

宇宙中元素的起源*

唐晓东[†] 李阔昂

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2019-09-16收到

[†] email: xtang@impcas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20191002

Origin of the elements in the universe

TANG Xiao-Dong[†] LI Kuo-Ang

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

摘要 宇宙中绝大部分锂以及所有比锂重的元素都是通过星体内部核过程产生。文章简要介绍这些核合成过程及其发生的天体物理场所以及重元素起源, 深地核天体物理实验等相关前沿研究。

关键词 核合成过程, 中子俘获过程, 放射性核素装置, 深地核天体物理实验

Abstract Most of the lithium and all the elements heavier than lithium in the universe are created by nuclear processes happening in stars. In this paper, nucleosynthesis at these astrophysical sites is briefly reviewed. Some frontier topics, such as the nucleosynthesis of heavy elements from iron to uranium and deep underground nuclear astrophysics experiments, are also discussed.

Keywords nucleosynthesis, neutron capture process, radioactive beam facility, deep underground nuclear astrophysics experiment

1 简介

宇宙中元素的起源是最基本的科学问题之一。根据现代宇宙学理论, 宇宙起源于大爆炸。宇宙大爆炸合成了一些轻元素: 根据大爆炸核合成理论, 在大爆炸发生数百秒内, 质子和中子合成了氢、氦及极少量锂。大爆炸核合成理论对宇宙中轻核素丰度(除了锂)的预言和观测数据非常吻合。大爆炸核合成的结果是使早期宇宙中的可见物质含有约75%的氢(主要是质子)、约25%的氦(主要是⁴He)和极少量的锂(几乎都是⁷Li)。那么接下来的疑问便是宇宙如何从一个仅有氢、氦和少数锂的世界演化至现在这个以80多种元素化学多样性作为行星和生命的基本组成单元的世界?

1957年, Burbidge夫妇、Fowler和Hoyle以及Cameron基于当时的原子核结构和反应理论, 非常有限的实验数据以及太阳系同位素丰度数据, 提出了由恒星燃烧过程、慢速中子俘获(s-过程)、快速中子俘获(r-过程)等过程组成的太阳系元素的起源理论(B²FH理论)^[1-3]。正是这些星体内部的核过程(图1和图2), 经成千上万次星体演化, 逐步将大爆炸产生的原初氢和氦合成为我们今天太阳系中从氢到铋的83种元素和长寿命的钍和铀, 从而将大爆炸后简单单调的宇宙变成今天我们身边的这个色彩斑斓的世界。大半世纪后的今天, 来自天文观测、核物理理论和实验、天体物理模型三个研究领域的科学家还在不断地改进、拓展和完善B²FH理论, 探索宇宙中的元素起源。

本文简要介绍产生这些元素的核过程及其发生场所, 以及相关的部分前沿研究。2019年是门

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2016YFA0400501)、国家自然科学基金(批准号: 11490564)资助项目

捷列夫周期表创立150周年，也是B²FH理论创立者之一Margret Burbidge 100岁。谨以本文向先驱们致敬。

2 从氢到铁的元素起源

恒星被称为引力约束的聚变反应堆。在强大的引力作用下，这些大爆炸原初物质聚集起来。在大爆炸4亿年后，宇宙中出现了第一代恒星。来自于引力的能量将星体核心物质的温度和密度升高，使恒星内部核反应堆点火，开始通过聚变反应产生核能，开始了恒星的平稳燃烧过程^[1-4]。首先发生的核过程是氢燃烧。这个过程的结果是将4个质子合成为1个⁴He，并产生两个正电

