

## 核天体物理学

姜承烈 程业浩

(中国原子能科学研究院)

**摘要:**本文介绍了用核物理学的内容去研究宇宙和星体是如何形成和发展的,特别是宇宙中元素分布的形成和发展的情况;以及当前天体物理研究中对核物理的需要。

近些年来,核物理学和天体物理学的结合,形成了一门新兴的科学:核天体物理学。这是当前国际上的一个“热点”。

三年一度的国际核物理会议上,总有开场重点报告(Keynote talks)。其最近三届的情况是这样的:1983年会议,D.A. Bromely 报告了核物理全貌;1986年是两个,B. Mottelson讲了核结构,E. Vogt讲了核反应;1989年也是两个,G. E. Brown的核物理和宇宙<sup>[1]</sup>,D. H. Wilkinson的地球范围内的核物理。也就是说,到了1989年,Keynote talks已超出了传统核物理的领域。我们认为这是个启示,值得注意。

近年来,获得诺贝尔物理学奖金的研究,有不少是和天体物理有关的。1974年,M. Ryle因综合孔径射电望远镜研究,A. Hewish因脉冲星的发现,分获诺贝尔物理学奖金。1978年,A. Penzias和R. W. Wilson因宇宙微波背景的发现共获诺贝尔物理奖。1983年,W. A. Fowler的元素起源和S. Chandrasekhar的恒星的演化瓜分了当年的诺贝尔物理奖。W. A. Fowler的工作可以说是核物理在天体物理中应用的一个典范,也是核天体物理学逐渐形成的一个标志。

现在,有关核天体物理学的国际会议、暑期讲习班及综合评述与特约文章都很多。国际上已经有一些核物理设备及研究人员转向了或准备转向研究此领域。这个领域实际

上主要还是核物理的内容。为此,我们向读者介绍一下这个新领域。扼要地讲一下核天体物理学是如何用核物理学的内容去研究宇宙的形成与发展的,特别是宇宙元素分布形成与发展的情况。为之,我们先谈有关宇宙和星系的发展,然后谈及当前天体物理研究中对核物理的需要。

### 一、大爆炸

宇宙的大爆炸理论,创始于40年代,到60年代已为大多数研究者所承认。

1946年以前,发现了如下事实:一是Slipher发现银河系正在远离我们而向外膨胀<sup>[2]</sup>,愈远的地方离开速度愈大,即速度 $v$ 正比于距离 $R$ , $v \propto R$ ,Hubble把它定则为 $v = H_0 R$ <sup>[3]</sup>,从 $H_0$ (Hubble常数)可以推出宇宙的年龄约为 $15 \times 10^9$ 年;二是宇宙间(诸星球上)各种元素的相对分布基本上是一样的。各元素的丰度如图1曲线POP.I所示。各种长寿命的天然放射性同位素的相对分布,是与假设从某一时刻开始衰变相一致的。面对这些事实,当时,人们假设在这个开始时刻宇宙是处于一个高温高密度的平衡状态,上述丰度曲线即由核的结合能来决定。这个假设,实际上已包含了大爆炸的思想。

1946—1948年,G. Gamow发表了三篇

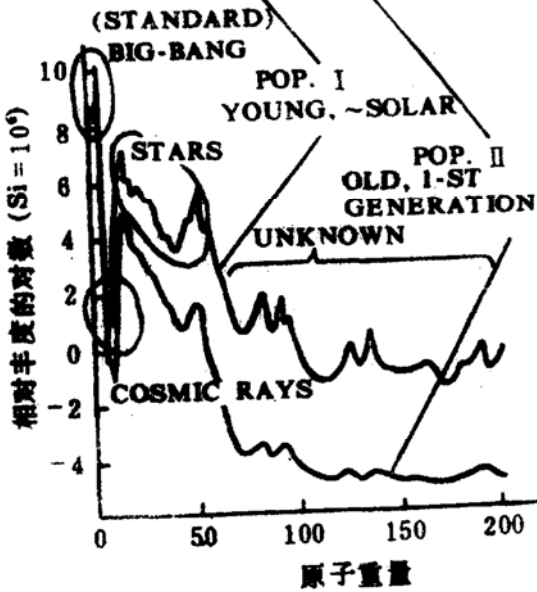


图1 银河系及地球上各元素的丰度

文章,为此理论奠定了基础<sup>[4]-[6]</sup>。其主要论点认为:过去为了解释丰度曲线,假设宇宙存在过一个很高温度和密度的平衡态,并由核结合能所决定。实际上由于核结合能在一级近似下是原子量的线性函数,而平衡态的假设无法解释这种丰度曲线,必需假设在一个有限的时间范围里曾存在某种非平衡态过程。这实际上是大爆炸理论的先驱。

大爆炸理论所以被人们承认,并认为优于平衡态理论,因为它能解释如下事实:Slipher—Hubble定则、He在宇宙中的丰度为~20%、宇宙微波背景、类星体的数目、射频频源和减速参数 $q_0 \equiv -RR / \dot{R}^2$ 等。

### 1. 标准大爆炸模型 (Standard Big Bang Model)<sup>[7]</sup>

该模型有两个基本假设:狭义相对论在

宇宙的任何局部是成立的,即所谓的等价原理是有效的;大爆炸(其时间取为零时间)后的短时间内(约小于 $10^{-10}$ s)宇宙曾处于一个足够高温的状态,使得当时出现的所有粒子处于统计平衡状态,其温度 $T > 10^{11}$ K(核合成时, $T \sim 10^9$ K),因此只需研究此时以后的情况。该时刻以前的历史,则可以先不管它。

