

Where do the ultra-high energy cosmic rays come from?

超高能宇宙线从何而来?

胡红波^{1,2}, 王祥玉^{3*}, 刘四明^{4,5*}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;

3. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;

4. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210034;

5. 中国科技大学天文和空间科学学院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: xywang@nju.edu.cn; liusm@pmo.ac.cn

2018-01-18 收稿, 2018-04-17 修回, 2018-04-24 接受, 2018-06-29 网络版发表

国家自然科学基金(11635011, U1738122)和国家重点研发计划(2014CB845800)资助

摘要 宇宙线是来自外太空的唯一物质样本, 携带着粒子物理、高能天体物理、宇宙物质组成及其演化的丰富信息. 已知的宇宙线粒子最高能量约为 3×10^{20} eV. “宇宙线是如何被加速的?”“其起源天体是什么?”“在这样的高能情况下, 已知的物理学规律是否还能适用?”等这些都是有待解决的重大科学问题. 为此人们通过多种实验手段在空间和地上开展宇宙线的多信使研究. 在过去的几十年里, 宇宙线、伽马射线和中微子观测取得了丰富的成果: (1) 宇宙线能谱、成分和各向异性的测量精度达到了史无前例的水平, 极高能宇宙线的偶极各向异性表明这些粒子来自银河系之外; (2) 空间实验发现了3000多个GeV伽马源, 地面实验发现了近200个TeV源, 它们大多为高能电子源, 有几个已被认证为强子源; (3) 冰立方实验发现了近百个高能中微子, 它们的各向同性分布暗示着河外起源. 这些新结果为解决宇宙线的起源问题和发展相关的粒子加速理论奠定了基础. 新一代更高灵敏度的实验装置的建设 and 运行正在开启宇宙线粒子天体物理研究的新篇章.

关键词 宇宙线, 伽马射线, 高能中微子, 激波加速, 多信使

1 科学意义

宇宙线的发现源于20世纪初对大气导电性的研究, 人们发现密封容器内的验电器会自发放电. 很多欧洲和北美的物理学家都为大气电离研究做出过贡献, 他们在地面上、隧道里、海面上、海水下、铁塔上、高山上以及高空气球上进行了测量. 集大成者是奥地利的物理学家维克多·赫斯. 在1911~1913年期间, 他利用验电器做了10次气球飞行实验. 在1912年8月7日的决定性飞行实验中, 赫斯发现空气电离率随海拔升高显著加强, 由此他推断: “这次观测结果可能最容易的解释是假设有穿透能力很强的辐射自

上而下进入大气层, 并且仍能够在低海拔的密闭容器中产生部分观测到的电离”. 赫斯的实验结果标志着宇宙线的发现^[1].

之后, 人们使用新发展的粒子探测技术, 对宇宙线开展了一系列研究. 考虑到地磁场对带电粒子运动轨迹的偏转效应, 宇宙线强度的东西不对称性表明其主要为带正电荷的粒子. 人们还发现分布在不同位置上的探测器可以同时探测到宇宙线, 并最终认识到原初宇宙线在大气中与气体物质通过级联簇射产生的次级粒子散布在一个方圆几百乃至上万米的范围内. 通过宇宙线实验, 人们发现了正电子、 μ 介子、 π 介子、K介子、奇异重子、重核子等许多“基

引用格式: 胡红波, 王祥玉, 刘四明. 超高能宇宙线从何而来? 科学通报, 2018, 63: 2440–2449

Hu H B, Wang X Y, Liu S M. Where do the ultra-high energy cosmic rays come from (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2018, 63: 2440–2449, doi: 10.1360/N972018-00084

本粒子”，这些发现为粒子物理的发展奠定了基础^[2]. 20世纪中后期，通过太阳和大气中微子实验，人们发现不同种类的中微子可以互相转化(中微子振荡)，这是宇宙线观测对粒子物理研究做出的最新贡献.

宇宙线是来自外太空的唯一物质样本，约99%为原子核，1%为电子. 此外，在传播过程中，宇宙线通过与星际介质作用，会产生少量次级核子及反质子、反电子、伽马光子和中微子等次级宇宙线粒子^[3]. 宇宙线粒子的流强随着能量由 10^9 eV($1\text{ GeV}=10^9$ eV, $1\text{ TeV}=10^{12}$ eV, $1\text{ PeV}=10^{15}$ eV, $1\text{ EeV}=10^{18}$ eV)增加到 10^{20} eV, 下降了大约30个量级，能谱基本上表现为幂率谱，谱指数约为-2.7，但在3~4 PeV能谱变陡，呈“膝”的形状，而在3~4 EeV能谱变平，呈“踝”的形状，此外还出现一些精细结构. 这些变化很可能与宇宙线起源天体的性质、加速机制和传播过程相关，也可能与暗物质粒子的湮灭或衰变有关.

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，是最大的粒子加速器LHC(large hadron collider)所能加速粒子能量的千万倍. 最高能量处的能谱截断很可能来自于宇宙线质子和微波背景辐射的反应，即著名的质子GZK(Greisen Zatsepin Kuzmin)截断过程，但如果极高能宇宙线不是由质子而是由重核主导，那么这个截断也可能是重核的光致裂解(photodisintegration)或加速源的加速极限所致. 由于“膝”以上的宇宙线流强很低，人们只能通过地面实验间接观测宇宙线与大气簇射反应后的次级产物来研究宇宙线. 原初宇宙线粒子种类的重建强烈依赖于强相互作用模型，“膝”区以上的成分至今依然没有得到准确测量. 宇宙线是在什么天体中如何被加速的，在能谱情况下，已知的物理学规律是否还适用是宇宙线研究的主要科学问题.

