

# 宇宙线电荷正负问题

侯超 董绪强

(中国科学院高能物理研究所 100049)



通过前几期的宇宙线发现之旅,我们已经知道了原初宇宙线是来自外太空的高能粒子,它们从宇宙深处以接近光速的速度朝我们飞来,各个方向都有。绝大多数是带电粒子,包含太阳宇宙线(能量<100 GeV),银河系宇宙线(100 GeV~100 PeV)和能量大于100 PeV来自银河系以外的极高能宇宙线。原初宇宙线粒子到达海拔高度约30 km的时候开始与地球大气发生相互作用,产生广延大气簇射。因此,我们在地面上探测到的是次级宇宙线粒子,主要有伽马光子、电子、缪子等。我们用什么方法来判断这些原初宇宙线电荷的正负呢?它们的成分又是怎样的呢?这正是本期我们要探索的问题。

## 一、如何判断粒子带正电还是负电

首先我们回顾一下判断粒子带正电还是负电都有哪些方法。在高中物理课本上我们曾学到过,带电粒子在电场和磁场中受到力的作用,运动轨迹会发生偏转。在静电场中,带电粒子受到电场力的影响,  $\vec{F} = q\vec{E}$ , 当带电粒子垂直电场线运动的时候,正电荷向电场线方向偏转,负电荷则相反。同样在

磁场中运动的带电粒子会受到洛伦兹力的影响,  $\vec{F} = q\vec{B} \times \vec{v}$ , 力的方向垂直于运动方向,这种力可以让带电粒子的运动轨迹发生偏转。我们可以利用左手定则去判断电荷所受洛伦兹力的方向,如图1。

对于负电荷,其受力方向与之相反。图2(a)显示的是一支阴极射线管,内部充满了荧光粉,电子通过时使荧光粉受激发光就可以看到电子的轨迹了。射线管的左侧阴极发出热电子,右侧阳极加高电压,则电子从阴极飞向阳极。这时候将磁铁靠近阴极射线管,可以看到电子的轨迹发生了偏转,如图2(b)所示,偏转方向与磁铁磁极的放置方向相关。老式电视机里面的阴极射线管就是利用的这

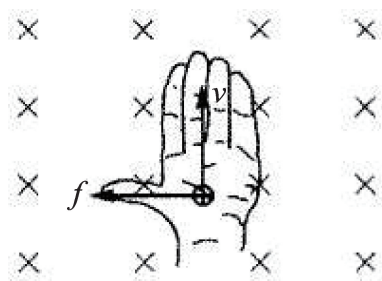
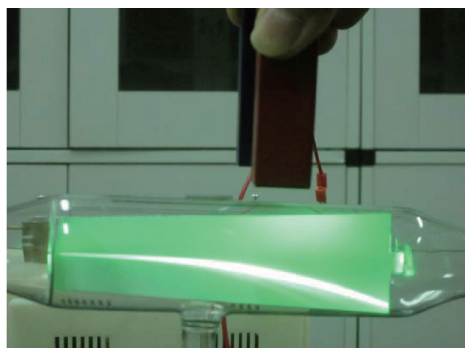


图1 用左手定则判断带电粒子受洛伦兹力方向的示意图



(a)



(b)

图2 阴极射线管(a),阴极射线管中电子的轨迹(b)(图片来自网络)

个原理,通过加入特定变化的电磁场,使电子有规律地打在屏幕上,屏幕在接收到电子后,就会发出荧光,也就变成了我们看到的电视画面。

对于高能带电粒子,速度接近光速,要看到明显的偏转,则需要强电场或强磁场,抑或长距离偏转。由于长距离和强电场不容易实现,对于强电场目前能做到的最高电场强度  $1 \text{ MV/m}$ ,且当带电粒子在强电场中容易发生空气击穿效应。因此,我们通常用外加强磁场的径迹室等探测装置实现对高能带电粒子偏转的测量。粒子电荷数( $Z$ )可通过粒子偏转半径( $\rho$ )和动量( $p$ )给出。其关系式为  $Z=p/(0.3B\rho)$ ,这里  $B$  为磁感应强度,是已知的。下面举例子:

