

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.01.02

宇宙线直接探测进展概述

彭晓艳, 袁 强

(中国科学院 紫金山天文台, 暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210008)

摘要: 宇宙线从发现起至今已超过百年。在 20 世纪上半叶, 大型粒子加速器技术成熟以前, 对宇宙线的研究引领着基本粒子物理的发展, 从宇宙线研究中取得的多项成果斩获诺贝尔奖。21 世纪, 宇宙线因其与极端高能物理规律和暗物质等新物理现象联系密切而绽放出新的活力, 宇宙线起源、加速、传播等相关的天文学及物理学问题也备受关注。简述了近年来在空间直接观测宇宙线实验方面取得的进展, 以及其对理解宇宙线物理问题的推动。最后概述了中国在相关领域的研究历程和现状。

关键词: 宇宙线; 高能天体物理; 空间探测; 暗物质

中图分类号: P159 **文献标识码:** A

1 简要历史

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子, 一般指带电粒子, 包括各种原子核、正负电子、反质子等。能量足够高的 γ 光子和中微子具有显著的粒子效应, 而且往往在大气或探测器中发展出级联簇射, 与普通宇宙线粒子并无明显差别, 因此它们通常也被广义地称为宇宙线。

宇宙线的发现源自 20 世纪初对空气导电性的研究。最初人们普遍认为空气的导电性产生于岩石放射性。然而自 Pacini 等人^[1]进行一系列实验(海平面及海水中、铁塔上、高空气球)后, 人们逐渐清楚地认识到, 导致空气电离的源并非来自地球。1912 年 Hess^[2]首次发现随着海拔升高空气电离度显著增加, 该观测结果成功地证明导致空气电离的辐射来自于外太空, Hess 因此获得 1936 年诺贝尔物理学奖。后来 Millikan 将这种地外辐射称为宇宙线。

宇宙线对粒子物理早期发展起着引领作用。在大型人造加速器技术成熟以前, 宇宙线几乎是研究高能粒子物理的唯一工具。人们从宇宙线中发现了一批新的粒子, 主要包括:

- (1) 1932 年 Anderson^[3]发现正电子(1936 年诺贝尔奖);
- (2) 1936 年 Anderson 和 Neddermeyer^[4]发现 μ 轻子;

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-05-31

资助项目: 国家自然科学基金(11722328)

通讯作者: 彭晓艳, pengxy@pmo.ac.cn

(3) 1947 年 Rochester 和 Butler^[5] 发现 K 介子;

(4) 1947 年 Lattes 等人^[6]发现 π 介子 (1950 年诺贝尔奖; 理论物理学家汤川秀树因为提出核力的介子理论而获得 1949 年诺贝尔奖);

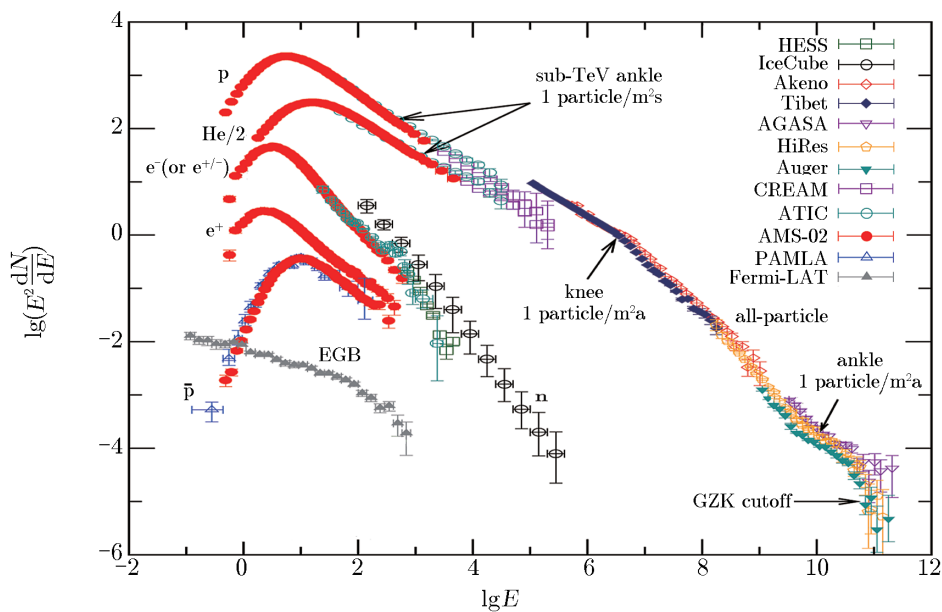
(5) 1949 年 Chang^[7]发现 μ 原子;

(6) 1950 年 Hopper 和 Biswas^[8] 发现 Λ 重子。

到 20 世纪 50 年代后, 粒子加速器逐渐取代了宇宙线, 在粒子物理研究中起着越来越重要的作用。宇宙线的研究重心则逐渐转移到相关的天体物理和宇宙学问题上了。

1934 年 Rossi^[9] 发现摆放在不同位置的仪器往往会同时记录下宇宙线事例, 表明它们来自于同一原初事件。随后 Auger^[10] 独立发现了该现象, 这被称作宇宙线的空气簇射, 由原初粒子跟空气原子核发生相互作用产生的大量次级粒子形成。1937 年, Bhabha 和 Heitler^[11] 提出宇宙线的空气簇射理论, 该理论至今仍然是地面观测宇宙线的基础。

