

# 回顾过去一年高能物理的进展

## ——标准模型胜利的前前后后

黄 涛

### 一、标准模型和反常事例

自然界中存在四种相互作用：引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。历史上爱因斯坦曾试图将引力相互作用与电磁相互作用统一在一起未取得成功。六十年代格拉肖-温伯格-萨拉姆成功地将弱相互作用和电磁相互作用统一在  $SU(2) \times U(1)$  模型理论中。1973 年西欧中心的实验证实了这一模型所预言的中性流，自那以后，这一弱电统一模型理论经受了实验的检验。特别是 1983 年初，荷电中间玻色子  $W^\pm$  和中性中间玻色子  $Z^0$  的发现对确立弱、电统一模型理论具有极为重要的意义。另一方面，自 1973 年以后发展起来的量子色动力学（满足  $SU(3)$  色对称性）在强相互作用领域也取得了重要的进展，经受了实验的检验，有可能成为强相互作用的基本理论。通常人们将弱相互作用与电磁相互作用统一的  $SU(2) \times U(1)$  模型理论和满足  $SU(3)$  对称性的量子色动力学理论统称为标准模型理论（ $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ）。

从 1983 年下半年到 1984 年，传出了许多实验迹象是这一标准模型理论所无法解释的，因此许多科学家将 1984 年称为反常年。有哪些反常现象呢？1. 1983 年下半年在发现的 16 个  $Z^0$  事例中其中有两个  $Z^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$  反常事例，这样一个事例率达 1/10 是用辐射衰变（ $\alpha = 1/137$ ）无法解释的；2. 单喷注事例。1984 年在西欧中心的对撞机上发现了 5 个单喷注（Monojet）事例，这也在标准模型中所无法解释的；3. 发现了  $\xi(8.3\text{GeV})$  粒子。1984 年以实验上测量光子可靠而闻名的晶体球实验组在西德的 PETRA 上从  $\gamma$  的辐射衰变中发现了  $\xi(8.3\text{ GeV})$  粒子，标准模型无法解释这一粒子的地位；4. EMC 效应。这是 1983 到 1984 年确立的反常效应，这一现象是说对于原子核的深度非弹结构函数并不等于简单的质子和中子结构函数相加，明显地有  $\pm 20\%$  的破坏，是传统的原子核理论和量子色动力学所无法解释的；5. 中微子质量问题。1984 年苏联（ITEP）实验小组宣布结果测量电子中微子质量不等于零， $M_\nu^2 = (1215 \pm 130)\text{eV}^2$ 。还有一些其它反常事例，以上只列出了几个重要的反常现象。这些对标准模型挑战的实验现象激发了成百上千的粒子物理学家寻找新物理、新观念的热情，人们希望从这些迹象看到标准模型理论的局限性，从而从矛盾中找出新物理学的端倪。

### 二、标准模型理论的胜利

如果说 1984 年是反常年，那么 1985 年就是标准模型胜利年。在 1985 年 8 月日本京都召开的国际轻子、光子会议上许多实验物理学家宣布新的结果表明，反常现象一个一个地被消除，标准模型处于胜利的欢呼声中。例如  $Z^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$  反常事例，这一年多来西欧中心机器的积分亮度增加了三倍，仍没有看到新的事例，这意味着那两个反常事例可能是本底。又如单喷注事例现在已增加到 29 个，认真细致的分析表明这 29 个事例大多数都可以在标准模型内用背景来解释。此外，这一年来的实验结果并没有看到  $\xi(8.3\text{GeV})$  粒子。关于中微子质量的实验结果，人们重新分析了同样的结果表明苏联人的实验与中微子质量等于零并不矛盾。还有近年来不同的实验结果表明在大  $x$  区域（ $x > 0.3$ ）EMC 反常效应是存在的，如果对传统的原子核理论适当修改，这种反常是可以解释的，并不构成对量子色动力学的威胁。

