

How were the heavy elements from iron to uranium made?

宇宙中铁以上的重核是如何合成的?

何建军^{1*}, 郭冰², 柳卫平², 赵刚¹

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413

* 联系人, E-mail: hejianjun@nao.cas.cn

2017-12-27 收稿, 2018-01-17 修回, 2018-01-19 接受, 2018-03-28 网络版发表

国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项(2016YFA0400503, 2016YFA0400502)和国家自然科学基金(11490562, 11490560)资助

摘要 针对21世纪尚未解决的11个重大物理问题之三, 即“宇宙中从铁到铀的元素是如何产生的?”进行了系统的阐述, 包括问题提出的背景和重要性、主要研究内容、国内外进展以及将来的发展趋势. 介绍了产生宇宙中比铁重的元素(简称为超铁元素)的几个主要核合成过程, 并总结了相关的研究目标. 目前, 尚需要精确测量天体核合成路径上关键核素的质量、寿命以及相关核反应的反应截面或者天体物理反应率等核物理输入量; 开展天体元素或者同位素丰度的观测研究, 以及星际X和 γ 射线等的卫星观测; 发展天体物理模型以及核物理理论模型, 最终将可靠的核物理输入量、核天体物理理论模型和天文观测数据相结合, 以探索 and 解决宇宙中超铁元素的来源问题.

关键词 核天体物理, 超铁元素, 核反应, 核合成, 元素丰度观测

1 问题提出的背景和重要性

人类自身和赖以生存的丰富多彩的物质世界是由各种化学元素构成的. 宇宙大爆炸3 min后开始的原初核合成阶段只产生了氢、氦和少量的锂(其中 ^1H 约占75%, ^4He 占25%, 而剩余的 ^2H , ^3He , ^6Li 和 ^7Li 质量之和只占十万分之一)^[1], 而其他化学元素是在各种不同的天体场所通过一系列核过程产生的. 在不同温度和密度的天体场所, 发生的核过程不同. 核过程在大爆炸之后宇宙的演化进程中起着极为重要的作用, 其中核反应是合成宇宙中除氢以外所有化学元素的唯一机制, 也是恒星抗衡引力收缩和爆发性天体现象的主要能量来源. 图1显示了在典型的天体环境中的核合成过程和路径^[2]. 在这里, 主要核过程包括: 宇宙大爆炸原初核合成(big-bang nucleosynthesis, BBN)、质子-质子链式反应(pp链或氢聚变)^[3~5]、碳氮氧循环(CNO cycle)^[3~8]、热碳氮氧循环(HCNO cycle)、

发生 α , p反应的 α p-过程、快质子俘获过程(rapid proton capture process, 简称rp-过程)^[6~9]、慢中子俘获过程(slow neutron capture process, 简称s-过程)^[10]、快中子俘获过程(rapid neutron capture process, 简称r-过程)^[11]、光致解离过程(photo-dissociation process, 简称p-过程)^[12]以及中微子质子过程(neutrino-proton process, 简称vp-过程)^[13,14]等. 因此, 认识元素的起源就意味着要认识核素演化的过程, 同时也要认识发生这些过程的天体场所. 没有特定的天体物理环境, 这些相应的过程也不可能发生.

60年前, 威廉·福勒(William Fowler, 1983年诺贝尔物理学奖得主)等人对恒星演化过程中的核反应进行了系统的实验和理论研究. 1957年Burbidge等人^[15]以“恒星中元素的合成”为题在美国《现代物理评论》(*Rev Mod Phys*)上发表了一篇著名的被后人称之为B²FH的论文, 阐明了恒星在赫罗图上的演化进程和恒星演化各阶段中发生的各种核合成过程, 以及超新

引用格式: 何建军, 郭冰, 柳卫平, 等. 宇宙中铁以上的重核是如何合成的? 科学通报, 2018, 63: 2429–2439

He J J, Guo B, Liu W P, et al. How were the heavy chemical elements beyond iron made in the Universe (in Chinese)? *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2429–2439, doi: 10.1360/N972017-01368

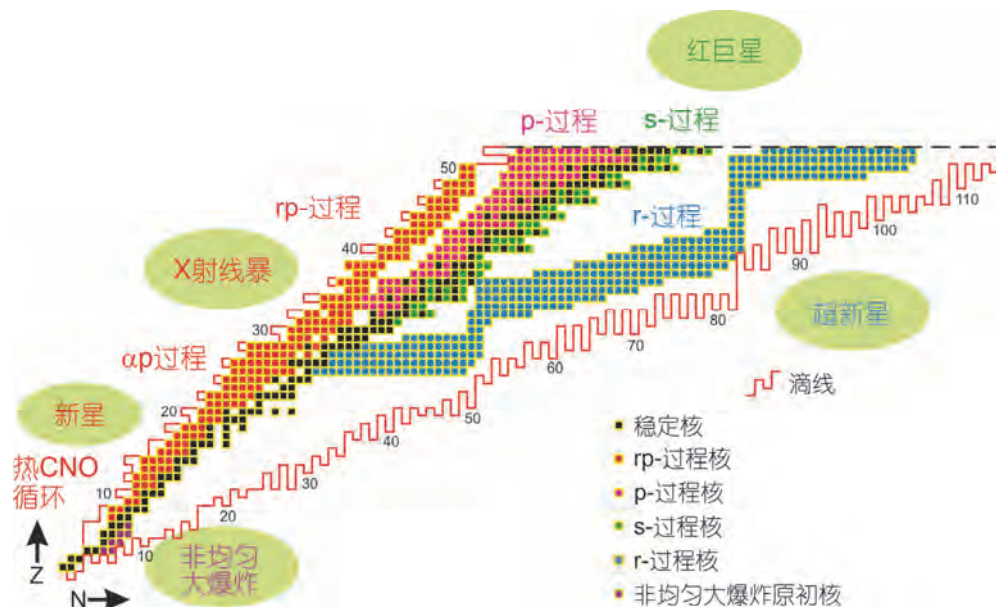


图1 典型天体环境中的核合成路径^[2]

Figure 1 Typical nucleosynthesis processes involved in various stellar environment^[2]