由于受到地球大气的阻挡, 原初宇宙线粒子一般需要使用空间或者高空粒子探测器进行观测。受技术手段和实验成本的限制, 空间探测器规模通常难以做大; 宇宙线粒子能谱为幂律谱 (见图 1), 低能粒子多而高能粒子少, 因此空间直接探测的对象只能是能量较低的粒子 ($\lesssim 100$ TeV)。高能粒子无法在空间进行直接观测。幸运的是, 它们在地球大气中可以引发级联簇射, 利用地面探测簇射次级粒子可以间接探测它们。地面实验规模可以做得很大, 因此可以将观测延伸到很高的能段 (10^{20} eV 以上)。图 1 汇总了宇宙线主要成分的观测能谱^[12-30]。其中 100 TeV 以下的粒子由空间探测器直接探测, 人们能很好地分辨粒子种类; 高能段成分测量比较困难, 给出的是全粒子能谱。下面将重点介绍直接探测方面的主要进展。



注: 能量约高于 100 TeV 时, 由于很难区分成分, 给出全粒子能谱。E 单位为 GeV, 图 2—5 与之相同。

图 1 宇宙线主要成分能谱观测汇总^[12-30]

2 代表性实验

2.1 气球实验

从 20 世纪 50 年代起, 人们就开始通过高空气球实验对原初宇宙线粒子进行观测^[31]。受技术条件限制, 长期以来气球实验规模难以做大, 所做的观测也主要针对低能宇宙线粒子。然而, 由于成本比空间卫星低很多, 即便是到今天, 气球实验在宇宙线直接观测中仍然发挥着重要的作用。近期主要的气球实验包括 CREAM (cosmic ray energetics and mass), ATIC (advanced thin ionization calorimeter), TRACER (transition radiation array for cosmic energetic radiation) 等。通过直接测量获得的宇宙线最高能量 (约 1 PeV) 来自气球实验 RUNJOB^[32]。能量在太电子伏至拍电子伏之间宇宙线能谱测量的结果比较准确, 也由气球实验给出, 并且人们发现宇宙线能谱在数百吉电子伏处存在拐折 (sub-TeV ankle)^[14, 33]。2008 年南极气球实验 ATIC 给出直至太电子伏的宇宙线正负电子总能谱测量^[18]。

2.2 “旅行者”号探测器 (Voyager)

气球实验有其局限性: 一方面残余大气对直接测量产生一定的影响; 另一方面气球飞行的轨迹不容易控制, 导致测量环境不可控, 且系统误差也会偏大。因此发射空间卫星探测器仍然是精确观测宇宙线的首选。早期的空间实验包括美国“探险者”号、“发现者”号、“先驱者”号、“旅行者”号等, 以及前苏联的“电子”号、“质子”号等绕地或行星际项目。值得一提的是“旅行者”号系列的“旅行者 1 号”。搭载“旅行者 1 号”的飞船于 2012 年 8 月 25 日穿越了太阳系日球层顶, 成为第一个离开太阳系进入星际空间的人造设备。“旅行者 1 号”上搭载了 11 台科学仪器, 分别用于行星科学、空间环境、行星际磁场、宇宙线等研究。其“宇宙线系统”和“低能带电粒子设施”目前仍在正常工作, 并且不断地向地球传回数据, 其中包含有星际空间高能粒子信息, 该信息对于认识银河宇宙线起源以及宇宙线粒子在太阳系内的传输具有重要意义。

2.3 反物质探测和轻核天体物理学探测载荷

反物质探测和轻核天体物理学载荷 (Payload for Anti-matter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics, PAMELA) 是由意大利、俄罗斯、德国和瑞典联合研制的空间高能粒子探测器。PAMELA 的主要仪器包括磁谱仪、闪烁体探测器、电磁量能器以及中子探测器。磁谱仪主要用于测量入射粒子的刚度 (或荷质比) 和电荷符号, 闪烁体探测器提供触发信息并可以进行电荷测量, 电磁量能器可以鉴别轻子和强子并测量正负电子能量, 中子探测器可以进一步区分轻子和强子。PAMELA 总重约 470 kg, 几何接受度为 $21.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。它的主要科学目标是进行反物质粒子和暗物质粒子探测, 同时也研究宇宙线传播、太阳和空间物理等。PAMELA 于 2006 年 6 月 15 日发射, 于 2016 年停止数据下传。PAMELA 仪器虽小, 却取得了多项重要的发现, 有力地推动了粒子天体物理领域的发展。

2.4 阿尔法磁谱仪

阿尔法磁谱仪 (Alpha Magnetic Spectrometer, AMS) 是由著名华裔科学家丁肇中领导的大型空间站宇宙线探测项目, 由美国能源部提供主要经费支持, 来自 16 个国家和地区的 60

