



粒子和反粒子的宇宙不对称的起源

方励之

狄拉克的错误猜测

1933年，狄拉克因他的电子和正子理论的成功获得诺贝尔奖金。是年12月12日，在诺贝尔演讲中，他却说了一段现在看来多半是不正确的话：

如果我们采纳迄今在大自然的基本规律中所揭示出来的正负电荷之间的完全对称的观点，那么，我们应当看到下述的情况实在是一种偶然：地球，也可能整个太阳系中，电子及正质子在数量上占优势。十分可能，对某些星球来说，情况并非如此，即这些星球主要是由正子及负质子构成的。事实上，可能每种星体各占一半。这两类星体有完全相同的光谱，用现有的天文学方法，无法辨别这两类星体。

这就是说，狄拉克主张宇宙是对称的。从宇宙的尺度来看，应当有一半的物质，一半的反物质，二者在数量上是相等的。

然而，事实证明，这个猜测并不对。

由太阳风的存在就可以判定整个太阳系是由物质构成的。否则，由物质构成的太阳风当与反物质相遇时，就会产生强烈的湮没辐射。比如，若木星是由反物质构成的，则扫过木星的太阳风与木星上反物质湮没所产生的伽玛射线，其强度将比目前的观测值高6到8个数量级。

太阳系之外的情况，可以用宇宙线来判断。因为脉冲星、超新星等天体是宇宙线的源，加之在宇宙线到达地球的路径上只经过极为稀疏的星际介质空间，它们不会显著改变宇宙线的成分。所以，宇宙线中的反物质成分就反映着源天体中的情况。由这种方法推算，星系中的反物质含量不超过物质含量的百分之一。

在星系团中，已经观测到X射线发射，这是由星系际的热气体产生的。如果在这种气体中含有等量的正反物质，就应有足够强的伽玛射线。但是却未观测到，因此，在星系团气体中，不会含有百万分之一以上的反物质。

另外，射电天文学发现，河外射电源的辐射中偏振

面有旋转，即有法拉第效应。这也表明，在星系际空间里不可能存在大体相同的物质区和反物质区。因为，如果那样，正反物质区所产生的法拉第效应就要相互抵消，而使总的结果为零。

总之，各种迹象都表明粒子含量远远大于反粒子含量，二者是不

对称的。

为什么从自然界的基本规律来看具有非常对称的性质的正反粒子，在自然界中的存在却如此的不对称？这是现代宇宙学中的一个基本的问题。

粒子的宇宙生成

对于上面的问题有一种答案，是说：现在之所以看到这种不对称性，那是因为宇宙中的粒子及反粒子的含量本来就是不对称的。

这个“本来的不对称性”倒底有多大？现在，我们根据标准的大爆炸宇宙学来分析一下。

按照大爆炸宇宙学，在宇宙早期，温度非常高，物态达到热平衡。其中存在着许多粒子和反粒子对。随着宇宙的膨胀，宇宙温度不断下降。这些粒子和反粒子将由于湮没而消失。

以重子为例，当宇宙温度大于 10^{13} 度时，宇宙中可以存在许多重子及反重子（正反质子、正反中子等等）。当温度低于 10^{13} 度之后，正反重子发生湮没。因此，如果在早期正反重子数目相同，即

$$\text{反重子数/重子数} = 1 \quad (1)$$

那么，由于湮没，今天的宇宙中就不会再有任何重子或反重子了。

按这种推论，就证明，在宇宙早期重子数与反重子数之比必定不相等。公式(1)不对，而应当是重子数多于反重子数，从而在湮没时期之后，还会有一些重子遗留下来。这些遗留重子就是构成恒星、星系等天体的主要成分。

现在的观测表明，平均说来，在宇宙间，每一立方米的体积中大约有一个重子。为了能够遗留下来这么多的重子，要求早期宇宙中正反重子含量的不对称性是：

$$\text{反重子数/重子数} = 0.999999999, \quad (2)$$

即约有十亿分之一的不对称。

尽管这个不对称性十分微小，它仍然不能被大爆炸宇宙学所容忍。因为，大爆炸宇宙学的基本观点就是认为宇宙间的一切都有其生成的过程，而且，现存的各种复杂的、不对称的宇宙现象，都是从简单的、对称

的原初宇宙演化出来的。因此，公式(2)中的不简单也不对称的性质，不能认为是从宇宙创生时期就存在的。

这样，在大爆炸宇宙学中，就有必要去说明，0.999999999这个数字到底是如何生成的。具体地说，如果原初的宇宙是对称的，即重子数等于反重子数，那么就应当去解释：宇宙如何从公式(1)所表示的状态演化到公式(2)所表示的状态？这就是大爆炸宇宙学中的粒子生成问题。

