

锦屏深地实验室解开古老恒星钙丰度之谜

张立勇^{1,†} 何建军¹ 柳卫平^{2,3}

(1 北京师范大学核科学与技术学院 北京 100875)

(2 中国原子能科学研究院 北京 102413)

(3 南方科技大学理学院物理系 深圳 518055)

2022-12-27 收到

† email: liyongzhang@bnu.edu.cn

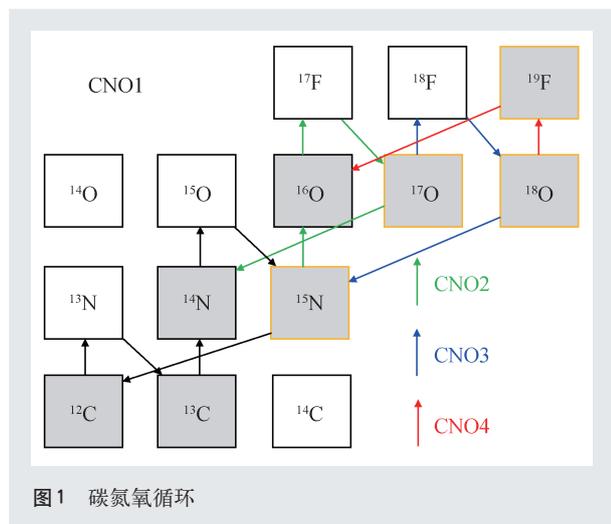
DOI: 10.7693/wl20230104

目前已知的元素有118种,把它们按照化学性质排列出来,就是我们熟知的元素周期表。这些元素构成了我们周围的世界,包括恒星(比如太阳)、行星(比如地球)。于是就有了一个自然的问题,这些元素是怎么合成的?为什么不同的元素含量相差如此之大?比如地壳中氧和硅含量很多,金银等贵金属含量却很少?它们的含量会随时间变化吗?研究我们的星空可以在一定程度上回答这些问题,因为绝大部分元素都是在恒星内部通过各种核反应合成的^[1]。

现在认为,宇宙产生自137亿年之前的大爆炸,大爆炸后的大概半个小时内,主要合成了氢和氦,以及少量的锂元素。这些元素组成了第一代恒星,它们的内部温度非常高,可达 10^8 K。如此高的温度下,原子核之间会发生剧烈的碰撞,引发各种核反应,生成新的原子核^[2]。比如4个氢原子核经过一系列核反应可以生成一个 ^4He 原子核,3个 ^4He 又可以进一步反应生成一个碳原子核。这些反应一直进行下去,伴随着第一代恒星

的整个生命周期,直到最后生成铁。此时的恒星经历了几百万年的演化,也走到了生命的尽头,会通过超新星爆发将其合成的一部分重元素(比氢重的元素)以及没有参与核反应的氢、氦等轻元素抛散到宇宙空间,反馈至星际介质。这些星际介质在万有引力的作用下会再次聚合,重新形成第二代恒星,并继续通过各种核反应合成更多的重元素。就这样,从宇宙大爆炸到现在的130多亿年里,一代又一代的恒星不断产生和消亡,合成了我们今天看到的所有重元素^[1]。核天体物理学最重要的任务就是研究上述重元素的核合成过程,主要方法之一就是测量关键核反应的截面,由此计算恒星合成的各种元素的含量(元素丰度)^[3]。第一代恒星质量一般都比较大(几十到几百个太阳质量),寿命比较短,一般经历几百万年的演化后通过超新星爆发的形式结束自己的生命。因此,如果想直接观测第一代恒星,就需要观测非常遥远的宇宙,探测宇宙大爆炸结束几百万年后恒星发出的第一缕光。美国和欧洲耗资100多亿美元发射的韦布望远镜的科学目标之一,就是直接观测第一代恒星的光谱,研究其化学成分和演化机制。

现在人们观测到的最古老恒星是2013年由澳大利亚国立天文台(ANU)发现的,编号SMSS 0313-6708^[4]。研究表明,这颗恒星由第一代恒星通过超新星爆发死亡后生成的星云重新聚合而成,现在正处于红巨星阶段。因此,SMSS 0313-6708中的所有重元素都是第一代恒星在其生命周期内合成的(SMSS 0313-6708形成后其内部也会进行核合成,但主要是由氢合成氦,几乎不合成重元素),通过观测它的元素丰度,就可以得到第一代恒星的演化信息。观测表明SMSS 0313-6708中存



