宇宙线起源中物理学前沿问题

胡红波*, 郭义庆

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

*联系人, E-mail: huhb@ihep.ac.cn

2015-07-01 收稿, 2015-07-31 修回, 2015-07-31 接受, 2015-10-08 网络版发表

国家自然科学基金(11135010)资助项目

摘要 宇宙线是由奥地利物理学家赫斯在1912年高空气球实验中发现的。此后, 人们在宇宙线的研究中发现了众多的基本粒子及其相互作用规律, 中微子振荡的最早发现也来自太阳中微子和大气中微子实验。迄今为止, 人们所知道的最能量的粒子也来自于宇宙线的观测。宇宙线的起源、加速和传播是一个世纪科学问题, 从中诞生了高能伽玛天文学、高能中微子天文学和极高能宇宙线天文学。目前, 人们已经发现了为数众多的电子加速源, 但作为宇宙线成分中最为主要的核子, 其起源问题依然没有解决。精确测量宇宙线核子的成分和能谱, 观测和研究高能伽玛射线、高能中微子及极高能宇宙线的产生地点和相关机制, 有助于解决宇宙线的起源问题。此外, 这些研究也是间接探测暗物质粒子, 研究宇宙演化和新物理学规律的重要手段。

关键词 宇宙线, 伽玛射线, 中微子

1 宇宙线的发现、历史回顾和天体粒子物理的兴起

1912年, 奥地利物理学家赫斯乘坐热气球上升到5350多米的高空。在6小时飞行当中, 通过对电离室中电流的测量, 发现高空空气的电离率是地面的数倍, 从而说明这种空气中的电离现象是由地球外边的“辐射”(后被称为宇宙线)所致。值得一提的是, 1913~1914年, 德国物理学家柯尔霍斯特重复了赫斯的实验, 1914年的气球飞行竟达到了9000 m的海拔高度。赫斯实验后来被人们认为是标志宇宙线发现的实验, 高海拔及空间实验也从此与宇宙线研究结下了不解之缘。

从宇宙线发现到20世纪50年代人们将第一台同步加速器用于高能粒子物理实验之间的一个相当长的时间里, 人们在宇宙线的研究中发现了许多基本粒子, 带来了粒子物理学的飞速发展^[1]。1932年, 安

德森从宇宙线中发现了正电子, 使得我们对于正、反物质世界的认识向前跨越了极大的一步; 1937年, 安德森和尼德迈尔利用云雾室又在宇宙线中发现了 μ 子; 1947年, 鲍威尔在高空核乳胶中发现了汤川秀树于1934年预言的能传递强相互作用的 π 介子。

作为联系微观粒子和宏观宇宙的桥梁, 宇宙线研究既对粒子物理也对天体物理做出了重要贡献。一个突出的例子, 就是对太阳中微子和超新星中微子的观测的贡献。在长达24年的观测中, 雷蒙德·戴维斯发现了太阳中微子的缺失, 为研究不同味道中微子之间的振荡效应做出了卓越贡献^[2]; 小柴昌俊所领导的神冈实验除了证实太阳中微子缺失, 还发现了超新星SN1987A爆炸时所发出的中微子, 直接验证了大质量恒星演化晚期形成中子星的理论^[3], 超级神冈实验还于20世纪末发现了大气中微子的振荡。

随着研究领域的不断扩大和拓展, 2013年10月, 国际纯物理和应用物理联合会(IUPAP)正式批准将所

引用格式: 胡红波, 郭义庆. 宇宙线起源中物理学前沿问题. 科学通报, 2016, 61: 1188-1209

Hu H B, Guo Y Q. Frontier physics problems related to the origin of cosmic rays (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1188-1209, doi: 10.1360/N972015-00702

属的宇宙线专业委员会(C4)的名称由宇宙线更改为天体粒子物理。

从天体的角度看,宇宙线来自于太阳的高能活动和各类天体的演化,与星际介质、磁场,与星系际介质、磁场,与微波背景等发生相互作用,星系形成早期的高能宇宙线会影响一些元素丰度的演化,近来的研究还表明宇宙线在星系形成过程中可能也发挥作用^[4-6]。

从粒子的角度看,宇宙线的测量和研究对象是各种稳定的高能粒子和高能原子核,这些粒子可能直接来自宇宙中各类天体的演化,或来自传播过程中与环境物质、辐射场作用的产物,或可能来自宇宙演化的早期,比如未知的暗物质粒子、磁单极、轴子等超出标准物理模型的粒子。

从所涉及的物理问题看,宇宙线研究包括宇宙线起源、加速和传播这3个基本问题,此外,宇宙线所具有的高能及在宇宙尺度上进行传播的特点又为研究新的物理规律提供了非常独特的实验室,而且,宇宙线与空间物理、大气物理、生物物理方面也具有交叉和应用的广泛意义。

2 宇宙线的成分及能谱

宇宙线的探测主要有空间(卫星和气球)和地面(包括冰下和水下)两大类的实验手段。空间实验因有效面积小,难以探测到随能量增加流量急剧下降的高能宇宙线粒子,但又因位于大气层之上,空间实验直接探测到的是原初的宇宙线,可得到原初成分的准确信息。地面实验则通过探测宇宙线和大气相互作用后产生的次级粒子,有关原初粒子种类的信息需要借助于相互作用模型,因而具有较大的模型依赖和不确定性。目前来讲,空间实验覆盖了~MeV到100 TeV能区,地面实验覆盖~TeV到100 EeV能区,其重叠的能区则为两类实验手段提供相互检验。

空间探测的结果表明,宇宙线主要由亚原子粒子构成,含量最多的是质子(86%),其次是氦核(13%),随能量的增加,重核成分的比率有很大提高^[7]。以碳元素的丰度来归一的话,那么宇宙线中从碳到硅的元素丰度和太阳系的相比差不了多少,铁的丰度也几乎一样,但宇宙线中碳之前的锂、铍、硼元素的丰度以及铁之前的从氯到锰的元素丰度则远高于太阳系里相应元素的丰度(图1)。此外,²²Ne与²⁰Ne的丰度比是太阳系的120倍,这表明可大量产生

图1 (网络版彩色)太阳系和宇宙线各个元素丰度比较^[8]。其中太阳系各个元素丰度来自于文献[9],宇宙线丰度来自于文献[10],质子和氦核丰度来自于文献[11,12]

Figure 1 (Color online) Comparison of Solar system and cosmic-ray elemental abundances^[8]. Nuclear abundances of solar system are from ref. [9], Nuclear abundances of Cosmic Rays are from ref. [10], protons and helium are from refs. [11,12]

²²Ne的Wolf-Rayet(WR)星应该显著贡献银河宇宙线(总量~2%,重元素~25%)^[13]。考虑到⁵⁹Ni只能通过电子俘获的辐射衰变产生⁵⁹Co,半衰期是 7.6×10^4 年,而人们在GeV能区宇宙线中能观测到⁵⁹Co,却没有测量到⁵⁹Ni,因此可以推断这些宇宙线的加速延迟了 10^5 年以上的時間^[14]。众所周知,碳、氮、氧、硅和铁等都是恒星演化过程中大量产生的原子核,它们在宇宙线中的高丰度表明宇宙线很可能来源于恒星演化終了时的环境,而碳-氮-氧、铁原子序数之前的高元素丰度则表明了宇宙线在到达地球之前经历了一个相当长的传播过程,在此过程中碳和铁等原初宇宙线通过和星际空间的物质,主要是氢发生碰撞碎裂成了较轻的元素。人们正是通过对诸如硼、碳元素的比例测量以及对长寿命放射性同位素的丰度测量推算出宇宙线在到达地球之前大约传播了一千万年的时间^[15]。除原子核外,宇宙线中还有正负电子、伽玛射线、中微子(图2)乃至其他未知的粒子,比如人们正在寻找的暗物质粒子等。

宇宙线粒子的能量主要分布在 $10^9 \sim 10^{20}$ eV量级之间。在能量升高11个量级的情况下,宇宙线的流强下降了约30个量级,能谱基本表现为幂率谱(图2)。通过空间实验人们发现,直到~PeV能区,不同核子的宇宙线能谱都表现为幂率谱,但不同核子的幂

图2 (网络版彩色)宇宙线能谱: 宇宙线全粒子谱来自于实验观测^[16], Tibet-AS_γ^[17], KASCADE^[18], Akeno^[19], AGASA^[20], HiResI^[21], HiResII^[22], AUGER^[23], TA^[24], IceCube^[25]; 质子成分能谱观测来自于AMS01^[26], AMS02^[27], BESS^[28], ATIC^[29], CREAM^[30], PAMELA^[31], RunJob^[32], CAPRICE^[33], JACEE^[34]; 轻核成分(p+He)观测数据来自于ARGO-YBJ^[35], ARGO-WFCTA^[36]; 正负电子能谱测量来自于AMS02^[37], AMS01^[38], PAMELA^[39], HEAT^[40], CAPRICE^[41], ATIC^[42], Fermi-LAT^[43], HESS^[44], BETS^[45]; 反质子实验观测来自于PAMELA^[46], AMS01^[47], BESS^[48,49], CAPRICE^[50]; 全天区的伽玛射线观测来自于FermiLAT^[51]; 大气中微子观测来自于IceCube^[52,53], AMANDA^[54], ANTARES^[55], FREJUS^[56]; 天体中微子观测数据来自于文献[57,58]

Figure 2 (Color online) The spectra of cosmic rays: the observations of all particle spectrum from PROTON^[16], Tibet-AS_γ^[17], KASCADE^[18], Akeno^[19], AGASA^[20], HiResI^[21], HiResII^[22], AUGER^[23], TA^[24], IceCube^[25]; the observations of proton spectrum from AMS01^[26], AMS02^[27], BESS^[28], ATIC^[29], CREAM^[30], PAMELA^[31], RunJob^[32], CAPRICE^[33], JACEE^[34]; the observation of light nuclear spectrum (p+He) from ARGO-YBJ^[35], ARGO-WFCTA^[36]; the observations of positron and electron spectrum from AMS02^[37], AMS01^[38], PAMELA^[39], HEAT^[40], CAPRICE^[41], ATIC^[42], Fermi-LAT^[43], HESS^[44], BETS^[45]; the observation of antiproton from PAMELA^[46], AMS01^[47], BESS^[48,49], CAPRICE^[50]; the observation of allsky γ -rays from FermiLAT^[51]; the observations of atmospheric neutrino from IceCube^[52,53], AMANDA^[54], ANTARES^[55], FREJUS^[56]; the observations of astrophysical objects from refs. [57,58]

