



人们对物质世界的认识,就其时空尺度而言是向两个不同方向发展的。一个是向大的方面发展形成了现在的天体物理和宇宙学;一个是向小的方面发展形成了现代的粒子物理。在人们探索物质世界的结构和运动规律的研究中,虽然早就注意到了这两个学科之间的联系(如宇宙线的研究),而近年来由于粒子物理,特别是弱电强大统一规范理论的发展,粒子物理同宇宙学联系的研究就更引起了许多物理学家的兴趣。

宇宙学是研究宇宙的形成、演变和发展的科学。虽然目前有不止一种宇宙学说,但是,人

们普遍接受的却是大爆炸宇宙学(或称宇宙学的标准模型)。它认为我们现在生活的宇宙(包括星系团、星系和恒星等)是在大约 10^{10} 年以前的宇宙大爆炸开始并演化而来的。宇宙从大爆炸开始演变到今天经历了一个从极高温极高密状态逐渐膨胀,稀疏和冷却的过程。了解宇宙大爆炸后的宇宙温度演变史,就会使我们自然地了解粒子物理和宇宙学的联系。

为什么目前人们普遍接受大爆炸宇宙学呢?主要有两方面的原因:一是宇宙观测对它的支持;一是爱

因斯坦的广义相对论可以容纳它。支持它的宇宙观测主要有:

1. 宇宙在膨胀。远在 1932 年,哈勃就发现了所有银河系星团以及其他各星系之间都在彼此远离。这就表明宇宙处在膨胀之中。这个结果被后来的许多天文学家观测到的遥远星系的红移现象所证实。既然宇宙在膨胀,人们自然要问:宇宙膨胀是什么时候开始的?人们推测,如果把膨胀着的宇宙按时间返回到宇宙的遥远过去,把现在宇宙中如此丰富的物质返回到越来越小的空间,宇宙势必会处在温度越来越高,密度越来越大的状态。因此人们提出了大爆炸宇宙学,认为我们现在生活的宇宙是从温度极高,密度极大的宇宙物质大爆炸开始的。

2. 宇宙的 He^4 丰度($\approx 25\%$)。能够解释 He^4 丰度是大爆炸宇宙学的巨大成功之一。根据大爆炸宇宙学,大爆炸后的 1—200 秒,粒子平均能量在 1—0.1 MeV 之间。这样,核子的动能不足以克服核子间的核力作用而开始了最初的原子核合成。

3. 第三个支持大爆炸宇宙学的宇宙观测是 1965 年蓬泽恩和威尔逊观测到宇宙中存在的 2.7°K 微波背景辐射。从此使人们认识到宇宙中所有天体都浸泡在这种均匀的、各向同性的低温微波背景辐射的光子海洋中。人们认为这正是根据大爆炸宇宙学推测宇宙存在一个温度很高的物质与辐射热平衡时期的化石。

在理论方面人们接受大爆炸宇宙学的原因是,霍京和潘罗斯曾经证明,如果宇宙是均匀、各向同性的,那么宇宙就开始于大爆炸。

根据大爆炸宇宙学,大爆炸时的宇宙是处在极高温,极高密状态,因此量子引力效应一定会很明显。但是,对宇宙年龄 $t > 10^{-43}$ 秒,量子引力效应是可以忽略的。因此,人们仍可应用经典的爱因斯坦广义相对论。由于广义相对论场方程把时空和物质联系起来,也就

