

从弱作用现状看它的未来

温伯格

它们的自旋结构，对味的依赖以及它们很弱的作用强度仍然是主要问题。但是，现在它们已成为粒子物理中的普遍问题。

我们都喜欢把物理学看成是不断发展的统一整体。但是，在它发展过程中的任何时候，实际上都被分为一些不同的研究领域，有时人们甚至把它们定义为不同的学科。三十年前，粒子物理学家正在研究基本粒子的强相互作用和弱相互作用。但是，在这两个领域工作的科学家的情况却大不相同。特别是，他们所得到的资料的多少以及这些资料的研究价值是非常不同的。

对于研究强相互作用的物理学家来说，在发现了大量新的介子态和重子态之后的不久，就获得了迅速增长的关于核子-核子和核子- π 介子相互作用的大量资料。但是，这些资料却没有多少研究价值，因为强相互作用太强了，以致于人们作不了多少可与实验比较的理论计算。

而弱作用却不同，由于弱作用非常弱，我们完全可以进行微扰计算（除非在这个过程中含有强相互作用）。但是，作用弱就使我们得不到足够的可靠资料。当时只有一些关于核衰变弱作用形式的不完整资料和一点点珍贵的关于 μ ， π 和奇异粒子的弱作用资料。

我或许可以把强相互作用物理学家比作吞食了大量营养价值不高植物的大象；而弱作用物理学家好像是忍着饥饿躺在树上等待肥羚羊从树下通过的豹。当然，他们的大部分后来一直仍在挨饿。当时，我不久就认识到，普林斯顿大学的山姆·崔曼是一位非常精明的豹。因而，我就加入了他们的研究行列，学习如何从弱作用现象中寻找好的研究题。那时，对我来说，强相互作用是件讨厌的事，因为在分析强子弱作用时必须要考虑它，而它自己或许绝不会揭示出十分有意义的东西。

改变研究方向

在这个时期的粒子物理研究中，最有意义而且影响研究方向的工作，是1958年山姆·崔曼与新来普林

斯顿的 M·古德博格发表的文章。这篇文章打破了弱作用物理学家与强相互作用物理学家彼此隔离的局面。这篇文章像1900年 M·普朗克发表的关于黑体辐射的第二篇文章和1925年 W·海森堡发表的关于量子力学的第一篇文章那样，是令人最难理解的工作之一。他们得出的令人瞩目的结果成功地改变了研究方向。但是，他们自己也没完全认识到他们工作的意义和对今后的影响。

他们的工作是，用色散关系计算带电 π 介子的衰变率，并且利用一个巧妙的近似得到了如下简明的结果：

$$F_{\pi} = 2m_N g_A / G \quad (\text{简称 } G-T \text{ 关系})$$

其中的 F_{π} 是 π 的衰变振幅， m_N 是核子质量， G 是 π -核子耦合常数。这个公式与实验结果相比是惊人的符合。

为了弄清这个关系式为什么与实验符合得这样好，兴起了1959—1960年的理论研究热潮以及随后1965年的第二个研究高潮。经过这些研究，理论家们认识到，强相互作用具有近似的 $SU(2) \times SU(2)$ 对称性。两个 $SU(2)$ 的作用刚好象原来的 $SU(2)$ 变换，不过在这儿是分为左右手核子（实际上是夸克）场。相应地，存在着矢量流和轴矢流的近似守恒，这等同于核子 β 衰变的强子流。这个对称性是自发破坏的，即这种对称性的破坏不出现在强子多重结构中，而出现在流性质和低能 π 介子的作用中。按照这种观点， $G-T$ 关系实际上应该写为：

$$G = 2m_N g_A / F_{\pi}$$

这就是说，核子发射低能软 π 的振幅 G ，由于单个核子态破坏轴矢流守恒而正比于 $(2m_N g_A)$ ，并且还正比于表示发射 π 介子的因子 $1/F_{\pi}$ 。

