

雷暴闪电与宇宙线

贾焕玉

(西南交通大学现代物理研究所 611756)

某个炎热夏日午后,天空乌云密布,一场雷暴天气袭击了上海外滩,轰隆隆的雷声不绝于耳,还不时看到耀眼的闪电。图1照片中拍下的正是这次雷暴天气中上海东方明珠塔上出现的闪电。

雷暴(thunderstorms)是自然界最为壮观和重要的大气现象之一,常发生于热带和温带地区的春季和夏季午后。雷暴天气发生时可伴随有雷击、闪电、强风和强降水。雷暴天气从雷暴云的出现到消失,有很强的局地性和突发性,空间水平范围从几千米到上百千米,在时间上持续几十分钟到数小时,有些可以持续十几小时。

强雷暴天气引起的灾害是世界十大自然灾害之一,具有巨大破坏性。中国每年因闪电伤亡的人数达上千人,世界森林火灾有很大一部分是由闪电引起的,受灾行业涉及航天航空、国防、通讯、计算机、电力输送、电子工业、石油化工、矿山、铁路干线、建筑等很多部门。

实际上对雷暴这种自然现象的记录可以追溯至人类文明的早期。中国古代、古罗马和美洲古文明都有关于雷暴的神话^①。



图1 上海出现雷暴天气,东方明珠上空现闪电
(图片来自百度百科)

1. 雷暴云和闪电

1752年,美国科学家本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)做了关于闪电的实验,即风筝实验,对闪电进行了深入研究,揭示了天上的闪电与人工摩擦产生的电具有完全相同的性质。此后闪电一直受到人们的广泛关注,是大气科学的重要研究对象。随着对雷暴探测技术的不断改进和提高,科学家们开展了大量研究,对雷暴闪电的形成机制、活动规律等有了深入了解。



图2 风筝实验(图片来自百度百科)

雷暴,是由于空气对流运动造成绝热冷却,使空气中水汽饱和凝结而成的形状如同底平顶突的馒头的浓厚云体。云开始形成时,云中带电粒子混乱分布,云整体上呈电中性。随着云的发展,云中带电粒子发展为有序的空间分布,在云内形成正负电荷中心,正负电荷产生的电场强度也逐渐增强。到雷暴阶段时,云内形成很强的正负电荷中心,电场变为强电场,电场强度可达80~280 kV/m。

1.1 雷暴云电荷结构

雷暴云带有电荷,其电荷分布结构很复杂,与

气象和地形条件有关,不同季节、地区的雷暴云电荷结构也不完全一样,同一次雷暴过程中的不同阶段电荷结构也不一样,上升气流区和下沉气流区中的也不一样。

20世纪初,现代雷暴电学领域两位奠基人威尔逊(Wilson)和辛普森(Simpson)分别利用不同的探测手段,开始对雷暴云电荷结构进行研究。威尔逊第一个利用静电场测量来推断雷暴云内电荷结构与闪电中电荷量,而辛普森及其同事们开展的云内电场探空则提供了雷暴云电荷结构的直接科学证据。

雷暴云电荷结构大致可以分为偶极性结构和三极性结构,还有多极性结构以及反极性结构和倾斜式结构等。偶极性结构是指雷暴云内空间电荷结构是垂直偶极性的,上部荷正电荷,下部荷负电荷。辛普森等提出的雷暴云的三极性电荷结构是指,地表7千米高度以上、温度低于 -20°C 左右的区域有一个电荷量为24库仑的正电荷区,2~7千米高度、温度低于 -7°C 左右的区域有一个电荷量为-20库仑的负电荷区,在2千米高度以下、温度高于 0°C 附近还有一个电荷量为4库仑的次正电荷区。三极性电荷结构如图3所示。尽管近年来的电场探空表明,雷暴云内的电荷结构较三极性电荷结构可能要复杂得多,但是,时至今日,在很多情况下,单体雷暴云中的主要电荷区域仍常用经典三极性电荷结构来代表^②。