除了反常现象逐一消除以外，一系列的实验结果再次肯定了标准模型的成功。西欧中心 UA1 和 UA2 实验组的最新测量结果给出

实验组	UA1	UA2
$M_W$	$(83.1^{+1.3}_{-0.8} \pm 3)\text{GeV}$	$(81.2 \pm 1.1 \pm 1.3)\text{GeV}$
$M_Z$	$(93.0 \pm 1.6 \pm 3)\text{GeV}$	$(92.5 \pm 1.3 \pm 1.5)\text{GeV}$
$\sin^2\theta_W$	$0.216^{+0.005}_{-0.008} \pm 0.015$	$0.226 \pm 0.005 \pm 0.008$

由  $M_W$  和  $M_Z$  所确定的温伯格  $\sin^2\theta_W$  与中微子中性流测量的结果  $\sin^2\theta_W = 0.220 \pm 0.008$  在误差范围内相当好地一致。 $\Sigma^- \rightarrow \nu e \bar{\nu}$  过程中的  $g_A/g_V$  值是卡比玻（Cabbibo）理论多年来遗留的唯一困难，从卡比玻理论预言  $g_A/g_V = -0.280 \pm 0.016$  可是以前的实验结果不仅数值不对而且连符号都会相反。新的实验数据积累比以前多了十倍，得到的最新结果为  $g_A/g_V = -0.29 \pm 0.09$ 。至此，卡比玻理论的唯一困难已宣

(上接封四)

告解决。此外,实验上测得的 $\tau$ 轻子的寿命为 $\tau_\tau = (2.90 \pm 0.17) \times 10^{-13}$ 秒,这一结果与理论预言在误差范围内一致。实验测得了更准确的B介子寿命,其结果为 $\tau_B = (1.26 \pm 0.16) \times 10^{-12}$ 秒,与标准模型理论预言一致。实验上在 $\nu$ -e散射实验中测得 $g_A^e = -0.53 \pm 0.04$ ,与标准模型理论预言 $g_A = -1/2$ 一致。

所有这些结果都表明标准模型理论经受住了实验的检验,取得了重大的胜利。

### 三、新粒子、新现象

1984年在莱比锡的第22届国际高能物理会议上宣布找到了第6个夸克(顶夸克)事例,后来事例数又有增加,测得其质量都在30—50 GeV之间,这是否已确认了顶夸克的存在?人们还持保守的态度,因为尽管事例数在增加,但统计误差并未缩小,仍不能确信顶夸克的存在,有待进一步的证实。从 $z^0$ 的衰变宽度 $\Gamma_z$ 的实验测量结果给出

$$\Gamma_z = \left( 2.19^{+0.70}_{-0.50} \pm 0.22 \right) \text{ GeV}$$

表明在标准模型内应存在三代轻子,由于夸克和轻子是对称的,夸克也存在三代,第六个夸克有可能存在,实验上将继续寻找。

1985年在DORIS II上发现了粲介子(D介子)的P波激发态 $D^{**}$ ,其质量 $M = (2420 \pm 6) \text{ MeV}$ ,宽度为 $\Gamma = (70 \pm 21) \text{ MeV}$ 。

七十年代末、八十年代初发展起来的大统一理论的最主要的预言是质子要衰变。最新的实验结果已把质子衰变寿命的下限推到 $\tau_{p \rightarrow e + \pi^0} > 3.3 \times 10^{32}$ 年,这就排除了简单的SU(5)大统一理论。但是,SO(10)大统一理论的预言仍可调和,然而随着实验结果精确程度的提高,SO(10)大统一理论将面临着严峻的考验。

其它,实验上在寻找中的黑格斯粒子、轴子、超对称伴随子等等,都没有迹象表明它们的存在。

### 四、超弦理论异军突起

1984—1985年的实验进展表明这些对称标准模型偏差的反常现象大多数是统计涨落和背景。反常消失了,这就意味着一直到目前的能量范围内,弱电统一模型理论是非常成功的,或者说目前的实验能量还没有超出标准模型理论应用的边界。

标准模型的成功既值得庆幸,又带来了烦恼,因为物理学家从来不满足于已有理论的成功,总希望看到未来,看到更深、更远的地方。标准模型理论中含有二十多个实验确定的参量,这当然不能成为基本理论,一个基本理论应该说明这些参量的由来并使参量减到最少。沿着这一方向的努力已有多年的历史。有一类