在着钙元素，却没有铁。人们认为，这些钙元素是第一代恒星在氢燃烧阶段合成的。第一代恒星的氢燃烧主要通过碳氮氧循环进行，如图1黑线所示： ^{12}C 俘获质子，形成 ^{13}N ， ^{13}N 通过 β^+ 衰变形成 ^{13}C ， ^{13}C 再通过两步质子俘获过程，生成 ^{15}O ， ^{15}O 再由 β^+ 衰变形成 ^{15}N ， ^{15}N 最后再通过 (p, α) 反应形成 ^{12}C ，完成一个循环。整个循环的效果是4个氢被消耗，生成了一个氦，而CNO等核素的数量不发生变化，而是起到一个催化剂的作用^[5]。实际上的反应流除了黑线所示CNO1循环以外，还有少量反应流通过CNO2、CNO3、CNO4进行循环，并最终通过 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ (p为质子)，反应突破到 $A > 20$ 的核区，再经过一系列质子俘获以及 β^+ 衰变过程，最终合成双幻核 ^{40}Ca ^[6, 7]。这样，在第一代恒星的氢燃烧阶段就可以合成钙元素，但理论计算出的钙元素丰度却比观测值低10—100倍。由此人们怀疑可能是合成钙元素过程中的关键反应 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 的截面数据(或者反应率，即反应快慢)存在较大的不确定性，导致钙元素丰度计算值偏小^[8]。

在天体物理感兴趣的能区， $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 的反应截面极低，对其进行直接测量将主要面对如下两个方面的挑战：(1)宇宙射线在探测器中产生的本底计数率远大于反应计数率，导致真实信号被淹没在本底信号中；(2)测量如此低的截面需要用非常强的束流轰击靶子，才能达到足够的计数率，这对靶子的耐辐照性提出了非常高的要求^[9]。我们在中国锦屏地下实验室(China Jinping Underground Laboratory, CJPL)用高稳定性 ^{19}F 靶对该反应进行直接测量。CJPL覆盖岩层厚达2400 m，居世界之首(图2)。锦屏II期新建了8个实验洞用于开展多学科深地科学研究，其中A1实验洞用于核天体物理研究。中国原子能科学研究院牵头，联合中国科学院近代物理研究所、北京师范大学、清华大学等科研单位，在CJPL的A1洞内建成了锦屏深地核天体物理实验装置(JUNA)，并于2020年底成功出束，宇宙射线通量比意大利格兰萨索地下LUNA实验室还要低大约100倍，为极低截面核天体反应直接测量提供了绝佳的环境^[10]。另外，为解决靶稳定性问题，我们经过多年的艰苦



图2 从世界最深的实验室CJPL窥探宇宙的奥秘

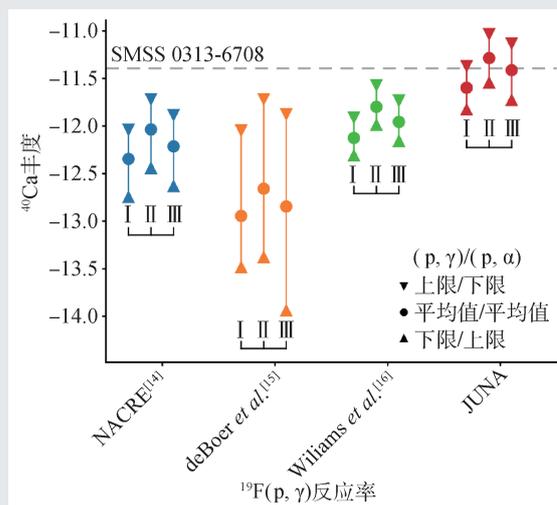


图3 基于不同 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应率计算出的 ^{40}Ca 丰度，其中只有JUNA实验的反应率可以重现天文观测值^[7]。图中，I为固定温度密度、II为包含对流等混合机制、III为完整恒星演化模型下计算出的 ^{40}Ca 丰度

攻关，利用离子注入技术，成功研制出世界上承受能力最强的 ^{19}F 注入薄靶，将承受能力从之前的不到1 C提高到200 C(库仑)，完全满足了强流实验的要求，解决了实验的卡脖子问题^[11, 12]。

基于JUNA的低本底环境，我们用强质子束流轰击高稳定性 ^{19}F 靶，用 4π BGO(锗酸铋)探测器结合符合测量技术测量 γ 射线产额，并利用Geant4模拟确定 γ 跃迁的级联关系，最终得到了关键天体反应 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 的反应截面^[13]。实验加装了液氮冷阱，降低了束流在靶表面引入的碳沉积。为进一步降低环境 γ 射线本底，我们在探测器周围放置了铜、铅、镉的组合屏蔽体。相较于之前的工作，实验本底更低(比地面实验室低4个数量级)、流强更强(平均流强1 mA)，从而可以将反应截面从之前的300 keV推进至186 keV，并