表 1

10^{17}	现在膨胀着的宇宙, 2.7K 微波背景辐射.	$2.7(10^{-13})$
10^{12}	银河系, 太阳系和其他星系形成.	$10^3(10^{-10})$
10^2	原子开始形成, 离化的粒子气体与光子退耦, 这些光子随着宇宙膨胀能量降低为今天的 2.7K 微波背景辐射.	$10^9(10^{-4})$
10^{-3}	弱作用的轻子时期进入核合成时期, 轻核开始形成.	$10^{12}(10^{-1})$
10^{-10}	$SU(2) \times U(1) \xrightarrow{\langle \phi, \rangle \neq 0} U(1)$, 弱作用 $SU(2)$ 对称性破坏. 质子和中子作为基本粒子存在, 介子和核子之间的强作用非常突出的强子时代结束.	$10^{15}(10^2)$
10^{-35}	$SU(5) \xrightarrow{\langle \phi_{24} \rangle \neq 0} SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, 三种相互作用强度渐渐分开. 与粒子的能量相比 H, X 重玻色子显得很重. 它开始衰变并渐渐减少, CP 破坏的重子数不守恒的作用使 $\Delta B \neq 0$.	$10^{28}(10^{15})$
10^{-43}	具有像 $SU(5)$ 那样对称性的弱电强统一规范理论, 有一个统一的耦合常数. 基本粒子是夸克和轻子, 有丰富的 X, H 粒子, 纯重子数 $\Delta B = 0$.	$10^{32}(10^{19})$
秒	量子引力起作用, 可能是 $SU(8)$ 超引力理论, 基本粒子可能是前子 (preon)	$^{\circ}\text{K}(\text{GeV})$ 宇宙温度
	(宇宙年龄)	

把物质密度和压强同时空联起来了. 这样我们就可以由大爆炸以来的物质能量密度和压强的变化推知宇宙发展中的时空特点.

在宇宙早期, 宇宙物质能量密度是极大的, 宇宙是开放的、平直的还是封闭的, 是影响不大的. 根据热力学, 早期宇宙的极端相对论的粒子气体压强和能量密度同宇宙温度 T 有关, 宇宙温度 T 和宇宙年龄 t 有表 1 所示的关系.

在表 1 里, 我们还列出了与宇宙温度的不同时期相对应的粒子物理理论. 实际上, 宇宙从高温高密状态演变到原子核的形成的过程, 就是随着宇宙膨胀, 在自然界基本相互作用力的作用下, 能量越来越低的基本粒子的相互作用转化和反应的过程. 早期宇宙的不同时期与不同的粒子理论的适用区相对应. 粒子物理同早期宇宙的关系如此密切, 实在使人惊异而又兴奋!

不同温度区与不同粒子物理理论相对应是根据物理理论的能量标度来决定的. 所谓能量标度就是物理理论可适用区的能量标志. 一般来讲, 不同的能量标度, 物质的基本组份是不同, 各个不同层次的组分之间的相互作用是不同的, 因而其运动规律也是不同的. 比如, 原子物理适用于能量在电子伏量级的能区. 这是因为原子核与核外电子是由电磁相互作用束缚成的, 其结合能是电子伏量级. 只当能量在电子伏量级时原子才可作为一个体系存在, 原子物理才适用. 能量在大于百万电子伏特时, 也就是远大于原子核里核子的结合能时, 核子的结合能同原子核的能量相比是可以忽略的情况下, 原子核理论也就不适用了(指低能核物理), 而必须要用相对论量子场论. 对于更高的能量, 根据现在的核子物理理论, 处在不同能区的粒子运动规律由具有不同对称性的规范理论来描写. 而能量大于

10^{19} GeV 能区, 是量子引力起作用的能区, 这是人们正在研究的问题, 一些科学家认为在这个能区的物质基本组份可能是前子, 其运动规律可能由超引力理论描写.

以上我们看到, 大爆炸宇宙学在解释宇宙现象时, 是离不开粒子物理的, 反过来, 宇宙学的研究也有助于粒子物理的研究. 人们对宇宙观测资料的分析早就发现, 利用某些宇宙观测结果可以对粒子物理某些不清楚的问题提供某些限制. 譬如, 中微子到底有没有静止质量的问题, 直到现在这个问题仍然是高能粒子物理的理论和实验都十分关心的问题. 宇宙观测表明, 宇宙中星系的总质量超过了它所包含的各恒星的质量之和, 星系团的总质量也超过了它所包含的各星系的总质量. 那么这些多余质量是从哪里来的呢? 人们推测充满宇宙的数目非常多的中微子可能具有不为 0 的静止质量. 对太阳热核反应发射出的 ν_e 的测量也得到类似的结论(即所谓太阳中微子失踪问题). 然而, 这只是一种推测, 下面将会看到, 运用大爆炸宇宙学会对粒子物理作出更具体的限制.

