

电子-正电子对撞实验的进展

唐孝威 范钦敏

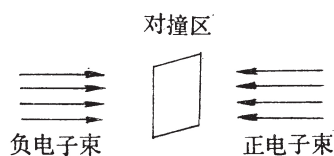
高能电子-正电子对撞实验是目前高能物理研究中一个很重要的方面。近几年来,许多重要发现是在电子-正电子对撞实验中得到的。这里,从实验物理的角度对这方面的进展情况作一简要介绍。

对撞的实现

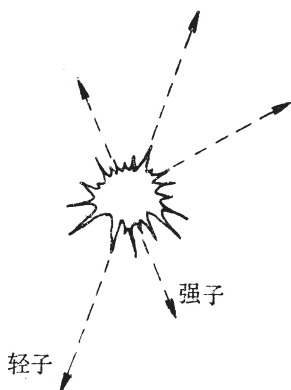
高能电子-正电子对撞实验,是使电子和正电子先在一个特殊的装置——对撞机中分别进行积累、加速、储存,然后,使两束粒子朝相反方向运动在对撞机内的几个固定点(称为对撞区)上进行对撞,从而研究对撞过程出现的各种物理现象。为了增加对撞的几率,对撞束被聚集在一个很小的截面上,例如,美国 SPEAR 的对撞机,对撞区是一个截面仅为 1 毫米 $\times$ 0.1 毫米、长度为 5 厘米的很狭小区域。在对撞机内维持着很高的真空度(如 10^{-9} 毫米汞柱)。在进行对撞实验时,电子-正电子束能量是可以细致地调变的,以便于进行寻找共振峰等项实验。

目前世界上正在运行的两台最大的电子-正电子对撞机是美国的 SPEAR 对撞机(目前质心系最高能

量为 80 亿电子伏)和西德的 DORIS 对撞机(目前质心系最高能量为 50 亿电子伏)。此外,在意大利、苏联、法国等还有许多台能量较低的电



(a)



(b)

图 1 高能电子-正电子对撞过程示意图
(a) 对撞 (b) 微观火球形成并转化

对撞过程的剖析

电子-正电子对撞湮灭过程,是分两步进行的:第一步,电子-正电子湮灭,产生一个在非常短暂时间内存在的中间态,常常称它为虚光子态,它很像一个能量密度非常大的微观火球。第二步,虚光子重新转化成为其它各种粒子。这些粒子可能是轻子对(如电子-正电子对或正负 μ 子对),也可能是某些强子(如 π 介子、K 介子、重子对等)。当电子-正电子能量很高时,往往在一次反应中就可产生很多个强子。

这个反应有哪些特点呢? 第一,能量相同的电子和正电子,以相反方向对头碰撞,在它们湮灭时,全部能量都转变成质心系的有效作用能(在普通高能粒子轰击静止靶的情况下,仅有很少一部分能量变成质心系的有效作用能),因此,利用这种对撞作用,可以进行目前在许多高能加速器上无法进行的某些超高能实验。第二,电子-正电子湮灭产生虚光子的过程,属于电磁相互作用过程,因此,可以用量子电动力学理论来描述。第三,中间态的虚光子具有确定的特性(例如电荷

为0,自旋为1,宇称为负,电荷共轭宇称为负。这些量子数同光子的量子数相同)。因此,虽然反应末态的粒子是多种多样的,但它们的总能量是一定的(等于火球的总能量),末态粒子总的量子数也是一定的(与火球的量子数相同)。由此可见,这类反应比强子引起的反应要简单得多。

实验探测

在对撞实验中,记录反应事例用的许多粒子探测器,通常都安置在电子-正电子对撞区的四周,几乎把对撞区包围起来,这样使对撞产生的许多粒子尽可能完备地被记录下来。同时,还常采用螺线管装置,使探测器处于强磁场之中,这样,可以对产生的事例进行选择,仅触发记录那些有兴趣的事例,并对每个粒子从反应点飞出的角度和动量进行细致的测定(用磁场精确分析带电粒子的动量)。此外,还常用飞行时间法、吸收法、簇射探测器等,逐个鉴定粒子的性质(判明它们是电子、 μ 子、光子、 π 介子、K介子、质子等)。

