

恒星能源与元素起源

——厉光烈

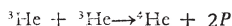
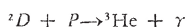
曹志军

在浩瀚无际的宇宙中,天体如何演化,元素如何生成,这是千百年来人类力图探索的奥秘。

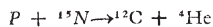
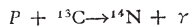
十九世纪著名物理学家(赫姆霍尔兹)曾经设想,太阳的能量来源于其中气体因收缩而产生的热量。按此设想,太阳的寿命不过 2000 万年。但是地质学家已经证明地球的年龄大约为 30 亿年。因此,太阳的能量不可能来源于气体的收缩。那么太阳的能量是否来源于化学燃烧过程中释放的能量呢?科学家已测算出太阳平均每克质量一年所产生的热量为 1.5 卡,而一克氧和碳完全燃烧只能发出 2200 卡热量。这就是说,如果太阳是象氧和碳那样燃烧,那么用不了 1500 年太阳就会烧光。因此,太阳发光并不是其中气体化学燃烧的结果。

太阳究竟为什么会发光呢?

本世纪初,原子核物理的发展给人们以启示:恒星内部上万度的高温和出奇大的压力使得原子失去所有的电子,裸的原子核可以自由地参加各种各样的原子核反应。1920 年,(爱丁顿)指出,太阳的能源可能来自太阳内部的氢通过核聚变反应转化为氦。1939 年,(贝特)和(魏茨塞克)分别独立地提出,太阳和恒星的能源主要来自它们内部氢的两组燃烧反应转化为氦其中之一称为 P-P 链:



另一组是以 ${}^{12}C$ 为催化剂的 CN 循环:



在考虑了恒星的各种模型以后,(贝特)进一步指出,

P-P 链和 CN 循环中的一系列核反应足以提供恒星的辐射能量,从而帮助天文学家弄清了令人困惑的恒星能源问题。(贝特)因此荣获了 1967 年度诺贝尔物理学奖。(贝特)的工作不仅解决了恒星能量的来源问题,而且把恒星能源与元素起源这两者有机地联系起来。但是(贝特)没有回答,氢燃烧以后,恒星如何演化,以及氢和氦以外的化学元素是如何生成的。

早期的元素起源理论大多数假设元素是在宇宙的原始状态下形成的。(贝特)在 1939 年发表的论文中认为:“比氦更重的元素不可能在普通的恒星里生成……在恒星里发现的较重元素一定是在恒星形成时就已经存在了。”物理学家(伽莫夫)在 1950 年提出,比氦更重的元素是在大爆炸过程中通过一次次俘获单个中子形成的。但是,早在(伽莫夫)理论提出之前,美国加利福尼亚理工学院(凯洛格)辐射实验室的(斯陶布)和(斯蒂芬斯)就从实验中发现 7He 和 7Li 的基态是不稳定的。此后,(福勒)等又进一步发现 8Be 的基态也是不稳定的。这样,在质量数 $A = 5$ 或 8 处就出现了质隙。对(伽莫夫)理论来说,这些质隙是不可逾越的。(费米)和(特克维奇)曾试图“架桥”跨越这些质隙,但没有成功。

1946 年,英国物理学家(霍伊尔)首先提出了比氦更重的元素可在恒星中通过氦燃烧生成的观点。他曾想到通过反应: $3\alpha \rightarrow {}^{12}C$ 来实现氦燃烧。但遗憾的是,他没有完成这一研究工作。1951 年,康奈尔大学的(萨彼特)在访问(凯洛格)辐射实验室期间发现,氦可以通过不稳定的 8Be 燃烧。他在分析了有关 $2\alpha \rightleftharpoons {}^8Be$ 的实验数据以后指出:平衡浓度甚低的 8Be ,有可能俘获 α 粒子转化为 ${}^{12}C$: $2\alpha \rightleftharpoons {}^8Be(\alpha, \gamma) {}^{12}C$, 并释放出大量的能量。他认为这个反应(其净效果是 $3\alpha \rightarrow {}^{12}C$)是红巨星的核能源。但是,当时实验上并没有发现这个反应。(霍伊尔)认为,这可能是由于反应产物 ${}^{12}C$ 不是处于基态,而是处于某个激发态。由于这个激发态会很快地衰变掉,因此实验上难以观察到。他预言这个态的激发能约为 7.68 MeV。(霍伊尔)在 1953 年初第一次访问(凯洛格)辐射实验室时,建议(福勒)通过实验找寻 ${}^{12}C$ 的这个激发态。(福勒)的同事(沃林)等在反应 ${}^{11}N(d, \alpha) {}^{12}C$ 中找寻并发现了这个态,其激发能与(霍伊尔)预言的大致相同。后来,(福勒)等又进一步在 ${}^{12}B$ 的放射性衰变中找到了这个态,并发现它既可以分裂为 3 个 α 粒子,又可以通过 γ