通过给云雾室附加磁场,世界上第一个反物质——正电子就被发现了。云雾室中充满过饱和水蒸气或酒精,当带电粒子穿过时产生离子,蒸汽会在离子周围凝聚成液滴显示带电粒子的轨迹,这与高空飞机留下的尾迹是相同的道理。1932年8月2日,美国加州理工学院的安德森利用加了磁场的云雾室观测到了和电子轨迹相似但方向相反的粒子,通过计算最后得知此粒子和电子质量相等,电荷相反,符合狄拉克对反电子的预言,认为其为电子的反粒子,也就是正电子<sup>[1]</sup>。图3是非常著名的一张照片,显示了一个正电子在带有磁场的云雾室中从下往上穿过铅板后部分能量被吸收,径迹的弯转曲

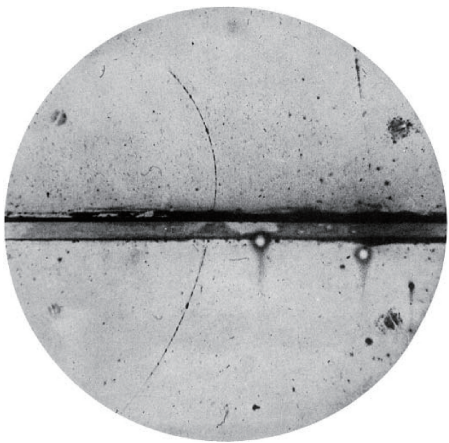


图3 1933年安德森拍摄的一张正电子在有附加磁场和铅板的云雾室里径迹的照片<sup>[1]</sup>

率半径变小的过程。

位于中国科学院高能物理研究所的北京正负电子对撞机上的北京谱仪探测器(图4),通过在探测器上加强磁场,测量正负电子对撞后产生的带电粒子在径迹室里的偏转方向和半径大小,从而判断粒子的电荷正负以及电荷量(图5)。

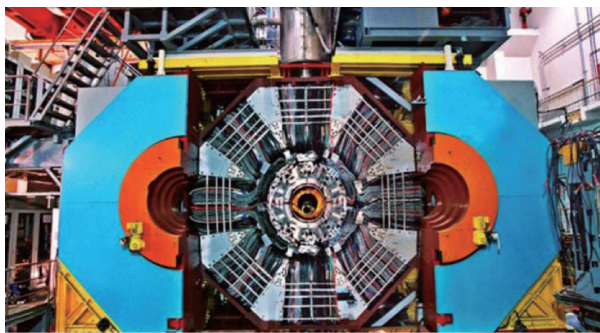


图4 北京正负电子对撞机上的北京谱仪探测器截面照片 (图片来自网络)

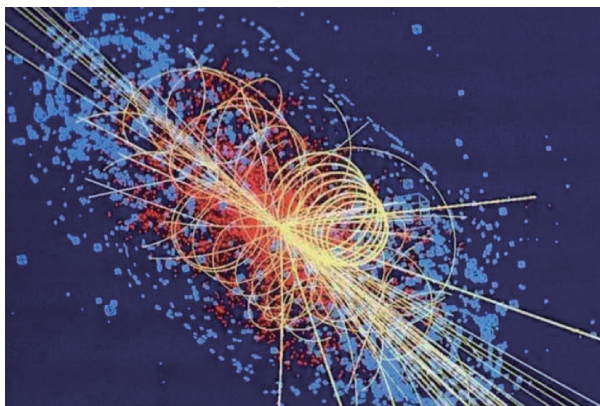


图5 正负电子对撞后产生的带电粒子在探测器径迹室里的径迹(黄)(图片来自网络)

我们知道地球是有磁场的,在宇宙线穿过地球磁场到达地面的时候,会因为地球磁场的作用发生偏转,偏转的角度与其能量成反比。在地面上我们只能探测到次级宇宙线粒子,下面我们一起来探索如何通过实验判断原初宇宙线是带正电还是负电。

