

(三)

张 端 明

幽灵粒子的故事

我们领略了宇宙“诞生”的“创世纪”中瑰丽雄奇的场面，再回过头去探索微宇宙的趣闻吧。你会发现，它们两者之间会有一些十分微妙的关系。

现在大多数粒子物理学家都相信，目前我们所查知的最小物质单元——基本粒子，大致主要有两类：夸克和轻子。

自从1974年丁肇中和里希特 (B. Richter) 发现 J/ψ 粒子以来，科学家就为一个问题所困扰：到底有多少种夸克和轻子？

幸而我们发现夸克和轻子有一种令人欣慰的对称性——“代”结构。原来，我们把至今所发现的夸克、轻子可以排列成如下“代”结构：

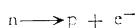
	第一代	第二代	第三代
夸克	$\begin{array}{c} u \\ d \end{array}$	$\begin{array}{c} c \\ s \end{array}$	$\begin{array}{c} t \\ b \end{array}$
轻子	$\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array}$	$\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array}$	$\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array}$

其中 t 夸克到底发现没有，还有争论。这种代结构，颇象化学元素的门捷列夫周期律要弄清楚有多少种基本粒子首先要弄清楚基本粒子有几代。

细心的人还会看到，实际上每一代都有一种相应的中微子 ν 。所以，归根结底弄清楚有几种中微子就是查实基本粒子有多少种的重要问题。

中微子……又是这个幽灵粒子。跟它相关连的有多少扑朔迷离的故事呵！

三十年代理论学家发现在 β 衰变中



有一部分能量“失踪”了。1922年梅特涅首先提出了这个问题。1930年，大名鼎鼎的玻尔在哥本哈根大胆

提出一种理论：能量守恒定律在 β 衰变此类微观过程不适用了。于是一场争论在物理学家中展开了。

1931年泡里指出所谓中微子假说解决了这个问题。他说， β 衰变后还放出一种看不到的神秘粒子——中微子。它们不带电，没有静止质量，速度等于光速，这一点象光子。但自旋为 $1/2$ ，这一点跟电子一样。泡里认为，失踪的能量是由它们携带走了。

但是，捕捉中微子可不是一件容易的事。首先，因为它是中性的，不可能用探测带电粒子的方法去记录它的径迹，另一方面，因为它与物质的作用很弱，它们在固体铅内行经 100 光年的距离后，也只有 50% 的机会被“挡住”——吸收。科学家们经过四分之一一个世纪，至到 1956 年才算把它们“捕捉”归案。它们的行踪既然如此诡秘，身世如此不凡，难怪人们赐给它们幽灵粒子的佳号。

中微子有关的故事太多了：什么太阳中微子失踪案，中微子质量案，中微子种类案，等等。但是在这里我们感兴趣的是：它们到底有多少种？

泡里提出中微子假说，压根儿没想到它们会是一个家族呢。70年代早期，西德等国实验工作者发现第二种中微子—— μ 中微子，以后又发现第三种中微子—— τ 中微子。人们自然会想，天知道，这个“幽灵家族”还有多少个“兄弟”呀。老实说，太多的中微子发现并不会引起科学家的高兴。须知，这就意味着更多种的基本粒子存在。这么多种基本粒子的存在，还能叫它们“基本粒子”吗？

1974年左右，对这个问题人们给出一个限制条件。美国普林斯顿大学的格洛斯等人利用量子色动力学中的重整化群的方法证明，夸克、中微子等的“代”不能大于 16，否则就会导致夸克相互作用在高能下“渐近自由”性质的破坏。而实验已表明，在很高能量之

下,夸克之间几乎不存在相互作用,这就是所谓“渐近自由”。

16种!这尽管给出一个限制,无疑人们还是觉得多了。谁也想不到,大爆炸学说竟然给出更严格的限制;中微子种类不会超过四种!

这是怎么回事呢?这个结论是研究原始元素(主要是 He^4)的构成得到的。

首先涉足于原始核合成对无质量粒子的影响这个领域的,是苏联人希瓦兹曼(Shvartman, 1969年),后来,斯特格曼(1977年)和斯拉姆(Schramm)利用最新观测资料进行了更精确的讨论。

根据标准的大爆炸模型,宇宙的年龄和温度有一个很简单的关系:

$$t = \left(\frac{45}{16\pi^3 G} \right)^{1/2} g_*^{-1/2} T^{-2},$$

式中 g_* 为所有极端相对论性的粒子(即 $m \ll T$)的自由度总数。在大爆炸 10^{-2} 秒左右,宇宙中粒子 $n, p, e^-, e^+, \nu_e, \bar{\nu}_e, \gamma, \dots$ 处于热平衡状态,它们对 g_* 都有贡献。

当温度下降到反应 $e^-p \rightleftharpoons n\nu_e$ 和 $e^+n \rightleftharpoons p\bar{\nu}_e$ 的速率小于宇宙膨胀率以后,中子 n 的冻结(freeze out)现象发生了。此时,质子和中子之间的核力已足以使它们形成 $\text{He}^4(2n + 2p \rightarrow \text{He}^4)$,大部分中子都束缚在 He^4 内,我们大体可认为, He^4 的丰度

$$R(\text{He}^4) = \frac{2n}{p+n} = \frac{2(n/p)}{1+(n/p)}.$$

此式中 $n/p \sim \exp[-\Delta m/T_f]$, Δm 为中子与质子的质量差, T_f 为所谓冻结温度,约相当 0.1MeV 的能量。

1977年,斯拉姆和瓦贡勒尔(Wagoner)经过标准计算,得到

$$R(\text{He}^4) = 0.23 - 0.26.$$

目前观测到的 $R(\text{He}^4)$ 的丰度从 0.23 到 0.32 不等,误差范围约在 ± 0.07 或 0.02 。可见大爆炸学说的预言是完全正确的。有的地方观测值较大,这似乎可以用恒星目前还在不断聚合为 He^4 来解释。

