

摘要

一个世纪前，核物理学进入天体物理学，诞生了一个新的科学领域，被称为“核天体物理学”。随着时间的推移，它以令人印象深刻的速度发展成为一个广泛交叉和多学科领域，不仅带来了天文学和宇宙学，而且还带来了物理学的许多其他子领域，特别是粒子、固态和计算物理，以及化学、地质学甚至生物学。本文主要集中在与天文学和天体物理学有关的核物理学方面，这里特别关注理论方面。

本文的大部分内容都是关于可能在天体物理条件下起作用的核物理现象，并强烈关注理论。必须处理的原子核种类异常繁多，从最轻的到最重的，从核稳定性的山谷一直到质子和中子滴线。最轻的氢元素来自宇宙大爆炸，氢元素的燃烧主要由 pp chain 和 CNO 循环生成氦，氦核中发生 3α 反应和 s 过程（以及 CNO 循环）产生碳氧乃至比铁更重的元素。碳核中发生 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 产生氧和中子，氧核中发生 $\text{O}-\text{O}$ 聚变产生氖。当燃烧到铁核时，聚变无法产生新的能量，无法抵消引力后发生猛烈收缩并弹反，发生超新星爆发并发生 r 过程，产生大量比铁更重的元素。

本文主要回顾了从氢开始到比铁更重重的核素的合成。以天体的诞生-消亡为脉络，并介绍了天体物理常见的反应和物理过程，包括各种元素核反应和 r 过程、s 过程等。重点放在影响这些核合成机制建模的天体物理和核物理不确定性上。涵盖了从恒星能量产生到元素合成、再到观测证据的广泛内容，展现了核天体物理学如何通过实验、理论模型和观测数据的结合，深入理解恒星内部过程和宇宙中的元素起源。这些研究为我们理解宇宙的演化提供了坚实的基础。

关键词：核天体物理学，理论，核素合成

正文

引言

我们生活在地球上，地球的温暖来自附近一颗我们称之为太阳的恒星的光线。这些阳光中的能量最初来自太阳内部深处氢与氦的核聚变。爱丁顿在 1920 年告诉了我们这一点，Hans Bethe 在 1939 年详细阐述了核聚变所涉及的核过程。为此，他于 1967 年获得了诺贝尔奖。

地球上的所有生命，包括我们自己，都依赖于阳光，因此也依赖于太阳内部的核反应。但是，太阳并不产生在地球上和我们体内发现的化学元素。

最初的两种元素和它们的稳定同位素氢和氦，是在宇宙膨胀的早期高温高密度阶段，即所谓的“大爆炸”的最初几分钟里产生的。元素周期表中的第三个元素——少量的锂也在大爆炸中产生，但其余的锂和所有的元素铍、元素硼，被认为是由恒星之间星际介质中的宇宙辐射使更重的元素碎裂而产生的。一般来说，这些元素都非常稀少。

重元素从何而来？普遍接受的答案是，所有较重的元素，从碳元素(6 号元素)，到长寿的放射性元素铀元素(92 号元素)，都是由银河系恒星内部的核反应产生的。在宇宙中，重元素是由恒星形成或诞生，进化或老化，并最终在 45 亿年前形成的银河系的一生中，将其核火的灰烬喷射到星际介质。

银河系的寿命被认为超过 100 亿年，但不到 200 亿年。无论如何，银河系比太阳系要古老得多。核灰烬或新形成的元素的喷射是在恒星的老年阶段，或在相对频繁的爆发期间，或在最后壮观的恒星爆炸(称为超新星)期间，通过缓慢的质量损失发生的。关于银河系以外其他星系组成的信息也在迅速积累。对这类数据的分析迫使我们得出这样的结论：丰度及其空间趋势在星系之间可能会有相当大的差异，甚至在给定的星系类内也是如此[2]。

在任何情况下，太阳、地球和太阳系中的所有其他行星都是在星际介质中的气态太阳星云的引力和旋转作用下凝聚而成的。星际介质由“大爆炸”氢和氦与早期银河系恒星合成的较重元素混合而成。这个想法可以推广到银河系中连续几代的恒星，结果是星际介质和由其形成的恒星的重元素含量随着时间的推移而增加。银河系中最古老的恒星，也就