## 二、探索原初宇宙线带电的正负

### 1. 地球磁场

带不同电荷的粒子在天然地球磁场中会如何偏转呢?这与地球磁场的分布和强度有关,我们先

来看看地球的磁场是怎样的。

地球磁场源自地球内部延至太空。主要由基本磁场和外源磁场组成。基本磁场占主要部分(99%),由地核内熔融铁热对流形成电流而产生磁场,地表的磁场近似于一个磁偶极子如图6(a)所示。外源磁场主要在大气层以上,在太阳风的影响下变形。如图6(b)所示,面向太阳的一面磁场分布空间被压缩,另一面则被拉长,近似苍蝇的形状。地磁场几十万年会发生一次地磁逆转,南北极位置互换。场强大小:0.25~0.65 G,从两极至赤道逐渐减弱。地磁倾角:  $-90^{\circ}$ (上)和  $90^{\circ}$ (下)之间,在北半球向下倾,在磁南极指向正下方,并随纬度下降而逐渐向上,至“地磁赤道”处完全与地表平行( $0^{\circ}$ )。往南,倾角继续向上,直到磁北极处指向正上方。地球磁场尺度约10至200个地球半径,而大气层厚度只有约1/6个地球半径,地球磁场的厚度远远大于大气层的厚度。地磁场能够使大部分太阳风偏转方向,保护地球大气层免受太阳风中的带电粒子的剥离,生物体不会受到紫外线的侵害。

## 2. 早期宇宙线电荷正负的测量——“东西效应”

原初带电的宇宙线粒子到达地球外部的广袤空间,在与大气碰撞前就受到了地球磁场的影响而发生偏转,这样会产生一个被称为“东西效应”的现象<sup>[2,3]</sup>,即宇宙线粒子来自西面的比来自东面的多。

因此到达地面的次级宇宙线粒子也相应表现出“东西效应”来。当然,由于不同纬度的磁场强度的不同,对宇宙线粒子的屏蔽作用也不一样,因此也有相应的“纬度效应”。本文只关注“东西效应”。

关于“东西效应”的发现,历史上有一些有意思的故事。

1903年,挪威地球物理学家斯托末在解释极光产生的原因时,研究了从远处投射到地球磁场中的带电粒子的运动轨迹。利用地球磁场的偶极分布模型,及带电粒子在磁场中动量和角动量守恒,通过洛伦兹方程推导,他得到在地球周围不同区域,刚刚能够进入的粒子的方向和动量是不一样的,即对不同方向入射的宇宙线的截止动量是不同的。这种现象对于正负电荷有相反的规律<sup>[2]</sup>。

1930年,布鲁诺·罗西听说了斯托末的宇宙线粒子在磁场中运动的理论后,于1930年7月3日,向 *Physical Review* 寄了一封信预测了一种不对称的现象——东西效应。由于地磁场的存在,当带正电的宇宙线经过磁场时就会受磁场偏转,不同方向来的粒子的截止刚度不一样,来自东边的截止动量比西边的高,所以东边有更多的宇宙线无法到达地面<sup>[2]</sup>,对于带负电的宇宙线,结果正相反。因此可以通过东西效应揭示宇宙线粒子的电荷性。罗西预测宇宙射线的到达方向应该存在东西不对称性,来自哪个方向的多取决于它们的电荷符号,这种效应在赤道附近应该更为明显。

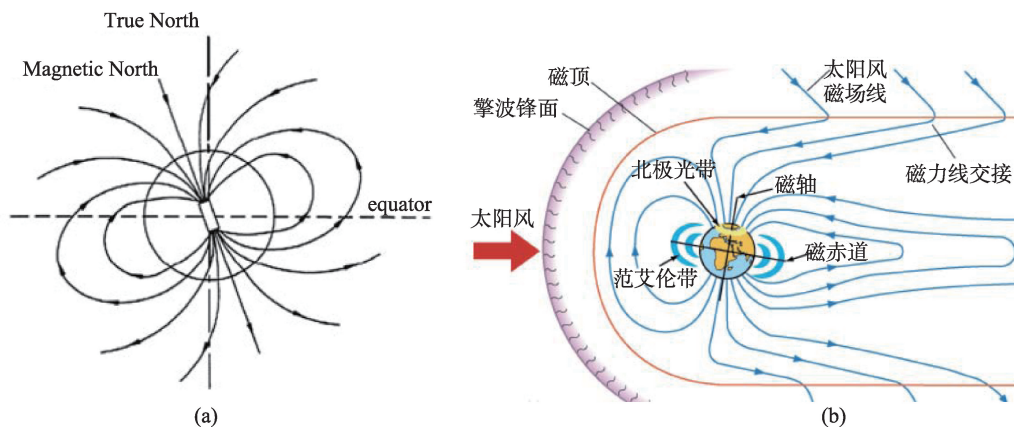


图6 地球磁场磁偶极简化示意图(a),地球磁场实际的分布结构示意图(b)(图片来自网络)

