

方 励 之

### 粒子认识论中的“相变”

1981年秋,汤川秀树去世后,许多人追怀他在物理学上的业绩。其中常常涉及这样的问题:为什么介子是由汤川这样一位东方的学者首先预言,而当时作为物理学研究中心的欧洲却没有人提出?

事实上,关于核力可能是由中子和质子间交换某种粒子而引起的思想,在三十年代初的欧洲,已隐约地有了。海森堡曾提出,中子和质子之间的结合,就像氢原子和氢离子之间的结合一样,是由交换一个电子导致的。费米则讨论了中子和质子交换一对粒子(即电子和中微子)的模型。尽管海森堡的理论中存在角动量困难,费米理论中有耦合强度问题,但无疑,这条思路是趋向介子论的大门的。

汤川在他的自传《旅人》一书中回忆,他是在“读了费米的文章之后”,才开始去探讨强核力能否用交换粒子这种方式去解决,“那时,我开始沿着这条思路认真地去想,几位外国科学家当时也正沿着同样的想法工作着……”。

在同样的思路,为什么汤川能先人一步呢?

在那个秋天,笔者恰好也在汤川纪念馆(京都大学基础物理研究所),得知对上述问题的一个公认的答案是:汤川先生成功的原因之一,正因为他是属于东方的。

三十年代初期的欧洲,似有一种潜在的原则:不赞成新粒子。例如,1930年,泡里根据 $\beta$ 衰变的性质,猜测可能存在一种新粒子(即中微子),然而,他并没有就此发表正式的论文,而只在给他的朋友的信中谈及,或只作为一个讨论的注记。又如,狄拉克曾经根据对称性质预言了正电子,然而最初他却说这种粒子可能就是质子。

狄拉克后来曾解释他们当时为什么都是欲言又止,他说:“在那个时期里,我决不敢冒然去假定存在一种新粒子。因为当时的舆论气氛是不赞成新粒子的。”

“不赞成新粒子”,这就是三十年代曾流行的一种粒子认识论。

三十年代的东方,并没有这样的舆论,或者没有受到它的强的影响。这就是汤川之所以取得成功的一个重要的文化上的因素。

和三十年代相比,今天的粒子认识论已经“相变”了。不但预言新粒子、证实新粒子是研究兴趣的一个中心。而且,对于一些并不存在的粒子,亦即预言中**应当存在而实际上不存在的**粒子,也同样受到关注。如果前一类问题可以简化地称为存在的粒子的物理学,那么,后一类问题就可以称为不存在的粒子的物理学。

后一种物理学中的一个典型问题,就是超重磁单极子。

### 应当存在的磁单极子

量子论中的磁单极,也是早在三十年代初狄拉克就开始讨论了。不过,包括狄拉克本人在内,一般并不相信磁单极子真的存在,直到1981年11月11日,在狄拉克致萨拉姆的信中,他仍然说:“至今我是属于那些不相信磁单极子存在之列的。”

大统一及早期宇宙的研究,使许多人改变了简单的“不相信磁单极子存在”的观点。

1974年特胡夫特和玻利亚科夫分别证明,在带有自发破缺的Higgs场的 $SU(2)$ 规范理论中,存在磁单极子是必然的。这个结论可以立刻推广到大统一理论,因为在大统一理论中,也是Higgs场,也有所谓真空自发破缺机制,所以必然也有磁单极子。而且,对称性自发破缺之后,可能存在许多不同的真空态,从而空间可能分割成一个个区域,同一个区域中真空态是一样的,不同区域则有不相同的真空。这些区域的交界处的场,可能就是磁单极子的场。它的磁荷 $g$ 也遵从狄拉克所给出的量子化条件,即

$$g = nhc/2e \quad (1)$$

磁单极子的质量大约是:

$$m \sim (g^2/hc)^{1/2} \epsilon / c^2 \quad (2)$$

其中  $\epsilon$  表示大统一的能量尺度, 约为  $10^{14-15} \text{GeV}$ , 因此  $m \sim 10^{16} \text{GeV}/c^2$ , 可见它是超重的、比质子质量约大  $10^{16}$  倍。

既然磁单极子处于一些具有不同真空态的区域的交界处, 而且它有一定的体积, 所以它的数目和这些区域的数目应该大致相当。利用这种特性, 并考虑到发生真空自发破缺的相变之后, 才能产生磁单极子, 就可以估计磁单极子在宇宙中的丰度。

