

# 近地雷暴电场与羊八井地面宇宙线 关联的模拟研究\*

周勋秀<sup>1)†</sup> 王新建<sup>1)</sup> 黄代绘<sup>1)</sup> 贾焕玉<sup>1)</sup> 吴超勇<sup>2)</sup>

1)(西南交通大学物理科学与技术学院, 成都 610031)

2)(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

(2015年3月11日收到; 2015年4月24日收到修改稿)

雷暴期间地面宇宙线强度变化的研究对理解大气电场加速宇宙线次级带电粒子的物理机理具有重要意义. 分析西藏羊八井 ARGO 实验中 2012 年大气电场的数据后发现, 近地雷暴电场的强度可达 1000 V/cm 甚至更高. 用 Monte Carlo 方法模拟研究了近地雷暴电场与羊八井地面宇宙线强度的关联. 当雷暴电场强度(取 1500 V/cm) 大于逃逸电场时, 宇宙线次级粒子中正、负电子的数目呈指数增长, 在大气深度约 520 g/cm<sup>2</sup> 处达到极大值, 与 Gurevich 等提出的相对论电子逃逸雪崩机理和 Dwyer 理论相符. 当雷暴电场强度小于逃逸电场时, 在所有负电场范围和大于 600 V/cm 的正电场范围, 总电子数目随电场强度的增大而增加; 当正电场小于 400 V/cm 时, 总电子数目均出现一定幅度的下降; 在电场为 400—600 V/cm 范围内, 总电子数目的变化与原初粒子的能量有关, 原初能量小于 80 GeV 时, 其次级粒子中总电子数目增加, 原初能量在 80—120 GeV 范围内时, 总电子数目变化不明显, 原初能量大于 120 GeV 时, 总电子数目出现下降, 下降幅度约 4%. 模拟结果可对羊八井 ARGO 实验的观测结果给予合理的解释.

**关键词:** 近地雷暴电场, 宇宙线, Monte Carlo 模拟, 西藏羊八井

**PACS:** 92.60.Pw, 92.60.Ta, 52.80.Mg

**DOI:** 10.7498/aps.64.149202

## 1 引言

来自宇宙空间深处的高能宇宙线原初粒子进入大气层后, 与空气中的原子核发生强相互作用和电磁相互作用, 产生大量的宇宙线次级粒子(包括电子、强子、 $\mu$ 子、光子等成分), 这种现象被称为广延大气簇射(extensive air shower, EAS). 1924年, Wilson<sup>[1]</sup>首次指出雷暴云中的强电场可以把宇宙线次级粒子中质量很小的电子加速到很高的能量. 1992年, Gurevich等<sup>[2]</sup>提出了相对论电子逃逸雪崩机理(RREA), 认为能量约 1 MeV 的电子在雷暴电场(强度约 2000 V/cm、厚度约 1000 m 量级)中可被加速, 当获得足够高的能量时, 将发生雪崩效应, 电子数目呈指数增长. Cramer等<sup>[3]</sup>通过分析计算得

到了 RREA 机理中电子被雷暴电场加速后的能谱特征. 多年来, 很多科学家试图通过地面宇宙线观测实验去寻找雷暴期间地面宇宙线突然增强的现象(TGE). 1985年, Alexeenko等<sup>[4]</sup>第一次通过地面宇宙线观测实验发现雷暴期间地面宇宙线强度的变化与电场相关. EAS-TOP 实验<sup>[5]</sup>记录到雷暴期间宇宙线次级粒子的计数率增加了 10%—15%, 这种现象被解释为强电场对宇宙线次级带电粒子加速的结果. Tsuchiya等<sup>[6]</sup>对 Norikura 宇宙线观测站实验数据的分析发现, 雷暴期间地面宇宙线次级粒子中光子、电子计数率的增加与大气电场相关. Chilingarian等<sup>[7,8]</sup>利用 ASEC(Aragats Space Environment Center)实验数据探测到了多个 TGE 事件. 上述地面实验的观测结果虽然不能排除其他机理的可能, 但都与 Gurevich 等提出的 RREA 机

\* 国家自然科学基金(批准号: 11175147, 11475141)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 2682014CX091)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhoux@ihep.ac.cn

理相符.

王俊芳等<sup>[9]</sup>利用羊八井中子监测器数据研究了雷暴电场对宇宙线次级粒子 $\mu$ 子的影响,发现中子监测器计数率变化与地面雷暴电场场强之间的相关性较小或者没有相关性. 2002年, Alexeenko等<sup>[10]</sup>发现雷暴电场对宇宙线次级粒子中软成分(电子)和硬成分( $\mu$ 子)的影响不同,在雷暴电场中电子的强度增加而 $\mu$ 子的强度出现了一定幅度的下降. 徐斌等<sup>[11]</sup>、Zhou等<sup>[12]</sup>利用ARGO实验中单粒子数据研究了雷暴期间地面宇宙线计数率的变化,发现原初能量低的宇宙线计数率有明显增长,原初能量高的宇宙线计数率增长不明显,有的还出现下降现象. 这种雷暴期间地面宇宙线计数率不增加反而减少的现象,用Gurevich等提出的RREA机理无法给予合理解释. 那么该现象与雷暴电场有关联吗? 产生这种现象的原因和物理机理究竟是什么? 要解决上述问题,需要通过Monte Carlo模拟的方法进行细致的研究.