星爆发和大质量恒星演化的关系等, 标志着核天体物理(nuclear astrophysics)这门交叉学科的正式诞生。

核天体物理是核物理与天体物理和天文学自然融合形成的前沿交叉学科. 它主要为人们认识宇宙中化学元素的起源及演化、恒星中能量的产生以及驱动天体现象的物理机制等科学问题提供天体物理模型所需要的关键核物理输入量. 通过各种天文观测和陨石分析等得到了太阳系元素的丰度, 如图2所示. 目前已经基本理解了铁以下元素合成的机制和天体场所, 网络计算能够比较准确地再现观测到的这些轻元素的丰度. 对于比铁重的元素(简称超铁元素), 天体物理学家普遍认为它们主要是通过慢中子俘获s-过程和快中子俘获r-过程产生的, 它们分别产生了宇宙中约50%的超铁元素(图3). 另外, 还有35个丰度比较低的p-核, 可能是由超新星中的光致解离p-过程(或称为光核反应 γ -过程)以及最近提出的中微子质子vp-过程产生的. s-过程主要发生在恒星演化的渐进巨星分支(asymptotic giant branch, AGB星)阶段. 在AGB星中, 以铁-56(^{56}Fe)为主要种子核, 在稳定线附近通过稳定核(或非常长寿命放射性核)的慢中子俘获s-过程和放射性核的 β 衰变产生重元素. r-过程是产生超铁元素的最重要途径之一, 理论天体物理学家认为这一过程发生在超新星爆或者双中子星并合过程中. 这两种天体物理模型都存在不同程度的局限

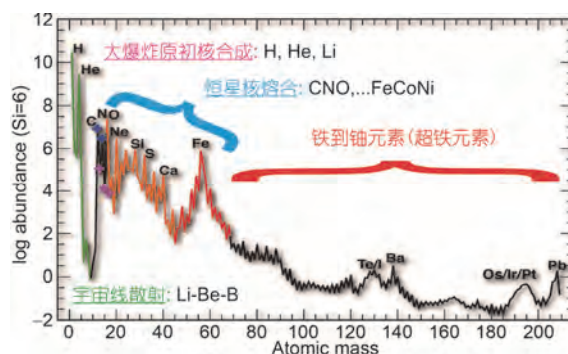


图2 太阳系元素丰度及可能的核合成起源

Figure 2 Element abundances of the solar system and possible origins of nucleosynthesis

性, 因此目前尚不确定r-过程发生的确切天体环境和场所. 在核物理输入层面, 快中子俘获路径位于极丰中子核区, 涉及的大多数核素的性质都是未知的, 包括一些关键原子核的质量、寿命、反应率等实验数据极其缺乏, 只能依赖于理论计算. 因此, 这就导致了天体物理模型不能很好地再现观测到的超铁元素丰度. 美国国家科学委员会于2002在*Discovery*杂志上提出了21世纪待解决的11个重大物理问题(The 11 Greatest Unanswered Questions of Physics)^[16], 其中“从铁到铀的元素是如何产生的?”(How were the heavy elements from iron to uranium made?)位列第三. 因此, 人们要认识重元素合成的过程、时间标度和天体场

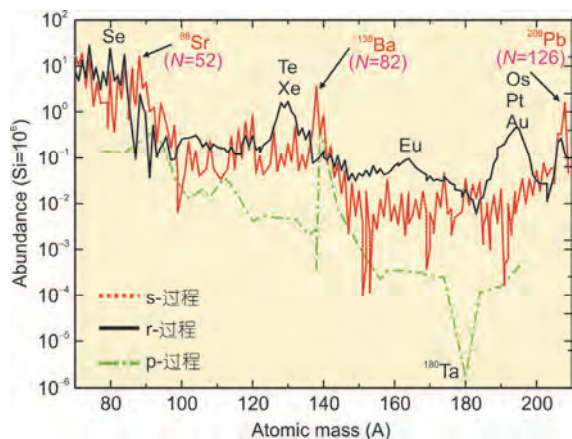


图3 (网络版彩色) 太阳系重元素丰度和相应的核合成过程^[11]

Figure 3 (Color online) Decomposition of the solar abundances of heavy nuclides into s-process (dotted line), r-process (solid line) and p-process (dotted-dashed line) contributions^[11]

所, 进而探索宇宙中从铁到铀等超铁元素的起源, 就需要精确测量天体核合成路径上关键核素的质量、寿命以及相关核反应的反应截面或者天体物理反应率等核物理输入量。

2 主要研究内容

迄今为止, 对比铁轻的元素的起源已经有了相对清楚的认知, 其产生机制主要包括3种核过程, 如图2所示。(1) 大爆炸原初核合成产生了宇宙中较轻的元素——氢、氦和锂;(2) 宇宙射线(主要是高能轻粒子, 如质子和 α)的散裂过程(spallation process)产生了铍、硼以及部分的锂元素;(3) 通过恒星内部带电粒子的熔合聚变, 即一系列的核燃烧过程, 如氢、氦、碳、氮、氧、硅燃烧, 产生了从碳到铁峰以下的各种元素。

以大质量恒星演化晚期形成的洋葱头结构为例, 由于比铁重的原子核的比结合能随质量数增加而减小, 因此它们与质子、 α 粒子等带电粒子的俘获反应是吸能的(并且随着库仑位垒的增大, 反应也难以进行), 核心在万有引力的作用下将会不断收缩, 当温度达到5 GK时, 通过光致解离过程, 铁核心将会被打碎进而形成中子化的核心, 并最终导致II型(即核心坍塌型)超新星爆。可以看出, 超铁元素难以在恒星的稳定核聚变过程中产生。因此, 需要寻找其他合成过程来有效地产生超铁元素。众所周知, 中子诱发的核反应不存在库仑位垒, 特别是它们的核反应截面在低能区非常大(对于s-波俘获, $\sigma_{(n,\gamma)} \propto 1/v$), 因此,

绝大多数的超铁元素都是通过种子核(铁或镍)的中子俘获过程产生的。按照原子核俘获中子和它们发生 β 衰变的相对快慢来判别, 中子俘获又分为慢中子俘获s-过程和快中子俘获r-过程两种。s-过程发生在中子密度相对较低($\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$)的天体环境中, 如AGB星。在这种慢过程中, 原子核俘获中子的速率很低, 俘获一个中子生成的不稳定核在俘获下一个中子之前有足够长的时间发生 β 衰变(典型寿命从几分钟到几年)。因此, s-过程的核合成沿着核素图靠近稳定线的区域进行。r-过程则发生在中子密度高得多($> 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)的天体环境中, 如II型超新星爆和中子星并合的天体事件中。在这种快过程中, 原子核俘获中子的速率很高, 连续俘获多个中子后才发生 β 衰变(典型寿命从毫秒到秒的量级)。因此, r-过程的核合成沿着远离稳定线的区域进行。除了s-过程和r-过程这两种极端情形外, 近年来还提出了一种新的中子俘获过程——中间中子俘获(intermediate process, 简称i-过程)^[17,18]过程。发生i-过程的天体场所的中子密度介于发生s-过程和r-过程的天体场所的中子密度之间, 约为 $10^7 \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。利用i-过程的图像可以非常好地解释观测到的碳增丰贫金属星(carbon-enhanced metal-poor star, CEMP_s)中的元素丰度。但是, 目前是否存在理论预言的i-过程中子密度环境还有很大的争议。