1.2 雷暴云起电机制

为了解释雷暴云内电荷的产生和分布,人们很

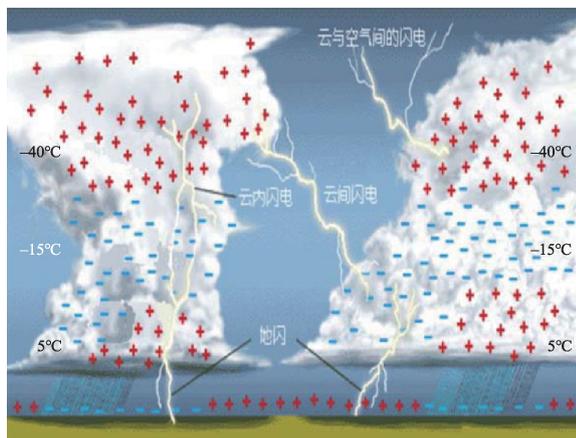


图3 雷暴云电荷分布与闪电示意图(图片来自王俊芳报告)

早就开始了云内起电机制研究,并提出了多种起电机制。这些起电机制可以分为微观起电或粒子起电和宏观起电机制。云内有各种不同尺度及不同相态的水成物粒子(霰、雹、雪花、雨滴、冰晶等),这些粒子间发生相互作用从而起电,这称为微观起电。另外云内存在大尺度强上升气流,考虑雷暴云内的对流、传导、离子扩散和湍流扩散等过程产生云不同部位荷电不同极性电荷,这称为宏观起电。实验室内各种试验和野外观测以及数值模拟试验结果认为,非感应起电、感应起电、次生冰晶起电等微观起电机制和离子扩散起电、离子电导捕获和对流起电等宏观起电机制是重要的雷暴云起电机制^③。

非感应起电机制被认为是最重要的起电机制,研究发现,大(霰粒或软雹)小(冰晶)冰相粒子之间在碰撞、弹开的过程中,在两个粒子之间发生电荷转移。在合适的温度和液态水含量时,霰粒带负电,冰晶带正电。在流场和重力作用下,大、小粒子宏观上分层分布,使雷暴云呈现上正下负的电荷分布^③。

感应起电机制如图4所示,在电离层形成的外电场的作用下,大雨滴和小云滴被极化,如果电场垂直向下,则雨滴和云滴上半部极化为负电,下半部极化为正电。大雨滴向下运动过程中,与向上运动的小云滴相遇发生碰撞,交换电量,荷正电荷的云滴向云的上部运动,荷负电荷的雨滴向云的下部运动,从而形成云中上部为正、下部为负的电荷中心。

离子扩散起电是指,上述感应起电机制中所说的极化水成物粒子降落速度以及正负离子迁移率的差别,通过电导吸附将使水成物粒子荷电的过程。

雷暴云中的电荷起电机制,也就是云中正负电

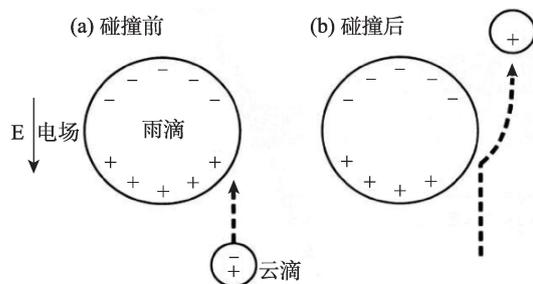


图4 雷暴云感应起电机制示意图

荷分离为不同极性荷电区的形成机制较为复杂。可能是一种起电机机制起作用,也可能是多种起电机机制综合作用。在多种起电机机制综合作用下,也可能是一种或几种起电机机制为主,其他起电机机制为辅。

1.3 雷暴云中的闪电

随着雷暴云中正负电荷的不断积累,当云内局部电场强度可以击穿空气(一般为2500~3000千伏每米(kV/m))时,便会激发闪电的发生。闪电就是雷暴云中不同符号荷电中心间发生的放电过程。放电过程中,闪道中的温度骤增,使空气体积急剧膨胀,从而产生冲击波,导致强烈的雷鸣。根据闪电部位,闪电可分为云闪和地闪两大类。如图3所示,云闪是指不与大地和地面物体发生接触的闪电,包括云内闪电、云间闪电和云空闪电。地闪是指云内荷电中心与大地和地面物体之间的放电过程。