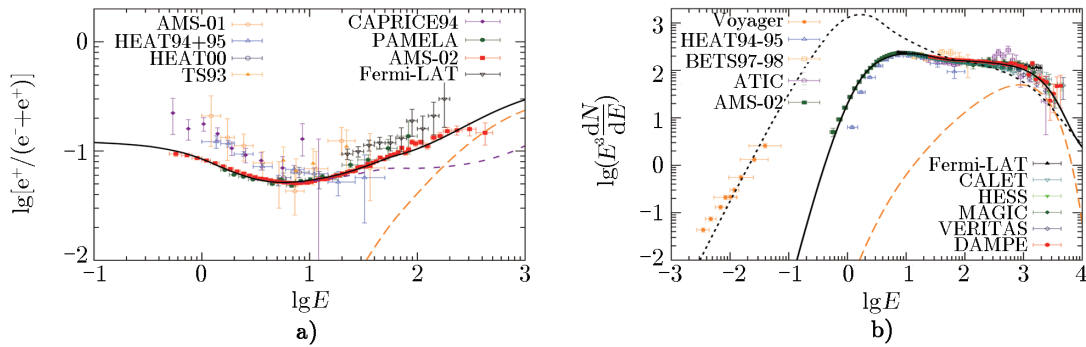
个机构共同参与建设, 包括中国科学院高能物理研究所 (简称高能所)、中国科学院电工研究所、中国运载火箭技术研究院、北京航空航天大学、东南大学、山东大学、上海交通大学、中山大学、台湾“国家太空中心”、台湾“中央研究院”、台湾“中央大学”、台湾中山科学研究院等机构。AMS 的原型探测器 AMS-01 于 1998 年 6 月搭载于发现号航天飞机绕地飞行两个星期, 验证了其设计的可行性。经过优化设计的 AMS-02 探测器于 2011 年 5 月搭载于奋进号航天飞机升空, 安置在国际空间站上。AMS-02 主要的子探测器包括穿越辐射探测器、飞行时间计数器、硅径迹探测器 (包括磁铁)、切连科夫探测器和电磁量能器。几个子探测器分别独立测量各类粒子的电荷和能量。AMS-02 的首要科学目标是寻找宇宙中的反物质和暗物质。自投入运行以来, AMS-02 获取的数据显著地改善了宇宙线直接观测的精度, 并且有效地拓宽了对反物质粒子如正电子和反质子的观测能段。AMS-02 将宇宙线的研究带入了精确时代。预计 AMS-02 将运行到 2028 年, 并与国际空间站同时退役。

3 宇宙线直接探测的几个进展

3.1 正、负电子超

2009 年 PAMELA 合作组报道了正电子占正负电子总和的比例的测量结果, 表明当能量大于 10 GeV 时, 正电子比例呈现持续明显上升的趋势^[34], 见图 2 a)。一般而言, 宇宙线正电子来自于宇宙线质子和星际介质非弹性碰撞, 因此人们可以通过宇宙线质子能谱 (正比于 $E^{-2.8}$) 估算出正电子能谱 (约正比于 $E^{-3.6}$)。与质子能谱相比, 正电子能谱更软, 两者的能谱指数相差了 0.8, 其原因主要是由于正电子在传播过程中通过同步辐射和逆康普顿散射而快速丢失能量。而 (负) 电子能谱之前的测量结果虽然有较大误差, 但大体上能谱正比于 $E^{-3.3}$, 因此预期正电子比例将随着能量增加而下降。PAMELA 的这一发现意味着需要额外的正电子来源, 一时之间引起了人们广泛的讨论。最可能的一类正电子来源是脉冲星, 也有很多学者提议用暗物质粒子湮灭或衰变来解释该正电子超^[35,36]。最近 HAWC 实验对邻近的两颗脉冲星 (Geminga 和 Monogem) 的 γ 射线进行观测, 结果发现这两个脉冲星产生的正负电子可能不足以解释观测到的正负电子超^[37]。但 HAWC 组假设脉冲星附近的扩散系数和银河系平均扩散系数相同, 并且这个数值远低于常规的银河宇宙线扩散系数。实际上, 如果宇宙线只在脉冲星附近数十秒差距区域内扩散缓慢而在更远的地方按照银河系平均扩散系数传播, AMS-02 等实验观测到的正电子超和 HAWC 观测到的 γ 射线可以同时得到解释^[38]。

同一时期, ATIC 气球实验^[18]、Fermi 卫星^[39], 以及地面切连科夫望远镜实验 HESS^[20] 等给出了对正负电子总能谱直至数太电子伏的高精度测量, 它们发现正负电子总能谱上也存在超出, 可能与正电子比例的超出具有同一来源, 即银河系中存在同时产生高能正负电子 (很可能是正负电子对) 的源^[40]。最近, 中国的暗物质粒子探测卫星报道了其对于正负电子总能谱约 5 TeV 的精确测量, 并首次直接测量到能谱约 0.9 TeV 处的拐折^[19]。我们后面还将详细介绍暗物质粒子卫星的结果。



