



近几年来,人们经常谈论美国正在建造一台超导超级对撞机(简称 SSC)的问题。它的预算造价为 82.49 亿美元,历时十年(1989—1999),周长 87 公里,占地 69 平方公里。其规模和造价都是空前的。美国政府和能源部正通过各种途径寻找国际合作的可能性来完成这一庞大的高能物理工程。去年五月中旬在北京召开的亚洲、太平洋地区的 SSC 国际合作会议就是在这一背景下召开的。人们不禁要问为什么要建造这样昂贵的高能加速器?超导超级对撞机对物理学发展会起到什么作用?本文试图从物理角度来分析和回答上述问题。

一、弱中间玻色子 W^\pm 和 Z 的发现

1983 年西欧中心 UA1 实验组在质子-反质子对撞机上发现了弱中间玻色子 W^\pm 和 Z 是近十年来高能物理学中最重要的事件。 W^\pm 和 Z 粒子是自然界中传递弱相互作用的媒介子。这些中间玻色子虽然在 30 年代就作为假设提出但一直未得到实验上的证实。1967 年温伯格和萨拉姆提出电磁相互作用和弱相互作用统一模型理论。在这一理论中利用希格斯机制不仅自然地给出了无质量的 γ 光子,而且预言了 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子的质量分别为质子质量的 85 倍和 90 倍,这一理论还预言了中性弱流的存在。1973 年西欧中心的实验结果证实了这一理论预言。1983 年又发现了 W^\pm 和 Z^0 粒子,其质量与理论预言值很好地符合。 W^\pm 和 Z^0 粒子的发现证实了电磁相互作用和弱相互作用统一模型理论,其重要意义可以与 19 世纪末电磁学理论的验证相比拟。一百多年前麦克斯韦成功地提出了电磁学理论,将原来互不相干的电学和磁学统一起来,预言了电磁波的存在,很快得到了实验的证实。此后电磁学理论对工业、农业、科学技术和军事都产生了巨大的影响。

电磁相互作用和弱相互作用统一模型理论和强相互作用的量子色动力学理论统称为粒子物理学中的标准模型理论。近几年来,人们在检验标准模型理论的同时还不断寻找对标准模型理论预言的偏离,其结果总是从实验上进一步验证了标准模型理论是目前能量和精度范围内成功的理论。

在 60 年代以前,人们对物质结构的认识是宇宙万

物是由电子、质子、中子、……这些基本粒子组成的。到 60 年代初,发现的基本粒子已经达到上百种。同时一系列的实验现象揭示了这些基本粒子并不基本,而是具有深入一层的内部结构,例如质子、中子以及所有参与强相互作用的粒子的强子,它们都是有更基本的夸克组成的。夸克之间的强相互作用是通过媒介子胶子传递的。

这样,构成自然界的基本组成成份可以分为三类:(1)夸克和反夸克。它们是组成质子、中子……所有强子的基本单元。目前已发现的夸克有上夸克(u)、下夸克(d)、奇异夸克(s)、粲夸克(c)、底夸克(b)以及它们的反粒子。实验事实还表明每一种夸克(称为夸克的味)还具有三种不同的颜色。因此目前已发现的夸克有三十种。(2)轻子类。这类粒子只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(e)、电子型中微子(ν_e)、 μ 子、 μ 型中微子(ν_μ)、 τ 轻子、 τ 型中微子(ν_τ)以及这些粒子的反粒子,共有十二种。(3)媒介子。它们是传递相互作用的粒子。光子传递电磁相互作用, W^\pm 和 Z 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中间玻色子,它有八种(g),因此媒介子共有十二种。这些最小单元就是目前微观世界所研究的对象,也是构成标准模型理论的基本砖石。当前高能物理学就是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。此外,理论上还预言了许多粒子,如顶夸克(t),磁单极子、希格斯粒子(H)、轴子以及各种超对称伴随子等。实验上至今还没有发现它们。

