

化学元素的起源

赵永恒

(中国科学院国家天文台 100012)

在古代，无论中国还是外国，都有人在不断地研究炼金术，企图利用廉价的材料炼制出黄澄澄的金子来。现代科学表明炼金术仅仅是在化学层面上来操作，通过化合和分解来改变分子，而无法改变原子的属性，因此炼金术是必然会失败的。

要想由其他物质来产生金子，必须通过裂变反应或聚变反应这样的核反应才有可能。但是这种核反应方法的成本极高，产生的金子价值远远低于所要使用的器材、原料、能量所需的费用，是绝对赔本的买卖。而自然界的金子则是在宇宙这个“炼金炉”中炼制出来的。

大家知道，地球上的物质是由化学元素(以下简称元素)所组成的。目前已知的元素有 118 种，其中 94 种是在自然界中存在的，其他是人工合成的。关于元素起源这一科学问题，是在 20 世纪天体物理学的发展过程中逐步得到解决的。

原子核是由质子和中子所组成的，原子核中的质子数目就是元素的原子序数，也称核电荷数。原子核中有相同的质子数但有不同的中子数，则称之为同位素。而原子核中质子和中子的数目总和是原子量。

1. 宇宙大爆炸的产物

按照宇宙大爆炸标准模型，宇宙在大爆炸初期是一个高温高密的

火球，其中包含着极大的能量。在宇宙的极早期，先后形成了暗能量和暗物质，这些东西一直保留到宇宙的终结。

根据爱因斯坦的质量能量公式，宇宙大爆炸中的能量可以产生出成对的正物质和反物质，而正物质和反物质又碰在一起而“湮灭”，将能量放出来。这时的宇宙像一锅煮沸的汤，正物质和反物质不停地生生灭灭，这被称之为“粒子汤”。

随着宇宙的膨胀，温度不断地下降。到了宇宙大爆炸发生后的一秒钟时，温度下降到一百亿度，这

时成对的正物质和反物质都湮灭成了能量，形成了光。然而，由于正物质比反物质略微多了亿分之一，因此宇宙中最终留下了极少量的正物质，就是质子、中子和电子。

宇宙大爆炸后的三分钟，温度下降到七亿度，这时中子和质子结合形成氦原子核，剩余的质子即是氢原子核。此时，宇宙中包含了 75% 的氢元素、25% 的氦元素和极少量的锂元素。

