изначально имевшее дипольную форму, превращается в сложную структуру, названную магнитосферой (рис. 14.2).

Открытие магнитосферы мы обязаны исследованиям на спутниках Земли. Именно благодаря космическим экспериментам было обнаружено, что земное магнитное поле имеет полоидальную

форму с направленной на Солнце лобовой частью, постоянно омываемой солнечным ветром

Размер магнитосферы определяется балансом между давлением солнечного ветра и давлением магнитного поля планеты. Это уравнение баланса выглядит так:

$$2nm_p v_p^2 = B^2/8\pi = 1/8\pi [2M/D_e^3]^2$$

Здесь слева – удвоенное давление солнечного ветра (берется именно масса протонов (m_p), как наиболее распространенной частицы в плазме солнечного ветра, и их скорость – v_p); а справа – давление магнитного поля планеты, которое можно записать через M – магнитный момент планеты. Параметр D_e в этой формуле и определяет размер магнитосферы: расстояние от центра планеты до последней замкнутой силовой линии на дневной стороне (она называется магнитопаузой).

Физика взаимодействия плазмы солнечного ветра с магнитным полем планеты приводит к выводу о существовании ударной волны перед магнитопаузой. И она действительно была обнаружена в космических экспериментах.

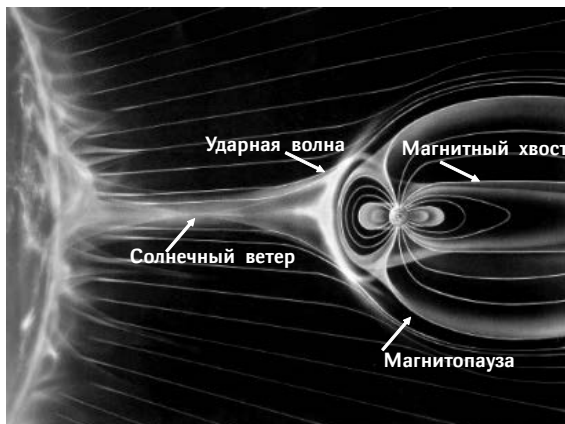


Рис. 14.2. Магнитосфера Земли – огромная структура в космическом пространстве, формируемая воздействием солнечного ветра на магнитное поле Земли.

На ночной стороне Земли силовые линии вытягиваются в антисолнечном направлении, образуя хвост магнитосферы. Открытие его в 60-х годах американским физиком Н. Нессом с коллегами на спутниках серии IMP, имевших апогеи на ~20 радиусах Земли на ночной стороне, сыграло в дальнейшем большую роль в космической физике. Ему отводится роль накопителя солнечной энергии, которая высвобождается при магнитных бурях.

Мы ещё к ним вернёмся (Глава 20), а пока проследим судьбу космических лучей, оказавшихся внутри магнитосферы Земли.

14.2. Земная ловушка для космических странников

В середине прошлого века магнитное поле Земли сыграло решающую роль в определении природы космического излучения. Безусловно, исследователей космических лучей с самого начала волновал вопрос о том, какая доля первичного космического излучения проходит через магнитное поле, и от каких факторов зависят условия проникновения частиц.

Подробно движение заряженных частиц в магнитном поле еще в далеком 1907 г. изучал К. Штёрмер. Именно он определил основные особенности их траекторий в магнитном поле Земли (см. рис. 14.1). Им были определены основные закономерности вариаций потоков частиц с изменением широты, долготы и высоты точки их наблюдения. Эти расчёты помогли исследователям правильно интерпретировать экспериментальные данные.

Заряжённые частицы, попадая внутрь магнитного поля Земли, испытывают воздействие силы Лоренца, зависящей от зарядового состояния частицы — иона (Q) или заряда ядра (Z), её скорости (v) и величины напряжённости магнитного поля (B). Сила Лоренца увеличивается как с увеличением Q , так и с увеличением произведения $v \cdot B$. Можно показать, что радиус кривизны траектории частиц с равными величинами mv/Q (m — масса частицы), называемой жёсткостью (R), имеют одинаковые траектории. Ясно, что такими частицами могут быть любые — и протоны, и электроны, и ядра. Именно поэтому в физике космических лучей удобно пользоваться величиной жёсткости для описания движения частиц в магнитных полях. Таковы основные закономерности движения галактических и солнечных космических лучей вблизи Земли.

Так, например, изучение азимутального эффекта движения частиц разного знака через магнитное поле (напомним, что частицы разного знака, например, протоны и электроны имеют траектории, направленные в противоположные стороны) помог пионерам исследования космических лучей понять их природу, а именно, доказать, что они состоят из заряжённых частиц. Расчёты показывают, что на экватор могут проникать только протоны с энергией, превышающей 15–17 ГэВ.

Для вычисления траекторий частиц нужны модели магнитного поля и параметры первичных космических лучей. Мы видели (см. рис. 14.2), что магнитное поле Земли — магнитосфера — это существенно искажённый под воздействием солнечного ветра магнитный диполь. Поэтому траектории частиц

в реальном поле далеки от плавной кривой, изображённой на рис. 14.2. Скорее, они напоминают запутанные спиралевидные линии с уменьшающимся радиусом кривизны по мере продвижения частицы к Земле (рис. 14.3). Однако в этой сложной картине можно выделить три основные закономерности.

Частицы с малой жёсткостью будут отражаться от магнитной брони нашей Земли, а частицы с большой жёсткостью будут проникать внутрь поля. Они либо погибнут в атмосфере, либо уйдут вновь в космическое пространство. А для некоторой доли частиц – с промежуточной величиной жёсткости магнитное поле представляет собой ловушку – частицы окажутся захваченными в нём (см.рис. 14.1).

Но ведь есть ещё энергичные частицы, ускоренные во время солнечных вспышек. Как они ведут себя в магнитном поле Земли?

Энергия этих частиц, как правило, значительно меньше, чем частиц ГКЛ. Поэтому для них весьма проблематичным выглядит возможность достижения низких высот или поверхности Земли. Лишь во

время экстремальных солнечных событий энергия этих частиц приближается к энергии галактических. Именно во время таких событий спутники на низких орбитах могут зарегистрировать частицы солнечного происхождения. Однако, для этих частиц (как, впрочем, и для всех других) в магнитном поле Земли существуют «дыры», куда частицы могут проникать практически беспрепятственно. Это полярные области, так называемые северные и южные полярные шапки. Здесь структура магнитного поля такова (силовые линии практически параллельны), что солнечные частицы могут достичь границы атмосферы. Нетрудно сообразить, что в связи с этим явлением могут возникнуть пробле-

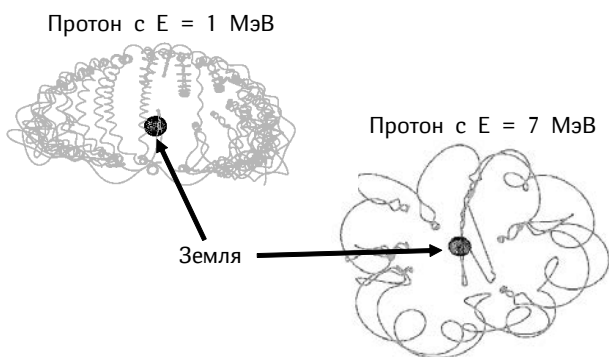


Рис. 14.3. Реальные траектории протонов в магнитном поле Земли.

Магнитное поле Земли сослужило большую роль в определении природы аномального компонента космических лучей. Эксперимент, выполненный российско-американской коллаборацией в начале 90-х годов с использованием спутников Земли, по своей идее был достаточно прост. Для определения заряда частиц АКЛ (кислорода) использовались одновременные измерения частиц на борту американского спутника IMP-8, летавшего за пределами магнитосферы, и нашего «Космоса», орбита которого была расположена вблизи Земли на низких высотах.

Частицы разного заряда имеют разные траектории в магнитном поле. Расчёты показали, что на орбиту «Космоса» могут проникнуть ионы кислорода лишь с зарядом $1+$ и не могут с большим зарядом. Совместные эксперименты показали полную идентичность вариаций потоков АКЛ вне и внутри магнитосферы и позволили точно определить заряд частиц АКЛ. Он действительно оказался близким к $1+$. Это и послужило доказательством справедливости гипотезы Л. Фиска о происхождении АКЛ (см. Главу 13).

мы с трансатлантическими авиалайнерами, залетающими на полярные широты. Потоки солнечных космических лучей достаточно большие, чтобы вызвать заметное увеличение доз радиации у экипажа и пассажиров. К этому вопросу мы вернёмся позже (Глава 22), а пока зададимся вопросом: насколько картина проникновения частиц космических лучей, нарисованная выше, стабильна во времени?

14.2. Магнитосферы планет солнечной системы

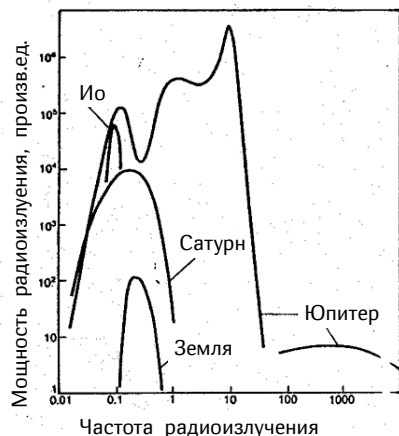
Не у всех планет Солнечной системы есть магнитные поля. Магнитного поля нет у Венеры. У Меркурия и Марса оно довольно слабое. Если не принимать в расчет Плутон, который астрономы перестали считать планетой, то у всех остальных планет магнитное поле есть. И самое сильное поле у Юпитера. Интересно, что обнаружили мощное магнитное поле у этой планеты задолго до космической эры. Как? — По радиоизлучению. Энергичные электроны в магнитном поле являются источником *синхротронного излучения* на радиочастотах. Это и наблюдалось с помощью радиотелескопов, когда их наводили на эту планету.

По приведенным в таблице 14.1 дипольным магнитным моментам планет можно представить разницу в размерах магнитосфер планет солнечной системы.

Таблица 14.1. Размеры магнитосфер и магнитные моменты планет солнечной системы (магнитные моменты представлены в единицах магнитного момента Земли M_e).

	Меркурий	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
Радиус, 10^3 км	2,43	6,38	3,4	71,6	60,0	?	?
Магнитный момент, M_e	$4 \cdot 10^{-4}$	1	$< 10^{-4}$	20000	580	~50	~25

Существует выраженная тенденция: у самых больших планет самые сильные поля. И, конечно, магнитосферы планет, у которых есть магнитное поле — разные. Читатель может сравнить относительные размеры магнитосфер, приведенных на рис. 14.5. Магнитосфера Юпитера впечатляет своими размерами! Если размер магнитосферы Земли составляет примерно 10 ее радиусов, то магнитосфера Юпитера — 65 радиусов этой планеты. Но интересно и то, что у его спутников Ио и Европа есть свои собственные магнитные поля. А вот у Луны магнитного поля нет.



Магнитосфера Юпитера впечатляет своими размерами! Если размер магнитосферы Земли составляет примерно 10 ее радиусов, то магнитосфера Юпитера — 65 радиусов этой планеты. Но интересно и то, что у его спутников Ио и Европа есть свои собственные магнитные поля. А вот у Луны магнитного поля нет.

Рис. 14.4. Синхротронное радиоизлучение, зарегистрированное наземными радиотелескопами. Самое мощное — у Юпитера. Это означает, что у этой планеты самое сильное магнитное поле. Здесь же приведены мощности радиоизлучения от Земли, Сатурна и спутника Юпитера Ио.

Рис.14.5. Сравнительные размеры магнитосфер планет. Самая большая – у Юпитера.

Оси магнитного диполя планет не совпадают с осью вращения. У Земли, например, угол составляет около 12° . И у каждой из планет своя пространственная структура магнитного поля. Вероятно, это связано с источником – генератором поля, который у каждой планеты принимает свое, особое пространственное положение в ее сердцевине.

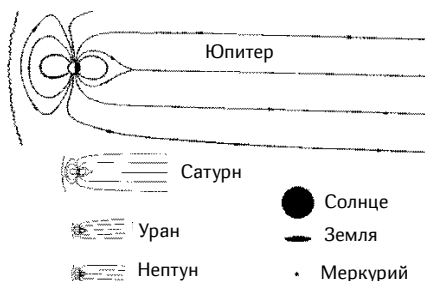


Рис. 14.6. Структура магнитных полей планет Солнечной системы: у каждой планеты свой индивидуальный угол между осью вращения и осью магнитного диполя.

Как следствие, магнитосферы планет принимают свой индивидуальный облик (рис. 14.7), связанный именно с расположением оси магнитного диполя.

Но надо учитывать еще один фактор, влияющий на пространственную структуру магнитосферы. Это внутренние токи, которые текут внутри них и создаются потоками плазмы. Индукционные магнитные поля изменяют конфигурацию главного, внутреннего поля планеты, придавая ей особые, присущие только ей «оттенки». Так, для Земли, как и для Юпитера, очень важно существование кольцевых токов, возникающих после поджатия магнитосферы усиленным давлением солнечного ветра корональных инъекций масс – СМЕ. Об этом пойдет речь в следующей главе. Здесь только отметим, что природа кольцевого тока, например, у Земли и Юпитера отличается. Если у Земли кольцевой

ток создается плазмой солнечного ветра и ее ионос-

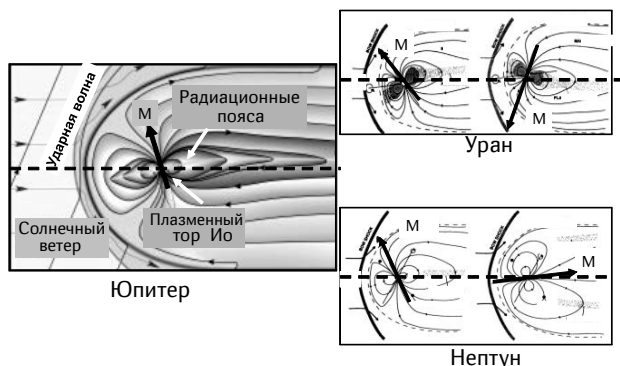


Рис. 14.7 Магнитосферы Юпитера, Урана и Нептуна. Они сильно отличаются от земной вследствие другого, чем у нашей планеты расположения оси магнитного диполя. Их пространственное положение относительно плоскости эклиптики (пунктир) отмечено стрелками «М».

Рис. 14.8. Извержение серного вулкана на спутнике Юпитера Ио. Серная ионизированная плазма является основным носителем кольцевого тока (плазменного тора) вблизи Юпитера.



феры, то у Юпитера — вулканической деятельностью одного из крупнейших его спутников — Ио. Это было в свое время удивительным открытием, когда пролетавший мимо Ио космический аппарат сфотографировал настоящее извержение вулканической серы на этом спутнике (рис. 14.8.). Именно ионы серы и являются основным материалом, создающим кольцевой ток, ответственные за магнитные бури в магнитосфере Юпитера.

Кроме того, нельзя забывать, что давление солнечного ветра ослабевает с расстоянием и, например, на орбитах планет — гигантов, расположенных далеко от Солнца, оно значительно меньше, чем на орбите Земли. Это, естественно, также влияет на размеры магнитосферы (см. раздел 14.1).

Глава 15. Магнитные бури

Земля и Солнце связаны друг с другом невидимой, но неразрывной связью через плазму солнечного ветра, вмороженное в нее межпланетное магнитное поле и другие виды излучений. Как, впрочем, и другие планеты Солнечной системы. Не исключено, и к этому уже есть предпосылки, что и межзвездная среда оказывает влияние на физические процессы в нашей гелиосфере. Принят термин, описывающий взаимосвязь явлений в разных средах — «космическая погода». Если иметь в виду солнечно-земные связи, то термин «солнечная погода» подходит больше. Но «космическая погода» прижилась и ей посвящены сотни, если не тысячи публикаций, и мы подробно останавливаться на этом интересном направлении не будем. Обратим внимание только на геомагнитную бурю и связь ее с радиационной обстановкой в окрестности нашей планеты.

15.1 Взрыв магнитной оболочки Земли

Магнитная броня нашей планеты находится под постоянным воздействием давления солнечного ветра, которое может испытывать существенные пространственные и временные вариации. Но спорадически после мощных взрывных процессов на Солнце происходит столкновение ударных волн плазменных облаков — (СМЕ), летящих со скоростью до 2000 км/с и более и несущих мегатонны солнечного вещества, с магнитосферой Земли (рис. 15.1)

Безусловно, магнитное поле на дневной, обращённой к Солнцу стороне, сплющится и очень сильно. Эксперименты показывают, что в такие моменты времени дневная граница магнитосферы — магнитопауза, обычно находящаяся на расстоянии около 10 радиусов Земли, может приблизиться к Земле на расстояние до 3-х радиусов планеты! И на ночной стороне также произойдёт сильная деформация поля. Что такое возмущённая магнитосфера? Оказы-

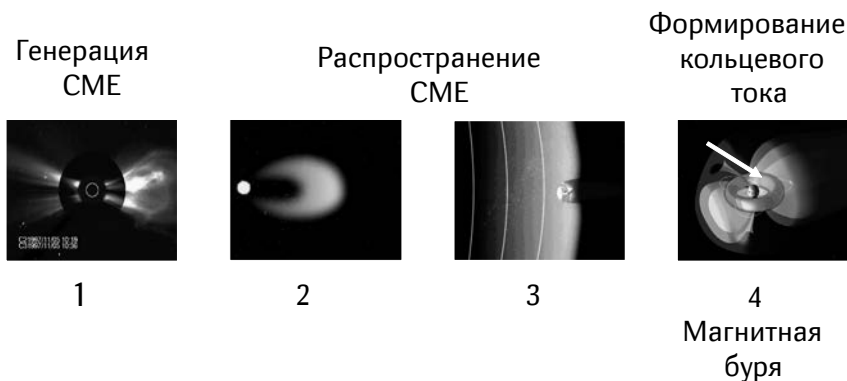


Рис. 15.1. Взаимодействие ударной волны (СМЕ) с магнитосферой. После образования магнито-плазменного облака около Солнца (1), оно в процессе распространения (2) в межпланетной среде по траекториям архимедовых спиралей может соприкоснуться с магнитосферой планеты (3). После этого внутри магнитосферы происходит формирование кольцевого тока и, собственно, магнитная буря (4).

вается, это не только та деформация поля, которая вызывается набегающим на Землю потоком солнечной плазмы. Как правило, после этого вблизи Земли происходит грандиозное явление, называемое магнитной бурей. Рассмотрим это очень интересное геофизическое явление более подробно.

Отметим, что магнитная буря – глобальное искажение основного, главного магнитного поля Земли. Оно обусловлено генерацией электрических токов внутри самой магнитосферы через некоторое время (до единиц – десятков

Барон Александр фон Гумбольдт, немецкий естествоиспытатель, географ и путешественник не расставался, наверное, с компасом, столь необходимым прибором в путешествиях. Однажды, это было ночью 21 декабря 1806 года, он заметил сильные покачивания стрелки компаса, а на небе было сияние авроры. К утру и авроральное сияние стихло, и стрелка компаса успокоилась. Барон остался наедине со своим открытием, его время еще не пришло. Но теперь ясно, что это было первое экспериментальное, подтверждаемое приборами, наблюдение геомагнитной бури, а в совокупности с авророй – то, что сейчас мы называем «космической погодой».

минут) после первоначального толчка облака солнечной плазмы (так называемое «внезапное начало»). Именно электрические токи, связанные с движением заряженных частиц плазмы внутри магнитосферной полости, вызывают искажение естественного магнитного поля Земли. Почему? Из физики известно, что ток, текущий по проводнику, генерирует вокруг себя магнитное поле (его называют индукционным). То же самое происходит и в магнитосфере. Индукционное поле

создаётся токами и в области его локализации общее, суммарное магнитное поле, конечно, будет отличаться от естественного.

Где в магнитосфере текут эти токи? Оказывается, наиболее мощный ток во время магнитной бури формируется вблизи Земли, на расстоянии 3–4-х радиусов. Это так называемый «кольцевой ток» (рис. 15.2). Он состоит как из частиц солнечной плазмы, так и земной – ионосферной. Его генерация проходит 3 фазы (рис. 15.2). Кольцевой ток во время бури генерирует мощное индукционное поле и вызывает уменьшение, депрессию общего магнитного поля Зем-

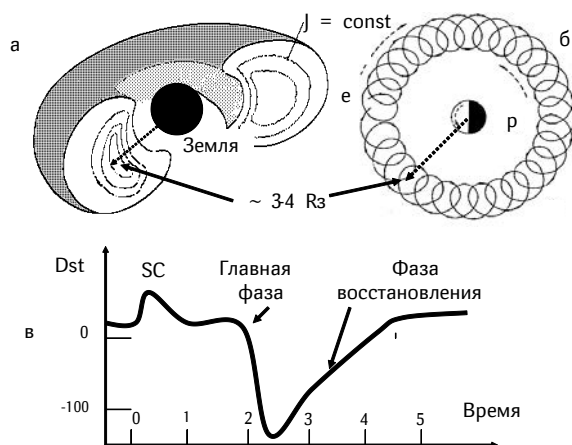


Рис. 15.2. Пространственная структура кольцевого тока – плазменного тора, сформированного во время магнитной бури. Показаны линии равных потоков J , формирующих тор (а). Тор представляет собой конгломерат дрейфовых спиралевидных траекторий. Протоны в этом кольце дрейфуют на запад, а электроны – на восток. Такой плазменный тор создаёт понижение напряжённости магнитного поля Земли. Сам момент удара СМЕ фиксируется магнитометрами как скачок – увеличение индукции магнитного поля в момент увеличения давления плазмы SC (внезапное начало).

ли на низких и средних широтах. Это и есть магнитная буря. Буря возникает не всегда, но, как правило, при преимущественно южном направлении межпланетного магнитного поля.

Тот факт, что магнитная буря должна вызываться кольцевым током частиц, было известно давно, до начала космических исследований. Еще в 30-х годах прошлого века А. Десслер, Ю. Паркер и Н. Скопке вывели замечательную формулу, демонстрирующую зависимость изменения магнитного поля от энергии частиц в таком кольцевом токе.

$$\Delta B/B_0 = 2E_{\text{rc}}/3E_m$$

Здесь: ΔB — изменение индукции магнитного поля в момент формирования кольцевого тока, B_0 — невозмущенное поле магнитосферы на поверхности Земли на экваторе. Для Земли $B_0 = 0,3$ Гс. С правой стороны: E_m — энергия дипольного магнитного поля, а E_{rc} — полная энергия частиц кольцевого тока.

Вплоть до начала 70-х годов не было ясно, т.е. экспериментально не доказано, какие частицы, собственно, могут быть ответственны за энергетику кольцевого тока? Иными словами, какие частицы создают тот запас энергии, который способен уменьшить собственное магнитное поле планеты?

С началом космических исследований стало ясно, что ими, очевидно, не могут быть электроны — их масса слишком мала при существующих потоках. Протоны? Они тяжелее электронов в 1840 раз и их довольно много в околоземном космическом пространстве. На них и обратили внимание исследователи в начале 70-х. В это время для экспериментаторов стали доступны полупроводниковые детекторы, позволявшие регистрировать протоны довольно низких энергий. Именно область энергий в десятки — сотни кэВ была неисследованной в то время, и именно на протоны таких энергий падали «подозрения» исследователей как на основных носителей кольцевого тока. Так оно и оказалось. Именно на этот диапазон энергий протонов приходился максимум плотности энергии во всем энергетическом спектре захваченных частиц (рис. 15.3), и именно они инжектировались во время возмущений магнитосферы во внутреннюю ее область, захватывались магнитным полем и формировали гигантское токовое кольцо вокруг Земли.

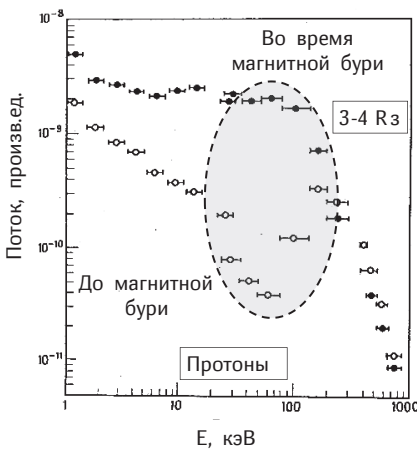
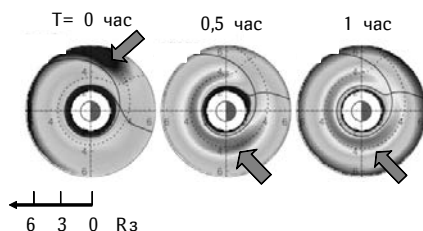


Рис.15.3. Дифференциальные энергетические спектры протонов до и после магнитной бури. Именно протоны в диапазоне энергий в десятки кэВ и более (до, примерно, 200 кэВ) (отмечены овалом) ответственны за формирование депрессии магнитного поля — магнитную бурю.

Рис. 15.4. Формирование асимметричного кольцевого тока. Частицы инжектируются с ночных и вечерних секторов внутрь магнитного поля с периферии магнитосферы, дрейфуя в скрещенных магнитном и электрическом полях. Протоны дрейфуют в западном направлении, формируя частичный кольцевой ток. Постепенно распределение частиц симметризуется по долготе.



На самом деле, картина формирования кольцевого тока несколько сложнее, чем это описано выше. И эксперименты, и моделирование процесса формирования кольцевого тока показывают, что этот процесс проходит две фазы: формирование асимметричного токового кольца (частичный кольцевой ток) и затем его симметризация (полный кольцевой ток). Первая фаза наблюдается в начале главной фазы магнитной бури, а вторая в ее конце (рис. 15.4). Не всегда с окончанием главной фазы наступает симметризация кольцевого тока. Безусловно, это находит отражение в локальных (долготных) изменениях магнитного поля. Скажем, если в Дели магнитометр зарегистрировал изменение магнитного поля, но это не значит, что в Нью-Йорке будет наблюдаться такая же картина. Магнитные бури также имеют самое непосредственное отношение и к радиационной обстановке около Земли. На этой проблеме мы остановимся в Главах 19 и 20.

В начале 70-х были получены данные о том, что не только протоны могут быть носителями кольцевого тока, но и более тяжелые частицы — ионы кислорода, а они в 16 раз тяжелее протонов, а значит, могут создавать в кольцевом токе запас энергии значительно больший, чем протоны.

Это был замечательный этап в развитии космической физики. До этого было очевидным, что протоны попадают в магнитосферу из солнечного ветра. Но с открытием существования мощных потоков кислорода во время магнитных бурь стало ясно, что наша атмосфера, а точнее, ее внешние оболочки, являются, помимо солнечного ветра, важным «поставщиком» вещества в околоземное пространство. Это открытие сделали американские физики в 1972 г. на низкоорбитальном спутнике S3-3 с помощью приборов, позволявших разделять протоны и более тяжелые частицы. В составе солнечной плазмы практически нет кислорода — именно этот факт стал доказательством существования и земного источника частиц кольцевого тока, создающего магнитные бури.

Сейчас ясно, что как солнечные частицы (в основном протоны), так и земные (кислород) ответственны за формирование кольцевого тока, хотя, следует отметить, что их относительная роль разная для разных бурь. Бывает так, что некоторые бури связаны в основном с формированием «кислородного тока», а некоторые — «протонного», а иногда присутствует их смесь. В этой области тоже не все ясно. Об этом в Главе 18.

Как часто возникают магнитные бури? Безусловно, и это уже понятно читателю, что солнечная активность является здесь определяющим фактором. Но посмотрите на рис. 15.5, на котором приведена статистика бурь и числа сол-

нечных пятен. Можно сделать вывод, что бури происходят наиболее часто в периоды повышенной солнечной активности, но четкой корреляции между индексами солнечной активности и индексами геомагнитной активности нет. Довольно часто бури происходят и на фазе спада активности Солнца. Аналогичная картина наблюдается и для СМЕ, и для солнечных космических лучей. Это и понятно: магнитные бури обусловлены приходом к Земле ударных волн, генерация СКЛ также связана с ускорением на ударных волнах. Но почему довольно мощные СМЕ наблюдаются на фазах спада — пока не понятно.

Но какое отношение магнитная буря имеет к космическим лучам — частицам высокой энергии? — Самое непосредственное.

15.2. Проникновение

Искажение магнитного поля, его ослабление на расстояниях менее 5-6 радиусов Земли (там, где расположен кольцевой ток) существенно меняет траектории космических лучей, проникающих в магнитосферу. Ранее упоминалось о заполнении высокоширотных областей солнечными энергичными частицами во время вспышек. Очень часто генерация частиц на Солнце (точнее, их приход к Земле) совпадает с магнитными бурями. Магнитное поле в эти моменты ослабевает и позволяет частицам проникать глубже в магнитосферу. Для «полярных» частиц это проявляется в виде смещения низкоширотной границы проникновения ближе к экватору: зона заполнения солнечными частицами полярных областей во время магнитных бурь становится более обширной, сдвигаясь к экватору (рис. 15.6).

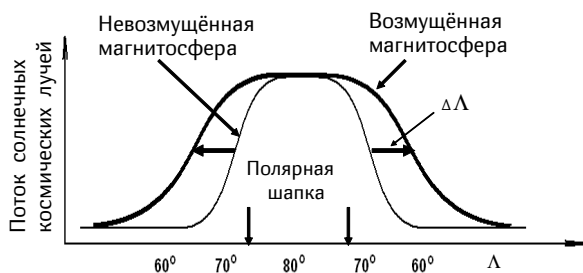


Рис. 15.6. Изменение границ проникновения солнечных частиц: в условиях магнитной бури (возмущённая магнитосфера) границы смещаются к экватору.

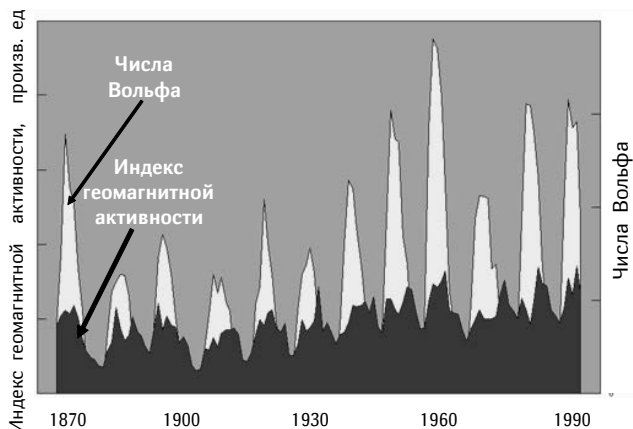


Рис. 15.5. Зависимость индекса геомагнитной активности от солнечной активности. Очевидна тенденция к усилению геомагнитной активности в периоды, близкие к максимуму солнечной активности, но наблюдаются сильные бури и в период ее спада (по материалам А.В. Белова).

Такова, в основном, картина проникновения галактических и солнечных космических лучей в магнитное поле Земли. Безусловно, частицы космических лучей, достигшие верхних границ атмосферы, не исчезают бесследно в её недрах. Они оставляют «следы». Причём, как мы теперь понимаем, очень значимые как для среды обитания человека, технологий, созданных человеком, так и для самого человека, как, впрочем, и любых других биологических структур на Земле. Таким образом плазма кольцевого тока не прямым образом, а опосредованно, создает «радиационные» проблемы. Проблема проникновения космических лучей во время бурь вязана с безопасностью полетов на космических кораблях, пересекающих авроральные и полярные широты и для пассажиров авиалайнеров, совершающих межконтинентальные перелеты на высоких широтах (об этом подробно в Главе 22). А может ли сама плазма создать проблемы, связанные с безопасностью космических полетов. Ведь в отличие от высокоэнергичной радиации (например, космических лучей) она не проникает глубоко в толщу вещества и не может создать радиационных эффектов внутри него. И, тем не менее, оказывается, может.

15.3. Как электрические разряды губят спутники

Эта проблема возникла в конце 60-х годов. И Советский союз, и США, а затем и другие страны начали усиленно эксплуатировать геостационарную орбиту. Необъяснимый выход из строя геостационарных спутников в начале

Особенность геостационарной орбиты состоит в том, что спутники, будучи запущенными на нее (высота такой орбиты 36 000 км в плоскости экватора), всегда будут расположены на той географической долготе, куда первоначально они были запущены. Это очень удобно для осуществления трансляции радио и телевидения, а также телекоммуникаций.

их эксплуатации заставил и наших специалистов, и американских глубоко окунуться в эту проблему.

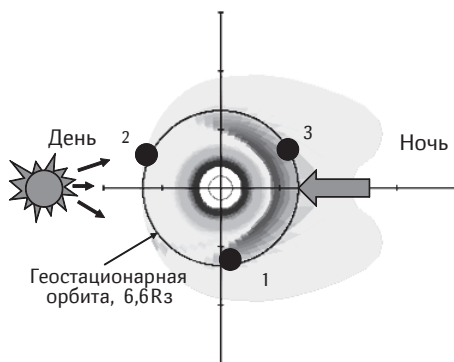
Что оказалось? В большей степени в этом виноваты именно магнитные возмущения и, конкретно, плазма, которая «приходит в движение» в связи с ними. Для того,

чтобы понять физику этого процесса, необходимо более подробно остановиться на механизме формирования кольцевого тока.

Основной моделью, описывающей этот механизм, является механизм инжекции плазмы из хвоста магнитосферы во время магнитных бурь (подробнее об этом в Главе 21). Вкратце это выглядит так: частицы во время интенсификации магнитного возмущения начинают дрейфовать в сторону Земли в скрещенных магнитном и электрическом полях.¹ Как результат, будет наблюдаться картина дрейфа частиц, наподобие приведенной на рис. 15.7. Это означает, что спутники, находящиеся на геостационарной орбите, оказываются в потоках плазмы, инжектированной из хвоста магнитосферы. В основном это происходит именно на теневой стороне Земли.

¹ В магнитосфере существует глобальное электрическое поле, направленное с утра на вечер, которое во время проявлений магнитной активности изменяется. Его напряженность порядка 100 кВ. На характер движения частиц достаточно малых энергий (до 100 кэВ) будут оказывать влияние одновременно два поля — магнитное и электрическое.

Рис. 15.7. Инжекция плазмы из хвоста магнитосферы сторону Земли во время магнитных бурь. Геоостационарные спутники 1 и 3 окажутся внутри инжектированных потоков плазмы на ночной стороне, а спутник 2 — на дневной, под действием солнечного излучения. Оба этих фактора будут определять электризацию спутников.



Здесь надо заметить, что поверхность любого космического аппарата — это сложная конструкция, состоящая из разных по своим физическим характеристикам материалов. Среди них и проводники электрического тока, и диэлектрики. И все они оказываются под воздействием плазменных потоков. При этом диэлектрики накапливают электрический заряд, создаваемый набегающей плазмой (рис. 15.8).

Материалы с разной степенью электропроводности накапливают электрические заряды в разной степени. Происходит так называемая дифференциальная зарядка поверхности космического аппарата. Как результат, между поверхностями разных материалов возникает разность потенциалов. Знак заряда тела определяется в основном электронами, имеющими при равенстве кинетических энергий большую скорость, чем положительно заряженный протонный компонент. Эта разность потенциалов может достичь критического для электрического пробоя уровня. Следует отметить, что возникающее напряжение может достичь таких значительных величин, как 15–20 кВ. Электрический разряд, возникающий на поверхности спутника, может привести к локальным повреждениям, а генерация мощного электромагнитного излучения к нарушениям в работе бортовых систем.

Для полноты описания электризации космических аппаратов необходимо учитывать и воздействие солнечного излучения на его поверхность. Так, *фотоэффект* приводит к «вырыванию» фотонами электронов, что приводит к фотоэлектронному току, который «уносит» отрицательный заряд с поверхно-

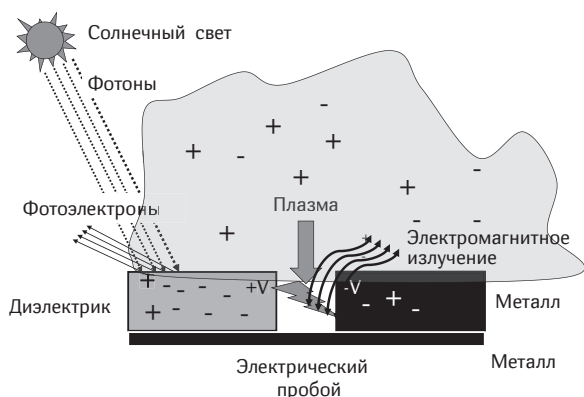
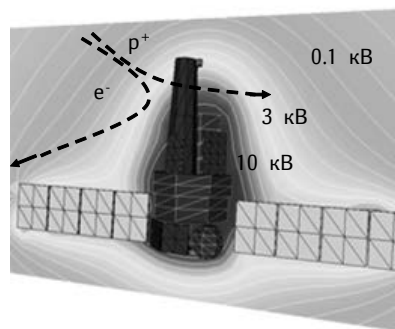


Рис. 15.8. Механизм дифференциальной зарядки поверхности спутника. Разные по своему составу материалы заряжаются набегающей плазмой в разной степени. В результате дифференциальной зарядки возникает разность потенциалов, которая может привести к электрическим разрядам и связанному с ними электромагнитному излучению. На дневной стороне поверхность подвергается воздействию солнечного излучения, которое вследствие фотоэффекта снижает отрицательный заряд диэлектрических поверхностей.

Рис. 15.9. Неоднородное распределение электрических потенциалов вблизи геостационарного космического аппарата — дифференциальная зарядка поверхности под действием инжектируемой плазмы. Такие поля оказывают и обратное влияние на частицы, дрейфующие в окрестности, изменяя регистрируемые приборами на спутнике их «естественные» физические параметры (по материалам, представленным Л.С. Новиковым).



сти спутника и влияет на общий баланс токов на поверхности, определяемый плазмой и светом.

Как результат — возникновение электрического пробоя, который может оказать самое опасное воздействие на бортовые системы спутника, особенно на его электронику. Потеря ориентации, прекращение передачи информации на Землю или выход из строя всего спутника — вот перечень негативных последствий ожидающих спутник на геостационарной орбите во время магнитных бурь. Проблема электризации космических аппаратов была и остается актуальной в связи с необходимостью обеспечения длительного срока их эксплуатации. Стоит отметить, что число аномалий в работе геостационарных спутников, связанных с электризацией, значительно превышает сбои в работе, связанные с дозовыми эффектами космической радиации и воздействием высокоэнергичных тяжелых заряженных частиц.

