

基于 CORSIKA 模拟研究雷暴云中相对论 逃逸电子雪崩机制*

周天¹⁾ 周勋秀^{1)†} 何会海²⁾³⁾ 杨慈¹⁾ 郭科骏¹⁾ 陈学健¹⁾
魏如梦¹⁾ 纪穉源¹⁾ 黄代绘¹⁾

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)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2025 年 4 月 30 日收到; 2025 年 7 月 19 日收到修改稿)

来自地球大气层的伽马射线闪 (TGF) 常伴随雷暴、闪电活动, 现已成为宇宙线物理和大气物理交叉学科中的研究热点. 相对论逃逸电子雪崩机制 (RREA) 被普遍认为可解释卫星和地面实验中伴随闪电先导过程的 TGF 现象. 本文基于 CORSIKA 软件包, 模拟了宇宙线次级电子在雷暴云强电场中引发的 RREA 过程, 并研究了 RREA 电子的强度和能量分布. 结果表明, 随着雷暴云内电场强度和电场区垂直尺度的增加, RREA 电子数目均呈指数增长; 发生 RREA 机制的雪崩距离常数 (λ) 随电场强度的增加而减小, 当电场为 -1600 和 -3000 V/cm 时, λ 分别约为 282 m 和 69 m. RREA 电子的能谱随电场强度和电场区垂直尺度的增加而逐渐变软, 其平均能量随电场强度的增加而增加, 当雷暴云内电场区垂直尺度大于 400 m 时, RREA 电子的平均能量逐渐趋于稳定. 模拟发现, 电场为 -3000 V/cm、电场区的垂直尺度为 800 m 时, RREA 电子的平均能量约为 11.7 MeV. 本文通过蒙特卡罗方法复现了大气中难以直接观测的 RREA 过程, 该模拟结果为研究 TGF 源区特征提供了重要信息, 为地面实验探测下行 TGF 提供了线索, 并有助于研究大气中闪电的触发机制.

关键词: 宇宙线, 相对论逃逸电子雪崩机制, 雷暴电场, 蒙特卡罗模拟

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

DOI: 10.7498/aps.74.20250580

CSTR: 32037.14.aps.74.20250580

1 引言

原初宇宙线进入大气层后, 与空气中的原子核发生作用, 通过强子级联和电磁级联过程, 将产生数以万计的次级电子、光子、 μ 子等, 该现象被称为广延大气簇射 (extensive air shower, EAS)^[1]. 这些宇宙线次级粒子经过公里量级的雷暴云 (云中大气电场可高达 1000 V/cm, 有的甚至超过 2000 V/cm^[2-4]) 时, 会发生什么现象呢? 早在 1924

年, Wilson^[5] 指出雷暴电场可加速大气中的电子 (当时并未与宇宙线联系起来), 并首次提出了“逃逸电子 (runaway electron)”概念. 1992 年, Gurevich 等^[6] 在考虑电子-电子散射 (Moller 散射) 后, 提出了“逃逸击穿 (runawaybreakdown)”理论, 现被称为“相对论逃逸电子雪崩机制 (relativistic runaway electron avalanche, RREA)”, 认为大气中的电子 (主要来源于能量较高的宇宙线) 在雷暴电场中被加速而获得能量, 当获得的能量超过电离和辐射损失的能量时, 将与空气中原子核作用产生新的

* 国家自然科学基金 (批准号: 12375102, U2031101) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhoux@swjtu.edu.cn

电子, 引发雪崩效应, 使电子数目呈指数增长. 这种雷暴电场加速宇宙线次级电子而产生的高能粒子现象, 已成为宇宙线物理与大气物理交叉学科中的研究热点之一.

自 RREA 机制被提出以来, 科学家们试图通过卫星实验和地面实验去探测伴随雷暴和闪电活动的高能粒子辐射. 1994 年, CGRO 卫星首次观测到来自地球大气层的伽马射线闪 (terrestrial gamma-ray flash, TGF) 现象^[7]. TGF 的发现引起了众多研究者的兴趣, 1996 年 Inan 等^[8]发现 TGF 事例可能与雷暴期间的闪电活动有关. 迄今, 卫星实验 BATSE^[9], Fermi^[10] 和 AGILE^[11] 等已探测到上千个 TGFs 事例, 中国的“慧眼”卫星 HXMT^[12] 和“怀柔一号”极目卫星 GECAM^[13] 对 TGF 现象也开展了一系列观测研究, 取得了丰富的观测资料. 相比于卫星实验观测到的上行 TGF 而言, 由于低层复杂的高密度大气环境, 地面实验观测到的下行 TGF 样本不多. 2004 年 Dwyer 等^[14]报道了第 1 个伴随人工触发闪电先导过程中的下行 TGF 事例, 自那以后, Hare 等^[15]、Enoto 等^[16]、Abbasi 等^[17]、Wada 等^[18]、Belz 等^[19] 基于地面实验陆续观测到下行 TGF 事件, 认为这些观测现象与雷暴、闪电的发生过程有密切关系.

目前, 关于 TGF 的理论探讨大多基于 Gurevich 等^[6,20] 提出的 RREA 机制. Dwyer^[21] 和 Symbalisty 等^[22] 通过数值计算和模拟仿真, 对发生 RREA 过程的大气电场阈值 E_{th} 进行了研究, 发现 E_{th} 与海拔高度有关, 可表示为 $E_{th} = E_0 \exp(-Z/8.4)$, 其中 Z 为海拔高度 (单位 km), $E_0 = 2800$ V/cm 为海平面处触发 RREA 机制的电场阈值. 当海拔为 4410 m 时, $E_{th} \approx 1660$ V/cm, 可见, 引发 RREA 过程需要一个强电场环境. 2003 年, Dwyer^[21] 利用蒙特卡罗方法考虑了电子与大气分子间的电离、激发以及 Moller 散射等作用过程, 对发生 RREA 机制的雪崩距离常数 λ 进行了研究, 发现 λ 与电场强度、海拔高度均有关, 可近似表示为 $\lambda = 7300$ kV/($E - 276$ kV/m $\times n$), 其中 n 为相对于海平面的大气密度. 当海拔为 4410 m、电场强度为 2000 V/cm 时, 发生 RREA 机制的雪崩距离常数约为 200 m, 可见, 引发 RREA 过程需要一个很大的空间范围. 2014 年, Skeltved 等^[23] 通过 GEANT4 软件包中利弗莫尔模型 (LBE) 和标准模型 (LHEP) 两种模型, 模拟得到电场在 300—2500 kV/m 条件下, 雪