1934年，Baade和Zwicky^[4]指出，宇宙线可能来自于超新星爆发. 后来随着射电天文、X射线天文、伽马射线天文的发展，人们不仅发现了超新星爆发产生宇宙线的观测证据，还发现了其他一些可以产生宇宙线的高能天体. 人们目前普遍认为能量低于~1 PeV的宇宙线主要来自于银河系，而能量高于~1 EeV的宇宙线主要来自于河外天体源. 能量低于~1 GeV的宇宙线由于受太阳风的影响，很难到达地球附近. 在地球附近观测到的能量低于1 GeV的高能粒子主要来自于太阳活动^[5].

这些高能粒子是如何获得能量的呢？费米^[6]于

1949年指出高能带电粒子可以通过与运动的磁化分子云随机碰撞获得能量，并且粒子能量随碰撞次数指数增加. 但考虑到粒子从银河系逃逸或与背景中原子核的非弹性碰撞，其保留下来的概率又随碰撞次数指数减少，从而宇宙线能谱表现为幂率形式，与观测结果相符^[1]. 费米机制本质上是利用运动磁场诱导产生的电场来加速带电粒子. 在实际的星际空间中，分子云的形态结构不断地发展演化，所以这一加速机制可以推广为带电粒子和运动磁场随机相互作用导致的加速，即所谓的随机粒子加速机制. 一般而言，参与随机加速的电场不一定都是由磁场运动诱导产生的，等离子体对电中性的偏离也可以产生电场. 这一加速机制在各种自由能耗散过程中普遍存在，可以用来加速不同能量的带电粒子. 但是由于粒子和电场的作用是随机的，带电粒子有可能从电场中获得能量，也有可能损失能量. 平均而言在较长的时间尺度带电粒子的能量是增加的，其对应于二阶Fermi加速，相应的加速率不会很高.

高能粒子通常和磁流体尺度的电磁场相互作用. 在定量研究带电粒子被磁场运动诱导产生的电场加速时，人们注意到在一般情况下天体等离子体以远小于光速的速度运动，相应的磁场强度要远大于电场强度，因此磁场对粒子动量的改变要比电场有效得多. 考虑到在不规则磁场中运动的带电粒子轨道的混沌特征，Parker^[7]首先引入对流扩散方程来分析高能粒子在背景等离子体中的输运性质，这个方程也是后来发展完善的扩散激波粒子加速理论的基础^[8]. 这个方程把高能粒子在流体共动参考系中和背景不规则磁场的相互作用采用一个高能粒子的空间扩散系数来描述. 而带电粒子和诱导电场作用导致的能量改变主要是通过背景流体场的压缩或膨胀以及高能粒子在背景速度场中的扩散而实现. 背景流体场的绝热压缩或膨胀对应于一阶Fermi加速，而粒子在剪切速度场中的扩散对应于二阶Fermi加速^[9].

在对流扩散方程基础上发展的扩散激波粒子加速理论指出在激波能量耗散的过程中，承载激波的流体运动的动能可以通过电磁场加速激波面附近的带电粒子. 如果高能粒子在和背景等离子体共动的参考系中的角度分布是各向同性的，激波下游被加速粒子的动量分布稳态时将服从幂律分布，并且幂律分布的谱指数由激波的压缩比决定，和高能粒子的具体扩散行为无关(激波上游高能粒子的动量分布

依赖于扩散系数). 它是唯一一个把高能粒子的能量分布特征和宏观流体的性质直接联系起来的理论, 其预言的幂律分布也与许多高能天体源的观测特征基本一致.

除了直接探测宇宙线粒子, 科学家也通过探测伽马射线和中微子来间接研究宇宙线. 因为带电宇宙线粒子从源传播到地球的途中会受到空间磁场的偏转, 导致我们不能通过宇宙线的方向直接追溯其起源天体. 利用宇宙线伴随产生的伽马射线或中微子辐射间接寻找宇宙线的起源天体是研究宇宙线起源的重要方法, 利用伽马射线和中微子、甚至引力波等手段来研究宇宙线的起源被称为“多信使”手段研究.

伽马射线观测的优势在于能揭示宇宙线加速区域的结构和演化. 伽马射线探测设备可以分为两类. 一类是利用空间探测器直接探测伽马光子, 如费米、AGILE(astro-rivelatore gamma a Immagini leggero)卫星; 另一类是探测高能伽马光子产生的大气簇射, 包括成像大气契伦科夫望远镜和地面粒子探测器阵列, 如HESS(high energy stereoscopic system), MAGIC(major atmospheric gamma imaging cherenkov), VERITAS(very energetic radiation imaging telescope array system), Tibet-AS γ (tibet-air shower gamma), ARGO-YBJ(astrophysical radiation ground-based observatory Yangbajing), HAWC(high-altitude water cherenkov observatory)等. 这些设备已经探测到了大量的伽马射线源, 最高探测能量也达到了100 TeV. 通过研究这些伽马辐射的性质, 科学家发现了超新星遗迹、分子云、银河系中心超大质量黑洞、银河系外的活动星系核、星暴星系等天体是宇宙线的加速源. 例如, 费米卫星合作组通过分析超新星遗迹W44和IC433的伽马射线能谱, 发现了宇宙线强子产生的伽马射线的独特能谱特征, 从而说明超新星遗迹能加速GeV~TeV宇宙线. 这个工作被*Science*评为2013年度十大科学进展之一^[10].

