

以宇宙线为探针探索极端宇宙

李 骋

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心 100049; 天府宇宙线研究中心 610213)

一、引言

自1912年奥地利物理学家维克托·赫斯发现宇宙线以来,宇宙线研究已有百年历史。宇宙线研究也贯穿整个现代物理学的发展。宇宙线探测仪器从最初的验电器已经发展到现在的卫星实验和大型地面阵列等,仪器的复杂程度不可同日而语。随着探测手段的不断发展,人类对宇宙线的了解也不断加深。如今我们知道,大约89%的宇宙线是质子,10%是氦原子核(即 α 粒子),1%是重元素原子核,还有微量的电子、中微子和伽马光子等(如无特殊说明,后文中提到的“宇宙线”特指带电宇宙线)。大家不禁提出疑问:宇宙线既然已经被研究了这么多年,为什么我们还要持续投入巨大精力去进行研究?我们到底还有哪些问题没有解决?

宇宙线的能量横跨二十多个量级,流强覆盖十几个量级。1991年,美国的尤他实验探测到一个能量高得离谱的粒子,称为“OMG”粒子^[1]。其能量有320 EeV($1 \text{ EeV}=10^{18} \text{ eV}$),大约相当于一块砖头从腰部砸向脚趾的能量,但是其大小只有 10^{-15} 米!而位于欧洲核子中心的大型强子对撞机加速粒子的最高能量只有13 TeV($1 \text{ TeV}=10^{12} \text{ eV}$)。宇宙线中探测到的粒子最高能量比人类所能加速的粒子最高能量高约七个量级!说明宇宙中存在着许多人类尚未了解的极端粒子加速过程。宇宙线犹如茫茫迷雾中的一盏明灯,照亮通往神秘未知世界的道路,同时不断点燃人类无尽的好奇心。宇宙线作为来自遥远宇宙的物质样本,其研究可以帮助我们了解极端天体环境、星际空间性质等。我们现有的物理规律是在实验室能标下建立的,这些物理规律在更

高的能标下是否依然适用?宇宙线研究是否有可能突破现有的物理框架?这也是宇宙线研究中非常有意思的地方。

二、宇宙线起源之谜

低能宇宙射线可以通过卫星实验来探测,例如国际空间站上的AMS实验等。但随着宇宙线能量升高其流强(即单位时间、单位面积内接收到的宇宙线粒子数量)逐渐降低,而空间卫星实验由于载荷重量的限制无法探测更高能量的宇宙线。幸运的是,高能宇宙射线与大气分子发生相互作用,产生更多的次级粒子,这些次级粒子几乎同时到达地面,从而形成广延大气簇射。我们可以通过测量这些次级粒子的特性,反推原始宇宙线的信息,例如AUGER、KASCADE等实验。

宇宙线流强随能量变化的关系称为能谱。通过对宇宙线能谱的测量,科学家们发现其大致服从幂律分布,同时也显示出一些精细结构(如图1所示)。例如,在PeV($1 \text{ PeV}=10^{15} \text{ eV}$)附近,宇宙线能谱呈现出变软的趋势,这种现象被称为“膝”,其形态类似于人体的膝关节;而在EeV附近,宇宙线能谱则表现出变硬的特点,这被称为“踝”,形态类似于人体的踝关节。一般认为,“膝”以下的宇宙线起源于银河系,而“踝”以上的宇宙线则来源于银河系外,但是PeV到EeV区间的宇宙线起源仍然未知。因此,通过宇宙线研究可以知道银河系内应该存在能够将带电粒子加速到PeV能量的天体,即所称的PeV宇宙线加速器(PeVatron)。那么,什么类型的天体能够将宇宙线加速到如此高的能量呢?遗憾的是,