为了描述宇宙的发展,引入膨胀率方程、能量守恒和重子数守恒三个基本方程:

$$\frac{dV/dt}{V} = (24\pi G\rho)^{1/2} \quad (1)$$

$$\frac{d(\rho V)}{dt} + \frac{P}{c^2} \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_b V) = 0 \quad (3)$$

这里 $V$ 为体积, $t$ 为时间, $G$ 为万有引力常数, $\rho$ 为各种粒子的密度总和, $P$ 为压力, $c$ 为光速, $\rho_b$ 为重子(质子、中子等)密度。由这些假设和方程可以推得开始时或开始后不久的密度总和:

$$\rho \approx \rho_\gamma + \rho_\nu + \rho_e, \rho \gg \rho_b.$$

这里 $\rho_\gamma$ , $\rho_\nu$ 和 $\rho_e$ 分别是光子,中微子和电子的密度。由于不断地膨胀,其结果是冷却。到后来, $\rho_b \sim \rho \propto R^3$ ,主要是重子了, $R$ 是半径。该理论的计算结果示于图2和表1。图3给出了宇宙随时间推移和温度下降而演化的基本情况。

下面,先介绍一下某种粒子保持平衡和失去平衡的概念,然后根据图2和图3就宇宙随温度变化而演化的情形作一简要描述。

这里有一个方程:

$$\tau \sim (n\sigma v)^{-1} > t \quad (4)$$

这里 $n$ , $\sigma$ 和 $v$ 分别是粒子的密度,反应截面和速度。 $(n\sigma v)$ 是该粒子引起反应的反应率,其倒数是反应时间 $\tau$ ,即燃烧时间。 $t$ 是宇宙膨胀时间,即宇宙的年龄。当 $\tau > t$ ,则该粒子已燃烧得差不多了,即失去了平衡。

现以中子质子处于平衡状态为例,说明保持平衡的概念。如果中子和质子的丰度分

别为  $x(n)$  和  $x(p)$ , 且满足下述方程:

$$\frac{x(n)}{x(p)} = \exp\left(-\frac{(M_p - M_n)c^2}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{15.01}{T_9}\right) \quad (5)$$

则叫做处于平衡状态。这里  $M_p$  和  $M_n$  分别是质子和中子的质量,  $k$  是波尔兹曼常数,  $T_9$  表示以  $10^9\text{K}$  为单位的温度。

表 1 早期宇宙的热力学性质 ( $10^3 \geq T_9 \geq 10^{-5}$ )

密度 ( $\text{gcm}^{-3}$ )	温 度
$\rho_\gamma = 8.42 T_9^4$	$T \propto R^{-1}$ (处于 $T_9 \sim 3$ 外)
$\rho_\nu = \frac{7}{4} \rho_\gamma (T_\nu / T)^4$	$T_\nu \propto R^{-1}$
$\rho_e = \frac{7}{4} \rho_\nu (T_9 \gg 3)$	$T_\nu \propto T (T_9 \gg 3)$
$\ll \rho_p (T_9 \ll 3)$	$= T / 1.40 (T_9 \ll 3)$
$\rho_b = 2.75 h T_9^3 (T_9 \gg 3)$	$T_9 = 10.4 t^{-1/2} (T_9 \gg 3, t \text{ (s)})$
$= h T_9^3 (T_9 \ll 3)$	$= 13.8 t^{-1/2} (T_9 \gg 3, t \text{ (s)})$

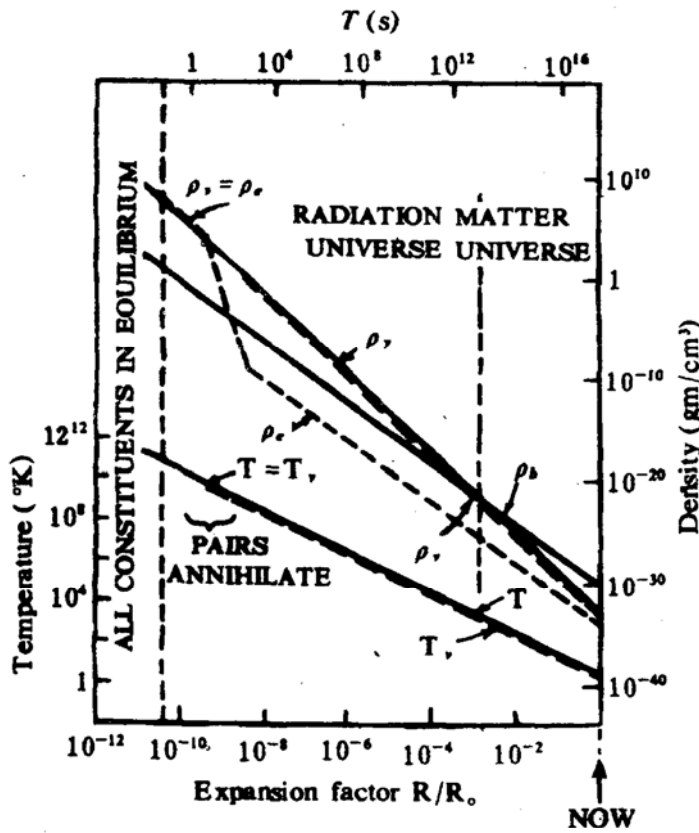


图 2 标准模型中各种粒子的密度对温度的演变

从大爆炸开始(零时间),到多少微秒,宇宙处于高温,其温度高达  $10^{12}\text{K}$ ,当时出现的所有粒子的分布均处于平衡状态。这是粒子物理研究的范围。随着时间的推移,宇宙的体积不断地膨胀,温度不断地下降,由于燃烧(引起反应)和膨胀,各种粒子的密度将不断地减小,但各种粒子减小的速率是不一样的:有的减得快,有的减得慢,因而有的粒子