闪电产生强电流,引起强电磁辐射和静电场的变化。闪电具有持续时间短(10^{-7} ~1秒)、发展速度快(10^4 ~ 10^8 米每秒)、空间尺度跨度大(从分子尺度到米量级再到几十上百千米)等特点。

20世纪90年代,人们利用飞机、气球和卫星等搭载的探测器发现了在雷暴云内和雷暴云顶存在着的比可见光子能量更高的高能光子辐射现象,比如地球伽马闪(Terrestrial Gamma-ray Flash, TGF)。后来利用地面和高山上的探测器也发现了由雷电过程直接产生的高能光子辐射。

这些有趣的新现象和新进展,进一步引起了物理学、大气科学、空间物理、天体物理等学科交叉研究的兴趣。其中宇宙线与大气电场、雷暴闪电触发等的关系是宇宙线研究学者关注的一个重要领域。

2. 宇宙线

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子流,其发现就来自于对地球大气电离现象的研究。人们很早就发现空气中存在着电离现象,并认为这种电离是地面辐射造成的,而且辐射越强,空气电离度就越高。空气电离度可以用电离室来进行测定。1911

年开始,气球飞行业余爱好者,奥地利物理学家赫斯(Victor Franz Hess,1883~1964)(图5)将电离室吊在气球下,飞离地面,来测量空气电离度随着距离地面高度的变化,结果显示在海拔5000米的高空,造成空气电离的辐射强度竟然是地面的9倍。由于白天和夜间测量结果相同,因此赫斯断定这种造成空气电离的辐射射线不是来源于太阳的照射,而是来自于宇宙空间。最初,这种辐射被称为“赫斯辐射”,后来被正式命名为“宇宙射线”,简称为宇宙线。现在我们把宇宙线认为是来自宇宙空间的高能粒子流的总称,是地球环境背景辐射的组成部分。这里所说的背景辐射是指我们生活的地球环境中广泛存在着的辐射,除了宇宙线外,还包括地表辐射和人体内辐射等。

宇宙线主要由质子、氦核等原子核组成,也含有少量电子和中性的伽马射线。尽管在太阳和星际空间也可能产生这些粒子,但其主要来自于银河系或银河系外。它们在星系际和太阳系空间传播,最后到达地球。宇宙线粒子的能量可以超过 10^{20} 电子伏特(eV,1电子伏特等于 1.6×10^{-19} 焦耳),远超过地球上的粒子加速器可以达到的能量(10^{13} eV)。从宇宙线研究中,人们发现了正电子、缪子和 π 介子等,开创了粒子物理这门学科。宇宙线研究一直也是天体物理学的重要领域。

在宇宙线研究中,我们把进入地球大气前的宇宙线粒子称为原初宇宙线。原初宇宙线粒子进入地球大气后,与大气中的氧、氮等原子核发生碰撞,



图5 宇宙线的发现者赫斯

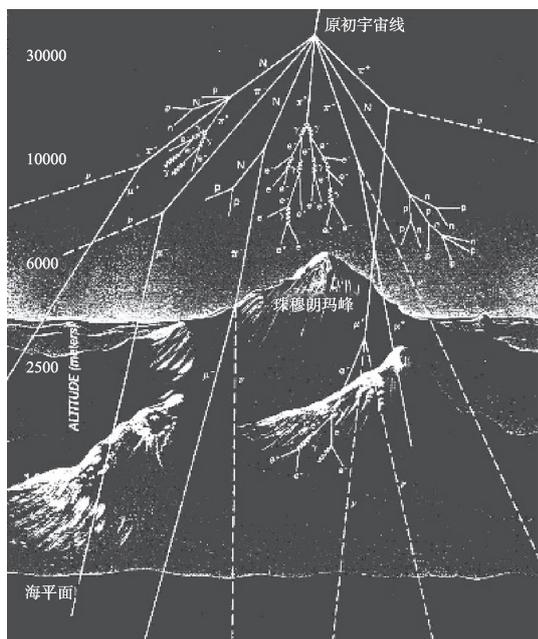


图6 宇宙线广延空气簇射现象示意图(图片来自百度图片)