На рис. 15.9. показано модельное распределение электрических потенциалов вокруг геостационарного спутника. Вследствие сложной конструкции космического аппарата оно очень неоднородно. Интересно отметить, что поле, возникающее вследствие дифференциальной зарядки космической плазмой поверхности спутника, будет оказывать и обратное влияние на частицы, оказавшиеся вблизи спутника (пунктирные линии на рис. 15.9 — траектории электронов и протонов).

Электростатическое поле будет изменять первоначальные направления траекторий частиц, тем самым изменяя такие их характеристики как энергетический спектр, состав и пространственные параметры, характерные для естественной среды. Иными словами, детекторы этих частиц, размещенные на спутнике, будут давать недостоверную информацию. Это должны учитывать специалисты, эксплуатирующие спутник или изучающие радиационную обстановку на данной орбите.

Глава 16. Следы странников

Слепому гневу солнечной короны
Подвластны наши ливни и ветра,
А к ливню ломит кости у вороны
И оттого орёт она с утра

Ю. Левитанский

Потоки космических лучей достигают окрестности Земли и те, которым «повезёт» пробиться через магнитное поле, достигают атмосферы. И здесь они не пропадают бесследно. Помните, у С.Лема: «В космосе ничего не пропадает». Ну что же, давайте посмотрим, так ли это.

16.1. Атмосферный след странников – климат сегодня

Взаимодействуя с атмосферой, космические лучи теряют свою энергию – почти 95%. Зададимся вопросом, какова доля этой энергии среди других видов излучений, падающих на Землю. В основном, это солнечная радиация. В таблице 16.1 приведены основные виды солнечной радиации и их поверхностную энергию (энергию, падающую на единицу поверхности атмосферы).

Таблица 16.1. Основные виды солнечной радиации и космических лучей

Вид	Поверхностная энергия, Вт/м ²
Видимое и инфракрасное излучение	1090
Ультрафиолетовое излучение	15,4
Рентгеновское излучение	10 ⁻¹
Солнечный ветер	3·10 ⁻⁴
СКЛ	2·10 ⁻³
ГКЛ	7·10 ⁻⁶
Общая радиация	1366

Мы видим, что СКЛ и ГКЛ среди прочих видов космических излучений несут ничтожную долю энергии. Поэтому возникает естественный вопрос, способны ли космические лучи повлиять каким-либо образом на атмосферные процессы? Оказывается, – да. Несмотря на их очень малую «энергетику», они играют очень существенную роль в развитии ряда атмосферных явлений, которые могут приводить и к климатическим изменениям.

Каким образом вообще можно «нащупать» связь между таким сравнительно «маломощным» агентом космической среды, каким является поток космических лучей и атмосферными явлениями? Обратим внимание на то, что изменения общей радиации Солнца очень малы – не более 0,1%. Это удивительно, но факт: несмотря на существенные изменения солнечной активности в течение 11-летнего цикла и других более длительных циклов и более коротких, общий поток солнечного излучения остаётся постоянным!

Однако мы уже видели, что изменения ГКЛ в течение 11-летнего цикла, весьма значительны: ГКЛ подвергаются мощной солнечной модуляции, потоки СКЛ и релятивистских электронов, выпадающих из радиационного пояса

Рис. 16.1. Изменение потоков релятивистских электронов, выпадающих из радиационных поясов, и солнечных космических лучей с изменением солнечной активности.

(см. Главу 20) также изменяется с течением солнечного цикла, но более сложным образом, чем ГКЛ (рис.16.1). Вывод напрашивается сам собой: надо попытаться обнаружить 11-летнюю цикличность (или более долгопериодическую) в атмосферных процессах и сравнить её с солнечной.

Такие попытки были сделаны, и они обнадеживающие. Взгляните на рис.16.2. На нём приведены изменения числа солнечных пятен (W), индекс, описывающий изменения геомагнитной активности aa (этот индекс пропорционален частоте магнитных бурь), а также изменение глобальной температуры атмосферы Земли (ΔT) за более, чем 100-летний период.

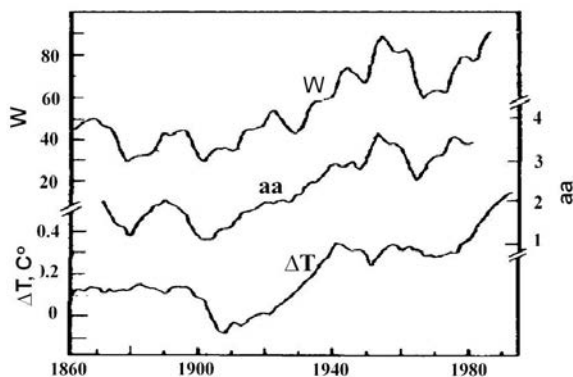


Рис. 16.2. Долговременные изменения солнечной и геомагнитной активности (W — числа Вольфа, aa — индексы геомагнитной активности) и глобальной температуры (T) на Земле. Положительный тренд солнечной активности приводит к отрицательному тренду (ослаблению) потоков ГКЛ и, возможно, к глобальному потеплению на Земле.

Какой физический механизм может быть ответственен за такую связь?

Прежде чем перейти к описанию этого механизма, обратимся к рис. 16.3, на котором изображена структура верхних слоёв атмосферы и скорость потерь энергии различных компонентов космического излучения: ГКЛ, релятивистских электронов радиационных поясов и ультрафиолета Солнца. Потери энергии частицами, проникающими в атмосферу, связаны с ионизацией частиц воздуха. Расчётные значения плотности потоков образовавшихся ионов также представлены на этом рисунке. Как мы увидим ниже, именно ионизация воздуха играет большую роль в искомой связи между космическими лучами и атмосферными явлениями.

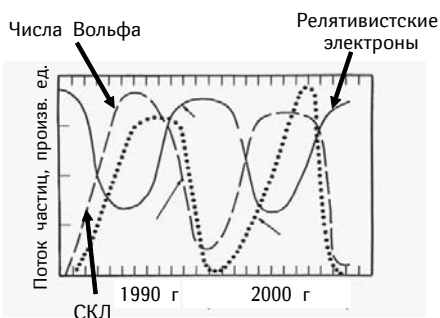
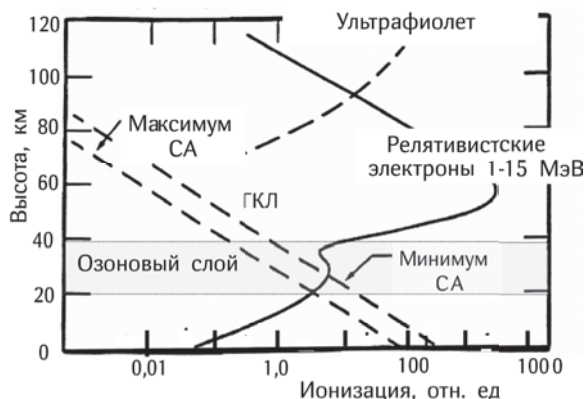


Рис. 16.3. Потери энергии в атмосфере различных компонентов космического излучения: ГКЛ, релятивистских электронов и ультрафиолета. На высотах от ~30 до ~90 км ионизацию атмосферы создают электроны, а на меньших высотах — ГКЛ. Верхние слои атмосферы ионизируются в основном за счёт ультрафиолета.



Что же нам говорят кривые, изображённые на рис. 16.3?

Первое: ультрафиолет Солнца ионизирует атмосферу лишь на больших высотах, а ГКЛ — основной фактор, приводящий к ионизации атмосферы на высотах менее 20 км, как во время максимума, так и во время минимума солнечной активности. Ну, а в промежутке, на высотах ~30–90 км, — релятивистские электроны, выпадающие из радиационного пояса в атмосферу, создают основную долю ионизированного воздуха. А теперь вспомним: где, на каких высотах сверкают молнии? Не выше нескольких километров над Землей. Вот к ним мы сейчас и обратимся.

16.2. Гром и молнии странников

Грозы — одно из самых захватывающих природных явлений. Подсчитано, что в течение суток наблюдается сотня тысяч гроз на нашей планете. Энерговыделение молниевых разрядов ~ $5 \cdot 10^{19}$ джоулей в сутки. Энергия же атмосферного циклона составляет всего 2% от этой величины, поэтому есть смысл рассматривать прямую физическую связь этих явлений. Ну, а молнии? Что заставляет «разряжаться» грозовые облака?

Одна из идей, состоит в том, что именно космические лучи могут являться тем «спусковым крючком», который заставляет грозовые облака выстреливать молниевые разряды как в сторону поверхности Земли, так и в других направлениях. Теперь вспомним про ШАЛ: максимум генерации вторичных частиц в ливне приходится на высоты ~15–20 км. А частицы с энергией в ПэВ-ной области достигают высот в несколько километров. Распределение

частиц ливня по высоте характеризуется их высотным ходом (рис. 16.4). Кривая ионизации воздуха ведёт себя аналогичным образом. Поэтому, есть смысл подозревать ГКЛ в качестве главного «виновника» ионизации атмосферы на этих высотах. Ну, а далее...

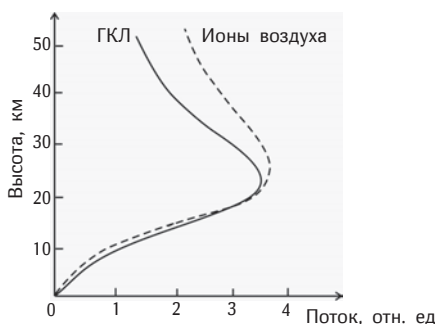


Рис. 16.4. Изменения потоков космических лучей и концентрации ионов в атмосфере в зависимости от высоты доказывают, что ионизация на малых высотах создаётся частицами ГКЛ.

Рис. 16.5. Изменения потока космических лучей и облачного покрова Земли.



Далее процесс выглядит следующим образом...

Грозовые облака образуются в месте разделения атмосферных фронтов воздушных масс с различной температурой. Они заряжены. Источником их заряда являются космические лучи, ионизирующие воздух. Однако помимо космических лучей естественная радиоактивность даёт свой вклад в ионизацию воздуха. Образовавшиеся ионы «прилипают» к аэрозолям воздуха и вместе с ними движутся вверх, обрстая всё новыми и новыми ионами. Постепенно образуются капли, туман и, наконец, облака. Экспериментальные данные (рис. 16.5), пожалуй, в пользу этой модели.

Действительно, существуют данные, свидетельствующие о высокой корреляции плотности ионизации воздуха и облачного покрова Земли. Чем больше облаков, тем более вероятным становится проявление грозовой активности и молниевых разрядов. На рис. 16.6 показаны результаты, свидетельствующие в пользу рассматриваемой гипотезы: частота молний действительно коррелирует с изменением ионизации воздуха.

Как мы видим из этих данных, ионизация воздуха и рост числа молниевых разрядов совпали с наступлением минимума цикла солнечной активности в 1995–1997 гг., когда поток ГКЛ достиг своей максимальной величины.

Становится понятным и наблюдающийся положительный тренд (рис. 16.2) глобальной температуры, связанный с многолетним уменьшением потока космических лучей (он уменьшается на несколько сотых процентов в год). Таким образом, наблюдающееся в последнюю сотню лет совсем небольшое, но заметное потепление на $0,5^\circ$ скорее всего связано не с увеличением энергии, созданной самим человеком, а вполне естественной причиной — ослаблением потока космических лучей, падающих на Землю. У вышеприведённой модели много сторонников, как, впрочем, и противников, и её развитие выглядит и впрямь неожиданным....



Но... вспомните слова Луи де Бройля: *«Прогресс науки постоянно тормозится тираническим влиянием некоторых концепций, которые, в конце концов, стали считаться догмами».*

Рис. 16.6. Изменение ионизации воздуха и частоты молний.

16.3. Климат до нашей эры и спиральные рукава Галактики

Итак, описанная выше модель демонстрирует, что космические лучи – не-маловажный фактор земной погоды. Если это так, то история космических лучей в прошлом и в будущем может помочь установить тенденции в изменении климата на Земле. В этом смысле отмеченная выше (рис. 16.2) связь между отрицательным трендом космических лучей и глобальным потеплением – обнадеживающий факт.

Идея ещё более смелой «продвинутой» гипотезы принадлежит А. Нею, высказана им в 1959 г. и недавно развита Н. Шавивом.

Суть её в следующем. Наша Галактика состоит из спиральных рукавов (рис. 1.8), в которых плотность звёзд больше и, следовательно, поток космических лучей также должен быть несколько больше. Это, кстати, показано по относительной концентрации изотопов калия в найденных железных метеоритах. Этим способом было определено, что каждые 130–150 млн лет поток космических лучей в Солнечной системе увеличивается в 2,5 раза. Солнечная система, двигаясь в Галактике, пересекает спиральный рукав примерно каждые 130 млн лет. Частота взрывов сверхновых в рукавах ожидается тоже выше. Поэтому следует ожидать появления климатической «волны» с периодом 130–150 млн лет в связи с вариациями потока космических лучей.

Как это определить? Это тоже можно сделать по изотопному методу (с помощью изотопов кислорода). Данные по вариациям космических лучей и изменению температуры совпали. Прохождение Земли через спиральные рукава Галактики приводит к охлаждению нашей планеты – ледниковым периодам. Не правда ли, заманчивая физическая модель для климатологов? (см. рис. 16.7). Только, если отойти от догм.

В целом, если эта модель верна, она делает космические лучи «ответственным фактором» за климатические изменения на разных шкалах времени. Они выступают в качестве либо доминирующего фактора (скажем, при создании облачного покрова или гроз) или вторичного, например, при формировании климатических изменений, связанных с 11-летними циклами солнечной активности и сопутствующей модуляцией ГКЛ, а также при прохождении Солнечной системы через спиральные рукава Галактики.



Рис. 16.7. Схема, иллюстрирующая взаимосвязь изменения потока космических лучей, связанного с попаданием Земли в спиральные рукава Галактики, с изменением глобальной температуры нашей планеты (по Н. Шавиву).

16.4. Солнечная бомбардировка атмосферы

Солнечные частицы время от времени бомбардируют Землю (см. главу 14). Особенно их много попадает в полярные шапки, в отличие от экваториальных областей. Эти частицы проникают в атмосферу не столь глубоко, как ГКЛ, – всего до высот $\sim 30\text{--}90$ км. Именно на этих высотах следует ожидать повышенной ионизации воздуха. Есть ли связь между возрастанием потоков СКЛ и арктическими явлениями?

Исследования в этом направлении ведутся, и первые результаты указывают на наличие такой связи. Существует достоверный факт усиления циклонов в районе Гренландии с возрастанием потоков СКЛ с энергией более десятков МэВ. Само усиление циклонов связывается с температурными контрастами в обширных районах верхней атмосферы, возникшей вследствие образования здесь облачности, регулирующий уход излучения, как от Земли, так и от атмосферы. Формирование же облачности коррелирует с ионизацией атмосферы (рис. 16.5), ответственность за которую несут и СКЛ.

Другим наблюдательным фактом в пользу данной модели может служить понижение уровня осадков во время Форбуш-понижений космических лучей. Опять-таки, и здесь, вслед за уменьшением интенсивности космических лучей после прихода ударной волны понижается степень облачности и, в результате, уровень осадков. С другой стороны, наблюдается увеличение уровня осадков после мощных солнечных вспышек, генерирующих ГэВ-ные протоны.

Другим примером глобальных атмосферных процессов, ответственность за которые несут космические лучи, является озоносфера Земли. Озон – молекула кислорода, состоящая из трёх атомов кислорода. В отличие от обычного кислорода, озон обладает резким запахом. Отсюда его название.

Слой озона предохраняет живые организмы на Земле от вредного ультрафиолетового излучения Солнца. Озонный слой над Землей расположен на высотах от 10 до 50 км с максимумом в области 20–25 км и является очень подвижной атмосферной субстанцией. Причины изменения концентрации озона над Землей широко обсуждаются. В качестве одной из таких причин называется техногенная – струи реактивных лайнеров, летающих на больших высотах, или выбросы фреона в атмосферу. Что касается фреона, то в ряде стран запретили выпуск бытовых холодильников с фреоном. Где здесь больше недобросовестной конкуренции между производителями холодильников, а где реально существующей и научно-обоснованной модели, предстоит ещё окончательно разобраться. Но фактом остается и следующий пример: недавно, в 2018 г., Илон Маск запустил в США самую мощную ракету в мире. И этот запуск «пробил» огромную дыру в ионосфере, существенно уменьшив концентрацию естественных электронов. Это в пользу техногенного воздействия на верхние слои атмосферы.

И тем не менее, существуют объективные научные результаты в пользу естественных «космических» причин вариаций озонного слоя Земли.

Опять-таки, к числу таких космических факторов относятся ГКЛ, СКЛ и релятивистские электроны, выпадающие из радиационных поясов.

Известно, что ионизация атомов азота (N) и кислорода (O) воздуха заряженными космическими лучами приводит к химическим реакциям между ионами и молекулами воздуха, которые, в свою очередь, образуют озonoактивные соединения типа NO и OH, разрушающие молекулы озона. Именно эти соединения влияют на глобальное распределение озона в атмосфере.

Такая модель изменения концентрации озона поддаётся расчёту. В качестве её входных параметров надо взять энергетические спектры ГЛ, СКЛ и других частиц и... «запустить» их в известную химическую среду атмосферы. В результате можно получить скорости ионообразования в зависимости от географической точки наблюдения и высоты над Землей.

Безусловно, «запускать» частицы надо с учетом знания пространственного распределения их потоков, которое зависит от жёсткости геомагнитного обреза. Так, для ГЛ и СКЛ следует ожидать увеличения скорости ионизации по мере продвижения к высоким широтам. С другой стороны, широтная вариация изменяется и с высотой по мере ослабления магнитного поля. Солнечная активность в свою очередь накладывает отпечаток на временную картину изменений потоков космических лучей.

В результате обнаруживается как широтная зависимость для распределения озона, так и его солнечно-циклическая вариация в полярных шапках, связанная с 11-летней модуляцией потока ГЛ.

Гораздо более заметный эффект на озоносферу Земли производят частицы солнечных вспышек, достигающие атмосферы. Такие события не часты. В годы максимума солнечной активности наблюдается до 10 событий в год с максимальной энергией частиц более 10 МэВ. В годы минимума — не более одного в год. Чем больше энергия частиц, тем глубже проникают они в атмосферу. Таким образом, мощные вспышки оказывают влияние на процессы озonoобразования в верхней атмосфере, которые по величине своего эффекта могут превышать вариации концентрации озона, связанные с изменением потока ГЛ.

Однако существует ещё один источник изменения концентрации озона — высыпавшиеся из радиационных поясов релятивистские электроны — спорадические потоки частиц, длительностью до нескольких часов (рис. 16.3). Обычно они появляются во время магнитных возмущений. Замечено, что их всплески в радиационных поясах связаны с увеличением скорости солнечного ветра. Воздействие релятивистских электронов на озон может временами превышать эффект солнечных вспышек

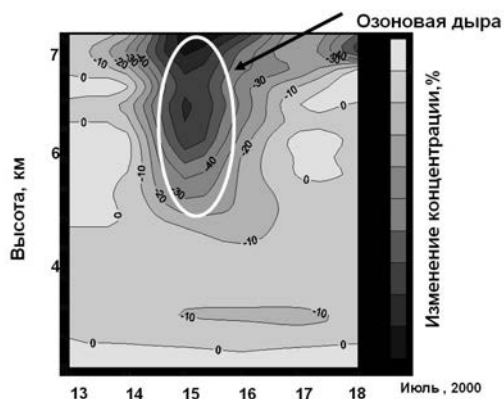
ГЛ проникают глубже в атмосферу, чем все остальные компоненты космической радиации, поэтому их эффект будет наблюдаться на более низких высотах.

Солнечные протоны влияют на разрушение в стратосфере и мезосфере. Здесь же своё разрушительное действие оказывают и релятивистские электроны.

Каков же эффект бомбардировки космическими частицами озонового слоя?

Форбуш-понижение космических лучей вызывает увеличение концентрации озона на ~10%. Что же касается СКЛ, то можно привести следующие примеры.

Рис. 16.8. Изменение концентрации озона после вспышки 14 июля 2000 г.: наиболее обширные и значительные изменения концентрации озона (формирование озоновой дыры) через ~40–50 дней после вторжения солнечных частиц.



В сентябре-октябре 1989 г., при одной из наиболее мощных вспышек прошлого столетия, понижение концентрации озона в высокоширотных областях Арктики и Антарктики достигло ~20%. Данные спутника UARS по измерению концентрации озона после сильной вспышки 14 июля 2000 г. (рис. 16.8) также показало образование большой «озоновой дыры» после вторжения солнечных протонов.

Становится понятным, что космические частицы, наряду с солнечным ультрафиолетом и антропогенным воздействием (тот же фреон) на атмосферу, являются источником изменения озонового слоя Земли и, как показывают модельные оценки и наблюдения, весьма существенным.

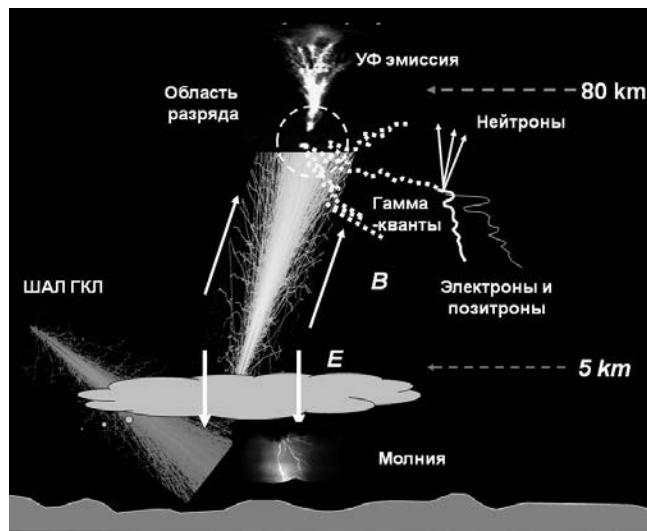
16.5. Салют космическим лучам

Заканчивая эту главу, хотелось бы остановиться ещё на одном атмосферном явлении, обнаруженном не так давно с помощью космических экспериментов. В начале 90-х годов американским исследователем Р. Фишманом со спутника, на котором был установлен детектор гамма-излучения, смотрящий вниз, в атмосферу, были обнаружены короткие всплески гамма-излучения. Гамма-вспышки получили название «земные гамма-вспышки» — TGF («Terrestrial Gamma Flashes»). Это было открытие, Р. Фишман показал, что наша планета может быть источником транзиентных (кратковременных) всплесков гамма-излучения, очень похожих на космические гамма-всплески GRB, о которых было рассказано в Главе 9.

Но, если космические генерируются где-то на окраинах Вселенной мощными астрофизическими объектами и на самой ранней фазе ее рождения, то откуда взялись земные TGF?

Вслед за их обнаружением появилась и модель, позволяющая понять их суть. И здесь вновь не обошлось без космических лучей. Во всём оказались «виноватыми» молнии и грозы (см. рис. 16.9). Оказалось, что в районе скопления грозовых облаков, где атмосферные электрические поля чрезвычайно велики, создаются условия для ускорения электронов окружающей среды. Более того, показано (здесь мы ссылаемся на модель А. В. Гуревича), что этот процесс носит лавинообразный характер. Электроны, стремясь покинуть область молниевых разрядов, становятся «убегающими», распространяясь вдоль силовых линий магнитного поля. Их энергия может достигать 1 МэВ и более. Получается, что грозовая активность действует как импульсный ускоритель электро-

Рис. 16.9. Модель «снизу-вверх» генерации земных гамма-всплесков TGF и транзистентных световых событий TLE в верхних слоях атмосферы над районами грозовой активности. Лавина убегающих электронов, ускоренная электрическим полем, создаёт атмосферный пробой выше грозовой облачности, вызывая кратковременное свечение атмосферы и всплески гамма-излучения.



нов с длительностью импульсов в миллисекунды и более. Этот ускоритель энергичных электронов может генерировать в

верхних слоях атмосферы вспышки гамма-излучения (здесь создаются условия для высотного электрического пробоя). Эти гамма-кванты от TGF и были обнаружены Р. Фишманом. В свою очередь, TGF могут генерировать посредством ядерных реакций новые частицы — электроны, позитроны и нейтроны.

Примерно в то же время было обнаружено (сначала на высотах гор, а затем на спутниках) еще одно интересное явление в высотной атмосфере — кратковременные всплески в ультрафиолете или в красном свете. Они разнообразны по физическим характеристикам и поэтому получили различные названия: спрайты, эльвы, голубые джеты и др. Но есть у них общее название — транзистентные световые явления («Transient Luminous Events» — TLE).

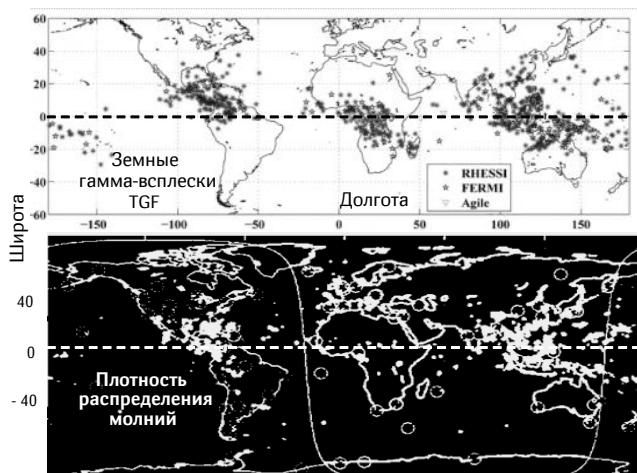
Лавины убегающих релятивистских электронов могут быть причастны к этим оптическим явлениям, генерируя и оптическое излучение в ультрафиолете (рис.16.9) на больших высотах. Известно, что если «выстрелить» ускорителем релятивистских электронов непосредственно в воздух атмосферы, он оставит в ней светящийся ультрафиолетовый столб света. Этот метод используется на установке Telescope Array (TA) в США (см. Главу 7) для калибровки флуоресцентных детекторов космических лучей. Именно поэтому здесь мы упоминаем эту модель (ее можно назвать как модель «сверху-вниз») в качестве рабочей гипотезы.

Длительность самих оптических разрядов — от десятков до сотен миллисекунд, происходят они на высотах от 25 до 100 км и, возможно, несколько выше. Горизонтальный их размер — 10–50 км, а занимаемые ими площади, например, для TLE типа эльвов — до 10000 км².

Могут ли TLE быть связаны единым физическим механизмом с TGF? Это вопрос для теоретиков и экспериментаторов. До сих пор экспериментаторы не получили объективных доказательств такой связи.

Где наблюдаются TGE и TLE? Результаты их наблюдений из космоса приведены на рис.16.10 и 16.11.

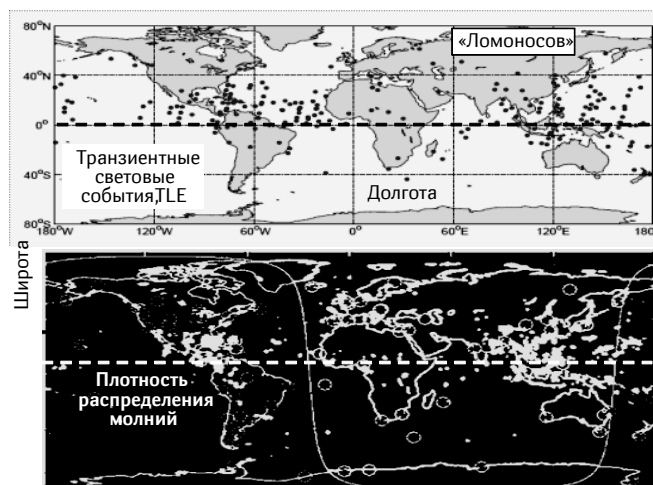
Рис. 16.10. Географическое распределение наблюдений земных гамма-всплесков TGF по данным спутников RHESSI, FERMI и AGILE и плотности распределения молний. Как молнии, так и TGF наблюдаются в основном над континентами вблизи экватора.



Качественно географические распределения TGE и TLE схожи: они располагаются над районами грозовой активности, что подчеркивает их связь с проявлениями атмосферного электричества в нижних слоях атмосферы, но не обязательно между собой. Тем не менее, как рабочую гипотезу снимать ее с «повестки дня» нельзя.

А какая альтернатива может быть предложена взамен модели «снизу – вверх» (рис. 16.9)? Выше уже упоминалось о дискретных полярных сияниях, вызываемых пучками электронов. Интересно, но такие транзистентные всплески высыпавшихся электронов из радиационных поясов наблюдаются не только в авроральных широтах, но и в средних. Не очень ясна их природа, т. е. механизм высыпаний из радиационных поясов, но такие пучки могут создать явления типа TLE. А это уже совсем другая физическая модель их генерации: «сверху – вниз».

Сейчас невозможно дать окончательный ответ в пользу той или иной модели. Мы находимся на стадии интенсивного исследования этих необычных явлений в верхней атмосфере нашей планеты. И ответ может, конечно, отличаться, от рассуждений, приведенных выше. Таков извилистый путь науки.



Представляют ли описанные выше транзистентные явления в верхней атмосфере Земли какую-нибудь опасность для лета-

Рис. 16.11. Географическое распределение наблюдений транзистентных световых явлений TLE по данным спутника «Ломоносов» и плотности распределения молний (в приэкваториальной области). Значительная часть световых транзистентов наблюдается над районами грозовой активности вблизи экватора.

тельных аппаратов? Если рассматривать TLE сами по себе, то, несмотря на огромную их энергетику (энергия излучения в импульсе для них может достигать сотен Мегаватт), какой-либо существенной опасности представлять не могут, т.к. ультрафиолет поглощается в достаточно тонком слое материала. Тем не менее, для открытых сенсоров на борту космических аппаратов воздействие ультрафиолета может стать губительным.

Другое дело – транзистентные лавины убегающих электронов, которые создают радиационные поля нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. Оценки радиационных доз, которые были сделаны, исходя из модельных соображений, дают значения, которые считаются безопасными для организма человека. Но такие расчеты имеют предварительный характер. Здесь необходимы прямые измерения вблизи «эпицентра» события типа TLE или TGF. Такие прямые измерения были осуществлены американским исследователем Дж. Двайером на самолете, однако только вблизи грозового облака. Они дали относительно небольшие, неопасные величины доз радиации. Но какие дозы будут наверху, на высотах в десятки километров, пока непонятно.

Еще один потенциально опасный фактор связан с электромагнитным излучением. Действительно, в области генерации электромагнитных транзистентов должны возникать мощные флуктуации электрических полей, обусловленные изменением параметров окружающей плазмы, в первую очередь за счет воздействия на среду либо лавины убегающих электронов, либо пучков высыпających из радиационного пояса. Эти факторы должны, к тому же, привести к модификации параметров мезосферы на высотах в десятки километров (изменению проводимости), что не может не отразиться и на распространении радиоволн, т.е. создаются проблемы для телекоммуникаций.

Следует, поэтому, ожидать, что сам физический процесс генерации описанных выше электромагнитных транзистентов типа TLE или TGF, приводящий к изменениям окружающей среды, а также генерации радиоактивных и электромагнитных излучений должны создать проблемы для полетов на этих высотах. На таких высотах самолеты не летают. Пока. Но уже осуществляются единичные запуски стратосферных летательных аппаратов, и можно быть уверенным, что число их будет нарастать. Поэтому этот фактор природных потенциальных угроз сбрасывать со счета не следует.

Читатель может спросить: «А причём же здесь космические лучи?» Оказывается, именно они могут создать «стартовые» условия для молниевых разрядов, а электроны ШАЛ являются исходными частицами для формирования лавин убегающих электронов, выстреливаемых из грозовых облаков (рис. 16.9).

Так Земля «салютует» космическим лучам, вторгшимся в её атмосферу. Но наша планета является, как теперь это понятно, и сама источником космических лучей: электроны достаточно высоких энергий – 1 МэВ и более, а также гамма-кванты, электроны и позитроны могут вырваться из атмосферы и уйти в космическое пространство. И такие доказательства уже имеются. Недавно на спутнике были зарегистрированы потоки позитронов, непосредственно связанных с районом грозовой активности.

Здесь уместно вспомнить ранние работы Нобелевского лауреата Ч. Вильсона, который еще в начале XX века выдвинул идею, что наблюдавшийся им большой остаточный ток в электроскопе (см. Главу 2) может быть связан с ускоренными в электрических полях грозовых облаков электронами. Чем вам не «лавины убегающих электронов», положенная в основу ряда современных моделей! И хотя эта интерпретация не была применена к обнаруженному им явлению, сама идея через много лет получила свое развитие в транзиентах типа TGF и TLE, открытых в конце XX века!

Глава 17. Околоземная радиация, поучительная история выдающегося открытия

Не дорог талант, правота дорогá
Спасает учёного истинный путь
Нгуен Чай, поэт

Космические лучи — галактические и солнечные — создают радиационную среду в космосе. Её параметры, как мы видели, зависят не только от расстояния до Земли, от местоположения космического аппарата, но и от солнечной активности. Изменения радиационной обстановки, связанные с космическими лучами, нельзя не учитывать при конструировании спутников, межпланетных аппаратов и орбитальных станций. Однако присутствием только космических лучей не исчерпывается вся радиационная среда в космосе.

Открытие, сделанное в начале космических исследований советскими и американскими учёными, осуществлявшими эксперименты на первых искусственных спутниках Земли, существенно изменило наши представления о космическом пространстве.

17.1. Первый акт космической эры — драма эпохального открытия

На первом советском искусственном спутнике Земли не было никакой научной аппаратуры, за исключением, пожалуй, самого радиопередатчика, посылавшего первые рукотворные сигналы с орбиты. Радиоволны передатчика «просвечивали» ионосферу Земли, предоставляя учёным сведения о распределении плотности ионизированной оболочки Земли.

Но уже на втором советском спутнике была установлена специальная аппаратуры для изучения космических лучей. Это были простые газоразрядные детекторы — счетчики Гейгера—Мюллера. О них уже было рассказано в разделе 3.2. Приборы на их основе создал Сергей Николаевич Вернов со своими сотрудниками из Московского университета (см. рис. 17.1). По сути, эта была

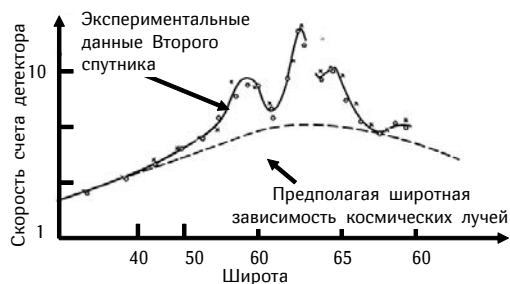
первая в мире научная аппаратуры, запущенная человеком в космическое пространство. Какие задачи выполняла эта аппаратура?



Рис. 17.1. Команда С.Н. Вернова из Московского университета, установившая первый физический прибор (счетчик Гейгера—Мюллера) на борт второго советского спутника.

Рис. 17.2. Скорость счёта газоразрядного детектора Гейгера–Мюллера, установленного на 2-м советском спутнике (точки). Всплески потоков радиации, превышающие ожидаемую широтную зависимость космических лучей, были приняты за солнечные частицы, пришедшие от вспышки. На самом деле, это были высыпавшиеся из радиационных поясов Земли частицы.

2 ноября 1957 года



Будучи «космиком», С.Н. Вернов, естественно, поставил задачу исследования космических лучей за пределами атмосферы. Что можно было ожидать из этих измерений?

Поток космических лучей должен возрастать по мере удаления от Земли из-за существования магнитного поля. Помимо этого, должна наблюдаться широтная зависимость потока: вблизи полюсов его величина должна быть больше, чем в районе экватора. Должен меняться и состав космических лучей, т.к. измерения проводятся вне атмосферы, где нет вторичных частиц. Пожалуй, всё...

Спутник был запущен в канун праздника, дня Революции. И уже на первых витках он зарегистрировал нечто необычное — поток частиц не следовал широтной зависимости, испытывая сильные флуктуации. Что бы это могло быть? «Взглянув» на Солнце, учёные обнаружили проявление солнечной активности — как раз в это время наблюдалась вспышка. Естественно было предположить вторжение солнечных частиц в окрестности Земли (рис. 17.2).

Вспоминает Ю.Ю. Логачев¹, участник этих пионерских экспериментов (его фото — на рис. 17.1):

«Весной 1956 года С.Н.Вернов предложил мне создать прибор для установки на искусственном спутнике Земли. Отмечу, что все было ужасно засекречено, мне было выделено помещение за закрытыми дверями, все переговоры были секретны и т.д. За эту секретность мы потом заплатились.

Были изготовлены первые приборы, получившие название КС-5: космический счетчик, пятый вариант.

В сентябре 1957 года приборы были практически готовы. Оставалось только провести испытания на длительность работы, и можно в полет. И вот, 4 октября весь мир, и мы в том числе, узнали, что в СССР запущен первый спутник. Научных приборов на спутнике не было, 60 кг аккумуляторов и передатчик с постоянными «пи-пи-пи». Представляете наше возмущение и негодование Сергея Николаевича (Вернова): мы имеем готовый прибор весом всего 2,5 кг, а спутник летит пустой, всему миру сообщая, что он живой и перемещается. Этот сигнал принимал весь мир, и если бы был установлен наш прибор — радиационные пояса были бы наши, Советский Союз был бы прославлен важным открытием. Зато все делалось в большом секрете, так что даже члены-корреспонденты АН СССР (С.Н. Вернов был тогда членом-корреспондентом) ничего

¹ Логачев Ю.И. К истории открытия радиационных поясов Земли
Радиационные пояса Земли. Первые исследования и открытие. Природа, 2017.

не знали. После небольшого совещания решили попытаться получить более полную информацию о планах наших ракетчиков, и тут обнаружилось, что готовится еще один запуск с собакой на борту. А до старта оставалось 3 недели. И здесь проявилась энергия Сергея Николаевича: он оседлал конструкторов, и уже через 3 дня техническое добро было получено. Визит к С.П. Королеву проходил без меня, знаю только, что не сразу согласился Королев, но доводы, что радиацию нужно мерить из-за безопасности полетов, его убедили. Поступила команда доработать изделие, т.е. сделать места крепления прибора и подводку телеметрии. Эта доработка осуществлялась прямо на полигоне, в монтажно-испытательном корпусе, и мы имели возможность участвовать в ней. И все это было сделано прямо на полигоне, приборы установлены и отлично сработали. И никакой военной приемки. Отметим еще раз, что это были первые приборы, запущенные на земную орбиту, выполненные целиком на полупроводниках. До нас никто на полупроводниках в космосе не работал.