消失了(烧光了),同时又可产生另外一些粒子。在  $10^{11}\text{K}$  ( $kT = 10\text{MeV}$ ) 时,可产生大量的  $e, \nu, \bar{\nu}, \gamma$  和少数核子,  $\rho \gg \rho_b$ 。这时,  $t \sim 10^{-4}\text{s}$ 。在  $10^9\text{K}$  时,  $\nu$  失去了平衡,即烧得差不多了。核子也很难保持平衡。在  $3 \times 10^9\text{K}$  时,  $e^+$  与部分  $e$  湮灭掉了。在  $\sim 10^8\text{K}$  时,出现了核。在  $\sim 4 \times 10^8\text{K}$  时,出现了原子。

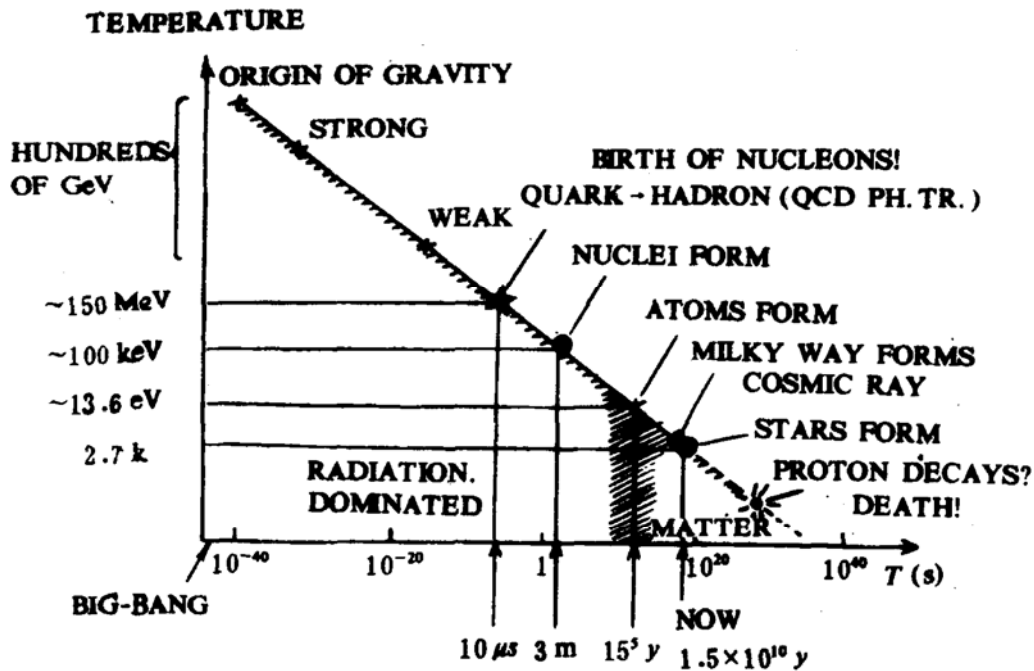


图3 宇宙的热演化史

再往下是银河系的形成,星体的形成,到现在约  $1.5 \times 10^{10}$  年。再以后,预言会出现质子衰变。有人认为,至此宇宙将死亡了,这一点是不妥当的。

在 Standard Big Bang Model 中再引入一个重子密度参数  $h$  ( $10^{-6} \leq h \leq 10^{-3}$ ), 使得:

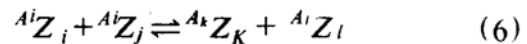
$$\eta = \frac{n_{\gamma}}{n_b} = 3.37 \times 10^4 / h \sim 10^9$$

其中  $n_{\gamma}$  和  $n_b$  分别是光子数和重子数,则可以推出元素丰度分布。

## 2. 早期宇宙情况下的元素合成

在上述宇宙演变过程中,温度约为  $10^9$  K 时,核出现了。如前已提到的,大爆炸理论可以预言 He 在宇宙中的丰度。现在简单谈一下这个过程。质子和中子等由于核反应逐渐合成各种元素。我们可以把  $\chi_i$  表示为  $i$  种核的丰度,是指其占据总的重子质量的比。当时的温度很高,但重子密度低 ( $\rho_b \sim 10^{-3} - 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ ),所有的核反应在初态只有二个核,同时也存在逆反应。主要情况可

描写成:



这里  $A_m$  和  $Z_m$  分别为  $m$  核的质量数和原子序数。决定任何一种  $i$  核丰度演变的方程为:

$$\frac{dY_i}{dt} = \sum_{j,k,l} N_i \left[ \frac{Y_j^{N_j} Y_k^{N_k} (l,k)_j}{N_j! N_k!} - \frac{Y_i^{N_i} Y_l^{N_l} (i,j)_k}{N_i! N_l!} \right] \quad (7)$$

