

为什么要建造 各种各样的加速器

郁忠强

从《高能物理》和《现代物理知识》杂志上我们已经熟悉了许多高能加速器的名字。譬如说,固定靶质子加速器 AGS、SPS、TEVATRON;质子-反质子对撞机 SPPS;正负电子对撞机 SPEAR、DORIS、CESP、PEP、PETRA、TRISTAN,最近我国建成了一台正负电子对撞机 BEPC,西欧 CERN 建成了能量更高的正负电子对撞机 LEP。为什么世界上要建立如此多的种类不同的高能加速器?世界上已经有了能量高的加速器为什么又还在建造能量低的加速器?等等。

一般说来,不同类型和不同能量的高能加速器服务于不同目的的粒子物理实验。根据物理实验的物理目标,选用不同的加速器作实验,选用固定靶加速器或者对撞机;选择质子加速器或者电子加速器;选择能量低的或者能量高的,等等。下面让我们举例向读者介绍。

一、已知粒子性质的研究

粒子实验物理中最常规的也是大量的研究工作是研究已知粒子的性质。例如,1974年丁肇中和里克特同时发现了 J/ψ 粒子。这个新粒子发现以后,就吸引了许多物理学家研究 J/ψ 粒子的性质。经过了十余年的研究,应该说, J/ψ 粒子的性质大体上已经清楚,它以很多不同的方式进行衰变,实验上已经测得了这些衰变方式的分支比。但是,还有许多衰变方式,特别是那些稀有衰变方式,也就是说,那些衰变分支比极小的衰变方式还没有被很好的研究。研究 J/ψ 粒子性质的最好方法是选用正负电子对撞机,质心系能量约 3.1GeV 。为了研究稀有的衰变方式,要求对撞机有高的量度。研究 J/ψ 粒子的性质是北京正负电子对撞机 (BEPC) 建造的物理目标之一。当 BEPC 在高亮度下稳定可靠地运行时,它将成为目前世界上研究 J/ψ 粒子性质最有效的加速器。

另一个例子是 Z^0 粒子性质的研究。1983年 CERN 的质子-反质子对撞机 SPSPS 上工作的 UA1 探测器发现了中性的中间矢量玻色子 Z^0 粒子。 Z^0 粒子的发现只可能在 SPSPS 上实现,因为当时世界上所有的加速器中只有它的能量高到足以产生质量为

93GeV 的 Z^0 粒子,其它加速器的能量都太低,不能产生 Z^0 粒子。但 SPSPS 是质子-反质子对撞机, Z^0 粒子的产额并不高,产物也很复杂。而正负电子对撞机实验,产物比较干净,易于分析。要想研究 Z^0 粒子的性质,最好的加速器还是正负电子对撞机,条件是正负电子的总能量必须大于 Z^0 粒子的质量。然而,当时已经运行的正负电子对撞机的能量都不足以产生 Z^0 粒子,最近建成的美国斯坦福的直线对撞机 SLC 和 CERN 的正负电子对撞机 LEP 建造的重要目的之一就是为了解研究 Z^0 粒子的性质。

再有一个例子是 K 介子的衰变。 CP 破坏的研究在物理学上是很重要的,这可以在 K 介子的衰变中观察。要详细研究 K 介子的衰变,需要大量的 K 介子,最好的方法是固定靶质子加速器中产生。因此,对 K 介子衰变作种种研究,目前世界上最理想的加速器是美国的 Tevatron, AGS 和西欧的 SPS。

二、已知力的研究

目前已知的四种作用力中的三种,电磁力、弱力和强力,都能够用加速器进行研究。但选择什么样的加速器来进行研究工作呢?这很大程度上依赖于你要研究什么种类的作用力和你准备如何研究它。一个研究了很多年的问题,目前仍然感兴趣的例子是质子和质子强相互作用的总截面测量。很早的实验就知道质子和质子通过强作用的总截面随着能量的增加而增大,这称为总截面上升的效应。直到现在,我们还不能彻底了解为什么会发生这样的现象。为了进一步弄清楚,需要作更高能量下质子-质子强作用的实验,取得更多的数据,显然这些数据只能依靠更高能量的质子-质子对撞机获得。正在酝酿中的美国的 SSC 和西欧的 LHC 的建成将使这个问题的研究向前推进一步。

质子-质子对撞机对研究弱力是不大合适的。质子-质子之间的强作用力将掩盖掉弱力的效应。研究弱力最好是在不出现强作用力的碰撞中研究。也就是说,碰撞的粒子中有一个必须是轻子。这样在碰撞中感觉不到强作用力。研究弱相互作用经典的方法是作固定靶实验。中微子束打质子或中子。中微子束是利用质子加速器的质子束打金属靶,产生带电的 π 介子和 K 介子,将这些介子聚焦到一个方向,然后让它们衰变成 μ 子和中微子。经过一个较长距离的屏蔽体和吸收物质,最后可以获得一定强度的中微子束。利用这中微子束打质子或中子,可研究弱相互作用。这类实验装置都是在固定靶质子加速器上实现的。

正如我们大家所知道的,固定靶实验中最高能量比在对撞实验中受到更大的限制。可以想象更高能量下的弱力研究最好是采用一种轻子和一种强子的对撞。世界上第一台这种类型的加速器正在西德汉堡 DESY 建造,它的名字叫 HERA, 30GeV 的电子和

320GeV 的质子对撞机,预计 1990 年可投入运行。这将成为世界上研究弱相互作用最为理想的加速器。

三、新思想和新理论的检验

物理学家提出一种新的理论,或有一种新的思想,为了检验理论的正确性,总要提出一些实验来进行验证。而这些实验往往是没有做过的,通常需要设计新的实验。其中有许多实验验证也许可以在已经运行的加速器上实现。也有一些也许要求建造新的加速器才能实现。