注：实线为考虑背景和脉冲星（长虚线）贡献之和对观测数据的拟合结果。图 b) 中点线为太阳调制之前的本地星际正负电子能谱。

图 2 a) 正电子比例随能量的变化^[34,41-47]；b) 正负电子总能谱^[18-20,48-55]

3.2 反质子

反质子的产生机制和正电子类似，主要来自于宇宙线和星际介质的碰撞。因为质子-质子非弹性碰撞截面对能量依赖很小，因此我们推断高能段（约 10 GeV）反质子产生能谱和质子能谱类似。在低能段，由于反质子产生阈的限制，能谱更硬。在经历了星际传播过程之后， \bar{p}/p 比例在高能段应该随着能量按 $E^{-\delta}$ 的规律下降，其中 δ 为扩散系数随能量变化的幂律谱指数。AMS-02 对宇宙线 B/C 的观测结果表明 $\delta \approx 1/3$ ^[60]。不过 B/C 与扩散系数之间并非简单对应，而是与传播模型有关。对不同的传播模型进行计算，得到 $\delta \approx 0.3 \sim 0.6$ ^[61]。

观测的反质子流强以及 \bar{p}/p 比例整体演化与理论预期相符，如图 3 所示，图中虚线和实线分别为太阳调制前后的模型预期。低能段流强受太阳调制影响，在不同时间呈现出一定变化。如果假设反质子与质子的太阳调制效应相同，一类模型^①预期的反质子流强在能量低于 10 GeV 时，比数据略低（见图中实线）。如果反质子受到的太阳调制效应更小，那么模型预期有可能与观测相符。太阳调制效应的电荷依赖性还需要进一步的研究。此外，不同的传播模型（例如考虑宇宙线的整体对流）给出的结果也略微不同^[61]。

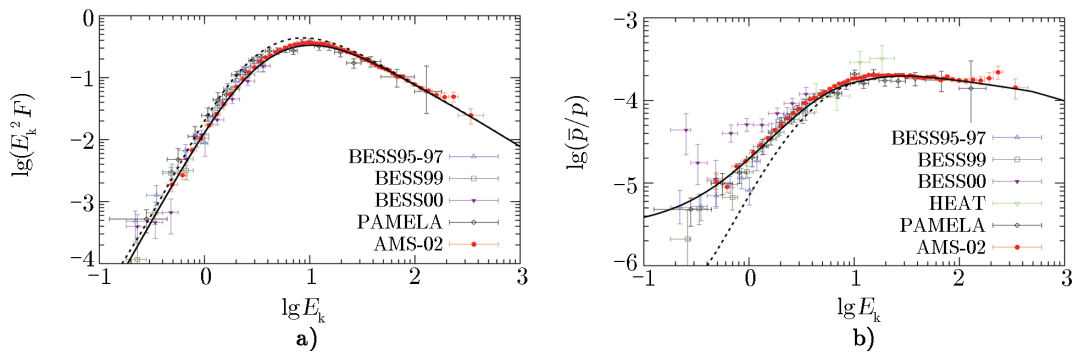


图 3 a) 反质子能谱；b) 反质子-质子比例^[21,22,56-58]

^①这类模型假设宇宙线在星际空间中传播时会和随机磁湍流相互作用而获得加速，称为重加速。这类模型可以很好地符合观测到的 B/C 比例数据^[61]。

3.3 原子核能谱

因为核素宇宙线的丰度很高, 它们的能谱是测量得最好的。原子核的能谱在数吉电子伏处存在拐折, 高能能谱近似为幂律谱并延伸至 100 TeV 以上。低能处的拐折是多个效应的叠加, 包括低能粒子的电离和库仑散射能耗。经历太阳调制, 粒子能量变成非相对论的^①, 并具有从加速源产生的能谱即拐折的幂律谱。气球实验 ATIC 和 CREAM 以及空间实验 PAMELA 和 AMS-02 均发现, 原子核能谱在约 300 GeV 处存在变硬的行为^[12,14,33,59], 见图 4。高能谱指数比低能谱指数硬约 0.13, 意味着宇宙线在加速或传播过程中可能具有更复杂的特性。AMS-02 关于原初和次级核素的最新测量结果表明, 与原初核素相比, 次级核素 (包括 Li, Be, B) 变硬的程度更大 (约 0.26), 意味着该能谱变硬的现象是传播效应造成^[16,62]。一类扩散系数依赖于空间位置的传播模型可以用于解释这些观测数据^[63,64]。