崩距离常数分别为 $\lambda = 7400$ kV/($E - 298$ kV/m) 和 $\lambda = 9770$ kV/($E - 285$ kV/m), RREA 电子的平均能量分别为 7.4 MeV 和 9.7 MeV, 可见, 在 LBE 模型下, 与 Dwyer^[21] 得到的结果相差较小; 在 LHEP 模型下, 有较大的差异. 2018 年, 李小强等^[24] 利用蒙特卡罗方法在一个大气密度均匀的圆柱体模型中模拟了 RREA 过程, 得到了雪崩距离常数的公式, 并对 RREA 电子的能量进行了研究. Gurevich 等^[6] 还提出了宇宙线引发闪电的理论, 他们认为宇宙线次级电子通过雷暴云时引发 RREA 过程将产生大量带电粒子, 从而可能触发闪电. 可见, RREA 机制的研究, 不但有助于理解大气中的高能辐射 TGF 现象, 还有望揭开闪电的触发机制之谜.

引发 RREA 过程需要的电场强、空间尺度大, 很难通过实验手段对其直接观测研究, 利用蒙特卡罗模拟方法, 有利于细致、全面研究 RREA 的发展过程. 为此, 本文使用 CORSIKA 软件包, 并添加大气电场模型, 模拟宇宙线次级电子在雷暴云中的 RREA 过程, 研究 RREA 电子数目和能谱随大气电场强度、雷暴云内电场区垂直尺度的变化特征.

2 CORSIKA 软件包及参数设置

CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for Cascade)^[25] 是模拟大气簇射过程的国际通用软件包, 能够详细记录次级粒子的类型、能量和位置等信息. CORSIKA 软件包中包含多种粒子之间的相互作用过程, 例如电子和正电子湮灭、Bhabha 散射、韧致辐射、Moller 散射以及多重散射等, 对于光子可能经历的康普顿散射、电子对效应和光电效应也包含在内. 此外, CORSIKA 软件包中提供了 41 种大气模型 (美国标准大气模型、中欧大气模型、南极大气模型等), 本文所采用的是美国标准大气模型^[25], 其大气由 N_2 、 O_2 和 Ar 组成, 分别占 78.1%, 21%, 0.9%, 大气边界定义在质量覆盖层消失的高度 (~ 112.8 km), 大气密度随海拔高度变化分成 5 层来描述, 接近真实的大气分布.

本文使用 CORSIKA 7.7410 版本, 高能 (大于 80 GeV) 强相互作用模型为 QGSJETII-04, 低能 (小于 80 GeV) 强相互作用模型为 GHEISHA. 为研究电子在雷暴电场中的逃逸雪崩效应, 本文模拟了能量分别为 1 MeV, 10 MeV 和 100 MeV 的种子电子在雷暴云中的 RREA 过程, 并分析了 RREA

电子的数目和能量特征. 为了研究宇宙线次级电子在雷暴云中引发的 RREA 过程, 本文模拟了垂直入射 (天顶角为 0°) 的原初质子 (能量分别为 100 GeV, 1 TeV 和 10 TeV) 进入大气层的 EAS 过程, 以及 EAS 中次级电子在雷暴云中的簇射过程. 考虑到电场的加速作用, 模拟中电磁粒子 (正电子、负电子和光子) 的截断能量为 CORSIKA 所能追踪的最小能量, 即 50 keV.

为了描述电场对宇宙线次级粒子中电子的影响, 在 CORSIKA 软件包中加入了大气电场模型^[26]. 本模拟中加入均匀且与地面垂直的大气电场 (以向下加速正电子的方向为正电场). 实际雷暴云中电荷结构复杂、大气电场的强度和极性随时间均发生剧烈变化. 本模拟中选择单一、均匀的电场模型, 虽模拟结果与实际情况存在一定的偏差, 但可以得到雷暴电场与宇宙线变化的直接关联. 本文分别模拟了种子电子和宇宙线次级电子在大于逃逸雪崩电场阈值 ($-1600, -1800, -2000, -2200, -2400, -2600, -2800$ 和 -3000 V/cm) 中的发展情况. 为了比较, 对于不加电场和小于逃逸雪崩电场阈值的情况也进行了模拟研究.

3 模拟结果

本工作利用 CORSIKA 软件包, 分别模拟了种子电子和原初质子簇射的次级电子在雷暴电场中引发的相对论逃逸电子雪崩过程, 并研究了 RREA 电子的强度和能量分布.

3.1 种子电子在雷暴云中产生的 RREA 电子

根据 Wilson^[5] 的“逃逸电子”概念和 Gurevich^[6] 提出的“RREA”物理机制, 进入高电场区域 (大于 RREA 电场阈值时) 的种子电子将会产生大量相对论性逃逸电子, 从而引起电子数目的指数倍增. 图 1 是利用 CORSIKA 软件包模拟得到的一个种子电子 (原初能量 100 MeV) 进入雷暴云中的簇射过程, 其中大气电场分别为 0, $-1500, -1800, -2000, -2500$ 和 -3000 V/cm, 电场区垂直尺度为 800 m (海拔高度 Z 为 4710—5510 m). 模拟结果表明, 不同电场对种子电子的发展具有显著的影响. 在无外加电场条件下, 种子电子发展缓慢, 由于电离能损, 簇射过程在海拔 5200 m 附近就停止发展. 加入电场 (小于 RREA 电场阈值) 后, 由于