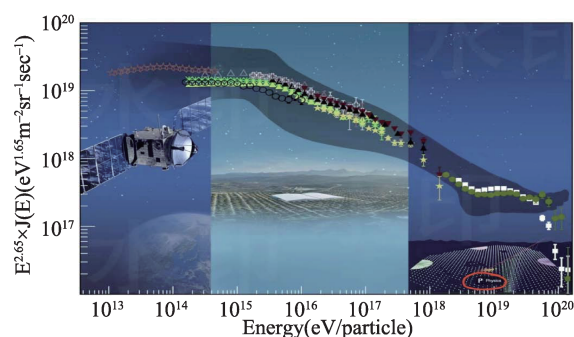


图1 宇宙线能谱和各能量范围内的主力探测手段及相关实验。从左到右分布表示卫星实验,地面阵列实验,地面阵列和荧光望远镜复合实验(图片引自参考文献[2])

宇宙线大多是带电粒子,而银河系中普遍存在的磁场会导致宇宙线在到达地球之前失去原始的方向信息,从而使我们无法通过直接测量宇宙线方向来准确推断出宇线源的位置。

宇宙线在传播过程中与物质(气体、光子等)相互作用可以产生中性粒子,例如伽马光子和中微子等。通过测量这些中性粒子可以反推宇宙线源的位置。由于中微子与物质相互作用截面很低,因此探测难度高,往往需要很大体积的探测器,且探测器灵敏度也较差。代表性的中微子探测实验包含位于南极的ICE CUBE实验、位于贝加尔湖的Baikal-GVD实验等。ICE CUBE实验已经运行十多年了,但是依然未能测量到5倍标准偏差以上的中微子信号,表明目前正在运行的中微子望远镜灵敏度还存在不足。伽马射线天文学的主要仪器包括FERMI、AGILE卫星等,地面实验包含ARGO、HAWC、HESS等等。伽马射线探测相对简单,但是伽马射

线除了可以由强子宇宙线与物质相互作用(强子过程)产生之外,还可以由高能电子与低能光子相互作用(轻子过程)产生。因此,如何区分轻/强子过程是伽马天文的难点。另外,此前大部分伽马探测望远镜的工作能段只能达到几十TeV,而确定PeV宇宙线源则至少需要探测到100TeV伽马光子。因此其工作能段也限制了认证PeVatron能力。

三、LHAASO助力破解宇宙线起源之谜

天鹅座是北天区最活跃的恒星形成区之一,一直被怀疑是银河系可能的宇宙线源,但却缺乏直接证据。LHAASO于2021年首次在天鹅座区域探测到PeV伽马光子,表明该区域可能存在PeV宇宙线源^[3]。历经三年,LHAASO通过积累更多数据和更细致的数据分析最终在天鹅座区域确定了一个巨型超高能伽马泡状结构(命名为Cygnus Bubble)^[4]。如图2所示,该延展信号的空间尺度至少达到6度以上,且伽马光子的空间形态与气体物质存在明显的关联。如果伽马光子是由宇宙线与物质相互碰撞产生,伽马光子流强与宇宙线密度和气体密度成正比,因此会在空间上与物质分布存在关联性。相反的是,如果高能伽马光子是由高能电子与背景光子相互作用产生,因为背景光子是空间均匀分布的,因此产生的伽马光子也应该是近似各向同性。而且由于辐射损失,高能电子无法传播到较远距离,从而产生如此大尺度的超高能伽马射线延展结构。因此

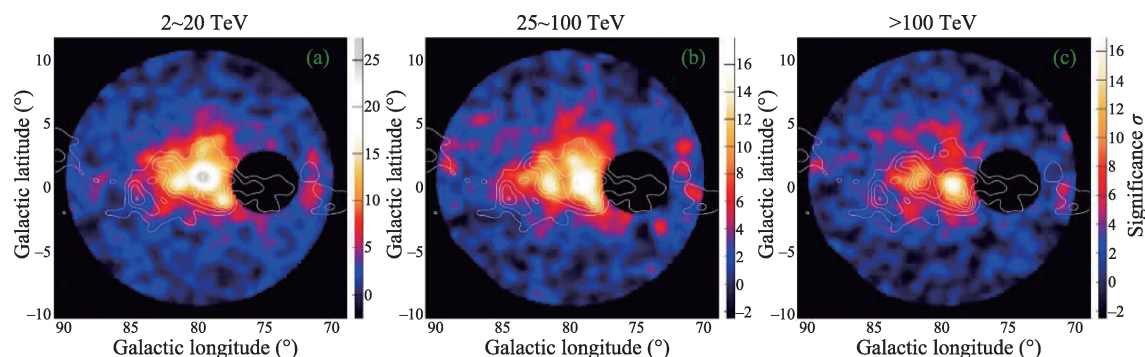


图2 Cygnus Bubble不同能段的显著性天图。白色 contour 图表示分子云分布(图片引自参考文献[4])