高能中微子只能由宇宙线与光子或物质反应产生, 因此高能中微子也是研究宇宙线的重要信使. 2013年, 位于南极的IceCube(冰立方)中微子探测器首次探测到地球之外的高能中微子, 开辟了高能中微子天文学的新时代^[11]. 这个发现被欧洲物理学会的新闻网站*Physics World*评选为2013年突破性进展之首. IceCube探测到的中微子能量高达几个PeV, 它们的到达方向各向同性, 表明这些中微子应该来自

于银河系之外的天体. 虽然至今IceCube已探测到数十个高能中微子, 但由于它们的方向误差较大, 仍没有找到与其对应的天体. 理论分析认为产生高能中微子的天体必须具有强大的加速宇宙线强子的能力, 可能的候选天体包括星暴星系、活动星系核、射电星系、伽马射线暴等.

2 近年来的研究进展

2.1 宇宙线电子和核子

近年来, 随着新的空间和地面实验不断投入运行以及新的分析方法的应用, 很多宇宙线相关的研究进入到了精确测量的时代. 以AMS02(alpha magnetic spectrometer02)为代表的空间宇宙线实验, 把GeV~TeV能区的宇宙线能谱测量精度提高到了史无前例的水平. 众多的实验结果显示, 从磁刚度(宇宙线粒子的动量乘以光速除以电荷量)为200 GV开始, 宇宙线核子的能谱变得平坦(也称变硬, 即幂率谱指数变大), 但10 TV开始有迹象变陡. 基于这些精确的能谱测量结果, 宇宙线在银河系内的传播参数得到了更好的限制, 宇宙线传播模型和众多的正电子超出模型得到了高精度的检验. 2015年12月17日, 我国成功发射暗物质粒子探测卫星(dark matter particle explorer, DAMPE), 其在GeV至10 TeV能区精确测量了电子能谱^[12], 进一步推动了间接寻找暗物质粒子和宇宙线加速问题的研究. 空间实验测量宇宙线核子的能量可以达到100 TeV之上, 但限于探测面积, 事例数较少, 统计误差较大.

100 TeV之上宇宙线能谱的有效测量需通过地面大气广延簇射(EAS)阵列实验, 而这种间接测量方法在确定原初粒子种类时, 需借助由低能实验外推而得到的高能强相互作用模型, 模型间的差异导致“膝”区前后宇宙线成分和能谱测量存在很大的系统误差^[13]. 比如羊八井的AS γ 和ARGO-YBJ实验认为质子和氦核的“膝”在400~700 TeV附近, 而德国的KASCADE(Karlsruhe shower core and array detector)/KASCADE-Grande、俄国的Yakutsk和Tunka-133等实验则认为“膝”主要由轻成分(质子与氦核)组成. LHC实验之后, 强相互作用模型得到了较大的改善, KASCADE/KASCADE-Grande对新模型进行了检验, 但发现模型导致的系统误差问题依然存在^[14]. 该实验位于海平面, 对于“膝”与“踝”之间的宇宙线来讲,

位于簇射发展极大位置之后, 不难理解模型依赖问题会更加严重, 但也正因为如此, 其数据可对模型做出更为灵敏的检验. 近年来, 更为精确的测量发现宇宙线总能谱在10 PeV处有微小的“踝”结构. 另外, KASCADE-Grande实验还发现重核的能谱在80 PeV处有一个“膝”, 轻成分在200 PeV有一个“踝”样的拐折, 该结果还有待其他实验的检验.

目前正在运行的极高能宇宙线实验有分别位于南北半球的AUGER和TA(telescope array), 它们联合起来覆盖了整个天空. 将AUGER的能标增大5.2%, TA的减小5.2%, 使两者的“踝”重合后, AUGER和TA的一个联合工作小组发现, 他们在相同天区里的测量结果于误差范围内一致. 然而, 总谱在 $10^{19.6}$ eV后依然显著不同, 或许存在未明的系统误差, 或许极高能宇宙线在南北两个天区存在一定的差别^[15]. 最高端的能谱截断与HiRes(high resolution fly's eye)早期的结果和GZK的预期一致, 不过极高能宇宙线的成分尚无定论. 随着能量由 10^{18} eV增加到 10^{19} eV, AUGER实验认为宇宙线成分由轻变重, 而HiRes/TA实验则认为其没有明显变化并由质子主导. AUGER和TA的另一个联合工作小组分析了他们在公共天区里测量到的宇宙线能谱和成分, 发现在 $10^{18.2}\sim 10^{19}$ eV能区, 在误差范围内, 两个实验获得的数据是相符的, 尽管它们的解释看似不同^[16]. 这表明探测技术和分析方法的差异可能导致理解上的差别. 另外极高能宇宙线的压低机制与洛伦兹不变性的破坏有紧密联系, 可以用来研究物理学基本规律.

宇宙线各向异性观测也是研究宇宙线起源的重要方面. 类似于光线, 来自源方向的宇宙线流会更强. 与扩散和对流过程相关的宇宙线流直接表现为大尺度各向异性, 宇宙线的小尺度各向异性则很可能来自于太阳系附近磁场的调制^[17].