指数略有差别。总的来讲,质子的能谱比其他核子要软一些^[28],这导致在能谱的高能时,重核比例逐渐增加,但质子谱较软的原因还不清楚,可能是质子与其他核在具不同加速能力的源上的比率各有不同。近年来,ATIC, CREAM和PAMELA空间实验发现在刚度为200 GV附近,宇宙线的能谱可能变硬^[28-31],这一实验结果对传统的传播模型提出了挑战并引起了粒子天体物理学家的关注。主要的理论模型包括:太阳系附近有个超新星源^[59];宇宙线与加速激波发生了作用^[60];多个加速源叠加^[61,62];宇宙线传播效应^[63,64]。

AMS02的初步结果表明这个拐折是存在的¹⁾,期待AMS02正式结果的发表。另一方面,地面实验发现,在PeV (“膝”)^[65]、100 PeV(第二个“膝”)^[18]、EeV(“踝”)^[66]和几十EeV(GZK截断)^[67,68]等能区,能谱也会出现细微的转折变化。大家普遍认为“膝”及第二个“膝”来源于银河宇宙线加速源的能量加速极限^[69]。“膝”到第二个“膝”之间,中间质量的核及重核的比例可能渐次开始占据主导^[70,71]。“膝”(及第二个“膝”)与“踝”之间是银河宇宙线向河外宇宙线过渡的能区,宇宙线的成分又逐渐变轻。GZK截断这个能量

1) Ting C C, 2015, AMSDarys at CERN(丁肇中, 2015年4月15日, AMSDays at CERN)

区间的成分中可能还有重核的贡献, HiRES, AUGER和TA的结果还不完全一致^[21~24], 需要更多的研究. 迄今为止, 观测到的宇宙线粒子的最高能量已达到 3×10^{20} eV^[72], 是最大的粒子加速器LHC所能加速粒子能量的千万倍. 宇宙线是如何加速的, 尤其是如何达到这样高的能量的, 是一个非常吸引人的问题.

3 宇宙线起源、加速和传播的“标准模型”

宇宙线粒子来自哪里, 它们是如何被加速, 又是怎样在太空中传播的, 一直是宇宙线研究中的3个根本问题, 至今尚无明确答案. 但根据百年来的实验和理论研究, 人们已普遍接受这样的加速机制, 即宇宙线起源于剧烈的天体演化(比如超新星爆炸或伴生的黑洞吸积物质喷流等)所产生的激波加速^[73~76]. 带电粒子与激波碰撞获得能量, 加速后的粒子有机会逃逸出加速区, 未逃逸的则有机会再次碰撞和加速, 由此形成幂率能谱. 激波加速本质上是电场加速, 电场来自变化的磁场.

在激波加速理论里, 原初宇宙线的能谱是指数约为-2的幂率能谱^[77]. 加速源的几何尺度及磁场强度决定了可加速的最高宇宙线粒子的能量^[78], 在非线性激波加速理论中, 宇宙线的非稳定流动可以激发湍动磁场, 使加速区的磁场增强, 从而增大可加速的最高宇宙线能量^[79,80]. 这样的磁场增强现象已经在超新星遗迹中被观测到, 从而使得超新星遗迹的最大加速能量达到PeV/电荷. 非线性激波加速理论可以很好地描述不同核子的能谱及其“膝”(图3), 但 Hillas^[69]发现, 要能描述直至“踝”区能量的全粒子能谱, 银河宇宙线在“膝”之上还需要再加一个高能的成分(图4). 我们在后面还会回到这个讨论上来.

在传播过程中, 宇宙线的运动受规则磁场的约束和无规磁场的散射, 无规磁场的效应可以用扩散系数来描述. 无规磁场在不同空间尺度上的强度不同, 从而导致扩散系数随能量有一个大约处于-1/3到-0.6 间的幂率变化^[81,82], 最终使我们在地球上观测到的宇宙线具有近似-2.73的幂率谱. 此外, 宇宙线在传播过程中还会和星际尘埃及气体物质发生反应, 产生次级的宇宙线粒子, 与原初宇宙线一起开始新的传播. 银河宇宙线在传播过程中受星际磁场的影响, 具有大尺度的整体运动或中小尺度上的流动, 在观测上表现为宇宙线强度的大尺度或中小尺度的各向异性. 基于扩散方程的传播模型已经有了多个版本的

数值计算程序包, 其中比较经典的有 GALPROP (<http://galprop.stanford.edu/>), 近年来, DRAGON(<http://www.dragonproject.org/Home.html>)在 GALPROP 的基础上把扩散系数的描述从2维扩展到了3维. 通过这些计算宇宙线传播的程序包, 人们还可以放入暗物质粒子湮灭和衰变的模型, 从而可以与实验观测进行比较.

图3 (网络版彩色)非线性扩散激波加速理论解释宇宙线能谱^[79,80]

Figure 3 (Color online) The explanation of the spectrum by the physical mechanism of non-line diffusive shock acceleration^[79,80]

图4 银河宇宙线至少应该有两个成分^[69]

Figure 4 Two components of galactic cosmic rays is required to explain the all particle spectrum^[69]

能量小于EeV的宇宙线, 通常被认为起源于银河系内. 考虑维持银河宇宙线总功率所需要的能量注入率, Baade等人^[83]于20世纪30年代提出了超新星遗迹是银河系的宇宙线主要加速源理论. 随着多波段观测的不断进展, 人们从超新星遗迹W44, IC443的伽玛能谱上看到了期待已久的 π^0 状结构(图5^[84]), 为宇宙线核子的超新星遗迹加速理论提供了重要的证据. 此外, HESS实验观测到来自银心处的弥散伽玛与分子云的物质分布有相同的空间形态, 且有较硬的能谱, 推测这些伽玛射线来自史前超新星爆炸加速的宇宙线与分子云的相互作用^[85]. Fermi-LAT和地面实验(MILAGRO, ARGO-YBJ, HESS等)的观测还表明银盘上存在弥散和扩展的高能伽玛射线^[86-89], 也表明这些区域可能存在宇宙线的强子源. Ice Cube观测到了37个能量位于30 TeV~2 PeV之间的高能中微子, 扣除所预期的15个大气中微子和大气 μ 子的贡献后, 超出的中微子有22个, 显著性达到了5.7个标准偏差, 所观测的空间分布与各向同性的预期不矛盾^[57]. 这些超出的中微子不能用标准传播模型中的银河宇宙线与星际介质的相互作用来解释^[90], 但它们当中的一些很可能来自正在加速的源区及其扩散到附近环境中的宇宙线^[91-93]. 从理论上讲, 能加速电子的加速源也应该同时能加速核子. 根据多波段观测, 银河系的电子源种类繁多, 除超新星遗迹外, 还有脉冲星、X射线双星、微类星体、恒星形成区、银心黑洞等.

能量大于EeV的宇宙线(极高能宇宙线), 不能被银河系的磁场束缚, 人们一般认为它们来自银河系

外, 主要加速模型包括: 超大质量黑洞吸积周围物质所伴生的喷流激波加速(如活动星系核AGN)^[94-97]; 基于火球模型的伽玛射线暴(GRB)内激波加速^[98,99]; 中子星强磁场层加速^[100]. 关于EeV能区“踝”的结构形成原因, 目前还存在争论, Wibig等人^[101,102]提出“踝”是银河宇宙线与河外宇宙线的分界线. 但是Berezisky等人^[103,104]认为银河宇宙线到河外宇宙线过渡能区低于“踝”的位置, “踝结构”主要是因为河外高能宇宙线在传播过程中会和微波背景光子发生产生正负电子对的反应, 形成了“踝”结构. 能量超过50 EeV的质子则可以通过和微波背景光子的反应形成核子共振态, 然后衰变为核子和 π 介子, 从而损失原先的能量, 使能谱快速下降, 这被称为GZK截断^[67,68]. GZK截断现在已经在实验中得到了验证, 如果这些宇宙线成分主要为质子的话, GZK的存在表明其来源于~100 Mpc范围内. 但是对于这些甚高能宇宙线成分是否是质子, HiRes/TA与AUGER的观测目前还存在争议. 另外, 还有一个可能的解释, 即这个截断只是由于加速源的加速能力所致. 要搞清楚这些问题, 找到它们的起源非常重要. 由于星系际磁场强度使极高能宇宙线粒子的运动方向偏转很小, 通常的模型预期不过几度, 因此极高能宇宙线粒子的方向与活动星系核及GRB的关联分析以及极高能宇宙线的各向异性可以用来研究和发现它们的起源.

总而言之, 宇宙线的成分、能谱及各向异性研究是研究宇宙线起源、加速的传统方法. 而极高能宇宙线天文, 伽玛天文学和中微子天文学是这些研究的重要发展.

图5 (网络版彩色) π^0 峰(π^0 bump)位于~100 MeV能量^[84]

Figure 5 (Color online) The characteristic peak of π^0 decay at ~100 MeV^[84]

4 宇宙线精确测量时代的一些新进展

4.1 TeV以下能区

近年来,随着新技术的应用和新实验的开展,宇宙线实验开始进入精确的时代. PAMELA实验的一个重要发现是宇宙线正电子在10 GeV以上能区出现超出(图6(a)^[39]), 同期ATIC实验也看到了类似的结果(图6(b)^[42]). 这些超出的来源可能来自暗物质粒子的湮灭、衰变^[105-109], 也可能来自天体过程, 比如临近的脉冲星^[110-114], 或来自加速区的宇宙线与背景光子的正负电子对的产生过程^[115]. 随后, PAMELA实验又观测到质子和氦核的能谱在200 GeV/核子处变硬^[31], 这些现象也出现在ATIC^[29], CREAM实验结果

里, CREAM实验甚至还看到了所有其他核子能谱在约200 GeV/核子处都有相似的变硬现象(图7).

2010年, AMS02成功发射升空. 2013年初, AMS02发表了正电子与总电子比的结果, 肯定了PAMELA的早期结果^[37], 同时也使宇宙线传播模型和众多的正电子超出模型面临高精度的检验. 从AMS02实验在国际会议上所发表的初步结果来看, 直到TV的刚度, 质子和氦核的能谱都表现为很好的幂率行为, 没有观测到200 GeV/核子处的变硬现象^[27]. AMS02和早先实验结果的差异可能反映了不同实验间的系统误差, 要确定能谱是否及在什么能量发生了变化还需要更为仔细的测量, 但是最近在CERN召开的会议上, 发现在~200 GV处存在拐折(图7).