理论试图从对称性角度将标准模型中的参量联系起来,从而使参量大为减少,首先是试图将弱、电、强三种相互作用统一的大统一理论,然而质子衰变寿命的实验测量结果排斥了简单的SU(5)大统一理论,尽管SO(10)大统一理论仍可生存,但大统一理论本身不能解决费米子“代”和“等级”问题。为了解决“等级”等问题,也因为大统一理论进展甚微,超对称理论和超引力理论应运而生。超对称性理论是玻色型粒子与费米型粒子间的对称性理论。定域超对称性理论即超引力理论虽然部分地解决了“等级”问题,并且将四种相互作用统一在一起,还可证明在单圈图下无发散困难,但是这一理论所预言的超对称伴随粒子在实验上至今并没有发现,此外还存在引力不可重整的困难以及反常消除问题。同时还存在另一条发展线索就是向深一层次探讨夸克和轻子的结构,这就是夸克和轻子的复合模型理论。目前实验上给出的夸克和轻子的半径 $< 10^{-16}$ 厘米。这就是说下一层次的能量标度应 $\geq 1 \text{ TeV}$ (即1000 GeV)。由于量子电动力学的成功,实验上也给出对构造复合模型很强的限制,特别是轻子的反常磁矩值,例如 $\mu$ 子的反常磁矩值,实验和理论差

$$(a_\mu)_{\text{实验}} - (a_\mu)_{\text{理论}} = (38 \pm 85 \pm 20) \times 10^{-10},$$

构造轻子的任何复合模型都不能破坏这高精度的实验结果。因此复合模型理论的发展遇到了两方面的困难:目前加速器能量还没有任何迹象表明夸克和轻子具有内部结构,没有决定性的实验推动;理论上也缺乏下一层次适用的动力学原理。

面对着标准模型向横向和纵向发展遇到的困难,1985年超弦理论异军突起。超弦理论虽然发展多年,但一直没有受到人们重视,这一年来由于证明了在超弦理论中可以消除反常和可期望理论没有发散困难,在过去的一年中成为最热门的一个理论。特别是10维时空,统一规范群是SO(32)或 $E_8 \times E_8$ 的配种(Heterotic)超弦理论展现出有可能发展成为基本理论的美妙前景。四种相互作用统一在普朗克能量标度( $10^{19} \text{ GeV}$ )上。但是人们对这一理论的若干基本问题和如何构成低能下的现实模型知之甚少。因此,虽然这种理论在解决量子场论基本困难方面显示出极其吸引人的特点,但它能否成为现实理论并能经受住已有实验检验仍是前途未测。

### 五、世界范围内的合作与竞争

标准模型的胜利反映了在目前能量范围内标准模型理论应用得相当成功,科学家勇于探索未知世界的理想激励人们寻找标准模型理论可应用的范围,在什么样的能量标度下将出现新物理学。这几年美国、西欧、日本、苏联竞相构造大型高能加速器,有的争分夺秒正在加速施工,有的正在加紧设计。科学家们密切注视着1986—1988年即将完工的一批加速器。(如下表)

名 称	实 验 室	类 型	能 量	预期完成年限
BEPC	中国北京	$e^+e^-$	$2.2\text{GeV} \times 2.2\text{GeV}$	1988 年
LEP	西欧中心	$e^+e^-$	$50 \times 50\text{GeV (I)}$	1988 年
			$125 \times 125\text{GeV (II)}$	
SLC	美国 SLAC	$e^+e^-$	$50 \times 50\text{GeV (I)}$	
			$100 \times 100\text{GeV (II)}$	
TEVATRON	美国 FNAL	$p \bar{p}$	$1000 \times 1000\text{GeV}$	1986 年
HERA	西德 DESY	$e^+e^-$	$30 \times 30\text{GeV (I)}$	1986 年
		$e^-p$	$30 \times 820\text{GeV (II)}$	1990 年
TRISTAN	日本	$e^+e^-$	$30 \times 30\text{GeV}$	1986 年

这些加速器使用了当前国际上最新的科学技术(例如超导磁铁等)以及采用对撞机提高实验能量,耗资几亿到几十亿美元。人们期望在未来的几年中实验将揭示出标准模型理论的局限性并展现新现象和新物理学。