Where do ultrahigh-energy cosmic rays come from?

超高能宇宙线源于何处?

曹臻

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

E-mail: caozh@ihep.ac.cn

2016-07-29 收稿, 2016-08-06 修回, 2016-08-06 接受, 2016-09-05 网络版发表

摘要 讨论超高能宇宙线(UHECR)粒子的身世, 即它们可能的出生地、可能的产生机制、到达我们的探测器之前它们可能的旅途长短和经历。人类对这方面的知识太有限, 只能对我们的已有知识做一个总结, 包括一个基于产生UHECR的必要条件而对一些天体的分类、实验上对于UHECR来自于银河系外的两个证据和与之伴随而来的难解之谜, 并对未来的发展尤其是未来实验做一个展望。

关键词 宇宙线源, 银河外星系, 宇宙线能谱, GZK 截断, 各向异性

超高能宇宙线(ultrahigh-energy cosmic rays, UHECR)有一个模糊的定义, 随人们对高能粒子的认识积累、人工加速器最高加速能量上限的提高, UHECR的下限能量也就自然在不断地提高, 但无论怎么提高, 10 EeV ($1 \text{ EeV} = 10^{18}$ 电子伏特)以上的宇宙线可以安全地划到这个范畴。这篇短文的主角就是这种UHECR粒子, 而讨论的问题是它们的身世, 即它们可能的出生地、可能的产生机制、到达我们的探测器之前它们可能的旅途长短和经历。注意, 我坚持使用“可能的”这个词, 因为人类对这方面的知识太有限, 并不具备准确回答这个问题的条件, 所以, 这里试图对我们的已有知识做一个总结, 并对未来的发展做一个简单的展望。

按照正常的思维逻辑和天文学的习惯, 回答这个问题最简单的办法是找到UHECR粒子的起源天体, 在行内还有一种称呼, 叫“宇宙超级加速器”所在的天体, 而UHECR粒子就是在其中被至少加速到 10 EeV 。按我们对这种加速器的粗略想象, 和对各种天体的大量观测所建立关于其周围物质, 和电磁场的分布的粗略和间接的知识, 在某些天体内或表面存在高强度的爆发过程、乃至整个天体的塌缩, 会导

致大量高速抛射物质从而形成局部很强的激波场, 当天体附近广泛存在的带电粒子(我们熟悉的恒星太阳周围的太阳风粒子、或地球电离层里的质子、电子等)在穿过这些激波前锋面时, 就会得到加速。显然, 如果每个粒子只穿过激波面一次, 不可能一下就被加速到这么高的能量。但是通常的天体都有一个磁场与之相伴(如太阳和地球的磁场一样), 它具备将粒子束缚在周围的能力, 这就提供了一个让这些粒子反复通过激波面的机会。如果通过的次数足够多, 就能被加速到越来越高的能量, 最终, 高到一定程度并超出了当地磁场的束缚能力, 就逃逸出来形成了我们所探测到的UHECR。所以, 如果用天体的空间尺度作为激波面尺度的一个粗略描述, 对天体尺度和磁场强度两个必要条件的共同要求就可以对已知的天体进行分类, 这就是著名的Hillas图。如图1所示, 对角线表示宇宙线可以被加速的能量上限, 对应下文将要谈到的GZK截断能量实线和虚线分别对应于宇宙线的成分假设, 即纯质子或纯铁核。位于此线上方的区域代表了有能力完成加速UHECR粒子的天体, 作为必要条件, 对于小体积的天体只有中子星(Neutron Star, NS)、伽马暴(Gamma Ray Burst, GRB)、活动星

引用格式: 曹臻. 超高能宇宙线源于何处? 科学通报, 2016, 61: 2967–2972

Cao Z. Where are the origins of ultrahigh-energy cosmic rays? (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2967–2972, doi: 10.1360/N972016-00739

图1 Hillas图. 横轴是天体的大小, 单位是秒差距(1 秒差=3.26 光年), 用于描述周围激波区域的大小; 纵轴是天体表面的磁场强度, 单位是高斯. 实线代表把质子加速到 100 EeV的必要条件, 虚线代表把铁核加速到 100 EeV的必要条件. 图中的文字和对应的区域, 表示各种天体所具备的加速条件, 位于曲线上方的天体具备加速粒子到此能量的能力^[1]

