

宇宙线是从哪里来的

——太阳是否为宇宙线源



武莎 南云程

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1912年奥地利物理学家维克托·赫斯通过高空气球实验证明了地球之外存在一种穿透能力很强的辐射,这些辐射自上而下进入大气层并与大气发生相互作用使大气发生电离。在这些辐射被发现之后,人们本能地开始思考这些地球以外的辐射是谁发出的。首先想到的自然是太阳。太阳是距离我们最近的恒星,它的质量在整个太阳系中占比高达99.8%,并无时无刻地将自身质量或能量通过辐射或发射粒子的方式向外输送。那有没有一种可能性,赫斯在地球上发现的这种穿透能力很强的辐射就是来源于我们熟悉的太阳呢?时间回到1912年,让我们跟着赫斯开启高空气球之旅,一起来探索这些辐射是否来自太阳。

一. 1912年高空气球之旅

在1911~1913年间,赫斯将验电器架设在气球上(图1),进行了10次飞行实验,测量空气电离度随海拔高度的变化。他发现一开始电离度随着海拔



(a)



(b)

图1 (a)1912年赫斯气球实验;(b)赫斯的验电器

高度升高而降低,继而急剧上升。最关键的一次飞行来自1912年4月17日。赫斯在几近日全食期间将气球上升到1900~2750米的高空,发现大气的电离在日全食期间并未减少。在接下来的飞行中也未发现白天和夜晚大气电离度有明显的差别。因此,赫斯断定使大气发生电离辐射的不是来自于地球之外的太阳——它必须来自更远的宇宙^①。1925年这种辐射被命名为宇宙线。赫斯因为这个发现获得了1936年度的诺贝尔物理学奖。

二. 2022年地面“玩具”探秘

比起飞向高空,我们更希望能简单地坐在地面上就测量到赫斯发现的宇宙线。于是我们做了一套叫作地面宇宙线探测器阵列的“玩具”。这个“玩具”由5台塑料闪烁体探测器组成,可以放在地面或者屋顶,用于探测宇宙线中的次级粒子。每台探测器的探测原理以及阵列的布局示意图可以从《重走宇宙线发现之旅》一文中看到^②。这个阵列的一部分真实数据已经开放给对宇宙线感兴趣的人。我们将共同坐在家重走宇宙线的发现之旅,探索“宇宙线的太阳起源”之谜。

1. “玩具”的使用指南

数据获取:重走宇宙线发现之旅的数据以EXCEL的格式保存,可以直接从网上下载(<https://github.com/nanyc2022/Revisit-the-cosmic-ray-journey>)。

数据信息:主要包括直接观测到的次级宇宙线和经过几何重建后得到的原初宇宙线。具体观测

量及含义如下:

次级宇宙线:

N_{hit} :“同时”测量到次级宇宙线的探测器个数。

t_0-t_4 :0-4号探测器中每台探测器测量到次级宇宙线的时间。

(X,Y) :0-4号探测器中每台探测器在地平笛卡尔坐标系下的位置。

原初宇宙线:

$Time$:原初宇宙线的观测时间。

(θ,φ) :原初宇宙线在地平球坐标系下的方向,依次是天顶角,方位角。

dt :测量到相邻两个原初宇宙线的时间差。

新手入门:任务一是重建出原初宇宙线方向。地面探测器阵列接收到的是原初宇宙线在大气层内经过级联簇射后的次级粒子(图2(a)),经过广延大气簇射过程的次级粒子基本分布在一很薄的圆盘上,这个圆盘在中心附近可以近似为一个平面。如果求解出这个平面的法向量也就知道了原初宇宙线的方向,我们把这个过程叫作原初宇宙线方向重建。根据探测器的着火时间和位置信息(图2(b)),可以对应找到平面上的“点”,计算出原初宇宙线的方向。

任务二是了解并计算宇宙线事例率。在观测宇宙线时,由于人为设置的观测时长不同测量到的宇宙线数量可能不同。因此使用单位时间内观测

到的宇宙线个数,即事例率来描述探测到宇宙线的真实情况。根据统计学原理,相邻2个原初宇宙线的时间差 dt 满足指数分布,其函数表达式为:

$$f(dt) = Ae^{-Rdt} \quad (1)$$

其中 t 是时间, R 即为事例率。在数据中统计不同时间差 dt 下的宇宙线个数,就能得到公式(1)的指数分布,进而确定事例率 R 。利用2021年12月27日的数据和EXCEL软件,计算得到阵列探测到的宇宙线事例率约为0.19 Hz(见图3拟合公式中的指数系数)。