在国际通用的模拟广延大气簇射的CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade)<sup>[13]</sup>软件包中,描述电子行为的是电磁级联EGS4中的子程序ELECTR. 为了研究电场对宇宙线次级粒子中电子的影响,在子程序ELECTR中加入了Bielajew<sup>[14]</sup>提出的电子在电磁场中传输的理论模型. 本文利用CORSIKA软件包研究了西藏羊八井

(海拔4.3 km)的近地雷暴电场与地面宇宙线强度的关联. 考虑到宇宙线次级带电粒子中电子占大多数,并且电场对质量小的电子加速作用更为明显,因而模拟中只考虑雷暴电场对电子的影响.

## 2 西藏羊八井近地雷暴电场的特征

研究表明,雷暴期间常伴随强烈的闪电活动<sup>[15,16]</sup>,雷暴电场大致分布于海拔高度为4—12 km的范围内<sup>[17]</sup>,其强度高达1000 V/cm,有的甚至超过2000 V/cm<sup>[18,19]</sup>. 本文所分析的大气电场数据来源于2005年安装在西藏羊八井ARGO实验(中国和意大利合作的地面宇宙线观测实验)大厅顶部的大气电场仪(EFM-100),最初的量程是 $\pm 100$  V/cm;由于雷暴期间大气电场的强度常超过100 V/cm,2009年该电场仪的量程扩为 $\pm 200$  V/cm;2011年11月6日起,其量程扩为 $\pm 1000$  V/cm. 本文分析了西藏羊八井2012年的大气电场数据,结果表明,晴天(平静天气)的大气电场强度约2 V/cm(文中设定晴天电场方向为正,即头顶正电荷在地面产生正极性电场),与徐斌等<sup>[20]</sup>对羊八井2006年3月至2011年6月大气电场数据的统计结果一致;雷暴期间大气电场发生剧烈变化,其强度大多在1000 V/cm以内,部分雷暴电场的强度大于1000 V/cm,有的雷暴以正电场为主,

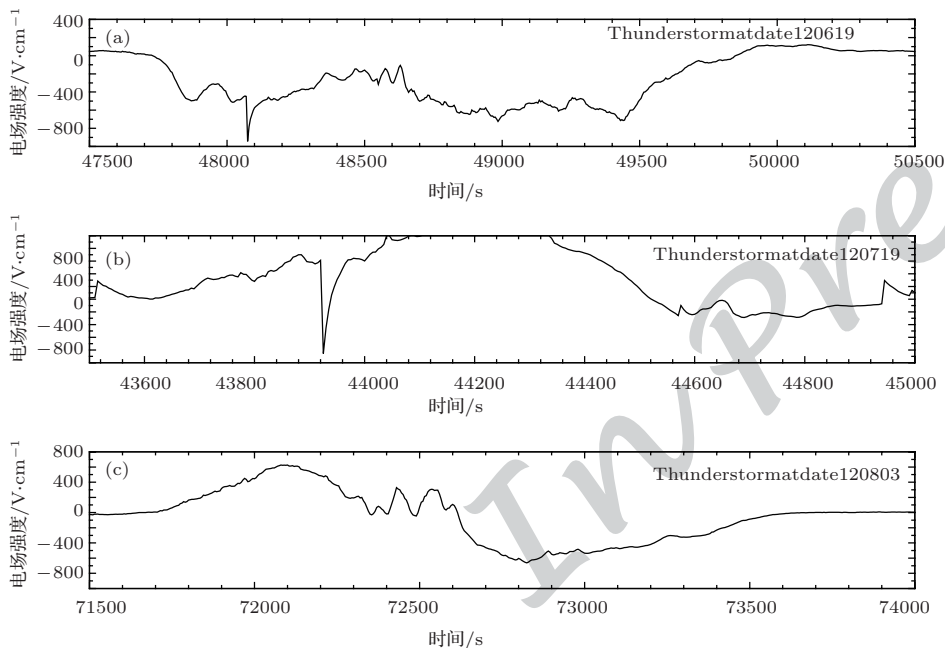


图1 羊八井ARGO实验观测到的雷暴电场随时间的变化 (a) 负电场为主; (b) 正电场为主; (c) 正、负电场交替变化  
Fig. 1. Strength of thunderstorms electric field detected by ARGO-YBJ experiment as a function of time: (a) negative-based; (b) positive-based; (c) alternation of negative and positive field.