是我们认为最早形成的恒星，其重元素丰度不到太阳系重元素丰度的百分之一。银河盘中最古老的恒星大约有百分之十的含量。

恒星中能量产生和元素合成的基本物理学即为核天体物理学。我在这里引用福勒的演讲的话“与军用反应堆和炸弹相比，它是核物理学的良性应用。然而，有一件事我是肯定的。解释阳光起源的科学绝不能被用来制造尘埃云，使地球上的阳光消失[1]。”

本文将强调核实验结果和对这些结果的理论分析。

恒星反应速率与实验室反应截面

在天体物理学中，了解恒星内部核反应的截面对预测元素合成和恒星演化至关重要。然而，直接在恒星条件下测量这些反应截面是极其困难的，因此需要依赖实验室测量和理论模型相结合的方法。

卢瑟福散射公式

卢瑟福散射公式定量描述了带电粒子与原子核的静电相互作用的散射现象。其公式给出了散射角为 θ 时，散射微分截面的大小。

微分截面 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 表示单位立体角 $d\Omega$ 内的散射概率，其表达式为：

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2E_k} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

恒星中的热核反应速率可以表示为：

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^{\infty} \sigma(E) v(E) f(E) dE$$

$\sigma(E)$ 是反应截面，它是入射粒子能量 E 的函数。

$v(E)$ 是相对速度，它与能量 E 相关。

$f(E)$ 是粒子的能量分布函数，对于恒星内部的热核反应，通常使用麦克斯韦-玻尔兹曼分布：

$$f(E) = \frac{kT^{1/2}}{2E} \frac{e^{-E/kT}}{(kT)^{3/2}}$$

在恒星中，反应截面随温度和能量的变化具有复杂性。带电粒子的反应受到库仑屏障的影响，这使得在恒星中的有效反应能量较实验室低。为了克服这一问题，提出了伽莫夫

穿透因子的概念，来解释库仑屏障的穿透率，并引入了“s 因子”，即能量与截面函数之间的关系，用于简化实验室结果向恒星条件的推算。

伽莫夫因子 $G(E)$ 表示为：

$$G(E) = \exp\left(-\frac{b}{\sqrt{E}}\right)$$

反应截面表现为：

$$\sigma(E) = \frac{s(E)G(E)}{E}$$

在实验室中，反应截面 $\sigma(E)$ 通常通过加速器实验测得，这些实验提供了核反应随能量变化的依赖关系。在恒星中的温度下，核反应速率主要由反应截面在“伽莫夫窗口”（恒星内最可能的反应能量范围）中的值决定。

在获得了反应截面 $\sigma(E)$ 和相关参数后，使用上述积分公式可以计算出恒星中某特定核反应的平均速率 $\langle\sigma v\rangle$ 。实际计算中，积分通常在伽莫夫窗口内进行，因为这是恒星内部反应的主要贡献区。

一旦确定了 $\langle\sigma v\rangle$ ，它就可以应用于恒星模型中，以预测核反应的能量产生率、元素合成速率以及对恒星演化的影响。这些结果进一步用于解释恒星的观测特征和演化路径。

在实际恒星中，反应网络是复杂的，包含多个相互依赖的核反应过程。

Hauser-Feshbach 模型是一种广泛应用于核反应截面计算的统计方法。该模型假设核反应过程可以视为复合态的形成和衰变，即入射粒子与靶核形成一个复合核态，然后以各种可能的通道衰变出去。该模型特别适用于中等到高能量的核反应，其中复合态具有高密度的能级，单个共振对总体截面的贡献被平均化。本文只在此处提到这个方法，简要提及，并不深入。

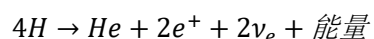
总结而言，通过实验室数据和理论模型结合，可以有效估算恒星中的核反应速率，进而理解恒星内部的核物理过程。

氢在主序星中的燃烧

主序星是恒星在其生命周期中的稳定阶段，此时恒星的主要能源来自于氢原子在其核心通过核聚变转化为氦原子的过程。氢燃烧主要通过以下两种途径进行：

一是质子-质子链反应 (pp-chain)：这是在像太阳这样的低质量主序星中占主导地位的反应链。质子-质子链反应可以分为几个步骤：

首先两个质子相遇，通过弱相互作用结合成氘核，释放一个正电子和一个中微子。随后氘核再与另一个质子碰撞，形成氦-3 核，并释放伽马射线。最后两个氦-3 核结合，形成一个氦-4 核，并释放两个质子。



