

大气保护了生命

——什么是广延大气簇射

左 雄

(中国科学院高能物理研究所 100049)



1. 大气保护了生命

来自外太空的每秒钟数以兆亿(10^{14})计的宇宙线在持续地轰击着我们的地球,这些神秘的太空信使同时也将是恶魔般的存在。研究表明,高空飞机上的辐射量是地面的30~60倍,而近地航天器中的辐射量竟然能高达地面的100~150倍。离地面越远,也即大气越稀薄的地方将面临更加严重的辐射风险。地磁场作为第一道屏障,抵挡了绝大多数低能的宇宙线对地球的轰击,但有部分高能宇宙线($>10^9\text{eV}$)还是会进入到大气层(图1)。原初宇宙线在大气中发生广延大气簇射,逐渐转换为较低能的次级粒子,次级粒子随后在大气中损耗,最终到达海平面时约只有每秒每平米160个粒子,而原初宇宙线在1 GeV附近的流强约为每秒每平米 10^5 个粒子。可以看出,大气层充当了坚实的护盾,使得辐射量降低了近3个量级。如果没有大气层的保护,

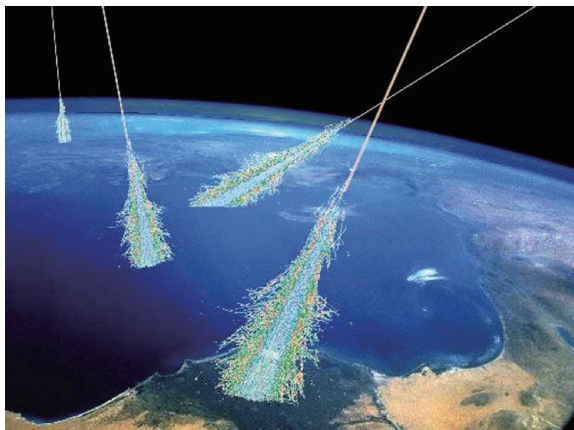


图1 高能宇宙线轰击地球,在大气中产生广延大气簇射

长期暴露在强辐射下的生物DNA和细胞发生不可逆的损害,地球生物承受灭顶之灾。

2. 广延大气簇射的发现历程

既然原初宇宙线在大气中发生广延大气簇射的过程这么重要,人们会好奇当初人类是如何发现它的? 1912年奥地利物理学家赫斯宣布发现了来自外太空的穿透辐射——宇宙线,那么当时他以及随后的其他科学家们做的多次实验中观测到的辐射是否就是原初宇宙线信号? 另外,簇射这样的概念是怎么形成的? 带着这些问题我们去回顾一下当时的探索进程。

1928年随着云雾室、盖革-米勒计数器(图2(a))和符合测量技术发展,簇射(shower)的概念开始被提出。云雾室中不同的径迹明显来自于同一顶点,即称为属于一个簇射。1932年,罗西(意大利物理学家)等人的测量结果表明,粒子的簇射可以被品字形排布的三个盖革计数器符合观测到;1933年,英国物理学家布拉凯特和意大利物理学家奥基亚利尼观察到了打在云雾室附近的单个高能宇宙线粒子与大气相互作用引发的多粒子径迹(图2(b)),他们称这样倍增过程为showers。越来越多这样的独立的实验测量清晰地表明,簇射中的粒子有一个共同的源。