近年来, AS γ 等实验相继报道了宇宙线两维各向异性的测量结果. 在TeV能区, 各向异性的强度约在0.1%的量级, 观测到了来自日球磁尾方向的强度增强和沿银河北极方向的强度减弱. 此外, 实验中还发现了来自天鹅座(Cygnus)方向的宇宙线的增强. 根据AS γ 的测量结果, 还可以推断银河宇宙线随环境一起绕银河系的中心旋转. 多个实验的观测还表明银河宇宙线的各向异性不随太阳的活动而变化. 此外, 在100 TeV~PeV能区, 由南极IceCube实验和羊八井中日合作AS γ 实验所做的各向异性测量发现其振幅较

TeV能区略有减小^[18], 且与TeV相比具有完全不同的空间结构, 在银心方向表现出明显的增强. 这样的空间分布可能表明PeV宇宙线主要来自银河系.

不久前, 极高能宇宙线实验AUGER合作组通过分析12年来获得的3万个能量高于8 EeV的数据, 以5.2倍的显著性观测到了极高能宇宙线的偶极各向异性^[19]. 各向异性的振幅为6.5%, 方向离银心方向有125°之远, 表明它们应起源于银河系外. 另一方面, 偶极各向异性的方向与我们周边星系按红外光谱强度(也即星系质量)加权后得到的偶极方向仅差55°, 该角度差与预期的极高能宇宙线粒子因银河系磁场而致的角度偏转是一致的, 进一步支持了极高能宇宙线起源于银河系外的假设. TA实验则在57 EeV之上观测到一个微弱的超出区域, 但在较低能时(16~57 EeV), 相同区域内的事例却出现缺失. 受限于统计量, 尚不足以得到确定结论.

2.2 高能伽马射线

伽马射线天文随着观测仪器的发展也取得了重要科学进展. 从观测能段看, 能量跨越了6个量级(100 MeV~100 TeV). 探测到的伽马射线源的种类和数目也大大增加. 由于探测能力的增加, 近15年来一批新的重要伽马射线源被发现, 如银河系中心的大尺度费米泡、脉冲星风云、伽马射线双星、银河系的分子云、河外星暴星系、高红移活动星系核等. 费米卫星和大气契伦科夫望远镜发现了一批恒星形成星系和星暴星系的伽马射线辐射, 并且发现伽马射线光度与星系的恒星形成率有很好的相关性^[20]. 这表明伽马射线辐射是由与恒星形成相关联的物理过程产生, 很可能是超新星遗迹或大质量恒星的星风加速的宇宙线与星系中的介质作用产生伽马射线辐射. 这些新的伽马射线源的发现揭示了一些新的宇宙线加速天体.

PeV能量以下的宇宙线通常认为起源于银河系内的超新星遗迹. 通过对超新星遗迹伽马射线的研究, 科学家发现宇宙线强子模型可以很好地解释一些超新星遗迹的能谱. 然而, 超新星遗迹并没有显示能加速PeV能量宇宙线的证据. 最近HESS探测器对银河系中心的分子云区域进行了长时间观测, 发现了能量高于几十TeV的弥漫伽马射线辐射^[21], 这要求银河系中心存在某些天体能把宇宙线加速到PeV能量. 另外, 当Ib/Ic型超新星的遗迹在大质量恒星的星风中传播时,

由于磁场更大,可以把宇宙线加速到PeV能量^[5].

能量高于100 PeV的宇宙线一般认为来自于银河系外的天体.活动星系核、伽马射线暴、巨超新星遗迹被认为是这些极高能宇宙线的重要候选天体^[22-24].近些年的研究发现,部分活动星系核的高能伽马射线能谱可以用宇宙线强子模型解释,伽马射线暴的高能伽马辐射也可以用强子模型解释,因此它们是可能的极高能宇宙线的加速天体^[25].

中国科学院高能物理研究所利用西藏羊八井AS γ 和ARGO-YBJ实验对河外活动星系核的探测以及对银河系内伽马射线源的观测取得了一系列重要成果^[26].紫金山天文台领导的暗物质粒子探测卫星也观测到一些伽马射线源,这些观测对研究宇宙线起源有重要意义. Peng等人^[27]通过分析费米巡天数据发现了第一个极亮红外星系(Arp 220)的高能伽马辐射,揭示了这类极端星系中的宇宙线加速过程.此外我国科学家在超新星遗迹的高能辐射^[28,29]、脉冲星风云的高能辐射研究^[30]、活动星系核的高能辐射、伽马射线暴的高能辐射机制等研究方面都取得了重要成果.

2.3 高能中微子

自南极IceCube探测器发现高能中微子以来,中微子的研究在国际上掀起了一轮高潮.高能中微子的起源是其中的关键科学问题.由于没有发现伽马射线暴与高能中微子成协,伽马射线暴中的强子辐射得到了严格的限制^[25].对中微子到达方向和时间与可能的候选源的交叉相关分析尚没有发现确定的成协天体.另外,科学家在中微子探测方向的误差范围内寻找成协天体时,在个别高能中微子情况下发现有耀变体(活动星系核的一类)的存在.由于这种成协的偶然概率仍较大,科学家尚不能确定是否是真实成协.因此高能中微子起源仍是一个未解之谜.我国科学家在高能中微子的起源的理论研究方面取得了一些成果. Liu等人^[31]提出恒星形成星系中的巨超新星遗迹可产生能量高达PeV的高能中微子,并且通过对河外弥漫TeV背景的研究提出绝大部分的高能中微子应起源于高红移的天体. Wang等人^[32]发现活动星系核对于高能中微子的贡献较小,而星暴星系可以贡献绝大部分的高能中微子.