目前已发现的最小单元有五十四种,人们自然地问微观世界的最小单元有多少种?它们之间的相互转化和规律是什么?1989 年西欧中心 LEP 各实验组通过对 Z^0 粒子的各种性质的研究,测量了一系列衰变过程的部分宽度,从而推断中微子只有三种,1992 年实验结果是:

$$N_\nu = 3.04 \pm 0.04.$$

这三种中微子分别是 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ ,与它们相对应的是三代轻子:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}.$$

在标准模型理论中夸克与轻子处于很对称的地位,三

代夸克分别是：

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

至今仍未发现顶夸克 t 的存在。

二、两件困惑物理学家的事情

标准模型理论的成功已为十多年来的高能物理的实验所证实，这是铁的事实。然而这十多年来也有两件事一直困惑着高能物理学家。

弱电统一模型理论之所以能预言中间玻色子的质量如此精确，究其根源在于自发对称性破缺机制，这一机制除了给出 W^\pm 和 Z 质量外还预言存在一种中性的标量粒子叫做希格斯粒子 (H)，然而理论上都不能确切地预言它的质量范围。十几年来，人们一直试图从实验上寻找它，始终未得到它存在的迹象。起初从轻希格斯粒子寻找，从 MeV 量级到几个 GeV 都没有发现它。美国、德国、日本、西欧中心的每一台加速器建成以后，都希望发现希格斯粒子，然而寻找希格斯粒子的结果只是给出它的质量下限。综合西欧中心实验组最新的结果和理论上的讨论，人们预期希格斯粒子质量的范围为： $60\text{GeV} < m_H < 1\text{TeV}(1000\text{GeV})$ 。

这样大的质量范围只能说明目前我们对希格斯粒子知之甚少。希格斯粒子的质量到底多大？如果实验上发现不了它，它的物理根源和本质是什么？

困惑高能物理学家的第二件事是寻找顶夸克 t 。标准模型中预言了存在第 6 种夸克-顶夸克，实验上通过底夸克前后不对称性的测量表明 t 夸克的存在是与实验测量结果相一致的。然而在目前的实验能量范围内尚未找到它。十几年来每一台加速器建成以后都宣称寻找 t 夸克是目标之一，然而实验结果也只是给出顶夸克的质量下限。美国费米实验室 CDF 实验组给出顶夸克质量的最新下限值为（在 95% 的可信度内）：

$$m_t > 91\text{GeV}.$$

综合理论和实验的分析，人们期望 t 夸克的质量在 100 GeV 到 200 GeV 之间。如果 t 夸克的质量确实在这一能量范围之内，可望在 1993 年底以前在费米实验室找到它。如果 t 夸克不在上述范围内，到底 t 夸克在什么样的能量范围内找到它？顶夸克的发现与否，人们都将进一步追问其物理机制和夸克质量的本质是什么？

三、SSC 的物理目标

自 1932 年世界上建成第一台加速器以来，平均每隔七年加速器能量就提高十倍，现在加速器的能量已比第一台加速器能量增加一百多万倍。可以说世界上最能物理加速器发展的总趋向是提高能量、提高亮度。目前美国正在建造的超导超级对称机 (SSC) 就是一台高能量、高亮度的质子-质子对撞机。它要比美国正

在运行的费米实验室的加速器的能量和亮度都要提高一个量级以上。

也许人们会问，历时十年花费 82 亿美元建造超导超级对撞机就是为了寻找那么两个粒子——希格斯粒子和顶夸克粒子，值得吗？提出这一个问题是很自然的，但也表明人们对 SSC 的物理目标还不全然了解。SSC 的物理目标并不是将宝押在发现希格斯粒子和顶夸克粒子上。事实上，如果顶夸克粒子的质量在 100—200 GeV 之间就有可能近二年内费米实验室发现，而在西欧中心将要运行的 LEP II 上也会继续寻找希格斯粒子。当然，如果顶夸克粒子和希格斯粒子在这两台加速器上都不能被发现，那么在更高能量范围寻找它们就是 SSC 的物理目标之一了。其实 SSC 的物理目标并不仅于此，更重要的是揭发未知，发现新现象和新物理。寻找希格斯粒子是与揭示电磁相互作用和弱相互作用统一的对称性破缺机制密切相联系的。弱电统一模型理论的成功意味着对称性破缺机制的低能行为已在实验上得到很好的证实，然而引起这种对称性破缺的相互作用本质是什么仍然是未知的。它是一种新的相互作用（第五种相互作用）吗？其高能行为怎样？希格斯粒子质量可能会在 1 TeV 以下还是由于高能行为的变化使得我们永远观察不到它？否则人们无法理解标准模型中的许多参量和内容。SSC 的能量范围使得它成为研究对称性破缺机制的一个最好的实验室。