宇宙开始时温度极高, 具有高的对称性, 当温度下降到  $10^{28}$  度, 或者能量为  $10^{15} \text{GeV}$  时, 大统一的对称性自发破缺相变发生。由于这时宇宙年龄  $t$  只有  $10^{-36}$  秒, 宇宙中具有因果联系的空间尺度仅为

$$ct \sim 10^{-26} \text{ 厘米} \quad (3)$$

或者说, 只在体积  $V \sim (ct)^3$  的小范围中才可能有因果联系, 超过  $V$  的范围就没有因果联系了。因此, 在自发破缺相变之后, 具有相同的真空态的区域大小不会超过  $V$ 。这样, 在宇宙年龄为  $10^{-36}$  秒的时代, 磁单极子的数密度可高达  $n_m \sim 1/V \sim 10^{78}/\text{厘米}^3$

(4) 随着宇宙的膨胀,  $n_m$  要成比例地下降。膨胀到今天,  $n_m$  已很少, 但它与重子的数密度  $n_B$  之比仍然有

$$n_m/n_B \sim 10^{-4} \quad (5)$$

即万分之一, 即比金在地球上的含量还要高许多。这就是由大统一和早期宇宙理论所预言的“应当存在的”磁单极子。然而, 宇宙间并没有这些磁单极子。

### 磁单极子实际上不存在

如若一万个重子就相应着一个磁单极子, 而且一个磁单极子的质量又比重子大  $10^{16}$  倍, 那么, 磁单极子的质量密度就应比重子的大  $10^{12}$  倍。

另一方面, 根据天文观测, 宇宙中的总质量密度不可能比重子密度高 100 倍以上。这样, 预言中“应当存在的”磁单极子要比宇宙可容纳的最大数量还大十个量级以上。

有不少工作企图直接发现磁单极。例如, 月岩或陨石都是太阳系中的古岩石, 有人用强磁场抽吸可能残存在这种样品中的磁单极子。或者找寻磁单极在岩石中留下的径迹, 结果都是否定的, 没有找到磁单极的痕迹。由这个结果得到的丰度是(请与(5)式对比):

$$n_m/n_B < 10^{-28} \quad (6)$$

1975 年, 澳大利亚的普赖斯 (Price) 等曾宣布, 在他们的探测宇宙线的气球实验中, 纪录到一个可能是磁单极的事例, 不过许多人不同意他们的分析, 没有得到公认。1982 年春, 斯坦福大学的卡伯来拉 (Cabrerera) 声称利用他的超导量子干涉器件, 等待了约二百天, 捕捉到一个磁单极。由于他的仪器还能确定磁荷值, 而且结果与狄拉克条件(1)符合, 这使他的实验

结果受到更多的重视, 不像普赖斯的那样, 缺乏确定性。

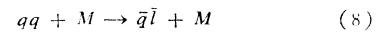
怀疑卡伯来拉实验的理由还是不少的。按照卡伯来拉的实验, 磁单极子的丰度大约有  $n_m/n_B \sim 10^{-8}$ , 虽然它比(5)式的  $10^{-4}$  小得多, 但与(6)式比较仍然是太大了。如果银河系中真有  $10^{-8}$  的磁单极, 银河系中就不会存在磁场了。因为, 星系的磁场会使磁单极加速, 从而也就把星系的磁场能消耗尽了。因此, 根据银河系磁场的存在, 就可以断定其中磁单极子不可能太多, 它的上限是

$$n_m/n_B < 10^{-16} \quad (7)$$

总之, 目前的宇宙中, 磁单极子必定很少很少, 甚至没有。

是不是在宇宙早期相变中曾有很多磁单极产生, 而后来都相互湮没了, 以至现在找不到它们? 磁单极子有两类, 即北磁单极和南磁单极, 就像电荷有正负一样。正电子和负电子相遇会湮没掉, 北磁单极和南磁单极相遇也会湮没掉。但是, 这种湮没的效率不高, 不可能使早期产生的磁单极减少到如今几乎一无所有的程度。

最近, 鲁巴可夫 (Rubakov) 和卡兰 (Callan) 证明, 一些夸克对会凝聚在磁单极周围, 而磁单极会促使它们发生重子数不守恒的反应, 例如



其中  $q$  和  $l$  分别表示夸克和轻子,  $\bar{q}, \bar{l}$  为其反粒子,  $M$  是磁单极。在这种反应中磁单极并不损耗, 而像是催化剂。根据他们的计算, 这种反应的截面像典型的强作用那样大。

鲁巴可夫-卡兰的理论如果正确, 则更说明在宇宙早期磁单极子就应很少, 否则它们会改变重子的数量, 以至不符合现在的观测。

所有的分析似乎都说明: 磁单极子是“实际上不存在”的, 或几乎不存在的, 无论在今天, 还是早期, 都是如此。

怎样才能摆脱这种“应当存在”, 而又“实际不存在”的困境呢?

