

# 高能物理学的进展

叶铭汉 黄涛 严武光

(中国科学院高能物理研究所)

迄今为止,高能物理中已发现了数百种粒子。根据它们的性质,粒子可以分为三类:强子、轻子和媒介子。强子是参与强相互作用的粒子的总称,质子、中子、超子、 $\pi$ 介子、K介子、 $J/\psi$ 粒子等都属于这一类,此类粒子最多,占粒子种类的绝大部分。它们都是由层子或层子和反层子构成。轻子仅参与弱相互作用和电磁相互作用,不参与强相互作用,它们是电子、电子型中微子、 $\mu$ 子、 $\mu$ 型中微子、 $\tau$ 轻子、 $\tau$ 型中微子以及这些粒子的反粒子。媒介子是传递相互作用的粒子,如光子传递电磁相互作用;又如四年前发现的 $W^\pm$ 和 $Z^0$ 粒子是传递弱相互作用的中间玻色子;胶子是传递强相互作用的媒介子。

这样,层子(u,d,s,c,b以及它们的反粒子),轻子(e, $\nu_e$ , $\mu$ , $\nu_\mu$ , $\tau$ , $\nu_\tau$ 以及它们的反粒子)和媒介子( $\gamma$ , $W^\pm$ , $Z^0$ 以及胶子)应是处于同一层次的粒子,它们是(目前认识范围内)组成物质的最小单元。至今,在现有加速器能量范围内还没有直接的实验表明它们具有内部结构,所以从理论上可将它们近似地处理为点粒子,这正象原子物理这一层次将原子核处理为点粒子一样。实验事实还表明,每一种层子具有三种不同的“颜色”,因此连同反层子在内应有三十种,轻子有十二种,媒介子包括八种胶子有十二种。这些最小单元就是目前微观世界所探讨的对象。此外,理论上还预言了许多粒子,如顶夸克,磁单极子,希格斯(Higgs)粒子,轴子以及各种超对称伴随子等。当前,高能物理学就是要研究微观世界中这些最小单元的性质以及如何结合又如何转化的相互作用规律。

## 一、弱电统一模型的成功

六十年代格拉肖-温伯格-萨拉姆成功地将物理

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,从那时以后,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。几年来,一系列的实验结果再次肯定了弱、电统一模型理论的成功。1973年提出的量子色动力学理论,十多年来经受了系列强相互作用的实验检验,取得了很大的成功,有可能成为强相互作用的基本理论。弱、电统一模型理论和量子色动力学理论,都是用规范原理建立起来的弱、电、强相互作用理论,通常称为标准模型理论。

虽然1984年发现了不少反常事例,标准模型难于解释,似有突裂标准模型的势头,但是1985年至1986年一系列的实验结果再次肯定了标准模型的成功。下面列举对弱电统一模型检验的实验结果。

### 1. $W^\pm$ 和 $Z^0$ 的质量和宽度

自从1983年发现W和Z以来,UA1和UA2两个实验装置已测得了较精确的数据。实验测量的W和Z的质量( $M_W, M_Z$ )和宽度( $\Gamma_W, \Gamma_Z$ )分别列在表1中。

表1 W和Z的质量和宽度

	UA1	UA2
$M_W(\text{GeV})$	$83.5^{+1.1}_{-1.0} \pm 2.7$	$80.1 \pm 0.5 \pm 1.3$
$M_Z(\text{GeV})$	$93.0 \pm 1.4 \pm 3.0$	$92.1 \pm 1.1 \pm 1.5$
$\Gamma_W(\text{GeV})$	$< 6.5(90\%)$	$< 7.0$
$\Gamma_Z(\text{GeV})$	$< 8.3(90\%)$	$< 5.8(90\%)$

### 2. 温伯格角 $\sin^2\theta_w$ 和 $\rho$ 值

$\sin^2\theta_w = 1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2}$ , 由 $M_W$ 和 $M_Z$ 的测量可

以得到  $\sin^2\theta_w$  的值,此外从其它弱相互作用的实验中也可以测出  $\sin^2\theta_w$  值,目前这些结果在实验误差范围内是自洽的.世界平均值为

$$\sin^2\theta_w = 0.029 \pm 0.003 \pm 0.006.$$

在标准模型中预言  $\rho = 1$ , 实验值在误差范围内与理论预言一致.

