

粒子物理未来的十年

张肇西

一、粒子物理发展的形势和问题

目前粒子物理发展的大形势是标准模型取得巨大成功,进入了全面深入检验标准模型的阶段,但在标准模型中还有一系列原则问题有待解决,并已开始追问标准模型更深层次的问题了。

标准模型中的规范场方面,所有的相互作用都是规范相互作用,相应的场粒子: γ ——光子, W^\pm, Z^0 ——中间玻色子, g ——颜色胶子已经全部被实验发现.最精密的实验之一是电子和 μ 子反常磁矩的实验.其测量值可达8位有效数字!而要理论与实验相符合,对于电磁作用计算需准确到 α^4 (α 是精细结构常数 $1/\alpha = 137.035963 \pm 0.060015$)并且还要加入强作用的影响.弱作用 W^\pm, Z^0 的影响,在目前实验精度下不用考虑.颜色胶子的作用,对少数很粗的纯轻子过程不用计算,对像电子和 μ 子反常磁矩这类“纯轻子”问题则必须考虑胶子和与它直接作用的层子参加的强作用.由于胶子引起其自身和层子的凝聚,引起的手征对称性破坏,胶子自作用造成的强作用的渐近自由行为,和颜色禁闭行为等是粒子物理经常需要考虑的重要因素.人们远未能全部揭开胶子和层子在各种问题中的各种效应.至于中间玻色子的自作用效应目前“低能”实验都未能达到足够的精确,从而能察觉到它们影响的程度.而“高能”方面,目前世界上的对撞机的能量或亮度不够,都不能产生大量中间玻色子对的事例.还不可能直接检验中间玻色子自作用。

对于标准模型的基础费米子层子和轻子方面,按它们的相互作用性质,它们表现为下列I、II、III代。

$$\begin{array}{ccc}
 \text{I} & \text{II} & \text{III} \\
 \left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e \end{array} \right)_L, e_R & \left(\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu \end{array} \right)_L, \mu_R & \left(\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau \end{array} \right)_L, \tau_R \\
 \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right)_L^i, u_k^i, d_k^i & \left(\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right)_L^i, c_k^i, s_k^i & \left(\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right)_L^i, t_k^i, b_k^i
 \end{array}$$

其中 i 表示颜色指标($i = 1, 2, 3$ 共三种),在此我们认为中微子质量为零,所以I、II、III中无右手中微子,其实中微子质量是否为零目前尚是个谜。

在I、II、III中左手的 d^i, s^i, b^i 不是物理上的 d, s, b 三种层子,而是物理的 d, s, b 的线性组合.在数学上这一线性组合用么正矩阵来表示,现在人们已经

把它称为KM矩阵.在这么么正矩阵中只有三个转动角度和一个复数相因子具有物理的实质内容.目前实验上情况是对其中的一个角度有比较好的测量,另一个角度有粗略的测量,第三个角度仅知不为零,对于其中的相因子的测量仍是很粗的,可见对于KM矩阵中的参量现还处于有待实验和理论的配合下改善对它们测量的状态!值得指出的是标准模型把二十年前实验观测到的CP破坏现象都归结于上述复数相因子.由此也可见对于KM矩阵中有实质物理意义的三个角度和相因子测量的重要性。

另外在上述I、II、III代中顶层子—— t 尚未发现. t 层子质量多大,在什么实验中最易发现,是标准模型急需解决的问题之一.标准模型中,采用黑格斯机制来破坏弱电统一,使弱作用与电磁作用又统一又不同.然而这是标准模型最薄弱的环节.经过黑格斯机制把弱电统一破坏掉,中间玻色子 W^\pm, Z^0 获得很大质量(近百GeV)的同时,至少还要留下一个物理的标量粒子.标准模型中把它称为黑格斯粒子,但是目前实验上一直没有发现这种黑格斯粒子.长此下去,破坏弱电统一是否真的经过黑格斯机制也要成为问题。