这里  $Y_i = X_i / A_i$ ,  $\sum X_i = 1$ , 而  $(i,j)_k = \rho_b N_A \langle \sigma v \rangle$ , 表示由  $i,j$  反应成  $k$  及  $l$  (当然  $\beta$  衰变和光子引起的反应等另有表述),  $N_A$  为亚佛加德罗常数。上述求和遍及所有包含  $i$  核的核反应。当初 Wagoner 把如图4所指的各种反应用计算机进行了计算,得到的结果如图 5a 和 5b 所示。从图 5a 可见,标准大爆炸模型得到的最终丰度的唯一参数为  $h$ 。这里把  $h$  与现在的温度  $T_0$  和密度  $\rho_0$  联系起来的公式为:

$$h = (\rho_0 / (2.44 \times 10^{-26})) \times (2.9 / T_0)^3$$

$T_0$  已知,约为 2.9K, 而现在的重子密度可能是:

$$3 \times 10^{-32} \lesssim \rho_0 \lesssim 3 \times 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

从图 5b 可见,  ${}^4\text{He}$  的质量成份约为 20%, 这是符合实际的。

## 二、星体演化和元素的合成

宇宙间元素分布是怎样形成的呢?

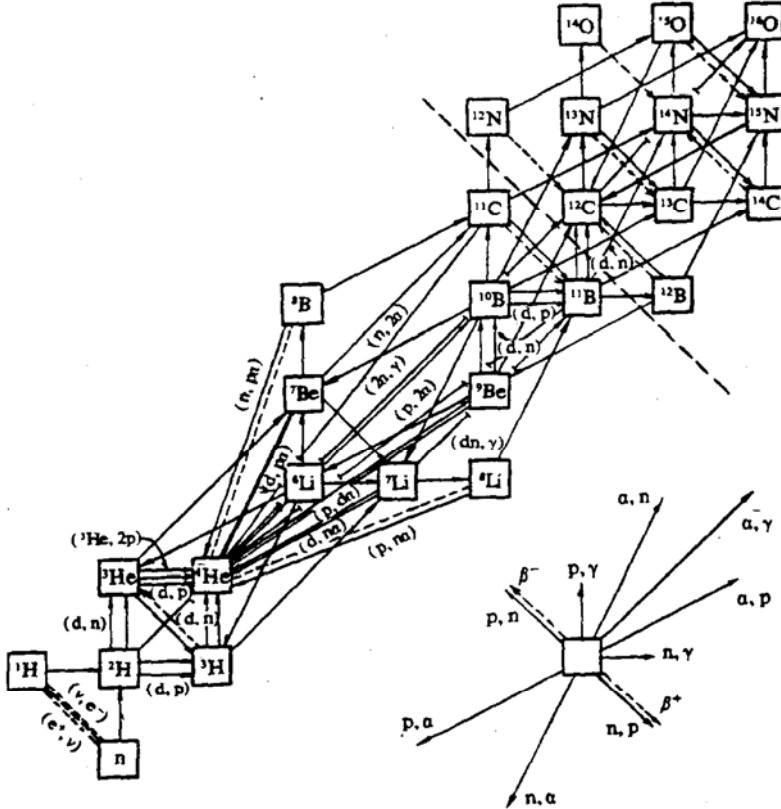


图 4 轻核情况下, 各种可能的核反应示意图

Fowler 在其荣获诺贝尔奖时的讲演中, 曾给出了元素分布长期形成的一张画面<sup>[8]</sup>。始于大爆炸后的宇宙, 物质是散开的, 在星际间存在大量的气体和尘埃。由于运动的不平衡, 这些气体和尘埃将凝聚起来, 形成年轻的亮

的星。再一次的不平衡, 就形成了星球。星球上不断地产生核反应, 放出能量, 最后将引起爆炸。其结果在星际间又产生气体和尘埃, 这些气体和尘埃又因运动的不平衡而凝聚……, 这样循环往复多次, 就形成了目前的元