并转化生成次级宇宙线粒子,而高能宇宙线的次级粒子又将有足够能量产生下一代粒子,如此下去,一级一级地产生转化,将会产生一个庞大的粒子群。这种大范围空气簇射现象称为宇宙线广延大气簇射(Extensive Air Shower,EAS),法国人奥吉尔1938年在阿尔卑斯山观测时首先发现了这一现象。这些EAS次级粒子组成一个粒子盘以光速飞向地面。EAS次级粒子主要由带电的电子、缪子、强子以及不带电的光子、中子和中微子等组成。利用地面上大范围探测器来记录EAS粒子,可以对原初宇宙线以及宇宙线粒子与空气相互作用过程进行研究。

3. 宇宙线与雷暴闪电的关联

随着人类科学技术的进步和发展,宇宙线对人类现代通讯和航空航天等活动的影响日益增加。宇宙线还存在对地球大气过程和天气的作用。宇宙线带给地球的能量与天气过程能量相比可以忽略,但宇宙线具有使空气电离的能力,因此进入地球环境中的宇宙线由于受到太阳活动的调制强度发生变化,可能导致地球天气和气候的变化,这或许是令全世界关注的地球气候变化问题的原因或

部分原因。人们对这一重大问题进行了许多研究、讨论和争论,现在仍然存在着很大分歧。

3.1 宇宙线与大气电场的关联

宇宙线和太阳紫外线及地面辐射使大气电离,形成大气电离层。大气电离层处于高度50到1000 km的区域,相对于地面维持着一个约250 kV的电压,形成了晴天大气电场。在地球平坦地面附近,晴天大气电场强度约为100~200伏每米(V/m),指向地面。各地大气电场的实际数值取决于当地的条件,如大气中的尘埃、地貌以及季节和时间等。大气电场变化可以提供天气变化和环境变化的重要信息,是一个重要的气象参量。雷暴云内探测到的电场强度80~280 kV/m^③,小于空气击穿电场的阈值2500~3000 kV/m,也就是说雷暴云内部一直未能找到一个足够强的电场能自然激发闪电。闪电始发机制一直长期被关注,但还没有被充分理解和认识。

自1924年Wilson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,并提出“逃逸电子(runaway electrons)”的概念以来,这种发生于雷暴云内的高能现象就成了大气物理学中的研究热点。1992年Alex V Gurevich等提出一种新的宇宙线引发闪电的理论。认为宇宙线次级粒子中能量约1兆电子伏特(MeV,10⁶ eV)的电子可被雷暴电场加速,当获得足够高的能量时,会使空气分子电离产生新的电子,新产生的自由电子又被电场加速,从而发生雪崩效应,使得电子数目呈指数增长。通过这种相对论电子逃逸雪崩(relativistic runaway electron avalanche, RREA)过程来增加带电粒子的数量,从而触发闪电的大规模能量释放。也就是说宇宙线的广延大气簇射是引发闪电的催化剂。多年来,很多科学家试图通过卫星实验去探测来自地球的伽马射线闪现象(TGFs)、通过地面宇宙线观测实验去寻找雷暴期间地面宇宙线次级粒子突然增强的现象(TGEs),进而探寻雷暴电场加速宇宙线产生的高能粒子。如图7所示。

