

空气电离之谜

熊 峥 刘 佳

(中国科学院高能物理研究所 100049)



一、问题的起源

18世纪,人们对电现象有了初步的认识。1785年法国物理学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736~1806)向法国皇家科学院提交了多份关于电磁现象的研究报告,其中一份报告详细记录了他通过一个基于验电器原理制作的扭力天平实验得出了由于空气的作用,该装置的电量不能永久保持,总会以自发放电的形式泄露电荷的结论。此后有多人研究过空气电离的问题,引出了一个困扰了人类近一个半世纪的空气电离之谜^①。

二、如何找到答案

我们来重温一下验电器实验(图1)和空气电离的原因。世间存在正负两种电荷,同种电荷相斥,异种电荷相吸。丝绸摩擦过的玻璃棒会带正电,而用毛皮摩擦过的橡胶棒会带负电,一旦将它们靠近验电器上方的导体片时,自身所带的电荷会传到玻

璃钟罩内的箔片上。由于同种电荷相互排斥,金属箔片将自动分开,张成一定角度。根据两箔片张角的大小可估计物体带电量的大小。但是金属箔片张角会随着时间的慢慢变小,这说明验电器会自发放电泄露电荷,也就是说电荷被某个“小偷”悄无声息地偷走了。

1903年,英国的卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871~1937)在库仑结论的基础上,怀疑“小偷”的身份是辐射:辐射导致大气电离产生正负离子,这些正负离子碰到金属箔片,中和了金属箔片上的电荷,在我们看起来就像是“偷”走了验电器中的电荷一样。于是他用铁和铅把验电器完全屏蔽起来,电离速率几乎可减少约三分之一,但验电器内部的空气还是会发生电离,大约是每秒每立方厘米有10对离子产生。在论文中卢瑟福提出设想,也许有某种贯穿力极强的辐射从外面进入验电器,从而激发出二次放射性。现在嫌疑聚焦在辐射这个“小偷”身上了,而且这种辐射还不是普通的“小偷”,而是可

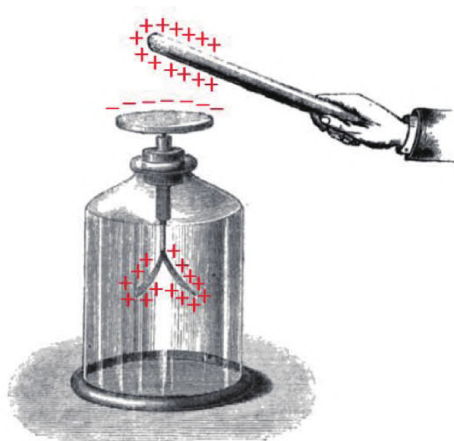


图1 库仑和验电器示意图

以自如穿过“由铅板和铁板组成的密室”的“怪盗”。那么这个神秘的“怪盗”的老巢在哪里呢？我们如何确定“怪盗”们的来源呢？

在那个时代，人们对于辐射的认知还停留在它们来自于放射性物质衰变的水平，放射性元素来自于地壳或者是它们产生的放射性气体“氡”。如果大气的电离是由于辐射造成的，那么就会有相应的放射性物质源存在。就像火源，火焰就是一个会向外辐射热量的辐射源，当我们靠近火源时，就会获得更多热量，感到热；远离火源时，就会感觉到冷。如图2所示，野人生火取暖，需要接近火取暖，但也不能离得太近。而放射性物质则会辐射高能量的光子或者是实物粒子，这些被称为是电离辐射，如图3所示。

那你觉得这些“怪盗”的老巢在哪里呢？如果要我来说，我会自然地认为这些“怪盗”的老巢就在



图2 野人生火取暖，“火源”就是一种“辐射源”

放射性和电离辐射

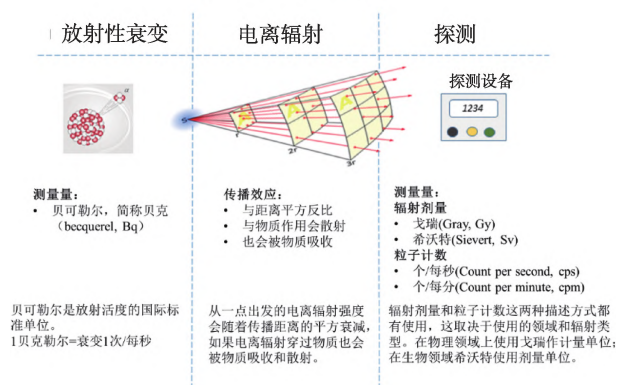


图3 放射性和电离辐射

深深的地下。当时，卢瑟福自然也认为这些辐射是来自于地壳中的放射性物质导致空气电离，并且给出了检验方法：如果这些辐射来自于地壳中的放射性物质，那么辐射强度应该随高度增加而减少。