除中子俘获过程外, 光致解离p-过程以及中微子 νp -过程也对产生超铁元素有一定的贡献。虽然这些过程的贡献比较小, 但有其独特作用。例如, p-过程产生的30余种核素是通过中子俘获过程无法产生的。因此, 系统研究上述核过程对于深入理解宇宙中超铁元素的起源具有重要意义。

2.1 慢中子俘获s-过程(AGB星)

慢中子俘获s-过程产生了宇宙中从铁到铀约1/2的重元素^[10]。发生s-过程最主要的天体场所被认为是AGB星。对于初始质量小于9倍太阳质量的恒星, 在其核心氢燃尽离开主序之后, 进入到核心氢燃烧的红巨星阶段。最终核心氢燃尽形成碳氧(CO)核心, 核心外层氦点火燃烧, 氢在更外层燃烧, 这个阶段的恒星被称为AGB星, 典型的AGB星壳层结构如图4所示。氢燃烧壳层(H-burning shell)和氦燃烧壳层(He-burning shell)处在核心与氦包层(convective H envelope)之间, 并且被一个氦壳间层(He intershell或He layer, 主要成分为: 约75%的 ^4He , 22%的 ^{12}C , 2%的 ^{22}Ne 及

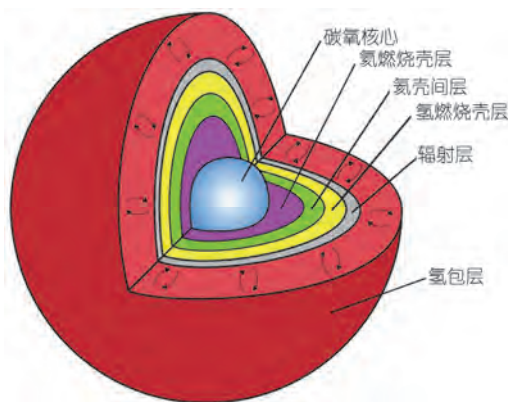


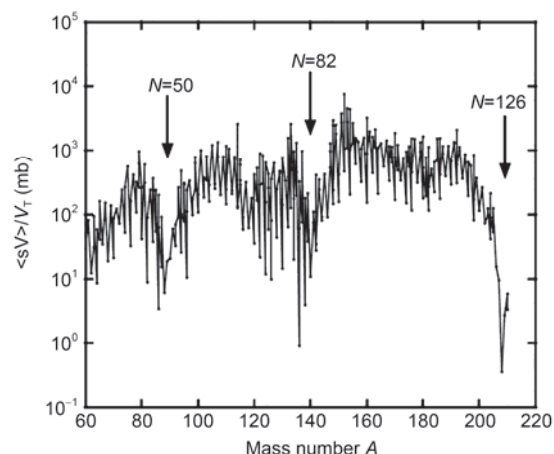
图4 (网络版彩色)AGB星的壳层结构示意图

Figure 4 (Color online) Diagram of shell structure in AGB stars

<1%的 ^{16}O)隔开. 当氦壳层开始燃烧时, 释放出巨大能量, 导致氦壳间层内部发生对流, 恒星进入热脉冲(thermally pulsing)的TP-AGB星阶段. 对流把氦燃烧的产物(以 ^{12}C 为主)和包层中的氢(^1H)带入了氦壳间层, 并通过 $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}(\beta^+ \nu)^{13}\text{C}$ 反应链产生大量的 ^{13}C . 由于氦壳间层中充满了 ^4He , 当该区域的温度达到0.09 GK时, $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 反应被点燃, 产生的中子最终触发了慢中子俘获反应, 继而开始合成超铁元素. $^{13}\text{C}(\alpha, \text{n})^{16}\text{O}$ 被称为s-过程主中子源反应, 它在小质量(<4倍太阳质量)AGB星中发挥主要作用. 当然, 除了主s-过程以外, 还存着大质量(>4倍太阳质量)恒星中的弱s-过程的贡献, 在这种情况下, $^{22}\text{Ne}(\alpha, \text{n})^{25}\text{Mg}$ 反应将为提供中子发挥主要作用.

在s-过程中, 原子核俘获中子的速率很低, 俘获一个中子生成的不稳定核在俘获下一个中子之前有足够长的时间发生 β 衰变. s-过程合成的核素丰度取决于反应链中涉及的中子俘获截面, 截面非常小的核素丰度会累积, 截面大的会很快被消耗掉, 因此只有很小的丰度. 对于中子数是幻数($N=50, 82, 126$)的核素, 在俘获中子后形成复合核的激发能较小, 反应通过很少的复合核能级进行, 截面相对较小(图5)^[19], 因此此处核素比较容易实现积累, 这就解释了太阳系丰度曲线在 $A=88, 138, 208$ 等处成峰的机制(图3).

s-过程的种子核来自于带电粒子诱发的核反应产生的靠近铁的稳定核素. 事实上, s-过程是有终点的, 到了 ^{209}Bi 为止, 再进一步就会导致 α 衰变进入循环反应链 $^{206}\text{Pb}(\text{n}, \gamma)^{207}\text{Pb}(\text{n}, \gamma)^{208}\text{Pb}(\text{n}, \gamma)^{209}\text{Pb}(\beta^-)^{209}\text{Bi}(\text{n}, \gamma)^{210}\text{Bi}(\beta^-)^{210}\text{Po}(\alpha)^{206}\text{Pb}$. 因此, 比铋更重的核素只能通过其他过程, 如快中子俘获r-过程来产生. 为了确

图5 重核的麦克斯韦平均中子俘获截面($kT=30\text{ keV}$)^[19]Figure 5 Maxwellian-averaged neutron capture cross sections of heavy nuclides for $kT=30\text{ keV}$ ^[19]

定发生s-过程的天体场所的物理环境(如温度和密度、中子密度和照射量等), 目前还需要精确的中子俘获反应和中子源反应的反应截面、关键核素衰变等实验数据. 从另一个角度讲, 利用天文观测数据结合精确的核物理输入量就可以更好地约束天体物理模型.

2.2 快中子俘获r-过程(超新星和中子星并合)

宇宙中大部分超铁元素被普遍认为是在快中子俘获r-过程中产生的^[11]. r-过程发生的最可能天体物理场所是II型超新星(type II supernovae)或者是双中子星并合(neutron star merger). 目前, 尽管科学界还不能确定快中子俘获过程发生的确切天体场所, 但普遍认为快中子俘获过程应该产生了宇宙中约1/2的从铁到铯的元素以及原子量大于209的全部元素.