Figure 1 Hillas diagram. The horizontal axis is the size of the celestial body in km and parsec (1 parsec=3.26 light year) indicating the size of the shock wave region. The vertical axis is the magnetic field strength in Gauss. The solid straight line indicates the necessary condition for a celestial body to accelerate proton to the energy of 100 EeV, and the dashed line is for iron nucleus to be accelerated to the same energy. The marked regions and illustrations indicate the accelerating capabilities of the corresponding celestial bodies, i.e. objects those locate above the lines are able to accelerate particles to the energy^[1]

系核(Active Galactic Nuclei, AGN)、和大尺度的星系团(Galactic Cluster, GC)、射电星系瓣(Radio Galaxy Lobe, RGL)等才有可能成为UHECR的候选天体; 而此线下方的各个区域则对应于各种不能将宇宙线加速到此能量的天体, 比如传统的候选天体——超新星遗迹(SNR). 由于这个简单的理由, UHECR的产生地应该主要位于银河系以外遥远的剧烈活动天体, 虽然不排除一些磁场极强(>1百万亿高斯)的中子星可能存在于银河系内部, 但至今并没有确切、直接的观测证据.

关于这个重要的猜测, 即UHECR可能源于河外, 宇宙线本身的观测数据也给出了比较明显的迹象. 经历了100多年的观测研究, 科学家对宇宙线洒落在地球上的数目进行了相当精细的测量, 包括最近丁肇中为首的科学团队利用卫星探测器AMS-02对宇宙线在进入大气层之前的测量. 测量表明宇宙线的强

度(也就是在单位面积上来自单位立体角内宇宙线数目)随着宇宙线的能量急剧下降, 大体上满足一个规律即随能量升高10倍, 高于此能量的宇宙线强度下降100倍. 在本文讨论的10 EeV左右的宇宙线大约每年在10 km²的范围内只有两三个. 而AMS-02约1 m²的探测器所测量的10 GeV左右的宇宙线则可以达到每秒200个的高强度. 在相差10亿倍的能量范围内保持这样一个简单关系是一个令人惊奇的现象. 更加精细的测量发现宇宙线强度随能量按幂律下降的规律, 只在屈指可数的几个能量处出现了偏离, 例如在0.001 EeV附近, 宇宙线强度随能量减少的速度明显加快, 在0.1 EeV附近, 这一速度进一步加快, 这意味着产生更高能宇宙线的能力明显减弱, 然而, 在5 EeV附近, 宇宙线强度随能量减弱的趋势得到了相当显著的恢复. 这先减弱后增强的过程被解释成为银河系内的宇宙线源产生高能粒子的能力逐渐衰竭, 而真正高能量的粒子似乎正好是从其他星系里逃逸出来, 并经历了非常长距离的星系际旅行才抵达地球上的探测器. 虽然这仅仅是一种猜想, 但与人们对银河系内部的高能天体逐渐丰富的知识, 以及对河外天体不断深入的观测研究并不矛盾, 人们也逐渐接受了这个图像, 至少是一个有一定说服力的图像, 虽然很难准确确定高于哪个能量以上的宇宙线就一定是来自于银河系以外, 但10 EeV明显超出了这个过渡能区. 进入21世纪之后, 更新的UHECR观测数据, 似乎提供了更加丰富的证据来支持这一猜测, 比如下面就要谈到的GZK截断现象.

早在20世纪60年代人们出乎意料地发现整个宇宙都可能被能量极低的冷光子所充满, 而这些光子的能量如此之低, 只相当于绝对温度3 K的黑体辐射, 这很完美地契合了宇宙大爆炸模型所预言的爆炸初期均匀分布在宇宙中的热光子场随宇宙的膨胀而逐渐冷却, 最终遗留在整个宇宙中形成了均匀的弥散光子场. 按照这个宇宙演化模型以及宇宙的年龄, 人们不难推断出现在观测到的背景辐射的确应该是这个冷却过程的产物. 了解了20世纪最具影响力的四大天体物理发现之一的弥散冷光子场, 思维敏捷的康奈尔大学的著名物理学家K. Greisen、莫斯科国立大学的G. T. Zatsepin和V. A. Kuzmin立刻预言了宇宙线在穿越茫茫星系际背景光场的过程中, 不可避免地要与背景光子碰撞, 从而导致了在某能量阈以上的宇宙线粒子能量的快速丢失, 其后果是宇宙线能

