

DAMPE 首个宇宙线电子观测结果的科学意义

周宇峰

中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

1933年 F. Zwicky 利用光谱红移测量了后发座星系团中各个星系相对于星系团的运动速度。发现它们的速度弥散度太高, 对应的质光比在 100 以上。因此星系团中应该存在大量的不可见物质, 这开启了现代暗物质研究。之后陆续有支持暗物质存在的研究结果出现, 1970年 V.C. Rubin 和 W.K. Ford 对仙女座大星云中星体旋转速度开展了高精度的光谱测量, 探测到了远离星系核区域的外围星体绕星系旋转速度和距离的关系。观测结果表明在相当大的范围内星系外围的星体的速度是恒定的。这意味着或者牛顿引力定律是不正确的, 或者星系中有大量的不可见物质并不分布在星系核心区, 并且其质量远大于发光星体的质量总和。由此开始, 星系及星系团中暗物质存在这一假说逐渐被天文学界广泛接受。

目前的天文观测表明现阶段宇宙物质约 85% 的组成由暗物质贡献, 构成可见天体和星际气体的常规重子物质只占很小的一部分。支持暗物质存在的观测证据来自星系旋转曲线, 星系团引力透镜, X-射线, 微波背景辐射, 大尺度结构数值模拟等。虽然目前暗物质的存在已经在学术界形成共识, 但暗物质究竟是什么是一个巨大的谜团。目前了解到的暗物质特性仅包括在宇宙学尺度上稳定、有质量、不带电荷、非重子和非相对论性运动等几个方面。由于暗物质的非重子性, 它不由夸克构成, 不可能是由构成地球和星系的任何

一种已知物质组成的。暗物质的存在是对当前非常成功的粒子物理标准模型提出了挑战, 表明粒子物理标准模型还不是完善的终极理论。理论研究表明暗物质极有可能与常规物质有微弱的非引力相互作用, 这意味着暗物质是有可能被实验室仪器探测到的。暗物质与常规物质相互作用的探测机制研究, 大致可分为空间探测、地面/地下探测、对撞机探测等方面。银河系中的暗物质可以发生湮灭和微弱衰变, 可由此产生宇宙线带电粒子如正负电子、正反质子等。这些粒子可能会改变宇宙线带电粒子的能谱形状的空间分布。因此探测宇宙线粒子是探测暗物质属性的重要手段之一^[1]。

目前全世界已经有数个暗物质空间探测器, 如 PAMELA、AMS-02、Fermi-LAT、CALET 等。中国也研制了自己的暗物质粒子探测卫星 DAMPE (中文名“悟空”)。“悟空”是以中国科学院紫金山天文台为主导研制的科学卫星探测器, 由塑闪阵列、硅径迹探测器、BGO 量能器、中子探测器 4 部分组成。主要探测高能宇宙线粒子的组成和能谱, 用以探索暗物质属性、宇宙线起源和开展伽马射线天文研究。DAMPE 探测器的主要特点是接收面积达到 0.36 m², 能量分辨率在 800 GeV 以上达到 1.5%, 电子质子鉴别本领达到 10⁵, 该探测器于 2015 年 12 月发射升空, 成功在轨运行并采集了大量的高能宇宙线数据。

2017 年 11 月 30 日, 《Nature》杂志发表了期待已久

收稿日期: 2018-02-08; 修回日期: 2018-03-20

作者简介: 周宇峰, 研究员, 研究方向为超出标准模型的新物理、新物理模型中的重子-反重子不对称起源、暗物质理论、CP 对称性破缺的模型和唯象, 电子信箱: yfzhou@itp.ac.cn

引用格式: 周宇峰. DAMPE 首个宇宙线电子观测结果的科学意义[J]. 科技导报, 2018, 36(12): 13-14; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.12.002

的 DAMPE 暗物质探测卫星的首个科学结果。引起了广泛的关注。DAMPE 首次发布的宇宙线电子数据中一个重要的结果是观测到了比较明显的电子谱 TeV“拐折”,即观测到的电子数目在 TeV 能量以上快速减少。这对当前美国的 Fermi-LAT 和日本 CALET 的结果构成了挑战,这两家实验均宣称未看见拐折现象。然而 DAMPE 的结果与 2009 年地面大气切伦科夫望远镜 HESS 实验的结果吻合。高能宇宙线电子也可以通过地面探测器间接探测(现有探测器包括 HESS、MAGIC、VERITAS 等),但地面探测的观测精度比空间直接探测要低得多。地面探测更适合在更高的能段如 10 TeV 以上开展测量。目前 HESS 已经测到 20 TeV 范围。因此 DAMPE 通过空间直接探测宇宙线电子对“拐折”是否存在的争论提供了新的依据,是一个重要的进展。

另一方面,DAMPE 数据也显示在 1.4 TeV 附近有疑似的新超出平滑背景预期的尖锐信号。在 1.3~1.5 TeV 的狭窄能量区间内观测到了 93 个正负电子,比预期的要高一些。受数据统计量的限制,该疑似信号的局部统计置信度为 3.7σ ,因此目前还无法下定论。但如果被进一步的数据证实,将会是一个意义十分重大的发现。通常的天体是不会产生如此尖锐的信号,因此该信号来自暗物质的可能性更高一些。暗物质分布在小范围并不均匀,可能在自身引力作用下或强引力体,例如黑洞的引力吸引下聚集,其自身湮灭到正负电子能够自然产生尖锐的能谱信号。研究表明若疑似信号在 TeV 附近,这种暗物质源的距离应该离地球相当近,仅 1000 光年左右。并且存在可以被检验的额外观测信

号。例如黑洞附近的暗物质聚集会产生类似点源的高能伽马光子信号,这些高能伽马光子具备独特的能谱特征,很容易和其他天体源区分开来。而且是有可能被实验观测到的。事实上 Fermi-LAT 卫星的确观测到了一些可能的点光源。另一种可能是来自暗物质的子晕结构。这类结构在空间上有一定的弥散度。因此会主要贡献到弥散高能伽马光子。当然,邻近的高能天体如脉冲星,超新星遗迹等的加速机制可能没有以前想象的那么简单。在特殊情况下,通过逆康普顿散射损失能量导致出现尖锐的能谱的可能性也不能排除,但这一般要求天体物理源的初始注入谱非常硬,比通常的一阶费米激波加速机制产生的能谱要硬很多^[2]。

DAMPE 的结果正在引起国内外暗物质研究的越来越多的关注,大量的理论研究已经出现。目前 DAMPE 探测器还在不断收集新的数据,随着统计量的增大,相信高能宇宙线电子是否存在结构这一问题会很快得到确定的回答。

参考文献(References)

- [1] Ambrosi G, An Q, Asfandiyarov R, et al. Direct detection of a break in the teraelectronvolt cosmic-ray spectrum of electrons and positrons[J]. *Nature*, 2017, 552(7638): 63-66.
- [2] Huang X J, Wu Y L, Zhang W H. Origins of sharp cosmic-ray electron structures and the DAMPE excess[J/OL]. [2017-01-20]. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%284eba2fc28-4eba2fc392e770e763da18c076e6f0a0%29&filter=sc_long_sign- &tn=SE_xueshusource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2F arxiv.org%2Fabs%2F1712.00005&ie=utf-8&sc_us=3534718179167360366.

(责任编辑 傅雪)