### 3. 新粒子的寻找

目前实验上还没有迹象表明存在三代以外的新层子和新轻子,也没有发现新的中间玻色子.第三代层子中的顶夸克还不能最后确定,实验上仍在继续寻找.

在弱、电统一模型中为了使中间玻色子获得质量需要自发对称破缺和 Higgs 机制,由此应存在希格斯粒子,迄今为止实验上并没有发现希格斯粒子.西欧中心正在考虑,把 LEP 正、负电子对撞机的质心能量提高到 300 GeV, 通过



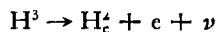
过程来寻找 Higgs 粒子 (H 是希格斯粒子,  $e$  是轻子).

### 4. 混合矩阵和 CP 破坏问题

由于夸克的质量本征态和弱作用本征态不同, Kobayashi-Maskawa 引入三个混合角  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  和一个相角  $\delta$ ,  $\delta$  的物理意义是 CP 破坏,目前对这些混合角的大小和相角的大小都有较好的测量.关于 CP 破坏,从  $K^0$  和  $\bar{K}^0$  系统测量的新结果比通常理论上“企鹅”图计算结果小一个量级,然而由于理论和实验两方面都有很大的不确定性,还很难搞清 CP 破坏的根源是 KM 矩阵还是其它超弱力.

### 5. 中微子质量问题

氦的  $\beta$  衰变实验



有不少人在进行,希望测出中微子的质量.最近的实验结果如下:

Bergkvist (1972) (瑞典,原子学所):  $m_{\nu_e} < 60\text{eV}$ ;

ITEP (1980—1986) (苏联):  $17\text{eV} < m_{\nu_e} < 40\text{eV}$ ;

Zurich:  $m_{\nu_e} < 18\text{eV}$ ;

Los Alamos:  $m_{\nu_e} < 27.2\text{eV}$ ;

INS (日本东京大学原子核研究所):  $m_{\nu_e} < 33\text{eV}$ ;

北京原子能研究院:  $m_{\nu_e} < 30\text{eV}$ .

除了苏联一家给出下限外其它实验都是只给出上限,也就是说与零中微子质量相自治.

### 6. 太阳中微子失踪问题

1985 年 Mikheyev 和 Smirnov 提出了一个机制,解决太阳中微子失踪问题,这一机制引起了人们极大的兴趣.我们知道,实验观测到的从太阳中发出的中微子仅是太阳标准模型计算出太阳中微子数目的三分之一,太阳标准模型预期测到  $(5.9 \pm 2.2)$  太阳中微子单位.实验上测到  $(2.1 \pm 0.3)$  太阳中微子单位.长期来人们为此谜伤脑筋.他们的机制指出:如果中微子具有很小的质量,则太阳中的电子中微子  $\nu_e$ , 由于与太阳物质相互作用有可能转化为  $\mu$  型中微子  $\nu_\mu$ . 从而使得实验上观测到的中微子变少了. Bethe 利用太阳标准模型进行这种机制的计算从而解释了太阳中微子“丢失”之谜.计算结果表明中微子质量仅需  $m_\nu > 10^{-6}\text{eV}$ , 这与目前大多数关于中微子质量的实验结果不矛盾.

有好几组实验在加速器和反应堆上作中微子实验,希望能测到中微子的转化(即所谓中微子振荡现象),但迄今还没有肯定的结果.

### 7. $\tau$ 轻子的性质

关于  $\tau$  轻子的性质,几乎所有衰变道的测量结果都与标准模型的理论预言相符合,只是单个带电粒子衰变道的分枝比,其理论值比实验值小 3.6%,原因不清.

## 二、强相互作用基本理论

### ——量子色动力学

1. 量子色动力学的一个重要的特点是渐近自由,由此特点决定了小距离物理过程可以应用微扰论.微扰量子色动力学已应用到许多物理过程.例如深度非弹电子-核子散射过程,中微子-核子散射,  $\mu$  子-核子散射,正、负电子对湮没产生强子,强子-强子碰撞产生大不变质量

