

新的核数据使恒星中的重元素困境恶化

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Katherine Wright. *Physics*, March 21, 2024)

天体物理学家遇到一个与元素铈有关的问题：模型预测，某些恒星中含有的这种重元素应该比天体物理观测所发现的少得多。最近在欧洲核子研究中心的中子飞行时间(n_TOF)装置上进行的实验已经将理论和观测之间的差距扩大了20%。参与这项工作的研究人员说，研究结果强调了对原子核性质进行高精度测量以及更新核合成模型的必要性。

宇宙中大多数较重的元素是通过所谓的中子捕获过程形成的，在这个过程中，原子核吸收一个或多个中子。缓慢的中子捕获过程又称“s过程”，在这种过程中，原子核每吸收一个中子便产生一个质子数相同但增加一个中子的稳定核，或是不稳定核，后者会发生放射性衰变，生成一个元素周期表中增加一个质子的下一个元素的原子核。

利用目前可用的s过程模型，研究人员正确地预测了恒星中钷(56个质子)、镧(57个质子)、铈(58个质子)和钷(59个质子)等重元素的丰度，这些元素都被认为是通过s过

程富集的。但是对于铈(58个质子)，模型失效了，因为这个元素在某些低质量、贫金属球状星团恒星中的丰度预测值，与观测结果相差30%。

铈还有另一个有趣的特性：它可以形成一个所谓的幻数核。宇宙中的大部分铈(89%)以铈-140的形式存在，这是元素铈的一种同位素，包含58个质子和82(幻数)个中子。幻数核特别稳定，因此通常比元素周期表中同一元素或邻近元素的其他同位素具有更高的丰度。

像其他幻数核一样，铈-140的高稳定性是由于它的中子捕获截面低，即铈-140原子核吸收入射中子的概率低。在欧洲核子研究中心的新实验中测量了该俘获截面。实验采用高能中子束轰击铈氧化物样品，然后测量相互作用的产物。样品中的铈-140捕获一个中子生成铈-141，这是一种不稳定的同位素。随后，铈-141发生衰变，发射一连串的伽马射线，当射线与液体闪烁体相互作用时，就可以探测到这些伽马射线。探测结果用以确定原始样品中铈-140的中子捕获截面。

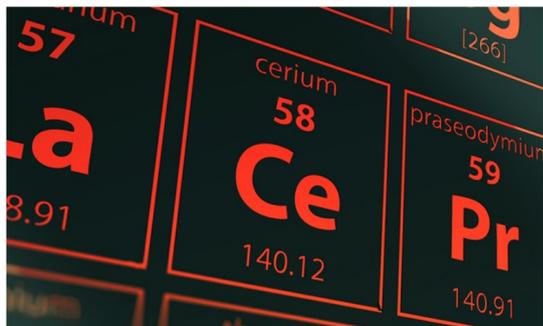
数据分析表明，中子捕获截面比以往精度较低的实验测量结果高40%。更高的截面使铈-140更有可能捕获入射的中子，而不太可能保持在铈-140的状态。从事中子俘获相关工作的人员说，这结果导致人们预测铈-140的丰度比

以前更低。较高的俘获截面也影响了在s过程链中下一步形成的原子核的丰度。由于铈-140更有可能捕获中子而形成更重的原子核，s过程可以更快地继续进行，产生更高丰度的较重的原子核。

理论预测的铈-140丰度与该团队对贫金属恒星的观测值之间的明显差别意味着，除了s过程之外的某个过程也可能在这些恒星中产生这种核。意大利国家新技术、能源和可持续发展局(ENEA)的Alberto Mengoni和他的同事认为，一种可能性是有另一种核合成途径，即所谓的*i*过程，参与了铈的生成。这种中子捕获过程绕过了一些参与s过程的稳定原子核，如果*i*过程发挥了重要作用，可能会改变元素的相对丰度。Mengoni说：“这是一种可能性，但我们不知道这个*i*过程是否能解释目前的情况。”

该小组并不是唯一一个研究铈-140中子捕获截面的小组。今年2月，耶路撒冷希伯来大学的Michael Paul和他的同事们使用一种不同的技术进行测量，发现其截面值比之前用这种技术测量的值低约15%。他们不知道这两个截面值之间差异的根源。

为了确切地梳理出到底发生了什么，研究人员认为需要进行更多的测量。许多理论和实验小组都在探索*i*过程。可能目前的核合成模型需要调整或需要发明新的模型。研究这些问题是核物理学中最活跃的领域之一。



新的实验表明，铈-140更容易俘获入射的中子