LHAASO 在超高能段探测到与物质存在关联性的伽马信号,是强子过程的有力证据。该延展结构的能谱一直延伸到 PeV 未观测到截断现象。一般来说,强子过程产生伽马光子的能量为质子能量的十分之一,因此对应的宇宙线能量至少到 10 PeV 以上。

通过伽马光子的空间形态,发现泡状结构中间的宇宙线密度要更高,这不仅排除了该延展信号主要由银河系弥散伽马信号贡献的可能性而且说明 Cygnus Bubble 中间可能存在宇宙线加速源。究竟哪个天体是宇宙线源呢? 位于泡状结构的中间有大质量恒星集团 Cygnus OB2 和微类星体 Cygnus X-3 是可能的候选天体。Cygnus OB2 是一个包含数十颗最大质量恒星的年轻星团,这些大质量恒星每个的质量都要比太阳大几十倍,体积大数万倍,亮度更是超过太阳百万倍。这些大质量恒星时时刻刻都以超过每秒 1000 千米的速度向星际空间中抛射大量物质。这些高速星风是宇宙线加速最可

能的能量来源。Cygnus X-3 是一颗双星系统,包含一颗致密星和沃尔夫-拉叶星。通过射电观测发现致密星存在喷流,而喷流也是加速高能宇宙射线的理想场所。总而言之,该工作首次定位了超过 PeV 的宇宙线源的位置,而且证明了银河系中存在着超过 PeV 的宇宙线加速器,是宇宙线研究历史上的里程碑事件。未来,随着数据量的积累,将进一步探索 Cygnus 区域内宇宙线加速和传播机制,同时有望认证更多银河系宇宙线源,从而对宇宙线起源有更加系统、深入的认识。

参考文献

- [1] HiRes Collaboration. D. J. Bird et al. Phys. Rev. Lett. 71 (1993), 3401-3404.
- [2] 李骢,杨睿智,曹臻. Science Bulletin. 2024 年第 19 期 2698-2700, 共 3 页.
- [3] Cao Z, Aharonian FA, An Q, et al. Nature 2021;594:33-36.
- [4] Cao Z, Aharonian FA, An Q, et al. 2024, Science Bulletin, 69, 449.

科苑快讯

千足虫分泌物有可能治疗人类疼痛

美国弗吉尼亚理工大学(Virginia Tech)科学家在一种美国本土千足虫的分泌物中发现了一个新的复杂分子家族,这些足以迷惑蚂蚁的化合物,也与人类大脑中与疼痛缓解有关的受体相互作用。

千足虫因为腿多而被避之不及,被很多人归为“令人毛骨悚然的爬虫”。但化学家在其分泌物中发现了新的复杂结构分子,可调节蚂蚁大脑中的特定神经受体,使其迷失方向。新发现的自然化合物称为生物碱,研究团队将其命名为雄激素乙醇和雄激素苷,这些发现发表在《美国化学学会期刊》(American Chemical Society)上。

研究人员了解到,千足虫释放这些化合物是为了抵御捕食者,同时也可与其亲属分享自己所在位置。

尽管千足虫分布广泛、无处不在,但是包括其特定栖息地、数量、饮食、行为和化学成分等各个方面仍然神秘。他们此前还研究过另一种原产于太平洋西北部的千足虫 *Ishchnocybe plicata*,发现相关生物碱与一种名为 Sigma-1 的神经受体有强烈的选择性相互作用,该族化合物可能在治疗疼痛和其他神经系统疾病方面颇具潜力。

研究人员说,这些化合物非常复杂,实验室合成尚需时日,一旦能够大规模生产,将能更好地研究其性质和在药物开发中的潜力。

(高凌云编译自 2025 年 7 月 27 日 SciTechDaily 网站)