### “通货膨胀”的存在

如果不轻易地怀疑大统一理论关于存在磁单极的预言, 那么, 要调和上述的矛盾, 就应压低磁单极在早期宇宙中的产额。

在自由经济的社会中, 失业率和通货膨胀率之间常常有反的相关。压低膨胀率, 失业率就增加; 压低失业率, 就不可避免地引起膨胀率的提高。磁单极的产生率和宇宙的膨胀率二者之间似乎也有类似的关系。要保持慢的宇宙膨胀, 就会产生很多磁单极, 反之, 要压低磁单极的数目, 早期宇宙的膨胀就应加快。这就是“通货膨胀”模型的要点。

磁单极子的产生率和宇宙膨胀率之间的反相关的机理也很简单。磁单极之所以过多,关键是大统一相变的时期太早,那时的因果范围(见公式(3))太小。反之,如果相变发生得晚,因果范围变大,就会降低磁单极的产生率。因此,人们设想,当宇宙温度降到  $10^{28}$  度时,大统一相变并不发生,而仍然保持原来的状态,从而形成相变中的过冷状态,就像在零度以下尚未结冰的过冷水一样。当宇宙处在过冷状态时,粒子的质量-能量是小的。因此,粒子之间的引力作用对宇宙膨胀的制约减小,宇宙的膨胀就会加快。

除了磁单极过多问题之外,“通货膨胀”模型还能解决宇宙学里的其他两个老问题:一是,为什么宇宙如此之“平坦”?二是,为什么宇宙这样均匀各向同性?

所谓“平坦”是相对“弯曲”而言的。由爱因斯坦方程求出的宇宙模型,绝大多数都具有弯曲的时空,只有在极特殊的条件下,时空才可能是没有弯曲的,即平坦的。我们生活的宇宙恰恰是这种“平坦”(或极近于“平坦”)的宇宙。如果认为宇宙恰恰选择了该种极特殊的条件作为它的初始条件,那不算完全的科学解释。因为,在宇宙学里不希望太多地使用“事情现在之所以这样,是因为它过去曾经那样”的哲学。

“通货膨胀”模型的优点是,不需要宇宙初始选择特殊的条件。不论初始多么不平坦,但只要宇宙早期有一个“通货膨胀”阶段,即快速膨胀阶段,时空就会从弯曲变得近于平坦。

均匀各向同性问题主要来自微波背景辐射。在整个天空上,来自不同方向的背景辐射的温度的相对差

小于千分之一。在慢膨胀(早发生相变)模型中很难解释这一点,因为慢膨胀的因果区域太小,来自不同天区的辐射是属于不可能有因果联系区域的。对于没有因果联系的区域,没有理由说明它们的辐射温度为什么相同。

在快速膨胀(晚发生相变)模型中,因果区大大地扩大了。上面的困难自然地消失。

最近,林德(Linde)讨论了一种更简便的图象。在从过冷相到正常相的相变中,开始是在过冷区中形成一些小的泡状区域,泡中的真空处在破缺的状态,即正常态,泡周围则仍然是过冷态。这个泡不断地长大,过冷态就不断地变成正常态。当泡区占满整个空间后,相变就完成了。林德的观点是,至今我们的天文观测的范围仍然局限在一个泡中,没有超出一个泡,所以宇宙是均匀的。而且,在一个泡区中,没有不同的真空态,也就根本没有磁单极子。

没有磁单极子,没有时空弯曲,没有非均匀性,我们的宇宙在大尺度上的这种“三无”似乎说明早期存在一个“通货膨胀”(即快膨胀)的时代。初次接触宇宙学的人,都不免有一种心理感觉,上述的推论和分析是不是走得太远,走得太离奇了呢?这种“太远”或“太离奇”的心理,与其说是来自对宇宙学的具体内容的陌生,不如说是一种潜在的认识论上的束缚的结果。如果我们回想一下三十年代那些有关中微子、“空穴”等等曾被认为“离奇”的预言,就可能觉得,宇宙学同样在走着物理学其他分支在走的路。