子和两个中微子，同时伴随着能量释放。核能驱动的光压与引力平衡，使恒星达到稳态。由于这个过程的主要产物是⁴He，所以此时的恒星还不能为宇宙有效地产生新的元素。当恒星燃烧完其核心内部所有的氢，主要留下的产物是⁴He。核心内部的核反应堆暂时停止，不再产生核能，恒星外的壳层仍然进行氢燃烧。引力将核心压缩，导致核心的温度及密度进一步上升，直至点燃氢燃烧。氢燃烧有两个重要反应： 3α 过程和 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 。氢燃烧的主要产物是¹²C和¹⁶O。 3α 过程分两步进行：首先两个 α 粒子形成非常短寿命的⁸Be(寿命约为 10^{-16} s)。绝大部分⁸Be衰变成两个 α 粒子，仅有其中极少数⁸Be有机会捕获另一个 α 粒子，通过著名的Hoyle共振态形成¹²C；然后部分¹²C俘获 α 粒子，产生¹⁶O。当核心的氦耗尽后，恒星内部形成碳氧核心。这是宇宙第一次通过恒星核合成产生原初大爆炸所不能产生的新元素。因此，这个过程在宇宙元素演化过程中有着极其重要的意义。如同前面的氢燃烧，当核心停止氢燃烧，其外壳层仍然进行着氢燃烧和氦燃烧，并不停地将外壳层产物抛洒到太空中，形成星际物质。此时的恒星被称为AGB星，是下面介绍的重元素合成(s-过程：慢速中子俘获过程)的一个重要场所。如果恒星质量小于(大约)8个太阳质量，恒星将其外壳层的物质抛完，在太空中留下一个由碳和氧形成的白矮星。抛洒物质形成行星状星云，成为星际物质。如果恒星质量大于(大约)8个太阳质量而小于(大约)10个太阳质量，引力可以点燃核心中的碳，通过碳碳熔合及一系列次级反应，合成氦。最终这个恒星终止其燃烧过程，留下一个氦和氧形成的白矮星及行星状星云。这些以白矮星为生命终点的恒星称为中小质量恒星。如果恒星的质量大于10个太阳质量，这些恒星可以形成中子星或黑洞，被称为大质量恒星。在核心碳燃烧之后，引力可以

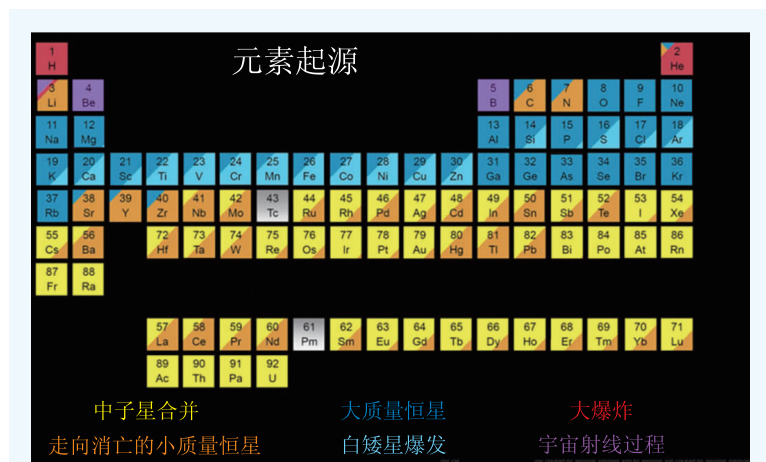


图1 化学元素周期表及各种元素的合成场所(根据<https://blog.sdss.org/2017/01/09/origin-of-the-elements-in-the-solar-system/>的原图改编)

