

原子核禁戒跃迁决定恒星命运

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Carla Frohlich. *Physics*, December 24, 2019)

每年约有1亿颗恒星诞生，又有同样多的恒星死亡。为了弄清恒星的生命周期，核物理学家与天体物理学家合作揭示了在恒星内部发生的物理过程。质量为太阳质量7—11倍的中等质量恒星，会经过两种不同的路径死亡：热核爆炸或引力坍缩。至于经过哪条路径，决定于恒星内氧核熔合时的状态。研究人员首次测量了氟到氖的稀有核衰变。这是了解中等质量恒星命运的关键。恒星的演化和命运强烈依赖于其诞生时的质量。低质量恒星，如太阳，首先演化成红巨星，当其外层脱离后变成由碳和氧组成的白矮星。大质量恒星，其质量至少比太阳大11倍以上，也演化成红巨星，在其核心不断发生核聚变，直到核心完全变成铁。这时恒星停止产生能量，在引力作用下开始坍塌。恒星的核压缩成中子星，而其外层在超新星爆炸中被抛出。中等质量恒星的演化不是很清

楚，理论预言，这些恒星可通过引力坍缩爆炸，也可通过热核过程爆炸。究竟发生哪个过程，关键是氖的一种同位素的性质及其俘获电子的能力。

原子核具有分立的能级。恒星内部条件，如等离子体的温度和密度，决定了核的能态。而能态的量子力学性质决定核的衰变路径。如果通过一条路径的衰变很容易发生，这种衰变就称为容许跃迁。反之，则称为禁戒跃迁。在恒星内部的极端条件下，这种禁戒跃迁可以更频繁地发生。恒星中氟(F)和氖(Ne)之间的一个重要的禁戒跃迁，可通过 ^{20}F 到 ^{20}Ne 的衰变，或通过 ^{20}Ne 俘获电子生成 ^{20}F 而进行。大多数情况下，跃迁涉及激发的 ^{20}Ne 核($^{20}\text{Ne}^{2+}$)，但在中等质量恒星中，预计跃迁主要通过 ^{20}Ne 的基态($^{20}\text{Ne}^{0+}$)进行。预期恒星的爆炸机制严重依赖于 ^{20}Ne 的电子俘获速率。因此测量 $^{20}\text{Ne}^{0+}$ 的跃迁速率是了解恒星命运的关键。加拿大Dalhousie大学的Oliver Kirsebom及其同事研究了 ^{20}F 与 $^{20}\text{Ne}^{0+}$ 之间的跃迁。

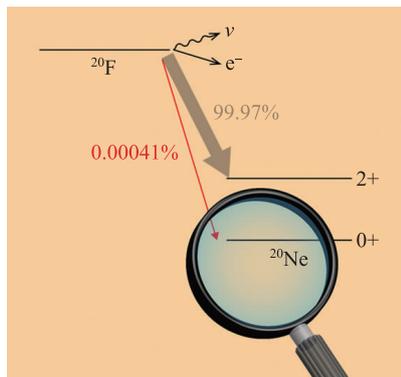
Kirsebom等在芬兰的加速器实验室JYFL，用 ^{20}F 核轰击碳箔，将 ^{20}F 核注入箔中，监测 ^{20}F 的放射性衰变，该过程中发射一个电子和一个中微子。用闪烁探测器测量衰变电子的能量。他们测量了能量高于5.8 MeV的电子。这些电子只能从 ^{20}F 到 $^{20}\text{Ne}^{0+}$ 的禁戒跃迁中产生。当 ^{20}F 衰变到 $^{20}\text{Ne}^{2+}$ 时，释放的1.634 MeV衰变能被激发的Ne随即发射的光子带走。但当 ^{20}F 衰变成 $^{20}\text{Ne}^{0+}$ 时，全

部衰变能(7.024 MeV)传递给电子和中微子。这种禁戒跃迁比普通跃迁发射的电子携带更高的能量。通过记录每种能量电子的数目，团队确定每25万个 ^{20}F 的衰变中有1个衰变到 $^{20}\text{Ne}^{0+}$ 。这百分比看起来很小，足以表明，所发生的禁戒跃迁是在各种核中测得的次最强的。

Kirsebom等用他们的结果计算恒星环境下 ^{20}Ne 的电子俘获速率。发现该速率比以前计算所预期的值大8个数量级。将这大的俘获速率输入中等质量恒星的模拟中，观察到恒星核心早期变热，以及较低密度时氧的熔合。与以前预言相比，发现核聚变的能量较低。在所有的模拟中，都观察到核心经热核爆炸而死亡。爆炸仅部分地使恒星瓦解，遗留一颗主要由氧、氖和镁组成的白矮星。

Kirsebom等的工作是核天体物理学的一个里程碑。实验用几十年的时间测量了这种禁戒 β 衰变跃迁，这是中等质量恒星的核心演化中最后剩余的一个核物理不确定性。但是这些恒星演化中仍有未解之谜。还需集中研究热力学和了解是否这些恒星的核心会因对流而不稳定。对流会将物质混合，并将能量从核心向外输送。物质的混合会抵消增强的电子俘获速率的效应，这意味着恒星将因引力坍缩而死亡。只有了解发生在恒星内部所有过程的详情，才能解开这些天体物理客体演化和死亡的秘密。

更多内容见 *Phys. Rev. Lett.*, 2019, 123: 262701。



研究人员测量了 ^{20}F 与 ^{20}Ne 之间的禁戒核跃迁。用测量结果对 ^{20}Ne 电子俘获速率进行了新的计算。该速率对于预言中等质量恒星的演化很重要