素分布。我们的太阳也是这种运动中的一环。

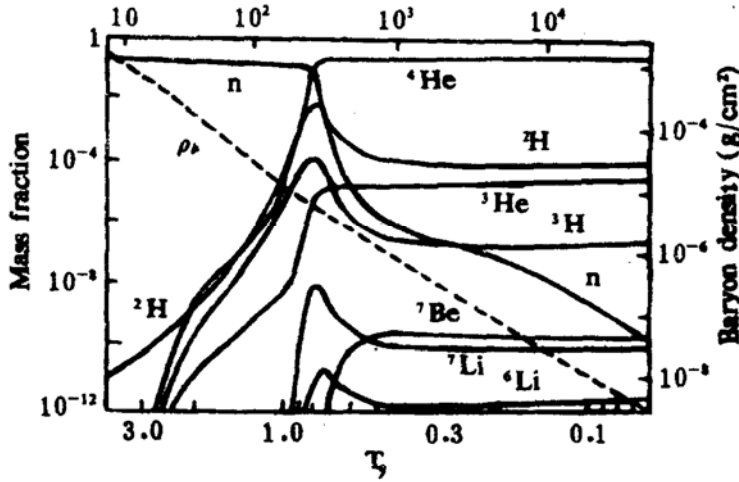


图 5a 用标准大爆炸模型 ( $h=1.15 \times 10^{-5}$ ) 计算的核丰度  $x_i$  和重子密度  $\rho_b$  随膨胀的变化

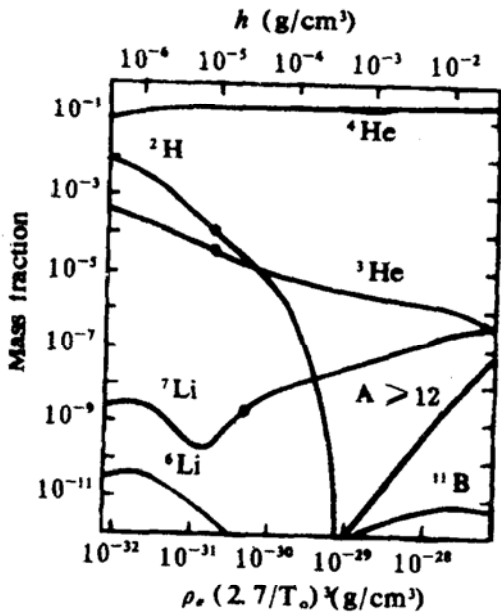


图 5b 现在温度和密度情况下核丰度 (标准大爆炸模型算得的最终质量丰度, 只有  $h$  是参数。)

### 1. 标准模型和非均匀密度模型

前面介绍的标准模型存在两个问题: (1) 不能说明稍重物质的形成: 从 H, He …… 直到 Li 的形成, 该模型还能说明, 但  $^{12}\text{C}$  以上便说明不了; (2) 在该模型里, 宇宙是开放的, 即宇宙自己束缚不住自己。如上所述, 宇宙是在不断膨胀的, 如果宇宙间质量足够的大, 由

于万有引力的作用, 这种膨胀速度是会减至零的。即膨胀到一定程度后, 就不再膨胀了。如果要达到这种状态, 宇宙的临界密度  $\rho_c$  必须为:

$$\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G \quad (8)$$

其中  $H_0$  是 Hubble 常数,  $G$  是万有引力常数。根据标准模型的计算, 现在的宇宙密度  $\rho$  近似为重子的密度  $\rho_b$ 。定义非均匀密度  $\Omega_B$  为:

$$\Omega_B \equiv \rho_b / \rho_c \approx 0.10 \quad (9)$$

即标准模型预言的宇宙密度  $\rho$  只有宇宙临界密度  $\rho_c$  的 10%。因此, 宇宙自己束缚不住自己。另有一种说法, 认为宇宙中还有一部份看不见的暗物质存在。还有人说, 这部份东西是中微子, 如果中微子有质量, 这个问题可以解决, 但目前还未肯定。

为了克服标准模型的困难, Fowler 于 1988 年提出了非均匀密度模型<sup>[9]</sup>。该模型能给出  $\Omega_B = 1$ , 即宇宙不再是开放的。这个模型除了能解释标准模型已能解释的东西外, 还可以说明  $^{12}\text{C}$  以上元素的形成。

非均匀密度模型和标准模型的区别在于: 在元素形成阶段宇宙密度是不均匀的。即从核子产生到核形成这一段中, 要有中子扩散, 如图 6 所示。在温度  $5 \times 10^2 \text{K}$  时, 宇宙中是

夸克、胶子等离子体。由于相变(量子色动力学(QCD)的相变理论),产生了重子(质子和中子等),其中质子由于运动的不平衡,其分布是不均匀的,而中子由于不受库仑力的影响,它的分布则是均匀的。由这种非均匀性,则可推出  $\Omega_b = 1$  和其它结果。

作者认为,宇宙的演化可描述如下:始于大爆炸的宇宙,存在一团  $\Omega_b > 1$  的物质,随

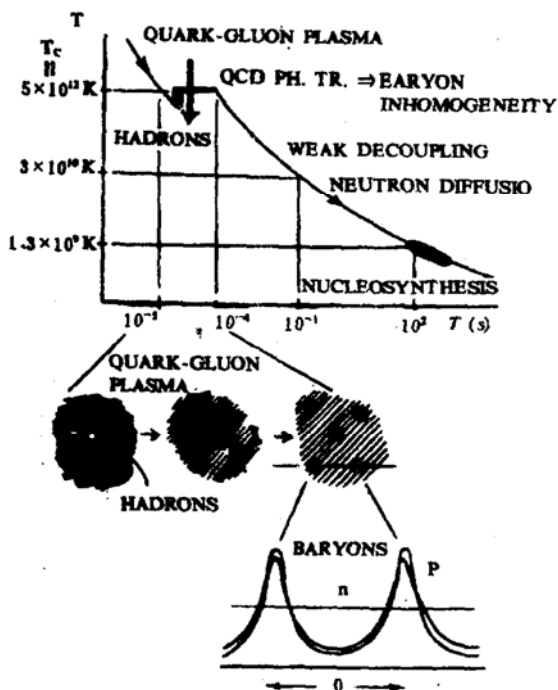


图6 非均匀密度模型的示意图

着时间的推移,这团物质不断膨胀。由于宇宙的质量足够大( $\Omega_b > 1$ ),万有引力的作用使膨胀速度逐渐减小,以致停止膨胀;此后这团物质将以加速度向中心收缩,收缩到一定限度就会再引起爆炸,爆炸后又膨胀,一个新的循环又将开始了,……。由这个图象可知:爆炸是宇宙自身发展的必然结果,无需乞求上帝来推动。宇宙也不存在死亡的问题,宇宙只不过按自己的规律在运动。至于“宇宙外”有否“别的宇宙”等问题,只能等待科学的进一步发展才能回答。