大家知道，目前已发现了五种夸克，而顶夸克的质量要大于 91 GeV。如果仔细考察一下六种夸克的质量谱，最轻的上夸克和下夸克的质量只有几个 MeV，奇异夸克的质量在 150 MeV，粲夸克质量在 1500 MeV，底夸克的质量在 5000 MeV，而顶夸克的质量至少是最轻夸克的二万倍以上。可以见到夸克的质量谱非常宽，从几个 MeV 到 100 GeV 以上。这样，夸克的质量是如何产生的？如果它来源于物理真空的不对称性，又如何理解它产生的机制？而这种机制又如何构成这样宽的质量谱？这种物理真空的不对称性又如何构成夸克禁闭在强子内部的物理效应？SSC 的能量范围将提供对顶夸克粒子的产生及其性质的深入研究，也为揭示费米子质量产生的本质提供一个最好的实验室。

对称性破缺机制和费米子质量产生的机制是标准模型理论中两个关键性的问题。多年来，人们虽从不同角度进行探讨但未有实质性进展，SSC 这台新加速器的建成有可能探讨和揭示新物理，而新物理有可能是与上述两个关键性问题的本质密切相关的。人们相信随着新现象、新物理在未来加速器上的发现它们必将影响 21 世纪的物理学。

此外，标准模型理论也需要在更精确、更高能量范围内得到进一步的检验。例如，弱电统一理论虽然在

(下转第 27 页)

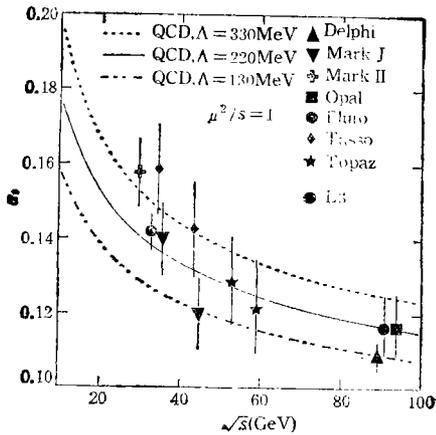


图4 强相互作用耦合常数 α_s 随 e^+e^- 对撞质心
系能量 \sqrt{s} 的变化

有相同的电荷。定义混合参数 χ_B 为一个 B^0 强子在衰变时振荡到 \bar{B}^0 的几率, 则有 $\chi_B = f_d \chi_d + f_s \chi_s$, 其中 f_d 和 f_s 分别为 B_d^0 和 B_s^0 产生的比例, 而 χ_d 和 χ_s 分别为它们的混合参数。L3 实验的结果观察到了 $B^0 - \bar{B}^0$ 的混合, 并给出: $\chi_B = 0.178 \pm 0.046$ 。

六、寻找新粒子

1. 寻找 Higgs 玻色子, 尽管是否存在 Higgs 粒子理论上尚有争议, 但实验家已作了很多努力去寻找它。L3 实验的结果表明, 如果存在 Higgs, 则它的质量下限为 53 GeV。LEP 另三个实验组也给出了相近的质量下限。

2. 寻找激发态轻子。L3 实验通过:

$$e^+e^- \rightarrow e^+ \tau^* e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma \gamma \text{ 和 } e^+e^- \rightarrow e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \gamma$$

反应寻找了激发态的 e^* , μ^* 和 τ^* 。还通过 $e^+e^- \rightarrow \nu \nu^*$ 和 $\nu^* \rightarrow e W$ 及 $\nu^* \rightarrow \nu \gamma$