发现了一个位于 225 keV 的新共振。通过对比该共振与(p, $\alpha\gamma$)道 323 keV 共振的产额曲线, 结合 Geant4 确定的 BGO 探测器的绝对探测效率, 我们精确确定了其共振强度为 $4.19 \pm 0.33 \times 10^{-2}$ meV。通过理论分析, 我们发现该共振将 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应在 0.1 GK (1 GK=10⁹ K) 处的反应率提高了 7.4 倍。最后, 我们与国外天体物理学家合作, 利用天体反应网络模型重新计算了第一代恒星在氢燃烧过程中产生的钙元素丰度, 发现新的 $^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应率可以重现 SMSS 0313-6708 的观测数据, 从而解释了第一代恒星中钙元素的来源问题(图 3)^[14-16]。另外, 我们的结果还对第一代恒星超新星爆发的能量进行了限制, 强烈支撑弱爆发模型, 排除了其他的可能性^[7]。

综上所述, CJPL 实验阐释了第一代恒星钙元素的核合成机制, 对理解第一代恒星的演化具有重要意义。实验结果发表后引起了国内外同行的广泛关注和一致认可^[17], 诺贝尔物理学奖获得者、詹姆斯·韦布太空望远镜首席科学家约翰·马瑟来函表示: “祝贺你们的新测量, 我觉得它

们相当重要。” CJPL 实验为未来核天体物理学研究提供了新途径, 引起了核天体物理学界的强烈兴趣。

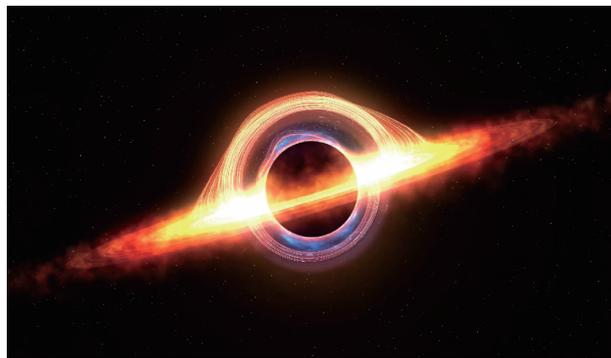
参考文献

- [1] Rolfs C E, Rodney W. Cauldrons in the Cosmos. Univ. Chic. Press Chic., 1988
- [2] Burbidge E M *et al.* Rev. Mod. Phys., 1957, 29: 547
- [3] 何建军, 周小红. 物理, 2013, 42: 484
- [4] Keller S C *et al.* Nature, 2014, 506: 463
- [5] Iliadis C. Nuclear Physics of Stars. Wiley-VCA, 2007
- [6] Takahashi K, Umeda H, Yoshida T. Astrophys. J., 2014, 794: 40
- [7] Zhang L *et al.* Nature, 2022, 610: 656
- [8] Clarkson O, Herwig F. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2021, 500: 2685
- [9] Couture A *et al.* Phys. Rev. C, 2008, 77: 015802
- [10] 柳卫平等. 原子核物理评论, 2020, 37: 283
- [11] Zhang L *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B: Beam Interact. Mater. At., 2019, 438: 48
- [12] Zhang L Y *et al.* Nucl Instr Meth B, 2021, 496: 9
- [13] Zhang L Y *et al.* Phys. Rev. C, 2022, 106: 055803
- [14] Angulo C *et al.* Nucl. Phys. A, 1999, 656(3): 183
- [15] deBoer R J *et al.* Phys. Rev. C, 2021, 103: 055815
- [16] Williams M *et al.* Phys. Rev. C, 2021, 103: 055805
- [17] Pignatari M, Psaltis A. Nature, 2022, 610: 640

Q&A

Q: 黑洞是看不见的, 人们所说的黑洞大小是指黑洞真实的大小还是指光线不能逃逸的引力作用范围的大小? 另外, 史瓦西半径是指什么?

A: 由于黑洞被定义为时空中的一个单向膜, 其边界



黑洞艺术图(图片来源于 Hackaday)

读者和编者

即使对于光子也是只能进入而无法逃出, 所以定义为黑洞的视界。而由于宇宙监督假设(一个物体的完全引力坍缩总是形成黑洞, 而不是形成裸奇异性)的存在, 时空中不会出现裸奇点, 其都会被一个视界所包裹, 也就是形成黑洞, 所以可见, 不失一般性地, 可以通过视界来考量黑洞的大小。

对于黑洞大小的讨论, 这就关联到第二个问题了, 即史瓦西黑洞, 视界的半径就是史瓦西半径, 所以可以用史瓦西半径来考量一个黑洞的大小。此外, 也可以用事件视界的面积来考察, 例如, 对于史瓦西黑洞, 事件视界面积为 $A=16\pi M^2$, 其中 M 为黑洞的质量。由此可以看出, 为什么常说一个黑洞质量(M)越大, 其黑洞大小(A)也就越大。

至于史瓦西半径, 其为爱因斯坦场方程史瓦西解中出现坐标奇异性的位置, 也是一个天体是否会坍缩为黑洞的判定标准。如果一个天体的真实半径小于史瓦西半径, 则其会不可避免地由于自身引力作用坍缩为黑洞。

(选自“中科院物理所”微信公众号问答栏目)