

## 宇宙线的百年研究

二十年的大气电离之谜导致了宇宙线的发现,宇宙线的研究打开了粒子物理学的大门,而今天,宇宙线又为银河系外的天体物理学开启了一扇窗口。

在2012年2月出版的 *Physics Today* 杂志上,刊登了瑞典皇家技术学院物理学名誉教授帕尔·卡尔松(Per Carlsson)写的《宇宙线百年》的文章,文中概述了宇宙线发现和各种观测实验导致的粒子物理和宇宙物质的重大发现。

1912年8月7日,奥地利物理学家赫斯进行了他那年的第七次气球飞行,首次飞达海拔5000m以上的高度,让他感到惊讶的是,他的验电器显示,大气电离并没有随着海拔升高而降低,相反,在4500m高空,他测出大气电离是地面的3倍。这是标志宇宙线物理研究起点的重大发现。赫斯本来是要研究1785年库仑遇到的神秘不可见辐射,当年库仑曾发现,一个带电金属球独自放在空气中会逐渐失去电荷,一个世纪后,克鲁克斯也观测到,验电器的电荷丢失率随气压降低而减慢。

在即将迈入20世纪的时候,物理学上有许多重大发现,汤姆孙发现了电子,伦琴发现了X射线,贝可则发现了放射性,X射线和贝可的铀盐的放射性表现出穿透性,能电离空气,居里夫妇发现了新的放射性元素,所有这些都为更好研究空气导电性创造了条件。

在20世纪初期,很多欧洲和北美的物理学家都为大气电离研究做出过重要贡献,最主要的仪器是放在密封容器中的验电器,随着绝缘性能的改进和验电器灵敏度的提高,放电率可以测得很准,威耳逊等人很快发现,电离一定来自密封瓶外,辐射要么是X射线,要么是 $\gamma$ 射线,威耳逊这时还提出,这个辐射也有可能来自地球外,卢瑟福等人在1903年发现,验电器用无放射性金属屏蔽后,电离会减少,因而密封容器中的电离至少有一部分是由于某种穿透性的辐射,当时流传的观点是,这种辐射来自地壳中的放射性物质,并应该随高度增加而减少。

特奥多尔·沃尔夫是供职于荷兰的德国科学家和耶稣会教士,能使验电器放电的穿透辐射让他着了迷,他用两根镀了金属膜的玻璃丝取代传统的金叶片,使验电器的可靠性和灵敏度大大改善,1909年,他用这样的验电器测量离子产生率,能够精确至每秒钟仅一对离子,其后一年巴黎之行,沃尔夫带着他的验电器到了埃菲尔铁塔的顶上,他在300m高的塔顶测量的大气电离率比地面略小,但远大于预期,因为这个高度应该是大约4倍的大气吸收长度,由此,沃尔夫得到的结论是,要么大气的 $\gamma$ 射线吸收长度大于此前的估计值,要么有另外的大气放射源。

在1909—1911年期间,瑞士物理学家艾伯特·格克耳携带一个沃尔夫型验电器做了3次气球飞行,在一次飞行期间,格克耳到了4500m的海拔高度,和沃尔夫一样,他观测到了电离随高度下降——但远没有预期的大,由于格克耳仪器的气压随高度变化了,引起了系统误差,因此他不能下结论,在其他2次低海拔飞行中,格克耳对他的仪器做了气压修正,测量结果显示:电离随海拔高度提高有一些不很显著

的增加,而不是减少!他不得不把相当一部分的大气电离归因于大气中放射性物质产生的 $\gamma$ 射线。

在1910—1914年期间,意大利物理学家多米尼克·帕西尼(Domenico Pacini)的许多实验非常重要,但很少被人提及,他在陆地上、海上和热那亚海湾的水下,用验电器做电离测量,在距离海岸几百米远的浅海湾,帕西尼发现水下3m处的电离率比水面处略低,他的结论是,大气中存在一种穿透性的辐射,但与地壳中的放射性物质无关,因为他单枪匹马开展实验,缺乏资源,甚至没钱参加国际会议,并且他的论文基本都用意大利文写,所以他的工作没能得到应有的重视。