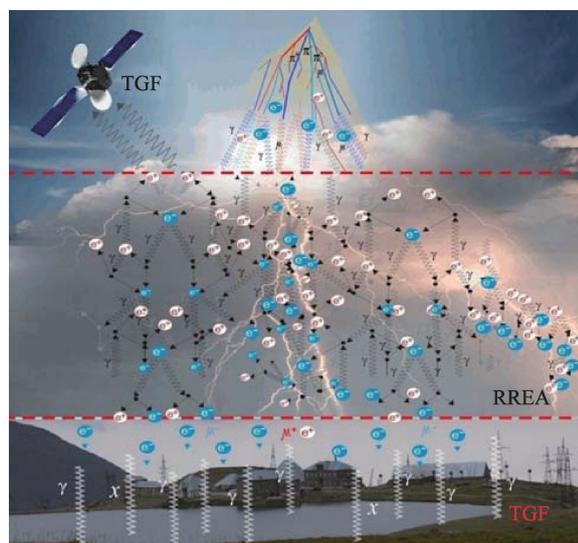


图7 雷暴闪电与宇宙线EAS次级粒子联系示意图

尽管目前已确信导致闪电的原因是某种逃逸崩溃,也有一定的间接证据表明这种逃逸崩溃可能由在云层之上的宇宙线引起,但还不能肯定逃逸崩溃都是由宇宙线引起的。对宇宙线强度和雷暴大气电场变化间的关联进行直接测量和分析研究,对上述问题的解决至关重要。另一方面雷暴云中的大气电场对宇宙线空气簇射的发展过程有何影响,也是宇宙线物理地面观测研究中特别关注的问题。宇宙线与大气电场间的关联研究也可以提供宇宙线粒子与大气相互作用、在大气中传播过程的重要信息。

总之,宇宙线与大气电场间的关联,特别是宇宙线流强有较大变化期间和雷暴期间二者的关联是一个重要的、有理论和实际意义的交叉学科前沿问题。

3.2 宇宙线与雷暴闪电关联研究进展

大气电场特别是雷暴云大气电场可以加速或

者减速带电的EAS次级粒子从而改变EAS事例的大小,因此,地面探测的宇宙线计数率将会随着大气电场而变化。另一方面EAS次级粒子在雷暴云中也会辐射产生新的更多的次级粒子,有可能触发闪电。闪电必须形成一条穿透云层的导电通道,人们至今仍不清楚,宇宙线诱发的逃逸崩溃所产生的大规模扩散放电,如何形成这样一条狭窄的高温通道。这也成为世界上各个研究组开展研究的重点和热点。Alexeyenko等人于1985年第一次通过地面探测实验发现了雷暴期间地面探测的次级宇宙线强度变化。EAS-TOP实验也记录到了雷暴期间EAS计数率10%~15%的变化,而且把这种变化解释为强电场对EAS次级粒子的加速结果;Khaerdinov等发现闪电前EAS次级粒子强度显著增强,并理解为发生了强电场中的逃逸电子;Buitink等模拟计算了大气电场对宇宙线次级粒子的影响,发现当电场大于一定阈值时可能出现逃逸电子崩溃。

中国科研人员早在20世纪80年代末就开始在西藏羊八井建设宇宙线地面观测站,研究宇宙线的起源等宇宙线物理中的基本问题。

位于地球低纬度的西藏羊八井宇宙线观测站是世界著名的宇宙线观测站^④,对宇宙线的观测具有独特的地理优势,可以很好地监测宇宙线强度的变化。其中中意合作ARGO-YBJ实验作为世界上大面积全覆盖地面EAS观测实验,积累了大量宇宙线数据和部分大气电场数据。利用这些数据,科学家们也开展了宇宙线物理与大气科学交叉问题研究。

2008年8月起,郅秀书团队在羊八井宇宙线观

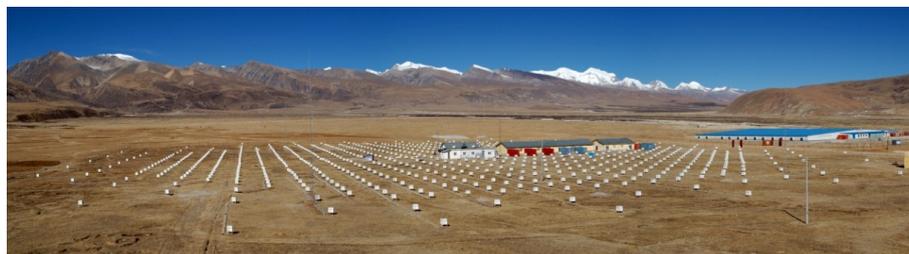


图8 西藏羊八井宇宙线观测站

左边为中日合作AS γ 实验,右侧大厅为中意合作ARGO实验

测站内开始记录测量雷暴电场、晴天大气电场和闪电,结果显示,羊八井地区雷暴云主要是三层电荷结构,下部正电荷层较大;羊八井地区闪电活动发生在5~9月份,闪电个数7、8月份最多,闪电大多发生在一天午后至半夜,17:00~19:00闪电最多,地闪峰值滞后一些;正地闪很少,负地闪主要发生在雷暴云的耗散阶段,这里的正地闪是指云中的正电荷对地放电形成的地闪,而负地闪指云中的负电荷对地放电;羊八井宇宙线观测站中子堆探测器记录的宇宙线计数率在雷暴期间有明显变化^⑤。