从上述中,读者不难了解,目前进一步验证标准模型和准确测量出模型中的物理参量的任务是极其艰巨的. t 层子和黑格斯粒子若不存在,标准模型将需做出重大的修改!另外一个十分引人注目的是标准模型中的基础费米子——层子和轻子,表现出I、II、III代的结构,是什么原因造成的?I、II、III中的费米子除了其质量相差很大外,在弱、电、强相互作用方面它们表现出极相似的性质.这是不是反映出它们除了具有颜色、味道、自由度之外,还具有其它内部自由度?与它们质量的起源又有什么关系呢?此外,三代之间的KM矩阵中的参数又反映什么物理实质呢?都是值得追问的问题!I、II、III代的结构和KM矩阵是否是反映这些基础费米子具有进一步的内部结构?等等,沿着标准模型的框架这些问题已经被提了出来。

如果离开标准模型的框架,还有许多有意义的问题值得在此指出.弱电统一后,强作用统一起来的方向仍然很吸引人,虽然最小的大统一SU(5)模型被否定,但是很可能在弱、电、强之外还存在其它基本规范相互作用,使统一的方式不象SU(5)那么简单,因此发现其它基本规范相互作用是很有意义的.沿着物质

无限可分的方向,标准模型中的基础粒子——轻子、层子、规范粒子和黑格斯粒子是否具有内部结构?轻子和层子代的结构相似可以把它看成是内部结构的表
现,三代仅是反映更基本组成的特性。虽然这些想法具有不少吸引人的地方,但是距离证实却有很长的路程!沿着寻找更大对称性的方向,目前人们已认识到费米子和玻色子之间可能存在一种崭新的对称性——超对称性。如果这种对称性存在,玻色子和费米子引起的发散相互抵消,使得理论的高能行为大大改善。目前非常遗憾的是这种对称性只停在理论探索阶段上,实验上从未发现它们存在的迹象。最后应对引力的问题稍说几句话。粒子物理多数情况都把引力问题排除在外,因为引力在相应问题中小得可以不计它。然而若追求理论的完整性,引力的问题却十分突出,引力甚至不能进行重整化。在极高能量下(大于 10^{19}GeV 时)问题将非常尖锐;近年来把超对称性和引力结合起来似可以解决这一原则问题,超弦理论也是沿此方向去解这一问题的。但是这些问题要到 10^{19}GeV 能量才会突出。因此在可见的将来不会在高能物理实验中所涉及。我们将不把它做为粒子物理的主要问题来讨论,这不等于我们认为它不重要。

如果回顾历史,我们还可以清楚地看到,粒子物理的每一进展都与高能物理实验进展分不开。因此下面我们来分析九十年代的高能物理实验形势。

二、九十年代的高能物理实验

以前,人们把高能物理与粒子物理两者常混为一谈。现在,当人们谈到高能物理时,倾向于在高能加速器上做的物理实验和有关物理问题,而粒子物理是微观前沿物理。虽然高能物理大部分内容属粒子物理,但有关高能物理探测器中的物理问题,以致高能加速器本身的物理问题却不属于粒子物理范畴。同时有些非高能实验,以致宇宙学的研究内容却也属于或涉及粒子物理内容。例如:测量原子中的中性流效应,由原子核的衰变测定弱作用的耦合常数,由宇宙膨胀和氦丰度来确定中微子种类和质量限等等。因此现在人们常常区别使用粒子物理和高能物理两个名词了。然而至今粒子物理所依据的实验结果主要仍来源于高能物理实验,而且粒子物理的重要发展常常是由高能物理实验的结果所推动,并由高能物理实验所证实。因此至今研究粒子物理的人“仍把眼睛主要盯”在高能物理实验上是十分自然的。

现代的高能物理实验装置已发展成为大规模地综合各种先进技术的大工程。加速器的规模庞大,探测器的技术复杂且要求高,不仅造价昂贵而且实验的周期不断加长,一个高能物理实验从着手准备到采取数据往往需要五至十年的时间,因此九十年代的实验,实际上是八十年代定下来的。现在世界上在建造的高能

加速器和实验探测器将陆续在九十年代初投入运转。下面我们分别介绍计划在各大对撞机上研究的主要物理问题。

i) 美国芝加哥附近费米实验室的 Tevatron 超导质子-反质子对撞机,它可使质子、反质子的质心系能量达到 $2\text{TeV}(1\text{TeV} = 10^{12}\text{eV})$,是目前世界上已进入运转的、能量最高的对撞机。对撞点的亮度为 10^{30} 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$ 。主要的探测器名称为 CDF,能记录和区别粒子径迹。由于开始运转才一年多,重要结果将在一年后才能陆续分析出来。根据理论上的计算,这样高能的对撞机首先能检验量子色动力学(QCD)和收集 W^\pm 和 Z^0 事例。因为其亮度不够,能量亦不够高,各种“无用”的本底很高,即使产生出黑格斯粒子也难以鉴别出来,如果“运气好”,复合“黑格斯理论”——五彩色(Technicolor)理论是正确的,而且 Tevatron 的能量已能产生出五彩色的标量粒子以外的“强子”,那么在此对撞机上发现这些“强子”是可能的。