为了确认电离的来源，法国科学家沃尔夫 (Theodor Wulf, 1868~1946) 在1910年带着更加灵敏而可靠的新型验电器登上巴黎324 m高的埃菲尔铁塔，进行了比较塔顶和地面两种情况下的电离强度的实验。他发现电离现象随着高度增加变弱，在塔顶的辐射大约是地面的64%。这一结果无疑支持了卢瑟福通过屏蔽验电器得出来的结论：辐射似乎来自地底^②。

“怪盗”可是狡猾得很，往往会留下许多假线索，误导我们去完全相反的地方寻找。仅凭一次测量并不能确证辐射来自地底，科学家会质疑“怪盗”是不是在欺骗我们，需要收集更多的证据。在沃尔夫的实验后，意大利物理学家多米尼克·帕西尼 (Domenico Pacini, 1878~1934) 分别在陆地上、海上和热那亚海湾 (Golfo di Genova) 的水下用验电器做电离测量，发现水下的电离率比水面处略低，得出了与前人不同的结论，即大气中存在一种与地壳中的放射性物质无关的穿透性辐射^③。

这让人们开始怀疑“怪盗”的老巢其实建立在天上——来自我们头顶的天空！1912年8月，奥地利物理学家维克托·赫斯 (Victor F. Hess, 1883~1964) 进行了一次历史性的气球飞行 (图4)，当他上升到5300米时，发现电离速率增加到海平面的三倍左右！他得出结论，穿透性辐射是从上方进入大气层的。他发现了辐射源来自于天上，它们让空气发生了电离！人们似乎抓住了“怪盗”的把柄！

然而，赫斯大胆的结论在当时并不为所有人接受，因第一个测出电子电量而闻名的美国物理学家密立根 (Robert A. Millikan) 就是其中的一位。密立根把探测器放在无人操作的气球上，在15000米的高空测到的辐射强度不到赫斯测量结果的四分之一。根据这个不同于赫斯的结果，密立根认为根本没有地球之外来的电离辐射，穿透性辐射都来自地

面。“怪盗”在自己的老巢前做了很多隐藏自己踪迹的工作,让我们在真相面前兜兜转转。但随后的实验结果证明,辐射量的差异是因为美国德州和中欧的地磁场差异引起的。

1926年,密立根在加利福尼亚州群山中的缪尔湖(Muir Lake,海拔3392 m)和慈菇湖(Arrowhead Lake,海拔1577 m)的深处做实验,把探测器放置于水下测量电离速率。通过比较电离速率与湖水深度的关系发现,同样水深的情况下,探测器在缪尔湖测得的电离速率会快于慈菇湖,只有将缪尔湖的探测器再往深处下放2 m,两者的电离速率才接近。也就是说2米水深对辐射的吸收作用与近2000 m的空气相当。这一结果使密立根和更多的人信服了赫斯“辐射一定来自天上”的结论。“怪盗”的身份和老巢终于被人类调查得一清二楚:它们实际上是来自宇宙的高能粒子而非来自地面的放射性物质,所以密立根为这些“怪盗”们取名为“宇宙线”^④。

最终,赫斯的发现被证明是正确的,并获得了1936年的诺贝尔物理学奖,这也是宇宙线研究历史上的第一枚诺奖。赫斯的高空气球实验无疑是科学探索史上最为壮美的一次飞行。诺贝尔物理学奖委员会指出,“赫斯的发现开启了解物质结构和起源的远景,证明了一种地球外穿透性辐射的存在——宇宙线,比发现辐射的粒子性和辐射强度随高度变化更加根本”^⑤。

在1911至1913年期间,赫斯带着验电器一共飞行了10次。那个时代的气球飞行可没法携带缓



图4 赫斯与他在气球实验中的照片(在气球里面的是赫斯)

解高原反应用的氧气瓶,赫斯不仅要克服缺氧、高寒和强风的艰苦条件进行科学测量,还要指挥助手控制航线。每一次飞行不仅是一次科学上的探险,更是挑战生命极限的冒险。在氢气球下的小小吊篮里,赫斯在罕有人至的高空迎着风紧张地进行测量,脚下是被云层覆盖的城市,这一幕被深深地印刻在一代又一代的宇宙线实验科学家的脑海里。

三、实验设计

今天,我们拥有了远比验电器更加强大而精确的探测器,让我们利用现代实验设备来重新证明宇宙线作为“电荷怪盗”让空气电离,以及它们来自宇宙而不是来自地下。首先介绍一下现代宇宙线探测器的一种——闪烁体探测器的工作原理。有关探测器更为详细的描述可以参考同期文章《重走宇宙线发现之旅》中对姜堰中学的宇宙线探测器阵列和缪子望远镜的介绍^⑥。