2.4 宇宙线加速理论

在粒子加速机制研究方面,近年通过理论分析

和观测应用,人们发现对流扩散方程面临许多挑战.在理论上,要用扩散方程描述带电粒子和背景电磁场的作用,相应的粒子运动的平均自由程需要远小于背景流体场的变化尺度,否则这些粒子就不会和背景速度场有有效的相互作用^[9].而对于我们关心的高能宇宙线粒子,它们在背景磁场中运动的平均自由程通常会比较长,这样在给定的时空位置,高能粒子的输运特征不仅依赖于当地电磁场的性质,还依赖于邻近电磁场的特征.虽然基于微扰理论这一方面的问题已经得到了系统研究^[33],有关成果还没有被广泛应用^[34].另一方面随着计算机数值模拟能力的不断提高,人们可以通过磁流体数值模拟产生磁湍流并通过测试粒子的数值模拟来研究其中高能粒子的输运特征.有些研究表明,粒子在湍动电磁场中可以表现出超扩散或亚扩散等反常扩散行为^[35],这直接挑战着对流扩散方程的实用性.这方面的理论还有待进一步发展^[36,37].而把扩散激波粒子加速理论应用到相对论激波时,问题的复杂性会显著增加^[23].

将经典扩散激波粒子加速理论应用于超新星遗迹的射电观测时,人们发现简单的激波粒子加速理论无法解释超新星遗迹射电能谱为何会随着超新星遗迹的演化而逐渐变硬的现象.其次对于一些年老的超新星遗迹,其射电辐射谱对应的电子能谱指数比强激波能够产生的能谱还要硬.围绕这些问题,人们提出了各种可能的解决方案,但总体而言,目前还缺乏共识^[38].另一方面,超新星遗迹的多波段能谱观测还发现了许多和粒子加速过程紧密相关的现象^[39],简单的扩散激波粒子加速理论在解释这些现象时也遇到了一些困难.特别是对于年轻的超新星遗迹,有证据表明激波下游磁场被显著放大.这一磁场放大效应可以通过磁流体力学过程来实现^[40].考虑到宇宙线对背景等离子体可能的反作用,在非线性扩散激波粒子加速理论的框架下,从激波面附近向上游逃逸的高能粒子也可以显著地放大背景磁场,这些成果还有待被观测进一步证实^[41].需要指出的是Hillas图表明磁场的放大机制和激波所能加速粒子的最高能量密切相关^[5],进而影响着宇宙线起源问题的研究.

过去几年随着X射线天文和伽马射线天文取得长足进展,超新星遗迹中高能粒子加速问题的研究变得更具有挑战性^[39].最近结合宇宙线能谱精细结

构的测量以及超新星遗迹多波段观测的分析^[42],并考虑到上面提到的扩散系数的不确定性,Zhang等人^[34]指出超新星遗迹中高能粒子的加速时标可能和遗迹激波的寿命相当.考虑到粒子加速过程随时间的演化,经典理论在解释超新星遗迹激波观测方面遇到的困难有可能可以得到系统解决,这方面的研究工作有待进一步完善.结合宇宙线在银河系的传播模型^[43],银河系宇宙线的超新星遗迹起源学说正在被日益完善.

在利用全粒子数值模拟(particle in cell, PIC)研究粒子加速方面,Lu等人^[44]在这些年开展了一系列研究工作.但是总体而言PIC模拟的时空尺度比较小,适合用来研究湍动电磁场在动力学尺度对背景中能量较低的带电粒子的加速.对于能量较高的高能粒子,通常认为磁流体理论可以自洽地描述高能测试粒子的加速过程.高能粒子对背景磁流体的反作用在流体力学框架下可以通过引入和高能粒子有关的压强项来近似处理^[41].而高能粒子从激波上游逃逸而导致的磁场放大需要通过对相关不稳定性的分析来定量研究^[45].

3 总结与展望

空间宇宙线实验方面,气球实验CREAM(cosmic ray energetics and mass)经过改造成为ISS-CREAM(international space station-cosmic ray energetics and mass),已于2017年8月14日搭乘龙飞船飞往国际空间站,预计将在那里开展为期至少3年的运行和观测,有望在1 TeV~1 PeV能区给出高统计量的宇宙线能谱测量.此外,我国计划安装于中国空间站的HERD(high energy cosmic-radiation detection)探测器,性能指标优异,具有比AMS02、DAMPE等大一个量级的几何因子,相应的数据收集能力和最大测量能量比以往实验均提高一个量级.

地面伽马天文方面,为增加探测灵敏度,国际上正在建设下一代的大气切伦科夫望远镜CTA,其探测能力将比目前的探测器提高一个量级以上.我国正在建设的高海拔宇宙线观测站LHAASO(large high altitude air shower observatory)将发挥高海拔的优势,采用多种探测技术手段实现复合、精确的测量,大幅提高灵敏度并覆盖更宽广能谱,拥有低阈能、大有效面积,大视场和全天候等优势.LHAASO对TeV能段的伽马射线源将有最强的巡天扫描搜索能力,在100

TeV能段将具有最高探测灵敏度.由于这些新设备具有更高的灵敏度和更大的视场,它们对于寻找宇宙线的加速天体更有优势.LHAASO实验预计2020年建成运行.

