

# 利用悬浮小球的反冲探测核衰变

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Tracy Northup. *Physics*, July 8, 2024)

几个世纪以来，物理学家们一直利用动量守恒作为分析动力学过程的手段。耶鲁大学的David Moore和他的团队将这种方法用于一项新的工作中：他们利用动量守恒来确定一个放射性原子何时发射一个 $\alpha$ 粒子。研究表明，经进一步改进，研究人员有可能使用这种技术探测其他核衰变产物，如中微子和假想中的暗物质粒子。

基本思想很简单：如果将放射性原子嵌入到一个较大的物体中，那么一个出射的衰变产物就会导致该物体向相反的方向反冲。但是，有可能探测到像氦核这样小的粒子的反冲吗？答案在于我们如何精确地测量较大物体的动量。其中一个主要的问题是摩擦力：如果较大的物体被摩擦力减慢，那么它的运动就不能反映来自衰变粒子的动量。

Moore等使用二氧化硅微球作为他们的大物体，使其在高真空中漂浮以使摩擦力最小化。利用光学、电学或磁力使微球悬浮，可以实现与环境的高度隔离。此外，悬

浮物体散射的光可以用来精确跟踪其位置，通过电或光学反馈可精确控制物体的运动。目前已经可以通过反馈将光学陷阱中的纳米级小球减缓到它们的量子力学基态运动的程度，并且能在1秒的观察时间内测量出大小为 $10^{-20}$  N的力和大小为 $10^{-7}$  g的加速度。

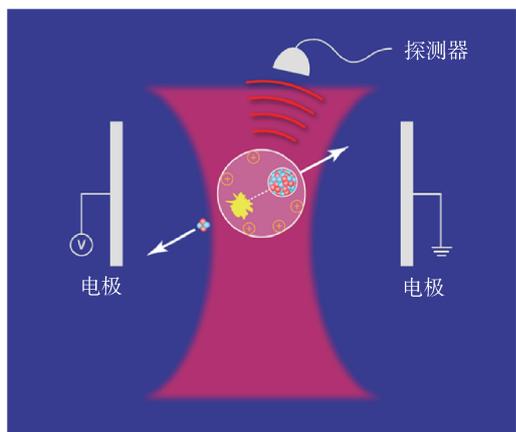
在耶鲁大学的实验中，第一步是将具有放射性的铅-212原子植入到二氧化硅微球。然后，使用聚焦激光束每次悬浮一个微球。由于激光的圆偏振，微球以超过100 kHz的频率旋转，因而提供了微球陀螺的稳定性，固定了粒子旋转轴的方向。接下来，将含有微球的腔室抽气到大约 $10^{-10}$ 个大气压的压力。最后，连续记录两到三天每个微球的反冲数据。铅-212的半衰期为10.6小时，该团队寻找铅-212通过发射 $\alpha$ 粒子和 $\beta$ 粒子而衰变为稳定同位素铅-208的证据。已获得了6个微球的数据。

研究人员采用两种并行的方法确定核衰变。第一种是电学方法：微球对振荡电场的响应揭示出它携带多少过剩电荷，灵敏度可达单个电子或质子的水平。过剩电荷值的任何变化都表明核衰变导致带电粒子发射(没有植入铅-212的微球在三天内未显示出过剩电荷的变化)。第二种是光学方法：微球散射的光提供了关于微球在陷阱中运动的精确信息。研究人员使用第一

种方法识别出6个微球83个电荷变化的事件，然后利用第二种方法对每个事件中微球受到的作用力进行了重建。他们的关键结果是重构的作用力幅值的直方图，这些幅值与 $\alpha$ 衰变和 $\beta$ 衰变所预测的响应一致。 $\alpha$ 衰变提供反冲信号；而 $\beta$ 衰变造成本底，但没有带走用以分辨反冲的足够的动量。

结果表明，从硅微球的反冲可以探测核衰变，尽管微球比衰变产物重 $10^{12}$ 倍。此外，通过测量反冲和电荷，提高了测量的灵敏度，从而可以探测到每天发生一次的稀少事件。进一步提高灵敏度的一种方法是使用一个更小的悬浮物体；Moore和他的同事提出使用质量比该项研究中的球体小100倍的球体研究中微子性质。另一种方法是基于悬浮纳米球的传感器的最新进展，提高微球动量探测的灵敏度。

研究人员指出，反冲探测解决了传统核衰变探测器的不足之处，后者依赖于衰变产物与探测介质的相互作用。因此，它可能是一项研究涉及非相互作用粒子(如暗物质或惰性中微子)衰变的技术。惰性中微子是假设中的极轻的粒子，仅通过引力与其他粒子相互作用，如果存在的话，也很难发现。估计暗物质约占宇宙的27%。它们的性质仍然是个谜。Moore等的技术可以通过放射性衰变引起的反冲动量发现这些难以捉摸的粒子。然而，对反冲敏感并非总是件好事：未来的基于离子阱的量子计算机可能会受到附近电极表面放射性衰变的不利影响。



光学陷阱内微球中的核衰变