当时的人们普遍认为空气中测量到的穿透性粒子是原初宇宙线,就是这些粒子通过与空气原子核相互作用产生了簇射。但很快罗西曲线(图3)的

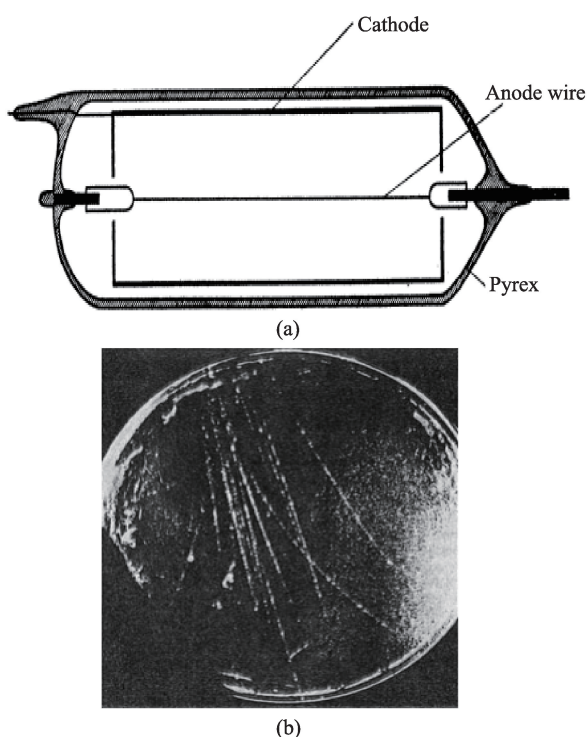


图2 盖革-米勒计数器(a)和云雾室粒子径迹照片(b)

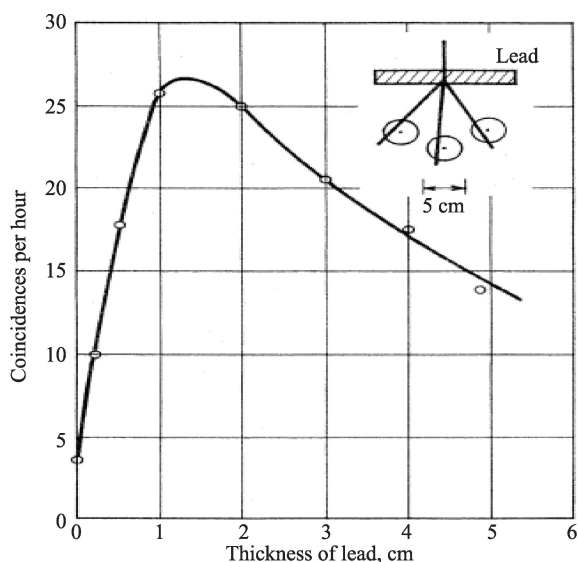


图3 罗西曲线及其实验装置图(右上角)

测量表明这种猜想是错误的。罗西实验用的是三个品字形排布的盖革-米勒计数器,计数器上面加了一层铅板。这样的排布保证了单个沿直线飞行的粒子无法同时触发所有计数器,即至少要两个粒子才能同时触发三个计数器。其中一个粒子可能是入射粒子,另一个应该是入射粒子在铅板中产生

的次级粒子。通过加盖不同厚度的铅板,测量符合计数率随铅板厚度的变化曲线。最初铅板厚度增加时,符合计数率快速上升,即入射粒子在铅板中发生了相互作用从而产生了簇射;随着铅板厚度继续增加,符合计数率又快速减小,表明入射粒子在铅板中被逐渐地吸收。而大气中的穿透性粒子的能量较高,在铅板中穿透的距离应该是在米量级,不会经过几厘米的衰减就使得其能量和数量发生明显改变。因此,这个实验的结果表明这些在铅板中引发簇射的入射粒子能量较低,不是之前发现的穿透性粒子。经过科学家们的不断地研究,目前我们知道这些粒子是原初宇宙线与大气相互作用产生的次级产物中的一部分,如电子和伽马光子。而穿透性粒子是次级产物中能量较高的部分,如缪子和强子。

而后人们利用多层云雾室在实验室中观测到了簇射发展的过程,更加直观形象。另外,20世纪30年代,量子电动力学的成熟完美地解释了电磁级联发展过程。除了实验室中簇射观测的进展,早在1933年,罗西在东非观测东西效应时就发现可能有扩展的粒子簇射到达并同时击中多个计数器,但是当时他没有时间去进一步研究这个有趣的现象。很可惜,这很可能是人类第一次观测到广延大气簇射,但罗西与首次发现失之交臂了。1938年,法国物理学家奥格尔通过在海拔3000多米的地方进行实验,通过不断改变计数器的间距,测量符合计数率(图4),发现了原初(来自太空)宇宙线在进入大气时产生具有明显时间与空间效应的“粒子雨”过程,宣布发现了广延大气簇射;进一步测量得到了次级粒子的能量可以高达 10^7 eV以上,结合次级粒子数目的估计可以得到原初宇宙线的能量在 10^{15} eV以上。1946年,还是我们熟悉的那个广延大气簇射研究的前驱罗西,他领导的小组创建了首个探测广延大气簇射的探测器阵列,从而开创了宇宙线研究的新天地。