有的雷暴以负电场为主, 有的雷暴正、负电场交替变化. 图1分别是2012年6月19日(120619)、7月19日(120719)和8月3日(120803)在羊八井观测到的典型雷暴电场随时间变化的分布曲线(以当天的零时刻为计时起点).

### 3 CORSIKA软件包中的参数设置

根据Gurevich等提出的RREA理论, 对约1 MeV的电子, Dwyer<sup>[21]</sup>研究得到逃逸电场 $E_{RB}$ (电子在该电场中被加速获得足够高的能量, 可发生逃逸击穿, 产生雪崩效应)的公式为

$$E_{RB} = E_{th-RB} e^{(-Z/8.4)}, \quad (1)$$

其中 $Z$ 是海拔高度(km),  $E_{th-RB}$ 是海平面处对应的逃逸电场. Symalisty等<sup>[22]</sup>计算得 $E_{th-RB} = 2800$  V/cm.

研究表明, 在地面宇宙线观测实验中, 距离探测面太远的高空雷暴电场对总电子数目几乎没有影响<sup>[23]</sup>. 本模拟中添加雷暴电场的空间范围选取海拔高度为4.3—6.3 km. 由(1)式可计算出海拔6.3 km和4.3 km处的逃逸电场分别为1320 V/cm和1680 V/cm. 根据在羊八井观测到的近地雷暴电场的特征, 对大于逃逸电场的近地雷暴电场取了-1500 V/cm和1500 V/cm两个值; 对小于逃逸电场的近地雷暴电场在-1300—1300 V/cm范围内取了一系列值.

本文模拟广延大气簇射的软件包为CORSIKA73500版本, 高能强相互作用模型为QGSJETII-04, 低能相互作用模型为GHEISHA. 宇宙线原初粒子中大部分是质子、 $\alpha$ 粒子, 有少量的电子、 $\gamma$ 射线、中微子等, 本文以质子为例进行模拟研究. 为了与羊八井ARGO实验的探测结果对照, 文中选取的探测面是海拔高度为4.3 km的西藏羊八井, 根据ARGO实验的观测能区, 模拟中对原初粒子的能量在30—1000 GeV范围内选取了一系列值. 考虑到雷暴电场对电子的加速作用, 在模拟中将电子的截断能量降为0.1 MeV.

## 4 模拟结果

### 4.1 近地雷暴电场大于逃逸电场时的模拟结果

本文对原初能量为770 GeV的质子(从天顶方向入射), 在海拔高度为4.3—6.3 km(对应的

大气深度606—484 g/cm<sup>2</sup>)的范围内, 分别添加-1500 V/cm和1500 V/cm两个均匀电场, 模拟得到了宇宙线次级粒子中正电子和负电子(在与“正电子”加以区分时, 文中将电子称为“负电子”)数目随大气深度的变化, 见图2. 不加电场时, 由于康普顿散射效应<sup>[10]</sup>(光子与空气中原子核外的电子发生弹性碰撞产生反冲的负电子)和正电子湮没效应(正电子与空气中原子核外的电子发生湮没产生光子), 导致负电子数目比正电子明显要多. 雷暴电场可以加速或减速宇宙线次级粒子中的带电粒子. 当电场为1500 V/cm时, 正电子被加速, 其数目增加, 负电子被减速, 其数目减少, 在所加电场强度大于逃逸电场的范围内, 正电子的数目呈指数增长; 当电场为-1500 V/cm时, 负电子被加速, 其数目增加, 正电子被减速, 其数目减少, 在所加电场强度大于逃逸电场的范围内, 负电子的数目呈指数增长. 根据Dwyer理论, 可用(1)式计算出逃逸电场大小为1500 V/cm时所对应的海拔高度为5.2 km(对应的大气深度535 g/cm<sup>2</sup>), 本文模拟得到正、负电子数目在约520 g/cm<sup>2</sup>处达到极大值, 与理论计算值有微小偏移, 这应该是在模拟中设定了电子截

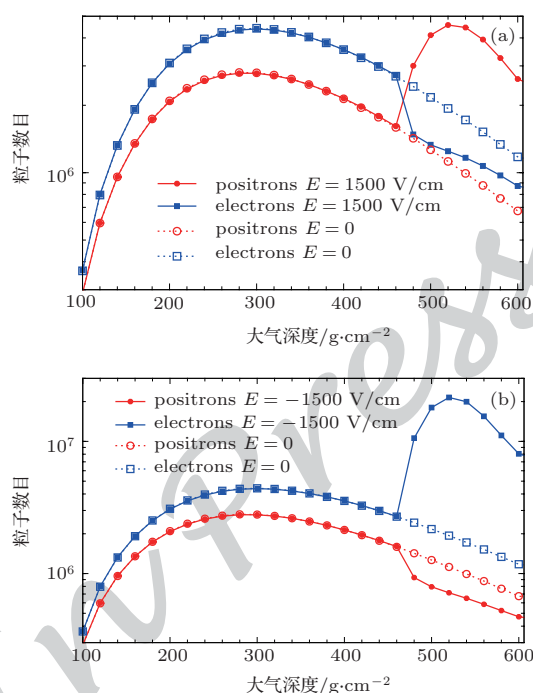


图2 (网刊彩色) 正、负电子数目在雷暴电场中随大气深度的变化 (a) 1500 V/cm; (b) -1500 V/cm; 添加电场的区域: 484—606 g/cm<sup>2</sup>

Fig. 2. (color online) Number of electrons and positrons as a function of atmospheric depth in different fields: (a) 1500 V/cm; (b) -1500 V/cm; electric field area: 484—606 g/cm<sup>2</sup>.