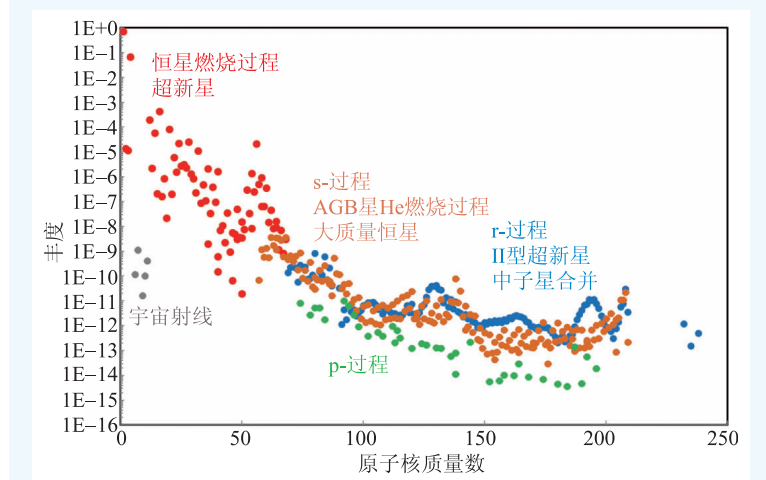


图2 太阳系中同位素丰度分布和相应的核合成过程。金铂等贵金属通过r-过程产生

子后部分¹²C俘获 α 粒子，产生¹⁶O。当核心的氦耗尽后，恒星内部形成碳氧核心。这是宇宙第一次通过恒星核合成产生原初大爆炸所不能产生的新元素。因此，这个过程在宇宙元素演化过程中有着极其重要的意义。如同前面的氢燃烧，当核心停止氢燃烧，其外壳层仍然进行着氢燃烧和氦燃烧，并不停地将外壳层产物抛洒到太空中，形成星际物质。此时的恒星被称为AGB星，是下面介绍的重元素合成(s-过程：慢速中子俘获过程)的一个重要场所。如果恒星质量小于(大约)8个太阳质量，恒星将其外壳层的物质抛完，在太空中留下一个由碳和氧形成的白矮星。抛洒物质形成行星状星云，成为星际物质。如果恒星质量大于(大约)8个太阳质量而小于(大约)10个太阳质量，引力可以点燃核心中的碳，通过碳碳熔合及一系列次级反应，合成氦。最终这个恒星终止其燃烧过程，留下一个氦和氧形成的白矮星及行星状星云。这些以白矮星为生命终点的恒星称为中小质量恒星。如果恒星的质量大于10个太阳质量，这些恒星可以形成中子星或黑洞，被称为大质量恒星。在核心碳燃烧之后，引力可以

使核心继续进行氦燃烧、氧燃烧、硅燃烧，产生一系列元素，直至铁镍(图3)。由于铁与铁的熔合反应是吸热反应，核心反应堆停止了核能的产生，恒星内部核燃烧熄灭。而外壳层从里到外依次继续进行硅燃烧，氧燃烧，氦燃烧，碳燃烧，氦燃烧及氢燃烧。经历漫长的与光压的斗争，强大的引力终于获得最终的胜利。由铁镍组成的核心被不断压缩，核外电子最终被压入原子核内，被核内的质子俘获，将核内质子转变成中子，同时放出中微子。核外电子的消失导致恒星核心的塌缩，外壳层物质以自由落体的形式砸向塌缩的核心，引起剧烈的爆炸，恒星演化成(II型)超新星，并终结其生命。在几秒钟的时间内，超新星释放出巨大能量，其中99%的能量由中微子带走，剩下1%能量由光子携带。爆炸过程中的冲击波将核心附近壳层中的原子核打碎成质子和中子，等冲击波过后，这些质子和中子重新组合成新的原子核。来自核心的中微子在通过这些物质时，与质子和中子发生反应，形成高中子密度区，为下面要介绍的重元素合成(r-过程：快速中子俘获过程)提供了另外一个重要场所。爆发过后，恒星的核心变成一个由坚硬的核物质组成的中子星，其外层核合成产物都抛洒到太空，形成星际物质。

这些抛洒到太空中的来自星星的灰尘(星际物质)携带着恒星产生的新元素，在引力的作用下重新形成下一代恒星。经过如此这般成百上千次星体的演化，终于将大爆炸产生的原初氢和氦合成我们今天太阳系中的80多种稳定元素和长寿命的钍和铀(图4)。

值得一提的是，如果恒星的质量非常大，例如几百个太阳质量，那么它会塌缩为黑洞，它所产生的任何元素都被黑洞吞噬，而对宇宙元素起源和演化没有贡献。中小质量恒星燃烧后剩下的白矮星可能与邻近恒星形成双星，并从恒星表面吸积物质，当其质量超出1.4倍太阳质量时，它将点燃核心中的碳碳熔合反应，形成(Ia型)超新

燃料	主要产物	次级产物	燃烧温度 (10 ⁹ K)	燃烧时间
氢	⁴ He	¹⁴ N	0.02	1千万年
氦	C, O	¹⁸ O, ²² Ne	0.2	1百万年
碳	Ne, Mg	Na	0.8	1千年
氧	O, Mg	Al, P	1.5	3年
硅	Si, S	Cl, Ar, K, Ca	2.0	0.8年
铁	Fe	Ti, V, Cr Mn, Co, Ni	3.5	1周