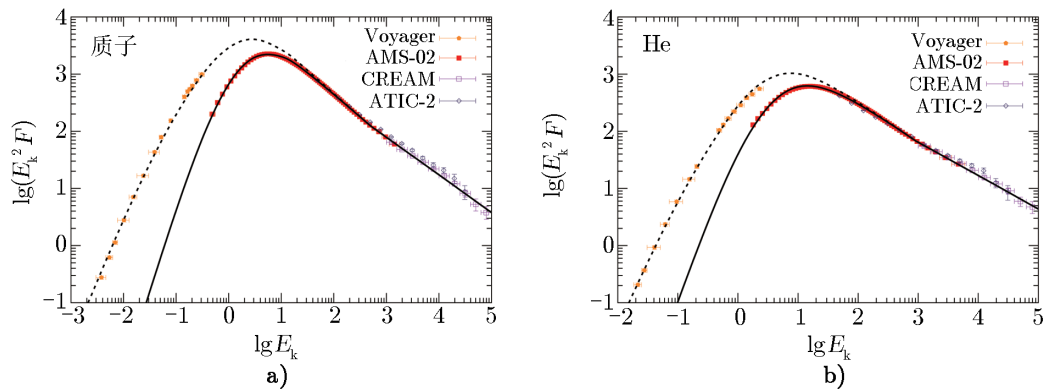


图 4 质子和 He 核能谱^[12,14,15,33,48,59]

3.4 宇宙线传播理论模型

理论方面, 人们已经建立起一个框架性的图像, 可以较好地解释大多数观测数据^[65]。下面我们对该模型进行简单介绍。

(1) 源 宇宙线的确切起源尚不清楚, 超新星爆炸后的遗迹被认为是最可能的宇宙线加速源之一, 其他种类的源包括银心超大质量黑洞、大质量星团、脉冲星等。宇宙线源集中分布在银盘上, 也可能与旋臂结构有关。银河系弥散 γ 射线的观测认为银心超大质量黑洞并非单一的宇宙线来源^[66]。

(2) 传播 宇宙线在银河系随机磁场的作用下以扩散方式进行传播。此外宇宙线还可能有整体对流, 以及在传播过程中可能会经历随机重加速。扩散系数随刚度的变化而变化, 一般用幂律谱 $D(R) \propto R^\delta$ 描述, 它反映星际介质湍动的统计分布行为。宇宙线的对流和重加速效应是否存在, 以及它们的效应强弱尚无定论。拟合 AMS-02 的观测数据 (包括质子能谱和 B/C 比例等) 表明适度的重加速效应与数据吻合得更好^[61]。

(3) 相互作用 宇宙线在传播过程中 (也有可能在加速的过程中) 会与周围的物质和场发

^①假设加速产生的粒子动量谱为单一幂律 $dN/dp \propto p^{-\gamma}$, 在相对论极限下 $dN/dE_k \propto E_k^{-\gamma}$, 而在非相对论极限下 $dN/dE_k \propto E_k^{-(1+\gamma)/2}$ 。

生相互作用, 包括弹性和非弹性相互作用, 导致能量损失, 核碎裂以及产生次级粒子等。宇宙线中的 Li, Be, B 以及比 Fe 稍轻的系列亚 Fe 元素就是通过次级相互作用而产生, 它们在宇宙线中的丰度显著高于恒星核合成过程所能产生的丰度。也因为此, 次级-原初粒子的比 (如 B/C) 通常被用于研究宇宙线的传播过程。

(4) 太阳调制 在进入太阳系之后, 宇宙线还会受到太阳风及其携带的磁场的屏蔽作用, 导致低能 (大致为 50 GeV 以下) 宇宙线流量被压低, 称为太阳调制。太阳调制具有周期性, 并与太阳活动的 11 a 周期相对应。太阳活动越强, 宇宙线流量越低; 反之, 则越高。一个简单的太阳调制模型是力场近似^[67], 将太阳系等效于一个势场, 宇宙线粒子在穿过太阳系的过程中会因做功而损失能量。

目前人们采用一些数值程序包求解宇宙线在银河系中的传播和相互作用过程, 如 GALPROP^[68] 和 DRAGON^[69]。

4 中国空间宇宙线研究概述

中国空间科学研究总体说来起步较晚, 历程艰辛。1976 年, 中国科学家提出了第一颗空间太阳观测卫星计划 (天文卫星一号), 卫星于 1978 年正式立项, 中国科学院紫金山天文台 (简称紫台) 承担超软 X 射线探测器、软 X 射线探测器、硬 X 射线探测器和紫外探测器的研制。1982 年, 在已完成电性件桌面联试工作之时, 国家经济面临困境, 导致项目夭折。后来紫台和高能所等单位又陆续开展了基于气球的高空高能辐射观测研究。20 世纪 90 年代起高能所和紫台等研究机构利用中国开展载人航天的机会, 在神舟 2 号上搭载高能 γ 射线谱仪, 并成功实现对 γ 射线暴和太阳耀斑等的观测, 中国在卫星平台上观测天体高能辐射领域实现了零的突破。随后, 中国科学家研制完成了 X 射线谱仪和 γ 射线谱仪并搭载于中国探月飞船, 实现对月球高能辐射的观测和月壤元素丰度的测量。2015 年底中国成功发射暗物质粒子探测卫星——悟空号, 其成为中国空间天文首星。