### 维克多·赫斯

赫斯1883年出生于奥地利,1906年在格拉茨大学获得博士学位,赫斯对放射性在大气中的吸收长度数据非常清晰,因此对沃尔夫的结果感到好奇,为改善吸收数据,他还仔细测量了镭辐射的吸收,新测量值与原有数据完全一致,为揭开沃尔夫和格克耳的迷团,赫斯重新设计了沃尔夫型的验电器,在1911—1913年期间,他带着验电器做了10次气球飞行,1912年8月7日的决定性飞行实验揭示:高海拔时电离有显著加强,一个月后,赫斯在德国明斯特的会议上报告了他的结果,并指出:“这次观测结果最容易的解释可能是,假设有穿透能力很强的辐射自上而下进入大气层,并且仍能够在低海拔的密闭容器中产生部分观测到的电离”,正因为他的这个发现,赫斯获得了1936年度的诺贝尔物理学奖,诺贝尔物理学奖委员会指出,赫斯的发现开启了理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——这个发现比发现辐射的粒子性和辐射强度随高度变化更加根本。

重要的新结果必须有独立的验证,科赫斯特也改进了沃尔夫型验电器,在1914年夏天爆发的第一次世界大战之前,他做了5次气球升空试验,最后一次升到了9300m的海拔,在这个高度上测到的电离比地面大了6倍,清楚地验证了赫斯的结果(见图1),他还测出了辐射吸收长度约为1300m,比放射源的 $\gamma$ 辐射吸收长度要大一个量级,因此,是一种穿透能力极强的未知辐射导致了赫斯和科赫斯特独立测量到的大气电离,且该辐射强度非常稳定,没有与昼夜和气候有关的变化。

### 它会是什么?

因为第一次世界大战,宇宙线研究中断了4年,战争岁月和战后时期的民族主义情感使纯科学研究进展缓慢,尽管大多数德国和奥地利以外的物理学家都相信赫斯和科赫斯特战前的结论,但也有一些人不相信,美国的密立根和鲍恩一起用了一个独创的技术,把记录仪器放在无人操作的测声气球上,在德克萨斯上空一次高度达15000m的气球飞行中,他们测到的辐射强度不到赫斯和科赫斯特的四分之一,由于当时不了解这是因为美国德州和中欧的地磁场差异引

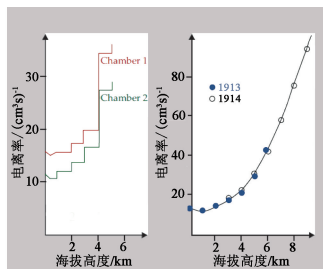


图1 大气电离率随海拔高度的变化函数 (a)由赫斯于1912年8月7日测得;(b)由科赫斯特于1913年测得

起的,他们因此认为辐射强度曲线在高海拔上有转折.密立根认为,根本没有地球之外来的电离辐射,所有穿透性辐射都来自地面.

密立根后来改变了他的看法,他和卡梅隆于1926年在高海拔的加州湖做实验,一个是海拔1500m,另一个是3600m,他们用验电器测量了湖里各种深度处的电离率.结果发现,低海拔湖水下的电离率总是相当于高海拔湖中水深加大2m的电离率,即2m水深辐射吸收与2km空气吸收相当.这使密立根和许多人确信“射线一定来自天上”.当时他认为进入大气层的穿透性辐射是电磁辐射,所以密立根为它取名为“宇宙射线”.在中欧当时已经流行的名字是高海拔辐射或超 $\gamma$ 辐射.

真正了解宇宙线的性质和组分花了很长的时间.一开始人们固执地认为它们是 $\gamma$ 射线.但如果真是,它们就不会受地球磁场的影响.1927年,克莱用离子室显示出宇宙线强度在海上行程中表现出很显著的纬度效应,表明至少有一部分的辐射是带电粒子.密立根又争辩说没有纬度效应.康普顿支持粒子说观点.两位巨人之间的争论持续了一段时间.1932年,康普顿数次运行测量纬度效应.他的结果清楚地表明纬度效应的存在,而且对低能宇宙线的效应更大.1933年,密立根在飞机上做过实验后,最终承认纬度效应.