2. 白天和夜晚的宇宙线

与赫斯通过测量日夜空气电离度来间接判断宇宙线是否来自于太阳的原理相似,我们利用地面探测器阵列测量白天和夜晚的宇宙线事例率来继续探索这个问题。随着地球自转,地面探测器阵列会在白天面向太阳,在夜晚由于地球自身的遮挡而背向太阳(图4)。通过比较白天和夜晚宇宙线的事例率,就能判断宇宙线是否来自太阳。

我们选取并利用2021年12月27日全天的观测数据来探究这一问题。所有的原初宇宙线按照观测时间平均分成白天和晚上两个数据样本,分别计算这些宇宙线的事例率。通过计算,白天和夜晚观测到的宇宙线事例率分别为0.19 Hz和0.18 Hz。结果显示,在夜晚探测器也能观测到宇宙线,并且白

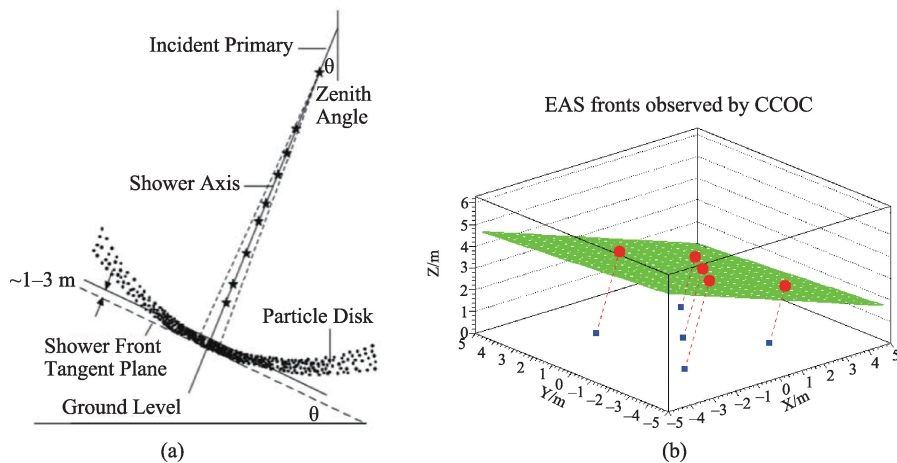


图2 (a)广延大气簇射示意图;(b)宇宙线方向重建示意图

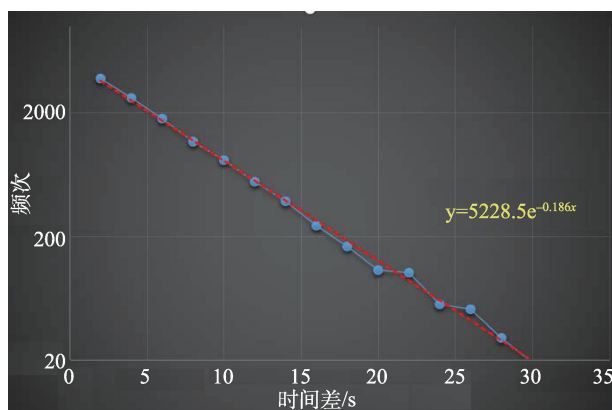


图3 相邻两个宇宙线观测时间差的分布
其中蓝点是测量结果,红线是趋势线

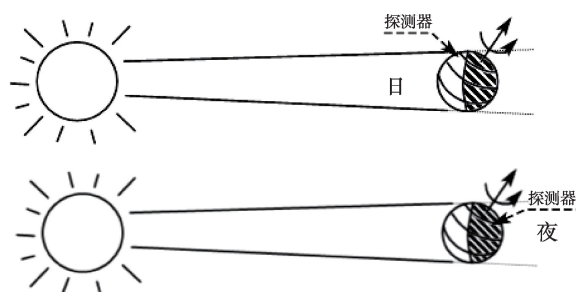


图4 探测器在白天(上)和夜晚(下)观测宇宙线示意图
左和右球体分别为太阳和地球

天和夜晚观测到的宇宙线的事例率相差仅5%。这说明宇宙线不仅仅来自于太阳方向,还来自于其他方向。因此,太阳并不是宇宙线的唯一来源。而观测到的白天和夜晚事例率的5%的差别与统计量的多少、甚至与温度、气压等因素有关。