图6 (网络版彩色)(a) 正电子能谱; (b) 负电子能谱. 实验测量数据来自于: AMS02^[37], ATIC^[42], Fermi-LAT^[43], HESS^[44], AMS01^[38], HEAT^[40], CAPRICE^[41], BETS^[45]

Figure 6 (Color online) (a) The spectrum of positron; (b) the spectrum of electron. The observations come from AMS02^[37], PAMELA^[39], ATIC^[42], Fermi-LAT^[43], HESS^[44], AMS01^[38], HEAT^[40], CAPRICE^[41], BETS^[45]

图7 (网络版彩色)(a) 质子能谱; (b) 氦核能谱. 实验测量数据来自于: ATIC^[29], CREAM^[30], PAMELA^[31], AMS02 2015^[2]

Figure 7 (Color online) (a) The spectrum of proton; (b) the spectrum of Helium. The observations from ATIC^[29], CREAM^[30], PAMELA^[31], AMS02 2015^[2]

值得强调的是,在史无前例的测量精度下,AMS02证实了前述的正电子超出^[37](图6),极大地推动了间接寻找暗物质粒子的研究和宇宙线加速、传播问题的研究.另外,AMS02初步结果显示正反质子比在几百GeV没有像传播模型预期那样随能量快速下降,而是平缓变化,而B/C测量在高能处误差较大,需要进一步验证(图8).正电子超出的天体物理起源仍是一个很可能的方案^[134,135].天体模型主要有临近脉冲星起源,超新星起源,或它们的联合贡献^[110-114],另外的贡献可能来自于银盘里刚加速不久的新鲜宇宙线与气体的强相互作用^[93],此外加速源上如果有较强的辐射场,高能宇宙线与背景光子的电子对产生也会有所贡献^[115].随着AMS02更多其他粒子谱及各向异性结果的发表,我们期待各种模型可以得到更为严格的检验.

4.2 “膝”前区、“膝”区及“膝”后区

宇宙线能谱的“膝”位于约4 PeV能量处,是幂率谱上最显著的一个拐折,“膝”之前幂率约-2.73,之后约是-3.1,“膝”最早发现于1958年^[65],成因至今是个谜.难以确定其形成机制的一个重要原因就是在这个能量区域,不同宇宙线成分的能谱一直没有精确测量到.在此能量处,宇宙线流量大约是每平方米每

年一个粒子,因此“膝”是卫星实验和气球实验的能量上限,因为这些实验的有效面积不超过一平方米,卫星运行时间是几年,气球实验一般几周,最长数月.另一方面,尽管地面实验没有统计量的困难,但测量结果仍存在较大的系统误差.这是因为通过地面测量到的次级粒子信息反推原初粒子信息时,需要借助于强相互作用模型,而这些模型的参数是通过低能加速器实验确定,外推到高能区间后存在一定的误差.“膝”前区的直接探测具有重要的意义,首先地面宇宙线实验无法在此能量区间有效探测原初成分,需要直接探测,此外,直接测量的结果可为地面“间接”实验测量“膝”区提供了重要的比对和标定作用.前面已经提到,在TeV能区,CREAM,ATIC和PAMELA的结果表明宇宙线能谱在200 GeV/核子处变硬,由于所有实验(包括AMS02)都发现质子谱比氦谱软,幂指数大概小了0.1,如此外推,在几十TeV时,氦核的流强就会超过质子流强,如果氦核的能谱保持单一幂率,那么全粒子能谱就会比所测到的-2.73要硬,从这里推断,氦核能谱在“膝”之前应该变软.是否真是这样的,需要等待新的实验结果.

多年来,地面EAS实验开展了多种方式的测量和研究.HESS和VERITAS实验采用了直接切伦科夫光的方法,测量了100 TeV能量附近的铁核能谱^[136].

图8 (网络版彩色)(a) 反质子与质子比率; (b) 硼碳比率. 关于 $\bar{p}/p$ 的实验观测来自于: PAMELA 2010^[116], PAMELA 2014^[117], BESS 1995-1997^[118], BESS 1999^[119], CAPRICE 1994^[120], CAPRICE 1998^[121], HEAT^[122]. 关于B/C实验观测来自于: AMS02 2013^[3], AMS02 2015^[4], PAMELA^[123], RUNJOB^[124], Juliusson^[125], Dwyer^[126], Orth^[127], Simon^[128], HEAO-3^[129], Maehl^[130], Voyager^[131], Ulysses^[132], ACE^[133]. **Figure 8** (Color online) (a) The ratio of $\bar{p}/p$; (b) the ratio of B/C. The observations of $\bar{p}/p$ come from PAMELA 2010^[116], PAMELA 2014^[117], BESS 1995-1997^[118], BESS 1999^[119], CAPRICE 1994^[120], CAPRICE 1998^[121], HEAT^[122]. The ratio of B/C comes from AMS02 2013^[3], AMS02 2015^[4], PAMELA^[123], RUNJOB^[124], Juliusson^[125], Dwyer^[126], Orth^[127], Simon^[128], HEAO-3^[129], Maehl^[130], Voyager^[131], Ulysses^[132], ACE^[133].

3) Aguilar M, 2013, CERN Courier

4) Oliva A, 2013, CERN Courier

因为铁核有26个单位的电荷,在进入大气层发生级联反应之前的极稀薄的气体里会产生较强的切伦科夫光(与次级粒子产生的切伦科夫光相比,被称为直接的切伦科夫光),用这种办法可以挑选出具有大电荷的铁元素,从而摆脱通常EAS实验遇到的强相互作用模型问题.

传统的地面阵列或通过测量次级伽玛和电子在观测面上的横向分布,或通过测量 μ 子数量来判断原初粒子种类,位于羊八井的AS γ 和ARGO-YBJ实验都采用前一个方法,而KASCADE和GRAPSE-3实验采用后一种方法.以轻核成分的能谱测量为例,图9显示了不同实验方法和不同强相互作用模型所得到的结果之间的比较,可以看出不同实验间能谱测量有较大差别,差别原因主要来自于两个方面:能量定标及强相互作用模型的精度.另外,从图9还可以看出即使同一个实验使用不同强相互作用模型,其结果也存在较大差别,比如KASCADE及Tibet AS γ 实验都使用了QGSJET及SIBYLL模型,不同模型导致测量结果的差别在10%~30%之间.值得注意的是,大气切伦科夫光与EAS阵列联合实验方案(ARGO/WFCTA)显示出较小的模型依赖,来自模型的系统误差估计在4.2%^[137].该方法是LHAASO项目将采取的一个主要测量手段,又考虑到LHAASO的有效面积将有很大的增加,我们预期在膝及其前后更宽阔的能区内,宇宙线的成分和能谱测量精度有很大的提高.尽管不同实验测量“膝”区成分的结果之间存在差异,但在对不同实验的测量能量给与适当的标定校准(不同实验的绝对能量间有约20%以内的相互

差异)之后,不同实验的全粒子能谱却能很好的一致.前面已经谈到,人们通常认为“膝”起源于银河系宇宙线加速源的加速极限,扩散激波加速可以很好地解释宇宙线能谱的“膝”.另一种可能的解释是“膝”与传播过程相关. PeV宇宙线的拉莫半径约是1 pc,如果无规磁场的相干长度约是1 pc,那么PeV以上和以下宇宙线的扩散系数就会有一个突变,这样的突变也可以很好地解释宇宙线能谱的“膝”(图10^[141]).

需要特别指出的是,在“膝”这个拐点上,绝大部分的实验还看到了能谱“尖锐”的转折(图11^[142]).这个结果之所以重要,是因为宇宙线的加速理论和传播理论并不会预期尖锐“膝”的出现.我们知道宇宙线的源多种多样,每种不同的源,甚至每个不同的

图9 (网络版彩色)轻核成分膝区能谱测量结果. 实验观测来自于: ARGO/WFCTA^[36,137], ARGO-YBJ^[35,138], Tibet-AS γ ^[139], CREAM^[30], KASCADE^[140]

Figure 9 (Color online) The measurements of cosmic ray knee for light nuclear. The observations come from ARGO/WFCTA^[36,137], ARGO-YBJ^[35,138], Tibet-AS γ ^[139], CREAM^[30], KASCADE^[140]

图10 (网络版彩色)传播模型可以描述“膝”的转折^[141]

Figure 10 (Color online) The knee structure can be explained by the propagation model^[141]

图 11 大多数的实验测出尖锐的“膝”^[142]

Figure 11 The sharp knee structure was observed by the ground-based experiments^[142]

源，它们的最高加速能量位置应该都是不同的，这些具有不同“膝”的能谱叠加在一起是很难给出一个尖锐的“膝”的。我们也很难用宇宙线的传播理论来解释尖锐的“膝”，即便扩散系数有一个快速的转折，扩散过程的随机和平均的效应也会使这个转折表现的光滑，不再尖锐，这也是一个需要研究的问题。

关于尖锐的“膝”的起源问题，Erlykin 和 Wolfendale^[142]提出了“单一源”的模型。模型认为太阳系附近(比如几百光年)可能存在一个较强的源，正是因为这个源的“膝”最显著的被我们测量到了，才使得我们从整体上看到一个“尖锐”的“膝”。理论上讲，如果这个源离我们不很近，但却很强，那么也会有相似的结论。此外，如果存在一个像Ia类型的超新星那样一类标准的源，每个这样的源具有位置完全相同的转折，那么也能解释这个结果。在这些模型里，“尖锐”的特点均来自于加速过程，不过其中的一个或一种所起的作用最大。然而，在当前的加速理论

中，如何形成一个“尖锐”的膝也并非显而易见的，还是一个需要研究的问题。

有些理论研究表明，如果加速区域存在较强的背景光子场，那么高能电子会因为与背景光子的作用所导致的能量损失造成一个快速的截断。在这样的环境下，宇宙线核子也可能因为正负电子对的产生过程损失能量而产生一个尖锐的“膝”^[115]。如果背景光子的温度在1 eV，接近通常的可见光波段，那么这个过程产生的“膝”则正好发生在PeV能量。这个过程另外一个作用是产生大量的TeV能量的正负电子对，可作为正负电子超出的一个来源。一个可能的例子是年轻的脉冲星，理论研究表明它们可以在一年的时间里把宇宙线加速到上百PeV，而且我们知道超新星爆发后数月的时间里，环境中会有很强的光子场，这个情况下是可以形成“尖锐”的膝^[115]。另外一个可能的例子是银河系的中心，尽管银心目前相当安静，不很活跃，但根据2010年发现的被称为

Fermi Bubble的位于银心上下的巨大的伽玛射线泡泡^[143], 可以判断银心在千万年前可能有一次大的爆发, 银心的很多其他观测也都支持银心发生过大爆炸的事件. 如果在爆发时存在强的光子场, 那么也能产生“尖锐”的膝^[144]. 银心对于银河宇宙线的影响需要更多的研究.

