

# 一些轻核素的起源

王 连 璧

宇宙中化学元素的起源问题,是核物理、粒子物理以及天体物理方面的科学家们所探索、研究的一个问题。本世纪40年代中后期,伽莫夫等人曾提出在冷却的初始宇宙中通过中子俘获链产生所有元素的可能性;自然界中缺少质量数等于5和8的稳定核素,构成了这一方案的致命弱点。1957年,霍伊尔等人提出化学元素是在恒星演化过程中通过核反应产生的想法,这一想法在考虑从碳到铀的重核时被证明是正确的,但是在考虑轻核时却遇到了困难。因为根据核物理和天体物理知识知道,轻核素在恒星内部是短寿命的,在恒星内部的高温下轻核素将聚合为其他核素。那么宇宙中的轻核素是来源于何处呢?按照现在的观点,宇宙大爆炸后的某一时期合成了 $^2\text{D}$ 、 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 和 $^7\text{Li}$ ,其后宇宙物质的快速冷却使它们得以幸存下来,而星系宇宙线使重核素分裂,在星系空间中直接产生 $^6\text{Li}$ 、 $^7\text{Li}$ 、 $^9\text{Be}$ 、 $^{10}\text{B}$ 和 $^{11}\text{B}$ 。恒星风和恒星爆炸也可能把恒星内部产生而未来得及聚合的 $^3\text{He}$ 、 $^4\text{He}$ 和 $^7\text{Li}$ 喷射到宇宙空间中。下面具体谈一下宇宙中一些轻核素的起源。

## 1. $^2\text{D}$

$^2\text{D}$ (氘核)是宇宙大爆炸时核合成的第一个核素。大爆炸后100秒左右,宇宙物质的温度约为10亿度, $^2\text{D}$ 与核子解耦,通过 $n+p\rightarrow^2\text{D}+\gamma$ 反应使 $^2\text{D}$ 的数目增加到 $D/H=10^{-3}$ 左右。 $^2\text{D}$ 不是在正常的恒星中合成的,因为正常恒星中合成的 $^2\text{D}$ 将转变为 $^4\text{He}$ 和其他核素。 $^2\text{D}$ 的另一来源是星系宇宙线引起 $^4\text{He}$ 分裂,估计这一来源的贡献仅仅是现在 $^2\text{D}$ 丰度的千分之一。

$^2\text{D}$ 在星系演化中系统地破坏。原始太阳星云中 $D/H=(2.6\pm 1.0)\times 10^{-5}$ ,而哈勃卫星观测到现在星际气体中 $D/H=(1.65\pm 0.25)\times 10^{-5}$ 表明, $^2\text{D}$ 的丰度将随时间的推移而减小,

但是从已有的观测数据估计,从太阳形成到现在 $^2\text{D}$ 的消耗大概不到一半。要改善这一估计,需要进行含重元素少的星系中 $^2\text{D}$ 丰度的测量。

## 2. $^3\text{He}$

宇宙大爆炸核合成和恒星内部的核反应都形成相当数量的 $^3\text{He}$ 。

在宇宙大爆炸后,当 $D/H$ 达到 $10^{-3}$ 左右时, $D+p\rightarrow^3\text{He}+\gamma$ 反应生成 $^3\text{He}$ 。在恒星内部 $^3\text{He}$ 是氢燃烧的中间产物。它主要产生在恒星外层,那里温度不太高,不致于使 $^3\text{He}$ 进一步反应而生成 $^4\text{He}$ 。随着恒星向红巨星演化,一部分 $^3\text{He}$ 被燃烧为 $^4\text{He}$ ;另一部分对流到恒星表面由恒星风喷射到宇宙空间中。在恒星演化的不同阶段也可能还有其他过程进一步产生相当数量的 $^3\text{He}$ 。据知,星系宇宙线对 $^3\text{He}$ 丰度的贡献是不值得注意的。

## 3. $^4\text{He}$

$^4\text{He}$ 产生于宇宙大爆炸核合成,也产生于恒星内部的核反应。已知的天体中,没有一个天体上氦丰度比 $^4\text{He}/\text{H}$ 低于23%。这形成一种意见:认为宇宙大爆炸核合成产生 $^4\text{He}$ 质量份额 $^4\text{He}/\text{H}\approx 23\%$ ,而主序恒星中的效应增加上述值到30%左右。这意味着恒星中约7%的H通过各种反应而转变为 $^4\text{He}$ ,相当于每个核子释放约0.5MeV的能量。但如按这一值估计星系发光度,至少应是现在星系发光度的5倍。为什么会出现这一矛盾尚待研究。