3. 什么是广延大气簇射

高能原初宇宙线粒子进入到大气层上空后,与

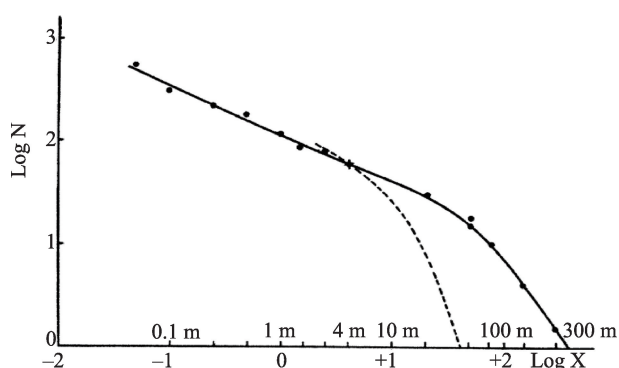


图4 符合计数随计数器间距的变化。横坐标为计数器摆放间距, 纵坐标为符合计数。其中黑点是测量值, 其他为理论预期

大气层中的原子核碰撞产生次级粒子, 然后次级粒子再和空气核相互作用继续产生新的次级粒子, 如此往复多次形成级联, 最终会产生数目巨大的低能次级粒子, 这些次级粒子也以接近光速前进着并且会在大气中横向扩散开来, 这些粒子就像一场瞬间(10^{-8} s)粒子“阵雨”一样到达地面, 簇射中的粒子数可高达千亿, 并且散布在数平方公里的面积上, 这样的粒子“阵雨”称为广延大气簇射。

根据原初宇宙线的粒子种类, 广延大气簇射可分为电磁级联和强子级联。原初宇宙线粒子为 γ 光子或电子时, 被称为电磁级联; 原初宇宙线为强子时, 被称为强子级联。

(1) 电磁级联:

高能电磁级联的物理反应主要是电子对产生和电子的韧致辐射(图 5(a))。原初高能 γ 光子在大气核子的库仑场中产生正负电子对:

$$\gamma + (Z, A) \rightarrow e^+ + e^- + (Z, A)$$

而正负电子随后又在库仑场中通过韧致辐射产生新的光子:

$$e^\pm + (Z, A) \rightarrow e^\pm + \gamma + (Z, A)$$

这样的过程会不断地进行, 使得光子和正负电子的数目持续地增加, 而其能量也相应地减小。当次级电子的能量降低至临界能量 E_c (电子的辐射能损和电离能损相等时的电子能量)时, 簇射发展到极大, 此后电子的电离能损(不产生新粒子)开始占主导地位, 次级粒子数目快速衰减致使簇射走向衰落。

(2) 强子级联:

与电磁级联相比, 强子级联在大气中的发展过程更加复杂(图 5(b))。高能强子进入大气后, 与大气中的原子核发生强相互作用, 产生次级核子和 π 介子(π^+ 、 π^0), 还有少量的 κ 介子(κ^+ 、 κ^0)和超子。这些次级产物中的强子或者继续与空气核发生相互作用, 或者发生衰变(部分反应中产生 μ 子和中微子), 产生更多的次级粒子。和电磁簇射类似, 强子级联

