

回顾过去一年高能物理的进展

赵志詠 黄朝商

近几年来,无论在理论上还是实验上,高能物理都取得了重要进展。尤其是中间玻色子的发现,宣告了弱电统一理论的胜利。尔后人们又围绕着这一理论提出的新问题,从理论和实验两个方面进行了广泛和深入的研究。理论物理学家先后提出了大统一理论、超对称和超引力以及超弦等理论;实验物理学家则在努力寻找标准模型和上述理论所预言的各种新粒子和新现象,比如,有没有黑格斯粒子、超对称伴子?有没有磁单极?有没有新的费密子“代”?质子会不会衰变?中微子有没有质量?自然界存不存在右手弱流?有没有第五种力?等等。可以预料,随着能量越来越高的大加速器的建立和实验精密度的提高,这些问题会逐步得到解答。

在过去的一年中,人们朝这个目标前进了多少,实验上和理论上主要有哪些进展呢?在这篇短文中,我们将按下述几个方面,向读者进行介绍:

一、有第五种力吗?

人们知道,自然界中存在着四种基本相互作用,或

者说四种力:引力、弱力、电磁力和强力。究竟有没有第五种力呢?这一直是物理学家十分感兴趣的问题。现代地球物理学实验对牛顿引力常数的测量表明,可能存在对牛顿引力定律的偏离,这种偏离可以用假设存在一种新的比引力小三个量级的中程排斥力来解释,这种力称为第五种力。虽然这个现象早已发现,但由于地球物理实验的精确度远不如实验室的测量精度,因而一直未引起普遍重视。去年菲希巴赫(Fischbach)等人在重新分析了六十多年前艾奥特沃斯(Eöt-vös)等人测量不同元素或化合物相对于地球加速度的著名实验后指出:艾氏实验揭示了对牛顿引力定律的微小偏离,如果把这个偏离解释为存在一种耦合于超荷或重子数的新力,那么从艾氏实验推算出的有关参数便与从地球物理实验数据推算出的大致吻合。菲希巴赫等人的这一发现引起了许多科学家的重视。去年在美国伯克利召开的第23届国际高能物理会议上,分组报告和专题总结报告中都有关于第五种力的介绍和评述。当然,目前还不能对第五种力作出定论,这有赖于进一步的实验,现在世界各地有不少实验组正在计

划和着手做精度更高的引力实验。不管怎样,从理论上分析,有一点是比较明确的,即不能把第五种力看成是耦合于超荷的力,因为这与现有的K介子实验结果相矛盾。

二、太阳中微子之谜

在太阳物理学的研究中,多年来就存在着一个令人头痛的太阳中微子之谜:根据标准太阳模型,太阳的电子中微子数目应为 $5.8 \pm 2.2 \text{ SNU}$ (SNU 为太阳中微子单位),而实验观测数据却是 $2.1 \pm 0.3 \text{ SNU}$,实验值比理论值几乎小了两倍。是标准太阳模型不对吗?不是。因为大量其他实验观测表明,这个模型是相当成功的。那么,为什么太阳中微子少了那么多呢?它们丢失到什么地方去了呢?1985年米克亥叶夫(Mikhayev)和斯米尔诺夫(Smirnov)提出了一个重要机制:太阳中的电子中微子 ν_e ,由于与太阳物质的相互作用,有可能转化成 μ 中微子 ν_μ ,从而逃脱实验上的观测。根据这一机制,贝特(Bethe)等对太阳中微子之谜从理论上进行了解释。他们假定中微子有质量,弱相互作用本征态与质量本征态不同,它们之间的关系可以用一个混合角 θ 来表示,即 $\nu_e = \cos\theta\nu_1 + \sin\theta\nu_2$, $\nu_\mu = -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2$, 其中 ν_1, ν_2 为在自由空间中传播的中微子质量本征态。根据温伯格-萨拉姆-格拉肖弱电统一理论, ν_e -e 与 ν_μ -e 的弱相互作用结构不同,前者有中性流和带电流贡献,而后者只有中性流贡献,这导致混合角 θ 与太阳内的电子密度有关,从而与太阳质量密度 ρ 有关。因此,只要 ν_e 的能量 E 大于临界能量 $E_c = \Delta/\rho_c$ 时 (ρ_c 为太阳中心质量密度, Δ 是与 θ 有关的常数),则这部分电子中微子穿过太阳共振区后将转化为 μ 中微子,从而不可观测。实验上能够观测到的只有 $E < E_c$ 那部分 ν_e 。计算表明,只要取 $E_c = 5.9^{+1.1}_{-3} \text{ MeV}$, 就能满意地解释太阳中微子“丢失”之谜。与这个 E_c 相应的混合角 θ 之值是 $\theta > 0.4^\circ$, 很小,这意味着电子中微子质量不会很大, $m_\nu > 10^{-6} \text{ eV}$, 迄今为止,高能物理与核物理关于 m_ν 的实验与此结果是不矛盾的。不过从理论角度看,中微子有质量会带来一些麻烦,众所周知,温伯格-萨拉姆-格拉肖弱电统一模型中,中微子没有质量,为了使理论体系容纳下有质量的中微子,就需要对温伯格-萨拉姆-格拉肖模型作些修改或扩充,比如,引进“基本”黑格斯粒子、不可重正相互作用,或者扩充成左右对称模型。