罗西设计了一个实验用于测量宇宙线的东西效应。他使用电子真空管记录来自盖革计数器的同步脉冲。他将三个探测器分别按照图7的方式水平放置,编号0、1和2号探测器。1和2号探测器中心连线是正东西方向。宇宙线粒子穿过0和1号探测器时(从西边来的宇宙线粒子),或者0和2号探测器(从东边来的宇宙线粒子)时才可以产生计数,这叫做“宇宙线望远镜”。因此,罗西的宇宙线望远镜可测量从东方和西方倾斜穿过的宇宙线粒子,并对两个方向的计数进行比较。

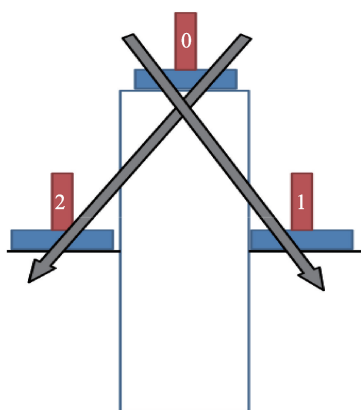


图7 罗西设计的宇宙线望远镜示意图

1930年罗西在佛罗伦萨(北纬43.7度)附近的Arcetri物理研究所做了实验,没有看到明显的东西效应。

之后,多位实验物理学家在不同地点多次进行了东西效应实验测量。

约翰逊和斯特里特于1933年在华盛顿山上做了实验,坐标为55°N,海拔1920 m,发现东西分布基本对称。

1933年秋,罗西与贝内代蒂合作,在阿斯马拉附近的厄立特里亚,地磁纬度较低(北纬13度),海拔较高,为测量提供了很好的条件,这一次显示出明显的东西效应。这表明测量到的次级宇宙线粒子主要是由带正电的原初宇宙线与大气碰撞产生的。

1933年4月,约翰逊利用莱迈特雷和瓦利亚塔的计算并根据康普顿的强度测量估计赤道和34°之间的地磁纬度范围内可以检测到东西效应。

路易斯·阿尔瓦雷斯和康普顿也对莱迈特雷和瓦利亚塔的计算感兴趣,他们在墨西哥进行了一系列的测量,结果表明,在天顶角30°和65°之间的角度上,西方强度大于东方强度,东西效应在45°左右达到最大值。他们的论文相继发表在同一期的“物理评论”中。根据后来越来越多的测量得到这种差异在赤道地区是最明显的,海平面东西差异约15%。在较高的海拔差异更大。较大纬度的不对称性降低,在50°N,这只有2%或3%。

通过上面介绍的宇宙线东西效应发现的历史,我们做一个简单的总结。在某一固定天顶角下,不同方向测量粒子通量,南面的通量等于北面,西面高于东面。东西效应可以用地磁截止动量随入射角的变化来解释。在赤道,东面来的粒子截止动量60 GeV,西面是10 GeV,东面来的宇宙线粒子有较大一部分被阻挡在了地球外面。

东西效应与地磁纬度 $\lambda$ ,海拔高度 $h$ 和天顶角 $\theta$ 有关。纬度越大,则东西效应越小,海拔高度越大则东西效应越大。天顶角越大东西效应越大,但在大天顶角下( $\theta > 60$ 度),由于大气已经很厚了,造成不对称性的低能粒子被大气吸收,地面上观测到的东西效应就不明显了。

2022年6月在北京(北纬40度),我们利用前面介绍过的校园宇宙线项目的缪子望远镜系统(如图8)进行了东西效应的测试。系统放置在四周无建筑物遮挡的位置,防止某个方向的次级宇宙线粒子被吸收,影响测量结果的正确性。望远镜轴分别对着东西方向 $30.0 \pm 0.1$ 度。两个方向分别测量了次级宇宙线粒子的事例率。由于北京海拔接近海平面,宇宙线次级粒子中的电子等被大气吸收,而缪子的穿透能力强会到达地面,因此测量到的大部分是缪子信号。信号脉冲幅值100 mV左右(通过调整高压),电子学阈值设置在10~15 mV,以保证较好的信噪比。根据测量结果,利用公式(1)计算东西方向事例率的不对称性。

$$\epsilon = \frac{R_W(\theta) - R_E(\theta)}{1/2[R_W(\theta) + R_E(\theta)]} \quad (1)$$



