

# 极不稳定核的五质子衰变

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Michael Schirber. *Physics*, October 27, 2023)

对极不稳定核发射5个质子衰变的观测，可用于对极端情况下核模型的检验。

研究人员发现了极不稳定核的一种现象，在这种核中，一半以上的核子是而非束缚的，也就是说，这些核子并不是与核的致密核心紧紧相连。原子核氮-9由5个质子围绕着一个类似氦核的核心组成，这些质子在氮-9核形成后便很快逸出。而此前的实验观察到在一个核中最多有4个非束缚的质子。研究团队必须仔细筛选大量的核碰撞数据来鉴别氮-9衰变。这种几乎不束缚的核对于核结构理论提出了独特的挑战。

质子数和中子数相差很大的核(奇特核)比相差不大的核的稳定性差。在极端情况下，质子过多(丰质子)或中子过多(丰中子)的同位素是不束缚的，意味着一个或更多的核子会在衰变中逃逸。束缚态与非束缚态之间的界限(在核版图的丰质子

侧与丰中子侧)称作滴线。研究人员对发现超出滴线的核感兴趣是因为这些核可用于对极限情况下核存在模型的检验。这些奇特核在超新星的重元素形成和中子星并合中也起着重要作用。

大多数超出滴线的核通过发射一个核子衰变。例如，氮-11和氮-10通过发射单个质子衰变。但是研究人员还测量到了通过发射两个、三个或四个质子衰变的核。在圣路易斯华盛顿大学的 Robert Charity 及其同事偶然发现一个信号，暗示一个氮-9的5质子衰变，氮-9是远超出滴线的核，没人认为这是可以探测的。

为证实这一发现，研究团队先是模拟了氮-9的结构。氮-9的核心由两个质子和两个中子组成——类似于氦核，剩余的五个质子没有束缚在这个核心上，但它们必须穿过势垒(隧穿)才能逃逸出来。

研究人员对这种隧穿现象进行了计算，在所用的理论中，核以类似于原子发射光子的方式发射质子。他们的计算揭示了氮-9衰变的三步过程：首先，发射一个质子，剩下一个碳-8核；然后，出射两个质子，生成铍-6；最后，另外两个质子逃逸出来，只剩下氦核心。这种5质子发射过程在大约 $10^{-21}$  s的时间内发生。

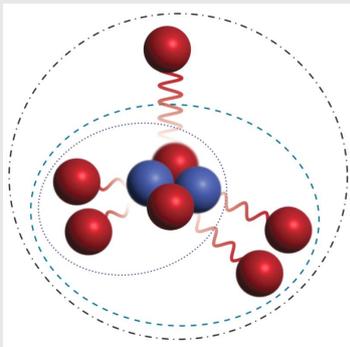
研究团队使用理论预言更仔细地分析了数据。实验是2016年在美国国家超导回旋加速器实验室(最近

升级为稀有同位素束装置)对几种丰质子核研究的一部分。研究人员用氧-16核束流轰击铍靶。在反应产生的碎片中他们分离出氧-13核，并用它继续轰击另一个铍靶，探测器记录第二次碰撞中出射的粒子。为研究氮-9，团队选择碰撞产物含有1个氦核和5个质子的事件。在筛除来自其他核衰变的本底事件后，研究人员发现，这些6粒子事件生成能谱中的最可能值(能谱中的峰)与所预言的氮-9的质量相符合。

这一结果存在着某种不确定性，因为能谱中的峰可能实际上是由核的基态和一个激发态产生的两个没有分辨开的峰形成。研究人员在接下来的实验将考虑如何区分一个峰和两个峰的问题。

波兰华沙大学的核物理学家 Marek Pfützner 说：“当实验人员研究更奇特的核时，有机会检验我们的核模型在远离稳定线区域时是否仍然有效。氮-9提供了一个特别有意思的检验，因为丰质子核必须克服质子间的斥力，2个中子抓住7个质子对我来说似乎不太可能。”

法国大型重离子国家加速器(GANIL)的核理论家 Marek Ploszajczak 对于 Charity 等能够在碰撞产生的各种核物质中发现氮-9的信号印象深刻，他想知道是否还能探测到更松散的核，并说：“未来挑战性的问题不仅是滴线在哪，而且是核存在的极限在哪？”



氮-9核由5个质子环绕着的两个质子(红色球)和两个中子(蓝色球)组成。当这个高度不稳定核衰变时，它会分三步过程发射5个质子，每一步都留下一个较小的核(如椭圆所示)