Утром 3 ноября 1957 г. все газеты и радио сообщили о том, что в СССР запущен второй искусственный спутник с собакой Лайкой на борту и еще некоторыми научными приборами. Фото Лайки до сих пор можно видеть на одноименных сигаретах, а научные достижения помнят лишь немногие. Лайка жила столько же, сколько и наш прибор, пока не кончилась энергия батарей, т.е. около десяти дней...

Затем был период приема информации и её обработка. Все это делалось без нашего участия, силами военных. К сожалению, информация с этого спутника поступала только тогда, когда спутник пролетал над территорией СССР, т.е. в области перигея орбиты (250–500 км). Там, где спутник уходил на большие высоты (H апогея = 1670 км), наших приемных пунктов не было, а другие страны эту информацию принимать не могли, система телеметрии и длины волн были засекречены — сигнал уходил в никуда. Таким образом, мы второй раз могли открыть радиационные пояса, но...

Но и та доступная нам информация была крайне интересна, ведь на этих высотах на таком большом интервале широт и долгот никто еще измерений космических лучей не проводил. Приборы работали отлично. Измеренный поток частиц оказался близким к ожидаемому. Были построены линии равных потоков, определен высотный ход в интервале 300–700 км, который хорошо объяснялся экранировкой Земли и уменьшением геомагнитного обрезания с увеличением высоты. Правда, в районе 700 км наши точки показывали тенденцию к большему возрастанию, чем ожидалось по теории, но мы не придали этому значения, возрастание было в пределах ошибок измерения. Как теперь ясно, это превышение было обусловлено частицами радиационных поясов, которые над территорией СССР только-только начинают проявляться на этих высотах. В Южном полушарии на этих же высотах, а тем более там, где летал спутник, потоки частиц радиационных поясов уже во много раз превышали потоки галактических космических лучей, но так как там от нашего спутника информации не было, то и узнали мы об этом только в 1958 г. после полетов американских «Эксплореров» и нашего третьего спутника.

На одном из витков 7 ноября 1957 года наши счетчики зарегистрировали необычное поведение скорости счета. Были резкие флуктуации, значительно большее возрастание на высоких широтах, чем ожидается по широтному эффекту. Это было выпадение частиц из внешнего радиационного пояса в связи со слабым магнитным возмущением. К сожалению, в то время эти понятия не входили в круг наших интересов, и мы интерпретировали наблюдаемый эффект в терминах солнечных частиц, вторгшихся в атмосферу Земли. Несмотря на то, что мы первые регистрировали частицы радиационных поясов Земли, Ван Аллен первым понял, что около Земли, в экваториальных районах присутствуют интенсивные потоки заряженных частиц. Природу зарегистрированных частиц, также как и мы, Ван Аллен не понял, объяснение обнаруженного явления возникло позже и явилось плодом коллективного творчества многих ученых».

Рис. 17.3. Джеймс Ван Аллен из университета Айовы, установивший свой прибор (счетчик Гейгера–Мюллера) на борт первого американского спутника «Explorer-1».

Вслед за С. Верновым, американский учёный Дж. Ван Аллен (рис. 17.3) для изучения космических лучей установил на первом американском искусственном спутнике Земли «Explorer-1» такой же газоразрядный детектор, как и на 2-м советском спутнике.



Джеймс Ван Аллен



«Explorer-1»

Каково же было удивление американских учёных, которые, взглянув на первую полученную со спутника информацию, обнаружили, что их счётчик «захлёбывался» от большого потока частиц. Один из сотрудников Дж. Ван Аллена, Э. Рэй даже воскликнул: «Боже мой, ведь космос радиоактивен!» (рис. 17.4).

Американские специалисты поняли, что они обнаружили что-то необычное. Интерпретация последовала довольно быстро: это авроральные частицы, которые приходят от Солнца и внедряются в высокоширотные области, вызывая полярные сияния. Это было неверно.

Это была настоящая драма первооткрывателей космоса. И С. Вернов и Дж. Ван Аллен столкнулись, на самом деле, с совершенно новым природным явлением — захваченными в магнитное поле Земли потоками заряженными частицами с большими энергиями. Позднее это явление было названо радиационными поясами. Однако в первых экспериментах они этого не осознали.

Понимание нового явления пришло немного позднее, спустя несколько месяцев, когда был запущен 3-й советский спутник с обширным набором экспериментальной аппаратуры, позволившей детально исследовать пространственные распределения частиц на больших высотах, когда Ф. Зингер (учёный не из группы Дж. Ван Аллена) опубликовал статью, правильно интерпретировавшую американские результаты, и когда появился первый механизм для объяснения существования гигантской ловушки для заряжённых частиц.

На 3-м советском спутнике в составе аппаратуры нашего института — НИИ ядерной физики МГУ был установлен более сложный сцинтилляционный детектор. Информация именно этого де-



Рис. 17.4. Первые результаты, полученные на спутнике «Explorer-1»: скорости счета счетчика Гейгера–Мюллера на некоторых участках орбиты спутника были неожиданно велики — здесь наблюдалось его «перегрузка» (вставка на рис. 17.4). Команда Ван Аллена была удивлена результатами первого эксперимента: один из сотрудников Ван Аллена произнес фразу, ставшую знаменитой: «Мой Бог, космос радиоактивен!».

тектора позволила установить существование двух пространственно-разделённых областей в околоземном пространстве — внешний электронный пояс, заполненный электронами с энергией ~ 100 кэВ и выше и внутренний, протонный. Энергия протонов внутреннего пояса была существенно выше (~ 100 МэВ), чем электронов во внешнем. Помимо этого, была обнаружена высотная зависимость потоков, свидетельствующая о захвате частиц в магнитной ловушке.

На волне моей памяти...

Сейчас очевидно, что первые советские и американские эксперименты в космосе взаимно дополняли друг друга. Однако, в силу специфики международных отношений той эпохи, говорить о международной кооперации не приходилось, и космическая физика рождалась в условиях острой конкурентной борьбы между учёными двух супердержав. Это, безусловно, был нобелевский результат, но история распорядилась по-своему...

Так часто бывает в науке, когда изначальная цель эксперимента приводит совершенно к другим результатам. А интерпретация полученных результатов находится под прессом существующих представлений.

Я вспоминаю шутку, которую мне рассказал не так давно один из моих американских коллег...

На заре космических исследований, где-то в 60-х, американские пионеры космоса говорили: «Это же понятно, почему электронные радиационные пояса оказались разделёнными зазором друг от друга — ведь внутренний пояс открыл Ван Аллен, американец, а внешний — Вернов, советский ученый. А в условиях холодной войны между ними обязательно должна была быть демилитаризованная зона!»

Итак, что представляют собой радиационные пояса Земли? Взгляните на рис. 17.5. Гигантский тор заряженных частиц с энергиями от самых малых, «плазменных» — в десятки-сотни кэВ, до энергий в ГэВы, т.е. сопоставимых с энергиями космических лучей.

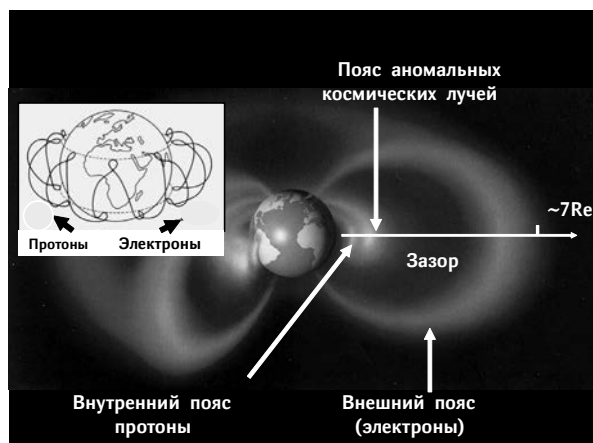


Рис. 17.5. Структура внутреннего и внешнего электронного радиационного пояса Земли. Также показано расположение пояса, состоящего из аномальных космических лучей (см. Главу 18). Пространственная протяженность радиационных поясов в плоскости экватора от $\sim 1R_e$ до $\sim 7R_e$. На врезке показаны дрейфовые траектории протонов и электронов, захваченных в магнитное поле Земли. Множество таких частиц и образуют, собственно, радиационные пояса.

...Дж. Ван Аллен с присущей американцам стремлением к здоровой рекламе сумел в торжественной обстановке на пресс-конференции 1 мая 1958 г. первым заявить об открытии нового природного явления, моментально озвученного журналистами именно как «пояса радиации». Так родились «радиационные пояса Ван Аллена».

На волне моей памяти...

...Первое открытие, сделанное советскими и американскими учёными в самом начале космических исследований, — обнаружение радиационных поясов Земли существенно изменило представление о космическом пространстве. Его история была, как мне представляется, настоящей драмой первооткрывателей космоса.

Я вспоминаю совещание у Вернова, которое, по сути, для меня, студента, стало приобщением к большой науке. Прошёл десяток лет после обнаружения радиационных поясов Земли и в кабинете директора НИИЯФ МГУ собрались сотрудники, осуществлявшие эксперимент на борту одного из первых межпланетного зондов «Марс». Они развернули перед собой экспериментальные данные радиационных приборов на стадии его подлёта к красной планете. Радиационных поясов у Марса не оказалось — слишком слабое у этой планеты магнитное поле.

Теперь, спустя много лет, я, кажется, понимаю чувства и ожидания людей, находившихся в кабинете Вернова, и его самого. Ведь, если бы «следы» радиационных поясов у Марса всё же были обнаружены, это было бы вполне достаточной «компенсацией» советским учёным за не вполне удачный эксперимент на 2-м спутнике в 1957 г. Однако, природа не дала нашему соседу по Солнечной системе мощного магнитного поля, способного удерживать заряженные частицы.

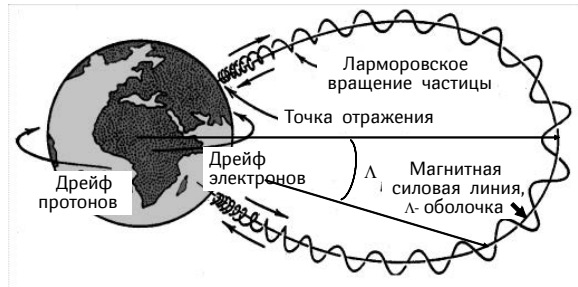
В этом плане Ван Аллен, как это ни удивительно, был более удачлив — он запустил (вновь, через много лет после «Explorer-1», в середине 70-х!) простой гейгеровский счётчик на межпланетном зонде «Pioneer-10» и обнаружил радиационные пояса Юпитера — вторые после земных. Однако их существование ожидалось — уж очень сильное магнитное поле у Юпитера, о чём было известно заранее.

17.2. Немного о кинематике частиц в магнитном поле

Что произойдёт с заряженной частицей, если она попадёт внутрь дипольного магнитного поля? Ответ на этот вопрос — в решении уравнений движения частицы в магнитном поле. Визуализация этого решения показана на рис. 17.6.

Положительно заряженная частица (например, протон) будет «навиваться» на магнитную силовую линию и дрейфовать вокруг Земли на запад, а электроны — на восток. Радиус окружности траектории частицы вокруг силовой линии (называемый ларморовским радиусом r_L) определяется скоростью частицы (v), её массой (m), зарядовым состоянием (Q) и индукцией магнитного поля B в данной точке:

Рис. 17.6. Основные виды движений заряженных частиц радиационных поясов: ларморовское (вращательное), вокруг магнитной силовой линии; колебательное вдоль поля с отражением на малых высотах и азимутальный дрейф частиц вокруг Земли (протоны и электроны дрейфуют в противоположные стороны).



$$r_L = mv/QB$$

Именно с ларморовским радиусом связана проблема устойчивого захвата частиц в магнитном поле. Известный астрофизик Х. Альвен показал, что частица будет устойчиво захвачена, если ее ларморовский радиус значительно меньше радиуса кривизны магнитной силовой линии, вокруг и вдоль которой наша частица совершает движения. Математически это выглядит так:

Здесь кривизна магнитной силовой линии ρ_M выражается через градиент магнитного поля ∇B :

$$r_L/r_M \sim r_L |\nabla B|/B = \varepsilon \ll 1.$$

Это очень важная формула, которая, по сути, определяет максимальные энергии частиц, которые могут быть захвачены в магнитном поле. Для магнитного поля нашей планеты это около 10 МэВ для электронов и 1000 МэВ для протонов. Для типичных энергий протонов радиационных поясов ларморовский радиус не превосходит нескольких сотен, а для электронов – нескольких километров. Нетрудно представить, что именно поэтому частицы ГКЛ, обладающие огромными импульсами, не могут быть захвачены в магнитном поле Земли: их ларморовский радиус не сопоставим с размерами пространства, занимаемым дипольным магнитным полем Земли..

Почему радиус вращения частицы уменьшается на высоких широтах по сравнению с экваториальными? Взгляните на рис. 17.6. Ответ в формуле для ларморовского радиуса r_L : магнитная индукция меняется вдоль магнитной силовой линии, становясь максимальной вблизи Земли. Поэтому радиус окружности уменьшается.

С вращением частицы вокруг силовой линии магнитного поля связан замечательный физический параметр, так называемый I-й адиабатический инвариант движения. По сути, это магнитный поток через площадь ларморовской окружности частицы, который является постоянной величиной для частицы в магнитном поле, но только если оно постоянно или изменяется достаточно медленно. С помощью некоторых математических выкладок на основе введения I-го инварианта движения можно прийти к понятию магнитного момента частицы (μ), который сохраняется в процессе ларморовского движения частицы вокруг силовой линии

$$\mu = E/B = \text{const.}$$

Эта формула также имеет важнейшее значение для понимания физики захваченной радиации в магнитном поле не только Земли, но и других планет. Сохранение магнитного момента частицы — ключ к выяснению процесса ускорения частиц внутри геомагнитной ловушки. Но об этом ниже, в Главе 19.

Обратимся вновь к рис. 17.6. Мы видим, что частица не только обращается вокруг силовой линии, но и движется вдоль неё. Такой вид движения характерен для частиц, направление скорости которых отлично от величины $\alpha = 90^\circ$. Здесь α — так называемый «питч-угол частицы» — угол между направлением её скорости и направлением магнитного поля в данной точке. Другими словами, если вектор скорости частицы отклонится от $\alpha = 90^\circ$, то она вылетит из экваториальной плоскости и полетит вдоль магнитной силовой линии.

...Вскоре после успешной реализации атомного проекта и в СССР, и в США учёные приступили к решению проблемы создания термоядерного реактора. Для этого надо было создать условия для устойчивого удержания плазмы. Это можно сделать с помощью магнитного поля. Было предложено много различных видов магнитных ловушек, среди них наиболее известный — «ТОКАМАК». До сих пор термоядерный реактор не реализован. Проблема удержания плазмы оказалась более сложной, чем это представлялось в начале исследований. Природа создала то, что не удалось пока сделать человеку. Внутри магнитного поля Земли реализуются условия для устойчивого захвата заряженных частиц.

Чем меньше α , тем ближе к Земле приблизится частица. При очень малых питч-углах наша частица неминуемо должна «врезаться» в атмосферу и там погибнуть. Этот процесс называется «высыпанием» частиц из радиационных поясов. «Высыпание» частиц из радиационных поясов — важнейший фактор, влияющий на развитие ряда интересных динамических явлений в атмосфере нашей планеты. Об этом рассказано в Главе 20 этой книги.

Не все частицы с малыми питч-углами погибают (попадают в «конус потерь»). Те частицы, питч-угол

которых отличается от характерного для конуса потерь, будут отражаться на высоких широтах данной силовой линии и колебаться между точками отражения или, как их называли, зеркальными точками. Как быстро происходят такие колебания? Расчёты показывают: $\sim 1\text{--}300$ мкс для электронов и $\sim 2\text{--}600$ мкс для протонов.

Частицы радиационных поясов, захваченные в магнитной ловушке, совершают 3 характерных вида движений, в результате которых (рис. 17.6), собственно, и «рождаются» их долгоживущие потоки. Вращательное движение частиц вокруг магнитной силовой линии (ларморовское движение с радиусом, определяемым импульсом (mv) частицы), колебание вдоль магнитной силовой линии и азимутальный дрейф вокруг Земли. Времена этих видов движения сильно отличаются: от долей секунды для ларморовского движения и до часа — для азимутального дрейфа.

В описании кинематики частиц удобно пользоваться понятием дрейфовой L-оболочки; это как раз та магнитная силовая линия, на которой в данный момент времени находится наша частица (рис. 17.6).

Итак, начало космических исследований в космосе привело к первому выдающемуся результату в области физики околоземного пространства — открытию радиационных поясов, что, по сути, дало начало новой науке — космической физике.

Этот этап отечественных исследований радиационных поясов завершился полётами автоматических станций к Луне. С помощью установленной на них аппаратуре ученым удалось получить полную пространственную картину радиационных поясов. Кроме этого, были также обнаружены временные изменения потоков частиц во внешней зоне радиации, предопределившие в дальнейшем одно из обширных направлений физики радиационных поясов, — изучение их динамики в зависимости от солнечной и геомагнитной активности.

Это удивительно, но так же, как и в случае с запуском первых спутников Земли, американские ученые оказались совсем немного позади — их космический зонд «Пионер-4» полетел в сторону Луны всего двумя месяцами позже советской «Луны-1», в марте 1959 года. На борту американского зонда был установлен счетчик

Здесь уместно вспомнить об одном замечательном эксперименте, осуществленном в 60-е годы советскими и французскими пионерами исследований космоса. К тому времени основы кинематики движения частиц в радиационных поясах были поняты и описаны в различных расчётных работах.

Изучая характер движения частиц в магнитном поле, естественно было задаться вопросом, а нельзя ли использовать созданный природой канал транспортировки частиц — магнитную силовую трубку — для «стрельбы» частицами по атмосфере из одного полушария Земли в другое? И такие эксперименты были проведены. Это советско-французский эксперимент «Аракс». На высотной ракете, которая запускалась из полярного района Советского Союза, был установлен электронный ускоритель, который на апогейном участке полёта «выстреливал» порцию электронов. Эта часть эксперимента осуществлялась на острове Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа). Задача учёных состояла в попытке зарегистрировать эти же электроны в Южном полушарии. Эксперимент был успешен: в противоположном полушарии экспериментаторы зафиксировали полярное сияние, вызванное электронами, инжектированными в Северном полушарии. Этот проект наглядно продемонстрировал существование дрейфа электронов вдоль магнитных силовых линий, т.е. именно так, как это изображено на рис.17.6.

Гейгера — Мюллера, который предоставил американским ученым, также как и советским, полную картину пространственного распределений частиц радиационных поясов Земли.

17.3. Родители пленников магнитной ловушки

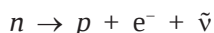
Откуда же появились частицы радиационных поясов?

К середине 1958 г. стало очевидной суть первого открытия, сделанного с помощью космических аппаратов. Пояса радиации, окружающие Землю, состоят из протонов и электронов в широком энергетическом диапазоне. Расчёты показывали, что это стабильное образование: времена жизни частиц во внутреннем поясе могли достигать десятков лет. Предстояло понять природу этих частиц, их источники и механизмы ускорения. На это ушли ещё 20–30 лет. Однако первая модель, предлагавшая механизм образования частиц ра-

диационных поясов, появилась практически сразу после их открытия. Это механизм образования вторичных энергичных протонов при распаде нейтронов альbedo, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой.

Безусловно, космические лучи ответственны за появление частиц радиационных поясов, но сами они не могут быть захваченными, по крайней мере, в течение длительного времени (см. выше, раздел 17.1 о «критерии Альвена») — их энергия слишком велика. Здесь уместно отметить, что «время жизни» протонов с энергиями в сотни МэВ и более в самой ближней к Земле области поясов достигает сотен лет!

Оказывается космические лучи (протоны), достигая атмосферы и взаимодействуя с ней, образуют вторичные частицы — продукты ядерных реакций (рис. 17.7). Среди них есть нейтроны, часть которых улетает в космическое пространство. Нейтроны нестабильные частицы. Их время жизни ~15 мин. Они распадаются по уже известной читателю схеме распада:



Первый механизм образования радиационных поясов вследствие распада нейтронов, предложили С.Н. Вернов и А.И.Лебединский сразу после их открытия в 1958 г. Интересно заметить, что практически одновременно (двумя неделями позднее) и независимо этот механизм формирования внутреннего радиационного пояса предложил американец Ф. Зингер. Механизм распада нейтронов альbedo позволил объяснить существование протонов высокой энергии (и, как оказалось впоследствии, и электронов) во внутреннем поясе, вблизи Земли, но в ограниченном интервале энергий (для электронов не более сотен кэВ, а для протонов — десятки МэВ), определяемом энергией альбедных нейтронов.

Как мы видим, продукты распада нейтронов — заряженные частицы — протоны и электроны. Они и являются частицами, пополняющими радиационный пояс. Впоследствии эта модель была названа CRAND — Cosmic Ray Albedo Neutron Decay (распад нейтронов от альbedo космических лучей).

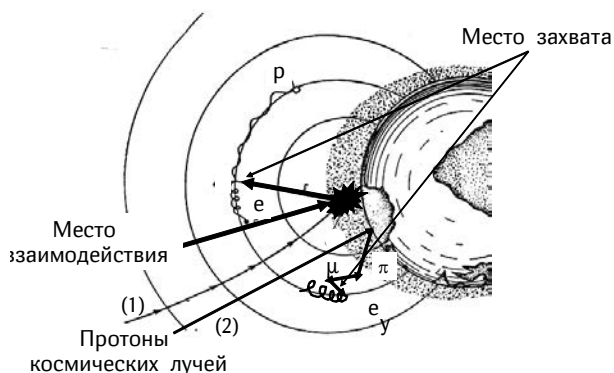


Рис. 17.7. Механизмы образования протонами ГКЛ электронов с энергиями до сотен кэВ и протонов в сотни МэВ в радиационных поясах (1) и высокоэнергичных электронов в сотни МэВ (2) под радиационными поясами, а также электронов. ...В обоих случаях частицы создаются в результате ядерных реакций космических лучей с атмосферой. Новые частицы — протоны и электроны радиационных поясов являются продуктом распада нейтронов, а электроны под поясами также образуются в результате распада пи-мезонов.

На волне моей памяти...

И в этом случае появление первой идеи, связанной с пониманием природы частиц радиационных поясов, не обошлось без проявления соперничества двух космических супердержав. Дело в том, что независимо от Вернова и Лебединского, к аналогичной «нейтронной» гипотезе происхождения радиационных поясов пришел и американский исследователь Фред Зингер, всего двумя неделями позже после наших авторов, опубликовавший такую же модель. Это тот Фред Зингер, который накануне запуска американского «Explorer-1» проиграл Дж. Ван Аллену конкурс на установку научного прибора на первый американский спутник. Задачей прибора Зингера была регистрация микрометеоров, но его прибор мог регистрировать и заряженные частицы. И если бы полетел прибор Зингера, а не Ван Аллена, интерпретация «загадочной» радиации около Земли была бы прояснена без промедления. Дело в том, что Зингер всего за год до первых экспериментов в космосе опубликовал работу о существовании вокруг нашей планеты кольцевых токов заряженных частиц – по сути радиационных поясов. Это еще раз подчеркивает всю драматичность первых лет космических исследований.

В 2012 г. я, готовя доклад, посвященный 100-летию С.Н. Вернова, получил письмо от Ф. Зингера, в котором он писал: «Вернов и Лебединский действительно были первыми, кто осознал природу захваченной радиации».

Предстояло определить механизмы заполнения частицами также и внешней зоны радиации.

Вслед за «Explorer-1» команда Ван Аллена запускает серию спутников «Explorer» для исследований радиации в околоземном пространстве. Постепенно к исследованиям радиационных поясов подключаются и другие группы американских ученых.

В СССР по инициативе и под руководством С.Н. Вернова создаются спутники серии «Электрон», запущенные в 1964 г. с установленной на борту научной аппаратурой НИИ ядерной физики МГУ, которые сыграли большую роль в систематизации знаний о структуре и динамике захваченной радиации. Благодаря удачно выбранным орбитам этих спутников и составу размещенной на них аппаратуры, была впервые изучена практически вся область радиационных поясов: энергетическое и пространственное распределение протонов и электронов в широком диапазоне энергий, а также их временные вариации. Результаты спутников «Электрон» стали существенным вкладом отечественной космической физики в мировые знания о радиационных поясах Земли.

Первые исследования радиационных поясов показали существование в них разномасштабных временных и пространственных вариаций потоков частиц. Возникал вопрос, какого типа эти вариации, насколько устойчивыми образованиями являются радиационные пояса и как изменяются их характеристики в зависимости от солнечной и геомагнитной активности. Первые эксперимен-

ты 1950–1960 г.г. проводились в максимуме цикла солнечной активности, поэтому вопрос об их стабильности в течение всего цикла оставался открытым.

Итогом исследований радиационных поясов в 60-х годах стало окончательное понимание их пространственно-энергетической структуры. Ученые выяснили, что пояса, по сути, – единое образование захваченных в магнитное поле заряженных частиц (в основном, протонов и электронов), имеющих очень большой диапазон энергий. При этом верхняя граница энергии захваченных протонов совпадает с энергией галактических космических лучей в максимуме их интенсивности, т.е. это – ГэВ'ы. Различие в пространственной структуре протонных и электронных радиационных поясов состояло, по сути, в существовании зазора (рис.17.5) – локального понижения потоков частиц на расстоянии 2–3-х радиусов Земли в экваториальной плоскости. С точки зрения теоретических моделей (см. ниже раздел 17.4) оказалось, что зазор – это область преобладания потерь электронного компонента.

Однако, помимо определения механизмов потерь частиц в поясах, модель их формирования должна дать ответ на вопрос, каким образом захваченные частицы приобретают столь значительные энергии.

История исследований радиационных поясов Земли насчитывает уже более шести десятилетий. Этот период исследований привёл к достаточно согласованной модели её описания. Пространственно-энергетическая структура радиационных поясов это результат воздействия не только внешней среды – солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, но и внутренней – низкочастотных природных и антропогенных колебаний электромагнитного поля, приводящих к ускорению, переносу и гибели частиц.

С открытия радиационных поясов началась космическая физика. Удивительным фактом стало то, что основные физические законы ускорения частиц, их транспорта и потерь внутри геомагнитной ловушки были поняты вскоре после их открытия. Скорее всего, этому способствовало то, что среди пионеров исследований околоземной радиации оказалось много исследователей с багажом знаний в области физики плазмы, ядерных и термоядерных исследований. Немаловажную роль, конечно, сыграл и энтузиазм пионеров исследований космоса в начале космической эры.

Советские и американские исследования в области космической физики развивались независимо в эпоху холодной войны, секретности и недоверия к другу. Оставив в стороне проблему приоритетов, можно отметить, что С.Н.Вернов и Дж. Ван Аллен шли параллельными путями и пришли к схожим результатам независимо друг от друга. Эти два ученых дали старт космической физике – исследованиям околоземного пространства и межпланетной среды, науке, которая продолжает быть актуальной и интенсивно развивается и сегодня.

На волне моей памяти...

В конце нулевых годов мы в Институте ядерной физики МГУ начали готовить новый космический эксперимент, направленный на изучение высокоэнергичной радиации в радиационных поясах и ее воздействия, в первую очередь, релятивистских электронов, на верхнюю атмосферу Земли. В 2014 г. мы запустили спутник, который имел довольно сложное наименование — МКА ФКИ №2 — «Малый космический аппарат №2 для фундаментальных космических исследований». А двумя годами раньше американцы запустили два космических аппарата также для исследований радиационных поясов — RBSP — «Radiation Belts Space Probes» («Космические зонды для исследований радиационных поясов»). И сразу после запуска наши коллеги приняли решение присвоить имя Ван Аллена своим спутникам. Также поступили и мы, назвав наш спутник «Вернов». Много лет спустя, не земные, но космические орбиты двух великих ученых — пионеров исследований космоса, «пересеклись». Так на земных орбитах состоялась встреча двух выдающихся ученых, пионеров исследований космоса (рис. 17.8). Хочется надеяться, что эти эксперименты внесут свой достойный вклад в дальнейшее изучение того природного феномена, которое Вернов и Ван Аллен открыли на заре космической эры. Это был первый случай в российской космонавтике, когда спутникам присваивались имена известных ученых, которые внесли выдающийся вклад в развитие космических исследований. А на Западе это обычное, но очень важное для сохранения памяти о выдающихся исследователях, дело. Летают же «Ферми», «Планк», готовятся к полету «Эйнштейн», «Вэбб» и недавно запущенный зонд к Солнцу — «Паркер»



На волне моей памяти

Это было совсем недавно...

Летом 2018 г. в г. Пасадена в Соединенных Штатах состоялась Генеральная Ассамблея Комитета по космическим исследованиям (COSPAR), которая собирает ученых многих стран мира, работающих в области космических исследований. Особенность этой ассамблеи состояла в том, что 2017–2018 г.г. были юбилейными. Эти годы — годовщина запуска первого советского и первого американского спутников Земли (1957 г. и 1958 г.) и годовщина первого открытия в космосе — радиационных поясов Земли. Я и мой американский коллега — профессор Д. Бейкер из Колорадо были приглашены выступить с докладом об истории открытия и перспективах исследований. И в этом была символика — после долгих лет некоторого соперничества в проблеме приоритета открытия представители двух держав, запустивших первые спутники, делают совместный доклад с объективным экскурсом в историю и признанием заслуг обеих команд, которые работали в то время абсолютно независимо друг от друга. Тысячная аудитория Ассамблеи была довольна: мы получили много поздравлений.

Вернёмся к природной радиации окружающего нас космического пространства. Откуда же появились частицы радиационных поясов?

Глава 18. Ядерная зима космического пространства

Единственным критерием, по которому я могу судить
о действительной важности новой идеи,
является чувство ужаса, которое охватывает меня.

Джеймс Франк, кинорежиссёр

Гонка вооружений, начавшаяся сразу после Второй мировой войны, вылившееся в военное противостояние СССР и США, не оставила без внимания и околоземное космическое пространство. Одним из перспективных направлений развития вооружений рассматривались космические летательные аппараты, способные нанести урон наземной обороне противника как с помощью активных средств нападения — боевых зарядов, так и с помощью пассивных средств, например, нарушения радиосвязи. Важнейшая роль отводилась оптической и радиолокационной разведке из космоса. Безусловно, это не могло не породить новые идеи обезвреживания космического потенциала противника. И тут открытие радиационных поясов — захваченных частиц в магнитной ловушке Земли — сыграло большую роль в удовлетворении амбиций руководства супердержав.

Радиация — отличный поражающий фактор. Энергичные частицы — протоны, тяжелые ядра и электроны способны вызвать нарушения в работе бортовых систем космических аппаратов и персонала, летающего в них.

Как создать необходимые для этого мощности радиации?

Трудно сказать, кому впервые — нашим или американцам — пришла в голову идея взорвать атомную бомбу в космосе с целью создания высоких уровней искусственной радиации в околоземном пространстве для возможного её использования в качестве поражающего фактора космических целей противника. Однако первой открытой публикацией на эту тему была книга американского физика Н. Кристофилоса «Операция «Аргус», появившаяся в 1959 г. и изданная в СССР в 1960 г.

Именно он в 1958 г. предложил американским военным провести смелый эксперимент — использовать возможность захвата заряженных частиц магнитным полем Земли для нанесения поражения космическим средствам нападения противника, т.е. межконтинентальным баллистическим ракетам и спутникам в космосе. Для этого он предложил взорвать ядерные заряды в космосе. Продукты распада радиоактивных веществ, прежде всего, электроны МэВ'ных энергий, могли привести к изменению свойств ионосферы — повышению ее ионизации и, как следствие, — помехам в распространении радиоволн, а также захватом в магнитную ловушку релятивистских электронов и увеличению доз радиации по сравнению с их естественным уровнем. Последний фактор, наряду с электромагнитным импульсом от взрыва рассматривался как метод активного воздействия на космические аппараты и баллистические ракеты противника путем радиационного поражения электроники и отдельных узлов спутников и ракет.

При ядерном взрыве при каждом акте деления выделяется энергия ~ 200 МэВ, приходящаяся, в основном, на осколки деления ядер (~ 85 %), а также на гамма-излучение и электроны (~ 5 %).

Принципиальная разница между взрывом в атмосфере и в космосе, т.е. в вакууме, заключается в том, что в последнем случае кинетическая энергия передаётся не молекулам окружающей среды, а атомам вещества конструкции ядерного заряда. Другим важным отличием космического взрыва является выделенная направленность разлёта его продуктов.

Выше (рис. 17.6) мы видели, что движение заряженных частиц в магнитном поле — это спиралевидные траектории вдоль силовых линий магнитного поля с характерным ларморовским радиусом. Отсюда очевидно, что если ядерный взрыв «прогремит» на достаточно большой высоте, выше, чем находятся зеркальные точки отражения частиц в вершине конкретной силовой линии, можно ожидать появления «дополнительной порции» радиации вдали от точки взрыва — на всём протяжении магнитной силовой трубки. «Облако» образовавшихся при взрыве частиц расширяется, быстро заполняя узкую область вдоль меридиана, и начинает дрейфовать вокруг Земли (вспомните дрейф протонов и электронов естественных радиационных поясов вокруг Земли). Таким образом, реализуется «ядерная пушка» стреляющая «из-за угла». Противник не обязательно должен находиться рядом с точкой подрыва заряда. Радиоактивное облако может его достичь за многие тысячи километров от неё, в другом полушарии.

Подсчитано, что при ядерном взрыве мощностью в 1 килотонну в космическое пространство может быть инжектировано до 10^{24} электронов. Много это или мало? Ведь эти частицы при взрыве попадают в среду, уже заполненную захваченными в магнитное поле электронами естественного происхождения. Могут ли искусственно созданные частицы стать существенным дополнительным фактором, влияющим на срок активной жизни космического аппарата?

Прежде чем ответить на этот вопрос, обратимся к истории. СССР и США взорвали в космосе 9 ядерных зарядов (по литературным данным).

Такие эксперименты по высотным ядерным взрывам начались в США весной 1958 г. Первые взрывы были маломощными (1,7 кт), произведены на относительно малой высоте (десятки км) и не оказали заметного эффекта на фоне естественных потоков электронов в радиационных поясах Земли.

Но последующий за ними эксперимент «Argus I» был произведен на большей высоте в несколько сотен километров и, хотя он был относительно малой мощности, произвел наблюдаемый эффект на фоне естественной радиационной среды. Именно этот эксперимент «Argus I» и последующий за ним «Argus II» доказали, что возможна инжекция частиц в геомагнитную ловушку и их устойчивый захват в ней. Действительно, находившийся в то время на орбите спутник «Explorer-4» зарегистрировал новый искусственный пояс электронов, который существовал в течение 3-х недель. Наиболее мощный взрыв «Starfish» («Морская звезда») США произвели в 1962 г. на высоте около 400 км. Именно этот взрыв произвел наиболее заметные изменения пространственно-энергети-

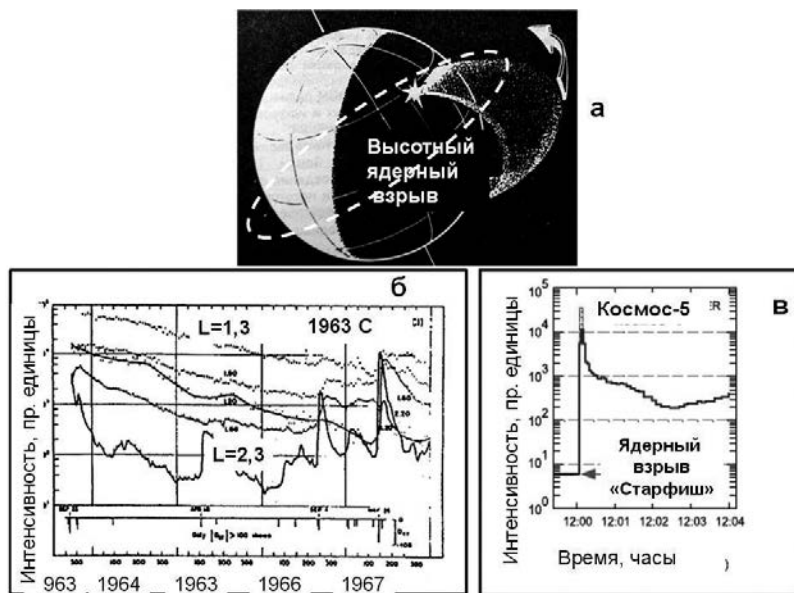


Рис. 18.1. Эффекты в околоземной радиационной среде, вызванные наиболее мощным высотным ядерным взрывом «Starfish». На панели «б» показаны вариации скоростей счета детекторов, регистрировавших субрелятивистские электроны с энергией >400 кэВ на американском спутнике 1963С, а на панели «с» — значительное, более чем на 3 порядка, увеличение потока электронов зарегистрированное непосредственно после взрыва на советском спутнике «Космос-5». Можно отметить, что искусственно инжектированные потоки электронов от ядерного взрыва превышали естественные во внутреннем поясе в течение нескольких лет, вплоть до 1967 г.

ческой структуры радиационных поясов, нарушив на длительное время природную экологию радиационной среды космического пространства. Продукты деления радиоактивных остатков ядерного взрыва — потоки релятивистских электронов с энергией до нескольких МэВ во внутренней зоне радиационных поясов существенно превышали уровни радиации, наблюдавшиеся до взрывов, сделав невозможным их наблюдение вплоть до 1966 г. (рис. 18.1). По сути, «космическими» можно считать взрывы, начиная с американской операции «Аргус». Эта операция была очень успешной.