轻子对, 强子-强子碰撞产生大横动量喷注现象, 双光子过程等量子色动力学。定性上取得了极大的成功, 然而定量上还存在很多困难, 主要是有很多不确定性因素(非微扰效应的影响, 高扭度贡献, 高阶修正的大小, 未知的强子结构波函数和胶子结构函数等)的存在, 致使人们至今不能从这些过程精确地确定量子色动力学的标度参量。近年来进一步测量了高扭度的贡献、胶子结构函数、 $\pi$  介子结构函数等。从轻子-质子非弹性散射中对非单态结构函数的测量, 得出量子色动力学标度参量  $\Lambda_{\overline{MS}}$  与核子质量  $M$  的关系:

$$M = 4.8132956 \Lambda_{\overline{MS}},$$

$$\Lambda_{\overline{MS}} = (220 \pm 20 \pm 60) \text{MeV}.$$

2. 量子色动力学除了渐近自由这一特点外, 还有一个重要特点是颜色禁闭, 即观察不到自由夸克和胶子。由于强作用耦合常数随着  $Q^2$  减小而迅速增加, 无法应用微扰论求解, 必须应用非微扰理论方法(非微扰量子色动力学)求解。目前行之有效的非微扰方法有: (a) 格点规范理论; (b) Skyrme 孤立子横模型理论; (c) 量子色动力学求和规则; (d) 各种唯象的模型如势模型、口袋模型、相对论夸克模型等。其中以格点规范理论最严格, 但解析研究进展很少, 而蒙特-卡罗模拟计算给出不少有趣的结果, 例如证明了禁闭存在; 计算了夸克和反夸克的禁闭有效势; 直接计算了介子质量谱和胶子球质量; 用有限温度的 Wilson 圈讨论了强子相到夸克胶子等离子体的相变等。但是, 将费米子纳入格点规范理论的问题尚未彻底解决。其它三种非微扰理论虽得到实验的支持, 但都只在一定近似下成立。例如, Skyrme 孤立子模型理论解释强子现象在 30% 误差范围内与实验一致; 量子色动力学求和规则, 利用夸克凝聚和胶子凝聚概念, 在量子色动力学框架内较好地解释了一系列强子物理现象; 各种唯象模型, 特别是势模型理论给出了与实验符合得很好的重夸克偶素谱, 在考虑了各种修正后很好地解释了重夸克介子的各种衰变模式。目前较成功的势模型较多, 它们的主要差别在小距离

的形状不同。如果顶夸克 ( $t$ ) 存在, 那么 ( $t\bar{t}$ ) 系统对检验不同的势模型将是重要的。

3. 胶子球态的测量一直是检验量子色动力学的一个重要方面。胶子是传递强相互作用的媒介子, 它具有“颜色”, 有八种, 这意味着胶子具有色荷, 胶子之间有相互作用(光子就不同, 光子是电中性, 光子之间没有相互作用)。此胶子之间相互作用形成的束缚态称为胶子球。除了已发现的  $\iota$  和  $\theta$  可能是胶子球的候补者,

$$J/\psi \rightarrow \gamma + \begin{matrix} \iota \\ \theta \end{matrix}$$

$M(\iota) = 1440 \pm 10 \text{MeV}$ ,  $\Gamma(\iota) = 76 \pm 10 \text{MeV}$ ,  
 $M(\theta) = 1690 \pm 30 \text{MeV}$ ,  $\Gamma(\theta) = 180 \pm 50 \text{MeV}$ .  
 其它还发现了一些可能的候补态, 如  $g_{\text{r}}(2120)$ ,  $g_{\text{r}}(2220)$ ,  $g_{\text{r}}(2360)$  等, 特别是 1983 年在 Mark III 上发现的  $\xi(2220)$  态至今仍是谜。

$$M(\xi) = (2232 \pm 7 \pm 7) \text{MeV},$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma \xi$$

$$\xi \rightarrow K_s^0 \bar{K}_s^0, K^+ K^-$$

法国 DM2 探测器在 2.2 GeV 并没有观察到  $\xi$  的存在。而去年 Mark III 又再次肯定了它的存在, 因此对于  $\xi$  粒子的存在和性质仍需要实验上进一步研究。目前实验上发现了较多的

$$J^{PC} = 0^{-+}, 1^{++}$$

态和较复杂的结构, 而且在正、负电子对撞的实验与强子-强子碰撞的实验中并不吻合。

总之, 胶子球的证实是检验量子色动力学的一个重要证据, 而  $J/\psi$  的辐射衰变确是研究胶子球的一个理想实验。然而要想肯定地说实验上所发现的某一粒子就是胶子球是很困难的。原因有二: 其一, 由于人们并不能确切地知道胶子球的质量谱, 实验上就难以调准谱仪精确地找到胶子球; 其二, 在有效质量为 2GeV 附近, 共振态密集, 错综复杂, 互相交迭、混合。例如, 理论上预言有超过 26 个夸克-反夸克 ( $q\bar{q}$ ) 的束缚态可能存在, 而且目前只发现了一部分的 ( $q\bar{q}$ ) 态, 还有很多粒子尚未发现, 它们的质量区域与胶子球重叠在一起, 很可能 ( $q\bar{q}$ ) 态与胶子球 ( $gg$ ) 态具有相同量子数的混合在一起。此外, 还会有四夸克态 ( $qq\bar{q}\bar{q}$ ) 和混合态