跃迁回到 ^{12}C 的基态。这样，(福勒)和他的合作者就在更普遍的意义证实了上述的反应： $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$ 。

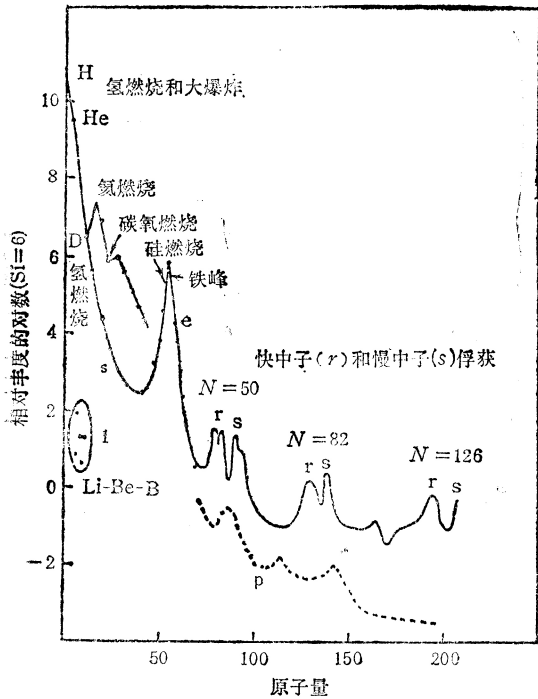


图1 Suess-Urey 元素丰度曲线图

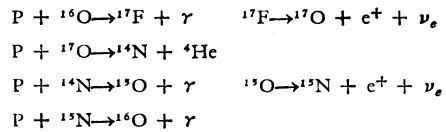
氢燃烧机制的发现，为元素起源理论的研究揭开了新的一页。人们开始相信，比氢更重的元素不是在大爆炸的一瞬间产生的，而是随着恒星演化在一系列核反应过程中逐步生成的。1956年，(修斯)和(尤里)根据地球、陨星及太阳的元素丰度画出了宇宙间各种元素的丰度随原子量变化的曲线图(见图1)。这为进一步研究元素的起源提供了更好的实验依据。1954—1956年间，(核·姆·伯比奇)，(季·阿·伯比奇)(福勒)以及(霍伊尔)合作，对恒星中的核反应进行了一系列的研究。1957年，在总结过去工作的基础上，他们依据(修斯-尤里)元素丰度图全面讨论了恒星中元素的核生成，发表了著名的论文——B²FH，提出了元素的核生成理论。后来这一理论得到了进一步的发展和完善，成功地解决了元素起源问题。

按照上述理论，在恒星中元素主要通过以下几类核反应过程生成：

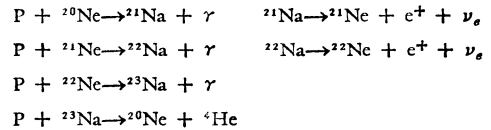
1. 氢燃烧和氦燃烧

前面已经讲过，氢可以通过 P-P 链或以 ^{12}C 为催化剂的 CN 循环燃烧生成氦。这类核反应主要发生在包括太阳在内的主序星内部。1950年(福勒)和他的合作者在(凯洛格)辐射实验室的静电加速器上对 CN 循环中的核反应进行了实验研究。他们发现，这个循

环只能发生在比太阳更重的主序星内部。后来，(福勒)又发现了氢燃烧的另外两个循环：一个以 ^{16}O 为催化剂，即



他将其与 CN 循环合称为 CNO 循环(在超新星爆炸过程中还可能发生一种快 CNO 循环，那里 CN 循环中的 β 衰变为 (n, p) 反应所代替)；另一个为 NeNa 循环，即