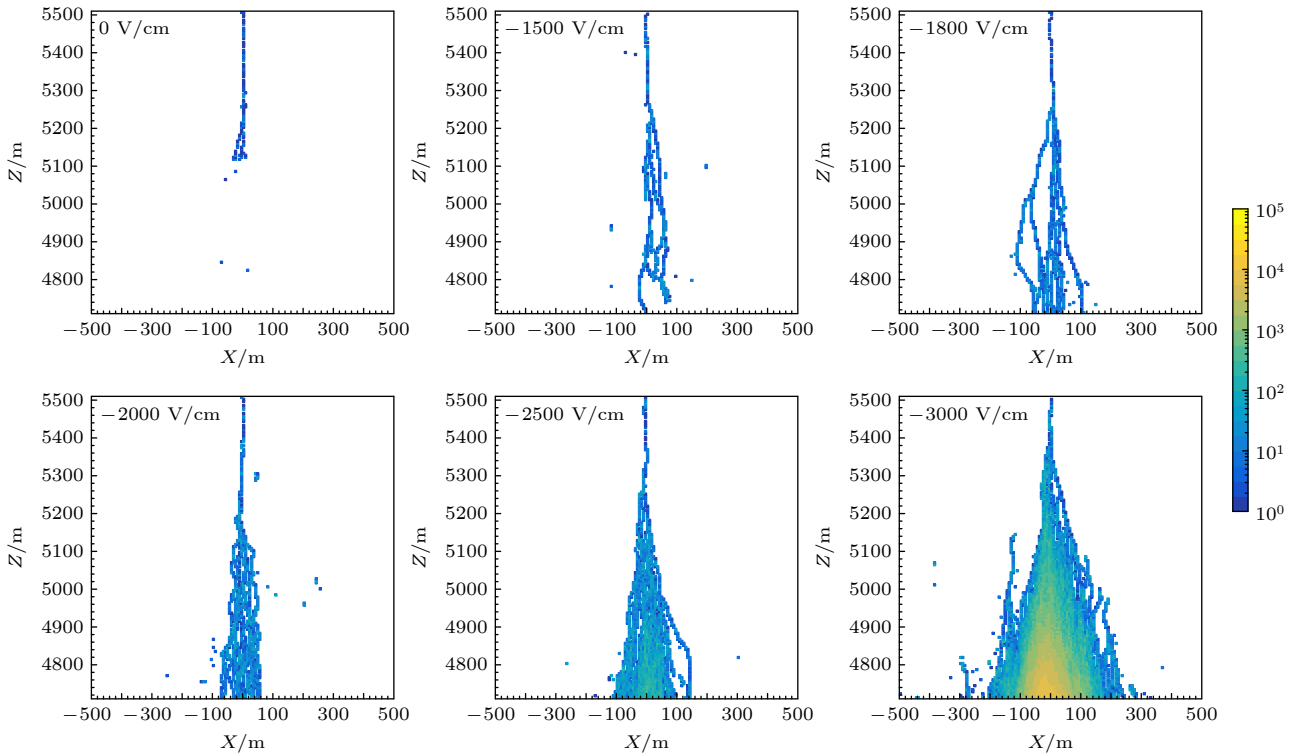


图 1 种子电子 (100 MeV) 在不同大气电场中的簇射过程

Fig. 1. Cascade process of seed electrons (100 MeV) in different electric fields.

电场的加速作用, 次级电子的数目增加. 当雷暴云中电场大于 RREA 电场阈值时, 种子电子引发了 RREA 过程, 次级电子数目出现雪崩倍增现象. 当电场为 -3000 V/cm 时, 一个种子电子经过 800 m 的雷暴云后, RREA 电子数目高达 1.5×10^4 个.

雷暴云中 RREA 电子的能量如何分布呢? 图 2 为原初能量分别为 $1, 10$ 和 100 MeV 的种子电子经过电场为 -3000 V/cm 的雷暴云 (云内电场区垂直尺度为 800 m) 所产生 RREA 电子的能量分布图. 由图 2 可知, 大部分 RREA 电子集中在小于 20 MeV 的低能区, 且随次级电子能量的增大, RREA 电子数目呈指数衰减.

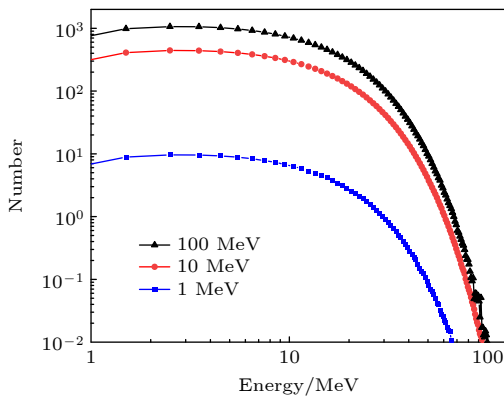


图 2 在 -3000 V/cm 电场下, 不同原初能量种子电子产生 RREA 电子的能量分布
Fig. 2. Energy distributions of RREA electrons induced by seed electron for different primary energies in -3000 V/cm .

不同原初能量种子电子所产生 RREA 电子的平均能量随雷暴云内电场区垂直尺度 (电场为 -3000 V/cm) 的变化如图 3(a) 所示. 当云内电场区垂直尺度较小时, 次级电子的平均能量与种子电子的原初能量有关, 种子电子能量为 1 MeV 和 10 MeV 时, 由于库仑散射的影响, 大部分次级电子运动方向与电场方向夹角增大, 在大气电离作用下损失能量而不能到达探测面, 而存活下来的次级电子几乎沿着电场方向运动, 受电场加速作用获得能量, 其平均能量随电场区垂直尺度的增大而逐渐增大; 种子电子能量为 100 MeV 时, 产生了大量的低能 RREA 电子, 其平均能量随电场区垂直尺度的增加而迅速减小. 随着雷暴云内电场区垂直尺度的持续增大, 次级电子中 RREA 电子的比例逐渐增大, 不同原初能量种子电子之间的差异逐渐减小. 当雷暴云内电场区垂直尺度大于 400 m 时, RREA 电子在电场中获得的能量与损失能量相当, 其平均能量逐渐趋于稳定.

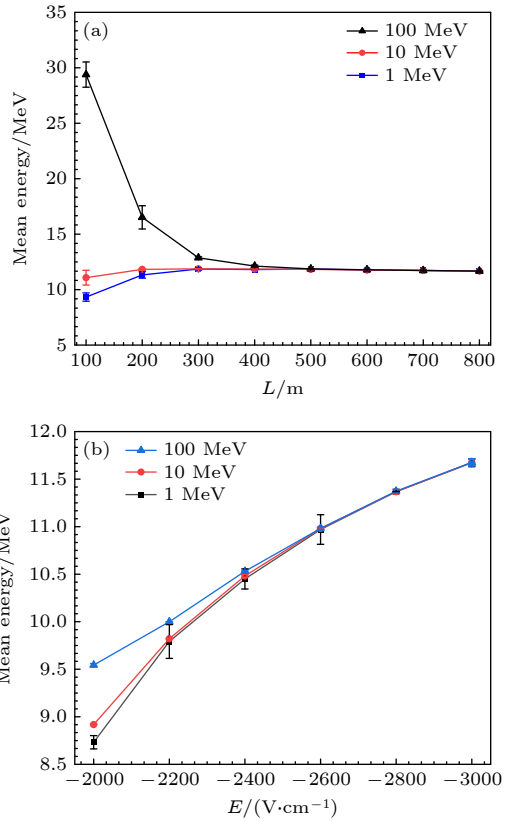


图 3 种子电子产生 RREA 电子的平均能量随电场区垂直尺度 (a) 和电场强度 (b) 的变化关系
Fig. 3. Mean energy of RREA electrons induced by seed electron as a function of the layer thickness (a) and strength (b) of the electric field.