但是,这个结果如何跟中微子的种类联系上的呢?这要从早期宇宙等离子体的热平衡问题谈起。我们已经谈过,在大爆炸后 0.01 秒左右,此时宇宙温度约绝对温度 10^{11} 度,相对于 1MeV 能量。宇宙中的基本粒子处于热平衡状态,各种粒子的反应由于粒子密度极大、能量级高,其速率是很大的,比宇宙膨胀的速率要大。因为宇宙的膨胀速率 $\sim t^{-1}$ 。另一方面,粒子的反应速率则 $\sim N\sigma v$,其中 N 为粒子数密度, v 为粒子速度, σ 则为它们的反应截面,所以热平衡条件可以写作

$$N\sigma v \geq 1 \text{ 或 } N\sigma v \geq \frac{1}{t}.$$

中微子的密度 $\sim T^3$ 。中子和质子的转换反应($n \rightleftharpoons p$)截面则 $\sim T^2$ 。由此可以得到一个关系

$$\frac{N'_{DF}}{N_{DF}} = 1 + \frac{7}{36} (K_\nu - 2).$$

其中 N_{DF} 就是冻结温度时有效自由度, N'_{DF} 则是由于冻结温度改变的有效自由度,这个比值与 $R(\text{He}^4)$ 的数值有关。

1976年,裴伯特(Peimbert)得到 $R(\text{He}^4) < 0.29$ 。这给出 $K_\nu < 8$ 。1979年,苏姆(Thum)和泰勒(Taylor)得到 $R(\text{He}^4) < 0.25$ 。斯拉姆据此推断 $K_\nu < 4$ 。这个结果令人非常欣慰。

如果这个结论可靠的话,则在已知三种中微子 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 之外,至多还可能有一种尚未查知的中微子,与这种中微子相应的,还可能有一种带电的轻子。由所谓轻子-夸克对称性推知,最多还有两种或三种夸克有待发现。这样一来,大千世界,极微胜境,似乎再无更多精彩粉陈了。

然而不然!我们要谨慎。

上述结论还不能说是定论。首先,计算的可靠性,以及观测资料的精确性都不是毫无疑问的。例如,斯特克在1980年指出, He^4 的丰度小于 0.23 。这相应的中微子的种类甚至会小于叁,与目前已知有三种中微子的事实显然不相容。出路之一,修正大爆炸模型,一种更可能的补救办法似乎是,宇宙中重子物质的密度比我们原来设想的要小,占优势地位的是非核子物质的质量。

但是,对上述结论挑战的却是电子型中微子 ν_e 存在简并性的可能性。如果这种简并性果然成立,上面的限制就会大大变化了。

这是怎么回事呢?

我们平时总是认为,宇宙中所有电荷 Q ,电子荷 E 和 μ 子荷 M 都为零。就是说,所有正电荷与所有负电荷相等,所有正电子荷等于所有负电子荷。所谓电子荷和 μ 子荷是物理学家为了区别 ν_e 和 ν_μ 而引入的。

至于电荷 Q 总量为零,这以很高精度与实验吻合。因为电磁力与引力一样,都是长程力,因此都对宏观世界的运动规律有支配影响,但是,前者比后者要强 10^{18} 倍。换句话说,为了要用引力平衡两个质子的静电斥力,我们应对每个质子添上 10^{18} 中子,这当然与目前我们所看到的宇宙的电性处处是均一分布完全不符。

电子荷的情形就不同了。如果电子荷总量不为零,即正 ν_e 与反 $\bar{\nu}_e$ 数目不相同,这并不会引起上述电荷中遇到的问题。原因是 ν_e 和 $\bar{\nu}_e$ 之间并不存在象电磁力那样强的长程力。因此在原则上并不能排除

$$|(N_{\nu_e} - N_{\bar{\nu}_e})|/N_\gamma \geq 1$$

的可能性,这里 N_γ 表示宇宙中总光子数。这就是所谓中微子简并性。林适(Linde)在1979年在欧洲物理快报上发表一篇文章谈到,如果至今留存 ν_e 的数目比 $\bar{\nu}_e$ 的数目相对余额数量级为 1 ,那么 K_ν 不一定

小于六。有人甚至推断,这个限制应放宽到 $K_\nu < 10^4$ 。

就是说,幽灵家族的成员数可能有十万之多!这真是不可思议!这不变成“幽灵”遍地么!当然林适说,如果考虑重氢的产生,应有 $K_\nu < 10^4$,也有一万之多!

糟糕的是,宇宙学的观测资料并不与中微子简并性假设矛盾。因此,我们兴致勃勃得到的限制条件 $K_\nu < 4$ 的可靠性,不免因此而减色了。

但是,无论如何,我们从幽灵粒子的故事确实看到了,茫茫宇宙、渺渺太空蕴含极微世界的奥妙!以后我们还会看到,小宇宙的疑云暗雾,竟然会透露大宇宙的许多玄旨。