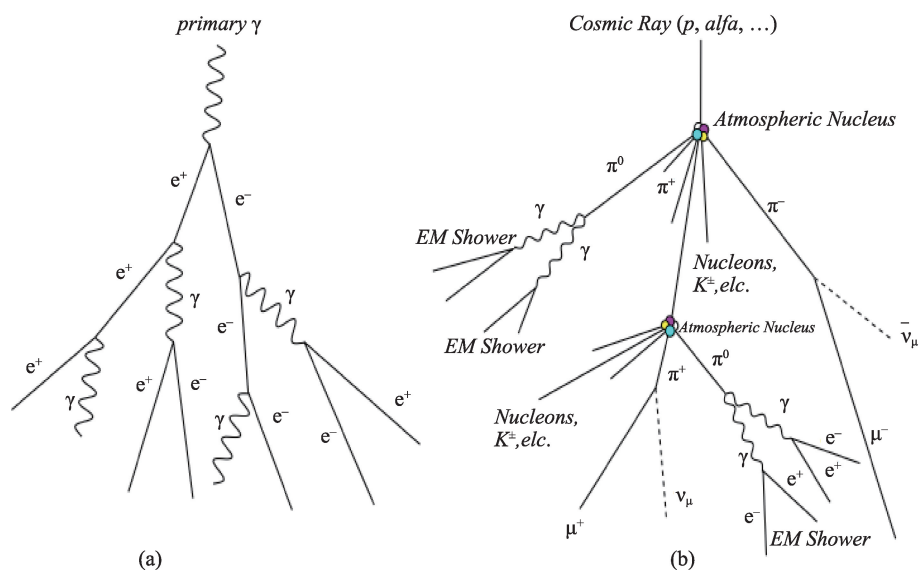


图5 电磁级联(a)和强子级联(b)的示意图

也不会无限发展下去。当次级粒子能量低于产生 π 介子的阈能(~ 1 GeV)时,强子簇射达到极大,随后才减少。

广延大气簇射过程中产生的粒子种类众多,最基本的有三种,电子、 γ 光子和 μ 子。其中前两者的数量在广延大气簇射发展极大处附近占比更大,而在海平面处 μ 子数目占主导。相比于能量较低的电子和 γ 光子(MeV量级), μ 子能量更高(大多为1 GeV以上),穿透力强。由上述级联过程可知,强子级联中富含 μ 子,而电磁级联中几乎不产生 μ 子,这是二者之间的一个较为鲜明的区别。

4. 如何探测广延大气簇射

(1)符合法:

符合法是广延大气簇射测量的核心方法。符合法是研究相关事件的一种方法,相关事件是指两个或两个以上同时发生的事件,也叫符合事件。符合法要利用符合技术即用电子学的方法在不同探测器的输出脉冲中把符合事件选出来。

经典的 ^{60}Co 的衰变中,放射性元素 ^{60}Co 发生衰变时,会同时放出 β 以及 γ 射线,如果我们在 ^{60}Co 附近“同时”测量到了 β 射线与 γ 射线,则证明 ^{60}Co 发生了一次衰变。具有内在因果关系的符合为真符合,没有因果关系的随机事件也存在符合,例如, ^{60}Co 接连放出的 β 与 γ 射线为真符合,而两个 ^{60}Co 同时衰变,一个放出的 β 射线,和另一个放出的 γ 射线的符合,则被称作偶然符合。

地面测量宇宙线方法之一就是时间符合测量法和空间符合测量法。由于原初宇宙线的能量非常高,在进入大气的过程中会被空气中的原子核碰撞击碎,产生很多“碎片粒子”,通常以大量粒子同时被测量到作为一个宇宙线信号的测量。由于探测器本身存在一定量的噪声,大量粒子的符合测量可以大大降低偶然符合概率。实际应用中,在一定的时间和空间窗口内“着火”探测单元(即探测到了次级粒子)个数大于某个值时,则记为一次有效的簇射事例。

(2)探测手段:

现有成熟的并应用广泛的广延大气簇射的探测手段主要有三种,即地面广延簇射阵列、大气切仑科夫成像望远镜和大气荧光望远镜。

地面广延簇射阵列通过铺设大面积的粒子探测器,测量簇射中的电子、伽马光子和缪子等次级粒子。它的优势是具有宽视场、有效曝光时间长且探测效率高。这类实验代表性的有中意合作的ARGO实验和国家“十二五”大科学工程的LHAASO(高海拔宇宙线观测站,图6)实验。特别是LHAASO实验是我们国家自主建成的高水平的国际宇宙线研究平台,运行至今已经在多家国际知名刊物上发表重要物理结果。其中2021年5月17日发表在《Nature》杂志上的文章表明,LHAASO发现了大量超高能宇宙加速器,并记录到最高1.4 PeV伽马光子,这是人类观测到的最高能量光子,改变了人类对银河系的传统认知,开启“超高能伽马天文学”时代。