Наиболее мощный взрыв — «Starfish» — американцы произвели в 1962 г. над островом Джонстон в Тихом океане. В это время летал наш спутник «Космос-5», который в первые секунды после взрыва зарегистрировал интенсивный поток гамма-излучения разлетевшихся при взрыве осколков деления. Спутник в это время находился на расстоянии 7500 км от точки взрыва! На том же рис. 17.16, в показаны вариации скорости счета детектора Гейгера—Мюллера, установленного на советском спутнике «Космос-5», оказавшегося в 7500 км от эпицентра взрыва над островом Джонстон: поток релятивистских электронов возрос более чем на 3 порядка.

СССР также произвел испытания ядерного оружия в космосе. Наиболее мощные — 150 кТ («КЗ») и 300 кТ («К4») — на высотах около 300 км. Они выз-

Рис.18.2. Эффект от советского ядерного взрыва в ноябре 1962 г.: интенсивности потоков электронов возросли в зазоре между поясами.

вали существенные изменения потоков частиц во внутренней зоне естественных радиационных поясов, зарегистрированные на нескольких спутниках, хотя и не такие масштабные, как американский «Starfish».

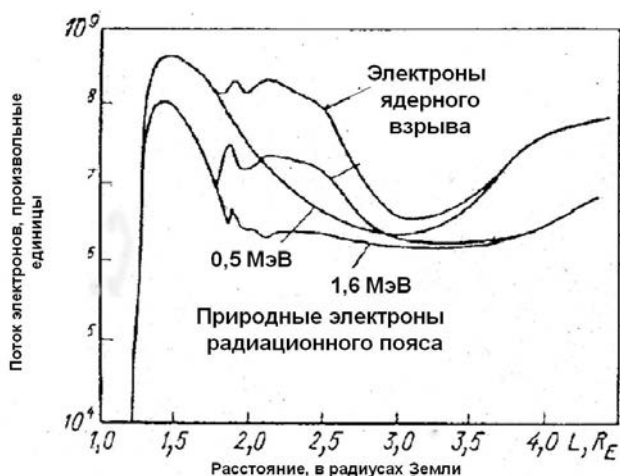
Основная цель ядерных испытаний США и СССР в космосе была, безусловно, военная. И в этом плане, они были успешными: был реально продемонстрирован эффект поражающего действия искусственной радиации на спутники. Имеется такая статистика: в результате ядерных взрывов были выведены из строя 11 спутников на орбитах, пересекавших области наиболее интенсивных потоков искусственных радиационных поясов. В основном, повреждения получили солнечные батареи, вследствие воздействия на них значительных доз радиации.

Важно отметить, что созданные человеком искусственные радиационные пояса существуют довольно долго (рис. 18.16): несмотря на некоторый разброс экспериментальных результатов, это — месяцы и даже годы. Поэтому очевидно, что многие эксперименты по изучению электронов внутреннего радиационного пояса в эпоху конца 50-х — начала 60-х годов прошлого века, были «загрязнены» потоками инжектированных во время ядерных взрывов частиц.

Однако эти испытания, помимо военных целей имели огромное значение и для фундаментальной науки. Научный резонанс от результатов ядерных испытаний был велик.

Это были первые активные геофизические эксперименты в космосе, продемонстрировавшие справедливость модели устойчивого захвата заряженных частиц в космосе, уже разработанной к тому времени. Удалось экспериментально обнаружить характерные для условий устойчивого захвата зависимости потоков частиц от индукции магнитного поля вдоль силовой линии и питч-угловые распределения частиц с максимумами интенсивности в направлении перпендикулярно магнитной силовой линии.

В заключении хотелось бы отметить следующую историческую деталь. Первые ядерные взрывы в космосе были осуществлены всего через несколько месяцев после открытия радиационных поясов. В это время понимание как динамики захваченных частиц в магнитном поле, так и механизмов формирования и источников радиационных поясов находились на начальном этапе. Поэтому на фоне секретности проводимых работ по исследованию космоса в



СССР и США, неудивительным представляется тот факт, что некоторые американские учёные (воспоминания профессора Дж. Ван Аллена) подозревали «русских» в создании радиационных поясов Земли с помощью произведённых ими ядерных взрывов. Понимая огромную значимость ядерных испытаний в космосе для фундаментальной науки, Дж. Ван Аллен еще в 1958 г. предлагал рассекретить их результаты, имеющие, с его точки зрения, большое значение для фундаментальной науки. Это было сделано, но позднее.

В середине 60-х годов прошлого века ядерные взрывы в космосе были запрещены. Радиационные пояса Земли «очистились» о примеси «милитаристской радиации», приведшей к многолетней «ядерной зиме» околоземного космического пространства.

Глава 19. Околоземной зоопарк космической радиации

Реальное путешествие в поиске открытий
состоит не только в поиске новых ландшафтов,
но и в наличие новых глаз

Марсель Пруст, писатель

Первый механизм, объясняющий существование во внутренней зоне радиационных поясов протонов и электронов (распад нейтронов альбедо), был предложен Верновым, Лебединским и Зингером. Он давал ответ на вопрос об источнике частиц радиационных поясов, но только частично. В предыдущей главе отмечалось, что это протоны космических лучей (ГКЛ), проникающие в атмосферу и вследствие ядерных реакций генерирующие в атмосфере нейтроны, которые, в свою очередь, распадаясь на протоны и электроны, пополняют радиационные пояса. Однако энергия этих частиц, как отмечалось выше, не может превышать несколько сотен кэВ для электронов и десятки МэВ для протонов. Кроме этого, пространственная локализация таких «альбедных» поясов не может распространяться на экваториальные расстояния за пределами 2-х радиусов Земли (R_e), т.е. внутренней зоны. Тем не менее, радиационные пояса простираются вплоть до $7 R_e$ и их энергетический диапазон больше, чем только у «альбедного компонента». Поэтому вопрос об источниках и ускорителях всех остальных частиц, по сути, основной доли радиационных поясов, оставался открытым. Но в течение 20–30 лет, прошедших после открытия радиационных поясов, были открыты и другие источники, наполняющие околоземное пространство захваченными в магнитное поле, частицами.

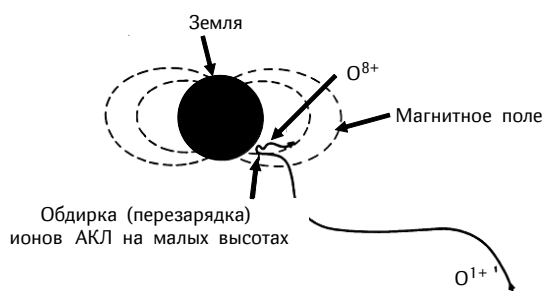
19.1. Галактические источники

Следует отметить, что механизмом распада нейтронов не ограничивается роль космических лучей в формировании радиационного окружения Земли. Дело в том, что первичный компонент ГКЛ, взаимодействуя с атмосферой, генерирует поток вторичных нейтральных и заряженных пи-мезонов (π). Эти частицы короткоживущие. Среди вторичных продуктов их распада есть гамма-кванты и мю-мезоны (μ), которые, в свою очередь, и порождают электроны.

Некоторая часть электронов может выходить в открытый космос, создавая дополнительный альбедный поток (рис. 17.7). Расчёты показывают, что энергия этих электронов достигает сотен МэВ, и они создают на малых высотах своеобразный ореол альбедных частиц вокруг Земли, внося дополнительный вклад в радиационное окружение Земли. Впервые этот механизм пополнения частицами радиационных поясов был предложен ученым из Московского университета Н.Л. Григоровым.

Однако, оказалось, что эти механизмы, связанные с «альбедными» источниками, не могут обеспечить заполнения частицами всех радиационных поясов. Обладая большим импульсом, частицы ГКЛ легко проникают в магнитное поле Земли и, хотя сами в нем не «захватываются», но являются источниками вто-

Рис. 19.1. Механизм формирования захваченных частиц аномальных космических лучей представляет собой проникновения однократно заряжённых ионов АКЛ внутрь магнитного поля, их перезарядку — обдирку до «голых ядер» на малых высотах на атомах атмосферы, и последующий захват высокоионизированного кислорода (и других ионов) в магнитное поле.



ричных частиц, заполняющих магнитную ловушку. И только вблизи Земли, в области внутренней зоны радиационных поясов.

Еще один, «галактический источник» был обнаружен спустя 20 лет. Им оказалась межзвездная пыль из нашей Галактики!

В 1990 г.г. начались совместные советско-американские эксперименты (см. раздел 13.3) по изучению так называемых «аномальных космических лучей» (АКЛ). Неожиданным результатом этих экспериментов оказалось обнаружение радиационного пояса состоящего, по сути, из межзвездного вещества.

Механизм его образования состоит в следующем (рис. 19.1). АКЛ проникают вглубь магнитосферы, и в верхних слоях атмосферы происходит их перезарядка на нейтральных атомах атмосферы. Оказалось, что однократно заряженные ионы кислорода и других элементов, входящих в состав аномального компонента, после перезарядки в верхних слоях атмосферы могут захватываться на устойчивые орбиты, образуя популяцию частиц, состоящую из вещества ближней локальной межзвездной среды. В результате их заряд увеличивается, радиус кривизны траектории резко уменьшается и тем самым обеспечиваются условия для устойчивого захвата. Оказалось, что этот радиационный пояс располагается на расстояниях, немного превышающих 2 радиуса Земли (R_e) от её поверхности в плоскости экватора.

Другая «экзотика» в окрестности нашей планеты была обнаружена совсем недавно, в ходе эксперимента «PAMELA», начавшегося в 2006 г. PAMELA — магнитный спектрометр, который способен регистрировать отдельно положительные и отрицательные заряженные частицы. Одним из результатов наблюдений PAMELA стало обнаружение антипротонов во внутренней области земной магнитной ловушки. Известно, что антипротоны в космическом пространстве — вторичный продукт взаимодействия протонов ГКЛ с другими ядрами, встречающимися во Вселенной, например путём образования пар или распада антинейтронов.

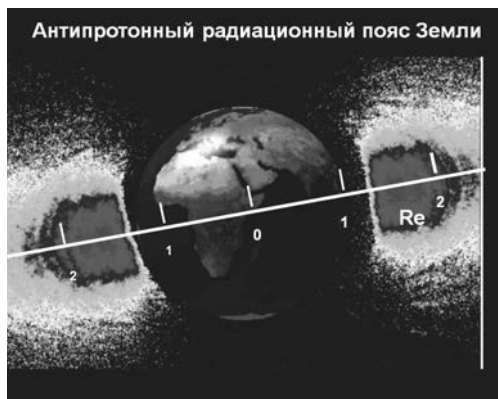
Создание пар: $p + A \rightarrow p + \bar{p} + X$,

распад антинейтронов: $p + A \rightarrow p + n + \bar{n} + X$, $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu$

Такие антипротоны вторичного происхождения и были обнаружены прибором PAMELA в радиационных поясах Земли (рис. 19.2)

Поэтому, помимо «альбедных» источников надо было найти дополнительные источники частиц радиационных поясов. Вполне естественно, что таким

Рис. 19.2. Пространственное распределение антипротонов во внутренней зоне радиационных поясов Земли. Он расположен около Земли, на расстояниях, не превышающих $2,2R_e$ в плоскости экватора.



кандидатом в источники частиц радиационных поясов в первую очередь стала плазма солнечного ветра.

19.2. Солнечный источник

Немаловажную роль в изучении солнечной плазмы сыграли эксперименты К. И. Грингауза, который с помощью плазменных приборов на советских космических зондах серии «Луна», запущенных начиная с 1959 г., впервые доказал существование непрерывного истечения плазмы из атмосферы Солнца.

Но эти частицы, во-первых, каким-то образом должны проникнуть внутрь магнитосферы, а, во-вторых, значительно увеличить свою энергию. Ведь энергия частиц солнечной плазмы (~ 1 кэВ) значительно меньше энергии частиц радиационных поясов. Вкратце, картина заполнения магнитосферы частицами солнечного ветра и их ускорения выглядит следующим образом.

Та доля частиц солнечного ветра, которая «сумела просочиться» внутрь магнитного поля, заполняет внешние области: между ударной волной и границей магнитосферы, хвост магнитосферы, полярные области (рис. 19.3).

Итак, уже два источника — космические лучи высокой энергии (ГКЛ) и солнечная плазма могут пополнять радиационные пояса. Но это ещё не все источники.

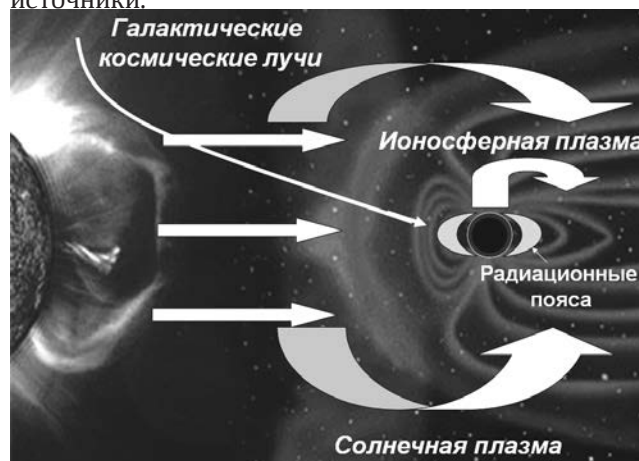


Рис.19.3. Основные источники частиц радиационных поясов Земли: галактические космические лучи (включая аномальный компонент), солнечная и ионосферная плазма.

19.3. Земной источник

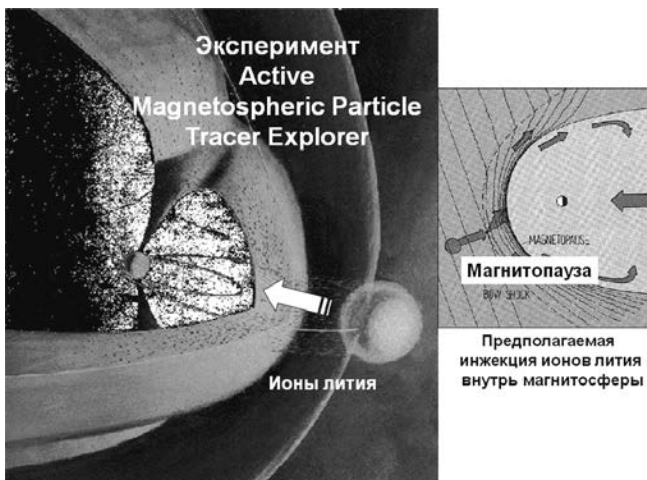
Велико было удивление учёных в начале 70-х годов, когда среди частиц во внутренней магнитосфере они увидели частицы земного происхождения – ионосферные! Как отличили эти частицы от солнечных? С помощью приборов, которые разделяют частицы по их энергиям, массе и заряду. В 1972 г. появились экспериментальные данные, полученные американскими специалистами на низковысотном американском полярном спутнике S3-3. Они продемонстрировали, что помимо солнечной плазмы источником частиц радиационных поясов является и земная ионосфера: было обнаружено, что ионосфера «фонтанирует» в окружающее пространство кислород. Это стало своего рода сенсацией, т.к. до этого открытия никто не предполагал, что в окрестности Земли может быть еще один источник плазмы, помимо солнечного. Это было сделано с помощью энерго-масс-зарядового спектрометра – прибора, способного разделять поток частиц по их энергиям, массе и заряду. Оказалось, что ионосфера «фонтанирует» в окружающее пространство кислород (рис. 18.1). Причём этот кислород имеет заряд $1+$, т.е. он слабоионизирован, в отличие от солнечного, у которого отсутствуют практически все электронные оболочки. Солнечный кислород имеет зарядовое состояние близкое к $8+$. Так отличили солнечное вещество от земного. Таким образом, был обнаружен ещё один источник частиц радиационных поясов: земной, ионосферный.

В 70–80-х появились экспериментальные спутниковые данные об энергетических параметрах и составе кольцевого тока – частицах внутри магнитной ловушки с энергией от единиц до сотни кэВ, ответственных за развитие главной фазы магнитной бури. Оказалось, что во время сильных магнитных бурь ионосферная плазма играет доминирующую роль в формировании кольцевого тока, определяя, тем самым, мощность самой магнитной бури.

Когда был открыт кислород в составе кольцевого тока, появились идеи, что может и вовсе не надо солнечного источника частиц для генерации кольцевого тока. Может достаточно только ионосферных ионов? Такие сомнения возникли в начале 1980-х г.г. Именно этот факт, по сути, революционный на тот период развития знаний о природе магнитных бурь, породил сомнения в необходимости привлечения солнечной плазмы в качестве доминирующего источника частиц во внутренней магнитосфере. По мнению ряда исследователей, значимость солнечной материи для внутренней магнитосферы и для радиационных поясов, в частности, могла быть переоценена.

Эти мысли привели наших западных коллег к желанию проверить это экспериментально. Это привело к идее осуществления нового активного эксперимента – AMPTE (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorer – «Исследователь по обнаружению активных магнитосферных частиц»). Суть этого проекта состояла в следующем: выпустить за пределами магнитосферы Земли облако частиц, которых нет в солнечной плазме и посмотреть, проникнут ли они внутрь магнитосферы нашей планеты? Каких частиц нет в солнечном ветре (и, следовательно, на Солнце)? Выбор был сделан на литии и европии. Их очень мало, практически нет, в солнечной плазме.

Рис. 19.4. Активный эксперимент AMPTE по инъекции ионов лития перед головной ударной волной магнитосферы с целью проверки возможности транспорта этих ионов внутрь магнитосферы.



Это было осуществле-
но следующим образом.
Это вещество было за-
правлено в бочки – в кон-
тейнеры, вместе с взрыв-

чатым веществом и отправлено на спутнике на орбиту за пределы магнитосферы (более 10 радиусов от Земли) на ее дневную сторону. Предполагалось, что после подрыва контейнера с этим веществом перед головной ударной волной магнитосферы Земли на дневной стороне, часть ионизированного под действием солнечного ультрафиолета лития, проникнет в хвост магнитосферы в потоке плазмы солнечного ветра, где он и будет зарегистрирован приборами на другом спутнике. Конечно, только в том случае, если сама инъекция солнечной плазмы внутрь магнитосферы возможна (рис. 19.4). Другой спутник, с приборами, позволяющими регистрировать ионы этого вещества, был отправлен в глубь магнитосферы, в ее хвост на ночную сторону, в попытке зарегистрировать это вещество там, если оно сможет проникнуть внутрь магнитной брони Земли

Итог? Эксперимент закончился отрицательным результатом. Бочки с литием подорвали, дождавшись магнитной бури, но спутник, летавший внутри магнитосферы, ничего не увидел! После повтора эксперимента специалисты убедились, что вещество, имитирующее солнечное, не проникает внутрь магнитосферы. Все модельные расчеты показывали, что небольшая доля лития и европия должна была быть зарегистрирована на спутнике, летавшем на ночной стороне внутри магнитосферы.

Тем не менее, этот эксперимент позволил ученым исследовать многие другие эффекты, связанные с динамикой частиц в околоземном космическом пространстве.

Казалось бы, сторонники идеи доминирования ионосферной плазмы во внутренней магнитосфере могли торжествовать. Однако исследователи не учли некоторых физических эффектов, не позволивших «псевдосолнечным частицам» проникнуть в глубь магнитного поля. Оказалось, что проникновение лития в магнитосферу не произошло по причине неожиданного для экспериментаторов эффекта электрической поляризации плазменного облака лития сразу после взрыва и развитием плазменной неустойчивости и, как следствие, невозможности их подхватывания потоком солнечного ветра и дальнейшего пе-

реноса внутрь земного магнитного поля. Оказывается, что после подрыва на орбите бочки с этими редкими элементами, образовывалось шарообразное облако, которое на солнечной стороне ионизировалось, а на обратной — в меньшей степени. И в результате возникших электростатических сил притяжения заряженное облако просто не позволяло частицам разлетаться.

Проект AMPTE был один из серии активных экспериментов, связанных с инъекцией химических веществ в околоземное космическое пространство в интересах, в том числе, военно-прикладной тематики. В данном проекте, также как и в более ранних экспериментах с ядерными взрывами, эта прикладная тематика стимулировала и развитие фундаментальной науки.

Но не только солнечная и ионосферная плазма оказались источниками частиц, населяющих радиационные пояса. Довольно интересным экспериментальным результатом оказалось обнаружение на орбите Земли высокоэнергичных электронов юпитерианского происхождения.

19.4. Юпитер как источник

Оказалось, что в те времена, когда архимедовы спирали межпланетного магнитного поля «соединяют» Солнце, Землю и Юпитер, в окрестности нашей планеты можно наблюдать электроны от Юпитера (рис. 19.5).

Они «выметаются» из гигантской магнитосферы Юпитера, пролетая огромные расстояния в магнитной силовой трубке, и регистрируются детекторами на спутниках. Очевидно, часть из них попадает в земную магнитную ловушку.

19.5. Еще один «альбедный источник»

Исследования тяжёлых ионов в радиационных поясах позволили обнаружить ещё один механизм их поясов в геомагнитной ловушке. Оказалось, что протоны внутренней зоны радиации в конусе потерь (в районе Южно-Атлантической аномалии), в результате взаимодействия с атомами атмосферы создают новые вторичные частицы (например, гелий). Последние, оказавшись

в ловушке, образуют дополнительный (к основному, созданному радиальным переносом частиц к Земле) пояс захваченных частиц.

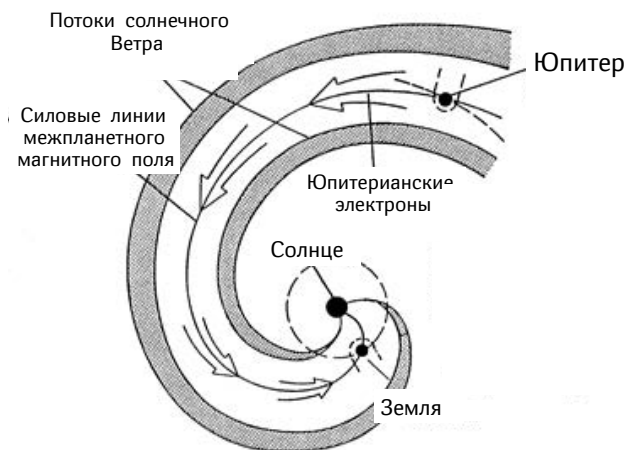


Рис. 19.5. Юпитерианские электроны достигают нашей планеты, когда силовые линии межпланетного магнитного поля «соединяют» Солнце, Землю и Юпитер.

Это явление впервые было обнаружено в эксперименте на низковысотном спутнике «Интеркосмос-17». Таким образом, был обнаружен источник и механизм образования радиационных поясов, которые также можно приписать к категории так называемых «альбедных».

К концу 1980-х г.г. сформировалась устойчивая точка зрения на многокомпонентный состав частиц радиационных поясов Земли, среди которых солнечная и ионосферная плазма, а также галактические космические лучи (включая аномальный компонент), являются основными источниками их пополнения (рис. 19.3).

В целом, радиационные пояса заполняют довольно обширную область вокруг Земли — их внешняя граница расположена на расстоянии до $\sim 7 R_e$. Эта зона поясов заполнена менее энергичными частицами по сравнению с внутренней. Именно во внутренней зоне, на расстоянии менее $2,5 R_e$ обнаружены протоны с энергиями до 1 ГэВ. Во внешней зоне энергии протонов не превышают МэВ'ов. Магнитная ловушка помимо протонов заполнена многими другими ядрами, а также электронами. Энергия электронов в поясах достигает релятивистских — несколько МэВ.

Вполне естественным является вопрос: а где ускорители этих частиц? Если «альбедные частицы», рождаясь в ядерных реакциях, уже имеют довольно значительные энергии, то частицы солнечного и ионосферного происхождения — по сути, горячую плазму, надо каким-то образом ускорить в магнитосфере Земли, чтобы она стала захваченной радиацией?

Далее посмотрим, какие могут быть ускорительные механизмы в ближнем космосе, способные разогнать частицы до больших скоростей.

Глава 20. Ускорители частиц ближнего космоса

Думаю, гораздо интереснее жить, не зная чего-то, чем имея ответы, которые могут оказаться неправильными

Ричард Фейнман

Плазма солнечного ветра, заполняет внешние области: между ударной волной и границей магнитосферы, полярные области и хвост магнитосферы. Хвост магнитосферы — громадный резервуар, в котором происходит накопление как солнечной, так и ионосферной плазмы, он играет активную роль в пополнении радиационных поясов частицами. Именно здесь во время магнитных бурь происходят мощные деформации магнитного поля, приводящие к генерации индукционных электрических полей, которые и ускоряют частицы, как солнечной плазмы, так и земной — ионосферной. Часть этих частиц, уже ускоренных в хвосте, достигает внешних границ радиационного пояса и здесь начинается другой процесс — их перенос внутрь, в направлении Земли. «Драйвером» этого процесса также является солнечный ветер, а именно, его флуктуации: как крупномасштабные (типа корональных инжекций масс), так и более слабые, практически постоянно существующие в межпланетной среде. Флуктуации солнечного ветра создают колебания магнитного поля Земли, которые, собственно, и «транспортируют» частицы внутри магнитной ловушки. В процессе их переноса к Земле, они ещё больше увеличивают свою энергию. На энергетической шкале величина этого ускорения должна быть значительной. Так, частицы солнечного ветра, имея первоначальную энергию ~ 1 кэВ должны достичь величин, характерных для релятивистских скоростей. В основном, это происходит за время геомагнитных возмущений, когда во внутренней магнитосфере Земли в течение коротких промежутков времени генерируются мощные электрические поля, ускоряющие частицы. Так каковы же эти ускорители?

20.1. Транспорт частиц в радиационных поясах

Проблема поиска ускорительного механизма, трансформирующего небольшую тепловую энергию солнечной плазмы (порядка 1–10 кэВ) в энергию частиц, которые в радиационных поясах достигают примерно 1000 МэВ для протонов и 10 МэВ для электронов, возникла к началу 60-х годов. И этот механизм был найден всего через несколько лет, после открытия самих радиационных поясов.

Теоретическая модель, позволяющая объяснить практически всю пространственно-энергетическую структуру радиационных поясов, была создана к середине 60-х годов. В основу её положен диффузионный механизм переноса частиц поперек магнитного поля (т.е. радиальный) под действием флуктуаций электрических и магнитных полей в околоземном пространстве. Насколько продуктивен был этот подход, можно судить по тому, что именно механизм радиальной диффузии и в настоящее время рассматривается в качестве основно-

го для объяснения экспериментально наблюдаемого пространственного и энергетического распределения захваченных частиц внутри магнитной ловушки.

Радиальный перенос частиц вызывается флуктуациями электрических и магнитных полей в магнитосфере, а сами флуктуации — изменениями давления солнечного ветра (рис. 20.1). Индуцированное электрическое поле приводит к

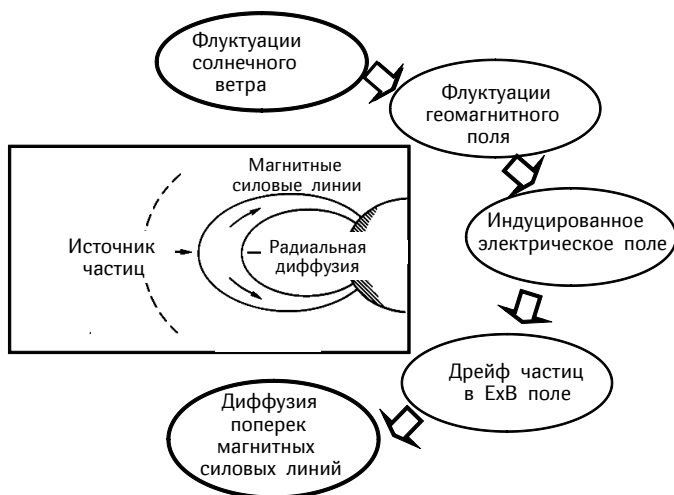


Рис. 20.1. Физический процесс во внутренней магнитосфере, приводящий к радиальной диффузии частиц внутри магнитного поля.

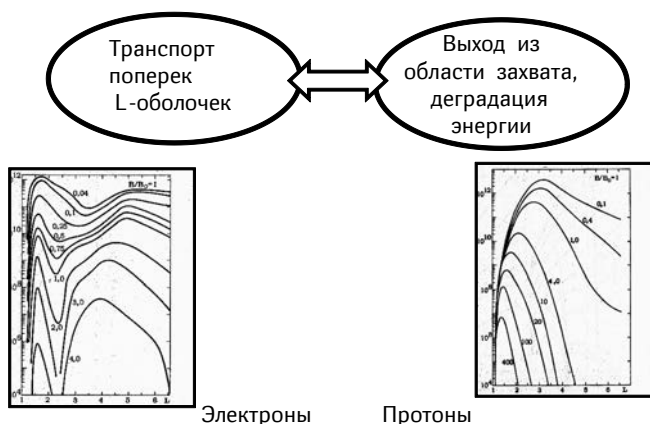
дрейфу частиц в скрещенном магнитном и электрическом полях и, как следствие, к диффузионному переносу частиц поперек магнитных силовых линий. Частицы, перемещаясь в ловушке внутрь, увеличивают свою энергию посредством бетатронного механизма ускорения при сохранении магнитного момента (первого адиабатического инварианта): $\mu = E/B = \text{const}$ (здесь E — кинетическая энергия частицы, а $B = 0,312 \text{ Гс}/R_e^3$ — индукция локального магнитного поля в плоскости геомагнитного экватора). Отсюда очевидно, что дрейфуя по направлению к Земле, энергия частицы будет увеличиваться обратно пропорционально кубу расстояния дрейфовой оболочки частицы до Земли, т.е. R_e^{-3} .

Это «бетатронный» механизм ускорения частиц, получивший своё название от наземных ускорителей электронов — «бетатронов», широко использующихся в экспериментах по ядерной физики.

Таким образом, частицы из хвоста магнитосферы, который является своеобразным резервуаром — плазмы солнечного ветра и ионосферы, попадают внутрь магнитной ловушки, где, в процессе переноса внутрь, ускоряются.

Впервые идею диффузии частиц внутри магнитной ловушки при возмущениях магнитного поля типа внезапных импульсов высказал Ю. Паркер. В дальнейшем идеи диффузионного переноса были развиты в работах многих ученых. Этот процесс является именно диффузионным, т.е. частицы преимущественно перемещаются внутрь радиационных поясов, хотя им «не возбраняется» на некоторое время оказаться и на внешних дрейфовых оболочках. Такой процесс переноса частиц описывается уравнением Фоккера — Планка, решением которого является картина пространственно-энергетической структуры захваченных частиц в виде функции распределения частиц. Принципиальную роль в уравнении диффузии играет коэффициент диффузии, определяющий скорость перемещения частиц поперек магнитных силовых линий. По мере приближения

Рис. 20.2. Схема, демонстрирующая формирование пространственно-энергетической структуры радиационных поясов электронов и ионов как следствие баланса между скоростью переноса частиц поперек магнитных дрейфовых оболочек (L) и их потерями, т.е. формирование пространственно-энергетической структура радиационных поясов с максимумами потоков на определенных дрейфовых оболочках для фиксированных энергий частиц.



частиц к Земле, они все в большей степени начинают испытывать воздействие различных механизмов потерь, например, при их взаимодействии с холодными электронами *плазмосферы*, с атомами *нейтральной экзосферы*, окружающих Землю. С точки зрения парадигмы радиальной диффузии максимум интенсивности ионов (рис. 19.2) соответствует характерной области в пространстве, где скорость переноса, определяемая коэффициентом диффузии, сравнивается со скоростью потерь ионов (за счет кулоновских взаимодействий и перезарядки).

Для электронных радиационных поясов требуется учет дополнительных потерь — взаимодействия с электромагнитными волнами, а также пренебрежение процессом перезарядки.

Коэффициент диффузии зависит от характера, текущей гелиофизической обстановки и от долговременных солнечно-циклических изменений. Он определяется как амплитудой, так и частотой возмущений магнитного и (или) электрических полей, зависящих, в свою очередь, от параметров солнечного ветра в межпланетной среде.

Количественные модели радиальной диффузии были развиты в работах многих авторов. Среди этих работ модель, разработанная Б.А. Тверским, существенно отличалась от других. Она дала хорошее количественное согласие с экспериментом и позволила объяснить многие характеристики пространственно-энергетической структуры как протонных, так и электронных радиационных поясов. Первые публикации этой модели пришлось на 1964–1965 гг. Ее основной парадигмой было утверждение о доминировании магнитной диффузии, в отличие от авторов, предполагавших существование только электрической диффузии (К. Фельтхаммер и др.), возникающей под действием флуктуаций *крупномасштабного электростатического поля магнитосферы*. Коэффициент «магнитной диффузии», предложенный в ранних работах Тверского, соответствовал средневозмущенной геомагнитной обстановке и, соответственно, определял «усредненную» пространственно-энергетическую структуру поясов. С другой стороны, коэффициенты «электрической диффузии» в работах других авторов выбирались скорее интуитивно, т.к. спектр мощности флуктуаций электрического поля был недостаточно экспериментально исследован. Удиви-

тельным был тот факт, что обе модели давали хорошее совпадение с экспериментальными спутниковыми данными по распределениям частиц радиационных поясов!

Противоречивая ситуация разрешилась к середине 80-х годов, когда после проведения серии экспериментов в космосе, появилось достаточно много экспериментальных данных не только о протонах и электронах, но и о более тяжёлых ионах, измерения которых сыграли важную роль в определении источников и механизмов ускорения и переноса частиц внутри геомагнитной ловушки. Это стало возможным в 60-х – начале 70-х гг., когда и в США, и в СССР, а затем и в других странах, были созданы приборы, позволяющие идентифицировать энергичные ионы по массе, энергии и заряду.

В составе солнечного ветра наряду с протонами имеются гелий, углерод, кислород и более тяжёлые элементы. Для гелия относительные концентрации не превышают нескольких процентов, ещё меньше концентрация более тяжёлых частиц. Тем не менее, изучение именно тяжёлых ионов сыграло важную роль в развитии моделей радиационных поясов, т.к. экспериментальные данные по их распределениям позволили провести объективное тестирование различных моделей формирования поясов радиации, что в полной мере было невозможно с использованием экспериментальных данных только о протонном и электронном компоненте. Это связано с тем, что коэффициенты диффузии в уравнении переноса Фоккера – Планка в общем виде могут зависеть как от энергии, так и от типа частицы (т.е. её массы и заряда). Поэтому тяжёлые ионы оказались чрезвычайно важным инструментом для верификации различных моделей радиальной диффузии.

Оказалось, что «магнитная диффузия» (перенос частиц под действием флуктуаций магнитного поля), описывает большую часть пространственно-энергетической структуры радиационных поясов. Флуктуации магнитосферного электростатического поля также «принимают участие» в формировании поясов радиации. Однако эффективность их воздействия ограничивается лишь малыми энергиями частиц (менее сотен кэВ) во внешней зоне радиации и, возможно, во внутренней зоне для энергий ионов более нескольких МэВ.

На волне моей памяти

После окончания аспирантуры и защиты диссертации в 1972 г. я продолжил работать в Институте. Очень быстро я был назначен на должность старшего научного сотрудника. Моя научная тематика оставалась прежней – исследования радиационных поясов Земли. В лаборатории мы занимались разработкой и изготовлением, ставших фактически серийными, приборов для изучения космической радиации для спутников «Молния-1», а затем и «Молнии-2». Наша тематика активно поддерживалась красноярским космическим предприятием М. Ф. Решетнева, т.к. наши данные позволяли делать выводы о степени радиационной деградации элементов и систем космических аппаратов. Эти плодотворные связи НИИЯФ МГУ и красноярского предприятия зародились благодаря друж-

бе С.Н. Вернова и М.Ф. Решетнева в конце 60-х и продолжают до сих пор. Собственно с этого периода в нашем институте начало активно развиваться тематика космического материаловедения — науки о воздействии космических излучений на материалы космических аппаратов. Это был прикладной аспект нашей тематики, сыгравший большую роль в развитии нашего института.

Не менее интересным и значительным для меня был и фундаментальный аспект проблемы исследований космической радиации в околоземном космическом пространстве.

В начале 70-х годов нашу Лабораторию возглавил Борис Аркадьевич Тверской, к тому времени ставший уже известным ученым в области динамики частиц в радиационных поясах. Его модель радиальной диффузии, как основного механизма заполнения частицами области захвата, действительно отличалась от аналогичных, развивавшихся в то время на Западе, ясностью теоретических подходов и выводов, необходимых для сравнения с экспериментом. Тем не менее, существовали альтернативные подходы к описанию механизмов формирования радиационных поясов Земли.

Поэтому неслучайно я решил заняться именно этим аспектом проблематики космической физики — детальным изучением механизмов формирования радиационных поясов нашей планеты. Весь период 70-х годов я посвятил этой проблеме.

Для детального «погружения» в эту тему нам не хватало измерений в радиационных поясах более тяжелых ионов, помимо протонов. Надо было сделать прибор позволявший регистрировать тяжелые частицы, наряду с протонами. Именно сочетание измерений протонов с более тяжелыми ионами могло обеспечить исчерпывающую проверку различных моделей формирования радиационных поясов Земли. Мы сделали такой прибор и запустили его на спутнике «Молния-2» в 1974 г.

Но двумя годами ранее, американцы, наши конкуренты, запустили свой спутник «Explorer-45» тоже для изучения радиационных поясов. И вновь мне повезло — в 1977 г. мне представилась возможность поехать в США на 11-месячную стажировку. Там я связался с Тедом Фритцем и Уолтером Спелдвиком, работавших в Колорадо в области изучения и моделирования ионных радиационных поясов. Я предложил задачу сравнения данных нашей «Молнии-2» и американского «Explorer-45». Результаты этой работы свелись к подтверждению выводов модели Тверского и опровержению некоторых результатов модели Спелдвика. Тем не менее, мы доложили эту работу на конференции Американского геофизического союза во Флориде. Оставалось понять, исследовать причину этого расхождения. Но это случилось позднее.

Не уверен, что результаты нашей совместной работы очень «понравились» тогда моим американским коллегам, но наша дружба и взаимодействие сохранились на многие годы.

Вообще, за многие годы, наблюдая общение теоретиков и экспериментаторов, я подметил огромное желание первых увидеть подтверждение своих теорий в эксперименте, не замечая при этом явных расхождений. Причем, этому подвержены, по моим наблюдениям, больше наши коллеги, нежели коллеги на Западе. Однако, на мой взгляд — точке зрения экспериментатора, не менее важно найти именно расхождение эксперимента с теорией. Именно такого рода факты в большей степени способствуют прогрессу науки, в то время как всякого рода «подтверждения» теории и эксперимента закрывают, по сути, определенную главу научных исследований.