整个过程可以总结为将 4 个质子（氢核）结合成一个氦-4 核，过程中释放出能量和中微子。这一反应链是太阳及类似恒星中主要的能量来源。

pp 链反应分为三个主要分支，分别为 pp-I、pp-II 和 pp-III 链。它们的差异主要在于核反应路径的细节，尤其是中间产物的处理方式。

pp-I 链是质子-质子链反应的主要形式，发生在温度低于 2000 万 K 的恒星中，如太阳的核心。第一步：两个质子发生聚变，形成一个氘核 (${}^2_1\text{H}$) 并释放出一个正电子和一个中微子，【公式】这个过程发生的概率极小，因为需要通过弱相互作用才能产生中微子。第二步：氘核与一个质子发生聚变，生成氦-3 并释放出一个伽马光子【公式】，第三步：两个氦-3 核再结合，生成一个氦-4 核和两个质子【公式】。pp-I 链的能量输出约占太阳总能量的 85%。在这一链中释放出的能量约为 26.2 MeV，主要以伽马射线、正电子湮灭产生的光子及中微子的形式输出。

pp-II 链是质子-质子链反应的一个次要分支，发生在温度略高的恒星中（大约 1500 万 K 到 2000 万 K）。第一步与 pp-I 链相同，第二步与一个氦-4 核结合，生成 ${}^7\text{Be}$ 【公式】，然后， ${}^7\text{Be}$ 捕获一个电子，通过电子俘获产生 ${}^7\text{Li}$ 和一个中微子【公式】，最后， ${}^7\text{Li}$ 与质子发生聚变，生成两个氦-4 核。pp-II 链在太阳中的能量贡献约为 15%，并且会产生较低能量的中微子。

pp-III 链只在温度更高的恒星中（约大于 2000 万 K）占据显著比例。在 pp-III 链中， ${}^7\text{Be}$ 不通过电子俘获，而是捕获一个质子，生成 ${}^8\text{B}$ 放出 γ 射线【公式】。接下来，发生 β 衰变，生成 ${}^8\text{Be}$ 和一个正电子与一个中微子。

每次完整的 pp 链反应将 4 个质子转化为一个氦-4 核，同时释放约 26.7 MeV 的能量。这个能量主要以以下几种形式释放：

光子能量（伽马射线）：大部分的能量以伽马射线形式释放，最后转化为恒星表面的光辐射。

正电子湮灭：正电子会与电子湮灭，产生更多光子。

中微子：中微子带走一小部分能量，并且由于中微子与物质的相互作用极为微弱，它们几乎不与恒星内的物质发生碰撞，因此能量会直接逃逸。

二是碳-氮-氧循环（CNO cycle）：这是在质量较大的主序星中主要的氢燃烧过程。CNO 循环依赖于碳、氮、氧作为催化剂，通过质子的逐步捕获和随后发生的 β 衰变，最终形成一个氦-4 核。与质子-质子链反应相比，CNO 循环对温度更为敏感，因此在更热的恒星中占主导地位，通常在核心温度超过 1800 万 K 时更加高效。

CNO 循环的核反应链可以表示为以下主要步骤。碳、氮和氧核在循环中依次作为反应中间产物，直到再次回到碳核。1. 碳-12 核捕获一个质子，生成氮-13，并释放出一个伽马射线光子。2. 氮-13 通过 β 衰变转化为碳-13，同时释放出一个正电子和一个电子型中微子。正电子随后会与电子湮灭，产生能量。3. 碳-13 捕获一个质子，生成氮-14，并释放出一个伽马射线光子。4. 氮-14 捕获一个质子，生成氧-15，并释放出一个伽马射线光子。这是整个 CNO 循环中最慢的步骤，因此它是决定整个循环速率的瓶颈。5. 氧-15 通过 β 衰变转化为氮-15，同时释放一个正电子和一个中微子。6. 氮-15 捕获一个质子，生成碳-12 和一个氦核。碳-12 核被重新生成，完成循环。

每次完整的 CNO 循环会释放大约 26.7 MeV 的能量。这与 pp 链反应的总能量释放相当，但是由于 CNO 循环依赖于碳、氮和氧元素作为催化剂，因此其发生的效率更依赖于恒星的温度和元素丰度。

在上述两种机制中，每次氢转变为氦时，都会释放大量能量。根据爱因斯坦的质能关系 $E = mc^2$ ，质量亏损转化为能量，这就是恒星能够发光和维持平衡的根本原因。