### 他们肯定是粒子!

早在1927年,前苏联的斯科别利岑就获得过一张云雾室的照片,上面显示有一条宇宙线的径迹.随后的一年,宇宙线研究有一次突破:盖革和米勒发明了一种充气的离子探测器管,能记录单个带电粒子.1929年,科斯特和玻特把2支盖革管上下放置,去记录宇宙线的相符事例.在两管之间放置一个4cm厚的金块,使相符率有一点降低,说明宇宙线中包含带电粒子,其能量远高于产生 $\gamma$ 射线的康普顿电子.

1930年,罗西开发了电子相符电路,极大地改进了相符时间的测量精度.1932年,他发现在穿过了25cm铅板的宇宙线中,有60%还能穿过1m厚的铅层.显然,宇宙线不仅含有能被几个毫米铅吸收掉的软成分,还包含有能量超过1GeV的硬带电粒子成分!考虑到地球磁场能偏转入射的带电粒子,如果宇宙线带负电荷,东边来的粒子就比西边来的多,反之亦然.1933年,罗西和其他人一起证明了东西效应,并显示宇宙线主要以正电荷为主.

入射大气层的宇宙线带正电荷,人们不得不问它们是否是质子、原子核还是刚发现的正电子.1940年,歇恩及其芝加哥大学合作者用盖革管和铅吸收体做了气球飞行实验.在

海拔20km的高空,来自大气层外的原初宇宙线占主导.歇恩发现,高能粒子穿过了铅吸收体时没有产生预计的低能电子的簇射.如果是高能电子或正电子,应该出现簇射.由此推断,原初宇宙线主要是质子.

### 新粒子:1932—1953

1911年发明的威尔森云雾室在后来的20多年里得到了极大的改进,能记录原初宇宙线产生次级粒子簇射后单个带电粒子的径迹.在30年代时有两个改进:一是灵敏探测的触发,使记录与带电粒子的穿越时间一致;二是将云雾室置于磁场,以测量带电粒子的电荷和动量.1932年,安德森用置于磁场中的云雾室发现了可能来自宇宙线簇射的正电子(见图2).这是对反物质世界的首次惊鸿一瞥,使安德森与赫斯分享了1936年度的诺贝尔物理学奖.

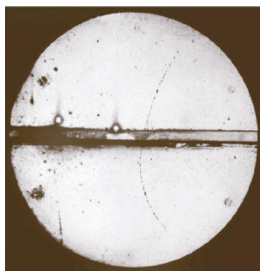


图2 一张有历史意义的云雾室照片,由卡尔·安德森1932年拍摄.照片显示一个可能来自于宇宙线簇射的正电荷粒子,从上面进入,被云雾室的横向磁场打弯,最后在铅板中丢失了能量.这是首次看到保罗·狄拉克1928年预言的正电子

也是在1936年,安德森和他的学生尼德美尔用1cm厚的铅板以测量宇宙线能损,用云雾室揭示出一种新型带电粒子—— $\mu$ 子,其在铅板中的能损比电子少得多.他们估计出粒子的质量介于电子的和质子之间.几年前汤川秀树曾猜测,在此质量区间存在一个新的粒子,以传递原子核内的强相互作用.预期的质量在100MeV量级,并与短程的核力有关.汤川觉得这个新发现可能是他预言的粒子.但是, $\mu$ 子的寿命约为 $2\mu\text{s}$ ,是强作用汤川粒子的百倍.能穿越1m厚的铅块,说明它和物质的相互作用太过于微弱.这个 $\mu$ 子是一个像电子那样有弱作用的带电轻子——不过质量比电子重了200倍.