强相互作用对称性自发破坏的发现，提醒人们去研究其他领域的对称性自发破坏的可能性，而这就导致了按照规范对称性自发破坏观念时弱作用的一个接

一个的现代认识。其中的一个结果是，我们现在可以解释前面所述的强相互作用破坏手征对称性的流与 β 衰变矢量流和轴矢流的关系：这刚好是电弱规范群和手征对称群在它们作用在夸克二重态上时的重叠部分。

以上我只给出了在过去几年里几件重要事情是怎样结合在一起的一个例子。在今天，很难想像年轻的博士生会宣布他(或她)希望做弱作用研究。是的，他们可以研究基本粒子现象学，或者规范场论，还有一些像超对称或超弦理论那样新的研究课题。但是，我认为，并不是说弱作用常常困扰我们的每一个问题都已解决。事实上有些老问题现在仍然存在。只不过它们现在是以粒子物理中普遍存在的问题的形式出现罢了。为了说明这点，我想提出弱作用常常困扰我们的三个老问题，并且看看这些问题在目前粒子物理学研究中是怎样出现的。

三个老问题

第一，弱相互作用的自旋结构。正如大家所知道的，在 1956—1957 年，也就是开始研究原子核 β 裂变的费米作用形式的四分之一世纪之后，人们终于认识到弱作用是破坏手征的，并且具有矢量流减轴矢流(即 $V-A$) 的形式。这可以概括为：带电流弱作用只含有基本费米子(轻子和后来认识到的夸克)场的左手部分。现在，按照现代规范理论这可解释为：夸克场和轻子场的左手部分形成规范二重态，而它们的右手部分是规范单态。通常把这种性质简称为，费米子是手征的。那么，费米子为什么是手征的呢？更奇怪的是，弱作用的这个基本性质现在还具有简单重复和难以理解的两个特性。

为什么说弱作用费米子手征性具有简单重复之特征呢？在过去十年，人们研究的基本粒子相互作用的统一理论里，实际上都含有物理学基本能量标度的观念。不管是普朗克标度，大统一标度，紧致标度，或者弦张量标度，它们都远远超过实验室所能达到的能量，它们或许会像 10^{19}GeV 那样大。按照这种观点，我们能发现的，只有通过对称性的要求使它们在非常高的能量(统一能量标度)标度质量为 0 的那些粒子。而且，在已知的情況里，这些粒子只有引力子，规范玻色子和手征费米子(根据超对称理论或许还有它们的伙伴)。因此，观察到的费米子必须是手征的，否则就是由于它们太重而没观察到(像 t 夸克那样)。

但是，手征费米子的存在还是难以理解的。大统一规范李群的大部分候选者都只有实表示，这就不会有手征费米子。高维纯引力理论当它紧致到四维时空时，也总得出只有非手征费米子的结果。为什么像嫁接(heterotic)超弦理论那样的 $E_6 \times E_6$ 超弦理论会引起许多物理学家的很大兴趣呢？其主要原因之一是

在它从十维紧致到四维时空时，会自然地得到 F_4 ，而 E_6 是允许手征费米子存在的几个少数大统一规范群的候选者之一。为什么一定要有手征费米子？我们至今还不知道如何证明。但是，在过去十年里它已成为我们考虑很高能量的物理学基本理论的关键线索之一。

第二个老问题是弱作用对味的依赖。许多年以前人们就知道，弱作用可以成功地用下面的图象描述： u 夸克不是单独地衰变为 d 夸克，也不是单独地衰变到 s 夸克，而衰变到它们特定的线性组合： $d \cos\theta_c + s \sin\theta_c$ ， θ_c 称卡毕玻角，实验确定它大约为 13° 。后来人们又提出与 $d \cos\theta_c + s \sin\theta_c$ 正交的线性组合 $-d \sin\theta_c + s \cos\theta_c$ 的衰变也是可能的，不过这新的衰变与新的夸克 c 相关。但没有一个人知道 θ_c 角是从那里来的。