图 3(b) 给出了 RREA 电子平均能量与电场强度 (云内电场区垂直尺度为 800 m) 的关系. 由图 3 可知, 随着雷暴云中电场强度的增大, RREA 电子的平均能量也增大, 不同原初能量种子电子之间的差异逐渐减小. 对 1 MeV 和 100 MeV 的种子电子, 当电场为 -2000 V/cm 时 RREA 电子平均能量相差 0.8 MeV , 而当电场为 -3000 V/cm 时, RREA 电子平均能量仅相差 0.004 MeV . 由图 3(a) 和图 3(b) 可知, 当电场为 -3000 V/cm 、电场区垂直尺度为 800 m 时, RREA 电子的平均能量约为 11.7 MeV .

3.2 原初质子簇射的次级电子在雷暴云中产生 RREA 的过程

来自宇宙空间的原初宇宙线进入大气层发生广延大气簇射过程, 产生大量宇宙线次级电子, 其数目随原初宇宙线能量的增大而增大. 这些次级电子作为种子进入雷暴云强电场中将触发 RREA 过程, 产生大量 RREA 电子. 下面模拟原初质子 (不

同原初能量)簇射的次级电子进入雷暴云(海拔高度 4710—5510 m)中产生 RREA 电子的强度和能量分布特征.

3.2.1 RREA 电子数目与雷暴云内电场区垂直尺度、电场强度的关系

不同原初能量的宇宙线质子经大气簇射过程并进入电场强度为 -3000 V/cm 的雷暴云中,产生的次级电子数目随雷暴云内电场区垂直尺度 L 的变化关系如图 4 所示. 次级电子数目随雷暴云内电场区垂直尺度的增大而出现了倍增. 原初能量为 100 GeV , 1 TeV 和 10 TeV 的质子在大气层中发生簇射过程,到达海拔 5510 m 时(进入雷暴云前)次级电子数目分别为 6 , 140 和 2.5×10^3 个,当经过 800 m 雷暴云(云中电场 -3000 V/cm)到达海拔 4710 m 时,次级电子数目分别增加到 2.3×10^5 , 4.4×10^6 和 7.89×10^7 个. 可见, RREA 过程中次级电子数目呈指数增长,且原初能量越大,在进入雷暴云前通过 EAS 簇射过程产生的次级电子越多(即种子电子越多),从而导致雷暴云中产生的 RREA 电子数目也就越多. 在经过 800 m 雷暴云后,不同原初能量的次级电子数目增幅均 $\sim 3 \times 10^4$ 倍. 可见,新产生的 RREA 电子占据了绝大多数.

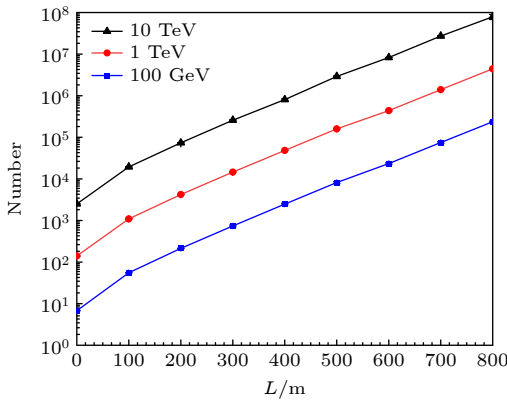


图 4 不同原初能量质子簇射的次级电子数目随雷暴云内电场区垂直尺度的变化

Fig. 4. Number of secondary electrons induced by protons as a function of the thickness of the electric field layer for different primary energies.

Gurevich 等^[6]预测了 RREA 过程中次级电子数目 N_{re} 与雷暴云中逃逸雪崩区域的长度 L 有关,并满足如下关系:

$$N_{\text{re}} = N_0 \exp(L/\lambda), \quad (1)$$

式中, N_0 为种子电子的数目, λ 为雪崩距离常数.

将 (1) 式进行如下变换:

$$\lambda = L/\ln(N_{\text{re}}/N_0). \quad (2)$$

根据图 4 中 RREA 电子数目与电场区垂直尺度的关系,利用 (2) 式可得到不同电场强度下雪崩距离常数 λ , 见图 5. 可见,雪崩距离常数 λ 随着电场强度的增大迅速减小,当电场为 -1600 V/cm 时, $\lambda \approx 282 \text{ m}$; 当电场为 -3000 V/cm 时, $\lambda \approx 69 \text{ m}$. 这意味着当经过相同雪崩距离后,雷暴云中电场强度越大, RREA 电子数目将会越多. 对图 5 中雪崩距离常数 λ 与电场强度 E 的关系进行拟合,得到如下公式:

$$\lambda(E) = 12797 \text{ kV}/(E - 114.8 \text{ kV/m}). \quad (3)$$

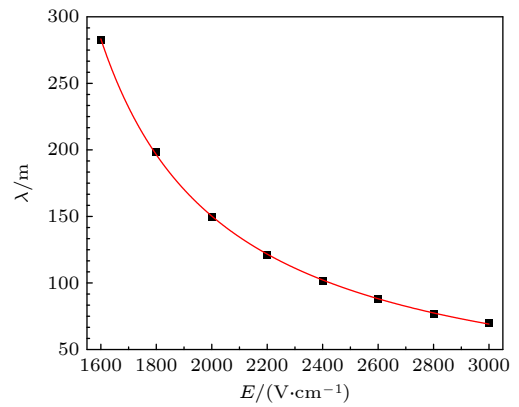


图 5 雪崩距离常数 λ 与电场强度的关系

Fig. 5. Avalanche length λ as a function of electric field strength.