谱在这个阈附近的截断, 换句话说, 如果UHECR不能在银河系内部产生, 人类就不应该探测到更高能量的宇宙线粒子. 这个能量阈是在70 EeV附近, 宇宙线质子与背景光子的质心系总能量达到了产生 π 介子的条件, 并通过共振过程产生 π 介子, 由于 π 介子不稳定, 在后续的飞行中就衰变成为 μ 子和一个相应的反中微子, 或直接衰变成2个光子, 而 μ 子还要进一步衰变成电子和一对正反中微子. 显然, 在实验中证实GZK截断的存在, 无疑是对UHERC主要起源于银河系以外的宇宙加速器的有力支持. 不仅如此, 同样由于背景光子场的存在, 质量大于氢的核通过光致离解(photo-dissociation)过程, 在飞行过程的初期很快就破碎成为分离的质子了. 这样, 就可以根据质子与光子产生 π 介子的共振截面以及光子的密度, 推算出质子的平均自由程, 也就是质子源分布范围的一个限制. 由于上述物理过程非常简单, 图像非常清晰, 似乎只要在实验中清楚地测量到GZK-截断现象, 问题就应该得到答案了. 令人惊叹的是, 通过建成后5年左右的观测, 美国的HiRes大气荧光探测器阵列实验, 于2008年明显地测到了位于70 EeV附近宇宙线能谱的快速下降^[2]. 最新的结果(TA实验是HiRes后续的日美合作实验)如图2中红色空心点所示. 更为重要的是HiRes同时还发现^[3]测量到的宇宙线成分以质子为主, 最新的TA实验结果见图3(a)所示. 这似乎对UHECR起源于银河系之外的猜测给出了近乎完美的证实, 而且源天体分布在半径小于1~2亿光年范围之内. 然而, 自然界的奥秘并非如此轻而易举地得到破解.

HiRes是位于美国Utah州相距12 km两个站点上共64台大气荧光望远镜组成的宇宙线广延空气簇射立体观测装置, 对于10 EeV以上的UHECR有效覆盖面积达到7500 km²以上, 由于只能在晴朗的无月夜晚进行观测, 有效观测时间只能达到10%左右. 上述UHECR能谱和成分观测结果发表之前, 收集到大约100个能量高于10 EeV的有效UHECR事例. 同时期稍晚投入观测的Pierre Auger 观测站(PAO)则位于南半球阿根廷西部门多萨省, 系由覆盖3000 km²的1660台水切仑科夫探测器按间距1.5 km排布而成的地面探测器阵列, 可24小时连续运行. 为了实现对UHECR空气簇射的完整观测, PAO也装备了24台大气荧光望远镜, 分布在阵列周围的4个站点, 覆盖了整个地面阵列. 通过两种探测器的联合观测, 不

图2 能量高于1 EeV的宇宙线能谱的最新测量结果汇总. 横轴是被探测到宇宙线的能量, 纵轴是在每个能量处 1 eV能量间隔内的宇宙线强度, 就是每秒钟来自 1 个立体角单位(来自整个地平线以上的空间包含 2π 个立体角单位)落在 1 平方米的面积内的宇宙线个数. 由于这个数目随能量下降非常快, 各个实验测量出的结果之间的差异和能谱本身的细微结构都难于在直接画出的强度随能量变化的图上显示出来. 在纵轴上通常就除了描述总体规律 $E^{2.5}$ 的因子, 这就使得这个快速下降的谱看起来平缓了, 所有的细节就是相对于这个规律的偏离. 世界上有许多实验对 1 EeV 以上的宇宙线开展过测量, 都收集在这张图里, 但最重要的无疑是最大的PAO(Pierre Auger, 实心圆点)和TA(Telescope Array, 空心圆圈)两个实验的结果, 它们都观察到GZK截断现象, 但能谱的形状和数值都还存在一定的差异, 除了两个实验之间的系统差别外, 这个差异可能蕴含着更深层次的物理根源^[4]