断能量(0.1 MeV)所导致的,即文中对能量小于0.1 MeV的电子不再跟踪.可见,近地雷暴电场在大于逃逸电场范围内的模拟结果与RREA机理和Dwyer理论相符.

图3是雷暴电场中总电子数目随大气深度的变化.结果表明,负电场(-1500 V/cm)中总电子数目的增加明显大于正电场(1500 V/cm),可见负电场对负电子的影响比正电场对正电子的影响大得多.

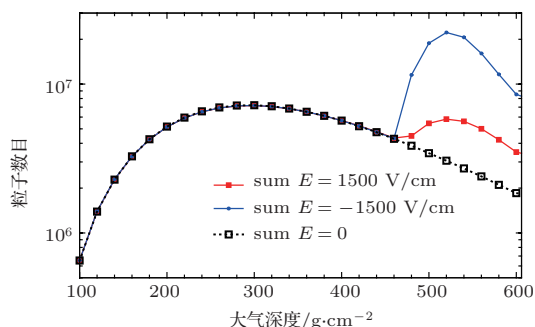


图3 (网刊彩色)总电子数目在雷暴电场(添加电场的区域:484—606 g/cm<sup>2</sup>)中随大气深度的变化

Fig. 3. (color online) Total number of electrons and positrons as a function of atmospheric depth in electric fields (electric field area: 484—606 g/cm<sup>2</sup>).

### 4.2 近地雷暴电场小于逃逸电场时的模拟结果

对原初能量为770 GeV的质子,当近地雷暴电场小于逃逸电场时,模拟得到羊八井处地面宇宙线次级粒子中正、负电子数目变化的百分比和总电子数目变化的百分比与雷暴电场的关系,见图4.由

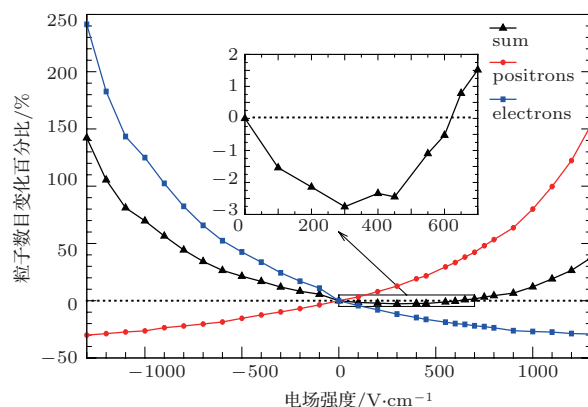


图4 (网刊彩色)粒子数目变化的百分比与雷暴电场的关系(插图是总电子数目减少区域的放大图)

Fig. 4. (color online) Percent change of particle number as a function of electric field strength (the illustration is the enlarged view of the total number reducing range).

图4可知,当雷暴电场为负电场时,负电子数目增加,正电子数目减少,总电子数目随着电场强度的增大而增加(如电场为-900 V/cm时,总电子数目增加约58%;电场为-1300 V/cm时,总电子数目增加约142%).当雷暴电场为正电场时,正电子数目增加,负电子数目减少,总电子数目在小于600 V/cm的范围内出现下降,下降幅度约3%;当雷暴电场大于600 V/cm时,总电子数目随着电场强度的增大而增加,电场为90 V/cm时,总电子数目增加约8%;电场为1300 V/cm时,总电子数目增加约39%.考虑到ARGO探测器对带电粒子响应的能量范围,本文对能量大于3 MeV的电子数目也进行了统计,得到了相同的规律.

### 4.3 原初粒子能量变化时的模拟结果

在羊八井ARGO实验中,探测到雷暴期间地面宇宙线计数率的变化与原初粒子的能量有关,发现原初能量高的宇宙线计数率增长不明显,甚至还出现下降的现象[11,12].本文对正雷暴电场中不同能量的原初粒子进行了模拟,根据ARGO实验的观测能区,对原初粒子的能量在30—1000 GeV范围内选取了一系列值.图5是不同原初能量的质子经过大气层后到达羊八井处总电子数目变化的百分比与雷暴电场的关系;图6是不同雷暴电场时到达羊八井处总电子数目变化的百分比与原初能量的关系.由图5和图6可知,雷暴电场大于600 V/cm时总电子数目都增加、电场小于400 V/cm时,总电子数目都出现减少的现象;电场