## 4. $^6\text{Li}$

$^6\text{Li}$ 是纯星系宇宙线反应产物,它的绝大部分来自宇宙线中的质子引起 $^{16}\text{O}$ 和 $^{12}\text{C}$ 的分裂。 $\alpha+\alpha$ 反应也有一定的贡献。

## 5. $^7\text{Li}$

大爆炸核合成、恒星内部的核反应以及星系宇宙线核反应都产生 $^7\text{Li}$ 。重元素丰度低的

# 温伯格谈还原论

江向东 摘译

对还原论的看法因人而异,据我推测,各种还原主义思想的一个共同特点是层次意识,即在越来越深的层次上解释自然现象的一种向往。有些真理可以归并入其它真理,比如化学可以并入物理,从层次上看,前者不如后者基本。基本粒子物理学家特别容易被人看成还原论者。

我自视为还原论者,但我并不认为基本粒子物理的问题,在科学中即便物理学中,是唯一有趣和深奥的。我也并不认为,化学家应该放下手头正做的其它事情而致力于求解各种分子的量子力学方程;生物学家应该停止所有有关植物和动物的思考而只考虑细胞和脱氧核糖核酸(DNA)。在我看来,还原论不是研究课目的指针,而是对自然界本身的一种看法。它或多或少象是这样一种观念,科学原理之所以取其自身的这种形式,是因为更深刻的科学原理所致(有些是因为历史上的偶然事件所致),而且,所有这些原理都能追溯到一套有着简单联系的规律。纵观科学历程,看来探索这些规律

的最好途径,莫过于研究基本粒子物理。

本世纪的前半叶的基本粒子物理,主要是电子和光子物理,对我们理解物质存在的所有形式,起过巨大的、毋庸置疑的作用。当今基本粒子物理上的诸般发现,已经对宇宙学和天文学产生重大影响。例如,应用我们的基本粒子知识,可以计算宇宙最初几分钟的化学元素的生成情况。没有人能用其它办法得出这样的结论。

我们知道,生物的演化过程,已经可以人为地制作,这是因为利用了DNA和其它分子的性质。任一分子的性质之所以是这样,是因为该性质是由电子和原子核的性质以及电磁力所决定的。这些东西的存在形式为何如此?这个问题从基本粒子的标准模型中已经部分地得到了解释。而如今我们想走下一步,想进而解释标准模型和相对论原理,以及其它基本的对称性。可见,对基本粒子的研究,将使我们比较接近于对大自然的全面了解。

(摘自 S. 温伯格原著《终极理论之梦》)

恒星中  ${}^7\text{Li}$  的丰度为  ${}^7\text{Li}/\text{H} \approx 1.2 \times 10^{-10}$ , 与重元素丰度无关。这表明宇宙大爆炸之后最初十亿年内星系气体中的  ${}^7\text{Li}$  丰度是由宇宙大爆炸核合成贡献的。当星系的重元素质量份额变得大于千分之一(现在太阳值的十分之一)时,不明身份的恒星来源使  ${}^7\text{Li}$  丰度增大了一个数量级。星系宇宙线产生的  ${}^7\text{Li}$  不能统治其丰度曲线。

## 6. ${}^9\text{Be}$ 和 ${}^{10}\text{B}$

恒星中  ${}^9\text{Be}$  和  ${}^{10}\text{B}$  的丰度随恒星重元素含量的减小而降低,即形成越早的恒星中  ${}^9\text{Be}$  和  ${}^{10}\text{B}$  越少。这表明  ${}^9\text{Be}$  和  ${}^{10}\text{B}$  是纯星系宇宙线产物。它们是  ${}^{12}\text{C}$  和  ${}^{16}\text{O}$  被轰击分裂而产生的。

## 7. ${}^{11}\text{B}$

${}^{11}\text{B}$  也产生自星系宇宙线核反应。但是标准星系宇宙线模型预言  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B} \approx 2.5$ , 而观测值  ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B} = 4$ 。这表明需要另外的  ${}^{11}\text{B}$  来源。可能有高能光子、高能电子或高能中微子在  ${}^{12}\text{C}$  上打出一个质子而生成  ${}^{11}\text{B}$ 。星系宇宙线中能量在 MeV 量级的质子的通量较高似乎与此有关。当然,也不排除在早期太阳星云中同位素分化的可能性。在 C1 球粒状陨石中  ${}^{11}\text{B}$  丰度高于恒星平均值进一步支持以上假说。

上面谈的一些轻核素的起源,是根据现有的观测数据和宇宙学理论得出的。随着新观测数据的获得和新宇宙学理论的提出完全有可能改写。