4.1 暗物质粒子探测卫星

暗物质粒子探测卫星 (Dark Matter Particle Explorer, DAMPE) 是中国科学院空间科学战略性先导科技专项中首批立项研制的 4 颗科学实验卫星之一, 其科学目标是以更宽的能段和更高分辨率观测高能宇宙线和 γ 射线, 从而间接探测暗物质粒子, 并同时开展宇宙线物理和 γ 天文的研究。

DAMPE 主要由 4 个探测器构成, 由上到下依次为塑料闪烁体阵列探测器 (PSD)、硅阵列探测器 (STK)、BGO 量能器和中子探测器 (NUD)^[70]。塑闪阵列探测器主要用于测量粒子电荷并用作 γ 射线观测的反符合仪器; 硅阵列探测器采用高位置分辨率的硅微条探测器, 主要用于测量入射粒子的方向, 也可以测量低 Z 核素的电荷 ($Z < 8$); BGO 量能器为全吸收型电磁量能器, 其厚度为 32 个辐射长度和 1.6 个核作用长度, 主要用于测量粒子能量, 并进行电磁和强子事例的鉴别。对于能量大于 100 GeV 的电子和 γ 射线, BGO 量能器能量分辨率优于 1.5%^[19], 并且其能量分辨率比国际上现有的空间探测器好数倍。此外, 利用电磁簇射和

强子簇射在量能器中的簇射形态的差异, BGO 量能器可以非常高效地区分宇宙线中的电子和质子, 对质子的排斥能力高于 99.99%^[19], 这有利于人们观测高能电子, 因为宇宙线质子的流量是电子的数百乃至上千倍 (见图 1)。中子探测器可以进一步区分质子和电子, 因为强子簇射产生的中子数量远高于电磁簇射所产生的。

暗物质粒子探测卫星自 2015 年 12 月 17 日发射以来, 已在轨稳定运行两年多, 完成全天扫描 4 次, 共记录下超过 40 亿宇宙线事例。基于前 530 d 的数据, 科研人员从重建出的 28 亿事例中挑选出 150 万个能量大于 25 GeV 的电子 (也包括正电子, 暗物质卫星并不区分正和负的电荷), 并获得了世界上精度最高的电子能谱^[19], 如图 5 所示。暗物质卫星的数据以高置信度 (6.6σ) 观测到在约 0.9 TeV 处电子谱的拐折行为。此前只有地面间接测量才能发现该拐折的迹象^[71], 而且系统误差很大。产生这个拐折的物理原因可能是高能电子源的加速限制^[72], 或者是由于源的离散分布特性 (反映邻近某些个源的特征, 而不是大范围内的平均效果)。此外, 暗物质卫星给出的高精度观测数据对于解释正电子超的暗物质模型给出很强的限制^[73]。特别是由于暗物质卫星的测量数据精度很高, 使得解释正电子超的暗物质模型参数空间被显著缩小。结合宇宙微波背景辐射或者 γ 射线的观测, 我们发现一类简化的暗物质湮灭或衰变到轻子的模型已被排除^[73]。如果仍然想用暗物质模型解释正电子超, 那么必然需要给模型增加额外的自由度来避开上述限制。暗物质卫星正在进一步积累数据, 希望将来可以探测到电子能谱的精细结构。

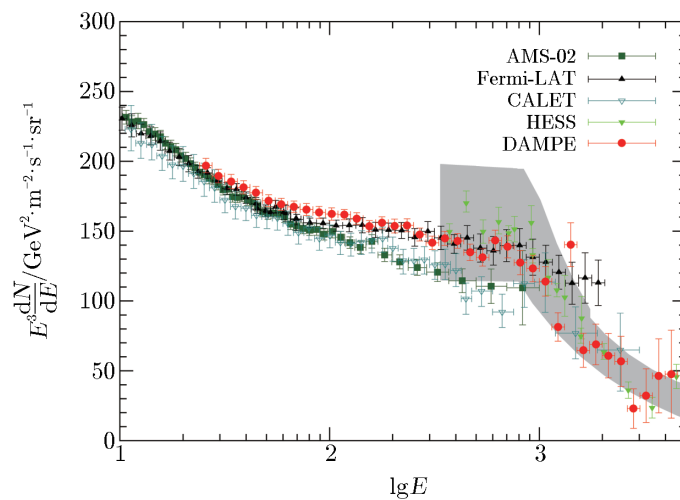


图 5 暗物质粒子探测卫星测量的宇宙线电子能谱^[19]及与其他实验的对比^[20,51-53,71]

4.2 中国空间站高能宇宙线探测器

中国将于 2020 年前后发射自己的空间站, 空间站将提供一系列舱位进行空间科学实验。高能所等单位提出研制高能辐射探测设施 (high energy radiation detection facility, HERD), 用于开展暗物质探测和宇宙线起源的研究^[74]。HERD 通过电磁-强子量能器探测超高能量宇宙线、正负电子和 γ 射线, 对电子和宇宙线的设计几何因子将达到 $3 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$, 明显超过现有探