几个重要的发现

近几年来,在高能电子-正电子对撞实验中有许多重要的发现。

第一,在丁肇中发现J粒子的同时,在电子-正电子对撞实验中也发现了这类粒子(又称 ψ 粒子或

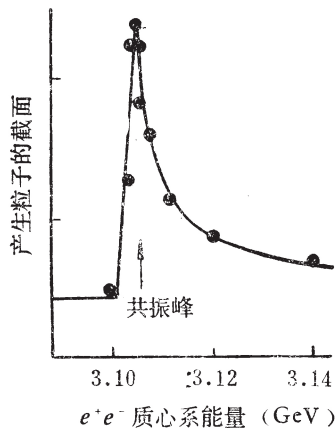


图2 ψ 粒子的存在表现为共振峰

J/ψ 粒子)。在对撞实验中, J/ψ 粒子的存在表现为共振峰,就是当电子-正电子的能量调到质心系总能量为31亿电子伏处,湮灭产生粒子的截面(即反应几率)特别大,而在这个能量前后,截面值又降低。这个共振峰非常窄,表示 J/ψ 粒子的寿命特别长。除 J/ψ 粒子外,还发现了另一个 ψ' 粒子,共振峰位置约在37亿电子伏处。此外,在电子-正电子对撞实验中,测量了在不同的质心系总能量下,电子-正电子湮灭产生强子的截面。实验上发现,随着质心系总能量的增加,电子-正电子湮灭产生强子的截面同产生正负 μ 子对的截面之比值 R 也有增加。当质心系总能量超过50亿电子伏后, R 增加到5。这个数值比早先理论所预期的值要大得多。因此,这是一个很令人感兴趣的问题。

在1974年以前,已知的各种强子可以用三种层子(及其相应的反层子)来解释。1974年以来,发现了 J/ψ 粒子和 ψ' 粒子以及 R 实验值的涨高,这些都是当初理论上没有预料到的。它们不能沿用三种层子的理论来解释,而需要引入第四种层子,即所谓“粲层子”(及“反粲层子”)来解释(粲层子带有新的叫粲数的量子数)。后来,在电子-正电子对撞机上,对 J/ψ 粒子和 ψ' 粒子进行仔细的研究之后,又发现了一些较宽的态(共振峰)以及由 J/ψ 粒子和 ψ' 粒子衰变产生的一些中间态新粒子。这一类粒子族可以解释为是粲层子与反粲层子所组成的粒子体系的不同能态(属于这个族的新粒子,粲数正负抵消,所以本身是不带粲数的)。

第二,在电子-正电子对撞实验中,还发现了粲粒子。其中一种是 D 介子,它们是带粲数而不带奇异数的介子(普通介子是不带粲数的)。另一种是 F 介子,它们是既带粲数又带奇异数的介子。这些粲粒子是不稳定粒子,通过测量它们的衰变产物来研究它们。目前理论上把这些粲粒子解释为是粲层子同普

通(不带粲数)层子结合成的粒子。

第三,在电子-正电子湮灭产生多个强子的反应中,发现有喷射现象,就是反应所产生的强子集中在两个束中,它们朝相反的方向飞出,像两簇喷射束一样。目前有人用电子-正电子湮灭产生层子,层子又很快形成强子喷射来解释上述现象。

第四,在电子-正电子对撞实验中,发现了质量比 μ 子重得多的重轻子。实验分析这些粒子的衰变产物,确定它们是带有与电子相同电荷的质量为19亿电子伏的轻子。近两年来,宣称发现了重轻子的实验报道有好几处,但以电子-正电子对撞实验发现重轻子的依据最为充足。随着重轻子的发现,还可以预料,与这种重轻子相伴随产生的将是一类新的中微子,它们与电子中微子或 μ 子中微子会有所不同。

新的课题

上述一系列新发现引起了高能物理工作者很大的注意。为了在高能量区域进一步做电子-正电子对撞实验,目前西德和美国都正在建造能量更高的电子-正电子对撞机。西德的PETRA对撞机和美国的PEP对撞机,质心系总能量都将达到400亿电子伏。

为了弄清楚有多少种层子、多少种轻子,将要继续在高能量对撞机上研究各类新粒子,同时,需要在更高能量区域内测量截面比值 R 的变化。在高能量对撞机上寻找自由层子,也将是很有趣的探索性实验。在电磁相互作用方面,进行检验量子电动力学的实验和研究电子-正电子交换两个虚光子的反应,同样都是很有意义的。另一方面的实验是研究弱相互作用效应。我们知道,电磁作用的截面随质心系总能量的平方而下降,而弱作用截面却随质心系总能量(直到500GeV)的平方而增长,因此,在很高能量电子-正电子对撞实验中,弱相互作用可能会较强烈地显现出来。由中性流

所传递的弱相互作用同电磁相互作用的干涉效应,又会使电子-正电子对撞产生正负 μ 子对的产额及角分布都发生变化。对这些现象进行深入的研究,将会对目前尝试中的把弱作用力和电磁作用力统一起来的理论提供重要的实验资料。此外,若进一步用极化的电子-正电子束进行对撞实验,也将会使我们观察到更多新的实验现象。