在第二次世界大战即将结束之际,叠放成像乳胶的核乳胶探测技术发展到了很高的灵敏度.人们把一叠叠乳胶放在高海拔宇宙线簇射里曝光,获得了许多重要结果.1947年,鲍威尔和他的伙伴将其放在玻利维亚5.5km高山上曝光,发现了汤川介子,即现在的 $\pi$ 介子.每个 $\pi$ 介子可衰变成了一个 $\mu$ 子和看不见的中微子.如果 $\pi$ 介子在衰变前是停下来的,两体衰变会产生一个单能 $\mu$ 子能谱.鲍威尔和他的伙伴发现,在11个衰变事例中,每一个都在乳胶里产生一个0.6mm长的径迹.鲍威尔因“他发展的用以研究核过程的成像方法和由此做出有关介子的发现”而荣获1950年的诺贝尔物理学奖.为强调 $\pi$ 介子、 $\mu$ 子和正电子的发现过程中宇宙线的中心作用,他选择“宇宙辐射”作为他获得诺贝尔奖的讲演题目.后来,带电 $\pi$ 介子的寿命被确定为大约10ns.

在1947年,宇宙线簇射里的磁云雾室曝光发现了第一个可衰变成2个带电粒子的中性粒子.罗彻斯特和巴特勒报告了由中性K介子到2个带电 $\pi$ 介子的衰变.在法国的云雾室也记录到了由中性粒子到质子和负电 $\pi$ 介子的衰变.该中性粒子是核子的第一个“奇异”亲戚—— $\Lambda$ 超子.1948年,

鲍威尔还在乳胶室中找到一个可衰变成 3 个带电  $\pi$  介子的案例——那是  $K^+$  介子。与  $\pi$  介子和谬子相似, 这些新粒子都是宇宙线原初质子与大气相互作用簇射中的产物。

1947 年, 在 30km 高空的一次气球实验揭示出, 除了含有质子外, 宇宙线中还有一些完全被剥离了的重核。现在我们知道, 原初宇宙线流量包含 87% 的质子, 11% 的氦核和 2% 的重核。宇宙线的核丰度与太阳系的成分很相似, 但又有显著的不同。在太阳系中, 几乎没有的弱束缚轻核元素——锂、铍和硼——在宇宙线中的丰度要高出几个数量级。宇宙线中的碳核和氧核与星际氢原子碰撞, 产生了这些轻核。宇宙线中有几个百分点的 Be 核是寿命长但不稳定的同位素  $^{10}\text{Be}$ , 半衰期为 150 万年。根据  $^{10}\text{Be}$  的丰度和星系际氢原子密度, 可以推断  $^{10}\text{Be}$  在宇宙中的平均旅行时间大约是 500 万年。

### 反物质和反物质世界

在 1955 年美国伯克利 Bevatron 加速器上发现了反质子之后, 阿瓦雷兹开启了宇宙反物质的搜寻。直到 1979 年, 寻找宇宙线反质子的的工作仍然是一无所获。正电子和反质子是银河系内宇宙线核子与星际氢及氦发生高能碰撞产生的, 不过产出率非常小。到现在为止, 各种气球和卫星探测器总共已探测到了大约 10000 个宇宙线反质子。直到 200GeV 的能谱测量结果都没有发现任何奇异“反物质世界”的迹象。更重的反核则一个也没有看到, 反氦与氦的流强比上限是  $10^{-7}$  的量级。

令人吃惊的反物质探测是 2009 年空间 PAMELA 卫星的谱仪记录的宇宙线正电子流强数据。如果宇宙线正电子产生于星际已知的粒子碰撞, 那么正电子和电子的比率应该随正电子能量增加而缓慢减小。然而, PAMELA 发现该比率在 5GeV 到 100GeV 之间随能量增加而增加! 这个始料未及的增长现在已被 NASA 的 Fermi 卫星证实, 并把能区推广到了 200GeV(见图 3(a))。这个增长的正电子超出可能来自于高能恒星类来源, 比如脉冲星, 或者某种未知的暗物质粒子湮灭。