测器。HERD有望在空间首次将核素宇宙线能谱测量至拍电子伏量级,这将对研究宇宙线起源以及宇宙线“膝”的起因等问题发挥重要作用。HERD对正负电子观测的几何因子将比现有实验增大10倍以上,将对正负电子能谱结构甚至各向异性给出高精度测量,可以有效开展暗物质探测和邻近电子宇宙线源等重大科学问题研究。此外,HERD还是高能分辨率的 γ 射线望远镜,对电子、 γ 射线的能量分辨率在10 GeV以上,优于2%,对寻找 γ 射线的谱线结构非常有利,也可开展 γ 射线天文研究。HERD探测器设计思路新颖,采用颗粒状晶体量能器直接对簇射进行三维成像,从而实现五面有效观测的模式(一般的设备只能观测顶面入射的事例)。科学家在量能器外围放置径迹探测器和电荷探测器,从而实现入射宇宙线粒子的能量、电荷、方向等的高精度观测。HERD项目组已完成几套不同规模的原理样机,并在欧洲核子中心开展了数次束流实验,验证了关键技术的可能性。HERD是由中国牵头的国际合作项目,参与国主要包括意大利、瑞士和西班牙等。HERD探测器计划于2025年前后发射。

5 结 语

本文综述了空间直接探测宇宙线的一些新进展,以及这些结果对研究宇宙线起源、传播等基本问题带来的影响。宇宙线是一个有着百年历史的研究领域,它与物理学的若干基本而重要的问题相关联而历久弥新。随着技术水平的不断提高,宇宙线的测量精度也越来越高,而且精确的观测结果也揭示出一些此前没有发现或者预见到的新现象,有效地扩大了人们认识的宇宙范围。相信通过进一步的努力,诸如暗物质本质这样重大问题的答案或许也将逐渐浮出水面。

参考文献:

- [1] Carlson P. Talk at 32nd ICRC, Beijing, 2011
- [2] Hess V F. PhZ, 1912, 13: 1804
- [3] Anderson C D. PhRv, 1933, 43: 491
- [4] Anderson C D, Neddermeyer S H. PhRv, 1936, 50: 263
- [5] Rochester G D, Butler C C. Nature, 1947, 160: 855
- [6] Lattes C M G, Occhialini G P S, Powell C F. Nature, 1947, 160: 453
- [7] Chang W Y. Rev Mod Phys, 1949, 21: 166
- [8] Hopper V D, Biswas S. PhRv, 1950, 80: 1099
- [9] Rossi B B. Ricerca Scientifica, 1934, 5: 579
- [10] Auger P V. Rev Mod Phys, 1939, 11: 288
- [11] Bhabha H J, Heitler W. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1937, 159: 432
- [12] Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. PhRvL, 2015, 114: 171103
- [13] Yoon Y S, Ahn H S, Allison P S, et al. ApJ, 2011, 728: 122
- [14] Panov A D, Adams J H, Ahn H S, et al. Bull Russ Acad Sci Phys, 2009, 73: 564
- [15] Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. PhRvL, 2015, 115: 211101
- [16] Aguilar M, Ali Cavasonza L, Alpat B, et al. PhRvL, 2017, 119: 251101
- [17] Aguilar M, Aisa D, Alvino A, et al. PhRvL, 2014, 113: 121102
- [18] Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. Nature, 2008, 456: 362

