

## 达到原子核存在的极限

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Artemis Spyrou, *Physics*, November 18, 2019)

发现自然界的极限是物理研究的主要目标。具有一定数量质子的原子核中，可以加入的中子数是有极限的，超出极限，核不能保持束缚状态，中子就会“滴落”。这种极限，称为中子滴线。

以前，只对118种已知元素中的8种最轻的元素测量了中子滴线。测量更重元素的中子滴线，除了可以绘制核素图的边界，还将挑战我们关于决定这些奇异核结构的基本作用力的认识。例如，实验表明在非常富中子的核中，对于中子数( $N$ )来说，16是一个“幻数”，具有 $N=16$ 的同位素是非常稳定的。

研究人员将这一观测与碳、氮和氧的中子滴线位置联系起来，这三种元素最重的束缚的同位素都具有16个中子。但是需要进一步实验来充分理解“幻数” $N=16$ 及其与滴线的关系。

这些实验也有助于解释氧的最重的同位素具有意外小的 $N$ 值。氟可以具有至少22个中子( $^{31}\text{F}$ )，而周期表中氟前面的元素氧，却没有超过16个中子的同位素( $^{24}\text{O}$ )，此即所谓的“氧

反常”。大多数理论模型不能重现这一特点，而预言 $^{26}\text{O}$ 甚至 $^{28}\text{O}$ 应该是束缚的。氧反常现象引起许多理论解释，延伸了我们对于核力性质的理解。例如，某些理论家认为氧反常的原因是当3个中子相互作用时产生的排斥性对核力的贡献，而中子对之间的引力不足来解释氧反常。还有人提出，氟同位素增加的稳定性是由于“转换岛”的出现，在核素图的转换岛区，传统的核壳模型所预言的核的性质不再成立。尽管有这些解释，我们仍缺乏关于奇特的富中子同位素的完整的物理模型，新测定的两种元素的滴线位置为理论模型的改进提供了新线索。

在新的测量中，Ahn等用高能 $^{48}\text{Ca}$ 束轰击铍靶，使 $^{48}\text{Ca}$ 核碎裂。研究团队利用碎片分离器BigRIPS，根据碎片的质量和电荷将不需要的碎片核去除，而将感兴趣的同位素分离出来。由于直到氧元素的滴线已绘出，研究人员专门寻找周期表中下面的一些元素：氟、氖和钠的同位素。这些元素的已知同位素是： $^{31}\text{F}$ 、 $^{34}\text{Ne}$ 和

$^{37}\text{Na}$ 。滴线在核素图上是一条不规则的路径，有时越过一种同位素而包含其相邻的更重核素。因此Ahn等通过寻找每一核素的下两个同位素 $^{32}$ 、 $^{33}\text{F}$ 、 $^{35}$ 、 $^{36}\text{Ne}$ 和 $^{38}$ 、 $^{39}\text{Na}$ 来确定滴线的位置。

Ahn等没有观测到 $^{32}$ 、 $^{33}\text{F}$ 、 $^{35}$ 、 $^{36}\text{Ne}$ 和 $^{38}$ 、 $^{39}\text{Na}$ 的事件，只给出测量灵敏度。如果这些核存在的话，应该探测到5个 $^{38}\text{Na}$ 和1100个 $^{32}\text{F}$ 。由此得出： $^{38}\text{Na}$ 存在的概率为1%，而 $^{32}\text{F}$ 存在的概率小于 $10^{-10}$ 。根据这些测量，确定最后一个氟的同位素是 $N=22$ 的 $^{31}\text{F}$ ，氟的最重的同位素是 $N=24$ 的 $^{34}\text{Ne}$ 。研究人员确实观测到一个 $^{39}\text{Na}$ 的事件，表明这个同位素很可能是束缚的，因而钠的滴线超出 $^{39}\text{Na}$ 。Ahn等新的测量对理论提出了重要挑战，目前理论计算只能重现这些元素中Ne元素的观测。特别是，某些模型预言氟和氖的滴线都在 $N=24$ 处，而Ahn等发现氟的最重的同位素 $N=22$ 。这些模型必须修正，这种修正将增进对核的基本性质的认识。

Ahn等的实验结果标志着有20年历史的稀有同位素科学前进了重要一步，达到更重的中子滴线是该领域的主要目标。在RIKEN，滴线研究仍在继续，世界各地的新一代稀有同位素装置上计划着新的测量。如美国的稀有同位素束流装置FRIB，预计两年后建成。在下一个5年左右将产生比RIKEN强得多的束流，因而可以达到周期表上第12个元素镁的滴线。与现代理论模型相结合，这些新的测量将为更好地理解极端条件下的原子核铺平道路。

更多内容详见 *Phys.Rev.Lett.*, 2019, 123: 212501。



研究人员已绘出氟(F)和氖(Ne)最重的同位素的边界(绿线)。以前只知道周期表中前8种同位素的中子滴线(粉红线)