图8 缪子望远镜系统照片

每次测量事例数不小于1万,统计误差小于1%;在东西30°方向进行了两次测量得到 $\epsilon=(3.2\pm 1.4)\%$ 。

### 3. 地月磁谱仪-月影的偏移

我们知道月亮阴影是宇宙线在穿过星际空间向地球传播的过程中,由于月球的遮挡使得在月亮方向的宇宙线出现缺失而形成的。宇宙线大部分是带电粒子,所以其从月球传到地球过程中会受到地磁场的作用而偏转,相应月亮阴影的位置也会偏移,偏移量与带电粒子的能量成反比,正负粒子偏转的方向相反。如果宇宙线带正电荷,根据左手定则判断宇宙线向东偏转,反推出月影向西偏移,反之则向东偏移。地面宇宙线阵列实验观测结果显示宇宙线月亮阴影向西偏移,随着能量的增加,月

亮阴影向西的偏移越来越小。因此我们得出结论,宇宙线是带正电的。

### 4. 背着探测器到大气层顶部直接测量宇宙线电荷及成分

前面介绍的两种方法都是通过在地面测量次级宇宙线粒子推测原初宇宙线带电的正负,称为间接测量。随着科技的进步,人类将探测器搭载气球、卫星和空间站飞到大气层上部或大气层外直接测量原初宇宙线。载荷上有多种探测器,如径迹探测器,飞行时间探测器,环成像切伦科夫探测器,量能器等,通过符合测量可直接获取原初宇宙线粒子的电荷和成分信息。

气球运载的“宇宙线能量和质量(CREAM)”实验(图9)在南极上空飞行了六次161天,平均高度~38.5千米,通过测量宇宙线核子的元素光谱,测定了 $Z=1\sim 26$ 宇宙线原子核成分,覆盖能量范围从10 GeV到100 TeV。

阿尔法磁谱仪, Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02)于2011年5月发射升空,国际空间站轨道高度400 km。其搭载的磁谱仪可以有效区分电荷的正负,通过多种探测器符合测量,可以实现原初宇宙线能谱与成分丰度的精确测量。

2015年12月我国发射的暗物质粒子探测卫星(DAMPE),通过多种探测器符合测量的手段测量了入射粒子的电荷、方向和精确能量信息,探测电子

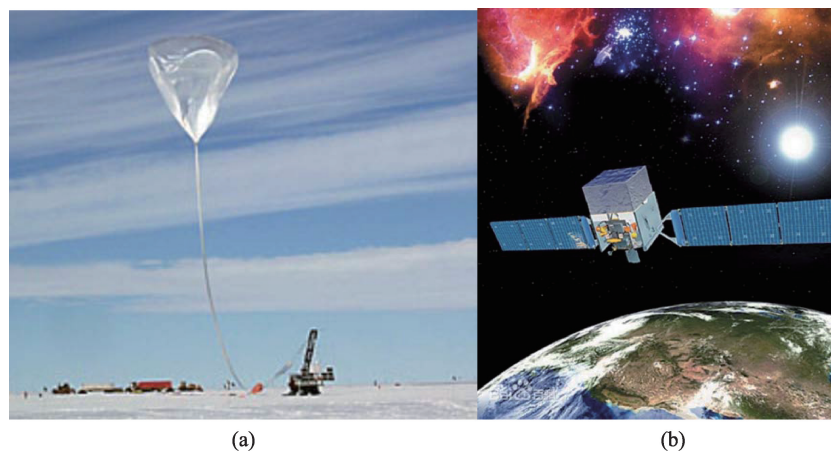


图9 CREAM实验照片(a)和DAMPE实验图片(b)(来自网络)

和光子的能量最高可达 10 TeV。

### 三、原初宇宙线的成分

在大气层顶部,已测量到宇宙线粒子中含量最多的是质子,其次是氦核,还有少量重核,三者比例大约是 9:1:0.1,这些原子核构成宇宙线成分的 99%。另有约 1%的电子, $\gamma$ 光子和超高能中微子只