根据逃逸电场阈值 E_{th} 与海拔高度的关系^[21,22],海拔为 4710 m 时,逃逸电场阈值 E_{th} 为 1600 V/cm ,这表明只有当电场强度大于 1600 V/cm 时,才会触发 RREA 过程. 为了更好地研究不同电场时 RREA 的发展规律,本文在固定电场区垂直尺度为 800 m 的条件下,对原初质子簇射的次级电子进行模拟,分析次级电子数目随雷暴电场强度变化的关系. 图 6 展示了不同原初能量的宇宙线质子在经过大气簇射过程并穿过雷暴云后,次级电子数目随雷暴电场的变化情况.

由图 6 可知,当电场强度低于逃逸电场阈值时,次级电子数目在电场的加速作用下缓慢增加. 在 -1600 V/cm 电场中, 100 GeV , 1 TeV 和 10 TeV 的次级电子数目分别为 40 , 8.35×10^2 和 1.56×10^4 个,是不加电场时的 6.7 , 6.0 和 6.2 倍. 当所加电场强度大于逃逸电场阈值时,次级电子数目呈指数增长. 在 -3000 V/cm 电场下,次级电子

数目分别为 2.3×10^5 , 4.4×10^6 和 7.89×10^7 个, 是不加电场时的 3.3×10^4 , 3.1×10^4 和 3.1×10^4 倍. 以上结果表明, 当电场强度超出逃逸电场阈值后, 次级电子数目快速增长并随原初能量的增加而进一步增大.

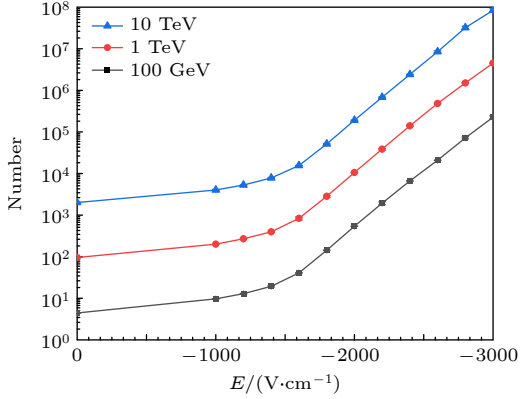


图 6 不同原初能量质子簇射的次级电子数目随雷暴电场的变化

Fig. 6. Number of secondary electrons induced by protons as a function of the electric field strength for different primary energies.

图 7 中展示了 $\ln(N_{re}/N_0)$ 随雪崩电场倍数 δ ($\delta = E/E_{th}$, $E_{th} = -1600 \text{ V/cm}$) 的变化. 当所加电场大于逃逸雪崩电场的阈值时, 不同原初能量下 $\ln(N_{re}/N_0)$ 与 δ 之间都呈线性正相关关系, 其比例系数为 9.7 ± 0.1 , 即 $\ln(N_{re}/N_0) \approx 9.7\delta$, 也就是说, RREA 过程中次级电子数目随雷暴云中电场强度呈指数增长.

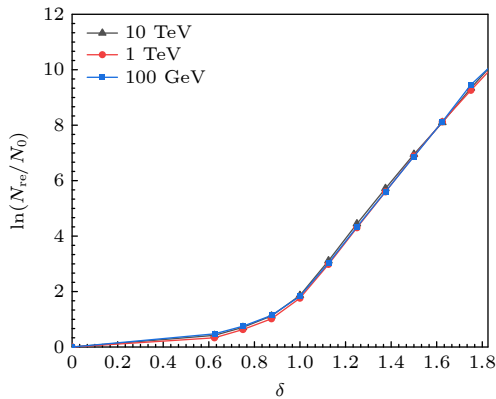


图 7 不同原初能量下 $\ln(N_{re}/N_0)$ 与雪崩电场倍数 δ 的关系
Fig. 7. $\ln(N_{re}/N_0)$ as a function of different values of δ for different primary energies.

当雷暴云中的电场强度超过逃逸雪崩电场阈值时, 将触发 RREA 过程, 伴随大量 RREA 电子的产生. RREA 电子数目与逃逸雪崩区域的长度

以及雷暴云中的电场强度密切相关, 还与原初粒子的能量有关. 从图 4 和图 6 可以看出, RREA 电子数目与原初粒子的能量正相关, 即原初能量越高, RREA 电子的数目越多. 这一现象表明, 原初高能粒子通过触发 RREA 过程, 能够显著增加次级电子的数量, 从而为大气中 RREA 电子进一步参与闪电触发过程提供可能性和理论依据.

3.2.2 RREA 电子能量与电场强度、雷暴云内电场区垂直尺度的关系

为研究次级电子的能量分布的特征, 原初能量为 10 TeV 的宇宙线质子经大气簇射过程并经过电场区为 800 m 的雷暴云, 次级电子的能量分布与雷暴电场的关系, 如图 8 所示. 随着电场强度的增大, 次级电子的数目逐渐增加, 其能谱也逐渐变软. 也就是说, 随雷暴电场强度的增大, 低能段区域的电子增大幅度越大. 相比于不加电场时, 能量小于 70 MeV 和大于 100 MeV 的次级电子在 -1000 V/cm 电场中, 增长幅度分别约为 120% 和 40%, 在 -3000 V/cm 电场中增长幅度分别为 5.6×10^4 倍和 10^2 倍. 这是由于低能电子在电场中加速时, 辐射损失的能量较小, 能够持续获得能量产生次级电子, 使得 RREA 电子主要集中在低能段区域. 高能电子主要来源于 EAS 过程中产生的次级电子, 随着电场强度的增大, 存活下来的高能电子数目增加, 但其增长幅度远低于低能电子.

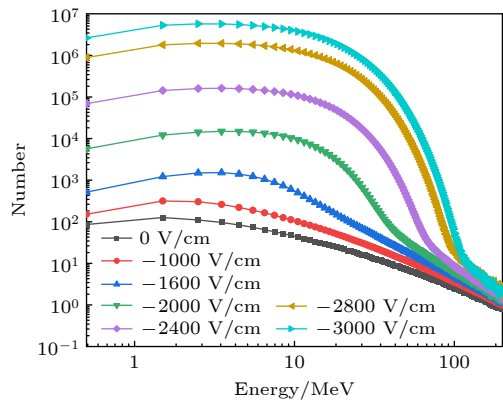


图 8 原初质子 (10 TeV) 簇射的次级电子在不同电场强度下的能量分布

Fig. 8. Energy distribution of secondary electrons induced by protons (10 TeV) with respect to electric field strength.