Figure 2 Summary of energy spectrum measurements for cosmic rays above 1 EeV. The horizontal axis is the measured cosmic ray energy E and the vertical is the cosmic ray intensity, i.e. the number of cosmic ray particles fall in an area of 1 m² from a solid angle of 1 sterad (the whole upper hemisphere is 2π sterad) per second, in an energy interval of 1 eV at the measured energy. Due to its rapid falling with energy, the difference between measurements and details of the spectrum are nearly invisible in a figure of the intensity itself as a function of cosmic ray energy. Usually, a factor of $E^{2.5}$ which describes the overall feature of the spectrum is dividing to the measured intensities, so that the rapidly falling spectrum looks flattened and all details of the spectrum appear to be the deviation from the overall spectrum. Many experiments in the world measured the spectrum above 1 EeV as collected in this figure. Our focus, here, is the one measured by PAO (Pierre Auger, filled circles) and the other by TA (Telescope Array, open circles). They both measured the feature of GZK-cutoff while the shape of the spectrum and absolute intensity are slightly different. Even taking the systematic uncertainties shared by the experiments into account, the difference above 20–30 EeV is too large to be simply statistical reason. It may root a still unclear mechanism in physics^[4]

但给地面阵列提供了UHECR测量中的能量定标, 还实现了与HiRes实验结果直接对比的便利. 经过近10年的观测, PAO也观测到超过70 EeV之上UHECR流强的迅速减弱, 见图2中的黑圆点, 这似乎证实了HiRes对GZK截断的观测结果. 然而, 仔细的对比发现, 测到的两个能谱的截断能量存在约10%的差别.

图 3 高能宇宙线空气簇射平均极大深度随能量的最新测量结果汇总. UHECR粒子进入大气并与其原子核碰撞, 产生粒子的大量增殖, 最终会产生 100 亿个左右粒子的“阵雨”, 持续时间仅几十纳秒. 阵雨的大小在从天顶到地面的过程中不断发展, 增殖到最大时, 次生粒子就不再具有增殖能力, 阵雨就开始减弱. 平均而言, 达到最大的这个大气深度(纵轴)对于UHECR粒子的种类很敏感, 如图中位于上、下两组直线分别对应了质子和铁核的情况, 其差别在 1 EeV 以上的各能量(横轴)几乎保持了 100 g/cm² 左右, 因此成为判断UHECR成分的重要参数. (a) TA实验的测量结果^[5], 表明 1 EeV 以上基本上是类似于质子产生的阵雨; (b) PAO实验的结果^[6], 1~3 EeV 的结果与TA的结果较为吻合, 但更高能量的阵雨明显地是由更重的核产生的, 随着能量上升更加倾向于更重的核. 图中对不同核的预期依赖于强相互作用模型的差别也做出了对比, 列出了 3 种模型不同版本的预期

Figure 3 Summary of the measurements of average atmospheric depth of shower maxima as a function of cosmic ray energy. As UHECRs enter the atmosphere and collide with air nuclei, many particles will be produced and cause cascading collision in the air. Nearly 10 G new particles form a “shower” lasting for tens of nanosecond. Total number of particles in the shower increases with its falling from the top of atmosphere until the number reaches the maximum. The secondary particles produced in the following cascading process will not energetic enough to produce more new particles, the shower becomes weaker. In average, the depth at which the shower reaches its maximum (vertical axis in the figure) is sensitive to the UHECR specie. The group of straight lines at the upper position in the figure represents the showers induced by protons, while the group of lines at the lower position is for iron showers. The difference between them is nearly constantly 100 g/cm² for showers with energies above 1 EeV. Therefore it is an important parameter in identification of the composition of the primary UHECRs. In the left panel, TA’s experimental results are demonstrated, by which one is able to tell that they are dominated by protons above 1 EeV. In the right panel, the similar results are measured by PAO. Below 3 EeV, the two experiments are agreed with each other, while the PAO result shows a trend of getting heavier with UHECR energy. The expectation is slightly different due to the uncertainty of the interaction models as shown in different type of lines for specific nuclei. Here three models, EPOS-LHC, QGSJET-II-04 and Sibyll2.1 are used in the simulation^[5,6]

如果考虑到各自的能标确定的系统误差, 这两个能谱是基本上一致的, 都观测到了类似于“GZK截断”的能谱特征. 然而, 成分测量的结果显示与HiRes相当不同的特性, PAO的观测样本在高于10 EeV的能区展现出与HiRes的几乎纯质子成分分布不同的趋势, 由较轻的成分逐渐过渡到比较重的成分, 如图3(b)所示. PAO的这个结果, 对UHECR源的分布范围不超过1~2亿光年的结论形成了较大的挑战.