图1给出了部分理论预言的快中子俘获路径. r-过程以铁为起始物质通过连续快中子俘获反应生成富中子重核素, 持续时间为数秒. 目前认为, 质量数 $A>209$ 的全部核素都是由r-过程合成的. r-过程由于生成的重核发生裂变而截止, 一般认为截止点在质量数 A 为260附近. r-过程的路径在丰中子核区, 那些中子数为50, 82和126幻数附近的丰中子核素对核反应路径、时间标度和核燃烧灰烬中元素丰度分布影响最大. 例如, 理论模拟显示 ^{78}Ni , ^{122}Zr 和 ^{132}Sn 周围的核素性质对r-过程影响极大. 在这些核区, 壳效应的减弱或新闭壳的形成是影响r-过程的最重要因素. 理论预言的位于快中子俘获路径上的大多数核素是未知的, 缺乏系统的质量和寿命实验数据; 对于那些已知

的核素,实验数据的精度也整体较差,不能满足天体网络计算的要求.为了模拟超新星爆中的核合成过程、确定快中子俘获路径、获得核燃烧灰烬中超铁元素的丰度,进而探索宇宙中从铁到铀元素的来源,目前还需要精确测量丰中子核的质量(特别是那些中子数在50, 82和126幻数附近的)、 r -过程关键核素的寿命、中子俘获反应率、 β 延迟中子发射分支比以及重核的裂变性质等核物理输入量.

超新星(type II supernovae): 某些恒星在演化接近末期时经历的一种剧烈爆炸.对于大质量恒星,如相当于太阳8~20倍质量的恒星,在它们演化的后期,当硅燃烧产物 ^{56}Fe 积攒到一定程度时会发生超级大爆炸,伴随有异常耀眼的光芒,这就是超新星爆.超新星爆发时的绝对光度超过太阳光度的100亿倍、中心温度可达100亿摄氏度,输出的能量高达 10^{43} J,相当于太阳在它长达100亿年的主序星阶段输出能量的总和.在爆炸过程中,超新星的星核和星壳彻底分离,在星核中发生剧烈核反应并最终演变为中子星或黑洞;星壳高速向外膨胀.在超新星爆中,以铁或镍为种子核,通过连续快中子俘获反应生成富中子的重核素,这些丰中子核素通过复杂的 β 衰变和/或 β 缓发中子级联衰变最终生成重元素.超新星爆将大部分物质以高达1/10的光速向外抛散,为宇宙中其他恒星、星系乃至生命的形成提供了物质基础,如人体血液中的铁元素和太阳系的构成物质主要来源于数次超新星爆发的产物.借助于天文望远镜,人们在银河系和许多河外星系中观测到约数百颗的超新星.例如,1987年2月23日发现的SN 1987A超新星是天文学上最重大的事件之一,在几个月时间内,这颗超新星一直光彩夺目,亮度相当于1亿颗太阳. SN 1987A超新星距离地球约16.8万光年,位于大麦哲伦云中,估计爆发过程中抛射出了20000倍地球质量的铁元素.日本物理学家小柴·昌俊(Masatoshi Koshiba)在神冈地下实验室成功截获到爆炸释放的11个中微子事件,这是人类首次探测到来自太阳系以外的中微子,因此获得2002年的诺贝尔奖物理学奖.从此,开启了中微子天文学的序幕.

双中子星并合(neutron star merger). 两颗中子星围绕共同的中心旋转,就构成了一个双中子星系统.它们在旋转过程中会不断释放引力波,导致系统的能量降低,轨道缩小,并最终撞在一起,发生并合.以宇宙中的重元素金为例,根据天体物理学家的计

算,当两个中子星撞在一起时,既足以产生金,又能把金抛洒出去让微乎其微的一小部分最终流落到地球上.不过有一个问题:过去人们从来没有真的观测到两颗中子星撞在一起.没有直接观测结果,上述图像只是猜测,无从验证模型的可靠性.北京时间2017年10月16日,激光干涉引力波天文台(laser interferometer gravitational wave observatory, LIGO)执行主任大卫·莱兹(David Reitze)宣布, LIGO和欧洲意大利的Virgo引力波天文台于2017年8月17日首次发现了一种前所未有的新型引力波事件.在NGC 4993星系观测到了第一例双中子星并合现象.由于国际天文学界在第一时间公布了星系的方位,在全世界众多天文学家及探测设备的协同努力之下,发现了该引力波事件的电磁对应体.全世界的天文学家都沸腾了,全世界的望远镜都在同一时间指向了同一个方向:那席卷1.3亿光年的时空演化狂澜的源头.人们观测到了首例双中子星并合事件.第一次,人类不仅“听”到了引力波的“声音”,还实时地“看”到了与引力波相伴的电磁对应体.根据模型估算,这样的一次相撞,应该能产生300个地球那么重的黄金;地球上的大部分贵金属有可能都是很久以前这样的并合过程带来的.研究者预测这种相撞还会产生巨量放射性元素,它们的衰变将在短时间内发出大量的光,亮度应该能达到新星的1000倍左右,因此,这个相撞现象又被称为“千新星”(Kilonova).数据显示这个天体系统的质量估计为1.1~1.6倍太阳质量,恰好是中子星的质量范围.全世界众多望远镜共同见证了双中子星并合,自此,多信使天文学时代正式开启.从初步的观测结果来看,此次中子星并合事件确实产生了大量超铁元素(特别是镧系元素).目前,中子星并合模型在解释超铁元素丰度时还存在一些不确定性^[20],需要进一步的完善.预期在不远的将来,利用更精确的天文观测结果、更可靠的核物理输入以及更真实的天体物理模型,可以较真实地模拟中子星并合过程所产生的超铁元素.

2.3 光致解离p-过程(超新星)

在天体物理元素起源(核合成)上,术语“p-过程”(p-process, p最初指代质子)在科学文献里有两方面的含义.最初,它是指一个质子的俘获过程^[15,21],负责从硒到汞丰质子核素的合成,这些丰质子稳定同位素被称之为p-核.尽管最初建议的质子俘获过

程不能很好地解释这些核的起源,但是后来,这一术语通常指任何能够产生p-核的核合成过程^[12].经典的35个p-核在核素图上的位置如图6所示.目前,人们对宇宙中p-核的天体物理起源还没有完全理解.现有的研究表明,这些核可能主要是由超新星爆中的光致解离p-过程或称光核反应(或更形象地称为 γ -过程)以及最近提出的vp-过程(参见2.4节的具体阐述)产生的.

在当前比较成功的天体模型中,认为p-过程发生在核心坍缩的II型超新星(core-collapse supernovae, CCSN)的O-Ne壳层,或者Ia型超新星的碳氧白矮星的热核爆炸中.典型的天体温度约在2~3 GK,由于光子数目与温度的四次方成正比,此时先前存在的丰中子核素(在s-或r-过程产生的)其实已经被“浸泡”在高能光子中,光致解离将在核合成中起主导作用.这些p-核就可以通过光致解离 γ -过程以及(p, γ)俘获过程产生.这里, γ -过程包括(γ , n), (γ , p)以及(γ , α)反应.然而,这一模型还不能很好地解释一些较轻的p-核,包括^{92,94}Mo和^{96,98}Ru的产生^[22-26].对于p-核区,核物理输入量主要依赖于统计Hauser-Feshbach模型计算,实验数据很少.