如图5所示,当宇宙线带电粒子进入塑料闪烁体时,会将自己的一部分能量沉积在塑料闪烁体中,塑料闪烁体的原子或分子受激而产生荧光,这些光被光电倍增管收集,经光电效应转换为电子,然后进行千万倍放大。

下面,我们就要将这些真正的“怪盗”给揪出来。

μ 子是宇宙线中含量相当丰富的粒子,速度近乎是真空中光速,而且穿透性极强。但是“怪盗”的本领是有限的,只有部分本领高强的“怪盗”才能穿过层层阻碍,偷走验电器上的电荷。 μ 子也是这样,它仍然会被物体所阻挡,例如水、大气、我们头顶的天花板(图6)等等。所以我们可以通过宇宙线

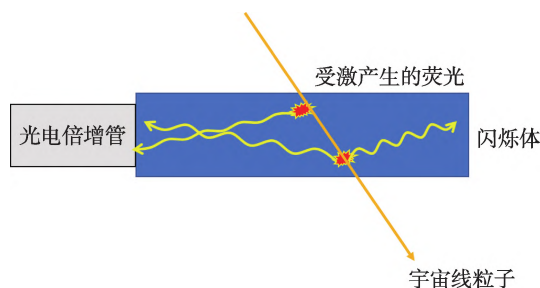


图5 闪烁探测器工作原理

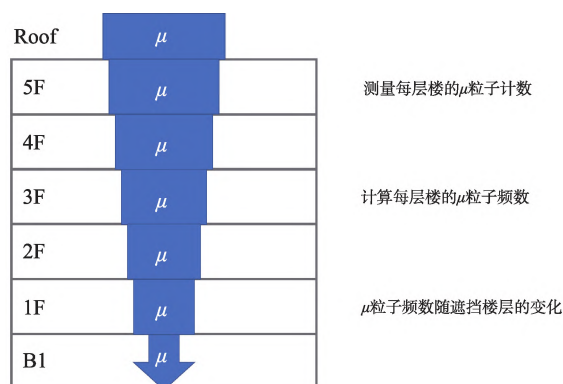


图6 宇宙线会受到物体的阻挡,比如校舍的天花板就会显著地阻挡宇宙线

探测器,看一看我们头顶的天花板对这些“怪盗”有着怎样的阻挡效应。我们可以将探测器放置在校舍的不同楼层,统计单位时间内每层楼的 μ 子计数,进而计算每层楼的 μ 子频数。我们比较不同层数的 μ 子频数,就会发现 μ 子频数会随着天花板累计厚度的增加而减少,说明 μ 子确实是来自于天上。这说明地面中的放射性物质并不是空气电离的主要来源——我们发现了“怪盗”来自于天上。

那么这些“怪盗”来自于天上的何方呢? μ 子是不是来自于天上的某个方向呢?为此我们需要用两块闪烁探测器搭建一个指向性的 μ 子望远镜,来搜索“怪盗”的老巢到底在何方。如图7所示,我们测量不同天顶角 θ 方向的 μ 子流量(“天顶角”是指某方向与当地垂直线间的夹角),如果某个方向 μ 子流

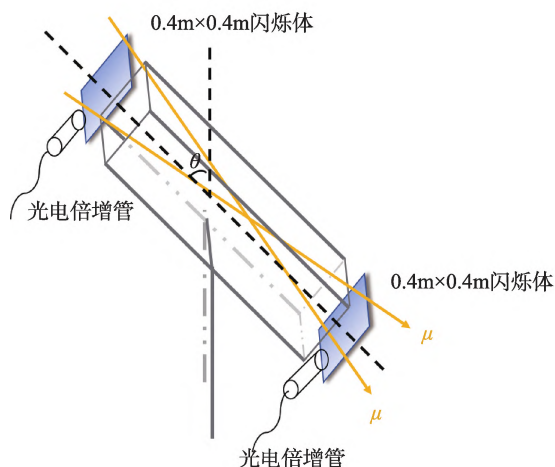


图7 μ 粒子望远镜系统,可以倾斜一定角度 θ ,测量天顶角 θ 方向的宇宙线流量

量多的话,就说明这个方向很有可能是 μ 子的老巢!

我们可以发现 μ 子计数率随着天顶角的增大而减小,所以说 μ 粒子的老巢是正正好地在我们头顶吗?还记得之前密立根在不同海拔的湖水里做的电离速率的实验吗?密里根发现大气和水一样对宇宙线有阻挡效应。大气看似比固体稀薄,但是厚厚的大气层对宇宙线仍然有很强的吸收和散射,从不同天顶角看起来,大气的厚度就完全不一样,如图8所示。事实上,宇宙线各向同性地进入地球大气,与地球大气作用产生我们所探测到的 μ 子, μ 子的入射方向也几乎是各向同性的,但由于入射角度不一样,它们穿过的大气厚度不一样,受到的阻挡效应便不同——这些电荷“怪盗”就一直在天上的各个方向,随时伺机穿过层层阻碍偷走电荷!

