

极高能宇宙线带来的挑战与机遇

徐仁新

(北京大学物理学院, 北京 100871)

摘要: 简要地从观测和理论两方面叙述了极高能宇宙线 (UHECR) 研究的进展状况。讨论了宇宙线中存在奇异滴的可能性及相关问题。

一、引言: 作为高能物理前沿的宇宙线

基于微观粒子的波粒二象性得到的 Heisenberg 不确定性关系告诉我们: 物质更深层次结构的探测依赖于波包长度更短的粒子; 这就需要更高能的粒子或环境。在加速器物理时代来临之前, 天然宇宙线提供的高能粒子功不可灭。例如, 通过宇宙线的研究, 1937 年 Anderson 和 Neddermeyer 发现 μ 子、1947 年 Powell 发现 π 介子、1947 年 Rochester 和 Butler 发现奇异粒子。加速器提供的高通量粒子流确实有效地克服了宇宙线研究的不足, 导致人们能够较好地理解了描述粒子间强相互作用的量子色动力学 (QCD)。然而, 加速器所能达到的极限能量终究是有限的。更高能的获取和研究还得回到天然的宇宙实验室。极高能宇宙线 (UHECR) 就是在极端的天体环境中产生的能量超过 $\sim 10\text{EeV}$ ($1\text{EeV} = 10^3\text{PeV} = 10^6\text{TeV} = 10^{18}\text{eV}$) 的粒子。目前观测到的最高能宇宙线粒子能量为 300EeV , 为当今加速器所能达到能量的 $\sim 10^7$ 倍!

天体物理通过分析和研究天体所发射粒子携带的信息来研究发生在相应天体上的物理过程。尽管光子 (电磁波) 观测是目前天体物理家获取信息的最主要手段, 中微子、宇宙线粒子 (p 、 α 、 n , 等)、引力波等所携带的物理信息也不容忽略。因此, 宇宙线研究亦可广义地看作天体物理的一部分。

由此可见, 宇宙线不仅能够为我们弥补地面高能实验的不足, 也是人们了解宇宙极端环境中高能物理过程的重要信息携带者。关于它的研究显然是高能物理的前沿。特别是 UHECR 的成分和起源的研究, 势必加深人们对基本物理规律的理解, 也有可能揭示出某些新物理。近年来, 关于 UHECR 的观测与理论研究非常活跃; 有关的中文综述性文献可以参阅马宇倩等 (1998)、吴飞等 (2003)、王新等 (2004), 等等。

二、极高能宇宙线的观测

宇宙线具有幂率谱, 能量 E 处单位能段的流量 $J(E) \propto E^{-\alpha}$ 。在 $E \sim \text{PeV}$ 处, 谱变陡; 幂指数 α 从 ~ 2.7 转变为 ~ 3.1 。这一特征称为宇宙线能谱的“膝”。而当 $E \sim \text{EeV}$ 处, 谱又变得较平; 该处称为宇宙线能谱的“踝”。因电荷数 Z 粒子位于磁场 B 、尺度 L 的宇宙环境中能够被加速得到的最大可能能量 $E_{\text{max}} \sim ZBL$, 一般认为: 膝区以下的宇宙线起源于银河系内超新星遗迹, 高于膝区能量的宇宙线源于星系尺度上的加速过程, 踝区以上的粒子是河外起源的。

上世纪六十年代发现了宇宙普遍存在着温度较低的背景黑体辐射光子场。已经精确测量得

到背景光子场温度，为 $2.725 \pm 0.001\text{K}$ ；即其光子平均能量为 $\sim 10^{-4}\text{eV}$ ，数密度为 $\sim 400/\text{cm}^3$ 。在微波背景辐射发现后不久，Greisen (1966)、Zatsepin 和 Kuzmin (1966) 就意识到宇宙线并非在“真空”中传播。他们提出了一种宇宙线流量高能截断的机制；即目前人们所称“GZK 截断”。下面以质子为例简要地说明这一效应。