原初能量为 10 TeV 的宇宙线质子经大气簇射过程并进入电场为 -3000 V/cm 的雷暴云中, 所产生 RREA 电子的能量分布与雷暴云内电场区垂

直尺度的关系如图 9 所示. 随着电场区垂直尺度增大, 次级电子的数目逐渐增加, 其能谱也逐渐变软. 当云内电场区垂直尺度达到 500 m 时, 能量小于 70 MeV 的次级电子数目约增长了 1.5×10^3 倍, 而能量大于 100 MeV 的次级电子仅增长了约 1.7 倍, 这表明新增的次级电子主要集中在低能量区域. 随着电场区垂直尺度的进一步增大, 次级电子的能谱变化逐渐减缓并趋于稳定, 表明雷暴云内电场区垂直尺度达到一定值后, RREA 过程对电子能量分布的影响逐渐达到饱和状态.

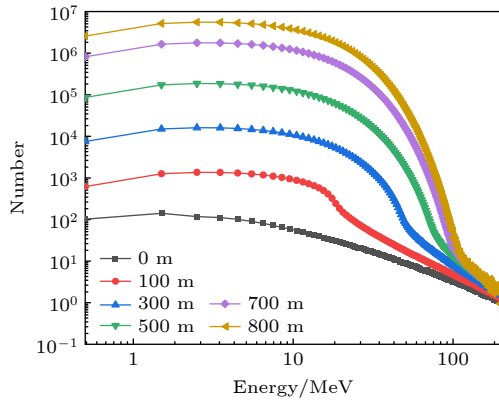


图 9 原初质子 (10 TeV) 簇射的次级电子在不同雷暴云厚度下的能量分布
Fig. 9. Energy distribution of secondary electrons induced by protons (10 TeV) with respect to thickness of the electric field layer.

图 10(a) 展示了不同原初能量的宇宙线质子在大气簇射过程中产生次级电子的平均能量与雷暴云内电场区垂直尺度 (电场为 -3000 V/cm) 的关系. 模拟可知, 原初能量为 100 GeV, 1 TeV 和 10 TeV 的宇宙线质子在进入雷暴云前 (海拔 5510 m) 所产生的次级电子能量较高, 其平均能量分别为 62 MeV, 91 MeV, 121 MeV. 当进入雷暴云后, 宇宙线质子簇射中的次级电子引发 RREA 过程, 产生了大量新的低能电子 (RREA 电子), 使其平均能量随电场区垂直尺度的增加而快速下降; 随着电场区垂直尺度的持续增大, 新产生的 RREA 电子比例逐渐增大, 当雷暴云内电场区垂直尺度超过 400 m 时, 次级电子中几乎是新产生的 RREA 电子, 这些电子在电场中获得的能量与损失的能量相当, 其平均能量逐渐趋于稳定.

图 10(b) 为不同原初能量的宇宙线质子在大气簇射中产生次级电子的平均能量与雷暴电场 (电场区垂直尺度为 800 m) 的关系图. 可以看出, 原

初能量越大, 次级电子的平均能量越高, 当电场强度低于逃逸电场阈值时, 在电场加速作用下, 簇射中更多低能次级电子获得能量而达到探测阈值, 使其平均能量随电场强度的增大而快速减小. 当电场强度大于逃逸电场阈值时, 将产生大量的 RREA 电子, 这些电子从电场中获得的能量大于损失的能量, 其平均能量随电场强度的增加而缓慢增加, 且不同原初能量之间的差异逐渐减弱. 当电场为 -3000 V/cm 、电场区垂直尺度为 800 m 时, RREA 电子平均能量约为 11.7 MeV, 这与种子电子模拟得到的 RREA 电子平均能量一致.

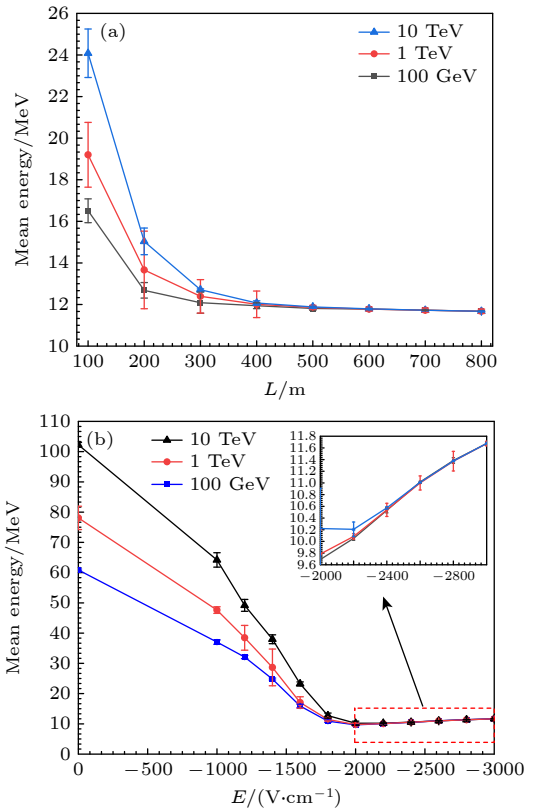


图 10 次级电子平均能量随雷暴云内电场区的垂直尺度 (a) 和雷暴电场的变化 (b)
Fig. 10. Mean energy of secondary electrons as a function of the layer thickness (a) and strength (b) of the electric field.

我们将得到的 RREA 电子平均能量与 Dwyer 等 [27] 和 Babich 等 [28] 的研究结果 (7.3 MeV) 进行比较, 本研究中的 RREA 电子平均能量较大. 这种差异主要由两方面导致: 一是本文统计的次级电子截断能量为 CORSIKA 中所允许的最小能量 (50 keV), 而 Babich 等 [28] 的统计中包含了 1 keV 以上的所有电子, 导致本文得到的平均能量偏大; 二是不同研究中使用的软件包和模型存在差异,

本文采用的是模拟广延大气簇射过程的 CORSIKA 软件包, 而 Dwyer 等^[27] 采用了 3-D MC 方法, Babich 等^[28] 使用了 ELIZA MC 代码. 此外, Skeltved 等^[23] 利用不同模型得到次级电子平均能量分别为 7.4 MeV 和 9.7 MeV, 这进一步表明不同模型间的计算结果可能存在一定差异. CORSIKA 软件包中涉及到大气模型和雷暴模型更加符合真实情况, 所包含粒子作用过程更加全面, 本模拟结果具有更大的实用价值.