2.4 中微子质子vp-过程(超新星)

20年前,Fröhlich等人^[13,14]提出了一种新的核合成过程,即中微子质子过程(vp-过程),它能够显著地改善上述p-过程模型所遇到的困难.该过程与文献[27,28]中所说的“中微子诱发的快质子俘获过程(rp-过程^[6-9])”是相同的过程.在CCSN早期中微子驱动的星风(neutrino-driven wind, NDW)中,反电子中微子($\bar{\nu}_e$)俘获丰质子物质中的自由质子产生微量的自由中子,即发生 $p(\bar{\nu}_e, e^+)n$ 反应.这些中子立即诱发电荷交换(n, p)反应,还有一部分在种子核⁵⁶Ni及随后产生的重核上发生中子俘获(n, γ)反应.这些自由中子的寿命只有几毫秒,远小于星风的膨胀时间尺度以及这些重核的 β^+ 衰变半衰期.核流(nuclear flow)将以质子和中子俘获的组合方式向前行进.在经典的rp-过程中, β^+ 衰变取代了上述中子俘获的角色.vp-过程与经典的rp-过程^[6]非常相似,但是vp-过程始于种子核⁵⁶Ni,而不是经典rp-过程路径上的第一个等待点核⁶⁴Ge.种子核⁵⁶Ni是在初始高温阶段(~4 GK)的原子核准平衡(quasi-equilibrium, QSE)状态下通过组装自由核子产生的.因此, vp-过程是一个

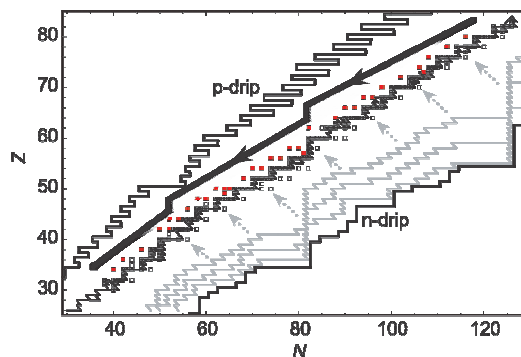


图6 (网络版彩色)相关核素图表. 实心方框表示经典p-核^[12]

Figure 6 (Color online) Part of nuclide chart relevant to p-nuclei. The p-nuclei are represented by the filled squares^[12]

主要过程(primary process),它不需要业已存在的种子.当温度降低到~3 GK时, vp-过程就开始了^[29].另外,不像快中子俘获r-过程, vp-过程不是由于自由质子的耗尽而终结的,而是由于温度的降低结束的(1.5 GK定义为vp-过程的结束^[29]).在温度小于1.5 GK时,质子俘获由于库仑位垒的影响而变慢,这样vp-过程结束时,将是非质子物质的冻结(freeze-out).

最近所有对核心坍缩超新星CCSN动力学(考虑中微子输运)的研究都建议早期超新星喷出物的大部分是丰质子的^[30-35].这支持了vp-过程可能发生在上述NDW中的结论.但是,不同的理论工作给出了略微不同的结果:Fröhlich等人^[13]的工作表明一维任意诱发爆炸模型(20倍太阳质量)能够产生直到A~80的p-核;Pruet等人^[27]的二维任意诱发爆炸模型(15倍太阳质量)可以得到A~100的p-核;Wanajo等人^[29]的工作表明, vp-过程对直到A=152的p-核产生都有非常大的贡献.这些不同的理论模型结果说明, vp-过程对于NDW的物理条件及其相关核反应的不确定性非常灵敏.在上述理论研究中^[29],除了超新星环境条件不同之外,一些关键核反应的反应率也存在着非常大的不确定性:(1) 相关(n, p)反应的反应率,因为在发现vp-过程之前,对丰质子核的(n, p)反应还不太感兴趣,尚无实验数据.特别是⁵⁶Ni(n, p)⁵⁶Co, ⁶⁰Zn(n, p)⁶⁰Cu和⁶⁴Ge(n, p)⁶⁴Ga的反应率对预言p-核的丰度非常灵敏;(2) pp链核区突破出来的一些关键核反应会影响vp-初始时的质子-种子比.由于vp-过程中的种子核是由自由核子直接形成的(即前述的主要过程),这样3 α 过程和一些相关的从pp链核区(A<12)突破出来的两体反应⁷Be(α , γ)¹¹C和¹⁰B(α , p)¹³C将在vp-过程中扮演非常重要的角色.因此,在实验上确定这些关

键核反应的反应率,对于深入理解太阳系中p-核的形成以及超新星爆发的物理过程具有重要意义。

3 国内外研究进展和趋势

3.1 地面实验室

最近几十年来,在美国1996, 2002, 2007, 2015年的核科学长期规划(<https://science.energy.gov/np/nsac/>)和2004, 2010年的欧洲科学基金专家委员会NuPECC长期规划(<http://www.nupecc.org/index.php?display=pub/publications>)中,都把核天体物理作为最重要的研究方向之一。在重要科学和技术目标的牵引下,世界科技强国正在建设大型重离子加速器研究装置,如德国的反质子和离子研究装置(facility for antiproton and ion research, FAIR)、美国的稀有同位素束流装置(facility for rare-isotope beams, FRIB)以及法国的在线放射性离子产生系统(système de production d'ions radioactifs en ligne-2, SPIRAL2)等。另外,日本理化学研究所建造的放射性束工厂(radioactive ion beam factory, RIBF)以及韩国正在建造的稀有同位素科学项目(rare isotope science project, RISP),也都把核天体物理作为非常重要的研究课题。特别地,借助于美国的FRIB装置提供的非常强的放射性束流以及先进的探测手段,可以直接测量s-, r-以及rp-过程中关键核反应的反应率以及一些核素的性质,为研究新星、X射线暴、超新星、中子星及其并合等重要科学问题提供实验数据。FRIB旨在取得世界核天体物理研究的领导者地位。另外,在德国FAIR大装置中有一个ILIMA (isomeric beams, lifetimes and masses collaboration)合作计划,预期将对核素图上大部分的不稳定核素的质量和寿命进行测量,甚至可以到达快中子俘获r-过程路径上 ^{208}Pb 核区的等待点核。