此外,更为大型的高能中微子探测设备已被提出,如第二代IceCube探测器、计划在地中海建设的KM3NeT(cubic kilometre neutrino telescope)项目.未来10年将是多信使手段研究宇宙线起源的重要时期.国际上多个国家,包括我国研究人员正在提出新的伽马射线和中微子探测设计方案,并在积极开展预先研究.

极高能宇宙线实验方面,AUGER计划增加射电探测天线和塑料闪烁体,使用多种测量技术开展多参数观测.而TA实验则计划将探测面积扩大4倍,使北半球的探测面积达到与南半球AUGER实验相同的面积.为加大探测面积,人们考虑把广角大气荧光望远镜放在卫星或空间站上.2016年4月28日,第一颗这样的卫星实验TUS在俄国发射成功,其有效面积约是500 平方千米的地面实验,为未来具有几十万平方千米有效面积的K-EUSO(Klypve-extreme universe space observatory)或JEM-EUSO(extreme universe space observatory onboard Japanese experiment module)计划开辟了道路.

根据这些发展形势,预计未来的粒子天体物理研究至少(但不限于)在以下几个方面将有重要进展:

(1) 精确测1 GeV~100 EeV能区的宇宙线成分能谱和各向异性,理解宇宙线能谱的“膝”和第二个“膝”的起源,确定银河宇宙线与河外宇宙线的过渡能量,理解极高能宇宙线能谱的截断是否来自GZK机制,有望发现极高能宇宙线的加速源.

(2) 精确测量1 GeV~100 TeV能区的电子能谱和各向异性,理解100 GeV以上宇宙线电子谱超出的起源,研究电子谱可能的其他结构,间接探测暗物质粒子.

(3) 精确测量GeV~PeV能区内弥散伽马射线的能谱,对银河系内外的宇宙线的起源、加速和传播进行高精度的研究,对暗物质粒子和其他新物理学规律进行高灵敏度的研究.

(4) 寻找银河系内的PeV宇宙线的加速天体.CTA和LHAASO在10 TeV以上的探测灵敏度比以前的设备都有大的提高,能够确定超新星遗迹以及银河系中心在10 TeV以上的高能伽马辐射机制.这是由于电子的逆康普顿散射过程受到Klein-Nishina效

应的影响会在10 TeV以上产生能谱的截断,而强子模型不会产生这样的能谱结构。

(5) 对恒星形成系统的研究将取得进展. 银河系的分子云、恒星形成星系、星暴星系都产生高能伽马辐射,它们都起源于宇宙线的作用过程. 未来在10 TeV以上的探测将对这些系统中的宇宙线的传播、对流等过程获得更明确的认识。

(6) 对河外活动星系核在更高能段上进行观测,确定活动星系核是否具有强子辐射的贡献. 活动星系核在TeV之上的能谱行为对于检验强子模型和轻子模型非常关键,因而对于研究活动星系核是否是极高能宇宙线源有重要价值。

(7) 通过下一代高能中微子探测设备的观测,确定IceCube探测到的高能中微子的起源天体。

(8) 伽马射线和中微子的观测不仅对揭示宇宙线的起源有关键作用,它们对于研究极端天体本身

的物理过程也有重要价值. 比如,它们可以研究不同天体中的激波形成过程. 由于中微子传播具有无障碍的特征,它可以用来揭示位于天体最深处的黑洞的活动性质。

(9) 在粒子加速理论方面,经典的对流扩散理论可以解释大部分河外源的观测特征. 结合新的观测进展,预期可以对这些源中和粒子加速相关的物理参数给出更严格的限制. 对于河内源,超新星遗迹激波以及脉冲星风云中高能粒子的加速和传播过程可以通过相关的多波段观测给出更好的限制,通过考虑随时间演化的粒子加速过程,有望对高能粒子的注入过程给出定量限制,从而为系统解决超新星遗迹和脉冲星对宇宙线的贡献奠定基础。