3. 日全食过程的宇宙线

月球在运动到日地之间时会遮挡住太阳照射到地球的光(见图5中地球上的小阴影区域)从而形成日食。在日食过程中,太阳会逐步被月球遮挡再逐步显现。根据观测的遮挡特征,日食又分为日全食和日偏食等。日全食在全球范围内每1.5年发生

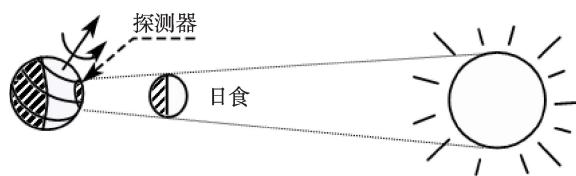


图5 探测器在日食期间观测宇宙线示意图
左、中和右球体分别为地球、月球和太阳

约1次。赫斯则是在这样一个罕见的日全食期间测量空气电离度来判断宇宙线是否来自于太阳。与赫斯的探究原理相似,我们也可以利用地面探测器阵列来测量日食前后,以及过程中(见图5)宇宙线事例率随时间的变化来继续探索这个问题。

在现有的观测数据的时间范围内,暂时没有出现日全食。更多的日食观测时间、地点信息可以在国家科学天文数据中心网站^③上查询,未来探测器也会继续观测并提供更多的数据。我们约好未来再一起探索。

4. 为宇宙线拍一张照片

1912年受到测量方法的限制,赫斯不能利用验电器来确定宇宙线的方向。在探索“宇宙线的太阳起源”之谜时,赫斯不得不在夜晚、日全食这种特殊条件下带着验电器乘坐气球一次一次飞行。

而今天,先进的宇宙线探测器阵列可以通过重建得到原初宇宙线的方向信息。用这个“玩具”对着天空持续“曝光”,就可以为宇宙线拍一张照片。如果宇宙线是太阳发射的,那么在照片中我们应该可以看到宇宙线集中在太阳运动的轨迹,即轨迹从东方升起,划过我们的头顶,向西方落下。

为了验证这个猜想,我们将观测数据中的所有原初宇宙线按照天顶角和方位角的大小排列在相纸上,拍摄了一张宇宙线的照片(图6)。照片中,宇宙线并没有集中在一条轨迹上,而是散落在整个天空。因此,太阳并不是宇宙线的主要起源。

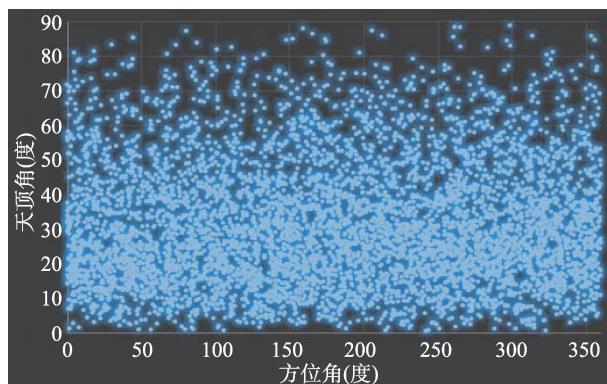


图6 宇宙线照片,其中蓝色点代表宇宙线

三. 上天入海探究宇宙线的起源

在宇宙线被发现的一百多年里,我们已经了解到宇宙线中绝大部分粒子是带电的原子核,只有少量的电子、光子和极难探测的巨大数量的中微子。宇宙线(如不做特殊说明,指的是宇宙线中的带电原子核)在宇宙空间的星际磁场中经过了漫长的传播过程,受到洛伦兹力的影响,它们在到达地球前就失去了原初方向信息(图7)。因此,直接定位加速宇宙线天体的天体变得非常困难。这些能量高的粒子究竟来自哪里呢? 粒子能够不断获得加速的前提条件是能被束缚在加速区,这就要求粒子的拉莫尔半径不能超过星体的大小,即 $E_{\max} \sim ZBR$ 。其中, Z 是带电粒子电荷, B 是磁场强度, R 是星体的半径。这样根据天体目标的磁场和尺度信息便可锁定候选源。从1912年发现至今,只有少量能量较低($<10^{11}$ eV)的宇宙线粒子已经确定产生于太阳,而能量更高的宇宙线主要来自于太阳系以外的银河系以及银河系之外更加遥远的地方。虽然人类还不