20.2. «Двугорбый верблюд» электронных радиационных поясов

Структура электронных радиационных поясов принципиально отличается от ионных наличием зазора между внешним и внутренним поясом.

Почему электронов нет в районе расположения зазора? Уже появившиеся в конце 1960-х г.г. исследования показали, что причина этому — потери частиц, их «высыпание» из области устойчивого захвата в атмосферу в результате взаимодействия электронов с электромагнитными волнами типа «вистлеров» — особого типа волн, генерируемых в области грозовой активности около поверхности Земли. Эти волны, распространяясь вдоль магнитных силовых линий, резонансно взаимодействуют с частицами, изменяя их направление движения. В результате, часть электронов оказывается в «конусе потерь», обеспечивающего их «высыпание» в атмосферу и гибель. Это было первой модельной интерпретацией существования зазора между двумя электронными поясами. Его формирование обусловлено доминированием потерь электронов над диффузионным переносом внутрь магнитной ловушки.

Электроны, в отличие от ионов, в большей степени подвержены воздействию электромагнитных волн (в основном, ОНЧ диапазона), чем ионы. Если для ионов основными механизмами являются ионизационные потери и перезарядка (для относительно малых энергий — менее сотен кэВ), то для электронов существенными становятся кулоновское рассеяние и взаимодействие с волнами. В уравнении диффузии Фоккера–Планка потери электронов описываются введением дополнительного члена, описывающего потери при взаимодействии волна — частица. В результате циклотронного резонанса электроны субрелятивистских энергий могут рассеиваться на этих волнах и, попадая в конус потерь, гибнут в атмосфере. Этим

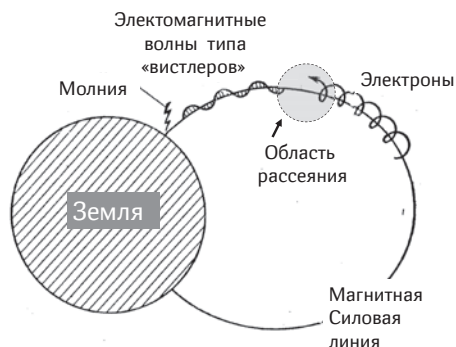


Рис. 20.3. Механизм рассеяния (изменение направления вектора скорости частиц под воздействием электромагнитных волн) — некоторая доля частиц, взаимодействующих с волнами, изменяет свое направление движения вдоль силовой линии и гибнет, попадая в атмосферу Земли.

фактором, наряду с кулоновским рассеянием, определяется их время жизни в ловушке.

Электромагнитное излучение, вызывающее рассеяние электронов, может генерироваться самими частицами радиационных поясов, например, частицами кольцевого тока, усиливающегося во время магнитных бурь, и вызывающими неустойчивость плазмы, а также электростатические колебания плазмы. В дальнейшем появились и другие, уточняющие модели, но также основанные на резонансном взаимодействии «волна – частица».

Однако, пожалуй, наиболее удивительным стало понимание того, что сам человек может быть причастен к появлению зазора между поясами. Мощные наземные низкочастотные передатчики, работающие в килогерцовом диапазоне, также могут приводить к эффекту высыпания электронов из радиационных поясов! Важно подчеркнуть, что и модельные расчеты, и прямые экспериментальные результаты коррелированных экспериментов по измерению частиц на спутниках и работой наземных передатчиков, подтверждают это. Более того, в середине 70-х годов появились работы, доказывающие исключительно антропогенное происхождение зазора. Сейчас, тем не менее, более устойчивой считается модель, основанная на одновременном действии как антропогенного, так и природного источника потерь электронов в районе зазора.

Однако здесь следует выделить проблему, требующую дальнейшего исследования. Это взаимосвязь между природными и антропогенными воздействиями на электронные радиационные пояса.

Одной из первых работ, указывающих на возможность модификации пространственно-энергетической структуры электронов внешнего пояса, были исследования, опубликованные в начале 70-х годов по результатам американского полярного спутника. В них было продемонстрировано, что локальный максимум в спектре релятивистских электронов при энергии около 1 МэВ появляется в результате резонансных взаимодействий типа волна – частица в периоды времени, когда спутник пересекал область пространства вблизи меридиана над советским низкочастотным радиопередатчиком в районе г. Горький (Нижегород). Результатом такого взаимодействия было резонансное ускорение частиц.

Вслед за этими исследованиями появились многочисленные исследования, демонстрирующие реальность антропогенного «вмешательства» в «экологию» электронных радиационных поясов Земли. Причиной этого были мощные навигационные низкочастотные радиопередатчики разных стран, работающие в килогерцовом диапазоне длин волн. В настоящее время наиболее мощный из них – военно-морской передатчик мощностью в 1 МВт расположен на западном побережье Австралии.

В научной литературе стали появляться статьи, в которых за формирование пространственно-энергетической структуры части внутреннего электронного пояса и зазора могла быть ответственна исключительно антропогенная составляющая. Иными словами, это могло бы означать, что в XIX веке и ранее, когда человек еще не изобрел радиосвязь, зазор между электронными пояса-

ми мог и не существовать! Вероятно, это точка зрения, заслуживающая внимания, но сбрасывать со счетов взаимодействие электронов с волнами в том же частотном диапазоне, но созданных природой, например, типа «вистлеров» во время грозových разрядов или возникающих внутри радиационных поясов в результате развития плазменных неустойчивостей, безусловно, нельзя.

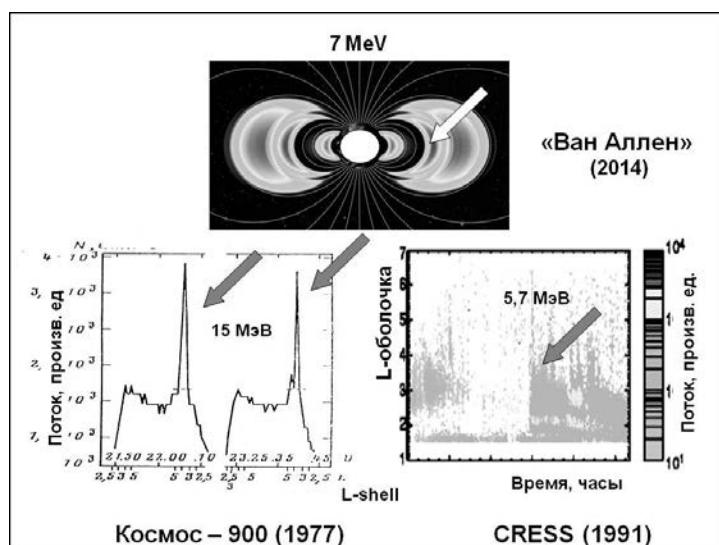
На возможность интерпретации высыпаний электронов из поясов под действием других антропогенных факторов, например, электромагнитного излучения от линий высоковольтных электропередач также указывалось в ряде научных исследований.

20.3. Зазор – пустой?

Однако, зазор между электронными поясами не всегда «пустой». В связи с этим представляет интерес напомнить вкратце первоначальную историю изучения электронного компонента радиационных поясов.

Уже в 1964 г., стало ясно, что зазор между поясами иногда заполняется очень энергичными электронами. Это явление обнаружила советская группа исследователей во главе с С.Н. Верновым из Московского университета, запустивших спутники «Электрон». Этот «новый» пояс в зазоре между более стабильными внутренним и внешним поясами, просуществовал около 1 месяца. К сожалению, эти результаты были опубликованы только в трудах конференции.

Впоследствии, Е.В. Горчаков с сотрудниками, тоже из Московского университета, на спутнике «Космос-900» разместил черенковский детектор, обладавший рекордной чувствительностью к относительно небольшим потокам высокоэнергичных электронов. В ходе эксперимента ученые из МГУ смогли впервые зарегистрировать появление в зазоре между внешним и внутренним электронными поясами электронов с энергиями, превышающими 15 МэВ (рис. 20.4). Из этих данных можно отчетливо видеть существование пояса 15 МэВ'ных электронов (отмечены овалом) во время пролета спутника «Космос-900» через радиационные



пояса в апреле 1977 г. Этот пояс релятивистских электронов просуществовал несколько дней и потом исчез. Впоследствии этой же группе ученых из МГУ удалось зарегистрировать еще не-

Рис. 20.4. Инъекции релятивистских электронов в зазор между поясами по наблюдениям на спутниках «Космос-900», CRESS и «Van Allen probes» (отмечены стрелками).

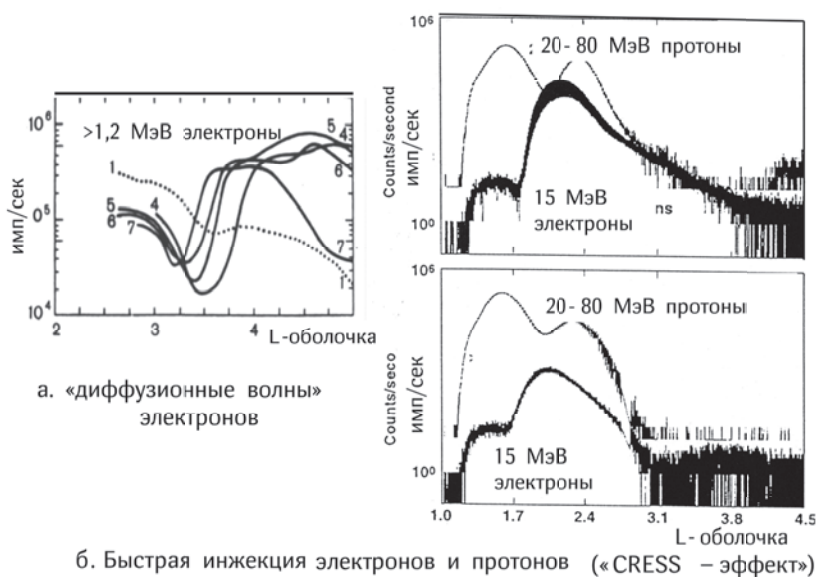


Рис. 20.5. Два типа вариаций релятивистских электронов во внешнем поясе: «диффузионные волны» (а) и anomalно быстрые инжекции протонов и электронов («CRESS-эффект»).

сколько случаев появления релятивистских электронов столь больших энергий внутри радиационных поясов в течение 1977 и 1978 г.г.

Анализируя эти результаты, авторы пришли к выводу, что все эти случаи относятся к временным интервалам на фазе восстановления геомагнитных бурь и коррелируют с увеличением скорости солнечного ветра. Тем не менее, окончательных выводов о природе ускорительного механизма, ответственного за появления этих электронов в радиационных поясах сделано не было.

Можно только сожалеть, что в силу изолированности советской космической науки эти замечательные результаты в свое время не стали достоянием мирового сообщества. По сути, именно они стали началом интенсивного исследования релятивистских электронов в геомагнитной ловушке, которое развивается и сегодня.

Внешний электронный радиационный пояс, в отличие от внутреннего, весьма нестационарен. Одним из ярких проявлений его «нестационарности» являются так называемые «диффузионные волны», детально исследованные в 1960–1970-х г.г. Диффузионные волны электронов, наблюдающиеся на фазе восстановления геомагнитных бурь (рис. 20.5а), демонстрировали скорости перемещения в соответствии с «средне-возмущённым» модельным коэффициентом диффузии, что подтверждало справедливость концепции «магнитной диффузии» частиц радиационных поясов.

Однако в начале 1990-х г.г. стало очевидным, что быстрые изменения потоков электронов (и протонов) могут быть связаны с воздействием на магнитосферу одиночных импульсов давления солнечной плазмы большой амплитуды, приводящих к anomalно быстрому перемещению частиц внутрь ловушки.

ки по сравнению со скоростью переноса, определяемой «средневозмущённым» коэффициентом диффузии. Это стало очевидным после обнаружения в 1991 г. на спутнике CRRES резонансного ускорения электронов и протонов в течение секундных интервалов времени до энергий соответственно 7–15 МэВ и 40 МэВ на расстояниях 2,2–2,6 R_e (рис. 19б). Такое довольно редкое явление в радиационных поясах обусловленное, как было объяснено, возникновением мощных биполярных импульсов геомагнитного поля. В дальнейшем такие эффекты ускорения наблюдались на спутниках «Гранат» и «Метеор» и других. В целом вариации электронов данного типа укладываются в модель ускорения частиц под действием внезапных импульсов, но с необычной амплитудой и формой.

Нестационарный пояс релятивистских электронов в зазоре был недавно «заново» открыт группой исследователей на спутниках «Van Allen probes». Изучение поведения электронов субрелятивистских и релятивистских энергией исключительно важно как в развитии представлений о физических процессах, определяющих динамику частиц в геомагнитной ловушке, так и в приложениях прикладной направленности. Достаточно отметить, что до сих пор проблемы источников, механизмов транспорта и потерь этих частиц не полностью поняты и их исследования продолжаются.

На волне моей памяти...

Незабываемы годы в аспирантуре. Уже на втором году пребывания в ней мне удалось запустить свой первый прибор в космос. Моя первая поездка на космодром в Плесецк, на предстартовые испытания, навсегда врезалась в память. В чемодане я вёз свой собственный прибор для измерения радиации, который через несколько дней должен был оказаться в космосе. От сознания этого факта я был не то что в приподнятом настроении, но в самой настоящей эйфории. Не обошлось без приключений...

Раннее утро, на земле и на деревьях иней. Два человека крадутся в тайге поближе к месту старта ракеты. Это я и мой напарник вопреки правилам решили избежать эвакуации из гостиницы перед стартом и собственными глазами увидеть взлет гигантского «Союза».

Мы стояли на обрывистом берегу, прислонившись к гигантской сосне. Внизу текла прозрачная Емца. Начался рассвет. Напротив, всего метрах в трехстах, на стартовом столе возвышалась в клубах дыма ракета. Это была незабываемая картина...

Начался предстартовый отсчёт времени. За минуты до пуска мы инстинктивно начали пятиться за сосну... Но ракета не взлетела. Вскоре мы поняли, что с ракетой что-то случилось. Нас посетила мысль: а если «рванёт»? Но ничего страшного не произошло, старт не состоялся. Мой прибор не полетел. А выходя из тайги, мы нарвались на патруль. Нас ожидали часы объяснений в особом отделе воинской части. Уже потом, в гостинице, во сне, я почувствовал, что моя кровать поехала. Это, наконец, взлетела ракета...

20.4. Проблема «инжектора»

Все, кто заглядывал под капот автомобиля, знают, что в современных двигателях внутреннего сгорания инжектор — очень важный механизм, обеспечивающий впрыск топлива собственно в камеру сгорания двигателя. Также и в магнитосфере Земли: нужен «инжектор», чтобы обеспечить заполнение частицами области захвата и, что самое главное, их предускорение.

Очевидно, что одним механизмом радиальной диффузии для обеспечения ускорения частиц до тех энергий, которые имеются в радиационных поясах, явно не обойтись. Легко показать, что при транспорте частиц к Земле, находящихся, скажем, на границе радиационных поясов ($6R_e$) на расстояние до $2R_e$, их энергия возрастёт всего лишь в $(6:2)^3$, т.е. 9 раз. Частицы солнечного ветра и ионосферная плазма, проникающая в перефирийные области магнитосферы, имеют энергии, не превышающие десятки кэВ. Их энергия во время «путешествия» вглубь поясов возрастет на порядок, но не более. Этого, очевидно, недостаточно. Это означает, что надо искать дополнительные механизмы ускорения, которые смогли бы обеспечить присутствие в радиационных поясах частиц с более высокими энергиями. И такие механизмы нашлись.

Исследователи обратили внимание на магнитные бури. Именно во время этих глобальных пертурбаций магнитного поля нашей планеты происходят мощные изменения земного магнитного поля, особенно на больших расстояниях от Земли, в хвосте магнитосферы. Когда ударная волна — СМЕ приходит от Солнца наша магнитосфера на ночной стороне претерпевает гигантские изменения — её хвост вытягивается в антисолнечном направлении, утончаясь при этом. Может даже произойти слияние и разрыв магнитных силовых линий на некоторых расстояниях от Земли. Этот эффект называется пересоединением магнитных силовых линий (рис. 20.6).

Магнитное поле в этом месте становится равным нулю! Что это означает? Вспомните закон Максвелла: любое изменение магнитного поля приводит к появлению электрического. Это нам и надо. Именно электрическое поле может ускорить частицы. Модельные расчёты показывают, что в местах разрыва магнитных силовых линий могут генерироваться частицы вплоть до МэВ-ных энергий. Ну, а затем эти частицы переносятся к Земле, будучи подхваченными останавливающимся после бури магнитным полем. Так, «предускоренные» частицы из солнечного ветра и ионосферы попадают в район дипольных силовых линий на границе радиаци-



Рис. 20.6. Во время геомагнитных бурь магнитные силовые линии вытягиваются, и вдали от Земли может произойти их пересоединение, что сопровождается значительным выделением энергии и ускорением частиц.

онных поясов и затем, уже в процессе радиальной диффузии, медленно ещё более увеличивают свою энергию.

Однако этими двумя механизмами не исчерпывается перечень существующих в природе ускорителей частиц.

Есть ещё один механизм ускорения частиц, на который исследователи обратили внимание тоже сравнительно недавно. Он основан на резонансном взаимодействии электромагнитных волн, существующих в радиационных поясах и усиливающихся во время геомагнитных бурь, и тех частиц, ларморовская частота вращения которых близка к частоте этих волн. Волны могут не только «убивать» частицы радиационных поясов, рассеивая их в конус потерь, но и ускорять их!

Исследования радиационных поясов продолжаются и не исключено, что в будущем мы найдём новые космические ускорители.

Глава 21. Радиационные удары Космоса

Небо и земля разделены, но они делают одно дело.

Конфуций, мыслитель и философ

Еще до полета человека в космос было очевидно, что радиация — опасный фактор и для человека, и для животных. Длительное ее воздействие оказывает влияние и на центральную нервную систему, вызывает сосудистые нарушения, нарушает мозговое кровообращение. Специалисты в области радиационной медицины отмечают нарушения дыхательной, иммунной и ряда других систем. Это приводит к ускоренному старению и возможному сокращению продолжительности жизни.

На этом фоне начиналась эра «борьбы» с космической радиацией. Впоследствии учёные, изучая её, узнали довольно много нового и даже неожиданного...

Оказалось, что радиация в космосе создаёт немало проблем не только космонавтам, но и конструкторам космических аппаратов, создающих орбитальные станции и космические корабли. Ещё на заре космических полётов создатели спутников столкнулись с проблемой живучести солнечных батарей. Оказалось, что под действием интенсивных потоков частиц радиационных поясов они довольно быстро деградировали: их электрический ток, необходимый для питания бортовых систем, уменьшался. Пришлось их защищать — предохранять слой кремния солнечных батарей стеклом, поглощающим большую долю радиации. Но и на этом не заканчивается неблагоприятная роль космической радиации.

21.1. Радиационный климат около Земли

Частицы, захваченные в магнитное поле Земли, являются, безусловно, источником радиационной опасности. Этим были озабочены пионеры исследования космического пространства. Ещё до полёта первого космонавта на кораблях-спутниках, предшественниках «Востока» (высота их орбиты была ~350 км), ученые начали устанавливать приборы для измерения доз радиации. Оказалось, что средняя величина доз за защитой ~3 г/см² (эта физическая величина эквивалентна толщине алюминия ~1 см) составляла ~10 мрад/сутки. Был сделан вывод о радиационной безопасности космических полётов.

Сейчас мы понимаем, что основная доза радиации накапливается, когда пилотируемый корабль пролетает над районом Южной Атлантики, вблизи берегов Бразилии. Дело в том, что именно здесь расположена так называемая Южно-Атлантическая аномалия (ЮАА) магнитного поля Земли. Космические корабли с космонавтами, летая на высотах 350–450 км, казалось бы, не должны «задевать» радиационные пояса, расположенные выше таких орбит. Однако в районе ЮАА они «провисают» над Землей вследствие ослабления магнитного поля в районе аномалии, создавая пространственно-локализованную область повышенных потоков частиц радиационных поясов. Они-то, в основном, и создают те величины доз радиации, которые наблюдаются на орбитах пилотируемых космических аппаратов.

Рис. 21.1. Траектория Международной космической станции на высоте около 400 км пересекает радиационные пояса лишь в области Южно-Атлантической аномалии.

Космические корабли, летающие над Землей, как бы «чиркают» пояса радиации в течение очень непродолжительного времени (рис. 21.1) на витках, проходящих район аномалии.

На других витках потоки радиации отсутствуют и не создают, как правило, хлопот участникам космических экспедиций. За исключением

периодов во время солнечных вспышек. Но об этом ниже. И, тем не менее, на высотах полетов пилотируемых орбитальных станций (~400 км) дозы радиации превышают величины, наблюдающиеся на поверхности Земли, в ~200 раз! В основном за счёт частиц радиационных поясов.

Южно-Атлантическая аномалия магнитного поля Земли – уникальное место и заслуживает того, чтобы остановиться на нем более подробно. С точки зрения планирования космических полетов на малых высотах, следует учитывать, что этот природный феномен не стационарен во времени. Существует два типа временных вариаций радиации в ЮАА: солнечно-циклические и вековые.

Исследования на орбитальной станции «Мир» в середине 90-х годов показали, что потоки радиации в области ЮАА изменяются во времени. Дозы ради-

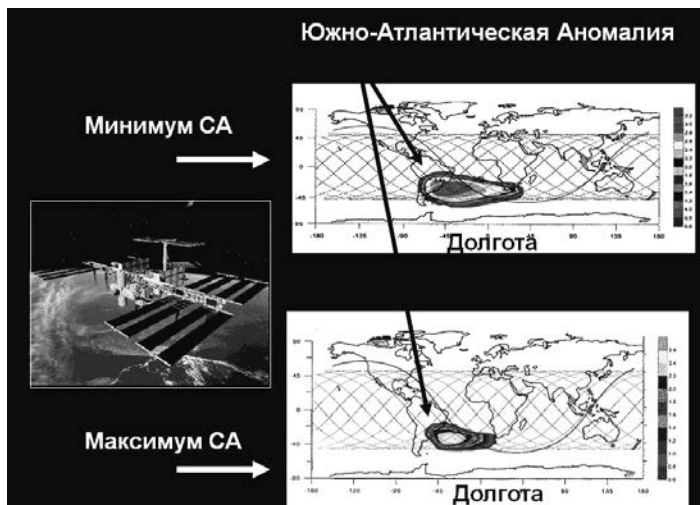
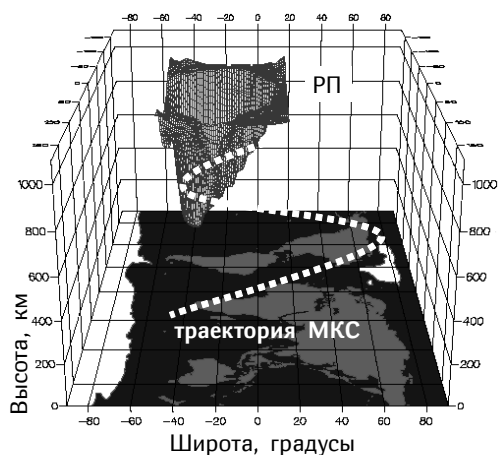


Рис. 21.2. Пространственные распределения радиации в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Дозы радиации увеличиваются в минимуме цикла солнечной активности и уменьшаются в максимуме. На рисунке приводится набор витков орбиты «Мир», которые, как это видно, лишь в течение короткого промежутка времени пересекают эту радиационно-опасную область (аналогично и для МКС).

ации на борту станции «Мир» меняются в противо-
 фазе с циклом солнечной
 активности — в минимуме
 цикла, когда Солнце обыч-
 но не проявляет значитель-
 ной активности, потоки ра-
 диации в районе ЮАА до-
 стигают максимума (рис.
 21.2). Это был довольно не-
 ожидаанный результат, т.к.
 именно в максимуме цикла

солнечной активности активизируются процессы переноса и ускорения частиц
 внутри магнитной ловушки, которые могли бы привести к увеличению пото-
 ков и в районе ЮАА. Однако этого не происходит. Причина — в изменениях
 плотности атмосферы. Именно атмосфера является «регулятором» солнечно-
 циклических вариаций потоков радиации в ЮАА. Частицы радиационных по-
 ясов, распространяясь вдоль магнитных силовых линий и достигая малых вы-
 сот, начинают взаимодействовать с атомами атмосферы, теряя свою энергию.
 В годы максимума солнечной активности атмосфера разогревается, ее плот-
 ность увеличивается на высоте полета орбитальной станции, вызывая возра-
 стание скорости потерь энергии частицами, а в минимуме солнечной актив-
 ности процесс обратный.

Другой тип вариаций связан с очень длительными изменениями величины
 и пространственного положения магнитного момента Земли. Это так называе-
 мые вековые вариации магнитного поля. На рис. 21.3 изображены карты рас-
 пределений индукции магнитного поля в разные периоды времени. Во-первых,
 очевидно, что со временем ЮАА расширяется, немного смещаясь к северо-за-
 паду. Во-вторых, поле в центральной ее части ослабевает. Что это означает для
 радиационной обстановки?

Из-за ослабления магнитного поля зеркальные точки колеблющихся вдоль
 магнитных силовых линий частиц (точки отражения) будут опускаться на бо-
 лее низкие высоты, и радиационная обстановка в ЮАА будет осложняться в
 связи с увеличением потока
 радиации на этих высотах.

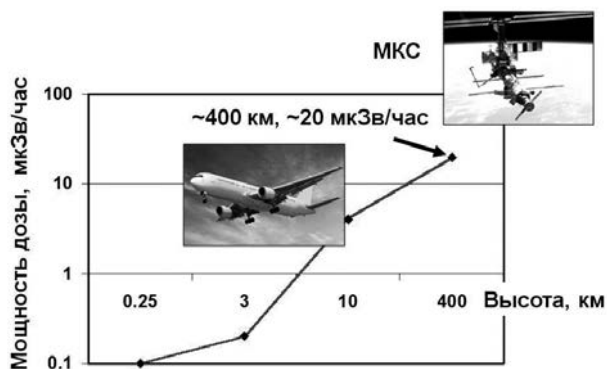


Рис. 21.4. С уменьшением высоты
 орбиты пилотируемой станции до-
 зы радиации уменьшаются.

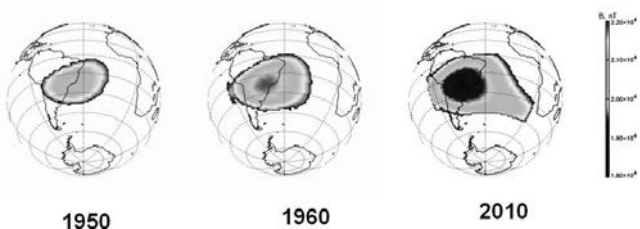


Рис. 21.3. Вековые вариации магнитного поля в районе
 Южно-Атлантической аномалии: с течением времени поле
 в аномалии на высотах около 400 км уменьшается, а са-
 ма ЮАА расширяется и дрейфует в северо-западном на-
 правлении.

Поэтому «радиационная погода» над Южной Америкой и Южной Атлантикой в последующие годы будет осложняться. И не учитывать это в прогностических моделях и расчетах радиационных доз будущих околоземных миссий нельзя.

Как долго этот процесс будут продолжаться?

Так как физика этого явления связана с пространственным положением источника магнитного поля в центре Земли, то геофизики полагают, что, возможно, совершив медленный (в течение сотен лет) дрейф сначала на запад, а потом на восток и вновь на запад, ЮАА вернется в исходное положение, характерное для начала космической эры.

Есть еще важная деталь, связанная с радиацией на низко-высотных орбитах. Взгляните на рис. 21.1. Очевидно, что чем ниже высота орбиты космического аппарата, тем меньше будет радиационная нагрузка, связанная с радиацией в районе ЮАА. На рис. 21.4 приведена зависимость доз радиации, измеренных на борту станции «Мир», в зависимости от высоты ее орбиты. Дозы радиации уменьшаются с уменьшением высоты станции. Дело в том, что с уменьшением высоты плотность атмосферы увеличивается и заряженные частицы радиационных поясов, теряя свою энергию и рассеиваясь на ее атомах и молекулах, покидают область захваченной радиации.

21.2. Другие космические факторы радиационного риска на низких высотах

Существует ещё один космический фактор, который может вызвать аналогичное временное изменение доз радиации на низких орбитах пилотируемых космических аппаратов. Это галактические космические лучи (ГКЛ).

Вспомним, что такое ГКЛ? Это протоны, ядра многих элементов и электроны, ускоренные в Галактике до гигантских энергий. Максимум потока ядер приходится на несколько сотен МэВ. Наиболее распространенный элемент в ГКЛ – водород. Поэтому главным образом протоны и определяют многие вторичные физические эффекты, связанные с воздействием ГКЛ. Среди них немаловажную роль играют радиационные эффекты.

Поток ГКЛ, по сравнению с потоком частиц РПЗ, мал и, казалось бы, они не могут определять радиационную нагрузку на космических орбитах. Однако это не вполне так. Дело в том, что эти частицы гигантских энергий, обладая большой проникающей энергией, способны преодолеть значительные толщину защиты космических аппаратов. Поэтому роль ГКЛ в определении радиационных доз по мере увеличения толщины защиты возрастает. Международная космическая станция имеет бóльшую толщину стенок гермоотсеков, чем её предшественница «Мир». Если на станции «Мир» средняя толщина стенок оценивалась в $\sim 2\text{--}3 \text{ г/см}^2$ (что соответствует толщине алюминия в $\sim 0,7\text{--}1,1 \text{ см}$), то на МКС – $8\text{--}15 \text{ г/см}^2$ ($\sim 3,0\text{--}5,5 \text{ см}$). Это соответствует эффективной энергии протонов, проникающих внутрь, соответственно, $> 50\text{--}60 \text{ МэВ}$ и $> 100 \text{ МэВ}$.

Средняя энергия ГКЛ значительно выше, поэтому, очевидно, что невозможно создать эффективную защиту от этих частиц, используя стандартные легкие материалы.

Положение усугубляется ещё одним фактором, способным увеличить радиационные нагрузки на борту космических аппаратов. Это нейтронный компонент излучения, который возникает при взаимодействии протонов (как РПЗ, так и ГКЛ) со стенками космического аппарата. Оценки и измерения показывают, что доля радиационной дозы, приходящейся на этот компонент, составляет до 30% от общей дозы при толщине защиты 3 г/см² и более. В этом плане увеличение толщины защиты, как мера борьбы с радиационными нагрузками, играет отрицательную роль – при увеличении толщины падает доза, связанная с РПЗ, практически не меняется от ГКЛ, но возрастает от локальных нейтронов.

Поток ГКЛ не постоянен. Он изменяется в соответствии с циклом солнечной активности, находясь с ней в противофазе (рис. 13.3). Это важнейший фактор, и его надо учитывать при планировании космических полетов.

На рис. 21.5. показаны измерения доз радиации на станции «Мир» и МКС, начиная с 1990 г. Хорошо видна солнечно-циклическая вариация дозы с максимумом, в 1996 г. – минимуме цикла солнечной активности. МКС начала работать вблизи максимума цикла солнечной активности и, как ожидалось, дозы радиации внутри станции должны быть небольшими. Так оно и оказалось. Затем должно было начаться постепенное увеличение доз по мере ослабления солнечной активности. Этого, однако, не произошло, по крайней мере, вплоть до 2004 г.

Вероятной причиной этому явилось особенность модуляции космических лучей, проявившаяся в 2000–2004 гг. – отсутствие монотонного увеличения потока ГКЛ на фазе спада солнечной активности. Объяснение этому явлению – в характерной структуре межпланетной среды, в которой распространяются космические лучи, а также в той экстремально высокой солнечной активности, которая наблюдалась в это время. Все это и привело к их относительно низкому потоку ГКЛ в этот период. Как следствие, на протяжении длительного времени, с 2000 по 2004 г.г. наблюдались относительно низкие величины доз радиации на МКС.

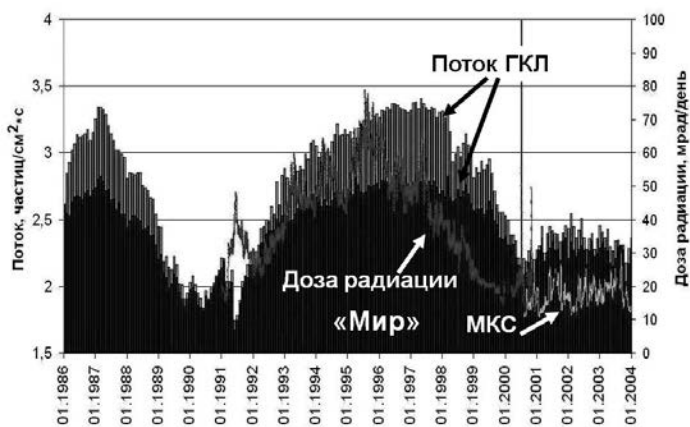


Рис. 21.5. Дозы радиации по данным дозиметров космической радиации в течение времени активного существования станции «Мир» и в начальный период работы МКС. Большая амплитуда вариаций радиационных доз в течение цикла солнечной активности 1991–2001 г.г. обусловлена солнечно-циклической вариацией частиц радиационных поясов Земли и галактических космических лучей.

Относительно низкая доза для МКС, начиная с 2001г., – аномально высокой солнечной активностью в этот период времени и, как следствие, низким уровнем потока ГЛ и частиц радиационных поясов в районе ЮАА.

Но ГЛ не единственный «внешний» компонент радиационного окружения Земли. Хорошо известно, что наше Солнце является ускорителем частиц до значительных энергий. Солнечные вспышки, генерирующие подчас весьма энергичные частицы (вспомнили? – вплоть до ГэВ'ов), могут создать большие сложности для полётов космонавтов. Какая доза радиации может быть получена космонавтом в случае прихода солнечных частиц к Земле – во многом воля случая. Эта величина определяется, в основном, двумя факторами: степенью искажения дипольного магнитного поля Земли во время магнитных бурь и параметрами орбиты космического аппарата в течение солнечного события. Депрессия магнитного поля во время бурь уменьшает минимальный порог обреза по жёсткости СКЛ, позволяя им проникать на низкие широты. С другой стороны, соответствие географического положения космического аппарата относительно начала возрастания солнечных частиц – действительно немаловажный фактор. Экипажу может повезти, если орбита в момент вторжения СКЛ не проходит опасных высокоширотных участков.

Выше рассказано о возможной опасности, которую может вызвать космическая радиация. Насколько защищены от радиации космические станции, спутники и сами космонавты? Давайте рассмотрим эту проблему на примере некоторых наиболее сильных проявлений солнечной активности.

Одно из наиболее мощных протонных извержений, вызвавшее радиационную бурю вблизи Земли, произошло 20 января 2005 г. Аналогичное по мощности солнечное извержение было 16 лет назад, в октябре 1989 г. Множество протонов с энергиями, превышающими сотни МэВ, достигли магнитосферы Земли. Кстати, такие протоны способны преодолеть защиту толщиной эквивалентной примерно 11 см воды. Скафандр космонавта тоньше. Специалисты считают, что если в это время космонавты оказались бы вне Международной космической станции, то, безусловно, воздействие радиации сказалось бы на здоровье космонавтов. Но они находились внутри неё.

Защита МКС достаточно велика, чтобы обезопасить экипаж от неблагоприятного воздействия радиации во многих случаях. Так было и во время данного события. Как показали измерения с помощью радиационных дозиметров, «схваченная» космонавтами доза радиации не превышала той дозы, которую человек получает при обычном рентгеновском обследовании. Космонавты МКС получили 0,01 Гр или ~0,01 зиверт (для биологических объектов целесообразней использовать биологические эквиваленты доз в единицах, учитывающих различие в степени поглощения различных видов излучений в биологических тканях (см. словарь терминов в конце книги)). Правда, столь малые дозы связаны и с тем, что станция находилась на «магнитно-защищённых» витках, что может случаться не всегда.

В таблице 1 приводятся значения доз радиации, приводящих к возникновению определённых радиационных эффектов.

Таблица 16.1. Таблица радиационных рисков

Доза, Зв	Вероятные эффекты
0–0,25	Нет эффекта, за исключением умеренных изменений в крови
0,25–1	Радиационные заболевания у 5–10% облучённых людей
1–1,5	Радиационные заболевания у ~25% облучённых людей
1,5–2	Радиационные заболевания у ~50% облучённых людей
2–3,5	Радиационные заболевания, ~20% с летальным исходом
4	50% летальных исходов
7	~100% летальных исходов

Несколько зивертов – громадная и опасная доза. Однако и эта доза, если она получена человеком не мгновенно, а постепенно, может и не привести к неблагоприятному исходу. К тому же, не надо забывать о возможной медицинской помощи в случае радиационного заболевания.

Поэтому можно заключить, что радиационная среда на высотах орбитальных станций при самых неблагоприятных гелиофизических условиях, вряд ли может привести к последней черте – дозам в несколько зивертов.

На волне моей памяти...

Однажды я напрямую столкнулся с ситуацией возможного опасного воздействия радиационной обстановки в космосе на осуществление космического эксперимента. Это случилось за несколько часов до старта ракеты, которая должна была доставить 20 января 2005 г. в космос наш спутник «Университетский – Татьяна».

Перед самой посадкой в самолет, который должен был доставить нас в Плесецк, я узнал, что после сильнейшей солнечной вспышки на Солнце, произошедшей накануне, в районе Земли могут оказаться мощнейшие потоки протонов солнечных космических лучей. Если они проникнут на высоты орбиты нашего спутника, то их воздействие на электронику могло сказаться самым негативным образом. А вероятность этого была чрезвычайно велика – спутник запускался на полярную орбиту и протоны могли легко «задеть» его в районе полярных шапок.

Я летел вместе с ректором МГУ В.А. Садовничим и Командующим космическим войсками В.А. Поповкиным. До запуска оставалось часов пять. Я некоторое время размышлял: доложить ли об этом Командующему? Но решил этого не делать. Принятие решения относительно старта ракеты на этой стадии, за несколько часов до старта, – чрезвычайно ответственное решение, которое должно быть четко аргументировано и регламентировано. Этого на тот момент времени не было. Кроме этого, мы «летели» попутной нагрузкой вместе с военным спутником и ради нас никто не стал бы принимать решение о переносе запуска.

