

追问原子核存在的极限

(北京大学 裴俊琛 编译自 Yorick Blumenfeld. *Physics*, November 16, 2022)

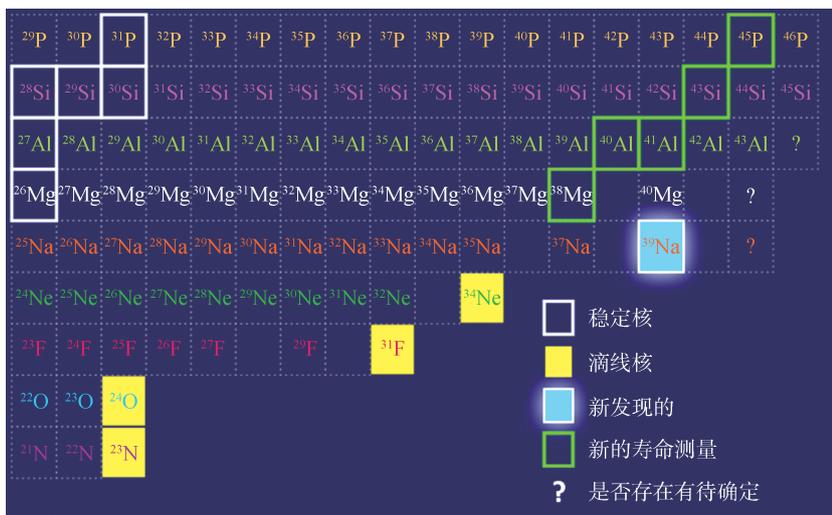
中子滴线(the neutron drip-line)给出了原子核存在的边界极限,即一种元素的原子核在质子数一定时最多能包含的中子数。对处于滴线的原子核,如果再添加一个中子,它将不再是一个束缚的体系,从而中子会“滴出”。测绘滴线位置是现代核物理的一个主要科学目标。滴线边界成了验证和校准各种核理论模型的试验场,对我们认识中子星和超新星爆发环境中宇宙元素的生成起源非常关键。最近两个研究组的实验扩展了我们对滴线核区的认识。其中一个是日本理化学研究所的放射性同位素束流工厂(RIBF)的研究组,Deuk Soon Ahn及其同事发现了钠-39(^{39}Na),这可能就是钠的滴线位置,如图所示。同时,美国密歇根州立大学的稀有同位素束流装置(FRIB)开展了建成后的第一

个实验,Heather Crawford及其同事研究了接近钠元素的丰中子同位素,测量了一些以前未知的同位素寿命。

经过一个多世纪的核科学研究,被发现的元素数不断增加,现在118号元素(Oganesson)已被发现。但是目前确认的中子滴线才到了氦,其滴线位于 ^{34}Ne (中子数 $N=24$)。RIKEN的实验中约有 5×10^{17} 个 ^{48}Ca 核轰击Be靶,观测到了9个 ^{39}Na 同位素核的事例。这样的实验探测比大海捞针还要困难! ^{37}Na 于2002年被实验发现,时隔20年才到 ^{39}Na 。最新的实验揭示了钠的滴线至少是 ^{39}Na ($N=28$)。 $N=28$ 是一个传统的壳幻数,但是在丰中子区壳层幻数发生了改变。这些规律似乎预示了原子核可以束缚比我们预期更多的中子。这种额外的结合能力可能

是由于原子核的形变效应。最新的壳模型计算能解释图中已知的滴线,有些核模型却不能(译者注:理论还预言 ^{39}Na 是一个弱束缚的非球形晕核)。虽然实验上很难排除还有更多中子的钠同位素,但是理论上基本判定 ^{39}Na 就是滴线核。

发现新同位素只是核物理研究的第一步。有关同位素核的奇特性质,包括寿命、质量、自旋、激发态的测量可以更好地检验模型的预言能力。FRIB于2022年5月建成,是目前世界上产生奇异同位素最先进的加速器装置。最近FRIB发表了第一篇实验成果。他们用 ^{48}Ca 束流轰击Be靶产生丰中子的Mg,Al,Si和P的同位素,并测量了它们的寿命,其中有5个同位素的寿命是首次测量。目前FRIB的实验还没有产生更丰中子的新同位素,以达到测量原子序数 Z 在12—15区域元素的滴线。这是因为FRIB才刚运行,其束流强度才开到了预定的1%,接下来的数月计划逐步提高束流强度,有望进一步扩展滴线边界。除了FRIB和RIBF,一些新的加速器装置也将发挥重要作用(如德国的反质子与离子研究装置(FAIR)。译者注:中国的强流重离子加速器装置(HIAF)也可以)。实际上地球上的加速器装置不可能达到所有的滴线边界,它们的存在和性质有赖于更可靠的核理论模型。这里介绍的 ^{39}Na 实验和未来实验为检验、约束和改进核理论模型提供了重要机遇。



丰中子核区从氦到磷的核素版图的最新边界。Ahn和同事们发现了 ^{39}Na ,它很可能是钠的滴线同位素。Crawford及其同事测量了5个以前未知的同位素的寿命