图3 大质量恒星将大爆炸产生的氢和氦通过核过程合成为碳、氧、氦、镁、硅、硫、铁等更重的元素

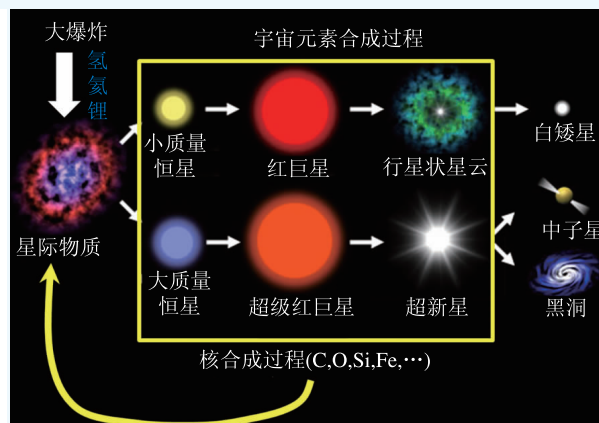


图4 中小质量及大质量恒星的演化过程。在此过程中，大爆炸核合成产生的氢和氦逐步合成更重的元素。恒星抛洒在太空中的星际物质被引力重新聚合，形成下一代恒星。经过如此这般成百上千次循环，形成了今天太阳系中的元素(根据 <http://flightline.highline.edu/iglozman/classes/astronotes/stellarevolution.htm> 的原图改编)

星。这种超新星的主要产物是铁镍为主的元素^[4]。大质量恒星形成的中子星可以与其他中子星或者黑洞形成双星，为重元素合成 r-过程提供一个潜在的天体场所。

3 铁到铀的重元素起源

恒星中的聚变反应只能产生铁镍以及更轻的元素。那么宇宙中从铁到铀的重元素是如何产生的？1957年，Burbidge 夫妇、Fowler 和 Hoyle 以及 Cameron 提出重元素主要由种子核(例如铁-56)通过一系列中子俘获反应和β衰变产生。如果中子俘获反应速率远低于β衰变速率，称为慢速中

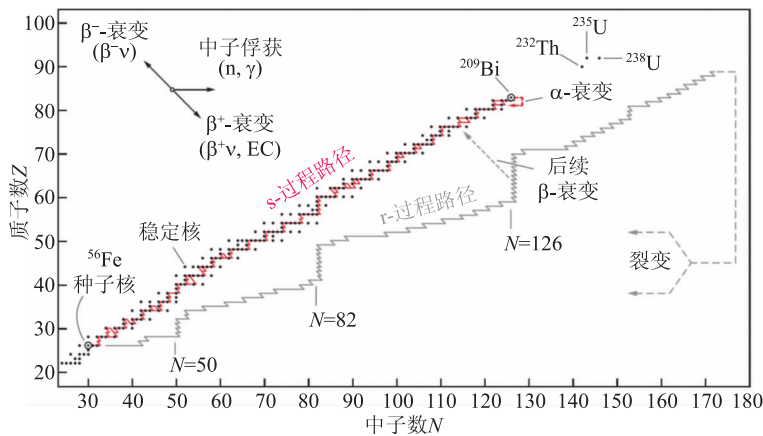


图5 通过s-过程和r-过程合成从铁到铀的同位素。图中黑点代表稳定同位素或长寿命同位素。s-过程和r-过程反应路径分别用红线和灰线表示

子俘获过程(s-过程); 反之, 称为快速中子俘获过程(r-过程)^[1, 2]。s-过程产生近一半从铁到铋的重元素; r-过程产生另一半从铁到铋的重元素, 以及钍和铀(图5)。由于中子幻数 $N=50$ 、 82 和 126 , 具有幻数的原子核的中子俘获截面远小于非幻数原子核的中子俘获截面, 可以完美地解释太阳系同位素丰度分布(图2)中r-过程丰度分布的特征峰位于 $A=80$ 、 130 、 196 , 而s-过程丰度分布的特征峰位于 $A=90$ 、 138 、 208 。因此, 太阳系中的贵金属, 金(^{197}Au)和铂(194 、 ^{196}Pt), 主要是通过r-过程产生。