## 2. 星体演化<sup>[10]</sup>

大爆炸后的物质是弥漫于星际空间的。

当这弥漫的物质局部失去平衡时,由于万有引力的作用,使其集中起来,就形成了星坯(一种力学平衡系统)。星坯由于引力作用就收缩,收缩的结果是中心温度升高,先是达到氢的点火温度,其后形成自持的热核反应,这就是恒星。将现在已发现的恒星画在图7中。这个图叫 Hertzsprung-Russell 图,其

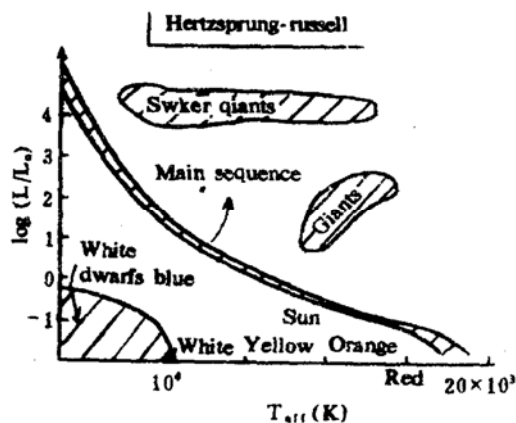


图7 Hertzsprung-Russell 图

横坐标是温度,纵坐标是相对总亮度的对数。这里  $L_{\odot}$  是太阳的总亮度, $L$  是被研究的星体的总亮度。该图中位于中间一个带上的星体叫主序星,其质量  $M > 0.08M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  是太阳的质量)。目前只观察到质量为几十个太阳质量的主序星。质量再大的星,因为很快就烧光了,所以看不见。

### (1) $M \sim M_{\odot}$ 恒星的演化

太阳的质量  $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{33}g$ ,半径  $R \sim 7 \times 10^{10}cm$ ,总亮度  $L_{\odot} \sim 4 \times 10^{33}sb$ 。它已燃烧了  $\sim 5 \times 10^9$  年,估计它的氢还可燃烧  $5 \times 10^9$  年。其中心温度  $\sim 1.5 \times 10^7K$  ( $T_c \sim 15.T_s = 10^6K$ )。太阳的燃烧,主要( $> 95\%$ )是通过核反应 P—P 链。对于星体  $M > M_{\odot}$ ,核反应 CNO 链就重要了。 $M$  更大,则核反应 HCNO 链(热 CNO)更为重要。这些核反应链下面将会讨论。

太阳或质量与太阳相近的星体的演变过程是这样的:首先是燃烧氢,当中心的氢烧完了,燃烧就要暂时停止。这时中心都是氢燃

烧形成的氦,氦的外围是氢。这时,中心的温度较高,但不足点燃氦,氦外围氢的温度较低,氢也点不着。但那时星体仍在发光,在损失能量,因此体积将收缩,温度随之升高。这时,氦外围的氢先点燃,而后点燃氦。氦烧得很快,出现氦闪光,于是这个星体就会爆炸,星体上的物质将随着爆炸而弥漫于星际之间,这个星体也就“消亡”了。

像太阳那样的星体,由于质量不够大,不足以进行较完善的氦燃烧。更重的星球(如  $M > 8M_{\odot}$ )除了氦燃烧外,还可进行碳燃烧等。

### (2) $M \sim 25M_{\odot}$ 星球的演化

其演化情况大致可见图 8。其氢燃烧情况大致与太阳相近,只是以后有更多燃烧循环起作用,而且燃烧时间短(由于温度高)。其氦燃烧的情况是与太阳不一样的,即不出现氦闪光,而是进行正常的氦燃烧,温度约为  $T_0 \sim 200K$ 。这种燃烧主要是通过下述反应使三个氦合成一个  $^{12}C$ ,但也有少量氧等:

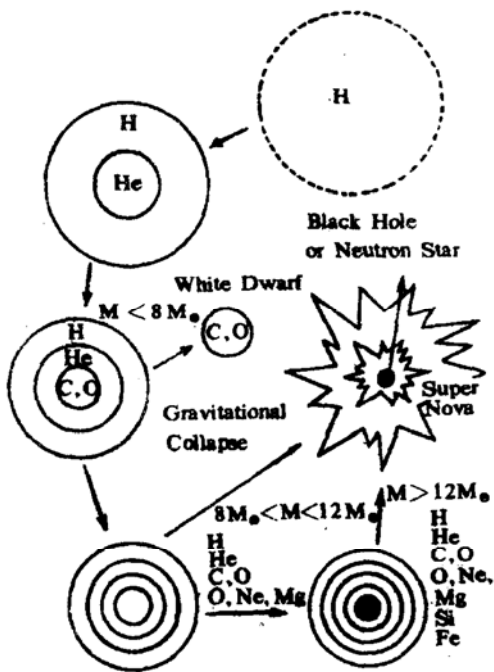
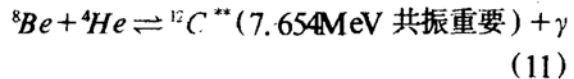
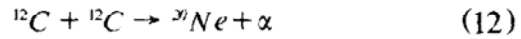


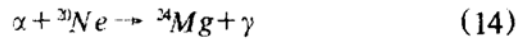
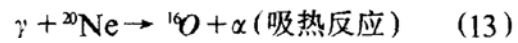
图 8  $M \sim 25M_{\odot}$  星球的演化过程示意图