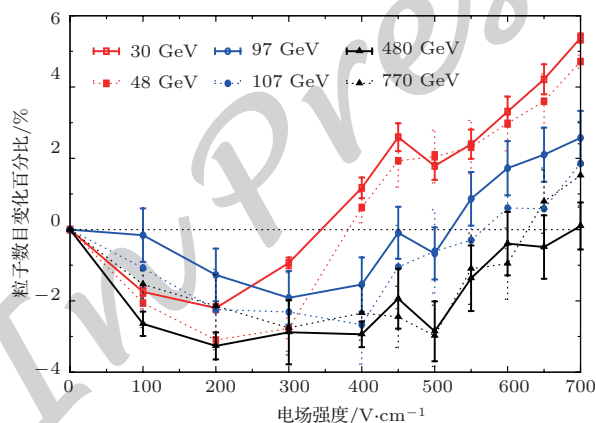


图5 (网刊彩色)不同原初能量时总电子数目变化的百分比随雷暴电场强度的变化

Fig. 5. (color online) Percent change of the total number of electrons and positrons as a function of electric field strength for different primary energies.



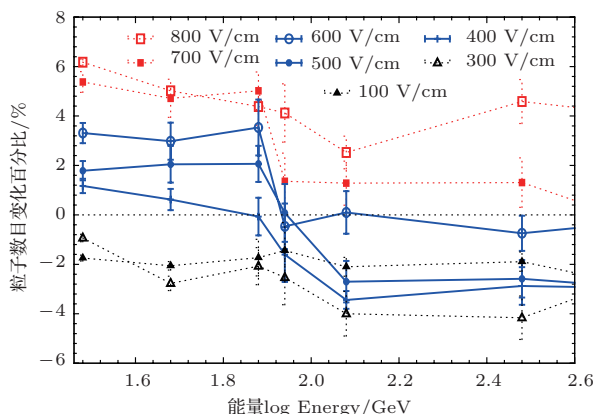


图6 (网刊彩色) 不同雷暴电场时总电子数目变化的百分比随原初能量的变化

Fig. 6. (color online) Percent change of the total number of electrons and positrons as a function of primary energies in different electric fields.

在400—600 V/cm的范围内, 总电子数目的变化与原初能量有关, 当能量小于80 GeV时, 总电子数目增加, 能量在80—120 GeV范围时, 总电子数目变化不明显, 在能量大于120 GeV时, 总电子数目出现下降, 其下降的幅度约4%。模拟结果与西藏羊八井ARGO实验的观测结果具有相同的趋势。

## 5 讨论

宇宙线次级粒子中总电子数目在雷暴电场中出现了下降的现象, 其原因可能与电场的极性、电场的强度、宇宙线次级粒子中正、负电子的比例以及电子的能量等有关。下面我们以前初能量为770 GeV的质子为例来进行讨论。

图7为不加电场时正、负电子数目各自占总电子数目的百分比随大气深度的变化。可见, 负电子的百分比随大气深度的增大而增加, 正电子的百分比则减少, 到达探测面时, 负电子数目大约是正电子的1.8倍。

添加电场后, 模拟可得正、负电子数目分别在负电场和正电场中占总电子数目的百分比随大气深度的变化关系, 见图8和图9。由图8可知, 在负电场中, 负电子被加速(部分低于截断能量的电子获得能量后进入探测器的探测范围), 其比例继续增加, 正电子被减速, 其比例继续减少, 总电子数目增加。由图9可知, 在正电场中, 正电子被加速, 其比例逐渐增加, 负电子被减速, 其比例逐渐减少, 到达探测面处, 若电场小于600 V/cm, 负电子的比例仍比正电子多, 总电子数目出现减少的现象; 若电场大于600 V/cm, 正电子的数目超过负电子的数

目, 总电子数目增加。可见, 由于负电子比正电子多, 到达探测面时, 在负电场中总电子数目不会出现下降的现象; 在正电场中, 根据电场的强度不同, 总电子数目有可能增加, 也有可能减少。

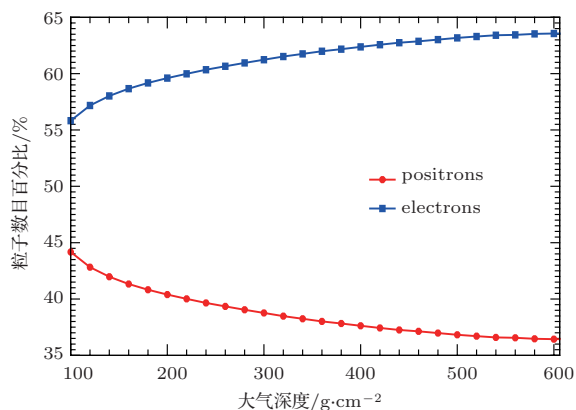


图7 (网刊彩色) 不加电场时正、负电子数目占总电子数目的百分比随大气深度的变化

Fig. 7. (color online) Percent of electrons and positrons number as a function of atmospheric depth in absence of a field.