经过半个世纪的研究, 人们目前对s-过程有了比较清晰的认识: 中小质量恒星演化至渐近巨星支(AGB)阶段, s-过程就会发生。AGB星氦燃烧壳层中的 ^{13}C 和 ^{22}Ne 通过 (α, n) 反应产生中子, 其密度约为 10^{7-8}cm^{-3} 。AGB星中来自上一代星体的铁以非常慢的反应速率(每次反应平均需要~100年)俘获中子, 形成更重的同位素, 其中的不稳定同位素通过 β 衰变将原子核内的一个中子变成质子, 从而合成原子序数更高的元素。由于中子俘获反应速率远低于 β 衰变速率, 这个过程仅局限在 β 稳定线附近的区域。当s-过程进行到 ^{209}Bi 时, 中子俘获反应产生不稳定的 ^{210}Bi (半衰期为5天), ^{210}Bi 衰变成 ^{210}Po (半衰期为138天)。不同于s-过程中的其他不稳定同位素, ^{210}Po 并不发生 β 衰变, 而是发生 α 衰变, 变成原子序数更小的 ^{206}Pb , 使反应流进入循环, s-过程终止于 ^{209}Bi ^[5, 6](图5)。

大质量恒星的氦燃烧核心、氦燃烧壳层和碳

燃烧壳层是s-过程的另外一个场所。这里的中子来源于 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 和 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, n)^{23}\text{Mg}$ 。由于可以产生的中子数目及燃烧过程持续时间远小于AGB星的氦壳层燃烧, 这种s-过程称为弱s-过程。由于弱s-过程可以产生较强的中子密度, 该过程是合成一些丰中子同位素(如 ^{58}Fe 、 ^{60}Fe 、 ^{64}Ni 、 ^{65}Cu 、 ^{68}Zn)的主要途径。

r-过程发生在中子密度巨大($\sim 10^{24}\text{cm}^{-3}$)的极丰中子环境中, 持续时间仅为~1 s。具体的天体场所

还有待研究和发现。一种可能场所是(II型)超新星, 另外一个可能场所是中子星—中子星并合或中子星—黑洞并合。在r-过程中, 种子核以非常快的反应速率(每次反应平均需要~微秒)俘获中子。中子俘获和光核反应在丰中子区迅速达到平衡, 丰度主要集中在远离稳定线的丰中子同位素。然后这些不稳定的丰中子同位素通过相对缓慢的 β 衰变将原子核中的一个中子转变成质子, 从而产生原子序数更大的元素, 包括s-过程无法产生的钍和铀。进入重核区后, 原子核裂变的几率迅速增大, r-过程终止在质量数约为270的核区。在中子通量减少之后, 这些不稳定的丰中子同位素通过一系列 β 衰变形成稳定的重元素(图5)。

快速或慢速中子俘获过程可以合成绝大部分超铁元素。但是, 这些过程无法解释在缺中子侧少量同位素(如 ^{74}Se 、 ^{84}Sr 、 $^{92-94}\text{Mo}$ 等)的来源。这些同位素部分可以通过一系列光核反应及其他次级反应将s-过程和r-过程产生的重元素离解产生^[4]。也有人建议超新星爆发时的中微子—质子过程可能也有贡献。对这些过程的研究是目前核天体物理的热点问题。

4 核天体物理及其前沿研究

核天体物理是研究微观世界的核物理与研究宇宙观世界的天体物理、天文学相融合的交叉学科^[7]。其主要目标是理解宇宙演化和物质(含基本粒子、

可见物质和暗物质)起源以及驱动星体爆炸的核过程。其研究特点:粒子物理、核物理、天体物理、天文学、宇宙学、引力波物理等多学科的交叉融合。在这个部分,我们介绍核天体物理在宇宙元素起源方面的两项前沿研究。

4.1 宇宙中从铁到铀的重元素是如何产生的?

从铁到铀的重元素主要通过s-过程和r-过程产生。s-过程路径靠近 β 稳定线,基于实验测量的稳定同位素中子俘获反应截面,AGB星模型已经可以比较好地描述s-过程的同位素丰度^[5]。然而,r-过程研究仍然存在许多疑难,美国国家科学院宇宙物理学委员会将相关研究列为21世纪的11个“将夸克与宇宙联系起来”的重大物理科学问题之一^[9]。