KASCADE-GRAND实验在“膝”后区的结果表明, 重核在80 PeV有一个“膝”, 而轻成分在200 PeV有一个“踝”样的转折(图12^[145]). 这些结果与传统模型的预期一致, 即4 PeV的“膝”是氦核为主, 铁的“膝”在26/2个4 PeV处, 即52 PeV. 此外, EeV的“踝”是河外宇宙线的标志, 轻核的“踝”出现的略早, 在120 PeV. 不过真正的情况是否是这样, 还需要其他实验的检验.

4.3 极高能宇宙线的测量结果

目前正在运行的极高能宇宙线实验有AUGER和TA两家, 前者位于南半球, 后者位于北半球, 联合起来可以覆盖整个的天空. 在 $10^{17.5} \sim 10^{20.5}$ eV能区, 宇宙线的能谱得到了精确的测量, 且可由3个不同幂率的部分描述, 其中包含“踝”和GZK两个能谱结构. 尽管两实验之间绝对能量的标度尚存在10%的差别, 但决定谱型的其他参数均在误差范围内很好符合(图13^[146,147]). 最高端的能谱截断与HiRes早期的结果一致, 也与GZK的预期一致. 不过, 在成分尚未确定为质子及探测到GZK中微子之前, 也不能排除这个

最高端的截断是由于加速源的加速能力所致.

关于成分测量, 在接近能量终点时, AUGER实验认为成分由轻变重了(远非全部变为铁), 而HiRes/TA实验则认为没有明显的变化, 主要是质子. 这些差别与不同实验的探测技术不同有关, 与强相互作用模型不确定性也有关. 精确测量极高能宇宙线的成分对于其起源和加速的研究有重要意义.

在极高能的情况下, 尤其对于质子, GZK效应使得它们来自不远的地方, 此外, 电荷也小, 微弱的星系际磁场的偏转作用不大. 反观宇宙线的方向, 有可能找到它们被加速的地点. 2007年, AUGER实验发表的结果认为极高能宇宙线方向与VCV的AGN的方向有关联, 但随着更大的曝光量和更多的事例数, 这种关联日趋减小. AUGER和TA事例的方向关联度比完全各向同性假设的预期略高, 这或许是统计涨落, 也或许是有一些真正的关联. AUGER的一些事例在CenA方向成团, TA事例也在北天区的某个方向上成团, 但显著性目前来看还不很高, 还需要积累更多的数据量.

4.4 有关宇宙线成分能谱的一些解释

适当调整不同实验的绝对能量标度, 宇宙线的全粒子能谱可以很好的一致. 在宽广的能段内, 大气荧光实验和EAS实验都开展了宇宙线成分的测量, 尽管数据点有些离散, 但总趋势基本一致. 从低能到“膝”的能量(3~4 PeV), 宇宙线的成分由轻变重, 至第二个“膝”(100 PeV), 重核比率达到最大, 然后到“踝”(EeV)开始减小.

前面已经提到过, Hillas曾经根据宇宙线能谱的结果, 推测河内宇宙线至少包含两个成分, 描述“膝”前及“膝”的A成分和描述“膝”后所需的B成分. 根据空间实验CREAM所测量的“膝”前区结果和地面广延大气簇射实验所测量的更高能的结果, Gaisser等人^[148]得出了推广的Hillas模型的结果, 发现银河宇宙线至少有3个组分才能较好地描述总能谱及成分测量的结果. 组分一在120 TV的刚度有截断, 组分二在4 PV的刚度有截断, 组分三在1.3 EV的刚度有截断(图14(a)). 有趣的是, 第一个组分的转折能量与SNR加速模型的经典结论相同, 即在几个微高斯的磁场强度下, SNR的最大加速能量约100 TeV. 另外, 4 PeV的“膝”则由第二组分里的氦与第一组分里的铁共同构成. 第二组分分离的铁形成了第二个“膝”, 这与

图 12 (网络版彩色)重核在 80 PeV 的“膝”及轻核在 120 PeV 的“踝”^[145]

Figure 12 (Color online) The knee of heavy nuclear was observed at ~80 PeV and the ankle of light nuclear was observed at ~120 PeV^[145]

图 13 AUGER, TA的精确测量且高度一致的极高能宇宙线能谱^[145]

Figure 13 The high consistent spectrum measurement of ultra high energy cosmic rays by AUGER and TA experiments^[145]

图 14 (a) Hillas模型的三分量解释; (b) 极高能增加第四组质子成分^[148]

Figure 14 (a) The all particle spectrum was explained by three populations of Hillas model; (b) the forth population was required to explain the spectrum of ultra high energy cosmic rays^[148]

KASCADE实验的测量结果也一致, 应该指出的是, 这组拟合在“踝”区之上给出的成分太重, 与实验偏差太大. 为此, 这些作者发现还需要为极高能宇宙线增加了第四个质子成分(图14(b)). 质子成分的出现表明, 极高能区的能谱快速下降至少有部分源自GZK效应.

4.5 宇宙线的各向异性

宇宙线各向异性最早是用来研究银河宇宙线起源的, 因为类似于光线, 来自源的方向的宇宙线预期也有更大的强度. 根据银河宇宙线的标准模型, 银河

宇宙线的流动(扩散、对流等)能直接导致大尺度偶极的各向异性, 银河宇宙线的小尺度各向异性则很可能来自于当地磁场的调制, 从而与当地磁场及等离子体环境相关.

近年来, 多个实验相继报道了宇宙线两维各向异性的测量结果(例如, AS γ 的结果显示于图15^[149]). 在TeV能区, 结果与以往地面 μ 子实验结果一致, 观测到了来自太阳磁尾方向(heliomagneto tail)^[150]的强度增强(区域I)和接近银河北极方向的强度减弱(区域II). 前者的增强可能与太阳球磁场有密切关系, 后者的减弱可能与银河宇宙线的扩散有关. 此外, 实验中

图 15 (网络版彩色)TeV能区北天区宇宙线各向异性的二维分布图,不随时间及太阳活动变化。(a)和(b)中的区域I是所谓的tail-in,即太阳球磁尾方向,与太阳所处位置的外旋臂切向接近。区域II是loss cone方向,指向接近银河系北极。区域III是天鹅座方向,与太阳所处位置的内旋臂切向接近^[149]

Figure 15 (Color online) The north sky anisotropy at TeV energy range is not variation with solar activity, where I is the tail-in direction in (a) and (b), and II is the loss cone direction and III is the CYGNUS direction^[149]

还看到了来自Cygnus方向的宇宙线的增强(区域III)。多个实验的观测还表明,此能量区间的银河宇宙线各向异性不随太阳活动而变化。

减除掉大尺度的各向异性后,MILAGRO和ARGO-YBJ实验还观测到银河宇宙线具有中小尺度上的各向异性,一些区域的能谱比平均的略硬^[151,152]。有理论认为这些各向异性可能与临近脉冲星Germinaga有关,有关的研究尚处于比较初级的阶段。

综合多个地面实验的观测,随能量增大,各向异性的强度先是逐渐变大,10 TeV以后,强度变弱,由于在300 TeV时北天区的宇宙线各向异性很小,可以

判断银河宇宙线随太阳系及物质一起绕银心共转。在300 TeV以后,宇宙线各向异性的振幅开始随能量增加。但在极高能宇宙线的情况下,由于统计量的限制,各向异性的显著性并不高。另一个变化是各向异性的超出和缺失区域也随能量变化,由外旋臂切向附近的最大方向改变为内旋臂方向附近为最大宇宙线的方向。从图16上看,在100~300 TeV之间,偶极分量的相位由恒星时3~4点变化到-5~-10点左右,这个相位在EeV能量后又最终变回到约5点。不过极高能实验的统计量很小,还需要更长期的观测研究。此外,宇宙线各向异性是二维的复杂分布,远非简单的

偶极模型所能描述, 这个振幅和相位只是一个简单的量化表示, 并不完全反映所有的物理现象.

各向异性可以通过宇宙线标准模型进行计算, 在忽略对流等因素的情况下, 人们通常用扩散速度

来衡量各向异性的大小, 扩散速度等于扩散系数和宇宙线空间分布的梯度之乘积. 如果扩散系数随能量变化的幂率是 -0.3 , 那么扩散模型可以给出较接近观测结果的各向异性强度及其随能量的变化, 但仍

图 16 (网络版彩色)宇宙线各向异性偶极分量的振幅(a)和恒星时相位(b)随能量的变化. 实验观测数据来自于: Norikura1973^[153], Ottawa1981^[154], London1983^[155], Bolivia1985^[156], Budapest1985^[155], Hobart1985^[155], London1985^[157], Misato1985^[155], Socorro1985^[156], Yakutsk1985^[155], Baksan1987^[158], HongKong1987^[159], Sakashita1990^[160], Utah1991^[161], Liapootah1995^[162], Matsushiro1995^[163], Poatina1995^[164], Kamiokande1997^[165], Macro2003^[166], SuperKamiokande2007^[167], Baksan1981^[169], Norikura1989^[170], Tibet2005^[171], EASTOP1995^[172], EASTOP1996^[173], EASTOP2009^[174], Baksan2009^[175], Milagro2009^[176], ARGO2011^[177], IceCube2010^[178], IceCube2012^[179], IceCube2013^[180], Tibet2013^[5].
Figure 16 (Color online) The amplitude of cosmic ray anisotropy: (a) the phase of sidereal time; (b) the phase variation with energy. The data from Norikura1973^[153], Ottawa1981^[154], London1983^[155], Bolivia1985^[156], Budapest1985^[155], Hobart1985^[155], London1985^[157], Misato1985^[155], Socorro1985^[156], Yakutsk1985^[155], Baksan1987^[158], HongKong1987^[159], Sakashita1990^[160], Utah1991^[161], Liapootah1995^[162], Matsushiro1995^[163], Poatina1995^[164], Kamiokande1997^[165], Macro2003^[166], SuperKamiokande2007^[167], Baksan1981^[169], Norikura1989^[170], Tibet2005^[171], EASTOP1995^[172], EASTOP1996^[173], EASTOP2009^[174], Baksan2009^[175], Milagro2009^[176], ARGO2011^[177], IceCube2010^[178], IceCube2012^[179], IceCube2013^[180], Tibet2013^[5].

5) Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. Observation of the large-scale sidereal anisotropy of the galactic cosmic ray intensity at 300 TeV with the Tibet Air Shower Array. In: the 33rd International Cosmic Ray Conference. 2013

然有相当的距离,且各向异性受临近源的分布影响很大,理论预言有很大的涨落(图17^[181]).