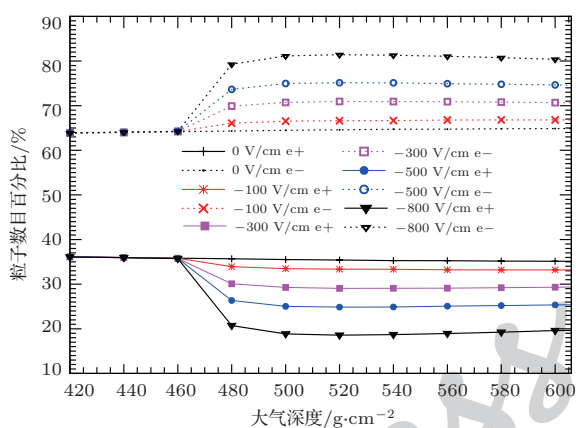


图8 (网刊彩色) 不同负电场中正、负电子数目占总电子数目的百分比随大气深度的变化

Fig. 8. (color online) Percent of electrons and positrons number as a function of atmospheric depth in different negative fields.

根据Bethe<sup>[24]</sup>的理论知, 电子在介质中运动时受到的能损与电子的能量相关, 对能量大于约1.4 MeV的电子, 随着电子能量的增大其受到的能损会逐渐增加。宇宙线次级粒子中的高能电子在大气层中传播时会与空气分子碰撞而受到阻力, 并通过韧致辐射损失能量, 同时在电场力作用下加速获得能量。那么, 电子可被加速的最大能量(本文称其为平衡能量)可写为 $U(X) = qEZ_0X_0/X$ <sup>[23]</sup>, 其中 $E$ 为所加的电场强度,  $X$ 为大气深度,  $X_0 = 36.7 \text{ g/cm}^2$ ,  $Z_0 = 8.4 \text{ km}$ 。

电子能量低于平衡能量时被加速, 高于平衡能量时主要通过辐射损失能量. 可见, 在相同的大气深度处, 电场越小, 电子可被加速的平衡能量也越小. 如在大气深度为  $500 \text{ g/cm}^2$  处, 电场为  $1000 \text{ V/cm}$  时, 电子可被加速的平衡能量为  $61.6 \text{ MeV}$ ; 电场为  $500 \text{ V/cm}$  时, 平衡能量为  $30.8 \text{ MeV}$ ; 电场小于  $100 \text{ V/cm}$  时, 平衡能量小于  $6.2 \text{ MeV}$ .

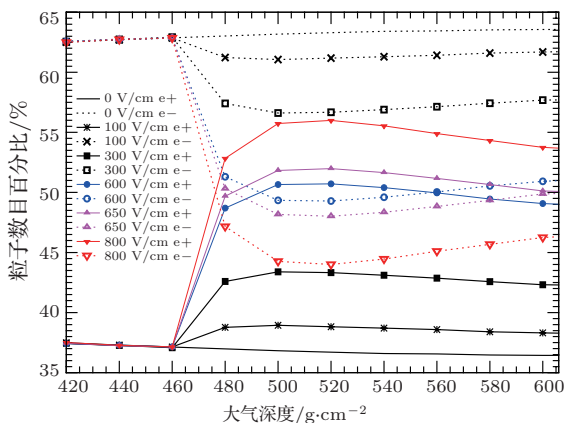


图9 (网刊彩色) 不同正电场中正、负电子数目占总电子数目的百分比随大气深度的变化

Fig. 9. (color online) Percent of electrons and positrons number as a function of atmospheric depth in different positive fields.

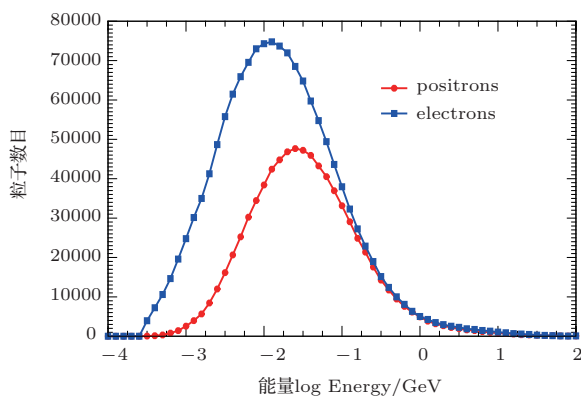


图10 (网刊彩色) 在海拔  $6.3 \text{ km}$  处, 无电场时正、负电子的能量分布

Fig. 10. (color online) Energy distributions of electrons and positrons at an altitude of  $6.3 \text{ km}$  in absence of a field.

图10为海拔  $6.3 \text{ km}$  处(即将进入本文设定的雷暴电场范围)宇宙线次级粒子中正、负电子的能量分布, 可见正电子的能量比负电子的能量大. 相同强度的雷暴电场对正电子的影响比对负电子的要小(如大气深度为  $500 \text{ g/cm}^2$ 、电场大小为  $500 \text{ V/cm}$  时, 约  $65.4\%$  的负电子可被加速, 而只有约  $48.1\%$  的正电子可被加速), 这也解释了文中

图3的现象, 即负电场对负电子的影响比正电场对正电子的影响要大.