燃烧产生的能量从恒星的核心向外运输，有两种主要方式：辐射和对流。能量从核心向外传播，使得恒星在其表面释放出光和热。这种能量平衡决定了恒星的光度和表面温度。辐射区在核心附近，能量主要通过光子的辐射传递。光子在穿过恒星物质时不断被吸收和再发射，使得能量逐步向外传递。对流区在更远的外层，温度下降导致物质的辐射效率降低，能量主要通过物质的对流传递。

氢燃烧是主序星阶段持续时间最长的阶段。对于像太阳这样的恒星，这一过程大约持续 100 亿年。在此期间，恒星的核心逐渐积累氦核，并随着氢耗尽，最终演化为红巨星。

碳、氧的合成及中子过程

碳和氧的合成主要发生在恒星的氦燃烧阶段。当恒星核心的氦通过“三 α 过程”形成碳-12 后，碳-12 核与额外的氦核结合可以形成氧-16：

三 α 过程是指三个氦核（ α 粒子）通过一系列反应形成碳-12 核。这一过程是恒星中碳的主要来源。碳-12 捕获 α 粒子即碳-12 与一个氦核结合形成氧-16。

两个氦核通过核反应结合形成一个不稳定的铍 Be-8，铍-8 是极其不稳定的同位素，半衰期非常短（大约 10–16 秒）。它很容易再次分裂为两个氦核，因此，如果没有后续反应，铍-8 会迅速解体。尽管铍-8 非常不稳定，但在恒星核心极高的温度（约 1 亿 K）和压强下，铍-8 有可能与另一个氦核结合，形成碳-12，并放出伽马【公式】。在恒星的氦燃烧阶段，氦核不仅与自身结合形成碳-12，还可以与已形成的碳-12 核进一步结合，形成氧-16 并放出伽马【公式】。

碳与氧的比例决定了恒星演化的不同阶段及其最终的核合成产物。在氦燃烧过程中，碳和氧的生成比例取决于反应的温度、密度和时间。氦燃烧阶段发生在恒星演化的中后期，对恒星结构和演化有重要影响：

红巨星：当主序星耗尽其核心氢燃料时，它会膨胀成为红巨星。核心收缩并加热，直到温度足够高以点燃氦燃烧。在此阶段，恒星的外层继续膨胀，而核心中的氦聚变逐渐合成碳和氧。

白矮星前身：对于低质量的恒星（如太阳），氦燃烧后期的产物碳和氧会在恒星死亡时保留下来，成为白矮星的主要组成成分。

超新星：对于更大质量的恒星，碳和氧的燃烧会继续下去，直到核心发生铁元素合成，最终可能导致超新星爆发。

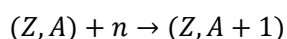
在氦燃烧阶段，恒星内部产生了大量的中子，这些中子参与了恒星内部更复杂的核反应过程。主要来源是碳-13 通过 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应产生中子，这一过程在恒星中十分重要。其他一些重元素通过类似的捕获反应也会产生中子，如 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反应。

这些中子随后参与了 s 过程和 r 过程的核合成。

中子捕获过程是宇宙中合成重元素（比铁更重的元素，如锂、钡、铀等）的主要机制之一。主要有两种中子捕获过程，即 s 过程（慢中子捕获）和 r 过程（快速中子捕获）。它们都涉及原子核通过捕获中子形成更重的同位素，并经历 β 衰变生成新元素。

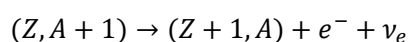
s 过程（慢中子捕获过程 slow neutron capture process）：中子捕获的速率相对较慢，以至于每次捕获中子后，原子核有足够的时间发生 β 衰变，形成一个较稳定的核素，然后再捕获下一个中子。这种过程发生在中子的密度较低，温度相对较低的恒星环境中。

原子核捕获一个中子，生成一个新同位素。由于中子不带电，因此能容易穿透原子核并被捕获。



其中 Z 是原子核的原子序数， A 是质量数。

由于中子的增加，新的同位素可能不稳定，会通过 β 衰变将一个中子转变为一个质子，放出一个电子和一个反中微子从而将原子核的原子序数增加 1，形成一个新的元素。



特点：

捕获速率慢：在 s 过程中，中子的捕获速率较低，因此原子核有时间通过 β 衰变调整其组成，达到稳定后再捕获下一个中子。

稳定同位素生成：由于中子捕获速度较慢，s 过程生成的核素通常会沿着稳定同位素链逐步合成更重的元素。

中等质量元素合成：s 过程在元素周期表中主要负责形成质量介于铁和铅之间的中等质量元素，如锶、钡、铀等。

s 过程主要在 巨星，特别是 红巨星 和 渐近巨星分支星（AGB 星）的核心中发生。这样的恒星内部温度和密度相对较低（大约为 10^8K ）

r 过程（快速中子捕获过程 rapid neutron capture process）：与 s 过程不同，r 过程在超新星爆炸、中子星并合等高中子通量的极端环境中发生。由于中子捕获速率远远超过 β 衰变速率，种子核会快速捕获大量中子，生成极重元素，以至于原子核还来不及发生 β 衰变就迅速捕获多个中子。这些元素在核反应停止后，通过 β 衰变稳定下来。