大尺度各向异性可能与本地的宇宙线传播有关,从而与本地磁场的具体分布有关.一个唯象理论模型认为,实验观测到的两个TeV宇宙线强度增强的方向与星际磁场的方向非常接近,可能是宇宙线扩散系数较大的方向.而剩余的部分可能是本地星际云(LIC)内的宇宙线向外的扩散导致的偶极各向异性.残余的中等尺度部分被发现与中性氢的偏转方向及其接近,可能来自于太阳系磁场的影响^[182].另外还有一种模型认为,这些大尺度的各向异性可能是全局的特征,而非太阳系内的特例.其理由是,两个强度增强方向都接近旋转臂的切向,是宇宙线具有较大传播系数的方向.而宇宙线强度减少的方向是垂直银盘的方向,是宇宙线扩散逃逸的方向.这些具有普遍性的方向特征或许表明这样的各向异性出现在银河系的每个地方^[183].如果我们知道太阳系附近的磁场分布和进入太阳系的宇宙线本来的分布,那么太阳系内的宇宙线的运动可通过磁流体方程来求得,并可由此推算出各向异性,文献[184]是这样的尝试的一个例子.宇宙线的传播还可以通过弥散伽玛和中微子来研究. Fermi-LAT卫星实验观测到的高精度的弥散伽玛射线与标准模型能较好的符合,其主要的贡献就是传播中的宇宙线与星际气体尘埃发生碰撞,产生 π^0 再衰变为伽玛.在观测和模型较好符合的背后, Fermi-LAT的伽玛存在GeV的超出,即模型不能完美地描述GeV以上的弥散伽玛谱^[185],此外地面实验也发现TeV能区存在标准模型不能描述的弥散

伽玛超出^[87].最近, Ice Cube结果表明高能中微子的超出与高能伽玛的超出具有相当的能谱和相当的功率,反映它们可能具有相同的起源.一些研究发现,如果银河宇宙线具有-2.5的能谱,的确可以同时描述伽玛和中微子的超出^[51].还有理论认为,银盘和银晕的宇宙线传播系数不同,银盘内比较小,从而能谱较硬的新鲜宇宙线会聚集在盘里,与星际气体作用后可以产生较硬的弥散伽玛和中微子,此外还会产生额外的次级正、负电子,反质子,会产生额外的次级核子,如B等^[93].

5 新物理及物理学基本规律研究

高能宇宙线观测为研究物理学基本规律提供了一个良好的实验室.暗物质粒子会集聚在引力势阱中,比如星系的中心和恒星的中心,而暗物质粒子的湮灭几率与密度的平方成正比,从而使得湮灭产物在这些地方有明显的增强.通过观测银心的伽玛超出和恒星中心的中微子超出,使得我们可以约束暗物质粒子的参数空间并检验宇宙学标准模型中关于星系中暗物质粒子质量分布的理论.通过测量次级带电粒子,比如正电子和反质子的超出,我们也可以研究和限制暗物质粒子的性质.有关进展情况可见于文献[186].除冷暗物质粒子,宇宙学距离的高能伽玛射线也为研究轴子(Axion)提供了重要手段.宇宙空间中,除了宇宙大爆炸形成的微波背景光子而外,其他各个波段也都存在背景辐射,比如由星光和尘埃辐射的红外光组成的河外背景光是功率第二大的背景,其功率约为微波背景的10%.高能伽玛光子在传播过程中会和河外背景光相互作用,产生一对正负电子,从而使得宇宙空间对高能伽玛并不透明.大量的观测结果表明,宇宙空间对伽玛的透明度比我们预期的要好,其中的一个可能的原因就是伽玛与Axion在星际磁场中发生了互相转换,延长了伽玛的传播距离.宇宙线实验灵敏的参数空间与实验室实验的参数空间正在接近,相互间的检验已逐渐成为可能^[187].利用天体的时变现象中不同能量光子的传播速度可以研究洛伦兹不变性的破坏(LIV).一些量子引力的理论认为真空中的光速具有色散,即不同能量光子的光速不同.光速与能量的最低两级的依赖是线形的或平方的.高能伽玛射线暴由于具有时变很快的特点,非常适合开展这样的研究.最好的结果来自伽玛射线暴GRB090510的研究,人们通过

图 17 (网络版彩色)模拟计算的各向异性振幅随能量变化,每条线代表一个模拟的银河系情况^[181]

Figure 17 (Color online) Anisotropy amplitude for ten random realizations of sources in the cylindrical model^[181]

分析GRB090510不同能量光子之间的时间差,可以给出保守和乐观等程度不同的限制,最乐观的情况下,甚至在能量超过100倍的普朗克质量的情况下,能量线性依赖的LIV也可以被排除掉^[188].

宇宙线也是研究磁单极,奇异粒子等新物理现象的重要手段.还有理论猜测大爆炸核生成时期可能就存在少量的高能非热粒子(广义上的宇宙线),它们可以打碎Li7, Be7,并有助于Li6的产生,由此解释宇宙大爆炸核合成(BBN)标准模型和观测之间的一致性问题^[189].

6 强相互作用模型研究

宇宙线大气簇射是高能宇宙线粒子对空气核的打靶反应,所产生的次级粒子位于极端朝前区,主要是小动量转移过程,无法通过微扰QCD进行计算.另一方面,在宇宙线实验中,人们需要通过唯像模型的帮助来理解实验数据和重建实验结果.模型的参数通过比对对撞机实验,打靶实验数据而得到.由于宇宙线能量远高于加速器实验,由低能模型外推到高能并不能获得完全的成功.为了使强相互作用模型^[188]在甚高能和极高能仍然比较准确,人们在迄今最高能量的加速器LHC的实验上开展了大量的相关研究,为此还专门开展了LHCf及TOTEM两个实验,测量朝前区(大快度区)的粒子及能量分布.尽管现有的多种模型可以把实验数据包围起来,但每个模型与实验数据的比较都没有达到精确符合的程度.不断获得的新实验

数据将有助于强相互作用模型的完善,并对宇宙线实验产生重要的影响.此外,重离子碰撞实验也计划开展类似的朝前区实验研究.考虑到LHAASO实验将采用多种探测技术,为此,LHAASO项目也有希望进一步改进强相互作用模型的精度.自LEP实验开展宇宙线 μ 子观测,并发现一些无法解释的多 μ 子束团的事例以来,LHC上的ALICE实验也开展了宇宙线 μ 子测量,而且也发现了模型无法解释的多 μ 子束团事例.AUGER实验中也观测到 10^{19} eV能量以上的事例中 μ 子数比模型预期有显著超出的现象,这也反映强相互作用模型还有很大的完善空间.

7 总结

历经百年的研究,宇宙线为粒子物理学、天文学和宇宙学做出了巨大的贡献.作为前沿交叉学科,宇宙线领域有丰富的科学问题,充满生机.随着新技术的使用和新实验的开展,宇宙线进入了精确测量的时代.由于作者自身知识的局限,本文只介绍了其中很少一部分工作的情况.

20多年来,作为国际高海拔大气簇射实验的重要组成部分,我国羊八井宇宙线实验获得了多项国际水平的成果.作为未来的国际宇宙线研究中心之一,LHAASO项目任重道远.我们需要组织和培养好科学的队伍,迎接各种科学挑战,为宇宙线起源、加速、传播问题的解决,为新物理的发现,为交叉应用取得成果做出重要贡献.

致谢 本文是根据香山会议第518次会议(宇宙线起源的天文和物理交叉研究前沿)的主题评述报告整理而成.感谢中国科学院高能物理研究所冯朝阳,博士生田珍和王振在绘图及文献引用方面提供的帮助.

参考文献

- 1 Hu H B, Han J L. One century studies of cosmic rays (in Chinese). *Physics*, 2012, 41: 45–47 [胡红波, 韩金林. 宇宙线的百年研究. *物理*, 2012, 41: 45–47]
- 2 Davis R, Harmer D S, Hoffman K C. Search for neutrinos from the sun. *Phys Rev Lett*, 1968, 20: 1205–1209
- 3 Hirata K, Kajita T, Koshiba M, et al. Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 1490–1493
- 4 Ryan S G, Beers T C, Olive K A, et al. Primordial lithium and big bang nucleosynthesis. *Astrophys J*, 2000, 530: L57–L60
- 5 Piau L, Beers T C, Balsara D S, et al. From first stars to the spite plateau: A possible reconciliation of halo stars observations with predictions from big bang nucleosynthesis. *Astrophys J*, 2006, 653: 300–315
- 6 Salem M, Bryan G L, Hummels C. Cosmological simulations of galaxy formation with cosmic rays. *Astrophys J*, 2014, 797: L18–L24
- 7 Gaisser T K. *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- 8 Gaisser T K, Stanev T. High-energy cosmic rays. *Nucl Phys A*, 2006, 777: 98–110