由上述讨论可知, 由于康普顿散射效应和正电子湮没效应, 导致正电子的数目比负电子少, 同时正电子的能量比负电子高, 则正电场对正电子的加速影响比对负电子的减速影响要小, 所以在一定范围内的正电场中(在本模拟条件下为小于  $600 \text{ V/cm}$  的正电场), 地面宇宙线次级粒子中总电子数目出现了下降现象. 原初宇宙线能量不同时, 其次级粒子中电子的能量也不同. 那么在相同的正雷暴电场中, 原初能量越大, 次级粒子中正、负电子的能量也越高, 可被加速的正电子比例也越少, 其数目增加得就越少, 导致原初能量大时地面宇宙线强度出现了下降的现象.

## 6 结 论

本文根据羊八井近地雷暴电场的特征, 通过 Monte Carlo 方法, 利用 CORSIKA73500 软件包模拟研究了近地雷暴电场与羊八井地面宇宙线次级粒子中电子数目的关联. 得到了以下结论:

1) 当雷暴电场(本模拟中取电场强度为  $1500 \text{ V/cm}$ )在大于逃逸电场的空间范围内, 正、负电子数目呈指数增长, 在大气深度约  $520 \text{ g/cm}^2$  处达到极大值, 与 Gurevich 等的 RREA 机理和 Dwyer 理论相符;

2) 在雷暴电场小于逃逸电场的负电场范围内, 由于负电子比正电子多, 同时负电子的能量比正电子的小, 所以在负电场范围内宇宙线次级粒子中总电子数目随着电场强度的增大而增加;

3) 在雷暴电场小于逃逸电场的正电场中, 总电子数目在大于  $600 \text{ V/cm}$  的范围内随着电场强度的增大而增加, 在小于  $400 \text{ V/cm}$  的电场中总电子数目均出现了下降现象; 电场在  $400\text{--}600 \text{ V/cm}$  的范围内, 总电子数目的变化与原初能量有关, 当能量小于  $80 \text{ GeV}$  时, 总电子数目增加, 能量在  $80\text{--}120 \text{ GeV}$  范围时, 总电子数目变化不明显, 在能量大于  $120 \text{ GeV}$  时, 总电子数目出现下降, 其下降的幅度达约为  $4\%$ , 这是由于康普顿散射效应和正电子湮没效应, 导致正电子的数目比负电子少得多, 同时正电子的能量比负电子的能量大, 所以在一定的正电场范围内出现了下降现象; 在 ARGO 实验中探测到雷暴期间地面宇宙线计数率在低能区增加, 在高能区出现了一定幅度的下降, 本文的模拟结果与 ARGO 实验的探测结果一致.

感谢中国科学院高能物理研究所丁林恺、朱清棋、查敏研究员在 CORSIKA 软件包中添加电场模型时给予的帮助和郭义庆副研究员在本工作中的讨论, 感谢西藏羊八井 ARGO 实验合作组所有成员的帮助.