这是因为自由中子的半衰期为约 10 分钟，只有中子与质子组成原子核才能不衰变。质子是氢原

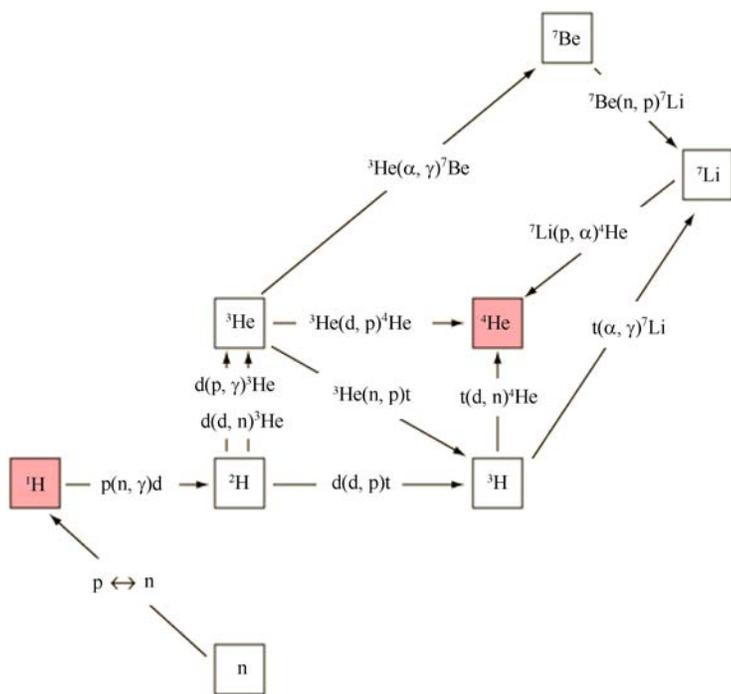


图 1 原初核合成的反应过程。其中 γ 为光子、 p 为质子、 n 为中子、 d 为氘、 t 为氚、 α 为氦

子核，再结合中子成为氘和氚的原子核，氘和氚与质子反应形成氦3和氦4，并可进一步生成锂原子核（图1）。

因此，元素周期表的头三个元素：氢、氦、锂就是在宇宙大爆炸中产生的，这被称为“原初核合成”。对宇宙中氢、氦、锂等元素的含量（丰度）进行观测（图2），结果与宇宙大爆炸理论模型的预言是一致的，证明原初核合成的理论

是正确的。同样，对这样元素的丰度的测量，也可以很好地限定宇宙学模型的理论参数，比如宇宙中重子物质的比例、中微子种类数等。

2. 恒星炼金炉

在宇宙大爆炸后30万年，温度下降到3000度，电子和原子核结合成为原子，形成了氢原子和氦原子等组成的气体。这时，宇宙就变得透明了，原来由正反物质湮灭而形成的光就可自由地辐射出来，

形成了宇宙背景辐射。

到了宇宙大爆炸后5亿年，在引力的作用下，由氢原子和氦原子等组成的气体不断收缩凝聚，形成了星系，而星系中的气体又凝聚成恒星。

(1) 氢燃烧

在恒星形成时，组成恒星的气体不断向中心聚集，恒星中心的温度越来越高。当中心温度达到1000万度时，就发生氢聚变为氦的核反应，称之为“氢燃烧”。氢燃烧的开始标志着恒星的正式诞生，此时氢燃烧产生的能量与气体的引力达到平衡，恒星进入主序阶段。

对于第一代恒星来说，氢燃烧的核反应是pp链反应，即质子-质子反应（图3）：

由于提出氢燃烧是恒星的能源机制，美国物理学家贝特获得1967年诺贝尔物理学奖。在氢燃烧时会放出中微子来，美国天文学家戴维斯因长期致力于探测太阳中微子而获得2002年诺贝尔物理学奖。

氢燃烧是恒星生命中的主要阶段，不同质量的恒星其氢燃烧的时间也不一样，质量越大的恒星其寿命也越短。这是因为质量越大的恒星，其向中心收缩的引力就越强，因此恒星中心的核反应要更加剧烈才能抵抗住引力的作用，使得整个恒星达到平衡。实际上，向心的引力越强，中心的温度就越高，中心的密度也越大，高温高密条件下的核反应也就越剧烈，恒星核心的“核燃料”氢元素消耗得越快，恒星的