( $q\bar{q}g$ )也在这一能量区域,难以确定它们哪些是胶子球,哪些是普通的正、反夸克态,哪些是四夸克态,或者是它们的混合,人们正以极大的兴趣期待着实验上更精确的测量。

### 三、探索微观世界的实验工程

自1932年建成第一台加速器以来,加速器就成为人类探索微观世界奥秘的主要工具。半个世纪以来,随着探索微观世界层次的深入,加速器的能量越来越高,规模越来越大。在当前高能加速器的发展中,对撞机是主要形式。七十年代,建成了一系列正、负电子对撞机。八十年代以来,特别是西欧中心 Van der Meer 提出的随机冷却方法在建造正、反质子对撞机中起了关键性的作用,使得正、反质子对撞成功,从而发现了  $W^\pm, Z^0$  中间玻色子。

由于正、负电子对撞机和正、反质子对撞机的发展,近十年来许多重要的实验是在对撞机上完成的。对撞机实验的成功证明了通用型  $4\pi$  立体角的探测器在探测和研究新粒子和新现象时的强大威力,并且已经形成了一套比较全面而完整的实验技术和实验方法。这样的实验装置愈来愈象一个大规模的实验工程,以正在建造的 L3 探测器为例,其外形尺寸达到高 15.6 m,长 13.6m,它的磁体的重量为 8000t。将来更大型的外型将达二、三十米,重量将增加到几万吨。实验中产生的模拟及数字信息量可达到几十万以至于几百万字节。近年来据不完全统计,全世界从事高能物理实验的研究人员(不包括在加速器上工作的研究和工程人员)约四千人左右,年经费在十亿美元以上。

近年来一些不用加速器的实验也受到了重视,例如寻找质子衰变,测量中微子质量,寻找磁单极子,测量原子核的双  $\beta$  衰变以及中子振荡和中微子振荡等。

根据我国具体情况确定的北京正、负电子对撞机工程,每个束流的能量在 2.2—2.8 GeV,即将在今年年底开始储存环的调试,预计 1988 年底实现正、负电子束流对撞。安装在对撞机上的谱仪也将在 1988 年底开始运行,主要用来

进行粲粒子物理问题的研究。

### 四、高能物理学的新探求

标准模型的胜利意味着一直到目前的能量范围内,弱、电统一理论是非常成功的,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。然而标准模型理论的成功既值得庆幸,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由实验确定的参量,这当然不能成为高能物理学的基本规律,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。近十年来,人们不断沿这一方向努力。例如大统一理论力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,将弱、电、强三种相互作用统一起来。然而多年来质子衰变实验的测量结果,排斥了简单的  $SU(5)$  大统一理论。所谓简单的  $SU(5)$  大统一理论,就是用  $SU(5)$  群将成功的  $SU(2) \times U(1)$  弱电统一理论和  $SU(3)$  量子色动力学统一在内,然后自发破缺描述低能弱、电、强相互作用现象。简单的  $SU(5)$  大统一理论的一个重要预言是质子要衰变(主要衰变到  $e^+\pi^0$ ),其寿命  $\tau_p$  为  $4.5 \times 10^{29 \pm 1.7}$  年。目前的实验下限为  $\tau_p > 3.3 \times 10^{32}$  年,这就超出  $SU(5)$  大统一理论预言之外。尽管  $SO(10)$  大统一理论或其它大统一理论仍可存在,修改后的质子寿命可与实验不矛盾,但已不如  $SU(5)$  大统一理论那样吸引人。此外,大统一理论本身也不能解决标准模型本身提出的大部分问题,特别是费米子“代”和“等级”问题。所谓规范等级问题是指理论上无法解释的  $m_x \gg m_w$  ( $m_x$  是媒介质子衰变的玻色子质量,  $m_w$  是  $W$  玻色子质量),理论上很难解决辐射修正的稳定性问题,很难解释三重态希格斯粒子要比二重态希格斯粒子重得多的原因。概括起来说,大统一理论造成了从  $10^2$  GeV 到  $10^{14-15}$  GeV 之间有一个“大沙漠”。人们不能相信在这样大的能量范围内没有新物理存在。正因为大统一理论进展甚微,也为了解决规范“等级”问题,超对称