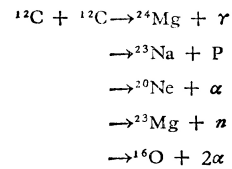
这两个循环仅当氢中混杂有 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{20}Ne 等元素时才会发生，燃烧产物除 ^4He 外还有 ^{13}C 、 ^{14}N 、 ^{15}N 、 ^{17}O 、 ^{21}Ne 、 ^{22}Ne 和 ^{23}Na 等稳定的轻元素。

氢燃烧尽以后，引力收缩使恒星内部温度和压强升高，恒星从主序星向红巨星过渡，这相当于恒星由青年期步入中年期。在温度约为 $(1-2) \times 10^8 \text{K}$ 时，氢通过反应 $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$ 和 α 俘获燃烧生成 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{20}Ne ，可能还有少量的 ^{24}Mg 。

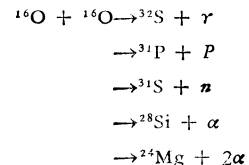
此外，通过反应 $^{14}\text{N}(\alpha, \gamma)^{18}\text{F}(e^+ \nu_e)^{18}\text{O}$ 和 $^{15}\text{N}(\alpha, \gamma)^{19}\text{F}$ 可以生成另外两种稳定的轻元素 ^{18}O 和 ^{19}F 。这样，通过氢、氦燃烧可以生成碳、氮、氧、氟和钠的全部稳定同位素。

2. 碳燃烧、氧燃烧和硅燃烧

氢燃烧的主要产物是 ^{12}C 、 ^{16}O 和 ^{20}Ne 。当进一步的引力收缩使恒星核心温度升高到约 $8 \times 10^8 \text{K}$ 时，碳将按下列方式燃烧：



当恒星核心温度约为 $2 \times 10^9 \text{K}$ 时，氧将发生燃烧：



碳、氧燃烧的主要产物是 ^{28}Si 、 ^{32}S 和 ^{24}Mg 。当温度高达 $(2-5) \times 10^9 \text{K}$ 时，恒星中的核反应进入最后阶段——硅燃烧。这时 (γ, α) 、 (γ, P) 、 (γ, n) 、 (α, γ) 、 (P, γ) 、 (n, γ) 和 (p, n) 等反应道都先后开放，各种原子核相互转化，原子核的生成和消耗达到平衡。这

就是所谓的 ϵ 过程。在这个过程中生成的原子核，平均结合能越大，丰度越大。因此，平均结合能最大的铁族元素（铬、锰、铁、钴和镍）有最大的丰度。（修斯-尤里）元素丰度曲线中的铁峰就是在这个过程中生成的。

碳、氧和硅燃烧发生在恒星演化过程的晚期。质量足够大的恒星能够稳定地进行碳、氧和硅燃烧，而中等质量恒星的这种燃烧往往以超新星爆发的形式进行，爆发将恒星中合成的元素发射到周围的空间。

由于在铁峰以上的核中每个核子的结合能随原子量增加而减小，这种核的聚变反应变为吸热反应。因此，当恒星核心的硅燃尽以后，它不能再依靠核聚变放出能量来阻止引力收缩。恒星按其质量的不同，在核聚变停止以后，将分别演化为白矮星、中子星和黑洞。

3. s 过程、 r 过程和 P 过程

比铁更重的原子核，由于它们的平均结合能随其质量数增加而减小，而且有较强的库仑斥力，因此，它们不大可能由核聚变或俘获 α 粒子和质子来生成。1954 年，（卡梅伦）首先指出，这些原子核可以在红巨星中由铁族原子核俘获中子得到。据他讲，他想到这点是受了（梅里尔）在红巨星里发现元素钨的谱线的启发。所需的中子是在氢燃烧过程中，通过发生在 ^{13}C ， ^{17}O ， ^{21}Ne 和 ^{25}Mg 等核上的 (α, n) 反应产生的。其中，第一个反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 是由（格林斯坦）和（卡梅伦）分别独立地提出的，其它的反应是（福勒）和他的合作者发现的。应当指出，在元素核生成理论中，发现这些恒星中子源也是很关键的一步。有趣的是，正因为 ^4He 是不稳定的，这些反应产生的中子才没有被大量存在的 ^4He “吃光”。这样，曾使早期元素起源理论发生障碍的质隙，竟成了新理论成立的不可缺少的条件。