此对撞机的每一束的粒子能量达到一个 TeV,除了用于粒子束对撞外,还能做许多有意义的固定靶实验,因为能量高,相对论沿长效应大和近年来探测技术的提高,能分辨出 D 介子这样(寿命为 10^{-13} — 10^{-12} 秒)粒子的产生和衰变的顶点,因此大大地丰富了固定靶实验可研究的内容。

ii) 日本筑波(KEK)实验室的 Tristan 正负电子对撞机。质心系能量为 60GeV ,亮度为 2×10^{31} 厘米 $^{-2}$ ·秒 $^{-1}$ 。并已经运转了一年,它原打算用来研究顶层子,但是近年来,根据最新的 CP 实验数据,经理论的推算,其质量将可能大于 50GeV 。如果理论的推算是正确的,那么建造 Tristan 的主要目标将落空,只得做一些量子色动力学有关的检验工作了。

iii) 我国高能所的 BEPC(北京正负电子对撞机)。这台对撞机的设计是质心系能量在 5.6GeV 时其亮度为 1.7×10^{31} 厘米 $^{-2}$ 秒 $^{-1}$ (若把质心能量降到 3.1GeV 时,亮度为 6×10^{30} 厘米 $^{-2}$ ·秒 $^{-1}$)。建造它的主要目的是用来研究粲层子(C)、D 介子和粲重子等的各种性质和寻找胶球、多层次束缚态等奇异粒子等。经过仔细的论证,这一对撞机的能量虽不高,但是其性能若能做到设计要求(世界上几台这一能量的对撞机,因为亮度不够都关闭了),性能比较好,在其上就可能做出许多有意义的研究工作。例如,目前研究 D 介子等非轻子衰变的有关问题,能量提高并无多大好处,关键是要求测量准确。我国选择建造这一对撞机是适应国情的一项决定。预计今年建成,明年取数据。

iv) 美国加利福尼亚,斯坦福中心的 SLC 正、负电子对撞机。它不同于一般电子对撞机,它用直线加速器分别把正、负电子加速到很高能量,然后让它们只相撞一次,不把正、负电子储存在高真空环内,碰撞很

多次。高速电子在迴转时要辐射很多能量，因此要不断补充能量。当正、负电子能量高过一定值时维持在固定的迴转轨道上所要补充的能量很大，技术上难以实现，不如撞一次就扔掉，更经济。这是 SLC 这一尝试的基本想法。如果 SLC 成功，将为建造更高能量的电子对撞机开辟新途径。

SLC 的正、负电子最大质心系能量为 100GeV，亮度为 6×10^{30} 厘米⁻²秒⁻¹。如果质心系能量正好在中间玻色子质量 m_{Z^0} 时，能共振产生大量 Z^0 粒子。因此这时也可称为 Z^0 “工厂”，不仅能严格定量地研究 Z^0 本身的性质，而且也可利用来研究 Z^0 衰变得到的“次级”粒子的各种性质。物理上对这些问题是十分感兴趣的。它还能用来寻找超对称粒子等新物理现象，研究顶夸克偶素，检验量子色动力学等。

SLC 原计划 1987 年建成，但由于是新尝试，何时能达到设计性能和正式开始实验都是未定的因素。

v) 西欧中心的 LEP 正、负电子对撞机。第一阶段称为 LEP I，其质心系能量在 100GeV 左右，亮度可达 1.6×10^{31} 厘米⁻²秒⁻¹。所要研究的问题与 SLC 相同，主要是研究 Z^0 本身和衰变产物性质，寻找新物理现象等等。将于 1989 年造成，并开始做实验。第二阶段称为 LEP II，通过进一步补充储存环中能量来增加能力，把质心系能量提高到 200GeV，从而能产生出 W^+ ， W^- 介子对，主要是用来研究中间玻色子三顶点耦合特性，寻找新物理现象等。