(10) 对于一些特殊的观测现象,特别是脉冲星的高能辐射,有必要发展非经典的粒子加速理论以解释在极端物理条件下的粒子加速过程。

参考文献

- 1 Todor S. High Energy Cosmic Rays. 2nd ed. Praxis Publishing Ltd: Chichester, 2010
- 2 Hu H B, Han J L. A century studies of cosmic rays (in Chinese). Physics, 2012, 2: 45–47 [胡红波, 韩金林. 宇宙线的百年研究. 物理, 2012, 2: 45–47]
- 3 Hu H B, Guo Y Q. Frontier physics problem related to the origin of cosmic rays (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 11: 1188–1209 [胡红波, 郭义庆. 宇宙线起源中的物理学前沿问题. 科学通报, 2016, 11: 1188–1209]
- 4 Baade W, Zwicky F. Cosmic rays from super-novae. Astronomy, 1934, 20: 259
- 5 Liu S M. Particle acceleration in the universe. Sci China Phys Mech Astron, 2015, 45: 119509 [刘四明. 宇宙中高能带电粒子的加速. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 119509]
- 6 Fermi E. On the origin of the cosmic radiation. Phys Rev, 1949, 75: 1169–1174
- 7 Parker E N. The passage of energetic charged particles through interplanetary space. Planet Space Sci, 1965, 13: 9–49
- 8 Drury L. An introduction to the theory of diffusive shock acceleration of energetic particles in tenuous plasmas. Rep Prog Phys, 1983, 46: 973–1027
- 9 Earl J, Jokipii J, Morfill G. Cosmic-ray viscosity. Astrophys J, 1988, 331: L91–L94
- 10 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants. Science, 2013, 339: 807–811
- 11 Aartsen M G, Abbasi R, Abdou Y, et al. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector. Science, 2013, 342: 6161
- 12 Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons. Nature, 2017, 552: 63–66
- 13 Pierog T. Air Shower Simulation with a new generation of post-LHC hadronic interaction models in CORSIKA. In: The International Cosmic Ray Conference, 2017. 1100
- 14 Schoo S, Kang D, Apel W D, et al. A new analysis of the combined data from both KASCADE and KASCADE-Grande. In: The International Cosmic Ray Conference, 2017. 339
- 15 Dmitri I. Report of the telescope array-Pierre Auger observatory working group on energy spectrum. In: The International Cosmic Ray Conference, 2017. 498
- 16 De Souza V. Testing the agreement between the $X_{\max}$ distributions measured by the Pierre Auger and telescope array observatories. In: The International Cosmic Ray Conference, 2017. 522
- 17 Ahlers M. Anomalous anisotropies of cosmic rays from turbulent magnetic fields. Phys Rev Lett, 2014, 112: 0211015

-
- 18 Amenomori M, Bi X J, Chen D, et al. Northern sky galactic cosmic ray anisotropy between 10–1000 TeV with the Tibet air shower array. *Astrophys J*, 2017, 836: 153
 - 19 Aab A, Abreu P, Aglietta M, et al. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} eV. *Science*, 2017, 357: 1266–1270
 - 20 Ackermann M, Ajello M, Allafort A, et al. GeV observations of star-forming galaxies with the Fermi large area telescope. *Astrophys J*, 2012, 755: 164
 - 21 Abramowski A, Aharonian F, Benkhali F A, et al. Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre. *Nature*, 2016, 531: 476–479
 - 22 Kotera K, Olinto A V. The astrophysics of ultrahigh-energy cosmic rays. *Annu Rev Astron Astr*, 2011, 49: 119–153
 - 23 Waxman E. Cosmological gamma-ray bursts and the highest energy cosmic rays. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 386–389
 - 24 Wang X Y, Razzaque S, Mészáros P, et al. High-energy cosmic rays and neutrinos from semirelativistic hypernovae. *Phys Rev D*, 2007, 76: 083009
 - 25 Boettcher M, Reimer A, Sweeney K, et al. Leptonic and Hadronic modeling of Fermi-detected Blazars. *Astrophys J*, 2013, 768: 54
 - 26 Bartoli B, Bernardini P, Bi X J, et al. Long-term monitoring of Mrk 501 for its very high energy γ emission and a flare in 2011 October. *Astrophys J*, 2012, 758: 2
 - 27 Peng F K, Wang X Y, Liu R Y, et al. First detection of GeV emission from an ultraluminous infrared galaxy: Arp 220 as seen with the Fermi large area telescope. *Astrophys J Lett*, 2016, 821: L20
 - 28 Li H, Chen Y. γ -rays from molecular clouds illuminated by accumulated diffusive protons from supernova remnant W28. *Mon Not R Astron Soc Lett*, 2010, 409: L35–L38
 - 29 Yuan Q, Liu S M, Fan Z H, et al. Modeling the multi-wavelength emission of the shell-type supernova remnant RX J1713.7-3946. *Astrophys J*, 2011, 735: 120
 - 30 Zhang L, Chen S B, Fang J. Nonthermal radiation from pulsar wind nebulae. *Astrophys J*, 2008, 676: 1210–1217
 - 31 Liu R Y, Wang X Y, Inoue S, et al. Diffuse PeV neutrinos from EeV cosmic ray sources: Semirelativistic hypernova remnants in star-forming galaxies. *Phys Rev D*, 2014, 89: 083004
 - 32 Wang B, Zhao X H, Li Z. Implications of Fermi-LAT observations on the origin of IceCube neutrinos. *J Cosmol Astropart P*, 2014, 11: 28
 - 33 Bykov A, Toptygin I. Particle kinetics in highly turbulent plasmas. *Phys Usp*, 1993, 36: 1020–1052
 - 34 Zhang Y R, Liu S M, Yuan Q. Anomalous distributions of primary cosmic rays as evidence for time-dependent particle acceleration in supernova remnants. *Astrophys J Lett*, 2017, 844: L3–L7
 - 35 Xu S Y, Yan H R. Cosmic-ray parallel and perpendicular transport in turbulent magnetic fields. *Astrophys J*, 2013, 779: 140–147
 - 36 Perri S, Zimbardo G. Superdiffusive shock acceleration. *Astrophys J*, 2012, 750: 87–91
 - 37 Bian N H, Browning P K. Particle acceleration in a model of a turbulent reconnecting plasma: A fractional diffusion approach. *Astrophys J*, 2008, 687: L111–L114
 - 38 Reynolds S P, Gaensler B M, Bocchino F, et al. Magnetic fields in supernova remnants and pulsar-wind nebulae. *Space Sci Rev*, 2012, 166: 231–261
 - 39 Helder E A, Vink J, Bykov A M, et al. Observational signatures of particle acceleration in supernova remnants. *Space Sci Rev*, 2012, 173: 369–431
 - 40 Ji S Q, Oh S P, Ruszkowski M, et al. The efficiency of magnetic field amplification at shocks by turbulence. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 463: 3989–4003
 - 41 Zirakashvili V N, Aharonian F A. Nonthermal radiation of young supernova remnants: The case of RX J1713.7-3946. *Astrophys J*, 2010, 708: 965–980
 - 42 H.E.S.S. collaboration. H.E.S.S. observations of RX J1713.7-3946 with improved angular and spectral resolution: Evidence for gamma-ray emission extending beyond the X-ray emitting shell. *Astron Astrophys*, 2017, arXiv: 1609.08671
 - 43 Guo Y Q, Hu H B, Tian Z, et al. On the contribution of a hard galactic plane component to the excess of secondary particles. *Chin Phys C*, 2016, 40: 115001–115008
 - 44 Lu Q M, Huang C, Xie J L, et al. Features of separatrix regions in magnetic reconnection: Comparison of 2-D particle-in-cell simulations and Cluster observations. *J Geophys Res-Space*, 2010, 115: A11208
 - 45 Bell A R. Turbulent amplification of magnetic field and diffusive shock acceleration of cosmic rays. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 353: 550–558