4 结 论

本文利用 CORSIKA 7.7410 软件包, 通过蒙特卡罗方法模拟研究了种子电子和原初质子的次级电子在雷暴云中引发相对论逃逸电子雪崩过程, 并研究了 RREA 电子的强度和能量分布. 当电场强度大于逃逸雪崩电场阈值时, 原初能量为 1 MeV, 10 MeV 和 100 MeV 的种子电子产生的 RREA 电子数目都出现雪崩倍增现象, RREA 电子的平均能量随着电场强度增强而增加, 当雷暴云内电场区垂直尺度足够大时, RREA 电子的平均能量逐渐趋于稳定. 对原初质子簇射的次级电子在雷暴云强电场中 RREA 过程的模拟发现, 随着电场区垂直尺度和电场强度的增强, 不同原初能量时 RREA 电子数目均呈指数增长. 当电场为 -3000 V/cm 时, 当一个能量为 10 TeV 的原初质子簇射的次级电子经过 800 m 雷暴云后, 次级电子数目可高达 7.89×10^7 个, 这为高能宇宙线引发大气中的闪电提供了可能性. RREA 过程中的次级电子主要集中在低能段区域, 其能谱随电场区垂直尺度和电场强度的增加而逐渐变软. 与不加电场时相比, 在 -3000 V/cm 的电场 (云内电场区垂直尺度为 800 m) 中, 能量小于 70 MeV 次级电子增长了 5.6×10^4 , 而能量大于 100 MeV 的次级电子增加了 100 倍, 也就是说, RREA 过程中能量较低的次级电子占据了绝大多数. 在电场为 2000—3000 V/cm 内, 次级电子的平均能量随电场的增加而增加. 当电场为 -3000 V/cm , 电场区垂直尺度大于 400 m 时, RREA 电子在电场中获得能量与损失能量相当, 其平均能量趋于稳定 ($\sim 11.7 \text{ MeV}$).

本文利用蒙特卡罗方法对难以直接观测、在实验室复现的 RREA 过程进行了模拟, 细致研究了 RREA 的发展过程. 结果为深入理解卫星、地面实

验中 TGF 现象的物理机制提供了重要信息, 同时有助于开展闪电触发机制的相关研究.

参考文献

- [1] Huang Z H, Zhou X X, Huang D H, Jia H Y, Chen S Z, Ma X H, Liu D, Axikegu, Zhao B, Chen L, Wang P H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 199301 (in Chinese) [黄志成, 周勋秀, 黄代绘, 贾焕玉, 陈松战, 马欣华, 刘栋, 阿西克古, 赵兵, 陈林, 王培汉 2021 *物理学报* **70** 199301]
- [2] 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, 郗秀书, 王志超, 吴学珂, 潘伦湘 2013 *物理学报* **62** 219201]
- [3] Marshall T C, Stolzenburg M, Maggio C R, Coleman L M 2005 *Geophys. Res. Lett.* **32** L03813
- [4] Stolzenburg M, Marshall T C, Rust W D, Bruning E, MacGorman D R, Hamlin T 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L04804
- [5] Wilson C T R 1924 *Proc. Phys. Soc. London* **37** 32D
- [6] Gurevich A V, Milikh G M, Roussel-Dupre R 1992 *Phys. Lett. A* **165** 463
- [7] Lü F C, Zhang Y J, Lu G P 2023 *Sci. China-Earth Sci.* **53** 421 (in Chinese) [吕凡超, 张义军, 陆高鹏 2023 *中国科学: 地球科学* **53** 421]
- [8] Inan U S, Reising S C, Fishman G J, Horack J M 1996 *Geophys. Res. Lett.* **23** 1017
- [9] Fishman G J, Bhat P N, Mallozzi R, Horack J M, Koshut T, Kouveliotou C, Pendleton G N, Meegan C A, Wilson R B, Paciasas W S, Goodman S, Christian H 1994 *Science* **264** 1313
- [10] Briggs M S, Fishman G J, Connaughton V, Bhat P N, Paciasas W S, Preece R D, Wilson-Hodge C, Chaplin V L, Kippen R M, Kienlin A V, Meegan C A, Bissaldi E, Dwyer J R, Smith D M, Holzworth R H, Grove J E, Chekhtman A 2010 *J. Geophys. Res.* **115** A07323
- [11] Marisaldi M, Fuschino F, Labanti C, Galli M, Longo F, Del Monte E, Barbiellini G, Tavani M, Giuliani A, Moretti E, et al. 2010 *J. Geophys. Res.* **115** A00E13
- [12] The Insight-HXMT team 2020 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **63** 249502
- [13] Chen C, Xiao S, Xiong S L, Yu N, Wen X Y, Gong K, Li X Q, Li C Y, Hou D J, Yang X T, Zhao Z J, Zhu Y X, Zhang D L, An Z H, Zhao X Y, Xu Y P, Wang Y S 2021 *Exp. Astron.* **52** 45
- [14] Dwyer J R, Rassoul H K, Al-Dayeh M, Caraway L, Wright B, Chrest A, Uman M A, Rakov V A, Rambo K J, Jordan D M, Jerauld J, Smyth C 2004 *Geophys. Res. Lett.* **31** L05119
- [15] Hare B M, Uman M A, Dwyer J R, Joradn D M, Biggerstaff M L, Caicedo J A, Carvalho F L, Wilkes R A, Kotovsky D A, Gamerota W R, Pilkey J T, Ngai T K, Moore R C, Rasoule H K, Cummer S A, Grove J E, Nag A, Betten D P, Bozarth A 2016 *J. Geophys. Res. Atmos.* **121** 6511
- [16] Enoto T, Wada Y, Furuta Y, Nakazawa K, Yuasa T, Okuda K, Makihima K, Sato M, Sato Y, Nakano T, Umemoto D, Tsuchiya H, GROWTH Collaboration 2017 *Nature* **551** 481
- [17] Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, Barcikowski E, Belz J W, Bergman D R, Blake S A, Byrne M, Cady R, Cheon B G, et al. 2018 *J. Geophys. Res. Atmos.* **123** 6864
- [18] Wada Y, Enoto T, Nakazawa K, Furuta Y, Yuasa T,