从表 1, 我们看到, 当宇宙年龄在 10^{-2} 秒, 也就是宇宙温度大约为 10^{11}K (相当 1 MeV) 时, 宇宙中的基本粒子是 $n, p, e^+, e^-, \bar{\nu}_e, \nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \gamma, \dots$, 这些粒子在电磁作用和弱作用下处于一种热平衡状态. 这时各种粒子的密度是不同的, 根据粒子数按能量的分布, 可以近似地认为各种粒子数的差别只相差在玻尔兹曼因子上. 例如, 中子和质子的粒子数密度之比, n/p 可写为 $e^{(m_p - m_n)/kT}$. 当宇宙继续膨胀时, 温度下降到 $T \sim 10^{10}\text{K}$ 时, 由于弱作用反应率开始低于宇宙的膨胀率(如 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 过程已不可逆). 这时依靠弱、电相互作用维持的热平衡开始破坏, 出现非平衡过程

$$n/p = e^{(m_p - m_n)/kT_f}$$

当温度再下降并接近 10^9K (相当于 0.1 MeV) 时, 质子和中子之间的核力已足以使它们形成原子核(He^4), 但此时的 He^4 核仍然足够“热”, 以致它们可以进一步克服库仑势垒而形成氦核(He^4). 因为 He^4 的形成是发生在弱作用反应率低于宇宙膨胀率的非平衡时期, 因此, 从冻结温度 T_f 开始一直演变到全部形成 He^4 的时间内, 中子的衰变将使冻结温度 T_f 时的 n/p 值变小. 因此, 结合成 He^4 的中子只是冻结温度 T_f 时的中子的大部分, 并非全部. 如果冻结温度时的中子全部结合成 He^4 , 那么 He^4 的总质量占宇宙的总质量的比, 也就是 He^4 丰度可近似地写为 (He^4 中有 2 个中子和 2 个质子):

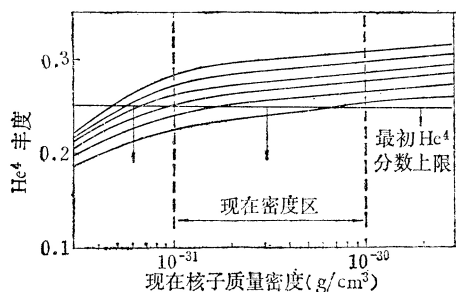
$$y = \frac{2n}{n+p} = \frac{2n/p}{1+n/p}$$

其值接近 $1/6$, 则 $y = 0.28$. 若考虑中子衰变的影响, 则 $1/6$ 可减到 $1/7$, 此时 $y \approx 0.25$. 这个值是与宇宙观测相符的.

由此可见, 由于 T_f 的变化会使 n/p 的值有显著地变化, 因此 He^4 丰度严格地依赖于冻结温 T_f ; 其次, 它还依赖于核合成开始到核合成完了这段时间间隔. 由于核合成时期的核子的能量密度 ρ 比起一些质量很轻的粒子的能量密度小得多, 因此此时宇宙的能量密度主要是那些质量很轻且仍处在相对论情形的粒子, 即,

$$\rho = \rho_e + \rho_\gamma + \rho_{\nu_\mu} + \rho_{\nu_e} + \dots = N' \frac{\pi^2}{30} T^4$$

N' 是不同种类的轻的粒子的自由度总和. 显然 N' 越大 ρ 就越大, 宇宙膨胀率 H 也就越大. H 增大就使宇宙膨胀加快, 这样就使中子在结合成原子核前进行衰变的时间间隔变短. 这样, 就使得结合成原子核的中子增多. 总之, He^4 丰度将随着核合成时期的轻的粒子的种类增加而增加, 反之则减少. 考虑到核子密度和轻子种类的多少对 He^4 丰度的影响, 人们仔细地计算了它们的关系. 其结果如图所示.