r-过程研究面临的主要挑战存在两个方面:一方面是测量r-过程涉及的极丰中子奇特核的物理性质;另一方面是确定能够满足r-过程发生所需极端条件的天体场所。具体来说:首先,r-过程涉及大量极丰中子同位素。这些同位素的性质决定了特定天体物理环境中产生的r-过程元素丰度。目前我们还无法产生这些原子核,并通过实验研究其相关性质,只好借助理论模型提供外推结果。由于不同模型间预言的结果差距巨大,模型预言能力未知,导致无法得到准确的元素丰度预言。其次,我们缺乏可靠的天体物理模型来实现r-过程必要的极丰中子环境,从而无法解释银河系中极贫金属星的重元素丰度演化历史。尽管科学家提出许多r-过程发生场所的模型,但是还没有一个模型被广泛接受。其中最可能的是中子星并合(NSM)和核心塌缩(II型)超新星(CCSNe)模型^[8]。

2017年8月17日观测到的GW170817引力波事件及其带动的多信使观测(引力波、伽马射线、X射线、紫外线、可见光、红外线和射电辐射等)为r-过程研究提供了绝佳机遇,其中观测到的红外光谱被解释为r-过程产生镧系元素的间接证据。可惜的是,由于多普勒效应,目前还没有发现相关元素谱线,因此尚无法直接证明r-过程的确可以在中子星并合事件中发生。中子星并合事件的发生频

率和抛射出的物质数量也表明这些事件在r-过程核合成中可能占主导地位。该结论与矮星系Reticulum-II中富集r-过程元素的恒星观测结果一致。地球深海底部²⁴⁴Pu的探测结果也支持存在类似中子星并合这样稀有的高产额r-过程元素合成场所的结论。

正确解读这些观测结果离不开核物理学。例如,基于可靠丰中子原子核数据建立的核合成模型可以预言特定天体环境中的r-过程,推断出中子星并合过程的物理条件,得到不同喷射分量的元素组分,从而确定其他天体物理场所对r-过程的可能贡献。

世界各国纷纷发展新一代放射性核素装置,例如日本RIBF、欧洲ISOLDE、美国FRIB、德国FAIR以及我国正在建设的强流重离子加速器(HIAF)^[10]等,用于产生丰中子新核素,研究它们的质量、寿命、衰变模式、反应率和裂变等性质。这些装置产生的丰中子核素束流也为中子星致密物质物态方程研究提供了新的机遇。尽管我们将利用新一代放射性核素装置合成许多r-过程丰中子新核素,但是仍然不能有效地产生r-过程中丰中子镧系元素和超重元素并约束远离稳定线的丰中子核素的俘获反应率(图6)。大部分r-过程模型所需的原子核数据仍然来自理论模型。新装置上的实验结果将检验各种核物理模型,提升它们在实验无法覆盖区域的预言能力。通过实验和理论相结合,得到更加可靠的核数据,更新天体物理反应率数据库,预测不同天体环境中产生的重元素丰度以及发出的引力波、中微子和电磁辐射。

未来几十年中,我们在核物理实验、天文观测、天体模型、核理论和计算科学等方面的能力将发生质的飞跃。RIBF、FRIB、FAIR、HIAF等新一代放射性核素装置将产生大量与r-过程有关的丰中子核素。在HIAF二期工程中,我们将加速器驱动次临界反应堆(CIADS)产生的丰中子裂变碎片与HIAF耦合,以产生核物理理论预言的所有中重核区丰中子核素,为r-过程研究提供可靠数据。核理论将为描述r-过程丰中子核素性质和致密物质状态方程建立自洽的微观模型,并提供预言值的不确定性。引力波、中微子和光子的多信使观测将为我们带来更丰富的爆发性核合成