Старт состоялся вовремя. Уже на первом витке наш спутник «ощутил» воздействие потоков протонов от солнечной вспышки. Это было

редкое, самое мощное солнечное протонное событие за последние несколько лет. «Татьяна» выдержала. Спутник был назван в честь Великой мученицы Татьяны, и в этом смысле он оправдал свое имя — наша «Татьяна» реально «помучилась» уже на первых витках своей жизни в космическом пространстве.

Однако надо понимать, что такие счастливые события происходят далеко не всегда. Известно много случаев выхода из строя спутников из-за воздействия радиации. Поэтому система прогноза радиационной обстановки в космосе и предупреждения о ее опасности должна существовать и работать.

Чем же определяется радиационная обстановка вдали от нашей планеты?

21.3. Радиационные бури на окраине околоземного пространства

До сих пор мы рассматривали относительно малые высоты над Землей. Гораздо более опасными с точки зрения радиационного влияния оказываются высоты выше «пилотируемых» орбит. Здесь космонавты не летают. Но эта область, вплоть до $7R_e$, весьма плотно «населена» автоматическими космическими аппаратами. Как они «выживают»? Конечно, в основном за счёт применения специальной защиты электроники, использования материалов наименее чувствительных к радиации.

Однако, проблема радиационной безопасности автоматических аппаратов всё же актуальна. Перед конструкторами стоит задача создания нового поколения околоземных спутников со сроком активного существования (САС) до 15 лет и более. Согласитесь, это немало, больше, чем солнечный цикл. Такой аппарат должен в полной мере испытать на себе воздействие космических радиационных бурь. Ну, а если задуматься о путешествиях к далеким звездам, то САС окажется несоизмеримо больше.

Помимо вторжения солнечных частиц, радиационные бури создают и частицы радиационных поясов. Их потоки меняются во время магнитных бурь и солнечных возмущений. В качестве примера можно привести поведение релятивистских электронов в радиационных поясах. На рис. 21.6 показано «поведение» электронов во всей области поясов в течение одного года. Масштабы вариаций во время магнитных бурь очень значительны как по интенсивности,

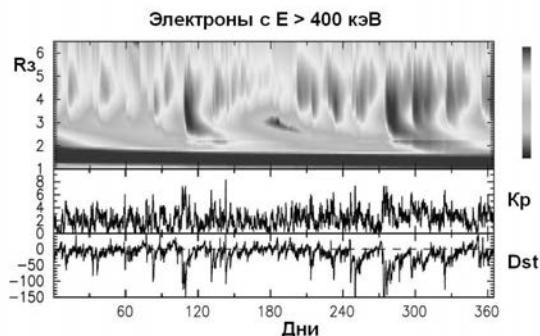


Рис. 21.6. Изменения потоков электронов с энергией >400 кэВ в радиационных поясах в течение 1 года. Оттенки серо-чёрного цвета демонстрируют изменение потока частиц: чем чернее оттенок, тем больше поток частиц. Видно, что наибольшие потоки частиц наблюдаются во время магнитных бурь (см. индексы Dst, Kp). В эти моменты времени они также заполняют зазор между внутренней и внешней зонами радиации на расстояниях $\sim 2,5R_e$.

так и пространственные. Во время бурь потоки частиц «сползают» ближе к Земле, заполняя ранее пустовавшие области захваченной радиации.

Обнаружено, что их потоки сильно увеличиваются во время магнитных бурь и в периоды увеличения скорости солнечного ветра. Они создают реальную угрозу спутникам, находящимся в зоне всплесков их потоков. Подчас это заканчивается весьма плачевно для спутников. Уже отмечено довольно много случаев, когда выход из строя отдельных систем спутников или даже прекращение их функционирования связано с резким усилением потока релятивистских электронов. Представьте себе мощный поток электронов с энергией в несколько МэВ, способный насквозь пробить оболочку спутника и создать большой поток вторичного тормозного излучения, состоящего из низко-энергичных гамма-квантов. Электроника спутника может не выдержать...

Одно из последствий воздействия энергичных электронов показано на рис. 21.7. Электронный пучок таких частиц, проникая внутрь неметаллических конструкций (например, пластика), вызывает в них внутренний электрический пробой. Образуется повреждение – очень красивая фигура Лихтенберга. Можно представить последствия воздействия такой «красоты» на бортовую электронику спутника, где довольно много пластиковых деталей. Недаром энергичные электроны называли «киллерами» спутников.

На рис. 21.8. наглядно демонстрируется связь наблюдающихся аномалий функционирования спутника и изменения потока релятивистских электронов. Спутники терпят бедствия, когда в космосе появляются мощные потоки этих частиц.

Именно потому, что радиация в космосе является одним из наиболее неблагоприятных факторов, влияющих на выполнение полётных заданий, будь

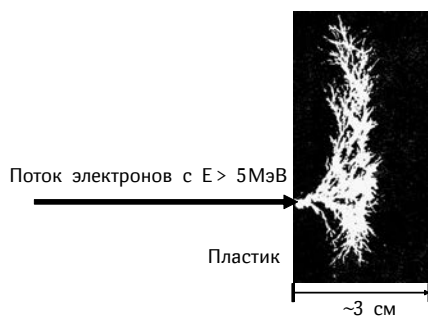


Рис. 21.7. Радиационный эффект воздействия релятивистских электронов – внутренний электрический пробой в пластике.

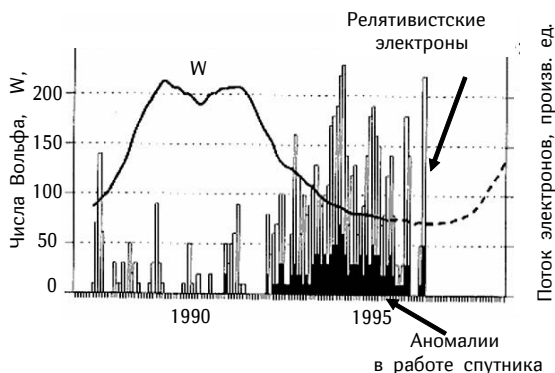


Рис. 21.8. Изменения потоков релятивистских электронов ($> 5 \text{ МэВ}$) в радиационных поясах, частота наблюдаемых аномалий в работе спутника и изменения солнечной активности. Аномалии в работе космического аппарата увеличиваются с ростом потоков релятивистских электронов.

Рис. 21.9. Географическое распределение случаев высоковольтных разрядов – пробоев в электронике одного из спутников. Расположение этих событий в точности совпадает со структурой внешнего электронного радиационного пояса, где присутствуют в значительных количествах релятивистские электроны – «киллеры».

то экипаж или сам космический корабль, ей уделяется особое внимание ещё на этапе проектирования. По-

мимо поиска и применения различных радиационно- стойких защитных материалов, дублирования и даже «троирования» электроники, на борту практически всех космических аппаратов устанавливают дозиметрическую аппаратуру, которая позволяет операторам на Земле отслеживать радиационную обстановку в космосе и, если это необходимо, проводить изменения в полётном задании, чтобы минимизировать возможный ущерб. Иногда даже простое выключение энергопитания всего спутника или отдельных его систем позволяет сохранить ему жизнь.

Эффект воздействия высокоэнергичных электронов на бортовые системы космических аппаратов очевиден. На рис. 21.9. показано географическое распределение случаев высоковольтных пробоев в электронике одного из спутников.

География этих событий в точности совпадает со структурой внешнего электронного радиационного пояса. Не зря эти частицы, обладающие большой проникающей способностью в веществе и в большом количестве присутствующие в радиационных поясах, называли «электроны – киллеры». Именно они создают много проблем и конструкторам космических аппаратов, и специалистам, их обслуживающим в полете. В США, в Центре космической погоды в Боулдере, даже распространяют по всему миру алертные сообщения о наступлении периодов времени, когда поток этих частиц – «киллеров», начинает превосходить опасный уровень. Это должно помочь сохранить работоспособность дорогостоящего космического аппарата. Как правило, это достигается путем введения его целиком или частично в «спящий» режим по энергопотреблению.

21.4. Нейтронный ореол Земли

Несмотря на свою короткую жизнь, нейтроны, безусловно, присутствуют в межзвёздной среде, Галактике и в Солнечной системе. Но зарегистрировать мы можем лишь те, которые рождаются близко от нас.

Солнце – мощный источник многих элементарных частиц, ядер и, конечно, нейтронов. Последние образуются в результате ядерных реакций СКЛ с

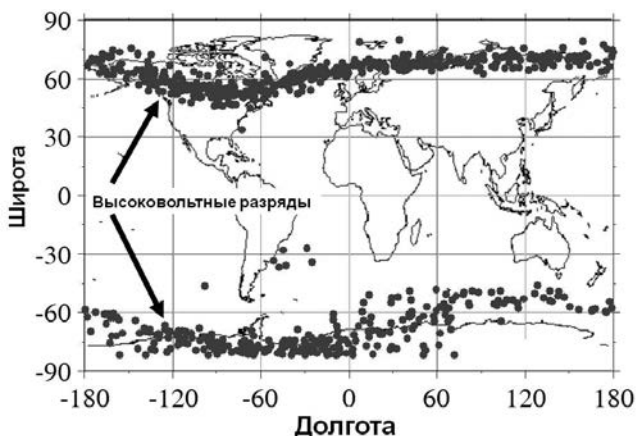
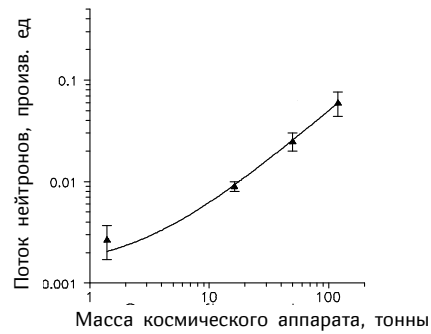


Рис.21.10. Поток вторичных (локальных) нейтронов, возникающих в результате ядерных реакций галактических космических лучей с материалом корпуса спутника в зависимости от его массы.



веществом солнечной короны. Однако наблюдать нейтроны от Солнца достаточно трудно. В первую очередь, дело в том, что из-за короткого времени жизни лишь небольшая часть их достигает Земли. А те, которые всё же попадают в атмосферу, начинают взаимодействовать с ядрами воздуха, превращаясь в другие частицы. И всё же есть шансы их зарегистрировать специальными детекторами.

Во время мощных солнечных событий самые энергичные электроны могут достичь окрестности Земли, и приборы на спутниках могут их зарегистрировать. Но приборы должны быть очень чувствительны к нейтронам, приходящим именно от Солнца. А этому мешает сам спутник, точнее, те конструкционные материалы, из которого он построен. Оказывается, чем тяжелее (массивнее) спутник, тем больше образуется нейтронов местного, локального происхождения, как результат взаимодействия заряженных космических частиц с материалом, из которого сделан аппарат (рис. 21.10)

Поэтому нейтронный детектор будет «захлёбываться» от избытка лишних, локальных нейтронов, рождённых самим спутником. Однако, если поток солнечных нейтронов достаточно мощный и эксперимент проводится на достаточно лёгком спутнике, шанс зарегистрировать солнечные частицы есть. И это было сделано уже много раз.

Солнечные нейтроны несут важную информацию о генерации частиц на Солнце. Ведь они, будучи нейтральными, не следуют вдоль спиралей Архимеда межпланетного магнитного поля как заряженные частицы, а летят по прямым траекториям. Этот путь требует меньшего времени и может дать информацию о начале и месте инжекции частиц на Солнце, а заодно и сведения о параметрах вещества солнечной короны, где они сами и рождаются.

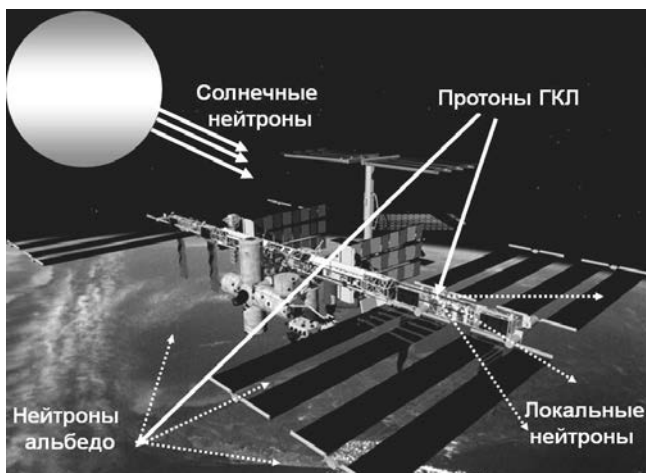


Рис. 21.11. Нейтронные потоки в ближнем космосе состоят из трёх компонентов: нейтронов от солнечных вспышек, а также локальных и альбедных нейтронов, рождающихся в результате взаимодействий ГКЛ с материалом корпуса самого космического корабля и с атомами азота и кислорода атмосферы.

А есть ли шансы зарегистрировать солнечные нейтроны на Земле? Шансов ещё меньше, чем в космосе. Этому мешает атмосфера, в толще которой должны погибнуть эти частицы. Однако во время очень мощных извержений (так, например, было в конце октября 2003 г.) на наземной станции, обращённой к Солнцу, в районе полудня был зарегистрирован сигнал о приходе солнечных нейтронов с очень высокой (~ 100 МэВ) энергией. В этом был элемент везения: если бы извержение произошло раньше или позже, солнечным нейтронам пришлось бы преодолевать значительно большую толщу атмосферы, и они вряд ли достигли бы поверхности Земли. Именно поэтому события, связанные с приходом солнечных нейтронов, чрезвычайно трудно экспериментально исследовать.

Уже рассказывалось об альбедных нейтронах в окружающей космической среде. Это те частицы, которые являются продуктами ядерных реакций космических лучей с атмосферой. Они вылетают из атмосферы и создают дополнительный радиационный «фон» в ближнем космосе.

Поэтому космический аппарат, запущенный в ближний космос, испытывает тройную радиационную нагрузку от нейтронов. Среди них локальные, альбедные, а иногда, и солнечные (рис. 21.11).

21.5. «Человечество не останется вечно на Земле....» (О радиационной опасности дальних космических миссий)

Так писал К. Циолковский. Человек уже побывал на Луне. Недалеко время, когда вновь возобновятся полёты на нашу спутницу, а затем, вероятно, и на Марс. Что представляет собой большую радиационную опасность в открытом космосе: ГКЛ или СКЛ? Это актуальная проблема планирования космических миссий в межпланетной среде.

Солнечные вспышки возникают случайным образом, и даже не очевидно, что мощные солнечные вспышки возникают в годы, близкие к максимуму активности. Экспериментальные данные наглядно демонстрируют, что генерация СКЛ происходит и во времена затухающего светила. Это видно из данных, приведенных на рис. 21.12.

Протоны солнечных вспышек несут реальную угрозу космическим экипажам дальних миссий. Но человек был в открытом космосе вне земной магнитосферы и полетит туда вновь. Как защититься от воздействия солнечных протонов, которые, в

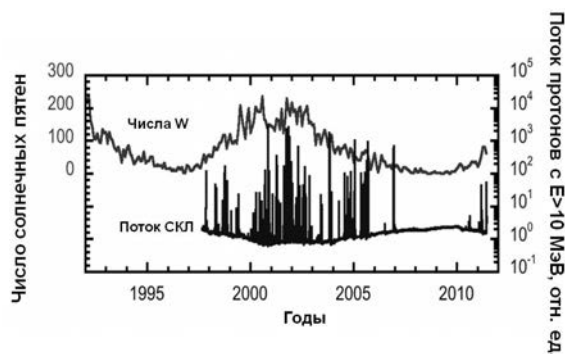


Рис. 21.12. Потоки СКЛ с энергией $E > 10$ МэВ и изменение солнечной активности с 1992 по 2012 г. (числа Вольфа, W). Мощные потоки СКЛ генерируются не только в годы максимума солнечной активности, но и на стадиях ее роста и спада.

отличие от Земли, бомбардируют и корабль и человека вне его, не испытывая никаких преград?

Здесь уместно вспомнить полёты американских «Apollo» к Луне в конце 60-х – начале 70-х. В августе 1972 г. была такая же по мощности вспышка на Солнце, как и в октябре 1989 г. «Apollo-16» приземлился после своего лунного путешествия в апреле 1972 г., а следующий – «Apollo-17» стартовал в декабре. Повезло экипажу «Apollo-16»? Безусловно, да. Расчёты показывают, будь астронавты «Apollo» в августе 1972 г. на Луне, они бы подверглись облучению с дозой радиации в ~4Зв. Это очень много, чтобы спастись. Если... если быстро не возвратиться на Землю для экстренного лечения. Доза радиации в единицах зиверт – так называемая «эквивалентная доза», учитывающая биологические эффекты воздействия радиации различных типов с помощью «фактора качества» – Q.

Другой вариант – перейти в кабину лунного модуля «Apollo». Здесь доза радиации уменьшилась бы в 10 раз. Для сравнения скажем, что защита МКС в 3 раза толще, чем лунного модуля «Apollo». В таблице 21.2 приводятся типичные величины защиты для разных космических аппаратов и скафандров.

Таблица 21.2. Толщины защит космических аппаратов и скафандра космонавта*

Космический аппарат	Толщина, г/см ²
Командный модуль «Apollo»	7–8
«Shuttle»	до 10–11
МКС	до 15
Скафандр космонавта	0,25

*Обычно, толщину защиты оценивают в единицах, представляющих собой произведение плотности вещества ρ (г/см³) на его геометрическую толщину в см, т.е. в г/см². Таким образом удобно сравнивать длину пробега частицы для разных веществ.

Возможный сценарий неприятных последствий сверхмощной вспышки типа августа 1972 г. показан на рис. 20.13. Только убежище на Луне или жилой



Рис. 21.13. Если бы на Солнце произошла такая же грандиозная вспышка, как это было в августе 1972 г., то космонавты, находящиеся в это время в открытом космосе или на поверхности Луны, могли бы получить летальные дозы радиации (4Зв). Защита современной орбитальной станции и будущих жилищ-убежищ на Луне значительно снижает риск радиационных облучений даже от таких мощных вспышек.

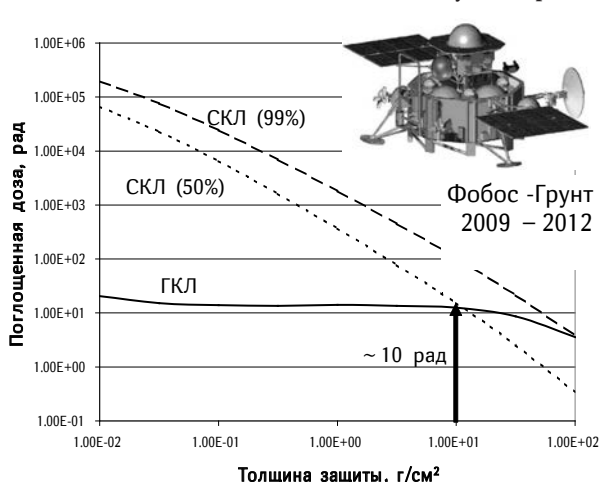
отсек на орбитальной станции может спасти космонавтов от губительного воздействия радиации такой вспышки.

Будущие исследователи Луны или Марса (ведь эти небесные тела практически без магнитного поля) также должны заблаговременно позаботиться об укрытии в убежищах от космической радиации во время солнечных вспышек. Из того, что сказано выше, следует, что свести риск радиационного поражения к нулю в течение такого длительного космического полёта, каким является путешествие на Луну или Марс, нельзя.

Но его можно минимизировать. Во-первых, необходимо правильно спланировать полёт. Мы с вами уже видели, что во время максимума цикла солнечной активности поток ГКЛ будет минимальным вследствие солнечной модуляции (рис. 13.3). Поэтому старт экспедиции, если опираться только на проблему радиационной опасности от ГКЛ, надо выбирать именно в это время. Во-вторых, необходимо обеспечить надежную защиту корабля. Правильно выбранная защита, безусловно, значительно снизит радиационные дозы от СКЛ, даже во время сильных вспышек. Ну, а если конструкторы космического корабля предусмотрят специальный отсек-укрытие с более мощной защитой, это ещё больше снизит риск радиационного поражения. Но, в основном, только от относительно низкоэнергетичного компонента космических лучей — солнечного.

Но здесь я должен оговориться. Дело в том, что сейчас является актуальным для космической науки вопрос: достаточно ли хорошо мы знаем физические характеристики СКЛ — максимальную энергию частиц, входящих в их состав? Во время мощных солнечных событий на Солнце могут генерироваться частицы с энергиями, сопоставимыми с энергиями ГКЛ вплоть до нескольких ГэВ, а иногда и больше.

Достаточно достоверных экспериментов в этой области энергий пока нет. Это означает, что те эмпирические модели, которые закладываются в основу расчетов радиационной защиты, являются предметом, как всегда это бывает в таких случаях, споров среди специалистов. Тем не менее, сейчас все больше специалистов склоняется к тому, что роль высокоэнергетичных СКЛ при рас-



чета радиационных доз недооценена. Как результат, становится очевидным, что максимум солнечного цикла не является приемлемым периодом, с точки зрения миними-

Рис. 21.14. Модельные расчеты относительного вклада в радиационные дозы потоков частиц ГКЛ и СКЛ (для разной вероятности их генерации на Солнце) для периода 2009–2012 г.г. Только при больших толщинах защит космического аппарата дозы от ГКЛ начинают преобладать.

зации радиационного риска, для осуществления долговременных межпланетных полетов. Очевидно, что именно это обстоятельство важно учитывать и при расчетах оптимального времени начала и продолжительности долговременных экспедиций на Луну или Марс.

Вернемся к вопросу, поставленному в начале этого раздела: какие частицы более опасны для космических миссий СКЛ или ГКЛ?

Казалось бы, что ответ очевиден. Потоки СКЛ, имея в среднем меньшую энергию, чем ГКЛ, и возникающие случайно и в течение относительно непродолжительного времени на фоне постоянного модулированного Солнцем потока ГКЛ, не могут создать дозовых нагрузок на шкале времени ~ 1 год и более, сопоставимой со временем полёта на Марс или продолжительностью длительной экспедиции на Луну. Однако, здесь тоже не так всё просто...

Один из результатов модельных расчётов приведен на рис. 21.14.

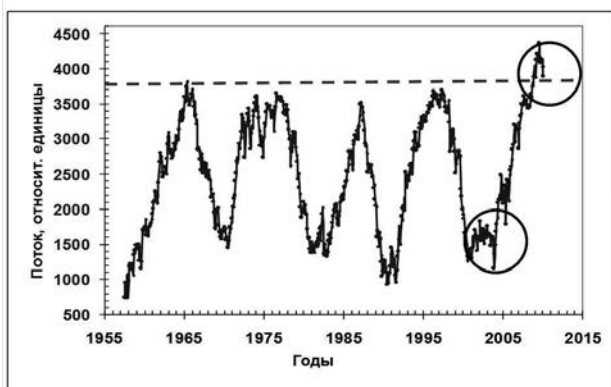
Расчеты наглядно демонстрируют, что для типичной экспедиции на Фобос, спутник Марса, длительностью около 3,5 лет (с октября 2009 г. по август 2010 г.) в период максимума цикла солнечной активности, главным фактором радиационного риска являются СКЛ, а не ГКЛ. Причём этот вывод справедлив как для периодов минимума, так и максимума солнечной активности и при толщине защите вплоть до 10 г/см^2 ($\sim 3,7$ см алюминия).

Расчётные величины поглощённых доз радиации зависят от конкретной конструкции космического аппарата. Для того же космического аппарата «Фобос-Грунт» эти значения могут изменяться от $3 \cdot 10^4$ рад на поверхности КА до 10^2 рад внутри него для «средних» условий (50% вероятность появления СКЛ в межпланетной среде) и до 10^5 рад на поверхности при «предельных» условиях (99%). Под защитой $\sim 10 \text{ г/см}^2$ величина дозы составит ~ 10 рад. Много это или мало? По нашим расчётам в тот же период времени (т.е. с октября 2009 г. по август 2012 г.) на МКС под аналогичной защитой (10 г/см^2) величина поглощённой дозы составила бы ~ 70 рад). Здесь, под «броней» магнитного поля, дозы радиации определяются преобладающим воздействием частиц радиационных поясов Земли, а доза от ГКЛ и СКЛ составит $\sim 20\%$ от суммарной.

Итак, для того чтобы прогнозировать радиационные условия для длительной космической экспедиции в будущем, надо иметь прогностические модели, описывающие поведение разных компонентов радиации во времени (в данном случае это СКЛ и ГКЛ).

В настоящее время существует ряд моделей ГКЛ и СКЛ, служащих основой прогноза расчёта радиационных дозовых нагрузок для длительных космических экспедиций на Луну и Марс. В основе моделей ГКЛ лежат обобщённые аналитические зависимости модуляционной кривой (рис. 13.3) изменения потоков ГКЛ, а для моделей СКЛ – вероятностная зависимость появления потоков СКЛ в межпланетном пространстве. Именно в этом – вероятностном представлении искомых потоков СКЛ, возникающих случайным образом на Солнце – отличительная особенность прогностической модели СКЛ. Исходным параметром для моделей СКЛ и ГКЛ является солнечная активность, описываемая, как правило, числом солнечных пятен (числами Вольфа). Зная параметр, харак-

Рис. 21.15. Модуляция галактических космических лучей (протоны): в период 2001–2010 наблюдалась аномальная вариация ГКЛ, не учтённая в существующих моделях.



теризующий солнечную активность, можно оценить дозы, создаваемые ГКЛ и СКЛ.

Сейчас накоплен богатый материал по временным вариациям ГКЛ, связанным с солнечным циклом. Именно это обстоятельство и позволило создать модель, на основе которой удаётся предсказать поток ГКЛ на любой заданный вперёд период времени.

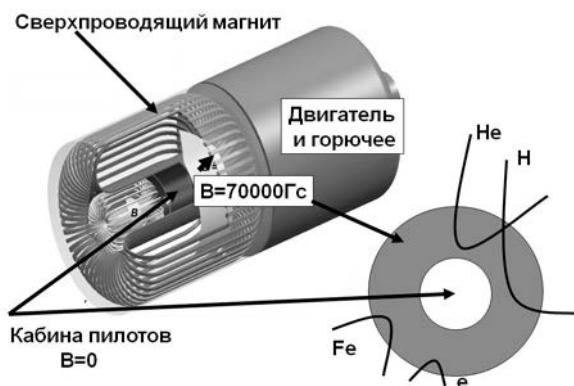
Однако, природа не может позволить ученым долго покоиться на лаврах... Конец нулевых нового столетия принес нам сюрприз.

Солнце вдруг надолго затихло. Снижение солнечной активности продолжалось несколько лет, — начиная с 2006 г., после нескольких лет бурной активности, наша звезда решила отдохнуть. Следующий максимум цикла не только запоздал, но и оказался уникально малым по числу пятен. Это была аномалия, которая, впрочем, продолжается и до сих пор. Это явление привело к тому, что поток ГКЛ возрос по сравнению с ожидаемым на 20 % (рис. 21.15). Это незначительная величина для радиационных доз во время кратковременных полётов, но, безусловно, ею нельзя пренебрегать при расчетах радиационных рисков долговременных экспедиций.

Из какого материала может быть создана защита корабля? Это очень актуальный вопрос для конструкторов космических аппаратов. Наиболее распространённый в космических кораблях материал — алюминий, в силу своего малого удельного веса и высокой прочности. Расчёты показывают, что можно создать межпланетный корабль с разумным весом и достаточно эффективной защитой от СКЛ. Разрабатываются новые виды защитных материалов, которые будут более эффективны, чем алюминий. К ним относятся, например, водородосодержащие пластики (например, типа полиэтилена). С помощью таких материалов можно создать защиту, которая при толщине 7 см будет уменьшать дозу радиации на 30–35 %. Но этого мало, и следует либо увеличивать толщину защиты, либо уменьшать длительность полёта. Если увеличение толщины защиты это дополнительная масса и, как следствие, — энергозатраты, то сокращение длительности полёта можно достичь, применяя, например, ядерные двигательные установки. Но это перспектива развития космонавтики.

Есть ещё один способ борьбы с этой проблемой — медикаментозный. Вполне вероятно, что будущие марсианские пилоты будут снабжены эффективными противорадиационными препаратами.

Рис. 21.16. Проект космического корабля с магнитной защитой для полёта на Марс. Тороидальный сверхпроводящий магнит с напряжённостью поля не позволит большей части космических лучей проникнуть в кабину пилотов, расположенную внутри магнита, и, тем самым, снизит суммарные дозы радиации от ГКЛ в течение всего полёта в несколько раз.



И всё же: как уменьшить риск радиационного поражения от ГКЛ при длительном космическом полёте? Неужели нет никаких вариантов? На самом деле, ещё на заре космических полётов учёные и инженеры думали о технических средствах борьбы с радиацией. И в этом плане изучение возможности использования искусственных магнитных и электрических полей играло первостепенную роль.

Вспомните нашу планету с её магнитным полем. Именно магнитное поле не позволяет большой доле космических лучей достичь Земли. Ну, а если вокруг космического корабля создать искусственное магнитное поле?

Такие проекты есть. Посмотрите на рис. 21.16. На нём изображён магнит с максимальной напряжённостью поля 70 000 Гс. Внутри и вне этого магнита поле приближается к нулю (это обеспечивается специально разработанной конструкцией). Такой магнит «отметёт» большую долю ГКЛ — как протонов, так и ядер. Расчёты показывают, что его применение позволит снизить в 3–4 раза дозу радиационного облучения за 2,5-летнюю экспедицию на Марс. Это немало. Аналогичное снижение дозы возможно, конечно, и с использованием алюминиевой защиты.

Однако масса только одного пилотируемого корабля с такой защитой должна весить более 30 тонн! Но как создать такое мощное магнитное поле? Это можно сделать только с использованием сверхпроводящих магнитов. Вы скажете — фантастика? Нет. Прообраз такого магнита был создан, и его планировали использовать в эксперименте AMS-02 исследования космических лучей на борту Международной космической станции. Так что, казалось бы, от фантастической идеи до её реализации, путь не такой уж и большой.

21.6. Радиационный риск космических одиссей, или будут ли на «Марсе яблони цвести»?

Проблема радиационного риска при дальних космических полётах продолжает быть актуальной. Это обусловлено возможностью генерации частиц сверхвысоких энергий во время экстремальных событий на Солнце, и «неограниченная» проникающая способность ГКЛ, наряду с генерацией ими вторичных ядерно-активных частиц, в первую очередь нейтронов, которые не толь-

ко относительно «легко» распространяются в веществе, но и рожают новые частицы.

Что касается ГКЛ, здесь необходимо добавить еще одну проблему. Дело в том, что помимо протонов, в их составе есть ядра многих элементов. Сейчас очевидно, что эти ядра (в основном, группы железа), несмотря на их незначитель-

В 2011 г. американцы запустили очередной космический зонд Mars Science Laboratory (MSL) в сторону Марса. На его борту был прибор для измерений доз космической радиации. Судя по опубликованным ими статьям, они были немало удивлены тем, что эквивалентные дозы радиации, зарегистрированные прибором, были значительно больше ожидаемых. Согласно их измерениям доза радиации в течение 253 дневного полета на Марс (в условиях солнечной активности 2011–2012 г.) составила 0,66 Зв. Нетрудно видеть, что эта величина представляет собой значительную долю предельной дозы для человека в космосе за всю его карьеру (~0,6–1,2 Зв) и практически совпадает с ее нижней границей. Основной вывод, который сделали авторы эксперимента, состоит в том, что экспериментально измененные дозы радиации при экспедиции на Марс оказались вблизи верхнего предела допустимых в НАСА норм.

Однако здесь следует заметить, что большая доля измеренной дозы приходилась на ГКЛ – 95% и только незначительная доля на СКЛ: за все время полета на Марс и обратно наблюдалась всего одна вспышка СКЛ. Но это был период аномально низкой солнечной активности, а в другие периоды вклад СКЛ в суммарную дозу, очевидно, будет больше. Соответственно, радиационный риск марсианской одиссеи еще больше возрастет.

В связи с этим вспомним радиационный эффект солнечной вспышки августа 1972 г. (рис. 21.10): такие события нельзя исключить из оценки радиационного риска.

ное количество (по отношению к протонам их всего 10^{-4} – 10^{-5}) вызывают нарушения ДНК, которые могут привести к нежелательным генетическим изменениям и онкологическим заболеваниям. Риск от воздействия этих частиц следует добавить к риску от облучения протонами ГКЛ и СКЛ. Пока, однако, не ясно, как он велик. (Более подробно см. Главу 22).

Космический полёт, как и всякая другая деятельность человека, это – риск. Надо уметь правиль-

но оценить величину этого риска и сопоставить с другими рисками деятельности человека. И на основе этого принимать решение о выполнении проекта.

Полагают, что риск смерти от поражения электрическим током составляет в течение года 10^{-6} , а от ДТП – 10^{-4} . Последняя величина эквивалентна воздействию годовой дозы 10^{-1} рад/год. Космонавт при полёте на Марс может, как это мы видели выше, даже под защитой 10 г/см² в течение года может «набрать» нескольких рад.

Это означает, что риск такого полёта, как минимум в несколько десятков раз, превышает риск смерти от ДТП на Земле. Известно, что фактические годовые радиационные дозы для лиц, проживающих в окрестности атомных электростанций, от аэрозольных выбросов составляют всего 10^{-5} – $2 \cdot 10^{-3}$ рад/год (!). Согласитесь, это намного меньше, чем в космосе. Однако возникает вопрос о справедливости сопоставления этих рисков. Но это вопрос к специалистам по космической биологии.

Космические агентства России, Канады и Европейского союза приняли в качестве предела допустимой дозы для космонавтов в течение всей их актив-

ной карьеры величину 1 зиверт¹. Специалисты НАСА, например, оценивают радиационный риск в единицах канцерогенного риска. Считается, что риск заболеть раком (до конца жизни) для 40-летнего некурящего американца составляет 20%. Полет на Марс в течение 1000 дней, как они полагают, может добавить еще от 1 до 19%. Однако ясно, что 39% — недопустимый риск.

Вся история развития космической физики демонстрирует тот факт, что нет орбит космических аппаратов, областей пространства и интервалов времени, которые были бы полностью безопасны. Проблема лишь в том, насколько мощны эти эффекты.

Человек — единственное на нашей планете существо, которое стремится туда, где жить невозможно. Возьмите, к примеру, Южный полюс в Антарктике, где даже пингинов нет, Мариинскую впадину или стратосферу. Поэтому не будет ничего удивительного, если в недалеком будущем мы окажемся свидетелями старта ракеты с человеком на борту с траекторией полета на Марс. Но не будет ли он обладателем билета в одну сторону?

Поэтому разумно уделить большее внимание развитию моделей радиации окружающей среды с целью их дальнейшей верификации, оценкам степени риска и разработке методов радиационной защиты, прежде чем «запускать на поток» дальние пилотируемые космические полёты или строить долговременные станции на Луне или Марсе.

Не будем столь пессимистичны — производная прогресса науки и технологий в настоящее время столь велика, что самые смелые прогнозы устаревают очень быстро...

Тем не менее, в следующей главе мы вновь возвращаемся к этой теме.

А пока давайте полетаем на самолетах. Это не космос, но давайте вспомним эксперимент Гесса...

21.7. Риск авиарейсов через полюс

Если бы мы полетели от поверхности Земли вверх с дозиметром (помните? — впервые это сделал В. Гесс, но только с электрометром в руках в 1912 г.), то увидели бы увеличение потоков радиации: дозы будут возрастать примерно вдвое каждые 2,2 км. Вначале, до высот в 20–30 км, это в основном связано с частицами ШАЛ (рис. 21.4) и даже до больших высот, если нет высыпаний релятивистских электронов из радиационных поясов и СКЛ от солнечных вспышек. Известно, что некоторые трассы межконтинентальных полётов проходят вблизи северной полярной области. Эта область наименее защищена от вторжения энергичных частиц и поэтому во время солнечных вспышек опасность радиационного облучения экипажа и пассажиров возрастает. Солнечные вспышки увеличивают дозы радиации на высотах полётов самолётов в 20–30 раз. Именно солнечные вспышечные протоны могут создать проблемы для пассажиров и экипажей самолетов.

¹ Более точно: НАСА в рамках данной парадигмы радиационного риска приняло за основу величины от 0,6 мЗв до 1,2 Зв для женщин и 0,8–1,2 Зв для мужчин в качестве предельных интервалов допустимых доз.

В последнее время экипажи некоторых авиалиний информируются о начале наступления вторжения солнечных частиц. Одно из недавних мощных солнечных извержений, в ноябре 2003 г., заставило экипаж «Дельты» рейса Чикаго – Гонконг свернуть с пути и лететь к пункту назначения более низкоширотным маршрутом. В результате было сожжено много лишнего горячего. А это немалые деньги. Это нельзя не принимать во внимание. Последнее аналогичное событие СКЛ, которое привело к дополнительным дозам радиации на северных трассах межконтинентальных перелетов, произошло в сентябре 2017 г., когда неожиданно Землю настиг поток очень энергичных солнечных протонов.

Сейчас Европейский Союз принял даже новый закон для беременных женщин – пилотов самолётов – им запрещается налёт часов с суммарной дозой радиации более, чем 1–6 мЗв в год. А ряд исследовательских групп приступил к разработке моделей и систем мониторинга радиационной обстановки, которые позволят делать прогноз возрастания доз радиации на высотах полётов самолётов во время солнечных вспышек практически в реальном времени, что представляется весьма актуальным.

Глава 22. Тяжелые ядра космической радиации: новая напасть

Всё, что скрыто и неизвестно и чего не могут открыть никакие научные исследования, вернее всего будет открыто. Только волею случая человеком, самым настойчивым в поисках и самым внимательным ко всему, имеющему хоть малейшее отношение к предмету поисков.