西南交通大学宇宙线研究组研究了2011年和2012年夏季雷暴期间,西藏羊八井宇宙线观测站ARGO-YBJ实验测量到的EAS次级粒子计数率变化情况。结果显示,雷暴期间,大气电场剧烈变化,宇宙线广延空气簇射(EAS)次级粒子计数率也有显著的变化。为了理解观测到的实验现象,对宇宙线粒子在空气中的相互作用和传播过程进行了全蒙特卡罗模拟计算。模拟计算结果合理地解释了上述观测现象^⑥。

4. 总结展望

总之,宇宙线与雷暴闪电的关联是一个重要的、有理论和实际意义的不断发展的前沿交叉学科领域。

位于中国四川稻城的高海拔宇宙线观测站(Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)(海拔4400米)是国家重大科技基础设施,该实验采用多种手段,对进入大气层的宇宙线粒子进行复合、精确测量,主要有1平方千米的闪烁体加地下缪子探测器(KM2A)、9万平方米的水切伦科夫探测器阵列(WCDA)和18台广角大气切伦科夫望远镜阵列(WFCTA)组成,实验效果图如图9所示。2021年全部实验设备安装完成并全面运行,图10为LHAASO实验俯瞰照片。

2021年,边建设边运行的LHAASO就取得了重大科研成果,发现首批“拍电子伏(PeV, 10^{15} eV)加速器”和最高能量光子,开启“超高能伽马天文学”时代^⑦。这也充分展示了LHAASO的先进性和实验

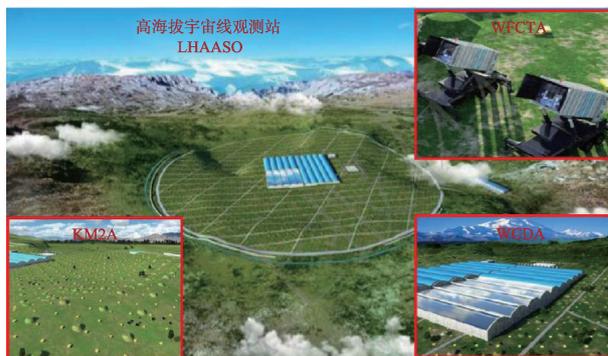


图9 LHAASO实验效果图



图10 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)

的灵敏度,以及拥有的低国能、大有效面积、大视场和全天候等优势。LHAASO实验站场内,还安装有云量仪、大气电场仪、闪电光学观测和射频三维成像仪等,通过多手段同步观测雷暴闪电,探究高原闪电和雷暴电荷结构特征与机理,与高海拔宇宙线观测站(LHAASO)对高能宇宙线粒子的复合观测相结合,对雷暴闪电过程相关的宇宙线高能粒子规律进行细致研究,有望取得突破性的进展。

参考文献

- ① 雷暴天气是什么? 雷暴天气是怎么形成的? 天气网,2015-07-20.
- ② 陈渭民,雷电学原理,气象出版社,2006年第二版.
- ③ 郟秀书等,雷电物理学,科学出版社,2013年.
- ④ 谭有恒,立足高原雪域 登攀科学高峰——为西藏计划20年而作,现代物理知识,19(2007):3.
- ⑤ 王俊芳等,雷暴电场对宇宙射线次级粒子 μ 子的影响研究,物理学报,61(2012):159202.
- ⑥ 周勋秀等,近地雷暴电场与羊八井地面宇宙线关联的模拟研究,物理学报,64(2015):149202.
- ⑦ LHAASO,Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 gamma-ray Galactic sources,Nature,594(7861)(2021):33.