质子衰变和 K_L 衰变的宇宙学意义

粒子物理学中有一条守恒定律，叫做重子数守恒，意即：在粒子的变化过程中，重子数减反重子数是不变的。通常简称为 B 守恒。显然，如果 B 守恒总是对的，就不可能从公式(1)所表示的状态演化到公式(2)所表示的状态，因为状态(1)中的重子数减反重子数等于零，而状态(2)中不为零。

因此，如果要想解决粒子生成问题，就希望存在 B 不守恒的过程。

B 守恒的最强有力的证据之一，是质子是稳定的。质子是最轻的重子，它如果是不稳定的，就只能衰变成不是重子的更轻的粒子，那就必然会破坏 B 守恒。所以我们说，如果发现质子是不稳定的，就直接证明 B 并不总是守恒的。

迄今还没有观测到质子的衰变。当然，“没有观测到”还并不能证明质子是绝对稳定的。因为很可能它的衰变寿命太长，极不容易观测。如果质子会衰变，则木星上的质子衰变就会引起木星辐射。从而由木星的发射强度可以估算出质子衰变寿命的下限，结果是 10^{18} 年，这比宇宙的年龄 (10^{10} 年) 长得多。现在有几个实验组正在直接测量质子的衰变，已经证明它的寿命至少大于 10^{29} 年。如果这些实验最终证实质子是不稳定的，则不仅是粒子物理学中的一件大事，而且对宇宙学也会有极大的推动，因为它正是解决粒子生成问题的一个必要条件。

B 不守恒过程对于解决粒子生成问题，仅仅是必要的，但还不充分。因为，即使质子会衰变，但若反质子也会衰变，而且衰变率与质子相同，那还是不能从正反质子的对称状态变到正反质子的不对称状态。

这样，解决粒子生成问题的另一个必要条件就是存在着正反粒子之间不对称的过程。这种过程一般称为 C 破坏过程或 CP 破坏过程。

有一种 CP 破坏过程早已被发现，这就是长寿命中性 K_L 介子的衰变。这种介子有以下两种衰变方式

$$K_L \longrightarrow \pi^- + e^+ + \bar{\nu}_e,$$

$$K_L \longrightarrow \pi^+ + e^- + \nu_e,$$

因为 K_L 的反粒子就是它自身，所以，如果 CP 对称性保持正确，则 K_L 的这两种衰变方式的机会必定是相等的，即 K_L 衰变成负 π 介子、正电子及中微子的机

会，应当与衰变成正 π 介子、电子及反中微子的机会一样多。然而，实验证明两种情况并不一样多， K_L 更多地是按照第一种方式衰变。因而， CP 破坏了。

由于可能存在的质子衰变极缓慢，已存在的 K_L 的 CP 破坏又极其稀少，所以，在能量较低的范围中 B 不守恒及 CP 破坏作用是异常小的，但是，我们预期，在极高能的范围中，这些过程将会有明显的、较强的作用。这种期望的根据来自粒子物理的大统一理论。

大统一理论对极早能的预言

大统一理论企图把强相互作用、弱相互作用以及电磁相互作用都统一在一起。

电磁作用最为习见，它决定于电荷。只有在荷电和带磁性的粒子之间才会有电磁相互作用。在两个荷电粒子之间的电磁作用是通过它们之间交换光子而实现的。

类似地，强相互作用决定于所谓色荷，只有具有色荷的粒子之间才有强相互作用。两个带色荷的粒子之间的强相互作用是通过它们之间交换胶子而实现的。

在电磁作用中，只有一种电荷，而在强作用中的色荷却有三种，分别称为红色荷、绿色荷和蓝色荷。

各种参与强作用的粒子，像重子和一些介子，都是由夸克构成的。每一种夸克都具有一种确定的“颜色”——色荷。例如，有红夸克，绿夸克和蓝夸克等。

不同色荷也可以相互抵消，比如，一个红夸克、一个绿夸克、一个蓝夸克三者加在一起就成为“无色”的体系。在自然界中天然存在的体系，都是无色的，所有重子都由三个不同颜色的夸克组成。而每种介子都由夸克和相应的反夸克组成，也是无色的。

弱相互作用也可以类似地描写，它是通过交换 W^+ 、 W^- 和 Z^0 这类粒子而实现的。例如中子的衰变就是一种弱作用的结果

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

从夸克的观点看，这是由 W^- 粒子引起的。这种粒子会使中子中的一个夸克 d ，变成质子中的一个夸克 u 以及电子和反中微子，即

$$d \longrightarrow u + W^- \longrightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e.$$

W^+ 、 W^- 、 Z^0 和光子、胶子不同，后二者的静质量为零，而前三者的静质量都很大。所以，弱相互作用是一种作用半径非常短的力。只参与弱作用和电磁作用的粒子叫做轻子。