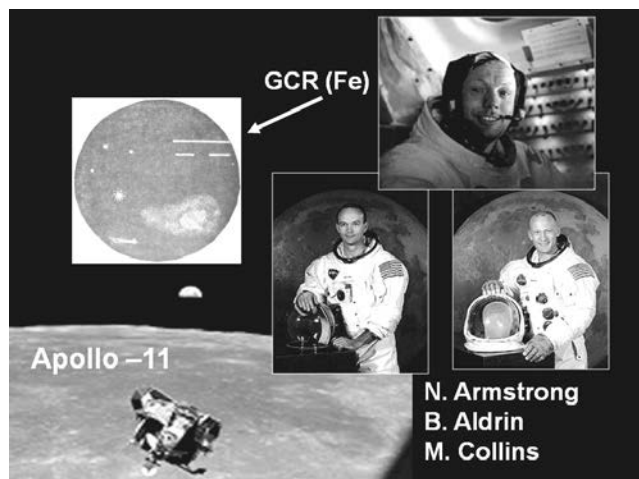
Гудьир, американский изобретатель

Наша Вселенная устроена таким образом, что количество тяжелых элементов значительно меньше, чем легких. Это характерно, как это мы уже видели, и для космической радиации. В составе ГКЛ протонов ($Z=1$) около 85% от полного состава частиц ГКЛ, ядер гелия ($Z=2$) всего 14%, а ядер с $Z>3$ и того меньше — около 1%. Примерно такое же соотношение между легкими и тяжелыми элементами и в СКЛ. Поэтому, казалось бы, тяжелый компонент ГКЛ и СКЛ — Тяжелые Заряженные Частицы (ТЗЧ) не могут давать существенного вклада в радиационные эффекты. Однако, как выяснилось относительно недавно, это не так. Интерес к ТЗЧ, как источнику радиационной опасности, возник в конце 60-х, во время лунных экспедиций человека.

Читатель хорошо знает о космической одиссее американских астронавтов на Луну. Земляне в течение нескольких экспедиций путешествовали на Луну на космических аппаратах «Apollo». Несколько дней астронавты находились в космическом пространстве, в том числе длительный промежуток времени — вне пределов земной магнитосферы.

В одной из первых экспедиций американский астронавт Базз Олдрин (совершивший вместе с Нилом Армстронгом на «Apollo-11» первый в истории полет на наш естественный спутник) сообщил о своих необычных ощущениях: иногда во время полета он наблюдал яркие вспышки в глазах. Порой их частота достигала сотни в день. Именно тогда специалистами и было высказано предположение, что это явление может быть вызвано ГКЛ, постоянно присутствующими в космическом пространстве. В их составе есть тяжелые ядра — углерод, кислород, железо. Именно эти ядра, обладающие большими ионизационными потерями, и вызывают вспышки света в глазах человека. Оказалось, что, по сути, глаз человека — своеобразный детектор космического излучения, регистрирующий его отдельные, тяжелые компоненты. В данном случае ТЗЧ вызывали так называемые фосфены — вспышки света, как результат взаимодействия космических частиц с веществом глазного яблока. Интерес к изучению ТЗЧ в космосе, как источнику радиационной опасности для человека и

Рис. 22.1. Нил Армстронг (командир), Базз Олдрин и Мартин Коллинз совершили первый в истории полет на Луну. Б. Олдрин во время перелета к Луне сообщил о вспышках в глазах, вызванных, как впоследствии оказалось, галактическими космическими лучами. На вставке слева — след, фосфен в глазном яблоке, вызванной ядром железа ГКЛ.



создаваемой им космической электроники, возник именно в период первых лунных экспедиций чело-

века. Теперь это явление широко известно. Оно, вероятно, наблюдалось и до Б. Олдрина, только не все космические пилоты об этом сообщали на Землю.

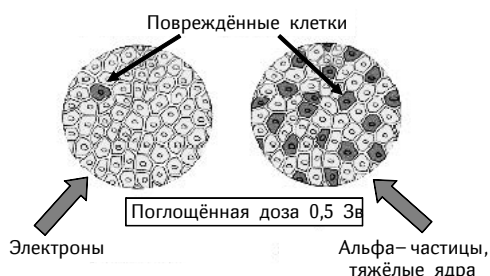
Некоторое время назад на борту Международной космической станции проводился специальный эксперимент по более глубокому изучению этого явления. Выглядел он так: на голову космонавта надевался шлем, начинённый детекторами для регистрации заряжённых частиц. Космонавт, а это был Сергей Авдеев, должен был фиксировать момент прохождения частицы по наблюдаемым им вспышкам, а детекторы проводили независимую «экспертизу» их пролёта. Световые вспышки в глазах космонавтов и астронавтов — пример того, как глаз может служить детектором космических частиц.

Так началась история исследования ТЗЧ в космосе. В иностранной литературе их называют HZE частицы (High (H) atomic number (Z) and high Energy (E) particles). Исследователей интересовали аспекты их воздействия на биологические структуры и электронику космических аппаратов. Рассмотрим эти эффекты, на том уровне, который нами сегодня осознан.

22.1. О воздействии ТЗЧ на биологические структуры

При изучении радиационного воздействия ТЗЧ на различные биоструктуры надо иметь в виду существенную разницу с тем воздействием, которое оказывают более легкие частицы на вещество, например, протоны или электроны, а также гамма-кванты. Радиобиологи «привязали» эффективность воздействия ТЗЧ к тому радиационному воздействию, которое оказывает на биоструктуры рентгеновское излучение. Путем экспериментальных исследований было показано, что «относительная биологическая эффективность» воздействия ТЗЧ на биоструктуры значительно больше, чем рентгеновского излучения. Другими словами, если мы облучаем одной и той же дозой рентгена и тяжелыми ионами, скажем, многоклеточную биоструктуру, то радиационный эффект в виде ее повреждений во втором случае будет значительно большим. Конкретно, радиобиологи экспериментально доказали, что так называемый «фактор каче-

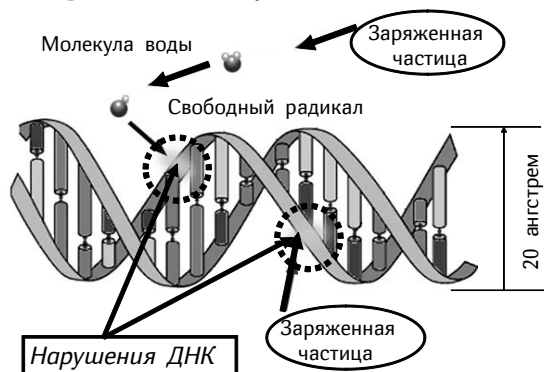
Рис. 22.2 Альфа-частицы (ядра гелия) и другие тяжёлые частицы космических лучей воздействуют на клетки более эффективно, чем электроны. Тяжёлые частицы теряют в веществе гораздо больше энергии на единицу пути, нежели более лёгкие. Это наглядно демонстрируется на этом рисунке: при одной и той же дозе радиации от электронов и тяжёлых частиц, число повреждённых клеток в последнем случае больше.



ства», например, ядер железа, в 20 раз превышает создаваемый рентгеном. Соответственно, «поражающий эффект» ТЗЧ более эффективен и в сравнении с электронами и протонами. В связи с этим, в радиационной биологии используется не просто доза радиационного облучения, а «эквивалентная доза», которая учитывает «фактор качества».

ТЗЧ, обладая большой массой, теряют значительно больше энергии на единицу пройденного пути, чем более легкие частицы с той же скоростью. Вследствие этого будут проявляться только локальные, в микроскопических объемах, повреждения биоструктур. При малых потоках ТЗЧ не следует, конечно, ожидать «дозовых» эффектов, характерных для высокоинтенсивных потоков ионизирующего излучения. Тем не менее, воздействие ТЗЧ в микрообъемах может вызвать существенные и, иногда необратимые изменения. Одним из таких результатов воздействия являются повреждения, возникающие на клеточном уровне. Это наглядно демонстрируется результатом эксперимента, показанного на рис. 22.2: при одной и той же исходной дозе радиации от электронов и тяжелых частиц число поврежденных клеток в последнем случае значительно больше. Как следствие, частота мутаций от мощности дозы при облучении ТЗЧ и гамма-излучения также разная — в первом случае больше. Как результат — необратимые генетические последствия, в том числе и канцерогенные.

ТЗЧ могут вызвать изменения в структуре ДНК. Вода — основное вещество биологических тканей — под воздействием радиации ионизируется, образуются свободные радикалы, которые могут разрушить молекулярные связи ДНК. Не исключен и сценарий прямого повреждения ДНК при торможении ТЗЧ (рис. 22.3). Следует отметить, что область взаимодействия ТЗЧ с веществом



биоструктур, в отличие, например, от гамма-квантов, сопоставима с размерами элементов самой ДНК. Это приводит, естественно, к

Рис. 22.3. Взаимодействие тяжёлых частиц ГЛ с молекулой ДНК в пределах её линейных размеров ~ 20 ангстрем может приводить к нарушениям в её структуре двумя путями: либо через образование свободных радикалов, либо напрямую — путём повреждения самой молекулы.

Рис.22.4. Радиационный риск повреждений в биоструктурах, вызванный воздействием на них различных тяжелых частиц и гамма-квантов.

очень эффективному результату — локальным повреждениям.

Данные, о радиационном риске, полученные американскими специалистами из Брукгейвенской лаборатории (рис. 22.4) наглядно демонстрируют более сильный, по сравнению с легкими частицами, эффект радиационного воздействия ТЗЧ на биоструктуры.

По свидетельству специалистов НАСА, у некоторых астронавтов — ветеранов длительных космических полетов наблюдались серьезные хромосомные aberrации кровяных клеток, что может быть свидетельством начала развития канцерогенных образований. Эти образования могут и не вызвать рак, если они не будут подвержены дополнительным мутациям, но, несомненно, потенциально опасны. Другой пример: воздействие ТЗЧ на глаз человека могут привести к повреждению клетчатки и хрусталика.

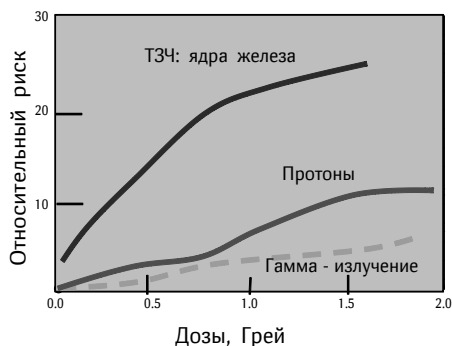
Однако надо отметить, что в самом механизме взаимодействия ТЗЧ с клеточными структурами много неясного, и сама проблема в рамках радиационной биологии далека от решения. Так, например, вероятность радиационных нарушений, описанных выше, не обязательно пропорциональна общей дозе радиации. Сами aberrации разных типов по-разному соотносятся с величиной общей дозы: для одних aberrаций необходимы малые дозы, для других — большие. Не вполне ясен и синергетический эффект различных видов радиации: скажем, воздействие ТЗЧ наряду с гамма-излучением, электронами. Так, например, исследования наших космических биологов показывают, что если хрусталик глазного яблока предварительно облучить ионизирующей радиацией, развитие катарактных явлений протекает быстрее.

Биологическая эффективность ионизирующей радиации коррелирует с энерговыделением в проходимом ею веществе вдоль трека частицы. В качестве единицы измерения потерь энергии обычно используется величина линейных потерь ЛПЭ — энергия (dE), теряемая частицей на единицу длины (dl) в веществе, т.е.

$$\text{ЛПЭ} = dE/dl \cdot \rho,$$

где ρ — массовая плотность вещества. Видно, что ЛПЭ зависит от типа частицы, ее энергии и массовых свойств самого вещества. Считается, что биологическая эффективность воздействия ТЗЧ (например, инактивация клетки) начинает увеличиваться с определенного порога, затем наступает насыщение.

Несмотря на то, что существуют факты, свидетельствующие в пользу такой интерпретации взаимодействия ионизирующей радиации с биоструктурами, следует отметить, что зависимость между ЛПЭ и биоэффективностью влияния



ТЗЧ не является простой функцией. Свидетельством тому является, например, тот факт, что биоэффективность ионов с различными зарядовыми состояниями при одном и том же ЛПЭ – разная. Специалистами в области радиобиологии отмечается, что, в отличие от нейтронов и, скажем, альфа-частиц, ситуация по изучению воздействия на биоструктуры высокоэнергичных ТЗЧ является более проблематичной. Такие данные практически просто отсутствуют, а имеющиеся относятся к экспериментам с большими дозами. Для ТЗЧ с большими значениями ЛПЭ биоэффективность ТЗЧ не имеет прямой связи с ЛПЭ. Это происходит, скорее всего, из-за того, что ширина трека частицы в веществе зависит от её скорости. Поэтому частицы с разными Z приводят к разному эффекту при одном и том же ЛПЭ. Так, по некоторым экспериментальным ускорительным данным максимум биоэффективности воздействия изменяется от 100 кэВ/мкм до более чем 150 кэВ/мкм при изменении от $Z=1$ (протоны) до $Z=26$ (железо). Можно констатировать, что воздействие ТЗЧ на биоструктуры скорее зависит от заряда частицы Z и её энергии, чем от ЛПЭ.

В этом случае становится очевидным, что «ЛПЭ – концепция» интерпретации эффектов ТЗЧ в биоструктурах не является вполне состоятельной.

В контексте изложения механизмов воздействия ТЗЧ на биоструктуры следует упомянуть и об изменении когнитивных функций высших млекопитающих при воздействии на них ТЗЧ. Причиной тому – нарушения на молекулярном уровне, изучение которых также еще впереди. Интересен такой факт (также результат экспериментальных исследований): если после облучения обезьян малыми дозами протонов – наиболее легкими ядрами – процент успешно выполняемых тестов несколько увеличивается, то при облучении ТЗЧ – уменьшается! Почему? Пока неясно.

Здесь надо отметить, что на сегодняшний день специалисты по космической медицине и биологии не способны дать исчерпывающий ответ. Есть проблемы, которые надо решать в будущих исследованиях. Например, само по себе нарушение ДНК не обязательно должно привести к раку. Более того, молекулы ДНК, получив сигнал опасности о нарушении своей структуры, стараются включить «программу ремонта» самостоятельно. И это происходит, порой, безуспешно. Любая физическая травма, тот же удар молотком по телу, вызывает гораздо больше нарушений на молекулярном уровне, чем радиация. Но клетки восстанавливают ДНК, и организм «забывает» об этом событии.

Стабильность ДНК чрезвычайно велика: вероятность мутации не превышает 1 на 10 миллионов вне зависимости от локальных условий. Это фантастическая надёжность биоструктуры, ответственной за воспроизводство жизни. Даже сверхсильные радиационные поля не могут её нарушить. Есть ряд бактерий, которые не мутируют в огромных по мощности радиационных полях, достигающих многих тысяч грей. Такую дозовую нагрузку не выдерживает даже кристаллический кремний и многие конструкционные материалы.

Проблема здесь, как это представляется биологам, состоит в том, что может быть сбой в программе ремонта: например, хромосома в результате может оказаться в совсем ненужном месте в структуре ДНК. Вот эта ситуация

становится уже опасной. Однако и здесь возможна разная последовательность развития дальнейших событий.

Во-первых, надо учесть, что процесс мутации – размножения «неправильных клеток» занимает большой промежуток времени. Биологи полагают, что могут пройти десятилетия между первичным неблагоприятным воздействием и негативной реализацией этого эффекта. Это время необходимо, чтобы сформировать новообразование клеток, подвергнутых мутациям, состоящее из многих миллиардов. Поэтому прогноз развития неблагоприятных последствий – дело очень проблематичное.

Другая сторона проблемы воздействия радиации на биоструктуры состоит в том, что недостаточно изучен процесс влияния именно малых доз радиации. Не существует прямой связи между величиной дозы и радиационными повреждениями. Как полагают биологи, разные типы хромосом различным образом реагируют на воздействие радиации. Одним из них для проявления эффекта «требуются» значительные дозы радиации, а другим достаточно и сверхмалых. В чём здесь причина? Ответа на это также пока нет. Более того, не вполне ясны последствия облучения биоструктур одновременно двумя или несколькими видами радиации: скажем, ГКЛ и СКЛ, или ГКЛ, СКЛ и радиационных поясов. Состав этих видов космического излучения разный, и каждый из них может приводить к своим особым последствиям. Но не ясен эффект их совместного действия. Ответ на эти вопросы – дело будущих экспериментов.

Таким образом, краткий экскурс в данную проблему показывает, что изучение влияния ТЗЧ на биоструктуры – на пути своего развития. Но уже сейчас очевидно, что потенциальная опасность воздействия ТЗЧ на биоструктуры – реальность, которую нельзя не учитывать при планировании космических миссий. На этом неприятные последствия присутствия в космосе тяжелых частиц космических лучей высокой энергии не заканчиваются.

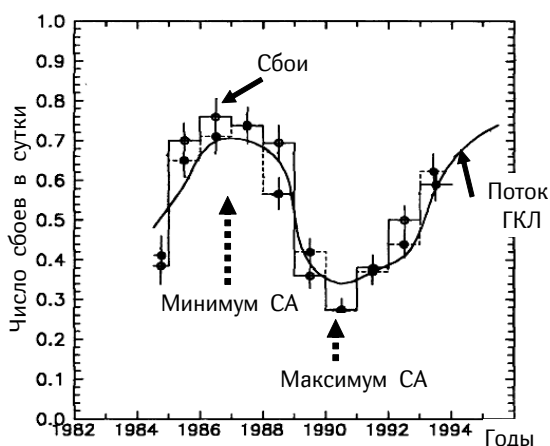
Было замечено, что работа бортовых компьютеров спутников может нарушаться. Эти нарушения могут быть двух типов: компьютер может «зависнуть», а через некоторое время восстановиться, но иногда и выйти из строя. Опять-таки, изучая это явление, учёные пришли к выводу, что ответственны за него тяжёлые частицы ГКЛ. Почему это происходит.

22.2. О воздействии ТЗЧ электронику космических аппаратов

Это удивительно, но подобные по своему негативному результату последствия, наблюдаемые в биоструктурах при воздействии на них ТЗЧ, обнаруживают себя и в космической электронике. Эти эффекты стали заметны при широком внедрении в бортовую электронику микросхем высокой степени интеграции. Поэтому эта проблема возникла где-то на рубеже 60–70-х годов прошлого столетия, т.е. даже календарно ее появление совпало с рождением сходной проблемы в радиационной биологии.

В качестве прямого доказательства существования эффекта негативных эффектов ТЗЧ на электронику космических аппаратов можно привести экспериментальные результаты, показанные на рис. 22.5. Здесь приводятся частота

Рис. 22.5. Доказательство связи между изменением потока ГКЛ и одиночными сбоями в компьютерных системах спутника: модуляция ГКЛ в течение цикла солнечной активности приводит к аналогичным изменениям частоты сбоев.



сбоев в микросхеме памяти, наблюдавшаяся на одном из спутников в течение ряда лет. Там же нанесена кривая изменения солнечной активности. В годы минимума солнечной активности, когда поток ГКЛ максимален, частота сбоев нарастает, а уменьшается в максимуме, когда поток ГКЛ минимален. Таким образом, очевидно, что частицы ГКЛ были источником сбоев в бортовой электронике данного спутника. В результате воздействия ГКЛ на микросхему бортового компьютера КА может «зависнуть», а через некоторое время восстановиться, но иногда и окончательно выйти из строя (заметьте сходство с воздействием на биоструктуры!).

Невозможно бороться с этим неприятным явлением традиционными методами — создавая пассивную защиту. Никакая защита не спасает спутник. Слишком уж велика проникающая способность этих частиц с их громадными энергиями. Даже наоборот, увеличение толщины обшивки космического корабля приводит к обратному эффекту. Потoki вторичных нейтронов, образуясь в результате ядерных реакций ГКЛ с материалом космического аппарата, создают сильный радиационный фон внутри корабля. Эти нейтроны, взаимодействуя с материалом расположенным вблизи чипа, генерируют, в свою очередь, тяжёлые частицы, которые, проникая внутрь чипов, создают сбои.

Каков же механизм образования сбоев в микросхемах под воздействием ТЗЧ? Так же, как и в случае с глазным яблоком человека, они проникают внутрь чипа и вызывают локальные микроскопические нарушения в его «сердце» — чувствительной области полупроводникового материала, из которого он изготовлен. Качественно механизм этого эффекта показан на рис. 22.6. В результате довольно сложных процессов, связанных с нарушением движения носителей электрических токов в материале чипа, происходит сбой в его работе (их называют «одиночными сбоями»). Это неприятное явление для бортовой аппаратуры современных спутников, напичканных компьютерными системами, управляющими его работой. В результате спутник может потерять, например, ориентацию или не выполнить необходимую команду оператора с Земли. В худшем случае, если нет на борту необходимой дублирующей компьютерной системы, можно спутник и потерять.

В принятой в настоящее время терминологии такие сбои принято называть «эффектами одиночных событий» — SEE (Single Events Effects) или «эффек-

тами одиночных сбоев». SEE представляет собой эффект ионизации ТЗЧ, генерирующий трек из электронно-дырочных пар, как это показано на рис. 22.6. Заряд, аккумулированный на электроде, может сформировать ложный сигнал, приводящий к «мягкому» сбою. Дальнейший сброс или перезапись устройства приводит, как правило, к нормальному функционированию. Подобные сбои обычно наблюдаются как переходные импульсы в логических или вспомогательных цепях, а также инвертирование в элементах памяти или в регистрах. Возможны многократные одиночные сбои, в которых единичная ТЗЧ поражает два или более бита, вызывая одновременные сбои.

В отличие от «мягких», «жесткие» сбои приводят к отказам, которые исключают возможность восстановления путем перезапуска — функциональность устройств нарушается окончательно. Один из примеров — эффект «защелки», или SEL (Single Effects Latchup). SEL приводит к генерации сильных токов во время «зависания» в одном состоянии («защелкивание»). Состояние защелкивания может разрушить устройство, закоротив напряжение на общей шине или повредить источник электропитания. Интересно, что SEL впервые наблюдалось во время наземных испытаний микросхем. Для описания SEE обычно, так же как и в радиационной биологии, используется концепция линейных потерь энергии ЛПЭ. Считается, что устойчивость устройства определяется порогом ЛПЭ, определяемым по минимуму ЛПЭ, вызывающей сбой. Зная энергетический спектр исходного космического ионизирующего излучения и, преобразовав его в ЛПЭ-спектр, можно модельно оценить частоту сбоев в конкретной микросхеме с учетом ее топологии и конструктивных особенностей. Этот метод оценки SEE основан на определении для микросхемы величины критического заряда — минимального аккумулированного заряда, создаваемого ионизирующей частицей в чувствительном объеме устройства и вызывающей одиночный сбой.

Таким образом, высокоэнергичная ионизирующая радиация, помимо «дозовых эффектов», — главной причины деградации полупроводниковых приборов в высокоинтенсивных полях радиации, может вызывать сбои, вызванные не объ-

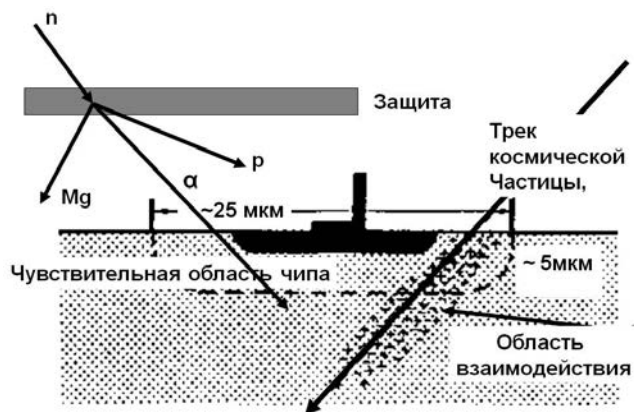


Рис. 22.6. Механизм формирования одиночного сбоя в микросхеме: тяжёлая заряженная частица космических лучей, проникая внутрь чувствительной области, создаёт локальные нарушения электропроводности, что приводит к сбою в работе. Другой вариант — заряженная частица, взаимодействуя с конструкционными материалами спутника, и в процессе ядерных реакций создаёт нейтроны, которые, в свою очередь, взаимодействуя с материалами (например, магниевыми сплавами), могут создать тяжёлые заряженные частицы (например, α -частицы). Они тоже вызовут сбой в работе микросхем.

емной, а локальной ионизацией. При этом SEE зависят от ЛПЭ. Зависимость от ЛПЭ носит пороговый характер (аналогично воздействию ТЗЧ на биоструктуры!). Однако имеются результаты наземных испытаний ряда микросхем, демонстрирующие, что такая простая зависимость вероятности сбоев от ЛПЭ — весьма упрощенная. В реальности она более сложная, свидетельствующая о существовании «многоуровневого» порогового эффекта.

ЛПЭ — концепция сбоев базируется на простейшем подходе учета средних ионизационных потерь заряженных частиц в аморфном веществе. При этом не учитываются возможные вклады, например, многократного рассеяния частиц в веществе, изменение энергии в пройденном слое мишени. Нет также учета влияния кристаллической решетки и температуры кристалла полупроводниковых материалов интегральных схем, что может быть связано с проблемами каналирования при прохождении частицы через вещество.

Не исключено, что сбои в микросхеме могут произойти за счет генерации вторичных продуктов ядерных реакций при взаимодействии ГКЛ с веществом, окружающим саму микросхему. Аналогичный процесс, приводящий к образованию вторичных ТЗЧ, происходит и при взаимодействии нейтронов с веществом (рис. 22.6). Кроме этого, не является очевидным, что дозовые эффекты и сбои под воздействием одиночных частиц — независимые явления. Проблема связи накопленной дозы и вероятностью одиночных сбоев — неоднозначна и является актуальной. Все эти «дополнительные» факторы, очевидно, нельзя сбрасывать со счетов при оценке ресурса электроники в условиях космического полета.

Необходимо напомнить читателю, что тяжёлые заряженные частицы встречаются не только в космических лучах. Давайте рассмотрим радиационные поля в космосе более внимательно на предмет обнаружения в них ТЗЧ.

22.3. Где тяжелые ядра бьют наиболее сильно?

Самый простой ответ на этот вопрос — везде. Но дьявол, как говорится, в деталях. Рассмотрим эту проблему более подробно. Ближе всего расположена к нам радиация в земной магнитной ловушке — в радиационных поясах.

22.3.1. ТЗЧ в радиационных поясах Земли

Здесь, как мы это уже знаем, присутствуют одновременно компоненты ионизирующей радиации, своим происхождением связанные с действием разных источников, механизмов ускорения и транспорта. Несмотря на более чем 50-летний период исследования этой области, остается еще ряд «белых пятен», подлежащих дальнейшему изучению. Радиационные пояса не являются в этом плане исключением.

Напомним, что радиационные пояса Земли — это образование захваченных в магнитном поле Земли заряженных частиц различного происхождения. Здесь «живут» частицы солнечного происхождения — ускоренная плазма солнечного ветра и солнечные космические лучи, частично проникающие вглубь магнитного поля.

Галактические космические лучи вследствие значительной величины их импульса не могут быть захвачены в магнитном поле Земли, но продукты их взаимодействия с атмосферой — нейтроны, распадаясь, создают протоны и электроны, которые «наполняют» внутреннюю область РПЗ. И наконец, частицы из ионосферы Земли — вполне реальный источник электронов и протонов, а также ионов кислорода в радиационных поясах.

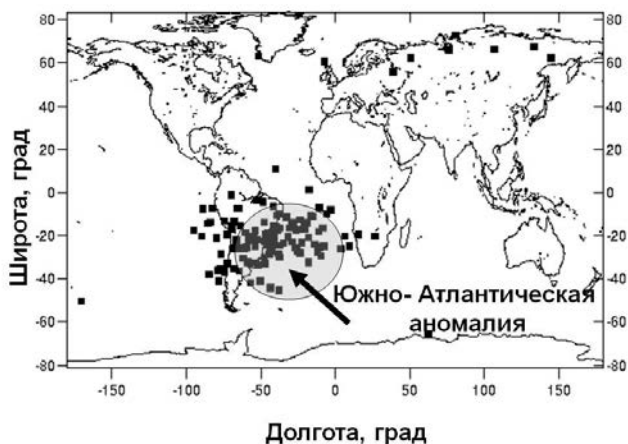
В рамках данной проблемы интерес представляют ТЗЧ, обладающие достаточными потерями энергии, и способные вызвать сбои и нарушения как в биоструктурах, так и в электронике космических аппаратов. Область локализации таких частиц — внутренняя зона РПЗ. Это мы рассматривали в Главе 20. Напомним об этом вкратце.

Известно, что источник большей части частиц радиационных поясов находится вблизи их внешней границы, в районе орбит геостационарных КА, на расстояниях $6-7 R_e$. Частицы от различных источников (солнечного ветра, ионосферы) посредством механизма радиационной диффузии перемещаются внутрь РП под действием флуктуаций электрических и магнитных полей, подвергаясь одновременному ускорению. Как результат, на внутренних магнитных оболочках (на расстояниях в плоскости экватора меньше $2 R_e$) происходит формирование очень энергичного ионного пояса, состоящего из тех частиц, которые присутствуют в солнечном ветре и ионосфере. Энергия захваченных протонов в этой области может достигать 1 ГэВ, т.е. сопоставима с энергией ГКЛ. Тем не менее, радиальная диффузия не может быть доминантным механизмом формирования протонов и ТЗЧ во внутренней зоне радиационных поясов в силу, прежде всего, малого времени их жизни относительно ионизационных потерь. Механизм распада нейтронов альbedo, возникающих при взаимодействии ГКЛ с атмосферой, является дополнительным и мощным источником протонов в области высоких энергий в этой части пространства. Более тяжелые частицы возникают здесь как продукты ядерных реакций — результата взаимодействия первичных протонов ГКЛ и протонов внутренней зоны радиационных поясов с атмосферой Земли.

Причем следует отметить, что эта область опасна как с точки зрения возникновения мощных дозовых эффектов из-за наличия в этой области высокоинтенсивных потоков протонов, так собственно и генерации эффектов одиночных сбоев и нарушений под воздействием малоинтенсивных потоков ТЗЧ.

К настоящему времени накоплено большое число экспериментальных данных — прямых измерений сбоев электроники на космических аппаратах, не ставящих под сомнение их возникновение именно во внутренней зоне радиационных поясов. При этом высокая зависимость частоты сбоев характеризуется ярко выраженной ограниченной пространственной структурой — с уменьшением высоты орбиты КА сбои начинают локализоваться в пределах сравнительно узкой географической зоны над Южной Атлантикой. Это Южно-Атлантическая магнитная аномалия (ЮАА) — область локального ослабления магнитного поля Земли. Для низкоорбитальных космических аппаратов (например МКС, высота орбиты которой ~ 350 км) это наиболее опасный радиационный

Рис. 22.7. Так выглядит пространственное распределение одиночных сбоев в микросхемах по измерениям на высоте ~ 500 км. Большая часть сбоев происходит в районе магнитной аномалии в районе Южной Атлантики. Именно здесь радиационные пояса «проевсают» над Землей.



участок траектории. Нетрудно представить, что электроника космического корабля, летающего на высоте километров в 500 должна «чувствовать» эти частицы. Так оно и есть. Взгляните на рис. 22.7: вы можете на нём увидеть, что наибольшая частота сбоев наблюдается как раз в районе аномалии. По свидетельству многих космонавтов именно в этой области частота фосфенов в глазах превышает наблюдаемые на других участках орбиты пилотируемых орбитальных станций.

Очевидно, что источником этих сбоев и фосфенов являются ТЗЧ, захваченные в радиационных поясах. Не исключено, что и высокоинтенсивные потоки протонов ЮАА также создают эти явления. Прежде всего, они должны возникать как следствие взаимодействия продуктов ядерных реакций протонов с материалом КА, расположенным вокруг микросхемы (рис. 22.6). Однако наши знания о химическом составе ионного компонента РПЗ внутренней зоны РТВ крайне ограничены. Это связано с экспериментальными трудностями проведения измерений в этой области. Потоки высокоэнергичных протонов (с энергиями более десятков МэВ) здесь настолько велики, что «мертвое время» любой электроники накладывает ограничения на возможность измерений значительно меньших потоков более тяжелых ионов. Тем не менее, существуют модельные расчеты транспорта ионов в РПЗ, которые показывают реальную возможность существования захваченных энергичных ионов в этой области.

Из данного рассмотрения структуры следует, что источником сбоев и нарушений в электронике являются ТЗЧ, захваченные в их внутренних областях РПЗ. Отсюда вывод, что наиболее подвержены воздействию ТЗЧ космические аппараты с высотой орбиты от сотен километров до нескольких тысяч. Следует отметить характерные для этой области пространственно-временные вариации ЮАА, связанные как с солнечным циклом, так и с вековыми вариациями главного магнитного поля Земли (см. также Главу 21).

Солнечно-циклические вариации потоков частиц в ЮАА (и на высотах меньше 1000 км) связаны с вариациями ионизационных потерь частиц вследствие нагрева и охлаждения верхней атмосферы в течение 11-летнего цикла солнечной активности. Во время солнечного минимума потоки увеличиваются,

что должно приводить к увеличению частоты сбоев. Обратная картина будет наблюдаться в солнечном максимуме — в это время плотность атмосферы на больших высотах увеличивается, вызывая рост потерь частиц и, соответственно, уменьшение потоков захваченных частиц, в том числе, конечно, и ТЗЧ. Поэтому, можно ожидать, что в максимуме цикла солнечной активности частота сбоев работы электроники в районе ЮАА и количества фосфенов в глазах космонавтов должно быть меньше.

Топология ЮАА должна меняться вследствие существования вариаций главного магнитного поля Земли. Как показывают расчеты, на шкале времени десятки лет и более, область ЮАА должна расширяться и смещаться к западу (рис. 21.3). Таким образом, можно ожидать, что в перспективе ЮАА будет представлять большую радиационную опасность, чем в настоящее время, в том числе и в плане генерации одиночных сбоев ТЗЧ внутренней зоны радиационных поясов.

22.3.2. ТЗЧ в солнечных космических лучах

Аналогичные сбои электроники происходят и при мощных солнечных вспышках. Протоны и тяжёлые ядра в составе СКЛ могут вызвать в чипах такие же одиночные сбои. И они действительно наблюдаются. Один из таких примеров показан на рис. 22.8: во время мощной солнечной бури 14 июля 2000 года (она произошла день взятия Бастилии, поэтому ей присвоили имя «День Бастилии») на магнитосферу Земли «обрушились» интенсивные потоки солнечных протонов, вызвавших сбои в работе спутников. Какие частицы в составе СКЛ их вызвали?

Солнечные космические лучи генерируются в активных областях Солнца посредством, например, механизма пересоединения или в межпланетной среде на фронтах ударных волн, распространяющихся в межпланетном пространстве корональных инжекций масс при стохастическом механизме типа Ферми. Помимо протонов, в составе СКЛ присутствуют и более тяжелые ионы. В данном контексте нас интересуют, прежде всего, ТЗЧ с энергиями в десятки и сотни МэВ/нуклон — наиболее вероятные источники сбоев микросхем и нарушений в биоструктурах на клеточном уровне. Есть ли такие частицы в СКЛ? Да, есть. И об этом убедительно свидетельствуют эксперименты. Однако и здесь не все очевидно.

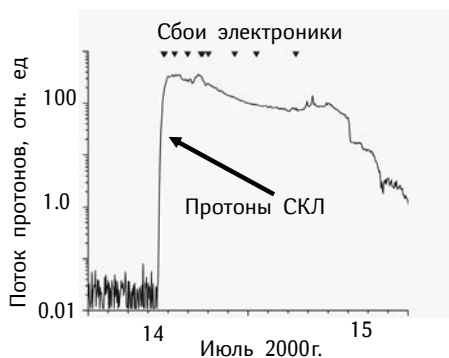


Рис. 22.8. Энергичные солнечные частицы тоже воздействуют на функционирование спутников на орбите. Во время мощного возрастания частиц СКЛ 14 июля 2000 г. (событие «день Бастилии») начались сбои (их временная привязка отмечена треугольниками) в работе бортовой электроники.

Так, для ряда событий обогащение состава СКЛ тяжелыми ядрами Fe по сравнению с другими, более легкими, наблюдается при достаточно больших энергиях (> 30 МэВ/нуклон). Однако такое обогащение происходит не всегда: оно было замечено только для периода 1997–2005 гг., но не для более поздних. Но нас интересуют ТЗЧ в СКЛ достаточно высоких энергий, а такие частицы генерируются только во время очень мощных солнечных вспышек.

В качестве примера можно привести результат, обобщающий энергетические спектры ряда мощных событий СКЛ (рис. 22.9). Из него следует совершенно очевидное указание на возрастание обогащения тяжелыми ионами состава СКЛ с ростом полной энергии при условии аппроксимации протонного спектра в сторону больших энергий с показателем наклона, характерного для более низкоэнергетичного компонента.

Следует отметить, что согласно данным наземных установок, максимальная энергия ускоренных протонов при развитии на Солнце самых мощных событий, они называются GLE – Ground Level Enhancement («возрастание на уровне Земли») может достигать 100–200 ГэВ т.е. фактически – даже больше энергий ГКЛ в максимуме их потоков. Если это так, то можно ожидать, что, поток тяжелых ионов в составе СКЛ на «хвосте» энергетического распределения может превысить (при равных энергиях) протонный (рис. 22.9). В этом случае значения потоков ТЗЧ, используемые в современных моделях СКЛ, как основа для расчетов сбоев, следует считать как не соответствующие реальным космическим условиям. Этот вывод относится к энергиям более сотен МэВ. Если это так, то и для электронных чипов и для биоструктур в космосе мощные события СКЛ должны представлять гораздо большую опасность в плане инициирования сбоев типа SEE или нарушений на клеточном уровне, чем менее мощные события СКЛ. Немного успокаивает тот факт, что частота мощных событий на Солнце значительно меньше, чем слабых. Но вероятность генерации их, все же, отлична от нуля, и не учитывать этот факт при планировании долговременных космических миссий нельзя.

Однако важно подчеркнуть, что область энергий более сотен МэВ пока «белое пятно» для прямых измерений протонов на КА. Этот энергетический диапазон «перекрывается» наземными *нейтронными мониторами*, что и делается для оценки максимальной энергии инжектируемых во время вспышек солнечных частиц. Но следует принять во внимание, что данные нейтронных мониторов не могут дать оценку относительного

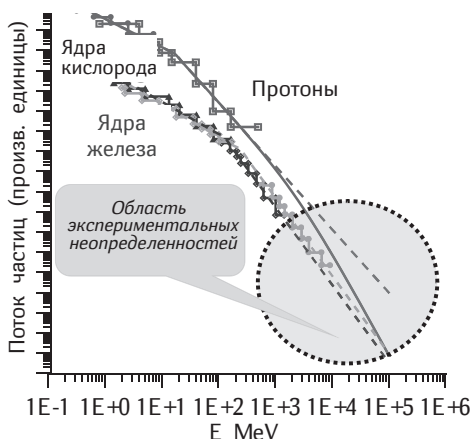


Рис. 22.9. Усредненные по нескольким событиям спектры частиц СКЛ (любезно предоставленные Р.А. Ныммиком): для легких протонов (р) и тяжелых О и Fe. Интерполяция спектров к большим энергиям (пунктирные линии) демонстрирует обогащение тяжелыми элементами состава СКЛ.