反应寻找了激发态的 ν^* 。实验结果在目前可以达到

(上接第 15 页)

低能范围内得到了很好的检验, 然而在更高能量下辐射修正效应不可忽略, 规范玻色子的直接耦合效应出现, ……都需要在高能物理实验中得到检验。又如量子色动力学理论能够很好地解释强子内夸克和胶子结构函数的演化效应, 然而在更高能量下将揭示很小 x 区域的结构函数的性质, 这已超出了微扰量子色动力学理论的预言范围进入了非微扰区域, 为发展量子色动力学理论的非微扰方法提供了实验基础。因此在更精确、更高能量范围内检验标准模型理论必将进一步发展标准模型理论。

十多年来, 人们在检验标准模型理论的同时探讨和提出了各种超出标准模型理论的尝试。有些尝试是企图寻找更高对称性减少标准模型理论中的参数, 例

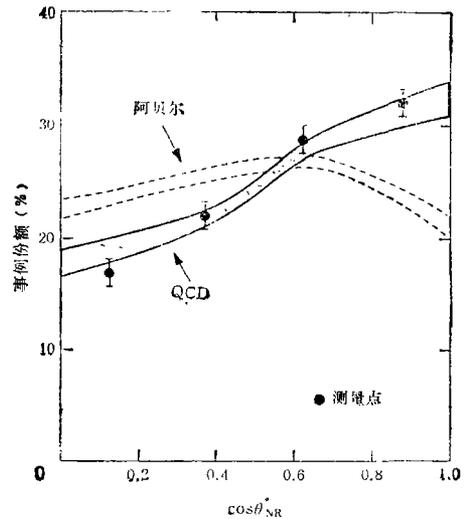


图5 4 喷注事例的 Nachtmann-Reitel
角 (θ_{NR}) 分布

的能区否定了激发态轻子的存在, 并给出了它们的质量下限: $m_{\mu^*} > 86.8 \text{ GeV}$; $m_{\tau^*} > 87.6 \text{ GeV}$; $m_{e^*} > 89.3 \text{ GeV}$; $m_{\nu^*} > 91 \text{ GeV}$ 。

3. 超对称性粒子的寻找。L3 实验在这方面也作了一些尝试。迄今为止, LEP 的四个实验组都没有找到任何超对称性粒子。L3 给出了标量电子 \tilde{e} 、标量 μ 子 $\tilde{\mu}$ 和 W 中间玻色子的超对称性伴侣 \tilde{W} 的质量下限: $m_{\tilde{e}} > 41 \text{ GeV}$; $m_{\tilde{\mu}} > 41 \text{ GeV}$; $m_{\tilde{W}} > 44 \text{ GeV}$ 。

LEP 计划在 z^0 能区运行至 1993 年底, 从 1994 年 LEP 将开始运行在 W^+W^- 对产生的能区。随着 z^0 能区数据的进一步积累, 和转入新能区的研究, 必将取得更多更精确的物理结果。能否发现新的物理现象是很难预言的。但全世界的高能物理界将投入更大的人力和物力继续向物质的更深处探索。

如大统一理论、超对称性理论、超弦理论等。有些尝试是企图寻找轻子、夸克、媒介子这些基本单元的下一层次物理, 例如轻子和夸克的复合模型理论、中间玻色子的复合模型理论、多彩夸克理论等。现有的高能物理实验结果虽然已排除了一些理论上的尝试, 然而还不足以对各种尝试给予最后的判断。超导超级对撞机必将进一步肯定和否定这些尝试以及新的尝试, 也必将揭示下一层次的新物理的标度和内容。

总之, 物理学的本质在于揭示未知世界, 高能物理学是探索微观物理世界最前沿的科学。相对论和量子力学已在 20 世纪科学技术发展中起到了决定性作用, 高能物理研究必将推进未来的科学技术发展, 超导超级对撞机是在世纪之交时一个重要的发展计划, 人们相信它将成为推动 21 世纪物理学发展的第一步。