当然，现在又多了两个夸克， b 和 t ，其中 t 至今还没发现。这样，就又为我们提供了两个混合角和一个可解为 CP 破坏的相角。

现在，混合角问题仍然存在，不过这个问题现在有些转化。从现代规范理论看，由电弱规范群变换下不变定义的夸克场才真是基本场，而定义质量(它也是通过把 W 和 Z 与光子分出的对称性自发破坏的方式获得质量的)的夸克场是基本夸克场的混合。这样为什么会有卡毕玻角就不再是不可理解的了，而为什么它会有观测到的值的问题，这已经属于认识轻子和夸克质量的一般问题了。

但也确实留下个问题。这就是大家所知道的，为什么最轻和最重的带电轻子 e 和 τ 的质量比竟有 3000 之大？为什么最轻和最重的夸克 u 和 t 的质量比至少要有 10000 之大？而且，在卡毕玻角没有多大变化情况下为什么新增加的两个混合角是如此惊人的小？我们中间有许多人曾试图在这些质量和混合角之间寻找某种解释它们的模式，但至今还没揭开这个秘密。

最后一个老问题我是想谈谈弱作用非常弱的相互作用强度。由中微子的穿透能力我们可以认识到弱作用是多么弱。但是，从电弱规范理论看，弱作用并没有什么特殊。它的唯一的无量纲参数是 $SU(2) \times U(1)$ 耦合常数，它的大小与电荷 e 是同一量级。但是，电弱规范理论里有一个标志电弱规范对称性破坏的、大约 270 GeV 的基本能量标度。它预言的 W 和 Z 的质量是 e 乘上这个能标度的量级。实验结果证明这是个正确结果。这样，弱作用为什么如此弱的老问题看来被如下问题所代替：为什么有些夸克和轻子—— u 、 d 和 e 的质量比起 W 和 Z 的质量是如此轻？然而，这也正是属于通常所考虑的夸克和轻子的一般问题。事实上，按照这个观点，为什么 t 夸克不可能比 W 轻许是最难理解的，最难理解的问题倒是我们首先发现的电子为什么那么轻？因而，实际上最难理解的问题并不是弱作用为什

么这么弱,而是它为什么这样强。就是说,电弱破坏标度 270 GeV 同大约 10^{17} GeV 的普朗克标度,或者大统一,卡鲁查-克莱因紧致标度,或者超弦能量标度相比为什么这么小? 这个问题称作能量阶梯问题。在过去十年里,这个问题已经推动了一个大胆的、新的理论观念(超对称)的发展。

弱作用的终结

这样,弱作用物理的问题仍然存在,不过它作为一个独立的专门研究领域已经结束了。在我的文章将要结束时,我想提一个问题,就是历史是否会重演? 实验是否可能为我们提供某种新的更弱的弱作用?

考虑这个问题的一种方法是: 让我们想像一下,如果我们现在完全了解了强作用和电磁作用,并且数学上又完全成熟;但对弱作用我们却什么都不知道,那么现在的物理学会是什么样呢? 我们会知道许多表观上的精确对称性,如劳伦兹不变性,色荷和电荷规范不变性, C , P 和 T 不变性,和夸克和轻子各自味——奇数,偶数, μ 数的守恒等等。如果把这些对称性都作为自然界的基本定律接受下来那可能是愚蠢的。然而,刨根问底的人可能会注意到: 不在已知的至少四个费米场的夸克和轻子之间引进结构复杂的相互作用,就没有别的其他简单方法来破坏像奇异数守恒,电荷共轭不变性等对称性。这样,不可重整的相互作用必须含有某个由质量标度负幂给出的耦合常数,而且,如果这个标度非常大(比如说 270 GeV)的话,那么像破坏奇异数,宇称那样守恒量的耦合就可能探测不到。这时,最精明的物理学家可能至少要考虑破坏已知对称性的弱作用的可能性。

这种推测之合理性是很清楚的。历史会重演吗? 我们能够发现能量标度比 270 GeV 大很多的、破坏现在普遍接受的 μ 数,重子数,轻子数或者还有别的什么守恒的超弱作用吗? 如果是这样,我们大家(理论家和实验家)将会进入一个新的十分有趣的研究领域。

显然,我不知道将来是否真是这样。然而,我想对那些有志参加粒子物理研究工作的年轻学生说句衷告话,那就是要吸取崔曼的选题经验!

(勾亮编译)