vi) 西德 HERA 电子、质子对撞机。其电子束能量为 26GeV，质子束为 820GeV，使它们在储存环中进行对撞，亮度为 1.5×10^{31} 厘米⁻²秒⁻¹。主要用来研究核子结构，检验量子色动力学，寻找新物理现象等等，预计 1990 年建成，取数据将是 90 年代的事了。

vii) 美国 SSC 超导超高能质子、质子对撞机，其质心系能量为 40TeV，亮度为 10^{33} 厘米⁻²秒⁻¹，是目前计划中能量最高、亮度最高的对撞机。经计算表明，在这样高的能量和亮度条件下，肯定会对弱电作用的破缺机制有肯定或否定的结论！很可能发现新一类“强作用”、发现超对称的伴随粒子、发现基础费米子内部结构的线索等等，做出物理上有极大兴趣的发现。此外，此对撞机本身的技术十分成熟，主要困难是资金和探测器方面的一些技术问题。美国政府多年来拨出可观的预研费。为解决探测器方面的困难，已投入了很多研究力量。SSC 建造成功，肯定会对标准模型和标准模型之外的各种问题给出解决的线索，SSC 预计于 1995 年建成，已受到全世界粒子物理学家的很大关注。

以上就是未来十年高能物理实验的主要装置。这些装置已在建造之中，需要理论上指导性的研究来挖掘更加有意义的具体实验方案。因此围绕上述装置开展理论性的研究工作也是大有可为的。

纵观九十年代的 高能物理实验 各大装置，一方面

充分准备发现重大新异现象，另一方面也准备好进一步深入细致地，或在更高能量上，更加精确地检验粒子物理标准模型。特别是 SSC，如果建造成功，能对标准模型中弱电统一的破缺机制有确定结论。其意义更是无可争议的。因此我们可以预料九十年代将会出现粒子物理发展史的又一个辉煌的时期。

三、正确部署研究力量在未来十年做出好成绩

认识粒子物理的发展规律和当前我们所处的形势特点，选择好研究工作的方向，正确部署我们的研究力量，使我国的粒子物理研究工作在将来十年取得好成绩是我国粒子物理工作者的共同愿望和奋斗目标。为了实现这一目标，我们目前应重视深入定量的研究工作。定量研究可以发现新的质的问题。若没有这方面的深入研究，某些新的质的问题难以发现，我们就不会抓住也认识不到它们已含的质的新异。即使对于一些显然的新异现象，由于没有大量定量研究的经验，在建立解释新异现象时不会提出深刻的见解，且不能找到正确的理论解释。过去我们对定量研究重视不够，在弱电统一理论提出后的一段时间里失去了发掘弱电统一模型预言的新现象的机会。当 1974 年首次发现 J/ψ 时，我们虽然也及时提出过一些自己的解释意见，但是终因缺乏“平日之功夫”，未能言中 J/ψ 的本质。这都是些教训。我国的对撞机 BEPC 的建造目的主要是做精确测量来定量研究 D 介子、粲重子等的非轻子衰变，以及胶球，多层次束缚态等等问题。所以为配合我国自己的高能物理实验，重视定量研究工作，也是十分需要的。凡是定量的研究工作，只要在解释实验上有进展，则总是有可以保留的成果。不象那类探讨质的问题的工作，如果被言中则是了不起的发现；如果言不中则一无所有。而定量研究虽说意义不那么“重大”，但常常是对以后发展有用或有启发。

我们目前还应重视指导实验设计的研究工作，因为现代高能物理实验规模大，综合了所有先进技术，周期长，价格昂贵，如果没有理论的设想和预先研究，以及蒙特卡罗的模拟等，要想做出好的物理实验结果不可想像。同时通过这些研究可以预先积累大量有用的计算程序软件，一旦有新现象出现，我们已准备好了必要的软件程序，就可能在国际性竞赛中取得好成绩。

在安排研究时，做好两手准备，一方面开展比较重要的、有意义的深入细致的定量研究，同时，也要开展与现实粒子物理实验不太遥远的基础性的、机制性的理论探讨性的工作。还要密切关注世界上各方面取得的成就。一旦实验发现新异时，我们就可能有深刻的见解并首先提出正确的理论解释。

最后归结为一句话：让我们做好准备迎接粒子物理发展的新高潮。而且下一个高潮很可能并不遥远，就在即将来临的九十年代！