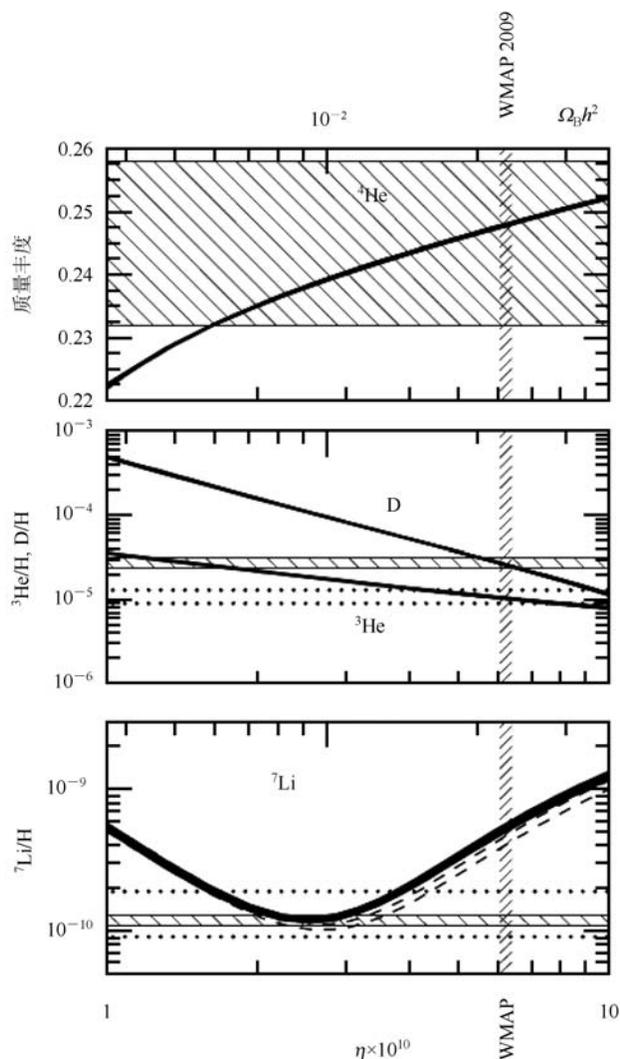


图2 原初元素的丰度。其中横坐标 η 是重子数和光子数之比，纵坐标从上到下分别是氦的质量丰度、氦3和氘核的数密度、锂核的数密度（与氢核的数密度之比）。此外， Ω_b 是重子能量密度与特征能量密度之比， h 是约化哈勃常数。图中水平的阴影和虚线为实测数据所给出的范围，竖直的阴影是宇宙微波背景卫星WMAP所给出的测量结果

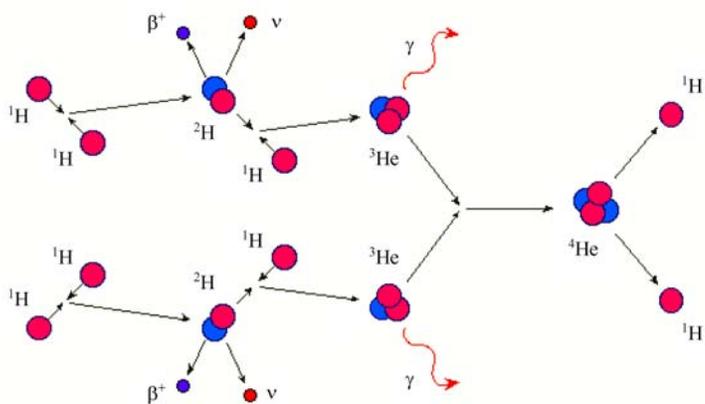


图3 氢燃烧的 pp 链反应

寿命也就越短。

对于在氢燃烧阶段的恒星（即主序星），其颜色基本上和恒星质量相对应，偏红色的恒星的质量偏小，偏蓝色的恒星的质量偏大。像我们的太阳是黄色，属于小质量恒星。下表给出各种恒星类型所对应的颜色以及典型质量和相应的寿命。

类型	颜色	质量	寿命
O	蓝白	40 太阳质量	300 万年
B	蓝白	6.5 太阳质量	8000 万年
A	白	2.5 太阳质量	15 亿年
F	黄白	1.3 太阳质量	50 亿年
G	黄	1 太阳质量	100 亿年
K	橙	0.7 太阳质量	350 亿年
M	红	0.2 太阳质量	2500 亿年

(2) 氦燃烧

恒星演化到晚期，其核心的氢聚变为氦，中心的氢燃烧停止。没有了能量的支撑，恒星气体在引力的作用下向中心收缩，随着中心温度越来越高，中心氦气体之外的氢气体开始氢燃烧，当中心温度达到1亿度时，中心的氦开始聚变为碳，这就是“氦燃烧”，此时恒星进入红巨星阶段。

氦燃烧是通过 3α 过程进行，即3个氦原子核聚变为1个碳原子核（图4）。

(3) 碳燃烧和硅燃烧

对于小质量恒星，如太阳，在氢燃烧结束后，其外壳被抛掉形成行星状星云，而核心则凝聚成白矮星。

对于大质量的恒星，在氢燃烧

之后还有一系列的核聚变反应。当氢燃烧结束后，恒星中以碳元素为主的核在引力作用下不断收缩，温度不断升高，最终开始碳燃烧。如此循环往复，在恒星核心的“炼金炉”中，把碳炼成氦和氧，氦炼成氧和镁，氧炼成硅和硫，硅炼成铁和镍。这些核反应主要通过 α 过程实验的（图5和图6），参加核反应的都是 α 元素，及其原子核可以看作是由若干个氦原子核所组成的。