在国内,正在运行的主要有两个大型的重离子加速器装置:一个是中国科学院近代物理研究所建造的兰州重离子加速器-冷却储存环装置(heavy ion research facility of Lanzhou-cooling storage ring, HIRFL-CSR),另一个是中国原子能科学研究院的北京HI-13串列加速器装置。目前,拟建造的另外两个大装置是中国科学院近代物理研究所将要在惠州建造的“十二五”强流重离子大科学装置(high intensity heavy-ion accelerator facility, HIAF)以及中国原子能科学研究院和北京大学联合提出的“十三五”北京在线同位素分离丰中子束流装置(Beijing isotope-sepa-

ration-on-line neutron-rich beam facility, BISOL)。中国的这些大科学装置,也都将核天体物理中的关键科学问题——“宇宙中超铁元素的起源”作为重要的研究方向,写入了中国的核物理发展规划^[36,37]。

2018年HIAF装置将在广东惠州开工建设,建成后将是世界上最先进的重离子科学综合研究装置之一,为核天体物理基础研究创造国际领先水平的条件。依托HIAF,通过中高能弹核碎裂反应产生远离稳定线原子核,以利用储存环技术精确系统测量原子核质量,特别是那些位于天体核合成路径上关键核素质量为重点,并基于熔合蒸发反应、转移反应、敲出反应、库仑离解、弹性散射和非弹性散射,通过伽玛、带电离子和中子的关联测量,系统获取弱束缚原子核结构和它们参与的核反应数据。通过天体网络计算模拟重元素合成的过程、时间标度、物理环境和天体场所,探索宇宙中从铁到铀重元素形成的重大科学问题。另外,北京ISOL项目已经列入国家重大科技基础设施“十三五”规划。该装置的基本功能是:采用反应堆和强流加速器以及在线同位素分离(isotope-separator-on-line, ISOL)和弹核碎裂(projectile fragmentation, PF)相结合的方法,产生高强度的丰中子核束;用强流氘束打靶产生能量为1~20 MeV强流中子。该装置对于开展原子核稳定极限区新物理、超重稳定岛核素合成、铁以上重元素的天体合成等重大基础科学前沿研究具有重要意义。另外,中国科学院上海应用物理研究所基于新一代同步辐射装置的上海激光电子伽玛源(Shanghai laser electron gamma source, SLEGS)已经开始建设,它将可以产生能量为0.4~20 MeV的伽玛光,并且具有高通量、准单色、能量连续可调等特点。未来SLEGS将成为开展天体p-过程光核反应等研究的重要实验平台。

3.2 深地实验室

在恒星平稳的氢、氦核燃烧过程中,很多天体核反应发生在非常低的伽莫夫峰(Gamow peak)能量附近,约几十到几百keV,远低于库仑位垒(几个MeV)。在伽莫夫峰附近核反应截面小到只有pico到femto靶恩甚至更低。在地面实验室条件下,由于宇宙射线的影响造成了探测器的信噪比太小甚至全部被噪声淹没,因此无法对反应截面进行精确测量。尽管也存在一些伽莫夫能量高一些的天体核反应,但是对于其中许多重要的核反应,至今尚未把测量的能量推到伽莫

夫窗口. 这些研究都需要在一个可以有效屏蔽宇宙射线的地下实验室环境中进行. 几十年来一直致力于对这些低能核反应截面的直接实验测量上, 而地下实验室将为这些低能天体核反应的研究提供绝佳的环境.

目前, 国际上只有意大利Gran Sasso的LUNA (laboratory for underground nuclear astrophysics)实验室正在开展天体物理相关核反应截面方面的测量工作. 由于实验室位于1400 m岩石的下面, 因此可以降低约一百万倍宇宙射线对于实验测量的影响, 同时与地上的实验室比较, 热中子流的影响也会减少1000倍. LUNA的测量结果表明, 通过进入地下以及利用低本底测量技术手段, 使核反应截面在低能伽莫夫能区的测量成为可能, 同时也表明反应截面的直接测量大大降低了由间接方法或者外推方法所得结果的不确定性^[38]. 在2004年, 作为重要的里程碑, 欧洲NuPECC建议优先建设并升级LUNA地下加速器实验室, 以确保欧洲在该领域的领导地位. 目前正在进行的LUNA-MV升级项目(2015~2019年)将安装一个紧凑、高流强、3.5 MV的加速器用来研究恒星氦燃烧过程中的关键核反应. 在2007年美国的《核科学前沿》中有一个重要的建议, 在南达科他州的霍姆斯特克(Homeslake)的金矿里建造地下的科学和工程实验室DUSEL (the deep underground science and engineering laboratory), 以保持美国在核心研究领域的领导地位. DUSEL大科学工程明确提出了核天体物理DIANA (dual ion accelerators for nuclear astrophysics)项目. 然而, DUSEL项目由于各种原因目前尚未得到资金支持. 目前, 在美国圣母大学Wiescher教授领导的一个小型CASPAR (compact accelerator system for performing astrophysical research)项目中, 将一个比较老的静电加速器(0.1~1 MV)和射频源放到1400 m的地下, 能够提供约0.1 mA的He束流, 主要开展天体(α , n)和(p, γ)核反应截面的直接测量.

目前, 国际上的核天体反应研究还主要基于地面实验室开展, 正在运行的地下实验装置只有意大利Gran Sasso的LUNA. 这为我国在该领域进入国际主流前沿提供了机遇. 根据对国内外研究动向的分析和研究, 中国核天体物理学家提出了在四川锦屏深地实验室(China Jinping underground laboratory, CJPL)建造深地核天体物理研究装置的构想. 中国锦屏地下实验室(CJPL)覆盖岩层厚达2400多米, 居世界之首^[39]. 宇宙射线通量比意大利Gran Sasso地下

LUNA实验室还要低约100倍^[40]. 目前, 清华大学和上海交通大学已在锦屏山建立了两个小型深地实验室, 用于探寻暗物质的实验项目(I期). 锦屏II期已于2015年新建8个实验洞用于开展多学科深地科学研究. 其中, 1个实验洞将建设锦屏深地核天体物理实验室JUNA(Jinping underground laboratory for nuclear astrophysics)^[41]. 目前, 在由中国原子能科学研究院牵头的国家自然科学基金重大项目“基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究”已于2015年启动, 目前参与的单位有中国科学院近代物理研究所和国家天文台、清华大学、四川大学以及上海交通大学等. 2017年已经完成了加速器和探测器的研制工作, 2018~2019年完成实验洞的全部基础建设工作, 预计2019年底将完成加速器等设施的搬入、安装及调试工作, 2020年初开始具备开展相关的科学实验研究的条件. 在锦屏JUNA的I期项目里, 4个物理实验课题分别是: (1) 星体演化关键核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的直接测量(被誉为核天体物理“圣杯”反应^[42]); (2) 天体物理能区关键中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 的直接测量(慢中子俘获s-过程主要中子源反应); (3) 直接测量AGB星中关键核反应 $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$ 在伽莫夫能区的反应截面(AGB星氟丰度及重核合成相关); (4) $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$ 等重要(p, γ)反应的直接测量(星际 ^{26}Al 问题相关). 其中, 课题(1)~(3)是与宇宙中重元素产生直接相关的. 目前, JUNA项目已联合美国的圣母大学和明尼苏达大学、日本的大阪大学和东京大学、澳大利亚的蒙纳什大学以及匈牙利科学院的知名科学, 组建了一支高水平的国际合作团队.