现在的核子质量密度和“轻”中微子种类对最初的 He^4 丰度的影响

用现在估计出的 He^4 丰度 $0.20 \sim 0.25$, 若取上限 0.25 与图 1 比较, 并取核子密度为 $\geq 10^{-31}\text{g/cm}^3$, 则

从图 1 可知刚好对应轻子种类等于 4 的曲线, 所以定出轻中微子的种类: $N_\nu \leq 4$. 再由现在粒子物理学中给出的轻子和夸克之间的对应关系:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b' \\ t' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau' \\ \nu_{\tau'} \end{pmatrix}$$

可推知夸克味 ≤ 8 . 从此可推知量子色动力学是禁闭的 (≤ 16 即可). 这虽然不是精确结果, 但是, 我们看到了宇宙学和粒子物理结合起来研究的意义.

宇宙观测不仅可给出中微子种类的限制, 而且还给出中微子质量的限制.

在宇宙温度大约降到 10^{10}K 时, 只参与弱作用的中微子已开始脱离同其他粒子共处的热平衡, 因而使得中微子从同其他粒子相互作用中退耦出来. 从此以后中微子开始自由膨胀, 最终像 2.7K 微波背景一样充满整个宇宙. 但中微子与光子不同. 大约在 $3 \times 10^9\text{K}$ 时, 电子和正电子丰度也开始改变. 因为这时光子的能量已不足以产生正负电子对, 因此正负电子的湮灭将渐渐减少正负电子对的丰度, 并且也使光子的温度有所升高, 这样就使得同一宇宙年龄的光子温度比已经退耦的中微子温度要高. 这种差异一直保持到今天. 现在光子的温度为 $T_\gamma = 2.7\text{K}$, 而中微子现在温度大约是 2°K . 由两者粒子数密度之比 $n_\nu/n_\gamma \sim \left(\frac{T_\gamma}{T_\nu}\right)^3$

可以知道中微子在宇宙中的数目几乎同光子一样丰富. 只要中微子质量 $\sum m_\nu \geq 1.4\text{eV}$, 那么它的质量密度就会比其他物质的质量密度还大. 因此它势必影响宇宙的膨胀和年龄. 反之, 通过现在宇宙膨胀和宇宙年龄可以给出中微子质量的限制, 其结果为:

$$\sum m_\nu \leq 43\text{eV}$$

这个结果同目前高能物理实验给出的中微子质量的上限要小得多. 同样, 运用粒子数密度的能量分布也可对重的中微子进行讨论其结果为 $m_\nu \geq 2\text{GeV}$.

从上面分析可以见到宇宙学和粒子物理密切相关, 相互影响. 上面介绍的只是宇宙年龄大约为 1 秒钟的情况. 宇宙年龄为 10^{-12} 秒时, 粒子的平均能量为 1000 GeV , 这正是目前粒子加速器所能达到的最高能量. 那么比这还早的时间里宇宙发生了什么呢? 为什么我们今天只观察到由粒子(物质)构成的天体, 而观察不到反粒子(反物质)构成的天体呢? 弱电强大统一理论预言的大能量标度 10^{25}GeV , 实验如何检验? 在普朗克温度 10^{19}GeV 量子引力的效应是什么? 这些问题的进一步研究会使我们看到, 宇宙学可借助于粒子物理理论来解释宇宙现象, 粒子物理理论还可把广漠的宇宙作为检验自己的天然实验室.

(勾亮、时维春、郝春)