例如，一个20个太阳质量的恒星，氢燃烧的持续时间是700万年，氦燃烧是50万年，碳燃烧是600年，氦燃烧是1年，氧燃烧是半年，而硅燃烧仅为1天。

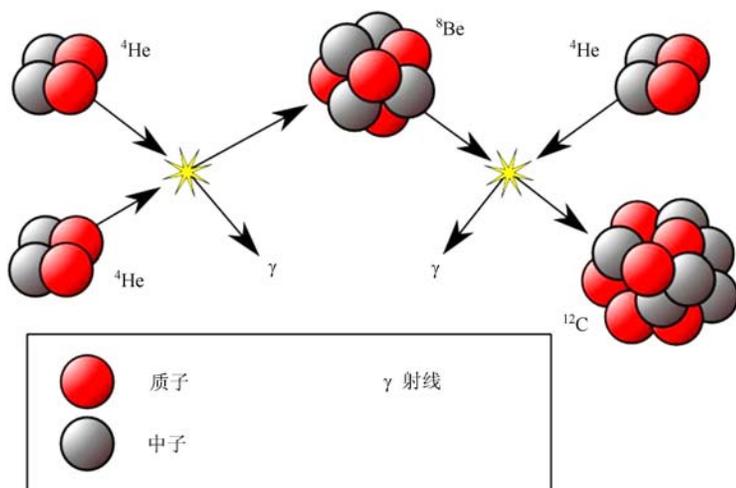


图4 氦燃烧的核反应

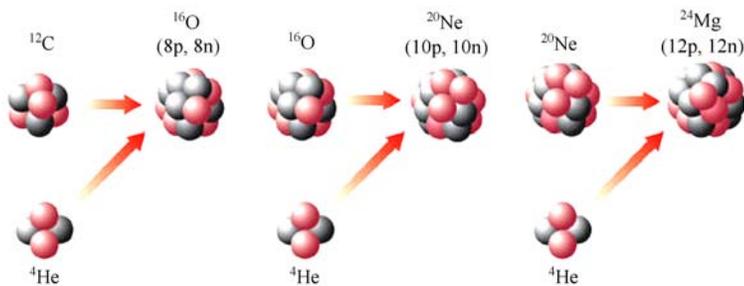


图5 核合成的 α 过程

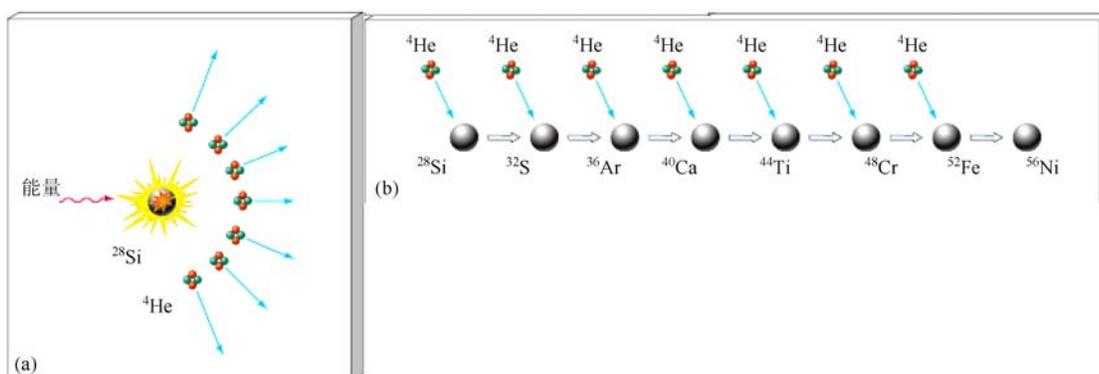


图6 硅燃烧

这样，大质量的恒星可以在其核心炼成从氢直到铁的各种化学元素，其核心就成了元素的“炼金炉”。恒星的核心成了“洋葱”形状，中心是铁核，外面是一层层的核聚变反应，外层的核聚变产物就是里层正在燃烧的元素（图7）。