大气切仑科夫成像望远镜利用的原理是相对论带电次级粒子的速度超过空气中光的速度时,会产生切仑科夫光。这类型的探测器具有较好角分辨和能量分辨;代表性的实验有HESS, MAGIC, VERITAS实验。而大气荧光望远镜(代表性的实验如HiRes和AUGER实验)的工作原理是次级粒子中带电粒子会激发大气中的氮气,在退激过程中会发出各向同性的荧光。荧光产额很低,常用于极高能

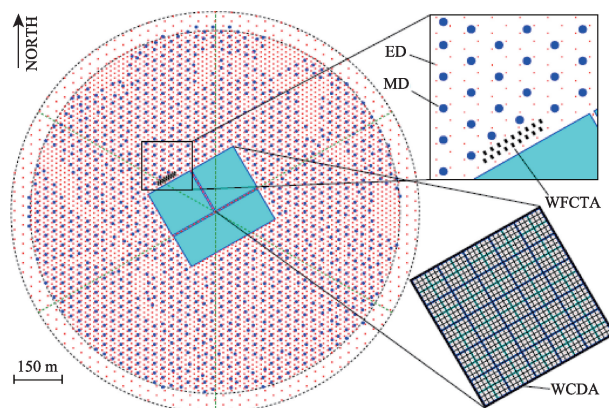


图6 位于我国四川省稻城县海子山海拔4400米的高海拔宇宙线观测站(LHAASO实验),通过大面积摆放不同类型探测器,多种手段测量广延大气簇射,精确测量原初宇宙线到达方向和能量

宇宙线($>10^{18}\text{eV}$)观测中。

5. 小结

由于地球大气层的存在,高能原初宇宙线通过与大气相互作用产生了广延大气簇射,转换成了数量巨大的低能次级粒子。随后低能次级粒子在大

气中继续损耗,最终只有少部分到达人类生活的场所,这样的过程极大地保障了人类的正常生活。

人类对广延大气簇射的探测已经持续了近90年,从最初的几个盖革-弥勒计数器的符合测量,到目前先进的数量庞大的多种探测器手段的复合精确测量,我们对广延大气簇射的认知还在不断地深入过程中。

科苑快讯

神经回路在学习、记住动作时会发生变化

一个日德研究小组通过老鼠实验发现,脑内神经回路的构造在学习并掌握身体动作的过程中发生了变化。

写字、骑自行车等各种动作,都是在试错过程中用身体来学习的,不久就能无意识地顺利完成。我们已知,初级运动区中会产生传递信号的神经细胞连接点,即突触。只是大脑保存这些记忆的结构,以及在大脑中的重要区域,尚不清楚。

因此,研究组做了一个实验,让老鼠用前爪抓住洞口前方的食物。在第1~4天的学习初期,初级运动区的突触大量形成。此时,运动能力越强的老鼠突触的数量越多,可见突触的形成非常重要。而学习初期产生的大多是“次级运动区”接收到的信号。而到了学习后期的第5~8天,初级运动区产生的神经突触消失了80%,剩下的部分不是从次级运动区接收信号,而是从间脑中负责大脑各种信号的中继器“视丘”接收信号。这些神经突触接收信号的“棘突”变大,加强初级运动区接收来自视丘的信号。在学习后期,学习到的运动逐渐自动化、习惯化。

之后进行了各种抑制信号的实验,学习初期抑制次级运动区的信号会导致运动水平很难提高,而抑制来自视丘的信号则没有影响。到了第9天,抑制视丘

发出的信号,已经熟练的运动就无法正常进行了。

一系列的实验结果表明,开始学习运动时,次级运动区到初级运动区的信号非常重要,之后的记忆由来自视丘的信号继承并保存。

这一研究结果刷新了人类对运动相关大脑结构的认知,使用视觉、听觉、身体感觉等更高层次功能的学习结构也是如此,这有助于进一步查明学习障碍和认知功能障碍的原因。



(高凌云编译自2022年8月23日 scienceportal 网站)