四、小结

1. 空气电离除了来自于地表可能存在的放射性物质之外,还来自于宇宙线;
2. 探测器计数率越高,说明单位时间内打在探测器上的宇宙线粒子越多;
3. 宇宙射线会穿过物质,有一部分会被“吸收”和“散射”,计数率会减少;
4. 宇宙射线的计数率会随着天顶角而变化,这个是由于不同天顶角大气厚度不一样,导致宇宙线被“吸收”和“散射”的程度不一样。

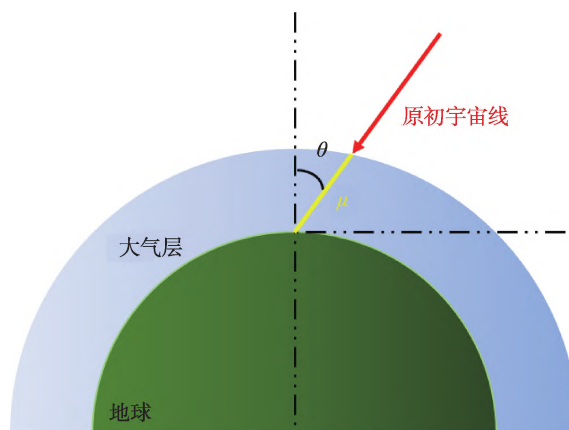


图8 μ 子计数率随着天顶角 θ 变化,事实上是由于不同天顶角下,大气的厚度不一样。那么究竟什么是原初宇宙线呢?

我们会在后面几期慢慢为大家介绍



图9 2012年8月7日奥地利物理学家赫斯(Victor F. Hess)的两个孙子在一块纪念碑前合影,这个纪念碑位于柏林附近的皮埃斯科夫(Pieskow),上面写着:“纪念宇宙射线的发现”。一百年前赫斯乘坐氢气球在皮埃斯科夫附近着陆

参考文献

- ① C.A. de Coulomb, "Troisième mémoire sur l'électricité et le magnétisme," Histoire de l'Académie Royale des Sciences, pages 612-638.
- ② Hörandel J R. Early cosmic-ray work published in German[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2013, 1516 (1): 52-60.
- ③ De Angelis A, Giglietto N, Guerriero L, et al. Domenico Pacini, un pioniere dimenticato dello studio dei raggi cosmici[J]. Il Nuovo Saggiatore, 2008, 24(5/6): 70-74.
- ④ Millikan, Robert Andrews, and G. Harvey Cameron. "High frequency rays of cosmic origin III. Measurements in snow-fed lakes at high altitudes." *Physical Review* 28.5 (1926): 851.
- ⑤ <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1936/hess/facts/>
- ⑥ 刘佳, 重走宇宙线发现之旅. 现代物理知识, 2022, 34(3): 49

科苑快讯

人类会在跑步时自然达到节能速度

科学家报告称,人类在跑步时,不论跑多远,都会自动适应节能的跑步速度。

加拿大安大略省金斯顿女王学院(Queen's University in Kingston)的运动机械科学家杰西卡·赛林格(Jessica Selinger)说,每个人不论跑多远,其跑步速度都是一致的,而不是短跑时快、长跑时先快后慢。虽然我们有意通过锻炼来消耗能量,但是我们很难克制减少能耗的欲望。

赛林格和同事分析了现实生活中4645名慢跑者,发现他们不论跑多远,通常都保持相同的速度。只有跑过10千米后,才会稍微慢下来,这可能是因为疲劳。研究人员还追踪了26名大学生在跑步机上以不同速度跑步时消耗的能量。结果表明,这是一种自然的倾向,最佳速度取决于体重或性别特征,最节能的速度是女性平均2.65米/秒,男性3.35米/秒。但在某些情况下,如参加比赛,你会迫使自己超越能量最佳状态。

不过,赛林格也提到,他们希望扩大调查人群,包括更广泛的年龄范围、健康水平等,以使估计更具代表性。研究人员还计划调查训练和环境条件(如天气)会如何影响一个人的能量最佳跑步速度。从进化的角度来看,以最节能的方式移动很有意义,因为可以用最少的能耗走得更远。

研究结果可能对运动科学家、康复专家、教练和运动医学从业者有实际应用,比如健身追踪器或跑鞋的设计可能因此得到改进。而想要提高跑步速度,听着音乐或与人结伴一起跑是不错的主意。

跑步和各种锻炼除了燃烧卡路里,还有很多好处,如增强肌肉和降低心血管疾病的风险。因此,以你喜欢的、能量最佳的速度跑步是一个很好的选择。

(高凌云编译自2022年4月28日 Popular Science 网站)