三、新粒子和新现象

人们一直在寻找标准模型、大统一模型和超对称、超引力等理论所预言的新粒子,如黑格斯粒子、顶夸克、新的规范玻色子、超对称伴子、轴子等。遗憾的是,去年实验上没有任何迹象表明它们的存在。1984年在

莱比锡第22届国际高能物理会议上曾宣布找到了顶夸克事例,然而去年没有发现新的事例,所以说,实验上还不能肯定顶夸克的存在。有趣的是,“有心栽花花不开,无意插柳柳成荫”,去年在企图寻找夸克胶子等离子体的重离子碰撞实验中人们意外地发现了一个叫做GSI峰的新现象。GSI峰是 e^+e^- 能谱中所观察到的质量为 $1.7-1.8 \text{ MeV}$ 的峰。起初,人们以为它可能就是梦寐以求的轴子(Axion),但进一步的研究表明,它不可能是轴子,甚至很难用通常量子场论中的粒子来解释。因此,到目前为止,对于这一新现象,还没有一个满意的理论解释。

去年发现的另一个有趣事件是带奇异量子数的质量为 3.1 GeV 的新的窄共振态,叫 $U^\pm, U^0$ 。这些新共振态是在 Σ^- 束打铍靶的实验中产生的,它们衰变成 $\Delta\bar{P} + \pi's$, 宽度 $\Gamma < 30 \text{ MeV}$ 。这种共振态用通常的理论很难解释,因为,如果是强衰变,则其最少的价夸克组态应由四个夸克组成,例如 $U^+ = su\bar{d}\bar{d}$ 。然而,只包含轻夸克的质量为 3.1 GeV 的多夸克态,宽度不会这么窄;如果是弱衰变, $c \rightarrow su\bar{d}$, U^+ 就应视为 D^{*+} 粒子,那为什么它不强衰变到 $D + \pi$ 呢?这些 3.1 GeV 的窄共振峰的存在与否还有待实验上的证实,如果它们确实存在,那么如何从理论上解释它们仍是一个谜。

四、有关标准模型

现在大概没有什么人怀疑标准模型了,这一理论获得了巨大成功。不足的是,它含有二十几个任意参数,因此要作为自然界的基本理论是不太满意的。为此,理论家试图扩充这个模型,寻求参数更少的理论;另一方面,实验家则采用各种实验手段测定这些参数并与标准模型进行比较,找出理论与实验不一致的地方,以便探索超出标准模型的途径。

去年西欧中心改善了仪器的精度,重新测量了中间矢量玻色子的质量,结果是 $M_W = (80.1 \pm 0.8 \pm 1.3) \text{ GeV}$, $M_Z = (92.1 \pm 1.1 \pm 1.5) \text{ GeV}$ 。关于温伯格角,最新的世界平均值为 $\sin^2\theta_W = 0.229 \pm 0.003 \pm 0.006$ 。关于CP破坏,对 $K_0 - \bar{K}_0$ 系统测量给出的新结果是

$$\varepsilon'/\varepsilon = \begin{cases} -0.0046 \pm 0.0053 \pm 0.0024 \\ 0.0017 \pm 0.0082. \end{cases}$$

这比通常“企鹅”算符的解释小一个量级。鉴于理论和实验两方面都有不确定性,至少可以说,目前对CP破坏的根源还不清楚。关于重轻子 τ ,几乎所有测量结果都与标准模型的预言符合,不过对于单个带电粒子衰变分支比,理论值比实验值小3.6%,其原因尚不清楚。

总的说来,到目前为止还没有发现什么出人意料的事例,实验检验仍停留在弱电统一理论的经典(树图)水平上。为了检验量子辐射修正效应,寻找黑格斯

粒子和探索超出标准模型的新物理,人们正把注意力转向费密能量标度(250—300MeV)的物理上。

为了检验量子色动力学,这一年来在实验和理论方面都取得了一些进展。例如对轻子-质子非弹散射中非单态结构函数的测量给出了量子色动力学标度参量 Λ 与核子质量 M 的关系, $M = 4.8132956 \cdots \Lambda_{\text{MS}}$ 以及 $\Lambda_{\text{MS}} = (220 \pm 20 \pm 60)\text{MeV}$ 。还进一步测量了高扭度的贡献、胶子结构函数、 π 介子结构函数。在强子-强子碰撞反应中通过分析喷注实验结果讨论了碎裂函数的各种模型描述,肯定了Lund模型的成功。

对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。目前实验上发现了较多的 $J^{\text{PC}} = 0^{-+}, 1^{++}$ 态(J 是自旋、 P 是宇称、 C 是电荷共轭宇称)。在1.4 GeV—2 GeV能区内出现了较复杂的结构,而且正、负电子对撞的实验结果与强子-强子碰撞的实验结果并不吻合。人们还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?或者是这几种类型态的混合。因此需要实验上作出更精确的测量,理论上作出更可靠的分析。