3. 火球余烬

大质量恒星演化在硅燃烧结束时，其核心是由铁族元素组成的。由于铁族元素的结合能最高（图8），再无法通过聚变反应或裂变反应产生能量，这样恒星的核心在引力的作用下向中心坍塌，强大的引力把所有原子中的电子给压

进了原子核中，最后都变成了中子。核心的物质继续向心坍塌，最后形成中子星或是黑洞。在铁核的中子化过程中放出大量的中微子，其所带的能量将恒星的外壳爆开，这就是超新星爆发现象。日本物理学家小柴昌俊因探测到1987年超新星SN1987A在爆发时产生的中微子而获得2002年诺贝尔物理学奖。

在超新星爆炸过程中，由于恒星核心有着大量的高能中子，这些中子与各种元素的原子核进行核反应，这种核反应叫做r过程，即快中子过程。r过程是指一个原子核被打入多个中子，形成不稳定的富

中子同位素，这些同位素衰变后形成新的元素。也就是说，在超新星爆发过程中形成了从铁直到铀的各种元素。像金和银这样的贵金属就是在超新星爆发中产生的，最近的研究表明，形成银元素的低质量超新星要比形成金元素的高质量超新星数量更多，分布更广，这就解释了为什么地球上银比金更多。

除了超新星的r过程以外，在恒星的氢燃烧也可以通过慢中子过程（s过程）产生铁以后的元素。这就是在恒星中的元素核合成理论（图9），该理论的创始人之一美国物理学家福勒获得了1983年的