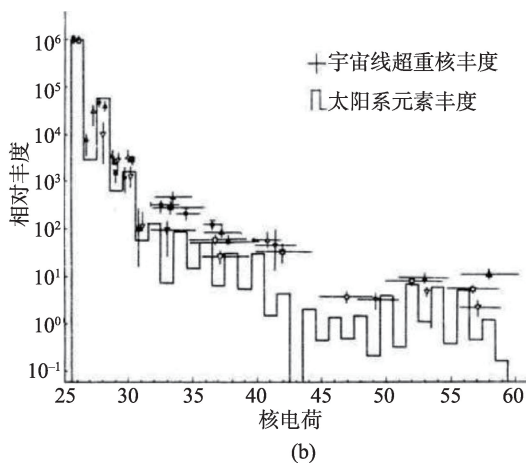
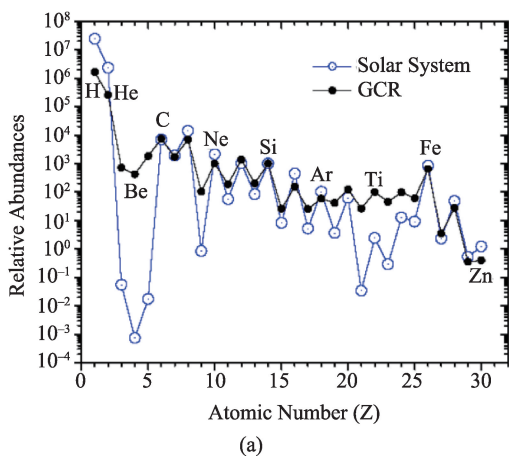


图 10 宇宙线原子核丰度测量结果,1~30 号元素(a),超重核丰度(b)(来自网络)

### 四、小结

通过前面系列对宇宙线的探索,我们现在对宇宙线有了一定的认识。宇宙线能量从 GeV 到超过 100 EeV,分为太阳宇宙线,银河宇宙线及银河系外的极高能宇宙线。银河宇宙线成分主要有质子、 $\alpha$ 粒子、电子和中微子以及高能 $\gamma$ 射线。这些我们称为原初宇宙线,他们从宇宙深处以接近光速的速度朝我们飞来,各个方向都有。原初宇宙线粒子到达地球大气层,与地球大气粒子相互作用,产生广延大气簇射,我们在地面上观测到的是次级宇宙线粒子,主要有伽马光子,电子,缪子等。

本文,我们通过对 100 多年前斯托末预言的宇宙线“东西效应”的观测,有效证明了宇宙线的带电性——宇宙线主要是由正电荷组成。当然,这只是间接得到宇宙线的带电性的信息,对我们理解宇宙线的带电性还不够直观,直观一点的方法是把利用不同电荷在磁场中偏转方向不同而制造出的磁谱

占极小的一部分。

宇宙线是来自宇宙中的物质样本,其成分与太阳系类似。图 10 显示了宇宙线元素丰度的测量结果。可看到宇宙线的某些元素比太阳系的丰度高(Li、Be、B、Ti、V、Cr、Mn),它们可能是在宇宙线传播过程中由重核(C、O、Fe)与星际介质碰撞碎裂产生的。高能宇宙线来源目前是个谜。

仪放在太空中,就像阿尔法磁谱仪一样,通过直接测量宇宙线在磁场中的偏转方向去确定宇宙线的带电性。

至此,宇宙线发现之旅告一段落,让我们一起来探索宇宙线的未解之谜,揭开银河系高能宇宙线的起源、加速和传播机制的答案!

### 参考文献

- [1] Mario Bertolotti, 《Celestial Messengers: Cosmic Rays - The Story of a Scientific Adventure》
- [2] C. Stormer, Astrophysics 1, 237 (1930)
- [3] D. F. SMART, M. A. SHEA and E. O. FLÜCKIGER (2000), MAGNETOSPHERIC MODELS AND TRAJECTORY COMPUTATIONS
- [4] On Compton's Latitude Effect of Cosmic Radiation. G. LEMAITRE AND M. S. (1932)
- [5] 吕洪魁,宇宙线粒子运动速度的测量,《现代物理知识》,2022 年第 5 期 54-58 页