r 过程产生的元素比 s 过程更重，两者在形成不同的元素丰度上起到互补作用。

碳和氧的生成直接影响到后续的氦、氧、硅燃烧阶段，而中子过程（s 和 r 过程）则负责合成从铁到铀等更重的元素。这些过程共同决定了恒星的最终命运及其对宇宙中元素丰度的贡献。

恒星的晚期演化

当恒星耗尽核心的氢和氦后，进入晚期演化阶段。此时，恒星核心的温度和压力足够高，使得碳、氧等元素进一步发生核聚变反应。这些反应包括碳燃烧和氧燃烧，碳元素和氧元素的来源正是前文所介绍的。氦燃烧后产生的恒星核心主要由 C、O 组成。

碳-12 核相互碰撞聚变，其反应主要产物是氖-20 和氦-4，发生反应 $^{12}_6\text{C}(^{12}_6\text{C}, \alpha)^{20}_{10}\text{Ne}$ 。其他次级反应也会发生。当碳“燃尽”后，氖-20 和氧-16 成为核心主要成分，温度升高。氧-16 核发生聚变，生成硅和其他更重的元素。这些燃烧过程依次进行，逐渐生成越来越重的元素，最终形成一个由铁和镍组成的核心。由于铁核的结合能最高，铁核心无法通过进一步的核聚变产生能量。

当恒星的核心主要由铁构成时，核心不再具有产生能量的能力，从而无法抵抗引力。核心会突然坍缩，当核心的密度达到极限时，电子简并压力无法再支持核心的重量，导致核心急剧收缩，导致外层物质的剧烈反弹，产生超新星爆炸。核心的反弹产生冲击波，将外层物质抛射到太空中，同时释放出大量能量。这一过程中，超新星不仅释放出极大的光能，还形成了许多重元素。

核心的反弹产生冲击波，将外层物质抛射到太空中，同时释放出大量能量。这一过程中，超新星不仅释放出极大的光能，还形成了许多重元素，并且还将这些元素散布到星际空间中，成为新一代恒星和行星系统的材料来源。

超新星爆炸时，由于极高的温度和压力条件下，发生了爆发性核合成。福勒提到，这一过程可能显著改变原有的元素丰度。爆发性核合成的主要特点是极端的物理条件下，核反应速率剧烈增加，导致新元素的快速生成[1]。例如，在爆炸的激波波前，硅层和氧层可能通过爆发性核合成生成镍、钴等更重的元素。通过对模拟超新星爆炸的计算，研究者得以推断爆炸后抛射出的物质中各种元素的比例。这些计算结果可以与实际的恒星观测或太阳系中的元素丰度数据进行对比，以验证模型的准确性。

一切完成的最后，恒星残余体：超新星爆炸后，恒星核心可能会形成中子星或黑洞，这取决于核心的质量。如果核心质量不超过某一极限（托尔曼-奥本海默-沃尔科夫极限），坍缩后的核心将稳定为中子星。如果核心质量超过这一极限，坍缩后的核心将继续收缩，最终形成黑洞。

结语

以上本文以恒星的形成到消亡为脉络，介绍了氢燃烧在主序星中的作用，介绍了质子-质子链反应和 CNO 循环如何维持恒星的能量输出，并强调了碳、氧的合成过程以及这些元素通过中子捕获进一步生成重元素的机制。

参考文献：

- [1] EXPERIMENTAL AND THEORETICAL NUCLEARASTRO PHYSICS;THE QUEST FOR THE ORIGIN OF THE ELEMENTS Nobel lecture, 8 December, 1983 by WILLIAM A. FOWLER W. K. Kellogg Radiation Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, California 91125.
- [2] Astronuclear Physics: A tale of the atomic nuclei in the skies M. Arnould, S. Goriely *Institut d' Astronomie et d' Astrophysique, Université Libre de Bruxelles, Belgium