содержания ионов в этом диапазоне энергий независимую от модельных представлений, которые, в свою очередь, зависят многих входных параметров. Так что в экспериментальном плане наши знания о ядерном составе СКЛ при самых больших энергиях на сегодня ограничены.

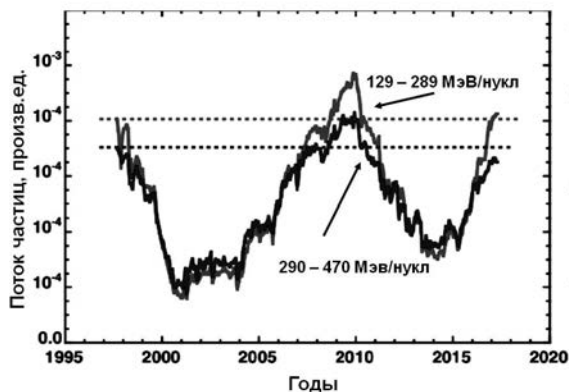
Если же обратиться к теории генерации СКЛ, то следуя стохастическому механизму типа Ферми, следует ожидать, что максимальная энергия частиц, генерируемая во время активных процессов, $E_{\max}$ пропорциональна заряду ядер Z , т.е. относительное содержание тяжелых ионов по мере приближения к предельной энергии ускорения должно увеличиваться. Именно так и происходит, например, при ускорении ГКЛ на остатках взрывов сверхновых звезд в районе «колена» — изменения показателя наклона энергетического спектра (10^{15} – 10^{17} эВ). В этом диапазоне энергий наблюдается очевидное обогащение состава ГКЛ тяжелыми ядрами. Очевидно, что аналогичный механизм ускорения должен действовать и для частиц, имеющих солнечное происхождение. В этом плане доминирование потоков ТЗЧ над протонными на «хвосте» энергетических распределений солнечных событий типа GLE должно быть реальностью.

Рассмотрим теперь некоторые особенности характеристик наиболее энергичных частиц в нашей Солнечной системе — ГКЛ.

22.3.3. ТЗЧ в галактических космических лучах

Относительное содержание тяжелых частиц в составе ГКЛ сходно с СКЛ. Максимум интенсивности этих частиц приходится на диапазон энергий 300–500 МэВ/нуклон. Именно эти частицы и представляют опасность возникновения сбоев в электронике и повреждений в биоструктурах.

Важной особенностью ГКЛ является их постоянное присутствие в космическом пространстве с характерной модуляцией потока в течение солнечного цикла (рис. 21.4). Существующая модель ГКЛ, адекватно описывающая временные характеристики потоков частиц в зависимости от параметра солнечной активности — числа W , представлена в виде моделей модуляции ГКЛ и используется при расчетах частоты сбоев в микросхемах. Как указывалось выше, ТЗЧ в ГКЛ представляют особую опасность для длительных межпланетных миссий в силу именно их постоянного присутствия в космосе. В этом плане



важен модельный учет модуляции ГКЛ для правильных инженерных расчетов сбоев, позволяющий выбрать оптимальный вре-

Рис. 22.10. Изменение потоков ядер железа ГКЛ за 20 лет их наблюдений на космическом аппарате АСЕ. Так же, как и для протонов ГКЛ, anomalно высокие потоки ядер железа наблюдались в период 2009–2011 г.г. Пунктирами показаны средние уровни потоков для приведенных на рисунке потоков ядер железа с данными энергиями.

менной интервал для осуществления космических миссий. В предыдущей главе уже отмечалось, что аномальность солнечной активности — затянувшегося минимума активности в период 2007–2012 годов, привела к возрастанию потока протонов ГКЛ. Аналогичная ситуация наблюдается и для ядер железа (рис. 22.10). Это относительно короткий промежуток времени, но нет гарантий, что он не повторится.

Очевидно, что оптимальным с точки зрения минимизации частоты сбоев от воздействия ТЗЧ ГКЛ является интервал времени, относящийся к максимуму солнечной активности. Долговременное непрерывное наблюдение ГКЛ в атмосфере Земли (начиная с 1957 г.) позволяет оценить максимальную частоту сбоев и смоделировать эксперименты на наземных ускорителях по изучению воздействия ТЗЧ на биоструктуры. Однако корректная оценка эффекта воздействия ТЗЧ сталкивается с трудностями прогностического характера, не описываемыми существующими моделями. Так, например, в последнем десятилетии наблюдался аномально длительный период низкой солнечной активности с 2005 по 2011 год. Последствия этого аномального минимума — относительно продолжительное (1–2 года) превышение потоков ГКЛ над максимальным уровнем (начиная с 1957 г., пунктир на рис. 21.12.), наблюдавшееся в 2009–2010 гг. Кроме этого, на этой фазе наблюдался продолжительный пик солнечной активности. Как результат — аномально низкий поток ГКЛ в период 2001–2005 гг. Очевидно, что такие экстремальные периоды необходимо учитывать в модельных оценках и наземных экспериментах.

22.3.4. Вторичные ТЗЧ на околоземных орбитах

Не только протоны и более тяжелые ядра — источники сбоев на низких орбитах, в частности, на орбите МКС. Как отмечалось выше, ТЗЧ могут возникнуть в результате ядерных реакций в веществе, окружающем микросхему. Вторичные нейтроны, возникающие при взаимодействии первичных ГКЛ с веществом, могут создать тяжелые ядра, которые, в свою очередь, и станут источниками сбоев в электронике или нарушений в биоструктурах. В реальности ситуация с нейтронным полем еще более сложная.

Источниками нейтронов в окружении КА могут стать и ГКЛ, взаимодействующие с атмосферой Земли, которые генерируют потоки альбедных нейтронов, приходящие от Земли, а также солнечные нейтроны во время очень мощных событий на Солнце (см. раздел 21.3).

Для межпланетных миссий роль локальных нейтронов становится еще более существенной: в течение длительного полета КА подвергается непрерывной бомбардировке ГКЛ, поэтому нейтронный фон основной источник накопленной радиационной дозы, которая становится очень существенной вследствие большой продолжительности полета. Ее величина, помимо времени полета, зависит от массы КА, а так как ожидаемая масса пилотируемого КА для, например, марсианских миссий — десятки и более тонн, то поток вторичных нейтронов ожидается весьма большим. Следовательно, и частота сбоев должна расти.

22.3.5. Вторичные ТЗЧ на поверхности Луны и Марса

Для посадочных модулей космических аппаратов и долговременных станций на поверхности Луны и Марса в расчетах нейтронного фона следует учитывать как свойства самого грунта, так и наличие (отсутствие) атмосферы. В чем отличие энергетических спектров вторичных нейтронов, рожденных в атмосфере Земли и Марса, а также от реголита Луны, вокруг которой нет атмосферы.

У Земли и у Марса спектр атмосферных нейтронов более жесткий, чем на Луне. Присутствие нейтронов с энергиями более 1000 МэВ, очевидно, чрезвычайно важно для оценки частоты сбоев и повреждений в биоструктурах вследствие роста сечения ядерных реакций с ростом энергии, которые создают потоки вторичных ТЗЧ.

Следует подчеркнуть, что вторичные, локальные нейтроны не единственный источник радиационной опасности в плане генерации сбоев и повреждений в биоструктурах. Выше мы видели, что локальные повреждения могут создаваться и протонами. Последние могут генерироваться при взаимодействии ГКЛ с лунным и марсианским грунтом, причем зависимость от толщины грунта для вторичных протонов и нейтронов должна быть разная: в отличие от протонов, с ростом толщины грунта поток нейтронов должен возрастать (до определенной толщины), в то время как поток протонов — уменьшаться. Отсюда следует вывод, что при создании как «поверхностных», так и «подповерхностных» станций обитания человека на Луне и Марсе требуется тщательный расчет радиационных полей различной природы.

В заключение данного раздела следует отметить, что источником вторичных частиц на Луне и Марсе являются не только ГКЛ. СКЛ — очевидный источник вторичной радиации для этих объектов Солнечной системы, имеющих очень слабые (Марс) или не имеющих вообще магнитных полей (Луна), способных отклонить потоки солнечных частиц во время вспышек и корональных инжекций массы.

На этом завершим краткий экскурс в проблему воздействия ТЗЧ на биоструктуры и электронные компоненты. Необходимо сделать очевидный вывод, что в настоящее время любые оценки одиночных сбоев, полученные в ходе экспериментов и тем более — расчетным путем, носят оценочный характер в силу, прежде всего, ограниченности наших знаний о механизмах самого воздействия. Проблема усугубляется еще и тем, что космический аппарат подвергается воздействию многокомпонентной космической радиации, в которой каждый из компонентов имеет свои особенные пространственно-энергетические и временные характеристики, которые невозможно воспроизвести в условиях наземного эксперимента.

Возникает вопрос: как минимизировать риск от ТЗЧ в современных условиях? Можно рассмотреть следующие рекомендации, которые, конечно, необходимо уточнять по мере накопления наших знаний.

22.4. Проблема ТЗЧ и планирование космических миссий.

Для того чтобы минимизировать частоту сбоев под воздействием космической радиации – снизить радиационный риск, надо проводить радиационное тестирование на стадии *разработки* микросхем, а не тестирование готовых изделий. Применение специальных конструкционных материалов, схем резервирования и программного обеспечения вместе с радиационным тестированием на стадии разработки – реальный путь к минимизации сбоев и снижения радиационного риска в космической электронике. Сложный характер космической радиации, прежде всего, её многокомпонентный состав ставит вопрос о необходимости проведения испытаний электроники в условиях космического полета для адекватной оценки радиационных рисков.

По естественным причинам, то, что можно сделать для электроники, невозможно для биоструктур. Вряд ли возможно скорректировать (изменить) структуру, скажем, ДНК, сделав ее нечувствительной к ТЗЧ. Здесь возможен только путь исследования механизмов воздействия ТЗЧ на определенные виды биоструктур и оценка возможных рисков при воздействии разных видов частиц.

Поэтому наиболее оптимальным и эффективным способом минимизации риска воздействия ТЗЧ является *оптимизация планирования* космических миссий, которая должна включать:

1. Запрет и ограничение проведения ответственных операций на борту КА в местах и во время попадания космических аппаратов в наиболее интенсивные поля ТЗЧ. Например: ЮАА – наиболее опасное место, где эффективность воздействия велика по сравнению с другими географическими зонами. Следовательно, любые ответственные операции (корректировка орбиты, выход человека в космос и др.) в этом районе должны быть исключены. То же относится и к периодам мощных солнечных вспышек. Для околоземных орбит в местах, где наблюдается проникновение СКЛ (например, полярные и авроральные области) ответственные операции также должны быть исключены.

2. Для человека должны быть установлены максимальные временные пределы космического полета. Очевидно, они должны быть разными для околоземных орбит, для межпланетных перелетов и нахождения на поверхности Луны и Марса. Важно подчеркнуть, что именно **время** – эффективная защита биоструктур от воздействия ТЗЧ в условиях космического полета.

Послесловие

Заканчивая эту книгу о о радиационных полях в космическом протранстве, автор постарался убедить читателя в том, что астрофизика космических лучей и космическая физика находятся сейчас на подъёме. Уже за более чем 100-летнюю историю исследований частиц из Вселенной были не только изучены свойства этих частиц и открыты новые, но с их помощью исследованы многие физические процессы и объекты Вселенной. До сих пор космические лучи остаются уникальным инструментом изучения далёких просторов Вселенной. И чем дальше развивается эта наука, тем очевиднее становится её связь не только с астрономией и космологией, но и с физикой элементарных частиц, базирующейся на наземных ускорительных экспериментах.

Задача ускорительной физики элементарных частиц — проникнуть вглубь вещества, познать строение кажущихся неделимыми частиц, изучить характер их взаимодействий. Но, проникая вглубь, мы, тем самым, изучаем прошлое Вселенной. Те новые частицы, которые обнаруживаются в наземных экспериментах, их физические взаимодействия сродни тем, что существовали в зародыше Вселенной сразу после Большого взрыва. Астрофизика и физика элементарных частиц уже ряд лет идут в одном направлении с целью достижения познания строения не просто вещества, а познания строения нашего мира.

В связи с этим, вернёмся вновь к вопросу о максимально достижимых энергиях частиц на Земле и во Вселенной. Можно ли подвергнуть экспериментальной проверке теорию Великого объединения? Лишь частично. Проблема заключается в гигантской энергии Великого объединения — 10^{24} – 10^{25} эВ. Подсчитано, что если создать ускоритель, охватывающий по периметру всю нашу Землю, то из-за синхротронных потерь энергия протона не превысит 10^{17} эВ (здесь указаны энергии частиц, соответствующие столкновениям протонов с неподвижной мишенью). Вселенная способна предоставить в распоряжение исследователей частицы с гораздо большей энергией, чем созданные человеком наземные ускорители. Вполне возможно, что космические лучи предельно высоких энергий как раз и являются «носителями информации» о самых ранних фазах эволюции Вселенной после Большого взрыва. Их изучение поможет детально разобраться в справедливости гипотез о сотворении мира.

Мы видели, что пока ещё не всё ясно с составом частиц в районе «колена» спектра галактических космических лучей. А ведь это, пожалуй, одна из самых значимых проблем астрофизики космических лучей. Вопрос ставится достаточно просто: есть ли экспериментальные доказательства ускорения частиц на остатках сверхновых? Ответ лежит в точных измерениях отдельных компонен-

тов космических лучей. Интерпретация данных наземных установок, обладающих пока значительно большими «светосилами», чем приборы космического базирования, наталкивается на трудности. Это связано с недостаточными знаниями в области моделирования взаимодействия частиц, необходимых, как мы видели ранее, для восстановления энергетического спектра первичных частиц.

Безусловно, результативность экспериментов будет зависеть от степени совершенства теоретических моделей, описывающих явления во Вселенной. Именно поэтому в настоящее время нет недостатка как в предлагаемых проектах для исследования Вселенной, так и в многочисленных теориях, пытающихся объяснить наблюдаемые явления.

У астрофизики космических лучей и космической физики, как это показано выше, есть и важная прикладная составляющая. Космические частицы постоянно бомбардируют околоземное космическое пространство и, несомненно, могут оказывать влияние не только на процессы, происходящие в этой среде, но также и на технику, созданную человеком, на самого человека, другие живые организмы и биологические структуры. И здесь не всё ясно. Предстоят ещё годы упорных исследований для решения этих проблем.

Каковы перспективы развития этих наук? Я далёк от мысли, что вслед за «золотым веком» в их развитии наступила экспонента спада. Я думаю, что наступила не менее интересная фаза — фаза приложений. Мы многое знаем о радиационной обстановке вблизи нашей планеты, в окрестностях других и в межпланетном пространстве. Мы знаем характеристики радиационных поясов, галактических и солнечных космических лучей. Однако возможности оценки радиационных условий будущих миссий, т.е. прогноза, остаются ограниченными. Проблема здесь заключается в малоизученных закономерностях временных вариаций радиационных полей. К тому же солнечная активность и связанная с ней модуляция галактических частиц, как это мы видели, в последние годы преподносит нам сюрпризы. И исчерпывающее решение этой проблемы не только и не столько в аналитике — интерпретации экспериментальных данных и создании физических моделей, а, скорее, в создании глобальной сети космических аппаратов — мониторов радиационной опасности, расположенных на разных расстояниях в гелиосфере и анализе данных в реальном времени. Без этого и длительная экспедиция на Марс и создание поселений на Луне вряд ли возможны.

Не представляется мне законченной и та глава космической физики, которая относится к её фундаментальной части. Здесь по-новому должна зазвучать тема ускорения частиц и взаимосвязи активных явлений на Солнце и внутри магнитосфер планет, т.е. солнечно-магнитосферных связей. Эта часть остаётся недостаточно разработанной и нужны ещё годы исследований в обстановке, способствующей научному поиску, чтобы приблизиться к следующему этапу познания этого, совсем крохотного объекта Вселенной — нашей Солнечной системы с её планетами, окружающими самую близкую к нам звезду.

Автор старался заинтересовать читателя этими увлекательными проблемами. Если это удалось, то можно сказать, что цель достигнута.

Литература

- Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Происхождение космических лучей, М. 1963.
- Мирошниченко Л. И., Космические лучи в межпланетном пространстве. М. 1973.
- Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М. 1975.
- Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. М. 1979.
- Топтыгин И. Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М. 1983.
- Добротин Н. А. Космические лучи. — М.: Изд. АН СССР. 1963.
- Росси Б. Космические лучи. — М. Атомиздат. 1966.
- В. Н. Демин. Тайны Вселенной. Изд-во "Вече". М. 1998.
- Дж. Нарликар. Неистовая Вселенная. Изд-во "Мир". М. 1985.
- И. С. Шкловский. Вселенная. Жизнь. Разум. Изд-во "Наука". М. 1987.
- Г. Б. Жданов. Частицы высоких энергий. Изд-во «Наука», Москва, 1965.
- А. М. Черепашук, А. Д. Чернин. Вселенная, жизнь, чёрные дыры. Изд-во «Век-2». 2003.
- Г. В. Кландор-Клайнгротхауз, К. Цюбер. Астрофизика элементарных частиц. «Успехи физических наук», 2000.
- И. Д. Новиков. Как взорвалась Вселенная. Изд-во «Наука». Москва. 1988.
- И. М. Капитонов. Введение в физику ядра и частиц. «Едиториал УРСС». Москва. 2002.

Словарь терминов

Адроны — элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Включают все барионы и мезоны.

Ангстрем Å — единица длины, равная 10^{-10} м = 10^{-8} см.

Аннигиляция — уничтожение частиц и античастиц, один из видов взаимодействия электрона и позитрона с излучением гамма-квантов.

Античастицы — элементарные частицы, имеющие те же значения масс, спинов и других физических характеристик, что и «обычные» частицы, но отличающиеся от них знаками некоторых характеристик взаимодействия (например, знаком электрического заряда).

Аэрозоли — образования, состоящие из частиц твёрдого тела и капель жидкости во взвешенном состоянии в газовой среде (например, в атмосфере — дым, туман).

Барионы — элементарные частицы, относящиеся к классу тяжёлых, т.е. с массой не менее протонной. Барионная материя составляет всего 4% от всего вещества Вселенной.

Взаимодействия фундаментальные — 4 вида:

электромагнитное, в котором участвуют заряженные частицы. Оно определяет макроскопические явления: взаимодействие между ядрами и электронами в атомах и молекулах, приводит к излучению электромагнитных волн;

сильное, в котором участвуют адроны, имеет радиус взаимодействия 10^{-13} см. (например, внутри атомного ядра.);

слабое, в котором участвуют все частицы, имеет радиус взаимодействия 10^{-15} см;

гравитационное — самое слабое из 4-х фундаментальных взаимодействий, которое определяет взаимодействие всех видов материи.

Гамма-излучение — область коротковолнового электромагнитного излучения с длиной волны короче 1 ангстрема ($\lambda \leq 10^{-10}$ м). Представляет собой фотоны — частицы с энергией $E_\gamma = \hbar\nu$, где $\hbar$ — постоянная Планка, а ν — частота волны ($\nu = 2\pi c/\lambda$). При таких коротких длинах волн преобладают корпускулярные свойства частиц. В настоящее время этот термин применяется для обозначения жёсткого электромагнитного излучения с энергией квантов $E_\gamma > 10$ кэВ. Фотоны с более низкими энергиями относят к рентгеновскому излучению.

Гелиопауза — внешняя граница гелиосферы.

Гелиосфера — область космического пространства, занятая солнечным ветром.

Ген — часть молекулы ДНК, содержащая информацию о строении белка

Геомагнитное поле — магнитное поле Земли, созданное внутриземными источниками. В первом приближении имеет форму диполя. На поверхности вблизи экватора оно имеет напряжённость 0,312 Гс и увеличивается до 0,62 Гс вблизи полюсов. С увеличением расстояния от Земли убывает как R_3^{-3} .

Дозы радиации. Обычно дозы радиации измеряют в Рад. Рад — количество энергии, выделенной (поглощённой) в материале в результате воздействия радиации. В системе СИ используется единица Грей (Гр) = 100 Рад, или 1 дж/кг. Для измерения биологических поглощённых доз используют также зиверты (Зв) и РЭМ'ы — биологически эквивалентные дозы.

Соотношения между ними следующие: 1 Зв = 100 Рэм (1 Зв = 1 Дж/кг);

1 Рад — 100 эрг/г (энергия в 100 эрг, поглощённая в 1 г вещества).

1 Рэм = 1 Рад $\times$ Q, где Q — фактор качества, учитывающий воздействие радиации на конкретную биологическую структуру.

Q изменяется от 1 до 20 в зависимости от вида излучений: Q = 10 для протонов, Q = 3–10 для нейтронов; Q = 20 для более тяжелых частиц; Q = 1 для гамма-квантов и электронов.

ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота — основа клеток живых организмов. ДНК вместе с белками образует вещество хромосом. Является носителем генетической информации, соответствующей её отдельным участкам.

Ионизация — превращение нейтральных атомов и молекул в ионы при воздействии электромагнитного излучения (фотоионизация), нагреве (термическая ионизация), а также при столкновении частиц с электронами и другими частицами.

Кварки — фундаментальные частицы, входящие в состав адронов (барионов и мезонов). В рамках современных представлений кварки — точечные и бесструктурные объекты с размером менее 10^{-16} см.

Корона — внешняя часть атмосферы Солнца, характеризующаяся низкой плотностью (~1 частица в кубическом метре) и высокой температурой ($>10^6$ K) плазмы.

Корональная инжекция массы (coronal mass ejection — CME) — выброс солнечной плазмы в межпланетное пространство с образованием ударной волны. CME вызывают деформацию магнитного поля Земли и планет, и магнитные бури.

Космические лучи — высокоэнергичные ядра атомов и элементарные частицы космического происхождения. Есть ещё одно определение: заряженные частицы, ларморовский радиус которых превышает размер пространственной неоднородности локального магнитного поля.

Космическое пространство — пространство за пределами атмосферы Земли.

Космическое электромагнитное излучение — излучение в радио-, инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма диапазонах в космическом пространстве.

Космология — наука о наиболее общих свойствах Вселенной: однородности, изотропности и расширения.

Красное смещение — эффект увеличения длины волны в системе отсчёта наблюдателя по сравнению с длиной волны в самом источнике. Такой эффект возникает при движении, например, источника света относительно наблюдателя. Он стал основным наблюдательным фактом в пользу нестационарной космологической модели расширяющейся Вселенной.

Лептоны — фундаментальные частицы с полуцелым спином, не участвующие в сильном взаимодействии. Это электроны, мюоны, нейтрино и их античастицы.

Магнитная жёсткость (R) — степень противодействия частицы силе, отклоняющей её в магнитном поле. R (вольт) = pc/Q , где p — импульс частицы, Q — её зарядовое состояние и c — скорость света.

Магнитное поле — силовое поле, воздействующее на объекты, обладающие магнитным моментом. Источниками магнитного поля могут быть движущиеся электрические заряды, переменные электрические поля и магнитные моменты. Магнитным полем обладают некоторые планеты Солнечной системы. Наиболее мощное магнитное поле у Юпитера. Магнитный момент Земли во много раз меньше юпитерианского.

Магнитные бури — изменение магнитного поля планеты под воздействием нерегулярных процессов как в межпланетной среде (вариаций давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля), так и внутри магнитосферы планеты (вариации собственных электрических токов внутри магнитосферы). Магнитные бури сопровождаются комплексом геофизических явлений, среди которых полярные сияния, пульсации магнитного поля, генерация электромагнитных волн и др.

Магнитосфера Земли — область околоземного пространства, занятая геомагнитным полем.

Межпланетное магнитное поле — магнитное поле в межпланетном пространстве вне магнитосфер планет, преимущественно солнечного происхождения.

Межпланетное пространство — область космического пространства, ограниченного сферой радиусом, равным среднему расстоянию самой далёкой планеты от Солнца.

Мезоны — нестабильные элементарные частицы, принадлежащие к классу адронов. Это пионы (π -мезоны), каоны (K -мезоны) и ряд других. Входят в состав вторичных частиц широких атмосферных ливней.

Модуляция космических лучей — изменение потока космических лучей, обусловленное воздействием солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и солнечной активности.

Нейтрино — очень лёгкая стабильная элементарная частица, с электрическим зарядом, равным нулю. Принадлежит к семейству лептонов. Различают три вида нейтрино: электронные (ν_e), мюонные (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ) с соответствующими античастицами.

Нейтрон — частица с электрическим зарядом равным нулю и массой, соответствующей массе протона. В свободном состоянии нейтрон — нестабильная частица со временем жизни ~ 15 мин. Наряду с протонами является составной частью атомных ядер. В составе ядра он стабилен: в связанном состоянии его время жизни не менее 10^{32} лет.

Нейтронная звезда — звезда, состоящая из нейтронов. Образуется в результате коллапса родительской звезды. Она имеет чрезвычайно высокую плотность — более 10^{17} кг/м³ и малый радиус, всего ~ 20 км.

Одиночные сбои в микросхемах — внезапное нарушение работы цифровых микросхем, связанное, преимущественно, с воздействием тяжёлых заряженных энергичных частиц, проникающих через внешнюю оболочку космического аппарата и через корпус электронного устройства. По воздействию эффект может быть как обратимым, так и необратимым.

Перезарядка ионов — процесс взаимодействия положительного иона с нейтральным атомом или молекулой, при котором один из электронов нейтральной частицы переходит к иону. Зарядовое состояние иона при этом изменяется.

Полная энергия частицы — сумма кинетической энергии и энергии массы покоя $E_0 = m_0 c^2$. Для протона $E_0 = 938,232$ МэВ, для нейтрона $E_0 = 939,565$ МэВ и для электрона $E_0 = 510,984$ кэВ.

Полупроводниковый счётчик (детектор) — прибор для регистрации заряженных частиц, изготовленный из полупроводниковых материалов — кремния или германия. При прохождении через детектор частицы в нём вырабатывается электрический сигнал, который затем регистрируется электронными устройствами.

Поток всенаправленный — результат интегрирования $j(E)$ или $J(E)$ по 4π стерадиан телесного угла и измеряется в единицах см⁻²с⁻¹ МэВ⁻¹ или см⁻²с⁻¹ соответственно.

Поток частиц направленный

– **дифференциальный $j(E)$** — число частиц в единицу времени в данном интервале энергий в единице телесного угла наблюдения, падающих перпендикулярно на единицу площади;

– **интегральный поток** — полная интенсивность частиц с порогом более заданного.

Протон — стабильная элементарная частица с положительным электрическим зарядом массой в 1836 масс электрона, относящаяся к барионам. Протоны и нейтроны образуют атомные ядра.

Радиационные пояса — внутренние области магнитосфер планет с захваченными магнитным полем энергичными заряжёнными частицами. Верхний диапазон энергий захваченных частиц определяется магнитным моментом планет, обладающих магнитным полем. Для Земли максимальная энергия протонов составляет ~ 1 ГэВ, а электронов ~ 10 МэВ. В качестве минимальной энергии захваченных частиц обычно принимается пограничный диапазон с максимальными энергиями, характерными для плазмы — десятки–сотни кэВ.

Реликтовое излучение — фоновое космическое радиоизлучение с температурой 2,73 К, которое образовалось на ранних стадиях развития Вселенной. Относится к микроволновому диапазону с длиной волны 1,5 мм.

Солнечная вспышка — внезапная эмиссия электромагнитного излучения, частиц и плазмы в солнечной атмосфере.

Солнечная корона — внешняя разряжённая часть атмосферы Солнца с температурой от 10^6 до $2 \cdot 10^6$ К.

Солнечная постоянная — общая энергия от Солнца, поступающая на Землю в единицу времени и на единицу площади. С точностью до 0,1% эта величина ($1,37 \cdot 10^6$ эрг/см²сек) постоянна, несмотря на любые проявления солнечной активности.

Солнечный ветер — плазма, постоянно истекающая из Солнца.

Спин — собственный момент импульса элементарных частиц, имеющих квантовую природу и не связанный с перемещением частицы как целого.

Сцинтилляционный счётчик (детектор) — прибор для регистрации заряжённых частиц. Принцип действия основан на возбуждении частицами в ряде специальных материалов световых вспышек, которые регистрируются фотоумножителем.

Тёмная энергия (космический вакуум) — однородная по плотности среда во Вселенной, создающая эффект антигравитации, по сути управляющая процессом расширения Вселенной.

Тёмное вещество (скрытая материя) — один из основных видов материи во Вселенной. Его масса на порядок больше хорошо известной формы существования материи — барионной. Состав неизвестен.

Ударная волна — область пространства, в которой происходит резкое изменение параметров вещества (плотности, давления, температуры). Ударные волны распространяются со скоростью, превышающей скорость звука для данной среды. В межпланетном пространстве часто наблюдаются ударные волны, возникающие при солнечных вспышках. Другой пример — ударные волны от взрыва сверхновых звёзд.

Фермионы — элементарные частицы с полуцелым спином.

Форбуш-эффект в космических лучах — изменение потока космических лучей, связанное с прохождением межпланетных ударных волн.

Фотон — нейтральная элементарная частица с нулевой массой. Является переносчиком электромагнитного взаимодействия.

Хромосома — линейный набор генов (см. *ген*).

Хромосфера Солнца — слой солнечной атмосферы выше фотосферы и ниже короны.

Черенковское свечение — эффект, открытый П. Черенковым и С. Вавиловым, излучение света, которое возникает при движении в веществе заряженных частиц со скоростью, превышающую фазовую скорость света в этом веществе.

Черенковский счётчик (детектор) — прибор, предназначенный для регистрации излучения, возникающего при взаимодействии заряженной частицы с рабочим телом детектора — сцинтиллятором.

Чёрная дыра — астрофизический объект с массой, достаточной для того, чтобы гравитационные силы смогли воспрепятствовать выходу любого вещества и излучения за его пределы.

ШАЛ — широкий атмосферный ливень, каскад вторичных частиц в атмосфере Земли, вызванный взаимодействием первичной частицы космических лучей с ядрами атмосферы.

Электрон — отрицательно заряженная стабильная частица с массой около $9 \cdot 10^{-28}$ г. Относится к лептонам.

Электронвольт — кинетическая энергия заряженной частицы, которую она приобретает при ускорении в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 Вольт. $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг.

Энергетический спектр космических лучей — распределение потока космических лучей по энергии. Энергетический спектр можно представить в дифференциальной или интегральной форме.

Дифференциальный (или интегральный) энергетический спектр частиц — графическое представление зависимости дифференциального потока $j(E)$ или интегрального $J(E)$ от энергии. Обычно используют степенную аппроксимацию энергетических спектров:

$j(E) = j_0 E^{-\gamma}$ — для дифференциального спектра;

$J(E) = [j_0 (E^{\gamma+1})] / (\gamma+1)$ — для интегрального; γ — спектральный индекс.

Южно-Атлантическая аномалия — пространственная область, расположенная в Южной Атлантике вблизи берегов Бразилии (иногда называют Бразильской магнитной аномалией), характеризующаяся сильным ослаблением геомагнитного поля. Это ослабление связано с асимметрией расположения источника земного магнитного поля. Существование аномалии приводит к «провисанию» радиационных поясов над Землёй: именно в этой области наблюдают повышенные потоки частиц радиационных поясов на высотах 300–500 км.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Часть 1. Высокоэнергичная Вселенная.	7
Глава 1. После Большого взрыва.	8
1.1. Убегающие галактики	8
1.2. Сотворение вещества	12
1.3. Гибель звезд	14
1.4. Наш мир – темный и светлый или жизнь в вакууме	17
1.5. «Большой взрыв» на Земле.	22
Глава 2. Земная и неземная радиация, или открытие космических лучей.	26
2.1. Радиоактивность Земли	26
2.2. Неземная радиация: трудный путь познания	27
Глава 3. Как поймать космические лучи?	34
3.1. Космические лучи в атмосфере	34
3.2. Ловушки частиц.	35
3.3. Космические лучи вдали от Земли	41
Глава 4. Что мы знаем о космических лучах.	47
4.1. Крутая траектория познания состава космических лучей	47
4.2. Космическая материя – космические лучи: из чего она состоит?	51
4.3. Энергия ядер космических частиц	52
Глава 5. Откуда вы, странники Вселенной?	59
5.1. Поиск звёзд на небе.	59
5.2. Сверхновые старые звёзды	60
Глава 6. Пушки Вселенной.	64
6.1. Космический ускоритель – Пэватрон.	64
6.2. Превращения звёздного вещества или о месте рождения и возрасте космических лучей	68
6.3. Поиски Пэватронов: о чём говорят результаты экспериментов?	70

6.4. Электронный компонент космических лучей	76
6.5. Редкие и драгоценные частицы	78
Глава 7. Мистерия обрезания	79
7.1. Хиллас против Зэватронов	79
7.2. Реликтовое излучение и «конец» спектра космических лучей	83
7.3. Поиски «Зэватронов»: о чём говорят результаты экспериментов?	86
Энергетический спектр КЛПВЭ — известен?	88
Массовый состав КЛПВЭ — известен?	89
Где находятся источники КЛПВЭ?	90
7.4. Сверху — вниз, или вперед к экзотике	93
ГЛАВА 8. Космическое око	98
8.1. Ультрафиолетовый след космической частицы	98
8.2. Зеркало на орбите	101
Глава 9. Гамма-изображение Вселенной	106
9.1. Гамма-фотография Млечного Пути	107
9.2. Загадочные всплески гамма-излучения	112
Глава 10. Частицы из зазеркалья	118
10.1. Другое состояние вещества	118
10.2. Погоня за антивеществом	119
Глава 11. Частицы Полтергейста	123
11.1. Приключения «неуловимых»	123
11.2. Нейтринное море реликтов	124
11.3. Нейтрино сверхновых	125
11.4. Нейтринная астрономия сверхновой SN1987A	126
11.5. Капканы для неуловимых	127
11.6. О нейтрино предельно высоких энергий	130
Заключение к 1 части книги, или «возьмемся за руки друзья!»	132
Часть 2. Солнечный дом	135
Глава 12. Двуликий Янус	136
12.1. Наша Звезда на звёздной шкале	136
12.2. Спринклер Солнечной системы	138
12.3. Активная жизнь нашей звезды	140
12.4. Солнечные бури и солнечные ускорители	142
12.5. Состав (элементный и зарядовый) солнечных космических лучей	145
12.6. Прогноз солнечной активности	146
Глава 13. Солнечный дом космических странников	147
13.1. Плазменная бутылка солнечной системы	147
13.2. Солнечная метла	149
13.3. Аномальные частицы в гелиосфере	151

Глава 14. Магнитная броня планет	156
14.1. Магнитное поле Земли и ее магнитосфера	156
14.2. Земная ловушка для космических странников	158
14.2. Магнитосферы планет солнечной системы.	160
Глава 15. Магнитные бури	163
15.1 Взрыв магнитной оболочки Земли	163
15.2. Проникновение.	167
15.3. Как электрические разряды губят спутники	168
Глава 16. Следы странников.	171
16.1. Атмосферный след странников — климат сегодня.	171
16.2. Гром и молнии странников	173
16.3. Климат до нашей эры и спиральные рукава Галактики	175
16.4. Солнечная бомбардировка атмосферы	176
16.5. Салют космическим лучам.	178
Глава 17. Околоземная радиация, поучительная история выдающегося открытия	183
17.1. Первый акт космической эры — драма эпохального открытия	183
17.2. Немного о кинематике частиц в магнитном поле.	188
17.3. Родители пленников магнитной ловушки	191
Глава 18. Ядерная зима космического пространства	197
Глава 19. Околоземной зоопарк космической радиации.	202
19.1. Галактические источники	202
19.2. Солнечный источник	204
19.3. Земной источник	205
19.4. Юпитер как источник	207
19.5. Еще один «альбедный источник»	207
Глава 20. Ускорители частиц ближнего космоса	209
20.1. Транспорт частиц в радиационных поясах	209
20.2. «Двугорбый верблюд» электронных радиационных поясов	214
20.3. Зазор — пустой?	216
20.4. Проблема «инжектора».	219
Глава 21. Радиационные удары Космоса	221
21.1. Радиационный климат около Земли	221
21.2. Другие космические факторы радиационного риска на низких высотах	224
21.3. Радиационные бури на окраине околоземного пространства.	228
21.4. Нейтронный ореол Земли	230
21.5. «Человечество не останется вечно на Земле...» (О радиационной опасности дальних космических миссий)	232

21.6. Радиационный риск космических одиссей, или будут ли на «Марсе яблоны цвести»?	238
21.7. Риск авиарейсов через полюс	239
Глава 22. Тяжелые ядра космической радиации: новая напасть .	241
22.1. О воздействии ТЗЧ на биологические структуры	242
22.2. О воздействии ТЗЧ электронику космических аппаратов	246
22.3. Где тяжелые ядра бьют наиболее сильно?	249
22.3.1. ТЗЧ в радиационных поясах Земли	249
22.3.2. ТЗЧ в солнечных космических лучах	252
22.3.3. ТЗЧ в галактических космических лучах	254
22.3.4. Вторичные ТЗЧ на околоземных орбитах	255
22.3.5. Вторичные ТЗЧ на поверхности Луны и Марса	256
22.4. Проблема ТЗЧ и планирование космических миссий.. . . .	257
Послесловие	258
Литература.	260
Словарь терминов	261

Панасюк Михаил Игоревич
Радиоактивная Вселенная

Подп. в печ. 00.00.2019. Формат 70×100/16.
Усл. п. л. 22. Тираж 530 экз. Заказ № .

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино, ул. Полевая, 12
E-mail: vek-2@mail.ru., www.vek2.ru
Изд. Лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

Отпечатано в соответствии
с предоставленными материалами
в ООО «ИПК Парето-Принт», г. Тверь,
www.pareto-print.ru