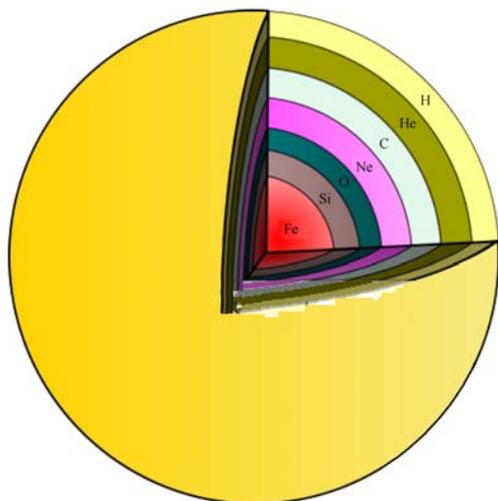


图7 超新星爆发前的恒星核心

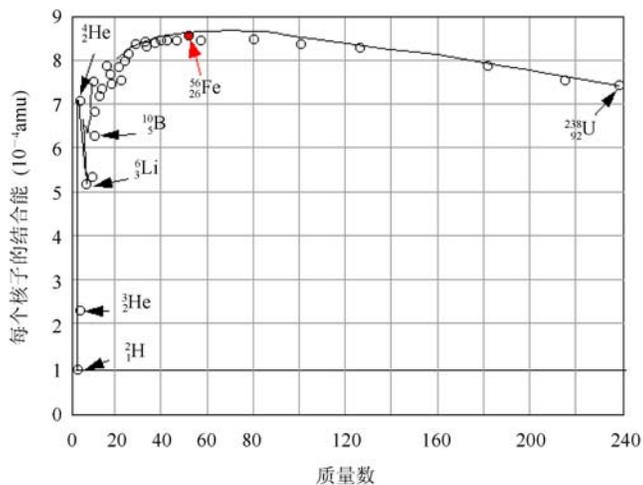


图8 元素的结合能

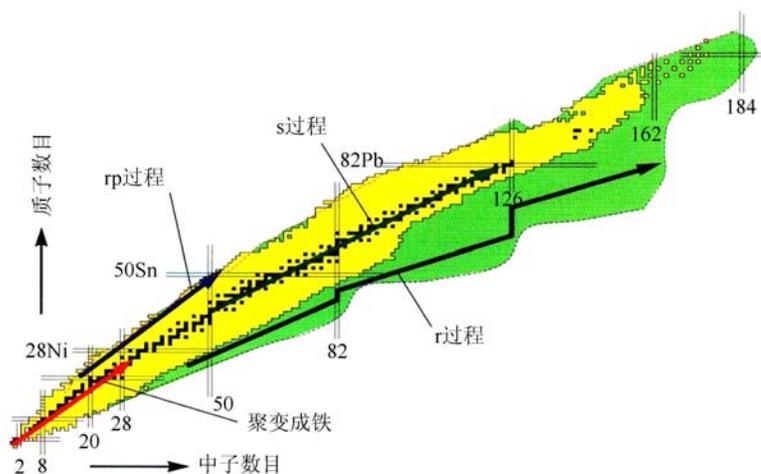


图9 元素核合成的主要过程

诺贝尔物理学奖。

就这样，恒星从星际气体中诞生，死亡时再将大部分物质还回星际气体中，而新的恒星又将从星际气体中诞生。在这个恒星的生死

循环中，恒星的核就如同“炼金炉”一样，不断地把产生化学元素。大质量的恒星可以在其核心中产生直到铁的元素，而在它死亡时的超新星爆炸中，可以再产生出直到铀

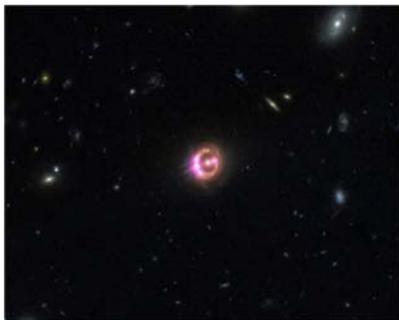
元素的自然界所存在的全部化学元素，并通过爆炸将这些化学元素抛散到星际空间中去。以后，从星际空间中再诞生的新一代恒星就拥有了所有这些化学元素。我们的太阳至少是第二代恒星，在太阳诞生以前肯定发生过超新星爆炸，唯有这样，才有可能在地球上找到从氢到铀的94种化学元素。

到宇宙大爆炸后八十多亿年，我们的太阳系才诞生。正因为有了硅和铁等元素，才形成了地球这样的行星；正因为有了碳和氧等元素，地球上才诞生了生命，才进化出了我们人类；正因为有了这94种元素，才形成了我们所看到的丰富多彩的自然界的一切。

科苑快讯

黑洞在星系碰撞中成长

天文学家知道多数超大质量黑洞会随着时间的推移由小到大。不过这种成长是怎样发生的？研究者测量一个类星体（61亿光年远处一个星系的闪亮核心）中超大质量黑洞的旋转情况后，认为黑洞很可能是通过其所在星系与其他星系合并时成长的。研究者能够研究类星体的细节，要归功于引力透镜的放大效果，其前方的大质量星系团



导致其格外明亮。

研究者分析来自类星体的X射线后，计算出黑洞旋转速度非常快。如果黑洞以四面八方的气流为食，其旋转速度将比观测到的慢很多，研究者在《自然》(Nature)网站上做了报告。换句话说，黑洞随时间流逝变为超大质量所摄取的气体降低了各个方向的旋转速度和吸积速度。所以就像旋转木马一样，沿着旋转方向的推力使其转得越来越快。在该黑洞演化历史中，其所在星系可能经历与其他星系的合并和碰撞。每次合并，新星系都会纳入黑洞的吸积盘中旋转，黑洞最终得以成长。

(高凌云编译自2014年3月5日 www.sciencemag.org)

虾蛄的色彩视界

大多数人知道人类基于三种光感受器的色彩视觉，简单地就说



是红、绿、蓝。虾蛄的光感受器却多达12个不同的类型，每个都覆盖从深紫外到远红外光的一个狭窄范围。

这是什么原因呢？澳大利亚昆士兰大学的东尼(Hanne Thoen)和同事做了解释，虾蛄扫描物体时，通过受体接受信号的时间先后编码图像颜色，这与用于遥感的推扫式光谱分析器类似。这种模式简化了虾蛄大脑的处理过程，是动物视觉上的一种独特图像编码方式。

(高凌云编译自2014年2月24日《欧洲核子中心快报》)