- 9 Zobeck M V. Handbook of Space Astronomy and Astrophysics. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- 10 Engelmann J J, Ferrando P, Soutoul A, et al. Charge composition and energy spectra of cosmic-ray nuclei for elements from Be to Ni—Results from HEAO-3-C2. *Astron Astrophys*, 1990, 233: 96–111
- 11 Alcaraz J, Alvisi D, Alpat B, et al. Cosmic protons. *Phys Lett B*, 2000, 472: 215–226
- 12 Alcaraz J, Alpat B, Ambrosi G, et al. Helium in near Earth orbit. *Phys Lett B*, 2000, 494: 193–202
- 13 Binns W R, Wiedenbeck M E, Arnould M, et al. Cosmic-ray neon, wolf-rayet stars, and the superbubble origin of galactic cosmic rays. *Astrophys J*, 2005, 634: 351–364
- 14 Garcia-Munoz M, Mason G M, Simpson J A. The age of the galactic cosmic rays derived from the abundance of Be¹⁰. *Astrophys J*, 1977, 217: 859–877
- 15 Stone E C, Cohen C M S, Cook W R, et al. The cosmic-ray isotope spectrometer for the advanced composition explorer. *Space Sci Rev*, 1998, 86: 357–408
- 16 Grigorov N L, Gubin Y V, Jakovlev B M, et al. Energy spectrum of primary cosmic rays in the 10¹¹–10¹⁵ eV according to the data of proton-4 measurements. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1971, 1: 170
- 17 Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 10¹⁴ to 10¹⁷ eV observed with the Tibet-iii air-shower array. *Astrophys J*, 2008, 678: 1165–1179
- 18 Apel W D, Arteaga J C, Badea A F, et al. Energy spectra of elemental groups of cosmic rays: Update on the KASCADE unfolding analysis. *Astropart Phys*, 2009, 31: 86–91
- 19 Nagano M, Hara T, Hatano Y, et al. Energy spectrum of primary cosmic rays between 10^{14.5} and 10¹⁸ eV. *J Phys G*, 1984, 10: 1295–1310
- 20 Takeda M, Hayashida N, Honda K, et al. Extension of the cosmic-ray energy spectrum beyond the predicted greisen-zatsepin-kuz'min cutoff. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 1163–1166
- 21 Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Amann J F, et al. Measurement of the flux of ultrahigh energy cosmic rays from monocular observations by the high resolution fly's eye experiment. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 151101
- 22 Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, et al. First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 101101
- 23 Yamamoto T. The UHECR spectrum measured at the Pierre Auger Observatory and its astrophysical implications. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 2008, 4: 335
- 24 Telescope Array Collaboration. The hybrid energy spectrum of TA's middle drum detector and surface array. 2014, arXiv:1410.3151
- 25 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. All-particle cosmic ray energy spectrum measured with 26 IceTop stations. *Astropart Phys*, 2013, 44: 40–58
- 26 Alcaraz J, Alvisi D, Alpat B, et al. Protons in near earth orbit. *Phys Lett B*, 2000, 472: 215–226
- 27 Consolandi C. Primary cosmic ray proton flux measured by AMS-02. 2014, arXiv:1402.0467
- 28 Sanuki T, Motoki M, Matsumoto H, et al. Precise measurement of cosmic-ray proton and helium spectra with the BESS spectrometer. *Astrophys J*, 2000, 545: 1135–1142
- 29 Panov A D, Adams J H, Ahn H S, et al. The results of ATIC-2 experiment for elemental spectra of cosmic rays. 2006, arXiv:astro-ph/0612377
- 30 Ahn H S, Allison P, Bagliesi M G, et al. Discrepant hardening bserved in cosmic-ray elemental spectra. *Astrophys J*, 2010, 714: 89–93
- 31 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. PAMELA measurements of cosmic-ray proton and helium spectra. *Science*, 2011, 332: 69–72
- 32 Apanasenko A V, Sukhadolskaya V A, Derbina V A, et al. Composition and energy spectra of cosmic-ray primaries in the energy range 10¹³–10¹⁵ eV/particle observed by Japanese-Russian joint balloon experiment. *Asrtopart Phys*, 2001, 16: 13–46
- 33 Beozio M, Bonvicini, V, Schiavon P, et al. The cosmic-ray proton and helium spectra measured with the CAPRICE98 balloon experiment. *Astropart Phys*, 2003, 19: 583–604
- 34 Asakimori K, Burnett T H, Cherry M L, et al. Cosmic-ray proton and helium spectra: Results from the JACEE Experiment. *Astrophys J*, 1998, 502: 278–283
- 35 Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Light-component spectrum of the primary cosmic rays in the multi-TeV region measured by the ARGO-YBJ experiment. *Phys Rev D*, 2012, 85: 92005
- 36 Bartoli B, Bernardini P, Bi X, et al. Energy spectrum of cosmic protons and helium nuclei by a hybrid measurement at 4300 m a.s.l. *Chin Phys C*, 2014, 38: 045001
- 37 Aguilar M, Aisa D, Alpat B, et al. Electron and positron fluxes in primary cosmic rays measured with the alpha magnetic spectrometer on the international space station. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 121102
- 38 Alcaraz J, Alpat B, Ambrosi G, et al. Leptons in near earth orbit. *Phys Lett B*, 2000, 484: 10–22

- 39 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV. *Nature*, 2009, 458: 607–609
- 40 Barwick S W, Beatty J J, Bower C R, et al. The energy spectra and relative abundances of electrons and positrons in the galactic cosmic radiation. *Astrophys J*, 1998, 498: 779–789
- 41 Boezio M, Carlson P, Francke T, et al. The cosmic-ray electron and positron spectra measured at 1 AU during solar minimum activity. *Astrophys J*, 2000, 532: 653–669
- 42 Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. An excess of cosmic ray electrons at energies of 300–800 GeV. *Nature*, 2008, 456: 362–365
- 43 Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. Fermi LAT observations of cosmic-ray electrons from 7 GeV to 1 TeV. *Phys Rev D*, 2010, 82: 092004
- 44 Aharonian F, Akhperjanian A G, Barres de Almeida U, et al. Energy spectrum of cosmic-ray electrons at TeV energies. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 261104
- 45 Torii S, Tamura T, Tateyama N, et al. The energy spectrum of cosmic-ray electrons from 10 to 100 GeV observed with a highly granulated imaging calorimeter. *Astrophys J*, 2001, 559: 973–984
- 46 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. PAMELA results on the cosmic-ray antiproton flux from 60 MeV to 180 GeV in kinetic energy. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 121101
- 47 Alcaraz J, Alvisi D, Alpat B, et al. Protons in near earth orbit. *Phys Lett B*, 2000, 472: 215–226
- 48 Maeno E, Orito S, Matsunaga H, et al. Successive measurements of cosmic-ray antiproton spectrum in a positive phase of the solar cycle. *Astropart Phys*, 2001, 16: 121–128
- 49 Asaoka Y, Shikaze Y, Abe K, et al. Measurements of cosmic-ray low-energy antiproton and proton spectra in a transient period of solar field reversal. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 051101
- 50 Boezio M, Bonvicini V, Schiavon P, et al. The cosmic-ray antiproton flux between 3 and 49 GeV. *Astrophys J*, 2001, 561: 787–799
- 51 Neronov A, Semikoz D. Neutrinos from extra-large hadron collider in the milky way. 2014, arXiv:1412.1690
- 52 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. Measurement of the atmospheric neutrino energy spectrum from 100 GeV to 400 TeV with IceCube. *Phys Rev D*, 2011, 83: 012001
- 53 Aarsten M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Measurement of the atmospheric ν_e flux in IceCube. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 151105
- 54 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. The energy spectrum of atmospheric neutrinos between 2 and 200 TeV with the AMANDA-II detector. *Astropart Phys*, 2010, 34: 48–58
- 55 Adrián-Martínez S, Albert A, Al Samarai I, et al. Measurement of the atmospheric ν_μ energy spectrum from 100 GeV to 200 TeV with the ANTARES telescope. 2013, arXiv:1308.1599
- 56 Frejus Collaboration. Determination of the atmospheric neutrino spectra with Frejus detector. *Zeitschrift für Physik C Part Fields*, 1995, 66: 417–428
- 57 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Observation of high-energy astrophysical neutrinos in three years of IceCube data. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 101101
- 58 Aartsen M G, Ackermann M, Adams J, et al. Atmospheric and astrophysical neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube. *Phys Rev D*, 2015, 91: 022001
- 59 Thoudam S, Horandel J R. Nearby supernova remnants and the cosmic ray spectral hardening at high energies. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 421: 1209–1214
- 60 Biermann P L, Becker J K, Dreyer J, et al. The origin of cosmic rays: Explosions of massive stars with magnetic winds and their supernova mechanism. *Astrophys J*, 2010, 725: 184–187
- 61 Zatsepin V L, Sokolskaya N V. Three component model of cosmic ray spectra from 10 GeV to 100 PeV. *Astron Astrophys*, 2006, 458: 1–5
- 62 Yuan Q, Zhang B, Bi X J. Cosmic ray spectral hardening due to dispersion in the source injection spectra. *Phys Rev D*, 2011, 84: 043002
- 63 Tomassetti N. Origin of the cosmic-ray spectral hardening. *Astrophys J*, 2012, 752: L13–L18
- 64 Jin C, Guo Y Q, Hu H B. Spatial dependent diffusion of cosmic rays and the excess of primary electrons deduced from high precision measurement by AMS-02. 2012, arxiv:1504.06903
- 65 Kulikov G V, Kristiansen G B. On the size spectrum of extensive air showers. *J Exp Theor Phys*, 1958, 35: 441–444
- 66 Linsley J. Primary cosmic rays of energy 10^{17} to 10^{20} eV, the energy spectrum and arrival directions. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1963, 4: 77
- 67 Greisen K. End to the cosmic-ray spectrum? *Phys Rev Lett*, 1966, 16: 748
- 68 Zatsepin G T, Kuz'min V A. Upper limit of the spectrum of cosmic rays. *J Exper Theor Phys Lett*, 1966, 4: 78