### 参考文献

- [1] Wilson C T R 1924 *Proc. Phys. Soc. London* **37** 32D
- [2] Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R 1992 *Phys. Lett. A* **165** 463
- [3] Cramer E S, Dwyer J R, Arabshahi S, Vodopyanov I B, Liu N, Rassoul H K 2014 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **119** 7794
- [4] Alexeenko V V, Chernyaev A B, Chudakov A E, Khaerdinov N S, Ozrokov S K, Sborshikov V G 1985 *Proceedings of the 19th International Cosmic Ray Conference* La Jolla, USA, August 11–23, 1985 p352
- [5] Vernetto S 2001 *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference* Hamburg, Germany, August 7–15, 2001 p4165
- [6] Tsuchiya H, Enoto T, Torii T, Nakazawa K, Yuasa T, Torii S, Fukuyama T, Yamaguchi T, Kato H, Okano M, Takita M, Makishima K 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 255003
- [7] Chilingarian A, Daryan A, Arakelyan K, Hovhannisyan A, Mailyan B, Melkumyan L, Hovsepyan G, Chilingaryan S, Reymers A, Vanyan L 2010 *Phys. R. D* **82** 043009
- [8] Chilingarian A, Hovsepyan G, Hovhannisyan A 2011 *Phys. R. D* **83** 062001
- [9] Wang J F, Qie X S, Lu H, Zhang J L, Yu X X, Shi F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 159202 (in Chinese) [王俊芳, 鄒秀书, 卢红, 张吉龙, 于晓霞, 石峰 2012 物理学报 **61** 159202]
- [10] Alexeenko V V, Khaerdinov N S, Lidvansky A S, Petkov V B 2002 *Phys. Lett. A* **301** 299
- [11] Xu B, Bie Y G, Zou D 2012 *Chin. J. Space Sci.* **32** 501 (in Chinese) [徐斌, 别业广, 邹丹 2012 空间科学学报 **32** 501]
- [12] Zhou X M, Ye N, Zhu F R, Jia H Y 2011 *Proceedings of the 32th International Cosmic Ray Conferenc* Beijing, China, August 11–18, 2011 p287
- [13] Heck D, Knapp J, Capdevielle J, Schatz G, Thouw T <http://www-ik.fzk.de/corsika/> [2014-03-06]
- [14] Bielajew A F 1988 *Electron Transport in E and B Fields, in Monte Carlo Transport of Electrons and Photons* (New York: Plenum Press) pp421–434
- [15] Dwyer J R, Uman M A 2014 *Physics Reports* **534** 147
- [16] Schellart P, Trinh T N G, Buitink S 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 165001
- [17] Liu D X, Qie X S, Wang Z C, Wu X K, Pan L X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 219201 (in Chinese) [刘冬霞, 鄒秀书, 王志超, 吴学珂, 潘伦湘 2013 物理学报 **62** 219201]
- [18] Stolzenburg M, Marshall T C, Rust W D, Bruning E, MacGorman D R, Hamlin T 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L04804
- [19] Marshall T C, Stolzenburg M, Maggio C R, Coleman L M, Krehbiel P R, Hamlin T, Thomas R J, Rison W 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** L03813
- [20] Xu B, He H, Yang X Y, Bie Y G, Lü Q H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 175203 (in Chinese) [徐斌, 贺华, 杨晓艳, 别业广, 吕清花 2012 物理学报 **61** 175203]
- [21] Dwyer J R 2005 *Geophys. Res. Lett.* **30** 781
- [22] Symbalisty E M D, Roussel-Dupre R, Yukhimuk V A 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 1575
- [23] Buitink S, Huege T, Falcke H, Heck D, Kuijpers J 2010 *Astropart. Phys.* **33** 1
- [24] Bethe H A 1930 *Annalen der Physik* **397** 325

# Simulation study on the correlation between the ground cosmic rays and the near earth thunderstorms electric field at Yambajan (Tibet China)\*

Zhou Xun-Xiu<sup>1)†</sup> Wang Xin-Jian<sup>1)</sup> Huang Dai-Hui<sup>1)</sup> Jia Huan-Yu<sup>1)</sup> Wu Chao-Yong<sup>2)</sup>

1) (School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

2) (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

( Received 11 March 2015; revised manuscript received 24 April 2015 )

## Abstract

Coincident study on the intensity change of the ground cosmic rays during thunderstorms is very important for understanding the acceleration mechanism of secondary charged particles caused by atmospheric electric field. It is found that the strength of the near earth thunderstorm electric field can be up to 1000 V/cm or even higher from ARGO-YBJ (where YBJ stands for Yambajan, 4300 m a.s.l., Tibet, China) data in 2012. In this paper, Monte Carlo simulations are performed by using CORSIKA program to study the correlations between the intensity of the ground cosmic rays and the near earth thunderstorm electric field at YBJ. When the atmospheric electric field strength is higher than the threshold field strength ( $E_{RB}$ ) for the development of a runaway breakdown process, the total number of electrons and positrons is exponentially increases. At an electric field strength of 1500 V/cm, the number increases exponentially and reaches a maximum value at an atmospheric depth of  $\sim 520$  g/cm<sup>2</sup>, where the electric field is slightly stronger than the threshold field strength. These results are consistent with the theoretical results of relativistic runaway electron avalanche (RREA) which was proposed by Gurevich et al. (Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R 1992 *Phys. Lett. A* **165** 463) and also supports Dwyer's theory. The total number of electrons and positrons increases with the strength of the field in the negative field or in the positive field greater than 600 V/cm, while a certain degree of decline occurs in the positive field less than 400 V/cm. In the range 400–600 V/cm, the energy of the primary proton should be taken into account. For the primary energy that is lower than 80 GeV, the total number of electrons and positrons increases. And it does not change obviously when the energy is between 80 GeV and 120 GeV. For the primary energy exceeds 120 GeV, the number drops off, and the decrease is of  $\sim 4\%$ . During thunderstorms, a short duration occurs in which the the single particle counting rate increases as energy lowers, while a decrease happens with energy becoming higher than that from ARGO-YBJ data. Our preliminary results can give reasonable explanations to the experimental observations of ARGO-YBJ.

**Keywords:** near earth thunderstorms electric field, cosmic rays, Monte Carlo simulations, YBJ

**PACS:** 92.60.Pw, 92.60.Ta, 52.80.Mg

**DOI:** [10.7498/aps.64.149202](https://doi.org/10.7498/aps.64.149202)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11175147, 11475141) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2682014CX091).

† Corresponding author. E-mail: [zhouxx@ihep.ac.cn](mailto:zhouxx@ihep.ac.cn)