总之，如果强作用、弱作用和电磁作用都统一起来，就要增加一些新的传递相互作用的粒子，它们能使强作用的夸克变成轻子，例如，使质子变成阳电子。这也就破坏 B 守恒。

如果某种 X 粒子能引起 B 守恒的破坏，那它就可能有以下衰变性质，

$$X \longrightarrow q + \bar{q}$$

$$X \longrightarrow \bar{q} + \bar{l}$$

即 X 可以衰变成两个夸克 q 和 \bar{q} , 也可以衰变成一个反夸克 \bar{q} 及一个反轻子 \bar{l} . 这两种过程的存在, 就可能引起质子中的一个夸克 u 变成

$$u \longrightarrow \bar{u} + X \longrightarrow \bar{u} + \bar{d} + e^+$$

正是这个过程会导致质子的衰变

$$p \longrightarrow \pi^+ + \pi^- + e^+.$$

显然, X 粒子的质量应很大, 否则质子的寿命就会太短. 大统一理论预计, X 的质量约为质子质量的 10^{15} 倍, 而质子的寿命约为 10^{31} 年. 这就是说, 大统一理论预言, 只有当能量高达 10^{15} 质子质量时, B 不守恒过程才会起显著的作用. 目前最大的加速器, 在质心系统中的能量只约有十几个质子质量. 所以, 对于 B 不守恒过程来说, 目前的高能加速器实在是极低能的. 什么地方会有如此高的能量呢?

在 1 微微微微微微秒之前

在宇宙年龄远小于 10^{-36} 秒的时期, 宇宙膨胀率超过各种相互作用的反应率, 所以并没有热平衡. 但当宇宙年龄接近 10^{-36} 秒, 各种相互作用的反应率开始超过宇宙膨胀率, 这才进入热平衡. 那时, 宇宙间有许多 X 粒子和它的反粒子 \bar{X} , B 不守恒的过程是很平常的事. 不过, 由于整个物态是热平衡的, 这种过程并不会造成重子与反重子之间的不对称. 重子数和反重子数一直是相等的.

一当宇宙年龄到达 10^{-36} 秒, 情况就不相同了. 这时宇宙的能量尺度将开始低于 10^{15} 个质子质量, X 和 \bar{X} 都将开始湮没或者衰变而消失.

前面已说过, X 有两种不同的衰变方式即 $q + \bar{q}$ 和 $\bar{q} + \bar{l}$, 反粒子 \bar{X} 也会有相应的两种, 即 $\bar{q} + q$ 及 $q + l$. 如果这种衰变又是 CP 破坏的, 则当 X 和 \bar{X} 衰变之后, 宇宙间就会出现重子数和反重子数的不对称性.

总之, 如果大统一理论预言的这种 X 粒子存在, 那么粒子和反粒子之间的不对称就会在 10^{-36} 秒的时代自然而然地生成. 目前理论推测宇宙中重子数 n_B 和光子数 n_γ 的比是:

$$\frac{n_B}{n_\gamma} \sim 10^{-8} \text{ 到 } 10^{-10}$$

这就是粒子生成学说的现状.

从美学的观点看, 这个学说是相当成功的. 因为, 它把粒子的统一理论和宇宙的演化问题极为和谐地结合在一起了. 所以, 尽管目前它还相当不完整, 但已经获得了较高的评价.

的确美学判据也是一个重要的判据. 在宇宙学的发展上常常会遇到它. 哥白尼在发展日心说的时候, 一个重要动机是他看到: 比起由均轮车轮等构成的复杂的地心体系来说, 日心体系要简洁完美得多. 因此, 尽管当时日心说对天体运行的预言并不优于地心说, 他还是倡导它.

当然, 美学判据并不总是正确的. 为了解释五大行星的轨道半径, 开普勒曾提出各层天球的半径由一系列互相切合的正多面体决定, 这的确是一个非常对称的几何图景. 但牛顿力学发展之后, 就看到这个颇具对称美的解释只是形式上的, 而不是实质的.

因此, 粒子生成说也必须等待进一步的观测结果, 以判断它的可靠性. 至少有两个观测目前是可行的. 一是质子衰变实验; 一是天体中微子的观测. 前者的意义我们已经讨论过了. 后者的意义在于更进一步地确认正反粒子的不对称性. 因为光子的反粒子就是它自身, 所以, 用光学天文学难于判定遥远天体是否由物质构成. 中微子则不同, 正反中微子是不同的粒子. 因此, 如果能探测到天体发射的中微子或者反中微子, 我们就可以直接判定它是由物质还是由反物质构成的. (题头: 明)