- 69 Hillas A M. TOPICAL REVIEW: Can diffusive shock acceleration in supernova remnants account for high-energy galactic cosmic rays? *J Phys G Nucl Phys*, 2005, 31: 95–131
- 70 Wang B, Yuan Q, Fan C, et al. A study on the sharp knee and fine structures of cosmic ray spectra. *Sci China Phys Mech Astron*, 2010, 53: 842–847
- 71 Hörandel J R. On the knee in the energy spectrum of cosmic rays. *Astropart Phys*, 2003, 19: 193–220
- 72 Bird D J, Corbató S C, Dai H Y, et al. Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 3401–3404
- 73 Krymskii G F. A regular mechanism for the acceleration of charged particles on the front of a shock wave. *Dokl Akad. Nauk SSSR*, 1977, 234: 1306
- 74 Bell A R. The acceleration of cosmic rays in shock fronts. I. *Mon Not R Astron Soc*, 1978, 182: 147–156
- 75 Bell A R. The acceleration of cosmic rays in shock fronts. II. *Mon Not R Astron Soc*, 1978, 182: 443–455
- 76 Blandford R D, Ostriker J P. Particle acceleration by astrophysical shocks. *Astrophys J*, 1978, 221: 29–32
- 77 Fermi E. Galactic magnetic fields and the origin of cosmic radiation. *Astrophys J*, 1954, 119: 1
- 78 Lagage P O, Cesarsky C J. The maximum energy of cosmic rays accelerated by supernova shocks. *Astron Astrophys*, 1983, 125: 249–257
- 79 Bell A R, Lucek S G. Cosmic ray acceleration to very high energy through the non-linear amplification by cosmic rays of the seed magnetic field. *Mon Not R Astron Soc*, 2001, 321: 433–438
- 80 Berezhko E G, Volk H J. Spectrum of cosmic rays produced in supernova remnants. *Astrophys J*, 2007, 661: 175–178
- 81 Goldreich P, Sridhar S. Toward a theory of interstellar turbulence 2: Strong alfvénic turbulence. *Astrophys J*, 1995, 438: 763–775
- 82 Yan H R, Lazarian A. Cosmic-ray scattering and streaming in compressible magnetohydrodynamic turbulence. *Astrophys J*, 2004, 614: 757–769
- 83 Baade W, Zwicky F. Cosmic rays from super-novae. *Phys Rev*, 1934, 45: 138
- 84 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. *Science*, 2013, 339: 807–811
- 85 Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. Discovery of very-high-energy gamma-rays from the Galactic Centre ridge. *Nature*, 2006, 439: 695–698
- 86 Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. Fermi-LAT observations of the diffuse gamma-ray emission: Implications for cosmic rays and the interstellar medium. *Astrophys J*, 2012, 750: 3–35
- 87 Abdo A A, Allen B, Aune T, et al. A measurement of the spatial distribution of diffuse TeV gamma-ray emission from the galactic plane with Milagro. *Astrophys J*, 2008, 688: 1078–1083
- 88 Di Sciascio G. Main physics results of the ARGO-YBJ experiment. *Int J Modern Phys D*, 2014, 23: 1430019
- 89 Abramowski A, Aharonian F, Ait Benkhali F, et al. Diffuse Galactic gamma-ray emission with HESS. *Phys Rev D*, 2014, 90: 122007
- 90 Guo Y Q, Hu H B, Yuan Q, et al. Pinpointing the knee of cosmic rays with diffuse PeV gamma-rays and neutrinos. *Astrophys J*, 2014, 795: 100–106
- 91 Fox D B, Kashiyama K, Mészáros P. Sub-PeV neutrinos from TeV unidentified sources in the galaxy. *Astrophys J*, 2013, 774: 74–80
- 92 Neronov A, Semikoz D, Tchernin C. PeV neutrinos from interactions of cosmic rays with the interstellar medium in the Galaxy. *Phys Rev D*, 2014, 89: 103002
- 93 Guo Y Q, Hu H B, Tian Z. On the contribution of “fresh” cosmic rays to the excesses of secondary particles. 2014, arXiv:1412.8590
- 94 Rachen J P, Biermann P L. Extragalactic ultra-high energy cosmic-rays - part one - contribution from hot spots in Fr-II Radio galaxies. *Astron Astrophys*, 1993, 272: 161–175
- 95 Biermann P L. Topical Review: The origin of the highest energy cosmic rays. *J Phys G*, 1997, 23: 1–27
- 96 Henri G, Pelletier G, Petrucci P O, et al. Active galactic nuclei as high energy engines. *Astropart Phys*, 1999, 11: 347–356
- 97 Halzen F, Hooper D. High-energy neutrino astronomy: The cosmic ray connection. *Rep Prog Phys*, 2002, 65: 1025–1078
- 98 Waxman E. Cosmological gamma-ray bursts and the highest energy cosmic rays. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 386–389
- 99 Vietri M. The acceleration of ultra-high-energy cosmic rays in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1995, 453: 883–889
- 100 de Gouveia Dal Pino E M, Lazarian A. Ultra-high-energy cosmic-ray acceleration by magnetic reconnection in newborn accretion-induced collapse pulsars. *Astrophys J*, 2000, 536: 31–34
- 101 Wibig T, Wolfendale A W. Ultra-high energy cosmic rays from transient extragalactic sources. *J Phys G*, 2004, 30: 525–542
- 102 Wibig T, Wolfendale A W. Ultra high energy cosmic rays. *J Phys G*, 2007, 34: 1891–1900
- 103 Berezhinsky V S, Grigorieva S I, Hnatyk B I. Extragalactic UHE proton spectrum and prediction for iron-nuclei flux at 10^8 – 10^9 GeV. *Astropart Phys*, 2004, 21: 617–625
- 104 Berezhinsky V. On transition from galactic to extragalactic cosmic rays. *J Phys: Conf Ser*, 2006, 47: 142–153

- 105 Bergstrom L, Bringmann T, Edsjo J. New positron spectral features from supersymmetric dark matter: A way to explain the PAMELA data? *Phys Rev D*, 2008, 78: 103520
- 106 Barger V, Keung W Y, Marfatia D, et al. PAMELA and dark matter. *Phys Lett B*, 2009, 672: 141–146
- 107 Cirelli M, Kadastik M, Raidal M, et al. Model-independent implications of the e , p^- cosmic ray spectra on properties of dark matter. *Nucl Phys B*, 2009, 813: 1–21
- 108 Yin P F, Yuan Q, Liu J, et al. PAMELA data and leptonically decaying dark matter. *Phys Rev D*, 2009, 79: 023512
- 109 Zhang J, Bi X J, Liu J, et al. Discriminating different scenarios to account for the cosmic $e^\pm$ excess by synchrotron and inverse Compton radiation. *Phys Rev D*, 2009, 80: 023007
- 110 Yuksel H, Kistler M D, Stanev T. TeV Gamma rays from geminga and the origin of the GeV positron excess. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 051101
- 111 Hooper D, Blasi P, Serpico P D, et al. Pulsars as the sources of high energy cosmic ray positrons. *J Cosmol Astropart Phys*, 2009, 1: 25–35
- 112 Prefumo S. Dissecting cosmic-ray electron-positron data with Occam's razor: The role of known pulsars. *Central Eur J Phys*, 2012, 10: 1–31
- 113 Malyshev D, Cholis I, Gelfand J. Pulsars versus dark matter interpretation of ATIC/PAMELA. *Phys Rev D*, 2009, 80: 063005
- 114 Blasi P. Origin of the positron excess in cosmic rays. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 051104
- 115 Hu H B, Yuan Q, Wang B, et al. On the e^+e^- excesses and the knee of the cosmic ray spectra-hints of cosmic ray acceleration in young supernova remnants. *Astrophys J*, 2009, 700: 170–173
- 116 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. PAMELA results on the cosmic-ray antiproton from 60 MeV to 180 GeV in kinetic energy. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 121101
- 117 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. Measurement of boron and carbon fluxes in cosmic rays with the PAMELA experiment. *Phys Rep*, 2014, 544: 323
- 118 Orito S, Maeno T, Matsunaga H, et al. Precision measurement of cosmic-ray antiproton spectrum. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 1078–1081
- 119 Asaoka Y, Shikaze Y, Abe K, et al. Measurements of cosmic-ray low-energy antiproton and proton spectra in a transient period of solar field reversal. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 051101
- 120 Boezio M, Carison P, Francke T, et al. The cosmic-ray antiproton flux between 0.62 and 3.19 GeV measured near solar minimum activity. *Astrophys J*, 1997, 487: 415–423
- 121 Boezio M, Bonvicini V, Schiavon P. The cosmic-ray antiproton flux between 3 and 49 GeV. *Astrophys J*, 2001, 561: 787–799
- 122 Beach A, Beatty J J, Bhattacharyya A, et al. Measurement of the cosmic-ray antiproton-to-proton abundance ratio between 4 and 50 GeV. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 271101
- 123 Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. Measurement of boron and carbon fluxes in cosmic rays with the PAMELA experiment. *Astrophys J*, 2014, 791: 93–104
- 124 Derbina V A. Cosmic-ray spectra and composition in the energy range of 10–1000 TeV per particle obtained by the RUNJOB experiment. *Astrophys J*, 2005, 628: 41–44
- 125 Juliusson E. Charge composition and energy spectra of cosmic-ray nuclei at energies above 20 GeV per nucleon. *Astrophys J*, 1974, 191: 331–348
- 126 Dwyer R. The mean mass of the abundant cosmic-ray nuclei from boron to silicon at 1.2 GeV per atomic mass unit. *Astrophys J*, 1978, 224: 691–707
- 127 Orth C D, Buffington A, Smoot G F, et al. Abundances and spectra for cosmic-ray nuclei from lithium to iron for 2 to 150 GeV per nucleon. *Astrophys J*, 1978, 226: 1147–1161
- 128 Simon T, Linsky J L, Schiffer F H, et al. Binary stars, flare stars, iue, stellar spectra, ultraviolet spectra, emission spectra, line spectra, magnesium, radiant flux density, stellar magnetic fields. *Astrophys J*, 1980, 239: 911–918
- 129 Engelmann J J, Ferrando P, Soutoul A, et al. Charge composition and energy spectra of cosmic-ray nuclei for elements from Be to Ni—Results from HEAO-3-C2. *Astron Astrophys*, 1990, 233: 96–111
- 130 Maehl R C, Ormes J F, Fisher A J, et al. Energy spectra of cosmic ray nuclei-Z of 4 to 26 and E of 0.3 to 2 GeV/amu. *Astrophys Space Sci*, 1977, 47: 163–184
- 131 Lukasiak A. Voyager measurements of the charge and isotopic composition of cosmic ray Li, Be and B nuclei and implications for their production in the galaxy. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1999, 3: 41
- 132 Duvernois M A, Simpson J A, Thayer M R, et al. Interstellar propagation of cosmic rays: Analysis of the ULYSSES primary and secondary elemental abundances. *Astron Astrophys*, 1996, 316: 555–563
- 133 Davis A J, Mewaldt R A, Binns W R, et al. On the low energy decrease in galactic cosmic ray secondary/primary ratios. *AIPC*, 2000, 528: 421–424
- 134 Blasi P, Serpico P D. High-energy antiprotons from old supernova remnants. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 081103