4 前景与展望

核天体物理是国际前沿的交叉学科, 涵盖天体物理、天文、核物理、粒子物理、等离子体物理等. 目前, 还存在许多挑战性的科学问题, 但同时面临着重要突破. 我国具有人才、学科、平台的良好基础, 未来需要瞄准核天体物理关键科学问题, 集聚我国核天体物理研究精英, 优势互补, 强强联合, 实现跨学科的深度交叉融合. 基于中国原子能科学研究院、中国科学院近代物理研究所和国家天文台等单位的大科学研究装置, 结合国际合作, 开展直接和间接、地面和深地的核天体物理实验和理论研究工作. 将核物理实验结果、核天体物理模型计算和天文观测数据相结合, 为解决宇宙中超铁元素的来源问题等做出

重要贡献。同时，打造一支国际一流的核天体物理创新研究团队。

瞄准以下国际公认的核天体物理关键科学前沿领域开展研究工作，特别是与宇宙重元素起源相关的：(1) 恒星平稳演化阶段最重要的热核反应在天体物理能区的直接测量；(2) 爆发性r-过程和rp-过程路径上关键核素质量、寿命及共振态性质的测量；(3) 平稳核燃烧s-过程和爆发性r-过程及rp-过程关键核反应截面的间接测量；(4) 核天体物理反应和衰变性质的理论研究、数据库和网络方程的建立；(5) 天体元素丰度的观测研究以及星际X和 γ 射线等的卫星观测。实现天文观测、天体物理、核物理的深度交叉。同时，开拓锦屏深地实验室核天体物理测量新方向，在

2020年前后建成国际领先的核天体物理深地实验室，取得国际公认的创新性研究成果。

国家自然科学基金委数理科学优先支持的领域涵盖了核天体物理方面的研究内容，例如，《极端条件下的核物理和核天体物理》以及国家自然科学基金重大项目《基于锦屏深地实验室的核天体物理关键科学问题研究》等。科学技术部在2000年启动的国家重点基础研究发展计划(973计划)里就已经涵盖了核天体物理；2016年启动的《大科学装置前沿研究重点专项》专门支持了《天体环境中关键核过程研究》项目。在国家自然科学基金委员会、科学技术部以及其他部委基金的有力支持下，我国的核天体物理研究必将跨入一个新的发展时代。

参考文献

- 1 Cyburt R H, Fields B D, Olive K A, et al. Big bang nucleosynthesis: Present status. *Rev Mod Phys*, 2016, 88: 015004
- 2 Smith M S, Rehm K E. Nuclear astrophysics measurements with radioactive beams. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2001, 51: 91–130
- 3 Rolfs C E, Rodney W S. *Cauldrons in the Cosmos: Nuclear Astrophysics*. Chicago: University of Chicago Press, 1988
- 4 Adelberger E G, Austin S M, Bahcall J N, et al. Solar fusion cross sections. *Rev Mod Phys*, 1998, 70: 1265–1291
- 5 Adelberger E G, García A, Robertson R G H, et al. Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 195–245
- 6 Wallace R K, Woosley S E. Explosive hydrogen burning. *Astrophys J Suppl Ser*, 1981, 45: 389–420
- 7 Champagne A E, Wiescher M. Explosive hydrogen burning. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1992, 42: 39–76
- 8 Wiescher M, Schatz H, Champagne A E. Reactions with radioactive beams and explosive nucleosynthesis. *Phil Trans R Soc Lond A*, 1998, 356: 2105–2136
- 9 Schatz H, Aprahamian A, Görres J, et al. rp-process nucleosynthesis at extreme temperature and density conditions. *Phys Rep*, 1998, 294: 167–263
- 10 Käppeler F, Gallino R, Bisterzo S, et al. The s-process: Nuclear physics, stellar models, and observations. *Rev Mod Phys*, 2011, 83: 157–193
- 11 Arnould M, Goriely S, Takahashi K. The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries. *Phys Rep*, 2007, 450: 97–213
- 12 Arnould M, Goriely S. The p-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics status. *Phys Rep*, 2003, 384: 1–84
- 13 Fröhlich C, Hauser P, Liebendörfer, et al. Composition of the innermost core-collapse supernova Ejecta. *Astrophys J*, 2006, 637: 415–426
- 14 Fröhlich C, Martínez-Pinedo G, Liebendörfer M, et al. Neutrino-induced nucleosynthesis of $A > 64$ nuclei: The vp process. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 142502
- 15 Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. Synthesis of the elements in stars. *Rev Mod Phys*, 1957, 29: 547–654
- 16 Haseltine E. The 11 greatest unanswered questions of physics. *Discovery*, 2002, 23: 37
- 17 Jones S, Ritter C, Herwig F, et al. H ingestion into He-burning convection zones in super-AGB stellar models as a potential site for intermediate neutron-density nucleosynthesis. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 455: 3848–3863
- 18 Hampel M, Stancliffe R J, Lugaro M, et al. The intermediate neutron-capture process and carbon-enhanced metal-poor stars. *Astrophys J*, 2016, 831: 171
- 19 Bao Z Y, Beer H, Käppeler F, et al. Neutron cross sections for nucleosynthesis studies. *Data Nucl Data Tabl*, 2000, 76: 70–154
- 20 Thielemann F K, Eichler M, Panov I V, et al. Neutron star mergers and nucleosynthesis of heavy elements. *Ann Rev Nucl Part Sci*, 2017, 67: 253–274
- 21 Cameron A G W. Nuclear reactions in stars and nucleosynthesis. *Publ Astron Soc Pac*, 1957, 69: 201–222