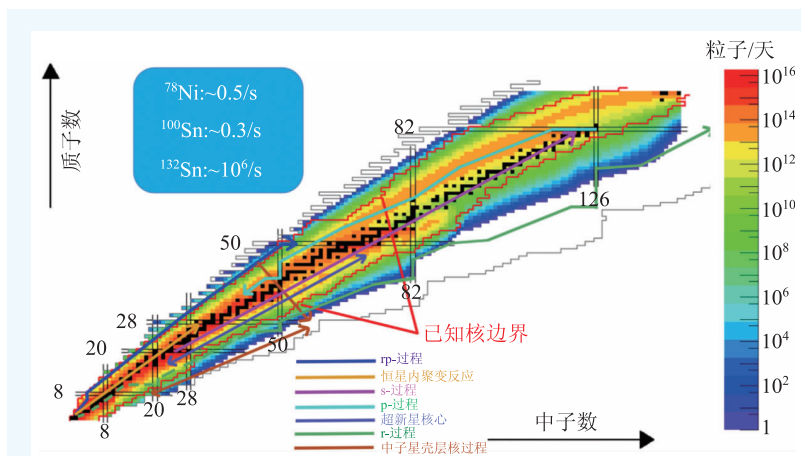


图6 HIAF产生的稀有同位素强度。红线代表现在已经合成的同位素边界。s-过程，r-过程等核合成过程路径用粗实线标出(图片承蒙章学恒、李宇田提供)

其中由于模型带来的系统误差很难得到验证。由于该反应在天体模型中起至关重要的作用，该反应在天体物理能区的精确测量已成为核天体物理的世纪性难题，被称为核天体物理实验中的“圣杯”。核天体物理奠基人，B²FH的创始人之一，诺贝尔物理奖获得者富勒(Fowler)讲过：“我们人体中绝大部分是C和O(90%)。在化学和生物的层面上，我们已经基本上理解了它们。可是在核天体物理的层面上，我们还并不理解我们身体中的

事件的相关信息。基于现有的大型光学望远镜(如我国的LAMOST)以及新一代光学望远镜(TMT, 4MOST和E-ELT等)的大规模巡天计划将为我们展示银河系的化学演化历史。超级计算机将更逼真地模拟超新星、中子星并合及其他r-过程天体环境中的核合成与化学演化，并和观测数据比对。大型中微子探测器(JUNO等)将有望测量来自超新星的中微子能谱，校验中微子在致密物质中的输运过程。基于以上进展，我们有望最终确定r-过程的发生场所，并解决宇宙重元素起源问题^[8]。

4.2 核天体物理深地实验

向天体物理能区推进关键天体核反应的直接测量，对准确了解恒星演化规律，获得基准数据、约束理论计算和发展极端条件下核理论具有十分重要的意义。例如，氢燃烧过程中的 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应不仅对氦至铁的中等质量同位素的合成有决定性的影响，而且对(II型)超新星的爆发过程具有重要影响。该反应在天体环境中的典型反应能量为0.3 MeV，天体物理计算要求其截面的精度好于10%。由于地面宇宙射线引起的本底以及加速器提供的流强有限，现有直接测量的最低能量为0.9 MeV，对应截面的误差大于50%。为了得到该反应在天体物理能区的反应截面，我们不得不借助于各种测量数据进行外推，但是外推数据精度不到30%，远未达到10%的精度要求，并且

C和O是怎么产生的”^[3]。 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应不仅是大质量恒星演化碳燃烧过程中的关键反应，而且是(Ia型)超新星和超级暴的点火反应。由于在天体物理感兴趣能区的反应截面极低(10^{-22} — 10^{-7} b)，目前实验上只能测量部分反应道，误差接近100%； $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应机制复杂，在天体物理能区内现有理论预言存在高达100倍的差异，导致天体模型无法准确预言元素丰度。

在深地实验室利用低能强流加速器开展关键天体核反应的直接精确测量，可以降低宇宙射线以及环境本底，增加反应产率，提升实验灵敏度，是国际公认的核天体物理前沿课题。继意大利的LUNA和美国的CASPAR地下核天体实验室之后，我国成立了锦屏山深地核物理实验合作组(JUNA)，在锦屏山深地实验室(CJPL)建立了深地核天体物理实验平台^[11]。我国锦屏实验室(CJPL)岩层覆盖深度世界居首，对宇宙线的屏蔽效果比意大利LUNA地下核天体实验室高出约100倍。JUNA合作组已经完成400 kV加速器的研制。该加速器提供的氢和氦束流强度是国外深地实验室的10倍以上。JUNA计划在2020年开始加速器和探测器的深地安装，2020—2021年开始开展恒星演化过程中 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 、 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 和 $^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ 等关键反应在天体物理能区或者接近天体物理能区的直接精确测量。在此基础上，JUNA合作组计划安装具备加速碳氧等重离子的强流加速器，在天体物理能区开展