质子是宇宙线的主要成分，由于质子的质量大约为 10^9eV ，当宇宙线中质子的能量高于 $\sim 10^{19}\text{eV}$ 时，质子的 Lorentz 因子将达到 $\sim 10^{10}$ 。根据狭义相对论，在质子静止系中观测到的背景光子平均能量为 $\sim \text{MeV}$ 。光子与质子碰撞后必将发生 $\gamma\text{-}\pi$ 、 $\gamma\text{-}e^+$ 两过程，使得质子运动速度降低。原子核在宇宙线中的成分也不可忽略。高能原子核与背景光子碰撞，除了以上两过程外，还会发生光致裂变。所以，与“真空”情形相异，能量高于一定程度的宇宙线粒子因与背景光子作用而不能长程传播。如果认为 UHECR 是河外起源的，宇宙线流量应该存在一高能截断。具体的计算发现，对于质子而言，这一截断的临界能量为 $\sim 10^{19}\text{eV}$ ；对于一般的核，相应的临界能量为 $\sim 10^{20}\text{eV}$ 。

高能宇宙线流量低（膝区宇宙线流量约每 m^2 每年一个粒子，踝区流量约每 km^2 每年一个粒子），且它们与物质作用的效率也不高。因此，高能宇宙线实验不通过气球或空间探测器观测，而往往采用粒子与地球大气介质作用而发生的 EAS（广延大气族射，Extensive Air Shower）过程来反推高能宇宙线的能量与成分。目前主要有两种方式测量 UHECR 事件；即探测作为 EAS 发展后果的大气荧光或次级粒子数密度。测量结果见图 1。可见，实验观测并未明确发现这一截断。相反在 $E \sim 10^{19}\text{eV}$ 处，随着能量的升高，宇宙线流量的衰减反而可能减弱了。理论与观测之间的尖锐矛盾，使得关于 UHECR 本质的探讨成为当今宇宙线研究中颇具挑战性的课题。

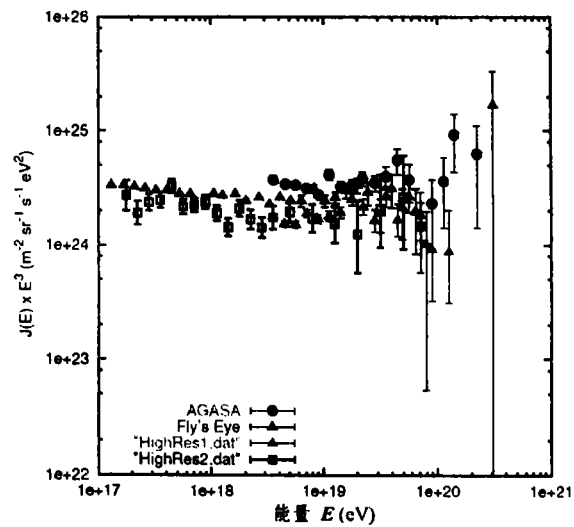


图1. 极高能宇宙线能谱 (Stecker 2003). $J(E)$ 为能量 E 处单位能量间隔宇宙线流量。不同数据点符号代表不同的测量分析结果。

三、极高能宇宙线理论 I: 超出标准模型?

UHECR 研究能否给我们带来新物理? 当然不能排除这种可能性。

Lorentz 对称性 (不变性) 描述惯性系之间的平权变换; 所有变换构成 Lorentz 群。它的直接后果之一是熟知的能动量关系 (取真空中低能光速 $c = 1$ 的单位制): $E^2 = m^2 + p^2$ 。然而, 量子引力研究结果预言 Lorentz 因子太高时 Lorentz 变换可能不再成立, 即 Lorentz 破缺 (LV, Lorentz Violation)。近年来 LV 研究成为 UHECR 和量子引力所领域共同关注的热点 (例如, 参阅 Gagnon 和 Moore, 2004)。因 Lorentz 不变性不再成立, 一般选择具有“空间均匀各向同

性”性质的微波背景辐射参考系来讨论修正后能动量关系；其具体形式依赖于不同的理论模型。例如，对于电子而言，可能的形式为

$$E(p)^2 = m_e^2 + p^2 + \eta \frac{p^3}{M_{\text{pl}}},$$

其中 $M_{\text{pl}} \sim 10^{28} \text{eV}$ 为 Plank 质量。研究发现，只要 Lorentz 对称性略微破缺就能够抑制 $\sim 10^{20} \text{eV}$ 的质子与背景光子间的 γ - π 作用，从而克服 GZK 效应 (Coleman, Glashow 1999)。此外，LV 的出现可能伴随 CPT 破缺^{*}，且在真空中导致高能光子的色散、荷电粒子的 Cherenkov 辐射等。