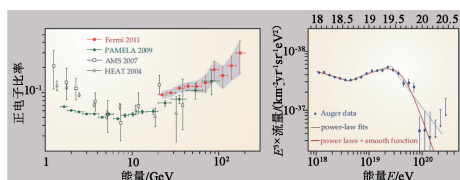


图 3 宇宙线最新结果 (a) PAMELA 和 Fermi 卫星能谱仪测到的正电子比率在 10—200GeV 能区令人惊讶地持续上升; (b) 由 Pierre Auger 观测站测量到的  $10^{18}$  eV 能量以上宇宙线能谱, 在  $3 \times 10^{19}$  eV 附近的陡降可能是预计的 Greisen—Zatsepin—Kuzmin (GZK) 截断。曲线和直线是对数据的不同拟合

### 测量能谱

自 1932 年起, 布莱克特和奥基亚利尼就试图把可触发

的云雾室放在磁场中测量宇宙线的能谱。他们第一次看到了 1GeV 到 20GeV 能谱以  $E^{-2}$  的幂率下降。能量足够大的宇宙线粒子进入到大气层之后, 簇射形成的次级粒子可以在一大块地面上测到。这种“广延大气簇射”是罗西在 1933 年首先测到的。后来, Pierre Auger 及其合作者做了十多年的系统研究, 利用盖米管记录了在地面上间距长达 300m 的相符事件, 然后根据簇射面积和粒子密度估计出, 一个簇射可以产生超过百万的次级粒子, 即原初粒子能量高达  $10^{15}$  eV。观测到的簇射延展区看来比  $\gamma$  射线和正负电子的电磁级联所预期的要宽。广延横向展宽最后被理解成核碰撞产生的  $\pi$  介子。在平方公里面积上布设数百个闪烁体探测器, 构成了很多簇射探测器阵列。用这种阵列探测到甚高能的原初宇宙线能谱是以  $E^{-2.7}$  的幂率下降。

现在能够观测的原初宇宙线能量已到了几个  $10^{20}$  eV。但这样的事例极其罕见, 在一个平方公里的阵列上预计每世纪仅能看到一个。2008 年, 在阿根廷建成的 Pierre Auger 宇宙线观测站, 在  $3000\text{km}^2$  范围内布有 1600 个探测器的阵列, 目的就是详细研究最高能量宇宙线的成分、起源和能谱。

1966 年, 格雷森、查才品和库兹兹独立推断, 超过  $3 \times 10^{19}$  eV 能量阈值的宇宙线质子会与微波背景低能光子 (2.7K) 相互作用, 产生  $\pi$  介子, 从而损失能量。因此, 他们预言宇宙线在这个能量阈值左右表现出突然的下折, 即所谓的 GZK 截断。Auger 观测到的  $3 \times 10^{19}$  eV 附近的能谱下降, 和预言的 GZK 截断非常像(见图 3(b))。但最高能量的宇宙线可能主要是铁核而不是质子, 那个截断能量也许是光核裂变的能量阈值。当然, 那个突然下降也可能体现某类银河系外宇宙线源的加速极限。

赫斯发现宇宙线以来的 100 年, 进展非凡。从太阳系外来到地球的高能粒子流不仅包含了带电的粒子, 也包含了  $\gamma$  射线和中微子。现如今, 在卫星和气球上搭载的大型探测器已经遨游太空了。去年 5 月, 国际空间站上的 AMS-02 宇宙线谱仪在空间加入了 PAMELA 和 Fermi 仪器的行列。在地面实验中, 大气簇射荧光探测器望远镜阵列 TA, 南极深海的冰立方中微子探测器, 还有法国海边水下的中微子望远镜, 都加入了 Auger 观测站联合观测的行列。所有这些设备都想回答: 最高能宇宙线的银河系外源是什么? 什么机制点燃了  $\gamma$  暴? 宇宙线能说明非重子暗物质粒子的什么性质? 在未来的数十年里, 宇宙线研究非常可能在粒子物理微观世界直至整个宇宙带给我们新的重要发现。

(中国科学院高能物理研究所 胡红波、中国科学院国家天文台 韩金林 编译自 Per Carlson, *Physics Today*, 2012, (2): 30, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)