碳—碳融合等关键核反应研究。这些重要的深地核天体物理实验，有望为天体模型提供可靠数据，解决宇宙中碳氧等元素起源等重大问题。

5 总结与展望

元素起源是一个基本科学问题，是核天体物理的核心研究目标。这个问题涉及天文观测，天体物理模型及核物理相关理论和实验研究。随着技术进步，天文观测进入多信使天文学时代，利用电磁波(射电、亚毫米波、红外、可见光、紫外、X射线、伽马射线)、引力波、中微子、宇宙线等探测技术对宇宙进行观测。我们已经成功对太阳，超新星 SN1987A、中微子源 Ice-cube-170922 和引力波源 GW170817 等进行多信使天文观测，获得一批突破性成果。多信使天文观测的对象涉及四大基本相互作用。为了准确解读这些观测结果，我们需要针对天体环境中的粒子物理和核过程，利用深地和地面加速器装置，开展关键核反应、原子核质量和衰变性质等的实验研究，结合粒子与原子核物理理论，为天体物理研究提供准确的反应率数据库等基准数据。以美国 JINA 为代表的学科交叉研究中心成功地将天文观测、天体模型和核合成过程研究三方人员组织起来，利用最新的核物理反应率数据，结合最新的天文观测结果，共同开展宇宙元素演化模型及中子星性质研究。

在过去 20 年里，我国核天体物理研究群体依托兰州重离子加速器、北京串列加速器、国家天文台郭守敬望远镜 LAMOST 等大科学装置，结合

国际合作，针对关键科学问题在核反应截面、原子核质量和衰变测量、理论计算、核合成网络计算，以及天文观测等方面开展研究，取得一批创新性研究成果。核天体物理交叉学科的特点以及多信使天文学的出现要求我们建立核天体物理联合研究中心，围绕从铁到铀的重元素起源等难题，加强核物理实验、核反应和核结构理论、天体模型及天文观测等方面的交叉合作，催生天文观测、天体物理与粒子和核物理关键科学问题的互动，充分发挥现有装置的潜力，为 CJPL 和 HIAF 等大科学装置确定具体研究目标，储备技术和人才。

核天体物理不仅处于科学的前沿，而且它的发展还将不断促进人们对基本粒子、原子核、天体、宇宙以及它们之间关系的深入了解^[12]。该学科一方面利用粒子物理、核物理手段研究天体物理中的重要问题，例如，从铁到铀的元素是如何产生的？另一方面，天体的特殊“实验室”环境为发现新物理提供了机遇。例如，天体物理、天文观测、粒子与核物理等多学科通过几十年的合作，成功建立了标准太阳模型，发现了中微子通量观测与模型间的差异，实现了以发现中微子振荡为代表的科学突破。目前国家对基础研究的大力投入，大科学装置的建设，为我国核天体物理研究提供了前所未有的机遇。相信经过一段时期的努力，我们一定可以在宇宙元素起源等基本科学问题研究方面做出我们应有的贡献。

致谢 感谢中国科学院近代物理研究所徐晓栋、房栋梁和茹龙辉仔细阅读本文初稿，并提供宝贵意见。

参考文献

- [1] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1957, 29: 547
- [2] Cameron A G W. *Stellar Evolution, Nuclear Astrophysics, and Nucleogenesis*. Atomic Energy of Canada Ltd, 2013
- [3] Fowler W A. *Rev. Mod. Phys.*, 1984, 56: 149
- [4] Woosley S E, Heger A, Weaver T A. *Rev. Mod. Phys.*, 2002, 74: 1015
- [5] Kappeler F, Galino R, Bisterzo S *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 157
- [6] Rolfs C E, Rodney W S. *Cauldrons in the Cosmos*. The University of Chicago Press, 1988
- [7] 柳卫平, 张玉虎, 郭冰 等. 核物理与等离子体物理发展战略, 第四章核天体物理. 科学出版社, 2017
- [8] Horowitz C J *et al.* *J. Phys. G: Nucl. Partic. Phys.*, 2019, 46: 083001
- [9] Committee on the Physics of the Universe Board on Physics and Astronomy Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council of the National Academies. *Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century*. National Academy Press, 2003
- [10] 周小红. 原子核物理评论, 2018, 35: 339
- [11] Liu W P *et al.* *Sci. China Phys. Mech. & Astro.*, 2018, 59: 642001
- [12] 钱永忠. 物理, 2013, 42(7): 468