- 135 Mertsch P, Sarkar S. Testing astrophysical models for the PAMELA positron excess with cosmic ray nuclei. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 081104
- 136 Aharonian F, Akhperjanian A G, Bazer-Bachi A R, et al. First ground-based measurement of atmospheric Cherenkov light from cosmic rays. *Phys Rev D*, 2007, 75: 042004
- 137 Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. The knee of the cosmic hydrogen and helium spectrum below 1 PeV measured by ARGO-YBJ and a Cherenkov telescope of LHAASO. 2015, arXiv:1502.03164
- 138 ARGO-YBJ Collaboration. The Cosmic Ray p+He energy spectrum in the 3–3000 TeV energy range measured by ARGO-YBJ. 2015, arXiv:1502.01894
- 139 Tibet AS γ Collaboration. Primary proton and helium spectra at energy range from 50 TeV to 1 PeV observed with (YAC+Tibet-III) hybrid experiment. In: *The International Cosmic Ray Conference*. Brazil, 2013
- 140 KASCADE-Grande Collaboration. KASCADE-Grande measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays. *Astropart Phys*, 2013, 47: 54–66
- 141 Giacinti G, Kachelriess M, Semikoz D V. Explaining the spectra of cosmic ray groups above the knee by escape from the Galaxy. *Phys Rev D*, 2014, 90: 041302
- 142 Erlykin A D, Wolfendale A W. The knee in the cosmic ray energy spectrum. 2009, arXiv:0906.3949
- 143 Su M, Slatyer T R, Finkbeiner D P. Giant gamma-ray bubbles from Fermi-LAT: Active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind? *Astrophys J*, 2010, 724: 1044–1082
- 144 Guo Y Q, Feng Z Y, Yuan Q, et al. On the galactic center being the main source of galactic cosmic rays as evidenced by recent cosmic ray and gamma ray observations. *New J Phys*, 2013, 15: 013053
- 145 Apel W D, Arteaga-Velazquez J C, Bekk K, et al. Ankle-like feature in the energy spectrum of light elements of cosmic rays observed with KASCADE-Grande. *Phys Rev D*, 2013, 87: 081101
- 146 Aab A, Abreu P, Aglietta M, et al. The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 33rd International Cosmic Ray Conference. arXiv:1307.5059
- 147 Abu-Zayyad T, Aida R, Allen M, et al. The cosmic-ray energy spectrum observed with the surface detector of the telescope array experiment. *Astrophys J*, 2013, 768: 1–6
- 148 Gaisser T K, Stanev T, Tilav S. Cosmic ray energy spectrum from measurements of air showers. *Front Phys*, 2013, 8: 748–758
- 149 Amenomori M, Ayabe S, Bi X J, et al. Anisotropy and corotation of galactic cosmic rays. *Science*, 2006, 314: 439–443
- 150 Hall D L, Munakata K, Yasue S, et al. Gaussian analysis of two hemisphere observations of galactic cosmic ray sidereal anisotropies. *J Geophys Res: Space Phys* (1978–2012), 1999, 104(A4): 6737–6749
- 151 Abdo A A, Allen B T, Aune T, et al. The large-scale cosmic-ray anisotropy as observed with Milagro. *Astrophys J*, 2009, 698: 2121
- 152 Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Medium scale anisotropy in the TeV cosmic ray flux observed by ARGO-YBJ. *Phys Rev D*, 2013, 88: 082001
- 153 Sakakibara S, Ueno H, Fujimoto K, et al. Sidereal time variation of small air showers observed at Mt. Norikura. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1973, 2: 1058
- 154 Bercovitch M, Agrawal S P. Cosmic ray anisotropies at median primary rigidities between 100 and 1000 GV. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1981, 10: 246
- 155 Nagashima K, Morishita, I, Yasue S. Modulation of galactic cosmic ray anisotropy in heliomagnetosphere - Seasonal variation of sidereal daily variation. *Planet Space Sci*, 1983, 31: 1259–1268
- 156 Swinson S B, Nagashima K. Corrected sidereal anisotropy for underground muons. *Planet Space Sci*, 1985, 33: 1069–1072
- 157 Nagashima K, Sakakibara S, Fenton A G, et al. The insensitivity of the cosmic ray galactic anisotropy to heliomagnetic polarity reversals. *Planet Space Sci*, 1985, 33: 395–405
- 158 Andreyev Y M, Chudakov A E, Kozyarivsky V A, et al. Cosmic ray sidereal anisotropy observed by baksan underground muon telescope. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1987, 2: 22
- 159 Lee Y W, Ng L K. Observation of cosmic-ray intensity variation using AN underground telescope. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1987, 2: 18
- 160 Ueno H, Fujii Z, Yamada T. 11 Years variations of sidereal anisotropy observed at sakashita underground station. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1990, 6: 361
- 161 Cutler D J, Groom D E. Mayflower Mine 1500 GV detector—Cosmic-ray anisotropy and search for Cygnus X-3. *Astrophys J*, 1991, 376: 322–334
- 162 Munakata K, Yasue S, Mori S, et al. Two hemisphere observations of the north-south sidereal asymmetry at 1 TeV. In: *The International Cosmic Ray Conference*. 1995, 4: 639

- 163 Mori S, Yasue S, Munakata K, et al. Observation of sidereal anisotropy of cosmic rays at ~ 1 TeV. In: The International Cosmic Ray Conference. 1995, 4: 648
- 164 Fenton K B, Fenton A G, Humble J E, et al. Sidereal variations at high energies—observations at poatina. In: The International Cosmic Ray Conference. 1995, 4: 635
- 165 Munakata K, Kiuchi T, Yasue S, et al. Large-scale anisotropy of the cosmic-ray muon flux in Kamiokande. *Phys Rev D*, 1997, 56: 23–26
- 166 Ambrosio M, Antolini R, Baldini A, et al. Search for the sidereal and solar diurnal modulations in the total MACRO muon data set. *Phys Rev D*, 2003, 67: 042002
- 167 Guillian G, Hosaka J, Ishihara K, et al. Observation of the anisotropy of 10 TeV primary cosmic ray nuclei flux with the Super-Kamiokande-I detector. *Phys Rev D*, 2007, 75: 062003
- 168 Gombosi T, Kóta J, Somogyi A J, et al. Galactic cosmic ray anisotropy at $\sim 6 \times 10^{13}$ eV. In: The International Cosmic Ray Conference. 1975, 2: 586
- 169 Alexeyenko V V, Chudakov A E, Gulieva E N, et al. Anisotropy of small EAS (about 10(13) Ev). In: The International Cosmic Ray Conference. 1981, 2: 146
- 170 Nagashima K, Fujimoto K, Sakakibara S, et al. Galactic cosmic-ray anisotropy and its modulation in the heliomagnetosphere, inferred from air shower observation at Mt. Norikura. *Nuovo Cimento C*, 1989, 12: 695–749
- 171 Amenomori M, Ayabe S, Cui S W, et al. Large-scale sidereal anisotropy of galactic cosmic-ray intensity observed by the Tibet air shower array. *Astrophys J*, 2005, 626: 29–32
- 172 Aglietta M, Alessandro B, Antonioli P, et al. Study of the cosmic ray anisotropy at E_0 –100 TeV from EAS-TOP: 1992–1994. In: The International Cosmic Ray Conference. 1995, 2: 800
- 173 Aglietta M, Alessandro B, Antonioli P, et al. A measurement of the solar and sidereal cosmic-ray anisotropy at E_0 approximately 10^{14} Ev. *Astrophys J*, 1996, 470: 501–505
- 174 Aglietta M, Alekseenko V V, Alessandro B, et al. Evolution of the cosmic-ray anisotropy above 10^{14} eV. *Astrophys J*, 2009, 692: 130–133
- 175 Alekseenko V V, Cherniaev A B, Djappuev D D, et al. 10–100 TeV cosmic ray anisotropy measured at the Baksan EAS “Carpet” array. *Nuc Phys S*, 2009, 196: 179–182
- 176 Abdo A A, Allen B T, Aune T, et al. The large-scale cosmic-ray anisotropy as observed with Milagro. *Astrophys J*, 2009, 698: 2121–2130
- 177 Iuppa R, Aniso Allen B T, Aune T. Tropies in the cosmic radiation observed with ARGO-YBJ. 2011, arXiv:1112.2375
- 178 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. Measurement of the anisotropy of cosmic-ray arrival directions with IceCube. *Astrophys J*, 2010, 718: 194–198
- 179 Abbasi R, Abdou Y, Abu-Zayyad T, et al. Observation of anisotropy in the galactic cosmic-ray arrival directions at 400 TeV with IceCube. *Astrophys J*, 2012, 746: 33–44
- 180 Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Observation of cosmic-ray anisotropy with the IceTop Air Shower Array. *Astrophys J*, 2013, 765: 55–64
- 181 Blasi P, Amato E. Diffusive propagation of cosmic rays from supernova remnants in the Galaxy. II: Anisotropy. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 1: 11–33
- 182 Tibet ASg collaboration. Modeling of the high-energy galactic cosmic-ray anisotropy. *Astrophys Space Sci Trans*, 2010, 6: 49–52
- 183 Qu X B, Zhang Y, Xue L, et al. Anisotropy as a probe of the galactic cosmic-ray propagation and halo magnetic field. *Astrophys J*, 2012, 750: 17–22
- 184 Zhang M, Zuo P, Pogorelov N. Heliospheric influence on the anisotropy of TeV cosmic rays. *Astrophys J*, 2014, 790: 5
- 185 Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. Fermi-LAT observations of the diffuse gamma-Ray emission: Implications for cosmic rays and the interstellar medium. *Astrophys J*, 2012, 750: 3–35
- 186 Bi X J, Yin P F, Yuan Q. Status of dark matter detection. *Front Phys*, 2013, 8: 794–827
- 187 Meyer M, Horns D, Raue M. First lower limits on the photon-axion-like particle coupling from very high energy gamma-ray observations. *Phys Rev D*, 2013, 87: 035027
- 188 Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects. *Nature*, 2009, 462: 331–334
- 189 Kang M M, Hu Y, Hu H B, et al. Cosmic rays during BBN as origin of lithium problem. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 5: 11

Frontier physics problems related to the origin of cosmic rays

HU HongBo & GUO YiQing

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Ever since the discovery of cosmic rays by Austrian physicist Victor Hess with high altitude balloon experiment in 1912, many fundamental particles as well as their interactions have been discovered in the research of cosmic rays. The first evidence of neutrino oscillation was obtained from the solar neutrino and atmospheric neutrino experiments even though particle physics has been dominated by accelerator experiments. To this day, the highest energy particle is known from the observation of cosmic rays, far beyond the reach of man-made particle accelerator. The origin, acceleration and propagation of cosmic rays are century-old scientific problems. From the studies of cosmic rays, the high energy gamma astronomy, high energy neutrino astronomy and ultra-high energy cosmic rays astronomy have been developed. In order to solve the origin problem, it is helpful to precisely measure the chemical composition and energy spectrum of cosmic rays, to observe and locate the sources of high energy gamma rays, neutrinos and ultra-high energy cosmic rays. Recently, with a new generation of space borne and ground based experiments in operation, great progresses have been made in cosmic ray spectrum and the anisotropy measurement. The fine structure of spectral hardening for primary nuclei at 200 GV was observed by ATIC-2, CREAM and PAMELA. And Positron/electron excesses were discovered by PAMELA and ATIC. The latest results by AMS02 experiment also confirmed the spectral hardening and positron excess with unprecedented precision. In the very high energy range, the knee structure of light elements below PeV has been observed by ARGO-YBJ/LHAASO-WFCTA hybrid experiment with a rather small systematic uncertainty. On the other hand, KASCADE experiment observed a knee at 80 TeV for heavy component and an ankle at 200 PeV for light component. By combining the anisotropy results from Tibet AS γ , ARGO-YBJ in northern hemisphere and IceTop in southern hemisphere, a global picture on galactic cosmic ray anisotropy from TeV to PeV energies are now obtained. In the field of high energy neutrino observation, the astrophysical neutrinos with a rather hard spectrum from 30 TeV to 2 PeV have been discovered at a 7.2 significance by IceCube experiment. As for the ultrahigh energy cosmic ray spectrum, AUGER and TA have performed very high precision measurement and their results agree with each other very well. It is worth to note that the composition measurements do not agree with each other when approaching the extremely high energy end. Apparently, GZK cutoff is clearly observed with high significant level. However, alternative explanation, such as the limitation of acceleration power by sources remains possible before the composition is well understood. All these results shed new lights on unveiling the origin of cosmic rays. Besides, these studies are important means to detect the dark matter particle and to explore the evolution of the universe and new laws of physics.

cosmic ray, gamma ray, neutrino

doi: 10.1360/N972015-00702