按照轻子数的守恒,下面的衰变过程是被允许的: $\mu \rightarrow e + \gamma$ 即一个 μ 子衰变成一个电子和一个光子。许多实验中都试图寻找这种衰变方式,但都没有找到,实验的精度已经达到 $1/10^{10}$ 。也就是说,在 10^{10} 个 μ 子衰变中,至今未发现一例 μ 子衰变成一个电子和一个光子。但现在还不能说这种衰变方式不存在,检验这种理论所要求的实验精度要求达到 $1/10^{12}$ 。这就要求有更大量的 μ 子做实验。最好的 μ 子来源是质子加速器的次级 μ 子束。显然,做上述实验最重要是高强度,而不是高能量,例如美国洛斯阿拉莫斯的 800MeV 的 LAMPF 质子加速器是比较合适的。

粒子物理学的发展是和新粒子的发现紧密地结合在一起的。发现新粒子是高能物理实验很重要的一个方面。有的新粒子的发现是在常规的实验中突然出现的,使理论物理学家们措手不及。例如 J/ψ 粒子的发现就是这样。而更多的新粒子是理论物理学家所预期的,他们在各种实验的启示下,预言某种新粒子的存在,或假设某种新粒子的存在,并且可以大体上推测该新粒子的某些性能。例如中微子的假设和在实验上观测到中微子;传递弱相互作用力的中间矢量玻色子 W^\pm 和 Z^0 粒子的发现;第五种夸克 b 夸克和它的反夸克 \bar{b} 的结合态 τ 粒子的发现;等等。

1974 年 11 月发现 J/ψ 粒子和 1977 年 7 月发现 τ 粒子后,理论物理学家们指出下一个可能的新粒子是第六种夸克 (t) 和它的反夸克 (\bar{t}) 组成的束缚态 ($t\bar{t}$),它的质量大约是在 20—28GeV 左右。于是,两台能量更高的正负电子对撞机分别在西德汉堡的 DESY 和美国 SLAC 开始动工兴建。它们的名字分别叫 PETRA 和 PEP,正电子束和负电子束的单束能量分别为 18.5GeV 和 18GeV,这是一对孪生子,为了同一个目的,几乎同时破土动工。谁能先建成运行,谁就可能抢先发现第六种夸克。世界各国三百余名物理学家聚集在西德汉堡,分成五个实验组,分别建成五个性能各不相同的大型谱仪。在大洋彼岸,以美国科学家为主体,也集合了三百余位物理学家,分成五个实验组,同时建造另外五台大型谱仪。竞争是激烈的,这是一场技术、智慧和力量的角逐。1979 年和 1980 年

PETRA 和 PEP 相继投入运行。经过一年多的运行,实验结果表明,没有新粒子的出现,这场大规模的世界范围的科学实验活动,历经数载,耗费了大量的人力物力,没有能达到预期的目标。

然而,寻找第六种夸克的实验研究并没有停止。1981 年西欧 CERN 的质子-反质子对撞机 (270GeV 的质子和 270GeV 的反质子) 建成后,人们希望从质子-反质子对撞实验的数据中获得新粒子 ($t\bar{t}$) 的证据。尽管 1984 年 UA1 组曾宣布他们发现有几个事例可能是 ($t\bar{t}$) 束缚态,但由于事例数太少,不定因素太多,始终不能得到肯定的结论。目前,许多物理学家寄希望于刚刚投入运行的新一代对撞机,其中有西欧 CERN 的正负电子对撞机 LEP (50GeV 正电子和 50GeV 负电子) 和美国 SLAC 的正负电子对撞机 SLC (50GeV 正电子和 50GeV 负电子)。期望在不远的将来发现新粒子 ($t\bar{t}$),最终从实验上证实第六种夸克的存在。这些新粒子的寻找和发现常常是和世界上建造最高能量的对撞机联系在一起的。

四、对未知的探索

目前粒子物理学面临着不少难题,很多是物理学上基本的问题。例如质量的起源,目前粒子物理理论无法回答夸克和轻子为什么有质量,为什么有不同的质量。迄今理论学家为了解决这个难题所作的努力和给出的理论思想可能都是错的。这要求实验物理学家摆脱已有的理论框架,从头开始去寻找实验线索。从实验中得到某种启示,逐步接近对难题的探索,对未知的探索,最后达到认识的深化,这就需要不同能量和不同种类的加速器进行多种多样的实验研究。

目前的粒子物理理论认为电子是点粒子,已经完成的实验证实在 10^{-16}cm 的尺度上电子是没有结构的。为了进一步探索未知,解决物理学上很多难题,我们可以假定,电子是有结构的,电子不是基本的,它是由更小的或更简单的客体所组成。也就是说,我们把探索深入到下一个层次。用下一个层次的物理来解决夸克和轻子这个层次的物理学上的难题。假如电子有结构,就会在某些实验中出现奇异的效应。期望在什么样的实验中去寻找这些奇异效应呢?也许首先应该在正负电子对撞机的实验中,注意力应该集中在很多参数的精确测量上,其次应该关心电子-质子很高能量散射的精确测量。

也许电子本身仍然是基本的,而 τ 轻子可能不是基本的。假如是这样的话,就必须不断地产生 τ 轻子,仔细地研究 τ 轻子。这样的工作相对来说就要在较低能量的正负电子对撞机上进行。北京正负电子对撞机 (BEPC) 正适合于这样的工作。