王祥玉

南京大学天文与空间科学学院教授, 博士生导师. 1995年毕业于南京师范大学并获学士学位. 2001年毕业于南京大学并获博士学位. 曾获国家自然科学二等奖、全国优秀博士学位论文奖, 国家杰出青年科学基金资助. 研究方向主要为高能天体物理和宇宙线天体物理.



刘四明

中国科学院紫金山天文台研究员, 宇宙高能粒子加速和辐射研究组首席. 1997~1999年, 北京大学理论物理专业硕士; 1999~2002年, 美国亚利桑那大学天体物理专业博士; 2002~2005年, 美国斯坦福大学博士后; 2005~2008年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室主任博士后; 2008~2010年, 英国格拉斯哥大学玛丽居里研究员. 主要从事高能粒子加速和辐射机制研究, 在波和粒子共振相互作用、黑洞吸积、超新星遗迹和太阳耀斑多波段研究等方面有重要成果.

Where do the ultra-high energy cosmic rays come from?

Hongbo Hu^{1,2}, Xiangyu Wang^{3*} & Siming Liu^{4,5*}

¹*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

²*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*

⁴*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, China;*

⁵*School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology, Hefei 230026, China*

* Corresponding authors, E-mail: xywang@nju.edu.cn; liusm@pmo.ac.cn

Cosmic rays are the only sample of matter coming from outer space. They carry rich information about particle physics, high-energy astrophysics, composition and evolution of the Universe. The highest energy of cosmic rays detected so far is about 3×10^{20} eV. “How are the cosmic rays accelerated?” “What kind of astronomic sources do the cosmic rays originate from?” “Are the fundamental physics laws still valid in such high-energy scales?” are all important scientific problems waiting to be addressed. To answer these questions, various space and ground experiments have been carried out to explore the nature of cosmic rays in a multi-messenger approach. The past few decades have witnessed great achievements in high-energy cosmic ray, gamma ray, neutrino observations, and detection of gravitational wave. (1) The cosmic ray spectra, composition, and anisotropy have been measured with unprecedented precision leading to better understanding of cosmic ray acceleration and transport and stricter constraints on properties of potential candidates of dark matter particles, and the dipole anisotropy of ultrahigh energy cosmic rays indicates that they have an extragalactic origin. (2) Space borne experiments have discovered more than 3000 sources in the GeV range, and the ground based experiments have uncovered more than 200 sources at TeV energies. Most of these sources are high-energy electron accelerators, and a few of them are identified as the accelerators of cosmic ray nuclei. Diffuse gamma-ray emission associated with galactic disks and jets and/or outbursts of Active Galactic Nuclei is also measured with better spatial and energy resolutions, which can be used to study cosmic ray transport in the interstellar/galactic/cluster medium. (3) With the IceCube experiment, about 100 high-energy neutrino events have been recorded and their isotropic distribution suggests an extragalactic origin. (4) The first gravitational wave event with simultaneous multi-wavelength observations has been detected opening the epoch of gravitational wave astronomy. Strong gravitational wave events represent the most catastrophic energy release in the Universe and can be important cosmic ray sources. These new results established the foundation to address the origin of cosmic rays and to develop theories of particle acceleration and transport. The study of cosmic ray transport has gone beyond the diffusion approximation to study the effect of magnetic field fluctuations on small scale anisotropy of cosmic rays and comprehensive numerical modelings of cosmic ray transport in the Galaxy are advanced with multi-wavelength observations. Diffusive particle acceleration by strong shocks of supernova remnants (SNRs) is also advanced based on multi-wavelength observations and cosmic ray measurements. The scenario of SNR origin of Galactic cosmic rays is being quantified with testable predictions. Although there are still uncertainties in amplification of magnetic field by cosmic rays and cosmic ray scattering by turbulent plasmas, sophisticated numerical codes are being developed to address these issues. Successful construction and operation of new generation cosmic ray and gamma-ray experiments will open a new chapter of the astro-particle physics study.

cosmic rays, gamma ray, high energy neutrino, shock wave acceleration, multi-messenger

doi: 10.1360/N972018-00084