能准确说出这些宇宙线是由什么地方产生的,但探寻它们的手段已经多种多样,解决宇宙线起源问题已经指日可待。

宇宙线在星际磁场中的偏转随着能量的升高而减小,当宇宙线能量高到某一程度时(比如 $>10^{19}$ eV),我们观测到的宇宙线到达方向已经可以近似指向加速源所在的位置。这些极高能的宇宙线非常少,在1平方千米的面积上100年才落下1个。为了克服流强弱这个问题,极高能宇宙线探测器面积都建造得巨大。例如,著名的俄歇观测站探测器的覆盖面积达到3000平方千米。另一方面,宇宙线与星际介质中物质相互作用产生伽马射线和中微子。伽马射线和中微子不带电,在宇宙空间中传播不会偏转(图7),是研究宇宙线起源问题的重要“探针”。中微子与其他物质发生相互作用的截面极小,不容易被探测到。如果想要捕获中微子则需要庞大的探测介质,这些探测介质非人力可为,通常取自天然,如位于南极冰层下1450米到2450米体积1立方千米的冰立方实验(图8)。目前,冰立方实验是观测

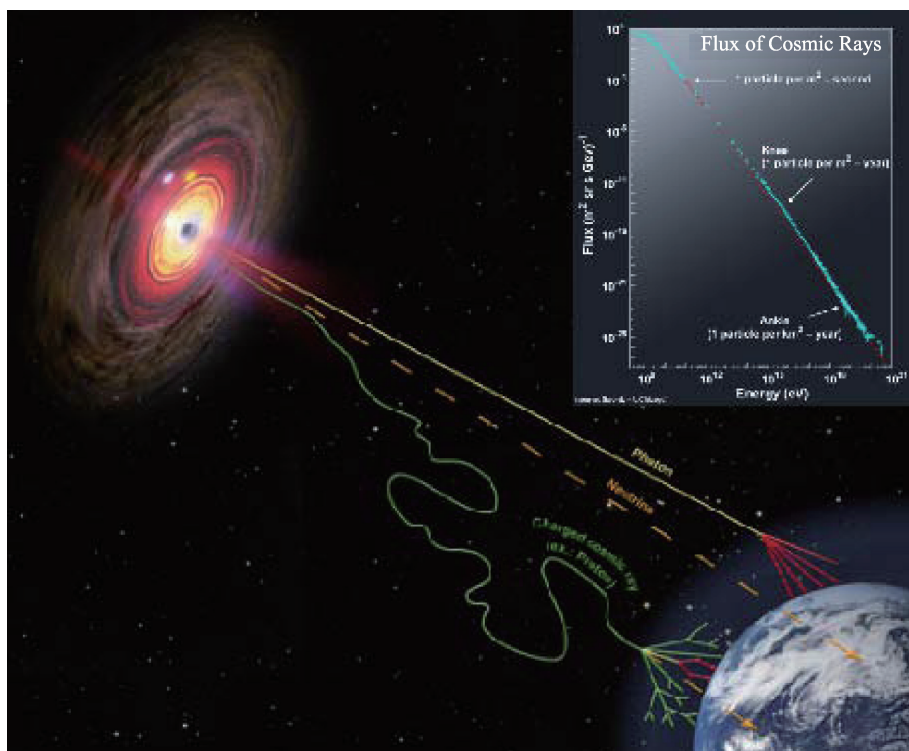


图7 宇宙线传播过程示意图^④

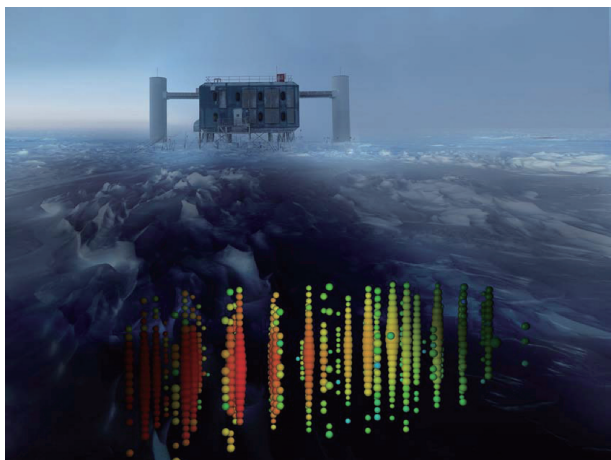


图8 冰立方实验^⑥

宇宙线中微子最好的探测器阵列,已经观测到多个中微子事例,但是还没有找到宇宙线源。

与中微子和极高能宇宙线相比,伽马射线的探测容易了许多。随着空间和地面探测技术的发展,已经有5000多个GeV(10^9 eV)伽马源(图9)和251个TeV(10^{12} eV)伽马源被观测到^⑦。其中伽马射线源的种类主要包括:位于银河系内的脉冲星及其星云、超新星遗迹、伽马射线双星、超级泡等和位于银河系外的活动星系核、星爆星系、伽马射线暴等。这些伽马射线源的发现帮助我们进一步逼近宇宙线起源问题的真相。然而高能伽马也可以由源区加速的高能电子产生,并不一定直接与宇宙线关联。利用伽马天文回答宇宙线起源问题的关键是观测到更多数量、更多种类以及更高能量的伽马源。同

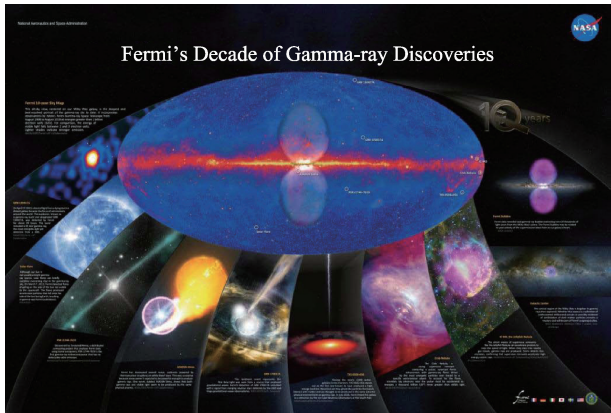