此外,实验上对双光子道的测量, γ 粒子家族的测量也获得一些有趣进展。

五、超弦理论的进展

自从1984年格林和许瓦兹证明了超弦理论没有反常以来,超弦理论的研究成了当今理论粒子物理领域的一个最活跃方向。超弦理论放弃了点粒子观念,把粒子看成是一维的弦。它的零质量振动模式包括了所有夸克、轻子、光子、中间玻色子、胶子和引力子等。这个理论统一地描述了四种基本相互作用:弱作用、电磁作用、强作用和引力作用。由于没有发散和反常,所以是一种有希望的包括引力在内的大统一理论。

去年在超弦理论方面研究的主要进展大致可以概括为下述几个方面:

1) 新的超弦理论之构造。即从超弦理论应当具有的重参数化不变性、超保形不变性、罗伦茨不变性和超对称不变性等基本原理出发,寻找不同的超弦模型。1985年以前,人们知道有I型、IIA型、IIB型、规范群为 $SO(32)$ 或 $E_8 \times E_8$ 的杂交弦,去年又提出了一种新的杂交弦,规范群为 $SO(16) \times SO(16)$ 。这六种超弦理论都要求临介维数 $D = 10$,除 $SO(16) \times SO(16)$ 杂交弦外,都有十维时空的超对称性。是否有临介维数 $D \neq 10$ 的超弦理论呢?国际上有不少人对此进行了探讨,其基本观念还是卡鲁查-克莱茵的观念,将十维中的部分空间(比如说六维)在环上或群流形上紧致化。再一种办法是,修改弦的边条件,如采用扭曲边条件。此外,也有人尝试建造一种更高维的弦理论,如 $D = 506$,将上述几种超弦理论统一起来。

2) 二次量子化协变弦场论的建立。在1985年

以前,超弦理论的基本框架是一次量子化形式,至于二次量子化弦场论,通常是在光锥规范下表述的,直到1985年下半年,才初步建立了自由弦的协变场论形式。对于有相互作用的超弦,问题要复杂得多。这成了1986年超弦理论研究的一个重要课题。在诸多的探讨方案中,尤以威滕的非对易几何引人注目。其基本思想是:仿效杨-米尔斯场论的微分几何(可对易几何)形式,利用BRST不变性和非对易几何,建立协变的超弦场论。这种弦场论是协变的,并且可以描写弦之间的相互作用,相互作用拉氏量具有陈-塞蒙斯三角形形式。威滕本人只讨论了开弦,到1986年夏,有人把非对易几何推广到了闭弦情形。

3) 弦微扰论和散射振幅的计算。1984年格林和许瓦兹证明超弦理论有限和无反常是从超弦的等效场论出发的。如果从超弦理论本身出发用微扰论进行计算,是否能得出同样的结论呢?人们相信如此。以前有人做过圈图计算(主要是算符形式),而去年,则有不少人尝试用波利亚科夫(Polyakov)方法对弦理论进行圈图计算。其主要技术是利用波利亚科夫(Polyakov)的超弦路径积分表述和二维黎曼几何曲面的几何性质,微扰论中的圈数对应于黎曼曲面上的亏格数(genus),因此,可以利用几何学上关于黎曼曲面的许多现成数学工具,如Teichmüller空间理论。对于超弦理论,单圈图计算的结果表明,发散可以抵消。但对于两圈以上图的计算,由于黎曼曲面拓扑学上的复杂性,实际上是相当困难的。

4) 超弦理论的唯一性。像任何其他理论一样,唯象学研究是关系到超弦理论命运的一个重要课题。这一研究在1985年取得了重要进展,肯德拉斯(Candelas)等人指出,I型超弦和杂交弦的极限场论通过紧致化可过渡到四维时空超对称爱因斯坦-杨-米尔斯理论,紧致化空间为卡拉比(Calabi)-丘流形,规范群为 $E_6 \times E_8$ 。 E_8 可通过威尔逊圈进一步破缺,超对称可借助第二个 E_8 来破缺。在这种理论中,费密子“代”的数目完全由卡拉比-丘流形的拓扑性质决定,并且原则上所有粒子质量谱、汤川耦合常数等都不可计算。去年在超弦唯象学方面,人们更仔细地研究了 E_6 以下怎么破缺以及相应的物理,对于紧致化空间也不限于卡拉比-丘流形,还包括Orbifolds和陪集空间。遗憾的是,不管哪种超弦理论,迄今还没有找到一个区别于其他理论的可用实验检验的唯一预言,这恐怕是目前超弦理论的一个根本弱点。

从上面回顾看出,去年高能物理在理论和实验两方面虽然都有一定进展,但没有什么震撼人心的事件,相对说来,是比较平静的一年。明后年我国 e^+e^- 对撞机将可能出束,预计1987—1989年,斯坦福100 GeV SLC对撞机和西欧中心的LEP(I)、LEP(II)也将建成,我们等待着它们的喜讯。