- 22 Woosley S E, Howard W M. The p-process in supernovae. *Astrophys J Suppl Ser*, 1978, 36: 285–304
- 23 Prantzos N, Hashimoto M, Rayet M, et al. The p-process in SN 1987 A. *Astron Astrophys*, 1990, 238: 455–461
- 24 Rayet M, Arnould M, Hashimoto M, et al. The p-process in type II supernovae. *Astron Astrophys*, 1995, 298: 517–527
- 25 Rauscher T, Heger A, Hoffman R D, et al. Nucleosynthesis in massive stars with improved nuclear and stellar physics. *Astrophys J*, 2002, 576: 323–348
- 26 Hayakawa T, Iwamoto N, Kajino T, et al. Empirical abundance scaling laws and implications for the gamma process in core-collapse supernovae. *Astrophys J*, 2008, 685: 1089–1102
- 27 Pruet J, Hoffman R D, Woosley S E, et al. Nucleosynthesis in early supernova winds. II. The role of neutrinos. *Astrophys J*, 2006, 644: 1028–1039
- 28 Wanajo S. The rp-process in neutrino-driven winds. *Astrophys J*, 2006, 647: 1323–1340
- 29 Wanajo S, Janka H T, Kubono S. Uncertainties in the vp-process: Supernova dynamics versus nuclear physics. *Astrophys J*, 2011, 729: 46–57
- 30 Janka H T, Buras R, Rampp M. The mechanism of core-collapse supernovae and the ejection of heavy elements. *Nucl Phys A*, 2003, 718: 269c–276c
- 31 Liebendörfer M, Mezzacappa A, Messer E B, et al. The neutrino signal in stellar core collapse and postbounce evolution. *Nucl Phys A*, 2003, 719: 144c–152c
- 32 Buras R, Rampp M, Janka H T, et al. Two-dimensional hydrodynamic core-collapse supernova simulations with spectral neutrino transport. *Astron Astrophys*, 2006, 447: 1049–1092
- 33 Kitaura F S, Janka H T, Hillebrandt W. Explosion of O-Ne-Mg cores, the crab supernova, and subluminescent type II-p supernovae. *Astron Astrophys*, 2006, 450: 345–350
- 34 Fischer T, Whitehouse S C, Mezzacappa A, et al. Protoneutron star evolution and the neutrino-driven wind in general relativistic neutrino radiation hydrodynamics simulations. *Astron Astrophys*, 2010, 517: A80
- 35 Hudepohl L, Müller B, Janka H T, et al. Neutrino signal of electron-capture supernovae from core collapse to cooling. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 251101
- 36 国家自然科学基金委员会. 未来 10 年中国学科发展战略·物理学. 北京: 科学出版社, 2012 [National Natural Science Foundation of China. Chinese Discipline Development Strategy in the Next 10 Years: Physics. Beijing: Science China Press, 2012]
- 37 核物理与等离子体物理发展战略研究编写组. 核物理与等离子体物理——学科前沿及发展战略. 北京: 科学出版社, 2017 [Compiling Group for the Development Strategy of Nuclear Physics and Plasma Physics. Nuclear Physics and Plasma Physics-Frontiers of the Discipline and Development Strategies. Beijing: Science China Press, 2017]
- 38 Broggini C, Bemmerer D, Guglielmetti A, et al. LUNA: Nuclear astrophysics deep underground. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2010, 60: 53–73
- 39 Normile D. China supersedes its underground physics lab. *Science*, 2014, 346: 1041
- 40 Wu Y C, Hao X Q, Yue Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in the China Jinping underground laboratory. *Chin Phys C*, 2013, 37: 086001
- 41 Liu W P, Li Z H, He J J, et al. Progress of Jinping underground laboratory for nuclear astrophysics (JUNA). *Sci China-Phys Mech Astron*, 2016, 59: 642001
- 42 Deboer R J, Görres J, Wiescher M, et al. The $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ reaction and its implications for stellar helium burning. *Rev Mod Phys*, 2017, 89: 035007



何建军

博士, 中国科学院国家天文台首席研究员, 光学天文部/核天体物理研究团组负责人, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”入选者. 2001 年中国科学院近代物理研究所获理学博士学位, 2002~2006 年在日本东京大学做日本学术振兴会特别研究员(Japan Society for the Promotion of Science, JSPS)博士后研究工作, 2006~2008 年在英国爱丁堡大学做博士后研究. 2008~2016 年受聘中国科学院近代物理研究所做中国科学院“百人计划”研究员, 核天体物理研究组组长. 主要的研究方向包括国内低能核反应直接测量、宇宙大爆炸锂问题及 X 射线暴关键核反应等.

Summary for “宇宙中铁以上的重核是如何合成的?”

How were the heavy chemical elements beyond iron made in the Universe?

Jianjun He^{1*}, Bing Guo², Weiping Liu² & Gang Zhao¹

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

² China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

* Corresponding author, E-mail: hejianjun@nao.cas.cn

Nuclear astrophysics, which is an interdisciplinary branch of nuclear physics (micro scale) and astrophysics (macro scale), addresses some of the most compelling questions in the universe. Research efforts have been devoted to many topics such as the origins of the chemical elements, the unique conditions of earth that makes life possible, and the formation and evolution of the sun, stars, and galaxies. Nuclear processes play an extremely important role in cosmic evolution after the Big Bang, and they are the only known mechanisms that synthesize heavy elements, in addition to providing the energy for stars to resist the force of gravity.

Over the past 50 years, scientists have developed a deep understanding of Big-Bang primordial nucleosynthesis and the mechanisms for synthesizing heavy elements. However, the astrophysical models have yet to adequately reproduce the observed solar abundances of those elements beyond iron (referred to as ultra-iron elements). It is widely believed that these ultra-iron elements were primarily synthesized via the slow neutron capture process (s-process) and the fast neutron capture process (r-process). The fundamental s-process component is thought to originate from thermally pulsing low-mass AGB stars, with reaction pathways closed after the stable nuclides. About half of the heavy elements (up to bismuth) were produced via the s-process. The r-process is thought to occur in the explosive burning of core-collapse supernova and/or neutron-star mergers. Although the r-process site remains a mystery, experts believe that more than half of the ultra-iron elements (up to thorium and uranium) were produced via the r-process. In addition, there are 35 neutron-deficient stable isotopes, which are present in significantly less abundance in our solar system. These so-called p-nuclei are likely produced in Type II supernova, through the photo-dissociation (referred to as p-process or r-process) of existing s- or r-process seeds, or through the recently proposed neutrino-proton vp-process.

Astrophysical models require a huge amount of nuclear-physics input data. The most essential data include nuclear mass, structure, decay and fission characteristics, and related nuclide cross-sections along the various nucleosynthesis paths. Thus far, the lack of systematic and precise nuclear inputs is one of the main reasons scientists have not been able to reproduce the observed solar abundances of ultra-iron elements. Published by *Discover* magazine in 2002, the American National Research Council ranked the question, “how were the heavy elements from iron to uranium made?” as one of the *11 Greatest Unanswered Questions of Physics in this Century*. More complete and precise nuclear physics inputs are therefore urgently needed to improve astrophysical models and decode the observations.

This paper introduces the most important nucleosynthesis processes that are responsible for the ultra-iron elements production in the universe, while also summarizing the relevant key nuclear-physics inputs required in the astrophysical models. Finally, the frontier in this field study includes the origins of ultra-iron elements, and the future of nuclear astrophysics research in China is examined.

nuclear astrophysics, ultra-iron elements, nuclear reaction, nucleosynthesis, abundance observation

doi: 10.1360/N972017-01368