事实上, 相对于目前观测到的最遥远的类星体如ULAS J1120+0641已经达到129亿光年, 1~2亿光年的范围在宇宙中是一个很小的临近区域, 小到什么程度呢? 小到此区域内真正满足Hillas图所示的必要条件的源天体几乎屈指可数, 而对应于如此高能粒子, 星系际磁场的折射效应并不是很大, 因此, 如果这些满足必要条件的天体就是其起源, 人们也似乎应该测量到比较明显的到达方向各向异性, 而

PAO逐渐累计起来的14000多个事例分布, 在统计学意义上并不支持任何各向异性的存在.

正如文章开始提到, 人类还没有能力完全解开这些谜团, 认知的水平仍处于力求获得更多的事例样本从而对能谱、成分和各向异性做出更精确的测量的信息积累阶段, 尚不足以对UHECR的起源给出更详细的确定知识. 因此, PAO正努力升级探测器, 增强探测缪子的能力, 希望借此提升成分鉴别的能力, TA实验正在扩展至现有阵列的4倍, 达到与PAO相当的有效面积, 从而对南北两个半球形成完全的覆盖, 以更大量的事例统计来寻找UHECR源可能的存在区域. 除此之外, “多波段”和“多信使”的联合观测研究也是目前重要的发展方向, 即借助在更低能区内的甚高能伽马射线源的观测研究、超高能中微子的观测研究、“膝区”单成分宇宙线能谱的精确测量, 共同探索“宇宙超级加速器”的存在.

参考文献

- 1 Cao Z, He H H, Yao Z G, et al. Proposal of Large High Altitude Air Shower Observatory (in Chinese). Chinese Zhongyuan International Engineering Ltd, 2014 [曹臻, 何会海, 姚治国, 等. 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)项目建议书. 中国中元国际工程有限公司编制, 2014]
- 2 Abbasi R U, Abu-Zayyad T, Allen M, et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration). First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 101101
- 3 Abbasi R U, Abu-Zattad T, Archbold G, et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration). A study of the composition of ultrahigh energy cosmic rays using the High Resolution Fly's Eye. *Astrophys J*, 2005, 622: 910–926
- 4 Castellina A. KIT Composition Workshop. Spectrum and composition of (G+EG) cosmic rays: Overview of the experimental results. 2015. In: The Presentation on HAP Workshop 2015: Composition, 21–23 September 2015 KIT Campus North, Germany, <http://indico.scc.kit.edu/indico/event/95/>
- 5 Abbasi R U, Abe M, Abu-Zayyad T, et al. Study of ultra-high energy cosmic ray composition using Telescope Array's Middle Drum detector and surface array in hybrid mode. *Astropart Phys*, 2014, 64: 49–62
- 6 Abreu P, Aab A, Aglietta M, et al. Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory. I. Measurements at energies above 1017.8 eV. *Phys Rev D*, 2014, 90: 122005

Where are the origins of ultrahigh-energy cosmic rays?

CAO Zhen

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

In this essay, the origin of ultrahigh-energy cosmic rays (UHECR) is discussed, including the possible celestial objects, possible accelerating mechanism and what possibly happened to them during the long journey before reach to our detectors on the ground. Since we have very limited knowledge about them, we only make a brief summary on (1) a categorization of celestial objects based on a necessary condition for the production of UHECRs, (2) two indirect evidences about the extra-galactic origins of UHECRs in experiments, and (3) mysteries together with the latest progresses. We are out looking for future developments, particularly future experiments.

origin of cosmic rays, extra-galaxy, energy spectrum of cosmic rays, GZK cut-off, anisotropy

doi: 10.1360/N972016-00739

曹臻

中国科学院高能物理研究所研究员, 博士生导师. 毕业于云南大学物理系, 在中国科学院高能物理研究所获博士学位, 研究宇宙线及相关高能物理. 现为国家重大科技基础设施项目“高海拔宇宙线观测站(LHAASO)”首席科学家, 担任工程建设经理部经理. 任国际纯粹及应用物理联合会(IUPAP)的“天体粒子物理国际委员会(WG-10)”委员、“天体粒子物理委员会(C4)”委员; 中国高能物理学会常务理事、副秘书长.