- Nakamura Y, Morimoto T, Matsumoto T, Makishima K, Tsuchiya H 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 061103
- [19] Balz J W, Krehbiel P R, Remington J, Stanley M A, Abbasi R U, LeVon R, Rison W, Rodeheffer D, Abu-Zayyad T, Allen M, et al. 2020 *J. Geophys. Res. Atmos.* **125** e2019JD031940
- [20] Qie X S, Wang J F 2010 *Adv. Earth Sci.* **25** 893 (in Chinese) [郟秀书, 王俊芳 2010 *地球科学进展* **25** 893]
- [21] Dwyer J R 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 2055
- [22] Symbalisty E M D, Roussel-Dupre R A, Yukhimuk V A 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 1575
- [23] Skeltved A B, Ostgaard N, Carlson B, Gjesteland T, Celestin S 2014 *J. Geophys. Res.* **119** 9174
- [24] Li X Q, Zhou H Z, Jiang R B, Li P, Song L J, Li Y N, Li W, Zheng Y 2018 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **38** 0360 (in Chinese) [李小强, 周红召, 蒋如斌, 李鹏, 宋立军, 李英男, 刘伟, 郑毅 2018 *核电子学与探测技术* **38** 0360]
- [25] Heck D, Knapp J, Capdevielle J N, Schatz G, Thouw T 1998 FZKA: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 6019, <https://www.ikp.kit.edu/corsika/70.php>
- [26] Zhou X X, Wang X J, Huang D H, Jia H Y 2016 *Chin. J. Space Sci.* **36** 49 (in Chinese) [周勋秀, 王新建, 黄代绘, 贾焕玉 2016 *空间科学学报* **36** 49]
- [27] Dwyer J R, Smith D M, Cummer S A 2012 *Space Sci. Rev.* **173** 133
- [28] Babich L P, Donskoy E N, Il'Kaev R I, Kutsyk I M, Roussel-Dupre R A 2004 *Plasma Phys. Rep.* **30** 616

Simulation study on the relativistic runaway electron avalanche in thundercloud with CORSIKA*

ZHOU Tian¹⁾ ZHOU Xunxiu^{1)†} HE Huihai²⁾³⁾ YANG Ci¹⁾ GUO Kejun¹⁾
 CHEN Xuejian¹⁾ WEI Rumeng¹⁾ JI Seyuan¹⁾ HUANG Daihui¹⁾

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

2) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 30 April 2025; revised manuscript received 19 July 2025)

Abstract

Terrestrial Gamma-ray flashes (TGFs) originating from the Earth's atmosphere, accompanied by thunderstorms and lightning activity, are one of the hot spots in the interdisciplinary of cosmic ray and atmospheric physics. Over the years, satellite experiments have detected thousands of upward TGFs during thunderstorms, while ground-based experiments have observed some downward TGFs. Nowadays, it is widely believed that TGFs accompanying lightning leaders observed by satellite-based and ground-based experiments involve relativistic runaway electron avalanche (RREA) production. Due to triggering the relativistic runaway electron avalanche (RREA) process needing a very large electric field strength and region, it is difficult to study the RREA process through ground-based experiments. In this paper, CORSIKA 7.7410 software package, combined with a vertically uniform electric field model, is adopted to simulate the intensity and energy distribution of RREA electrons in thundercloud with different electric field strengths induced by seed electrons and the secondary electrons in extensive air shower (EAS) from vertical protons with different primary energies. The results show that the number of RREA electrons increases exponentially with the thickness of the thunderclouds increasing, and also increases exponentially with the electric field strength rising. After passing through the atmosphere with an electric field of -3000 V/cm and a thickness of 800 m, the number of secondary electrons in RREA process increases by approximately 3×10^4 times. The characteristic length of avalanche (λ) decreases as the electric field strength increases. When the electric field is -1600 V/cm and -3000 V/cm, the λ is approximately ~ 282 m and ~ 69 m, respectively. The energy spectrum of RREA electrons gradually softens with the increase of layer thickness and strength of electric field, and their average energy increases with the increase of electric field strength, when the thundercloud thickness exceeds 400 m, the mean energy of RREA electrons gradually stabilizes. When secondary particles pass through a thundercloud with an electric field strength of -3000 V/cm and a thickness of 800 m, the mean energy of RREA electrons is approximately 11.7 MeV. Through the Monte Carlo simulations, the RREA process, which is difficult to observe directly in the atmosphere, is successfully simulated. The simulation results provide important information for studying the characteristics of TGF source regions, offer clues for detecting downward TGF in ground-based experiments, and contribute to the research on the triggering mechanism of lightning in the atmosphere. In addition, our simulation results are expected to elucidate the relationship between TGF and lightning activity, promoting interdisciplinary research in the fields of atmospheric physics and cosmic ray physics.

Keywords: cosmic rays, relativistic runaway electron avalanche, thunderstorm electric field, Monte Carlo simulations

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

DOI: [10.7498/aps.74.20250580](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250580)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250580](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250580)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12375102, U2031101).

† Corresponding author. E-mail: zhouxx@swjtu.edu.cn

基于CORSIKA模拟研究雷暴云中相对论逃逸电子雪崩机制

周天 周勋秀 何会海 杨慈 郭科骏 陈学健 魏如梦 纪穉源 黄代绘

Simulation study on the relativistic runaway electron avalanche in thundercloud with CORSIKA

ZHOU Tian ZHOU Xunxiu HE Huihai YANG Ci GUO Kejun CHEN Xuejian WEI Rumeng JI Seyuan HUANG Daihui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 199201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250580

CSTR: 32037.14.aps.74.20250580

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250580>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雷暴电场对LHAASO观测面宇宙线次级光子的影响

Effects of thunderstorms electric field on secondary photons of cosmic ray at large high altitude air shower observatory

物理学报. 2024, 73(12): 129201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240341>

宇宙线高能粒子对测试质量充电机制

Mechanism of cosmic ray high-energy particles charging test mass

物理学报. 2021, 70(22): 229501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210747>

膝区宇宙线广延大气簇射次级成分的特征

Properties of secondary components in extensive air shower of cosmic rays in knee energy region

物理学报. 2022, 71(24): 249601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221556>

机器学习在宇宙线粒子鉴别中的应用

Application of machine learning in cosmic ray particle identification

物理学报. 2023, 72(14): 140202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230334>

高海拔宇宙线观测实验中scaler模式的模拟研究

Simulation study of scaler mode at large high altitude air shower observatory

物理学报. 2021, 70(19): 199301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210632>

基于塑料闪烁体探测器的宇宙线缪子与太阳调制效应观测

Observation and research on cosmic ray muons and solar modulation effect based on plastic scintillator detector

物理学报. 2025, 74(5): 059201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241704>