

测量高能宇宙线电子能谱

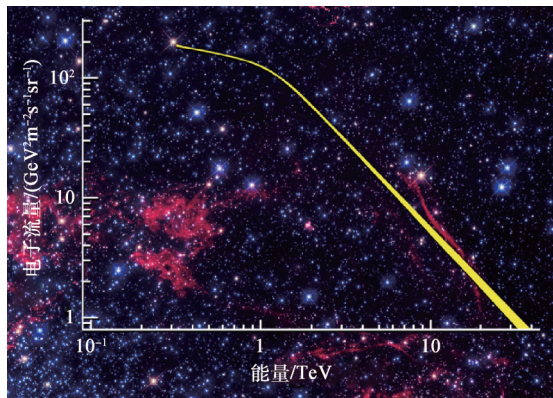
(北京大学 徐仁新 编译自 Carmelo Evoli. *Physics*, November 25, 2024)

尽管宇宙线中的电子和正电子成分远低于质子和其他原子核，但电子能谱(简称电子谱)却是银河系内若干高能物理过程的重要探针。近期，高能立体望远镜系统 HESS (High Energy Stereoscopic System) 的合作组在该领域取得了重大突破，将宇宙线电子谱的测量延伸至惊人的 40 TeV(此前的测量低于 5 TeV)。HESS 团队收集了超过 12 年的数据，揭示了前所未有的能谱信息，特别是发现电子谱在 1 TeV 附近开始明显变陡。这个特征挑战了我们关于银河系宇宙线起源的认识。此外，测量发现在约 1—40 TeV 能区的电子由幂律谱主导，很好地约束了太阳系附近局部区域加速粒子的流量以及可能的电子产生机制(如银河系内暗物质粒子的湮灭或衰变)。

高能宇宙线电子跟银河系磁场和背景光子之间频繁地相互作用，会迅速损失能量。因此，高能电子

的传播范围较小，从而能够通过测量电子谱来搜寻邻近的宇宙线加速器，鉴别这些局部加速过程(很可能是脉冲星或超新星遗迹)将揭示宇宙线的起源。研究的另一动机是探索某些特殊过程(如暗物质湮灭)产生的电子对宇宙线电子谱的贡献。在 0.1 TeV 以上的高能区，常规天体物理过程产生的电子流量显著减少，特殊过程产生的高能电子将占主导。

对于像 HESS 这样的间接测量而言，探测宇宙线电子的挑战在于如何区分电子和流量大得多的质子(或其他核)。利用位于纳米比亚的切伦科夫望远镜阵，HESS 合作组积累了大量的高质量数据，他们改进了粒子甄别技术，将质子的贡献控制在万分之一以下，从而获得了高置信度的电子事件(也包括正电子)。分段幂律谱可很好地描述电子测量结果，如图所示。



HESS 测得的宇宙线电子谱，即电子流量随能量的关系

其实，1 TeV 附近谱指数的增加早已在 CALET 和 DAMPE 等空间实验中被发现。诚然，测量几 TeV 的高能电子对于理解分段幂律谱的起源至关重要，但空间实验较难拓展至该能区。起初认为 1 TeV 处谱变陡起源于电子穿越银河系时的能量损失，然而最近 AMS-02、CALET 和 DAMPE 等

空间实验给出的宇宙线核素中的硼碳比表明：宇宙线在该能区的存活时间与导致分段幂律谱的理论模型预期不一致。此外，HESS 发现 1 TeV 以上的电子谱比预期更陡，不像银河系内电子扩散传播所致。

另一种观点认为，少量的临近高能电子源可能造成能谱的分段。这类模型预期电子谱含有凹凸的特征，但这些行为并未在延伸至 40 TeV 的 HESS 测量结果中体现。DAMPE 的数据曾暗示电子谱在 1.4 TeV 附近的有峰结构，有些人推测它可能显示了暗物质的特征，但 HESS 并未发现这一结构。无疑，HESS 的测量结果必然会推动对于宇宙线(特别是电子)加速机制的研究，澄清银河系内加速器如何将这此粒子从冷的星际介质中加速至极端的相对论速度。

HESS 的发现意义重大。首先，它约束了潜在的邻近宇宙线电子源候选范围。虽然暗物质湮灭解释的可能性较小，但更传统的天体物理起源(如脉冲星和超新星遗迹)仍较合理。其次，该工作还将深化宇宙线传播的研究——在如此高的能量下粒子传播的机制。未来的研究可能会提升两方面的探测能力：进一步改善甄别粒子的能力(如利用机器学习技术)，以及将空间直接测量的电子谱拓展至更高能量。(译者注：中国下一代“高能宇宙辐射探测设施”(简称 HERD)空间实验拟将探测电子的能区延伸至 15 TeV)。总之，虽然 HESS 合作组取得了新的成果，但高能宇宙充满未解之谜。

DOI: 10.7693/wl20250312 CSTR: 32040.14.wl20250312