图9 Fermi十年对伽马射线源的观测结果^⑥

时联合其他多波段的观测,寻找到伽马源和宇宙线的关联证据。

面对宇宙线研究领域的科学机遇,瞄准宇宙线起源问题,我国宇宙线物理学家们提出了建设高海拔宇宙线观测站(英文名称为:Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO)。LHAASO位于海拔高度4410米的四川省稻城县海子山,占地面积约1.36平方千米(图10)。在探测技术上,LHAASO采用四种不同的手段,可以对宇宙线事例进行全方位、多变量的测量。LHAASO的主体工程于2017年开始建设,至2021年7月LHAASO阵列全部建设完成,已经成为国际上最活跃的宇宙线物理实验平台。LHAASO 1/2阵列11个月的数据已经在银河系内发现12个稳定的超高能伽马射线源,并记录到能量达1.4拍电子伏的伽马光子,突破了人类对银河系粒子加速的传统认知。LHAASO开启了“超高能伽马天文学”时代,有望揭开宇宙线起源之谜。

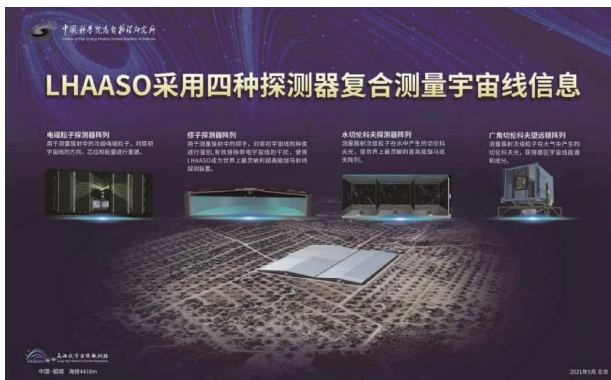


图10 LHAASO阵列布局及四种探测手段

参考文献

- ① V.F.Hess,Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten, Phys. Zeit. 13,1085-1086(1912).
- ② 刘佳, 重走宇宙线发现之旅. 现代物理知识, 34(3),49-53(2022).
- ③ <https://nadc.china-vo.org/eclipse/>
- ④ <https://www.cta-observatory.org/pevatrons-hunt-for-galactic-cosmic-rays/>
- ⑤ <https://apod.nasa.gov/apod/ap150901.html>
- ⑥ <https://fermi.gsfc.nasa.gov/#whatsfermi>
- ⑦ <http://tevcat.uchicago.edu/>