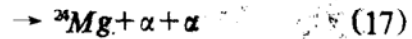
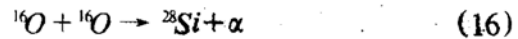
这里  $\tau$  是寿命。等到中间氦烧完后,留下灰分碳和氧等。氦燃烧停止了,这个星球又将收缩,温度再升高,直到引起碳燃烧,其温度约为  $T_0 \sim 500 - 800K$ 。碳燃烧主要通过反应:



这样产生的  $\alpha$  粒子又可对各种核起反应,合成一些更重的元素。碳燃烧之后,将陆续地出现氖燃烧。这时温度约为  $T_0 \sim 1 - 1.5K$ ,  $\gamma$  和  $\alpha$  引起的重要反应如下:



总的来讲,这些反应仍是放热的。下一个燃烧是氧燃烧,  $T_0 \sim 2K$ 。主要是:



其灰粉主要是  $^{28}Si$ 。最后一个流体静力学的燃烧过程是硅燃烧,  $T_0 \sim 3.5 - 5K$ 。这实际上是一个准平衡过程。



再发展下去主要是吸热反应了,吸收或放出  $\gamma$ , 放出  $\alpha$  或质子等。燃烧到这个阶段将出现剧烈的反跳,抛出大量质量,相当于出现超新星的现象,最终“崩溃”和“死亡”。这些燃烧过程可以归纳于表 2。

### (3) CNO 链的燃烧

该链的燃烧如图 9 所示。当  $M > M_{\odot}$ ,  $T_0 \sim 20K$  时,该链才渐渐重要起来。这些反应同样是 4 个质子转换成一个  $^4He$ 。其中 C、N、O 只不过是媒介物。在这个链中,循环 I 是主要的。后来发现,  $^{15}N (P, \gamma)$  反应比起  $^{15}N (P, \alpha)$  反应来,  $^{17}O (P, \gamma)$  反应比起  $^{17}O (P, \alpha)$  反应来不能忽视,因而出现了循环 II 和循环 III。所有这些循环中总是先生成  $^{14}N$ , 这一点对人类很重要。



当温度更高 ( $M$  更大) 时, 有 HCNO 链 (热 CNO 链) 的燃烧。在这个链中,  $^{13}\text{N} (p, \gamma)$  反应快于  $^{13}\text{N}$  的  $\beta$  衰变 (9min)。下述反应:



的截面就很重要, 可是现在没有。因为  $^{13}\text{N}$  是放射性核。这就是核物理的新问题了。同

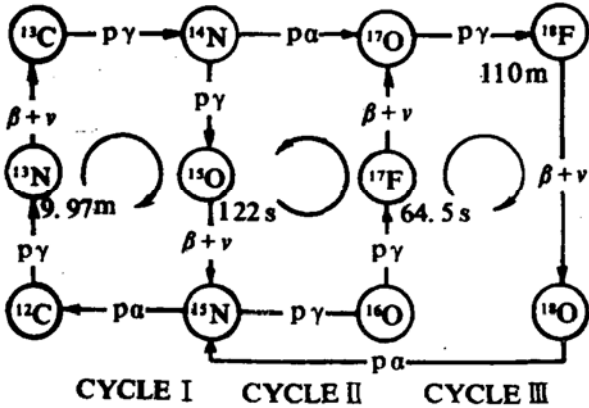


图9 CNO 链的燃烧循环

样, 在其它场合,  $^{14}\text{O} (\alpha, p) ^{17}\text{F}$  反应的截面也很重要, 但没有测过, 因为  $^{14}\text{O}$  也是放射性核素。这就引起了下面要讲的关于对放射性束的要求问题。

### 三、核天体物理学对放射性束的需要

核天体物理学理论计算中, 要用到大量核反应截面的激发函数数据。我们引入反应率  $R_{12}$ :

$$R_{12} = (n_1 n_2) (1 + \delta_{12})^{-1} \langle \sigma v \rangle, \quad (21)$$

在低能量时, 反应截面  $\sigma(E)$  常表示为:

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp(-2\pi\eta) \quad (22)$$

$$\eta = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v = b / E^{1/2} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \langle \sigma v \rangle &= \frac{(8/\pi)^{1/2}}{M^{1/2} (kT)^{1/2}} \int S(E) \\ &\exp\left(-\frac{E}{kT} - b/E^{1/2}\right) dE \quad (24) \end{aligned}$$

式中  $n_1$  和  $n_2$ ,  $Z_1$  和  $Z_2$  分别是参加反应的弹核和靶核的密度和原子序数,  $\sigma$  是反应截面,  $v$  是弹核速度,  $\delta_{12}$  是  $\delta$  函数,  $E$  是质心系能量,  $S(E)$  为靶核的能级密度,  $M$  是折合质量。

这个被积函数的能量变化, 主要由一个 Maxwell-Boltzmann 因子及势垒穿透因子的乘积所决定。中间的一个峰称为 Gamow 峰或 Gamow 窗。一般, 能量  $E_0$  是相当低的。

前面已从 CNO 链和 HCNO 链谈到了  $^{13}\text{N} (p, \gamma)$  等反应对研究这些过程的重要性。实际上, 核天体物理学已经提出了一大串急需从实验上对它们进行测量的反应, 且在绝大多数情况下, 靶核或弹核其中的一个是放射性的, 例如

CNO 及 HCNO 循环中, 有  $^{13}\text{N} (p, \gamma)$ ,  $^{14}\text{O} (\alpha, p) \dots$ ;