理论和超引力理论应运而生。超对称理论是探讨玻色型粒子和费米型粒子间的对称性理论，它将内部对称性与洛伦兹不变性结合起来。它的紫外性质好，存在“不重整定理”，它保证了规范等级的稳定性，部分地解决了“等级”问题。有的理论如  $N=4$  超对称杨-米尔斯理论及  $N=2$ ，单圈  $\beta = 0$  的理论都甚至是有限的。定域超对称性理论(即超引力理论)将四种相互作用统一在一起，并且提供了很好的破缺超对称的机制。 $N=1$  的超引力理论是不可重整的，无法计算引力辐射修正效应，而超弦理论则提供了解决这一问题的可能性。在超对称性理论中超多态中，费米子自由度数=玻色子自由度数，每个费米子(或玻色子)自由度有一个伴随的玻色子(或费米子)自由度。迄今为止实验上没有发现任何超对称伴随子，只给出实验上限。

从标准模型向前发展的另一条线索，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小于  $10^{-16}\text{cm}$ 。这就是说，下一层次的标度应在  $\text{TeV}(1000\text{GeV})$  量级。由于量子电动力学的成功，实验上也给出了对构造复合模型很强大的限制，特别是轻子反常磁矩值(例如  $\mu$  子的反常磁矩值)，其实验和理论之差为

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

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。

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，1984年由于格林(M. Green)和许瓦兹(J. H. Schwarz)证明了在超弦理论中可以消除反常和期望

理论没有发散困难，超弦理论这两年成为最热门的理论之一。近年来，人们对若干基本问题进行深入探讨，例如试图建立二次量子化协变弦场论；试图探求构造新的超弦理论、弦场论中的微扰计算、超弦理论唯象学等。总之，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，但遗憾的是不管哪种超弦理论，迄今还没有给出一个区别于其它理论可用实验检验的唯象预言。因此，它能否成为现实理论并能经受实验检验仍是前途未测。

从六十年代以来，标准模型经受了实验的考验，人们为了超出标准模型，作了种种努力，寻找标准模型理论可应用的范围，以及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、苏联竞相建造大型高能加速器，有的争分夺秒正在加紧施工，有的正在紧张地设计。表2是酝酿中的未来加速器。

表2 酝酿中的未来加速器

加速器名称	国家	粒子能量	周长(km)	类型
SSC	美	pp(20TeV + 20TeV)	113	贮存环
LHC	CERN	pp, p $\bar{p}$ (10TeV + 10TeV)	26.7	贮存环
LLC	美	e $^+$ e $^-$ (1TeV + 1TeV)	50-100	直线对撞
UNK	苏	pp(6TeV + 6TeV)		贮存环

这些酝酿中的未来加速器每台估计耗资达二、三十亿到四十多亿美元。高能物理学家们正密切注视着刚刚完工和即将完工的一批加速器，它们有可能发现新的中间玻色子  $Z'$  和  $W'$  以及其它新物理。人们更以期待的目光注视着正在酝酿的几台未来加速器，这些加速器进入了  $\text{TeV}(10^{12}\text{eV})$  能区。科学家绝不相信大沙漠的存在，在未来的几年中实验必将揭示出标准模型理论的局限性，从而出现新的物理学。

## 1987年第9期《物理》内容预告

怀念胡刚复先生(钱临照)；深切怀念饶毓泰老师(虞福春)；缅怀敬爱的叶企孙教授(钱三强)；纪念吴有训先生(王淦昌)；当前核物理研究的发展动向(孙祖训)；沟通微观和宏观世界的重要桥梁——宇宙线物理学(霍安祥)；国内外加速器发展概况(谢家麟)；固体内耗与超声衰减(葛庭燧)；电介质物理及其进展(李从

周)；五次对称与Ti-Ni-V合金中的准晶(张泽等)；双共振多光子电离光谱的新进展(沙国河等)；普林斯顿托卡马克如何创造了等离子体离子温度的世界纪录(李文莱编译)；原始Eötvös数据的重新分析和第五种力(邓祖淦编译)。