另一种看法认为存在某种具有大统一能量尺度质量的 X 粒子，其衰变分裂的部分产物即为 UHECR (Bhattacharjee 1998)。可能有两类 X 粒子的起源。一类认为 X 粒子直接形成于极早期宇宙；它们具有长寿命，可能是暗物质的一部分。另一类认为 X 粒子是拓扑缺陷 (TD, topological defects) 所产生的 (如正反单极子湮灭而辐射出来)。TD 为早期宇宙相变的可能产物，它们可以是零维的单极子 (monopole)、一维的弦 (string)、二维的畴壁 (domain wall)。

再一种看法被称为所谓的“Z爆” (Z-burst, Weiler 1999)。正反中微子湮灭的截面一般很小。然而，若在质心系中两碰撞中微子能量正好为弱作用媒介粒子 Z 的静止质量，则有可能因共振作用而截面较大。作为正反中微子作用中间产物的 Z 很快衰变成若干光子和少量核子，这些衰变产物在地球大气中的 EAS 过程可能表现为 UHECR。设中微子质量为 m_ν ，能量为 E_ν 的极高能中微子与低能的宇宙背景中微子碰撞，质心系中能量为 $E_{\text{cm}} = (2 E_\nu m_\nu)^{1/2}$ 。若取 E_{cm} 为 Z 粒子质量 $\sim 90 \text{GeV}$ ，则 $E_\nu \sim 4 \times 10^{21} \text{eV}/m_\nu$ ，其中 m_ν 以 eV 为单位。中微子较为可能的质量 $m_\nu \sim (0.05-8.5) \text{eV}$ ，故 Z 衰变的产物粒子能量超过 $\sim 10^{19} \text{eV}$ 是不奇怪的。一般认为 Z 爆发生于星系晕中，因为那里背景中微子可能成团。

以上简介了三种通过 UHECR 发掘新物理的可能性：LV、X 粒子、Z 爆。它们都试图得到超过 GZK 截断能量的粒子在地球大气中发生 EAS。其中第一种方案通过修改能动量关系让 $\sim 10^{20} \text{eV}$ 粒子在背景光子场中长途传播而不跟光子有效作用，后二者通过近地发生的事件产生极高能粒子 (而这些粒子根本没有在宇宙中长途传播)。EGRET 高能卫星的观测对后两类模型作了一定的限制 (Kachelriess 2004)。

四、极高能宇宙线理论 II：是中微子还是奇异滴？

能否在粒子物理标准模型框架以内理解 UHECR 的若干观测事实？这也不能轻易排除。

一种看法是认为 UHECR 就是极高能中微子 (UHE ν)，因为中微子与光子作用截面非常小，很容易突破原 GZK 能量截断的限制。这种看法的不足之一是：理论上认为弱作用中微子导致的 EAS 应该在大气底层发生 (因为中微子需要穿越足够多的物质才能反应)，而大气荧光观测 UHECR 得到的 EAS 事件往往从大气顶层开始发展。不足之二是：UHE ν 撞击裸奇异星可能使奇异星变成恒星级黑洞，而我们似乎并未观测到这类天文事件 (Xu, Wu 2003)。

^{*} CPT 守恒是指物理规律在电荷共轭 (C)、宇称 (P)、时间反演 (T) 联合变换下的不变性。

另外一种论点：UHECR 就是奇异滴 (strangelet, 如 Madsen, Larsen 2003; Xu, Wu 2003)。奇异滴是质量较小且带奇异数的夸克胶子等离子体 (GQP, 或称为夸克物质)。

夸克物质的可能存在是强作用渐进自由性质^{*}的一个直接后果。为搜寻夸克物质, 除地面相对论重离子对撞机是可能的途径以外, 天体夸克物质的证认和探测也是不能忽略的。一种极可能存在的夸克物质即所谓奇异夸克物质 (SQM, 它由几乎等量的 u、d、s 价夸克组成); 关于它的研究被 Witten (1984) 的工作而显著地推动。天体 SQM 存在的形式有两种: 质量较大的奇异夸克星 (简称奇异星) 和质量较小的奇异滴。奇异滴具有非常高的质量和电荷, 但荷质比很低。这使得它较容易被加速到很高的能量, 且不跟背景光子有效地作用。因此奇异滴是很好的 UHECR 候选者。当然, 宇宙线中也可能存在较低能量的奇异滴。事实上, 若干宇宙线高山实验或许已经显露出较低能奇异滴存在的迹象 (Banerjee et al. 1999)。