热 Ne-Na 循环, Mg-Al 循环等有  $^{23}\text{Na} (p, \gamma) \dots$ ;

太阳中微子问题中, 有  $^7\text{Be} (p, \gamma) ^8\text{B}$ ;

$\gamma, p$  过程 (快的质子过程) 中, 对丰质子核的  $(p, \gamma)$  反应等;

$^{26}\text{Al}$  谜中  $^{26}\text{Al} (p, \gamma) ^{27}\text{Si}$ ;

Ne-E 问题中  $^{22}\text{Na} (p, \gamma) ^{23}\text{Mg}$ ;

还有  $^8\text{Li} (\alpha, n)$  反应等等。

一般认为, 对于靶核质量大于 40 的那些核的核反应截面, 由于能级密度高, 用统计的 Hauser-Feshbach 模型加上核反应系统学就可以大致算出  $\sigma(E)$ 。但是, 对于靶核为  $A < 40$  的情况, 能级密度低,  $\sigma(E)$  往往由一个或少数几个共振态或非共振机制所支配。理论计算根本不可靠, 只能靠实验测量。上述的一些反应大都是  $A < 40$  的情况。

由于上述反应的靶, 都是天然不存在的放射性核素, 只可以由非直接方法或逆反应方法来获得一些有关  $\sigma(E)$  的消息。但是, 这样做只能对其中一部份反应得到部分消息, 而且往往要花很大工作量, 只能得到少量且不精确的讯息。

另一种办法是直接测量法。即首先用核

表2 M = 25M<sub>⊙</sub> 恒星的燃烧情况

燃烧阶段	近似温度 (10 <sup>8</sup> K)	主要产物	产生能量 (erg/g)	近似持续时间	主要的发光体
氢	0.02	<sup>4</sup> He, <sup>14</sup> N	8 × 10 <sup>18</sup>	7 × 10 <sup>6</sup> y	光子
氦	0.2	<sup>12</sup> C, <sup>16</sup> O, <sup>20</sup> Ne	7 × 10 <sup>17</sup>	5 × 10 <sup>5</sup> y	光子
碳	0.8	<sup>20</sup> Ne, <sup>23</sup> Na, <sup>24</sup> Mg	5 × 10 <sup>17</sup>	6 × 10 <sup>2</sup> y	中微子
氮	1.5	<sup>16</sup> O, <sup>24</sup> Mg, <sup>28</sup> Si	1 × 10 <sup>17</sup>	1y	中微子
氧	2.0	<sup>28</sup> Si, <sup>32</sup> S	5 × 10 <sup>17</sup>	180d	中微子
硅	3.5	<sup>54</sup> Fe, <sup>56</sup> Ni, <sup>52</sup> Cr	3 × 10 <sup>17</sup>	1d	中微子

反应产生放射性核素,再把它制成靶做实验;或者把产生的放射性核素进行加速再做核反应实验。在前者情况下,靶的放射性活度将大到足以“毁坏”探测器等,而且靶的寿命也往往太短。后一种方法是近年来正在提议和进行尝试的路子。这种路子已讨论了5~6年,但到去年才热起来。目前国际上只有 LOUVAIN — LA — NEUVE 这一家真正已在做这方面的事情<sup>[10]</sup>。它是欧洲共同体的一个协作项目。他们是用二台回旋加速器串联起来,用第一台加速器的质子流轰击<sup>13</sup>C靶,以<sup>13</sup>C(p,n)<sup>13</sup>N反应获得<sup>13</sup>N,靶是稀疏的<sup>13</sup>C靶,用通入氮气的办法把<sup>13</sup>N带出来(<sup>13</sup>N<sup>14</sup>N气体),进入ECR离子源后,获得<sup>13</sup>N<sup>+</sup>,然后通过同位素分离器进入第二台加速器再加速,从而得到低能的<sup>13</sup>N<sup>+</sup>束流。目前,他们已获得流强为1.5 × 10<sup>8</sup>/s的<sup>13</sup>N<sup>+</sup>束流。但是,束流中含有<sup>13</sup>C杂质,其强度竟是<sup>13</sup>N的1千倍,因此还需努力改进。

无论如何,核天体物理的研究要求发展

放射性束的加速。而放射性束的意义远不只是研究核天体物理学,它对核物理研究(核反应和核结构)以及核技术应用都有着极大的意义。

### 参考文献

- [1] G. B. Brown, Proc. Inter. Nucl. Conf., São Paulo, 1989, Vol. II, P3
- [2] V. M. Slipher, The Mathematical Theory of Relativity, P162, London: Cambridge Univ. Press, 2nd ed. (1924)
- [3] E. P. Hubble, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 15: P168-173 (1929)
- [4] G. Gamow, Phys. Rev. 70, 572 (1946)
- [5] R. A. Alpher et al., Phys. Rev. 73, 803 (1948)
- [6] G. Gamow, Nature, 162, 680 (1948)
- [7] D. N. Schramm et al., Ann. Rev. Nucl. Sci. 27 37-74 (1977)
- [8] W. A. Fowler, Rev. Mod. Phys. 56, 149-179 (1984)
- [9] R. A. Malaney, W. A. Fowler, 私人通讯, 发表中
- [10] 例见 C. A. Barnes et al., Treatise on Heavy Ion Science, Ed. D. A. Bromly, Vol 6, P3
- [11] D. Darguennes et al., Phys. Rev. C42 R804 (1990)