

单电子回旋辐射

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Patrick Huber. *Physics*, April 20, 2015)

由来自美国和德国的科学家组成的合作组正在进行一项称作 Project 8 的实验, 探测做轨道转动的单个电子发出的辐射频率。这一频率, 从而电子的能量, 可以非常精确地测量。如果能够进一步提高能量分辨率, Project 8 实验可能成为一种新的测量中微子质量的方法。

实验装置的核心是一个小的低压气室, 放置在 1 T 的磁铁内。气室中含有少量的氦-83 气体, 当其原子核发生 β 衰变时产生电子。这些电子在磁场作用下沿圆形轨道运动, 同时发射出频率大约为 25 GHz 的回旋辐射, 可以用灵敏的微波放大器探测。

在探测到的辐射功率随时间和频率变化的关系图中, 向斜上方排列的辐射条纹是单个电子发出的辐射(见附图)。理论上已知, 做圆周运动的电子会连续地发出辐射, 导致电子逐渐损失能量, 转动速率随着时间线性增加。所探测到的辐射条纹具有理论预言的线性关系。据此, 研究人员将这些条纹与单个电

子联系起来(图中频率的跃增对应于电子与气室中剩余的原子或分子的碰撞)。通过测量与第一个条纹相关的频率, 能够确定氦-83 核发射的电子能量, 精度达到 30 eV。

中微子是在 β 衰变中和电子一起产生的。Project 8 实验测量 β 衰变中发射的电子能量并将其与总衰变能比较。如果中微子具有质量, 那么电子的能量就不可能等于总衰变能, 这是由于一些能量要用于产生中微子。因此, 中微子的质量可通过测量所发射的电子的最大能量来确定。

在粒子物理的标准模型中, 中微子是无质量的。这主要是因为标准模型是在实验表明中微子具有质量之前建立的。后来的实验显示中微子有三种味(电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子), 会从一种类型变化到另一种类型, 即中微子振荡。这种现象只有在中微子具有质量时才会发生。

中微子振荡实验仅仅提供了中微子质量的下限, 约为 0.01—0.05 eV/ c^2 。

次最轻的费米子(电子)的质量大于 500000 eV/ c^2 。这种巨大的质量差有可能表明中微子获得质量的机制与所有其他的费米子获得质量的 Higgs 机制不同。有许多试图解释中微子质量的理论, 其中相当一部分依赖于仅在极高

能量下才能产生的粒子, 所需的能量远远超出大型强子对撞机或其他能够设想的粒子对撞机的范围。

至今, 中微子振荡是中微子质量量级的唯一直接证据。实验室条件下对中微子质量的测定只得到上限值。最严格的“味平均”的中微子质量的上限 $m\beta \leq 2.05 \text{ eV}/c^2$, 来自对氦的 β 衰变中发射的电子能谱的仔细观测。下一代氦衰变实验——Karlsruhe 氦中微子实验(KATRIN)——将用一台大谱仪测量电子能量, 该谱仪设计的目标是测量小到 0.2 eV/ c^2 的中微子质量。但是按照 KATRIN 所采用的技术, 为改进测量的灵敏度必须建造一台更大的谱仪。KATRIN 已经大如一座建筑物, 更大的谱仪是不现实的。

与之相比, Project 8 的能量分辨率不受装置大小的限制, 而只取决于磁场的设计和电子回旋频率的测量精度。这两方面在原则上都可以改进。Project 8 的研究者们打算用他们的实验, 探测在氦的 β 衰变中产生的多个电子的同时发射。他们目前约 30 eV 的能量分辨率对于测量中微子质量来说远远不够。但是, 未来的 Project 8 谱仪的能量分辨率将超过 KATRIN 的能量分辨率(约 1 eV)。原则上, 这种技术的灵敏度可能达到中微子振荡实验给出的质量范围。主要的挑战在于改进这种技术, 使之能同时测量多个电子, 并且能测量这些电子单独的回旋辐射。更多内容详见: D. M. Asner et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114: 162501。