奇异星和奇异滴研究关系密切。一方面可以通过奇异星研究了解低温高密 SQM 的性质, 以帮助理解奇异滴与大气作用的 EAS 过程; 另一方面探测到宇宙线奇异滴 (AMS、地面事件、月球土壤) 势必威胁到人们关于脉冲星类天体的传统观念。后者是因为: 1, 奇异滴的存在表明 Witten (1984) 猜想 (即大快 SQM 是强作用体系的基态) 是正确的, 超新星爆发新形成中子星中心若夸克解禁则必然形成 SQM; 2, 正常中子星很可能被宇宙中无所不在的奇异滴奇异化成奇异星。研究发现冷奇异星可能以固态形式存在, 且其表面即为夸克表面。如果奇异滴也是固态的, 它与地球大气作用时可能先碎裂成若干质量较小、温度较高的奇异滴。奇异滴因撞击碎裂升温到一定程度时融化, 并进一步奇异化大气核子升温或削裂质量, 最终使得自身质量达到临界值而蒸发核子、消失。奇异滴的这种 EAS 过程肯定有别于其它类粒子相应的过程, 故 EAS 探测也许会鉴别出宇宙线奇异滴。羊八井基地的优势是膝区物理; 能否在此基地探测到具有膝区能量的奇异滴, 尚需完成大量的理论和实验研究。

五、总结

UHECR 的发现告诉我们, 除了质子、原子核等, 宇宙线中还可能存在某种未知的粒子。关于这些未知粒子本质的研究, 很可能为人们探索新物理和改善粒子物理标准模型提供了机会。所以在 UHECR 研究中, 挑战与机遇共存。

从个人研究经历来看, 作者倾向于认为 UHECR 的主要成分是奇异滴, 且宇宙线中还存在能量较低的奇异滴。奇异滴形成方式可能有: 1, 宇宙早期 QCD 相变残留; 2, 超新星爆发形成奇异星时喷发; 3, 因奇异星双星系统合并而引力潮汐产生。

有无奇异星可能存在的天文学证据? 答案是肯定的。包括: 脉冲星类天体质量-半径的测量、无原子谱线热辐射特征、脉冲星射电辐射的漂移子脉冲行为等。进一步地, 这些研究还预言了一些检验奇异星模型的可观测现象, 例如在自转突跳后不可能探测到引力波、发现亚毫秒 (如周期为 0.1 秒) 脉冲星等。诚然, 检测宇宙线奇异滴是研究 SQM 的又一有效途径。

^{*}Gross、Wilczek、Politzer 于 1973 年在非 Abel 规范理论基础上证明。他们同获 2004 年度 Nobel 物理学奖。

参考文献

- Banerjee, S., et al. 1999, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 25, L15
- Bhattacharjee, P. 1998, Phys. Rev. Lett. 81, 260
- Coleman, S., Glashow, S. L. 1999, Phys. Rev. D59, 116008
- Gagnon, O., Moore, G. D. 2004, Phys. Rev. D70, 065002 (hep-ph/0404196)
- Greisen, K. 1966, Phys.Rev.Lett., 16, 748
- Kachelriess, M. 2004, Comptes Rendus Physique, 5, 441 (hep-ph/0406174)
- Madsen, J., Larsen, J. M. 2003, Phys. Rev. Lett. 90, 121102 (astro-ph/0211597)
- Stecker, F. W. 2003, Journal of Physics G, 29, R47
- Weiler, T. 1999, Astropart. Phys., 11, 303
- Witten, E. 1984, Phys. Rev. D30, 272
- Xu, R. X., Wu, F. 2003, Chin. Phys. Lett., 20, 806
- Zatsepin, G. T., Kuzmin, V. A. 1966, JETP Lett., 4, 78
- 马宇倩, 况浩怀, 白新华, 1998, 物理学进展, 18, 383
- 王新, 汪景琇, 2004, 物理学进展, 24, 300
- 吴飞, 徐仁新, 2003, 天文学进展, 21, 139