-
- [19] Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. *Nature*, 2017, 552: 63
- [20] Aharonian F, Akhperjanian A G, Barres de Almeida U, et al. *PhRvL*, 2008, 101: 261104
- [21] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. *PhRvL*, 2010, 105: 121101
- [22] Aguilar M, Ali Cavazonza L, Alpat B, et al. *PhRvL*, 2016, 117: 091103
- [23] Ackermann M, Ajello M, Albert A, et al. *ApJ*, 2015, 799: 86
- [24] Abbasi R U, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. *PhRvD*, 2011, 83: 012001
- [25] Nagano M, Hara T, Hatano Y, et al. *JPhG*, 1984, 10: 1295
- [26] Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. *ApJ*, 2008, 678: 1165
- [27] Shinozaki K, Teshima M. *Nucl Phys B Proc Suppl*, 2004, 136: 18
- [28] Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, et al. *PhRvL*, 2004, 92: 151101
- [29] Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, et al. *PhRvL*, 2008, 100: 101101
- [30] Yamamoto T. *ICRC*, 2008, 4: 335
- [31] Maurin D, Melot F, Taillet R. *A&A*, 2014, 569: A32
- [32] Derbina V A, Galkin V I, Hareyama M, et al. *ApJ*, 2005, 628: L41
- [33] Ahn H S, Allison P, Bagliesi M G, et al. *ApJ*, 2010, 714: L89
- [34] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. *Nature*, 2009, 458: 607
- [35] Fan Y Z, Zhang B, Chang J. *IJMPD*, 2010, 19: 2011
- [36] Bi X J, Yin P F, Yuan Q. *Front Phys*, 2013, 8: 794
- [37] Abeysekara A U, Albert A, Alfaro R, et al. *Science*, 2017, 358: 911
- [38] Fang K, Bi X J, Yin P F, et al. *ApJ*, 2017, 863: 30
- [39] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. *PhRvD*, 2010, 82: 092004
- [40] Serpico P. *APh*, 2012, 39: 2
- [41] Aguilar M, Alcaraz J, Allaby J, et al. *PhLB*, 2007, 646: 145
- [42] Barwick S W, Beatty J J, Bhattacharyya A, et al. *ApJ*, 1997, 482: L191
- [43] Coutu S, Beach A S, Beatty J J, et al. *ICRC*, 2001, 5: 1687
- [44] Golden R L, Stochaj S J, Stephens S A, et al. *ApJ*, 1996, 457: L103
- [45] Boezio M, Carlson P, Francke T, et al. *ApJ*, 2000, 532: 653
- [46] Accardo L, Aguilar M, Aisa D, et al. *PhRvL*, 2014, 113: 121101
- [47] Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. *PhRvL*, 2012, 108: 011103
- [48] Cummings A C, Stone E C, Heikkila B C, et al. *ApJ*, 2016, 831: 18
- [49] Du Vernois M A, Barwick S W, Beatty J J, et al. *ApJ*, 2001, 559: 296
- [50] Torii S, Tamura T, Tateyama N, et al. *ApJ*, 2001, 559: 973
- [51] Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. *PhRvL*, 2014, 113: 221102
- [52] Abdollahi S, Ackermann M, Ajello M, et al. *PhRvD*, 2017, 95: 082007
- [53] Adriani O, Akaike Y, Asano K, et al. *PhRvL*, 2017, 119: 181101
- [54] Borla Tridon D, Colin P, Cossio L, et al. 2011, arXiv:1110.4008
- [55] Staszak D. arXiv: 1508.06597, 2015
- [56] Orito S, Maeno T, Matsunaga H, et al. *PhRvL*, 2000, 84: 1078
- [57] Asaoka Y, Shikaze Y, Abe K, et al. *PhRvL*, 2002, 88: 051101
- [58] Beach A S, Beatty J J, Bhattacharyya A, et al. *PhRvL*, 2001, 87: 271101
- [59] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. *Science*, 2011, 332: 69
- [60] Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. *PhRvL*, 2016, 117: 231102
- [61] Yuan Q, Lin S J, Fang K, et al. *PhRvD*, 2017, 95: 083007
- [62] Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. *PhRvL*, 2018, 120: 021101
- [63] Guo Y Q, Yuan Q. *PhRvD*, 2018, 97: 063008
- [64] Liu W, Yao Y H, Guo Y Q. *ApJ*, 2018, 869: 176
- [65] Strong A W, Moskalenko I V, Ptuskin V S. *ARNPS*, 2007, 57: 285
- [66] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. *ApJ*, 2012, 750: 3
- [67] Gleeson L J, Axford W I. *ApJ*, 1968, 154: 1011

- [68] Strong A W, Moskalenko I V. ApJ, 1998, 509: 212
[69] Evoli C, Gaggero D, Grasso D, et al. JCAP, 2008, 10: 018
[70] Chang J, Ambrosi G, An Q, et al. APh, 2017, 95: 6
[71] Aharonian F, Akhperjanian A G, Anton G, et al. A&A, 2009, 508: 561
[72] Fang K, Bi X J, Yin P F. ApJ, 2018, 854: 57
[73] Yuan Q, Feng L, Yin P F. et al. 2017, arXiv:1711.10989
[74] Zhang S N, Adriani O, Albergo S, et al. SPIE, 2014, 9144: 91440X

Overview of Direct Measurements of Cosmic Rays

PENG Xiao-yan, YUAN Qiang

(Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The history of cosmic ray studies can be traced back to the 1910s when Hess and other scientists first discovered them. Cosmic rays are very important laboratories of particle physics, and led to many important discoveries of fundamental particles such as positrons, muons, pions, and a series of strange particles. Cosmic rays are nowadays key probes of physics at the extremely high energy end and dark matter particles. A brief review about the history and recent progresses of direct observations of cosmic rays is presented. In recent years, new space-borne experiments such as PAMELA and AMS-02, as well as a few balloon-borne experiments, have measured the energy spectra of cosmic rays very precisely and revealed several new features/anomalies. Remarkable excesses of the positron fraction in the total electron plus positron fluxes have been observed, which could be due to dark matter particle annihilation/decay or astrophysical pulsars. The cosmic ray antiprotons, which are expected to have the same secondary origin as that of positrons, do not show significant excesses compared with the background prediction. This result also constrains the modelling of the positron excesses. In addition, spectral hardenings above a few hundred GeV of cosmic ray nuclei have been revealed. Such results have important and interesting implications on our understandings of the origin, acceleration, and propagation of cosmic rays. In particular, China has launched the Dark Matter Particle Explorer (DAMPE) to indirectly search for dark matter and explore the high-energy Universe in the TeV window. Most recently, the DAMPE collaboration reported new measurements of the cosmic ray electron plus positron fluxes up to about 5 TeV with very high precision. The DAMPE data revealed clearly a spectral break around TeV. Possible fine structures of the electron plus positron spectra can be critically addressed with the accumulation of data in the coming years.

Key words: cosmic rays; high energy astrophysics; space detection; dark matter