但是，仅有上述的中子俘获过程还不足以解释元素丰度图中铁峰以上 $N = 50, 82$ 和 126 附近出现的引人注目的双峰。1956 年，（福勒）和他的合作者进一步指出，实际上存在两种中子俘获过程：一种是（卡梅伦）提出的，发生在红巨星内部，那里的中子通量比较微弱，在反应产物 β 衰变以前，一个铁族原子核通常只能俘获一个中子，他们称其为 s （慢）过程；另一种是（福勒）等发现的，发生在具有强中子通量的情况下，例如超新星爆发的时候，他们称其为 r （快）过程。在 r 过程中，一个铁族原子核在 $10-100$ 秒内最多可以俘获 200 个中子。大多数重中子元素就是在 r 过程中生成的。关于 r 过程的发现有一段有趣的故事：1956 年春，比基尼岛氢弹试验的资料发表以后，人们发现在强中子流作用下可以产生超铀元素 ^{254}Cf 。（季·阿·伯比奇）注意到一个奇妙的巧合—— ^{254}Cf 的放射性衰

变和超新星的特性衰变有相同的平均寿命（ ~ 55 天）。这启发他们发现了 γ 过程。（霍伊尔）指出：“ B^2FH 的工作正是从此开始的。”

在超新星爆发中还发生另一类核反应——快质子俘获过程（即 P 过程），它包括 (P, γ) ， (P, n) ， (γ, n) 和 $(n, 2n)$ 反应以及正电子俘获。比较稀少的丰质子重元素就是在 P 过程中生成的。

4. x 过程

在轻元素中只有 D ， ^3He ， Li ， Be 和 B 不能在恒星内部生成。这是因为，在恒星内部的高温下，它们即使生成了，也会在 α 粒子和质子轰击下很快蜕变掉。（福勒）等人指出，这些稀有轻元素只能在低温低密度的恒星表面生成。（依·姆·伯比奇）和（季·阿·伯比奇）在撰文庆贺（福勒）七十寿辰时说，当时他们只是感到需要有一个过程来生成这些稀有的轻元素，但是他们并不清楚这是什么样的过程，因此称其为 x 过程。现在我们知道，这些元素中的 D ， ^3He 和 ^7Li 主要是在膨胀宇宙的低密度的早期阶段中生成的； ^6Li ， Be 和 B 是由宇宙射线在 ^{12}C ， ^{14}N ， ^{16}O 和 ^{20}Ne 等原子核上引起的散裂反应中生成的，又称为 l 过程。

（福勒）和他的合作者对元素核生成理论的重大贡献不仅是提出了上述几类核反应过程，他们还通过一系列的实验测量和理论计算定出了这些核反应的速率，去解释恒星的能量辐射，并拟合出元素丰度曲线。由于这些核反应都是在很低能量下进行的，因此这是一项相当困难的工作。例如，在红巨星中发生的核反应 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 就是在 α 粒子的相对运动能量约为 0.3 MeV 的情况下进行的。而在当时（凯洛格）辐射实验室的静电加速器上能够得到的 α 粒子束流的最低能量是 1.4 MeV 。在这样低的能量下测到的上述核反应的截面只有 1 nb ，将其外推到 0.3 MeV ，截面将下降到约 10^{-8} nb 。因此，要得到精确的结果，不仅要求实验测量的精度很高，而且要尽量减少因外推而引起的误差。1967 年，（福勒）等导出一个核反应速率的解析表达式。利用这个公式，可由实验室里测量到的核反应截面，比较精确地推出相应的天体核反应的速率，从而成功地解决了上述难题。

（福勒）教授因创立和发展元素核生成理论，以及领导（凯洛格）辐射实验室所取得的卓越成就，荣获了 1983 年度诺贝尔物理学奖。

元素核生成理论是天体物理发展史上的一块里程碑。它不仅成功地解决了元素起源问题，而且帮助天文学家弄清了在赫罗（赫茨普龙-罗素）图中恒星演化的方向以及中等质量恒星的最终归宿是超新星爆发等问题，从而完善了恒星演化理论。