

# 高能 $e^+e^-$ 作用的物理工作

王祝翔

高能正、负电子( $e^+e^-$ )对撞到底可以做什么物理工作? 它们在物理上究竟取得了哪些成就? 为什么国际上对这种类型的对撞机如此重视? 这是大家感兴趣的问题。

$e^+e^-$ 作用的物理工作与对撞的  $e^+e^-$  的总能量有极大的关系, 甚至可以说, 主要取决于

$e^+e^-$  的总能量。在能量较低的情况下(譬如小于 200 MeV)一个负电子和一个正电子相碰, 它们或者是发生弹性散射, 或者是相互湮灭而产生二个光子。由于能量太低, 它们不可能产生其他质量较大的粒子。随着总能量的增高,  $e^+e^-$  作用末态产物的种类也逐渐增多。当总能量增高到 500 MeV 时, 它们就有可能产生一对正负  $\mu$  子或一对  $\pi$  介子。当增加到大于 1 GeV 时, 又有可能产生一对  $K$  介子。能量达到大于 4 GeV 时, 就会观察到  $J/\psi$  粒子族, 粲粒子等多种粒子。当能量再提高到大于 10 GeV 时, 又出现了所谓的  $\gamma$  粒子族及底粒子等。可以预料, 在更高的能量下, 将会出现更多新的现象。因此, 在不同的  $e^+e^-$  总能量下, 可以做的物理工作是很不同的。总的说来, 不同能量下的物理工作可大致列在表 1 中

表 1 不同能区的主要物理工作

$e^+e^-$ 对撞机的代号及国家	能量 (GeV)	主要物理工作
ADONE 意大利	$2 \times 1.5$	电磁作用; (不包括 $c, b$ 夸克的) 强子物理
VEPP-2M 苏联	$2 \times 0.7$	同上
SPEAR 美国	$2 \times 4.2$	$J/\psi$ 族; $D$ 介子; $F$ 介子; $\tau$ 轻子; 粲重子; ( $c$ 夸克物理)
DORIS 西德	$2 \times 5.1$	$J/\psi$ 族……; $\gamma$ 族
CESR 美国	$2 \times 8$	$\gamma$ 族; 底介子; 底重子 ( $b$ 夸克物理)
VEPP-4 苏联	$2 \times 7.5$	同上
PEP 西德	$2 \times 19$	胶子族; 夸克的喷注现象 (夸克物理)
PEP 美国	$2 \times 18$	同上
TRISTAN 日本	$2 \times 30$	可能的 ( $t$ ) 粒子族; 顶粒子; ( $t$ 夸克物理)
LEP 西欧中心	$2 \times 65$	中间波色子 $Z^0, W^\pm$ ; $t$ 夸克物理; $H^0$ 粒子

## 1. 高能 $e^+e^-$ 物理所取得的成就

高能  $e^+e^-$  对撞机技术近年来得到极为迅速的展

展, 各个技术先进国家的政府都拨出专门款项, 支持开展这项工作。建造  $e^+e^-$  对撞机费用是很大的, 特别是很高能量的对撞机, 造价十分惊人。例如最近已获批准的西欧各国联合建造的 LEP (大型  $e^+e^-$  对撞机, 总能量为 130 GeV), 周长达 27 公里, 总投资竟高达 10 亿法郎 (约合 5 亿美元)。尽管如此, 西欧各国政府仍予以批准。在目前国际经济情势不太景气的情况下, 这样大的基础工程项目为什么还会被批准呢? 主要原因在于: 自从 1974 年发现  $J/\psi$  粒子以来,  $e^+e^-$  物理取得了一系列极其重要的成就, 而且从发展趋势看, 它们对粒子物理的贡献将越来越大, 作用将越来越显著。下面我们扼要地分析一下, 从 1974 年到目前为止  $e^+e^-$  物理所取得的主要成就。

1974 年, 丁肇中和里克特独立地发现了  $J/\psi$  粒子以后 ( $J$  和  $\psi(3100)$  是同一种粒子, 丁肇中是在质子加速器上发现的, 他取名为  $J$ , 里克特是在  $e^+e^-$  对撞机上发现的, 命名为  $\psi$ 。之后国际上就把这种粒子记作  $J/\psi$ ), 盖尔曼提出的、能满意地解释强子系统的三种夸克 (记作  $u, d, s$ ) 的模型已能解释这种粒子。原因是这种粒子的质量比已往观察到的所有强子 (包括共振态) 的质量都大, 然而寿命却比共振态粒子长得多, 这样就不能纳入原先分类的强子系统中去。当时认为唯一能说明这种粒子存在的理论也许是四种夸克的模型。这种模型是 1970 年美国的格拉肖等, 为了解释在弱相互作用中不存在  $\Delta S = 1$  的弱中性流 (如  $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ ) 而提出的, 他们认为, 组成强子的更基本的粒子——夸克, 除了  $u, d, s$  三种以外, 还应存在第四种夸克, 记作  $c$ , 而  $c$  夸克则带有新的量子数, 叫做粲数。当时根据  $J/\psi$  粒子的性质, 认为它们是由  $c\bar{c}$  组成的 ( $\bar{c}$  为  $c$  夸克的反粒子)。

如何证明  $J/\psi$  是由  $c\bar{c}$  组成? 如何证明确有  $c$  夸克存在? 这需要进一步用实验加以验证。首先, 假如  $J/\psi$  是由  $c\bar{c}$  组成, 那么就应该存在着 ( $c\bar{c}$ ) 的各种激发态, 也就是说, 除了  $J/\psi$  粒子以外, 还应该有一个以不同能量态表征的家族。正好象由 ( $e^+e^-$ ) 组成的电子偶素一样, 存在着能级各不相同的各种激发态。其次, 假

表 2  $\psi$  粒子族及粲介子族

$J/\psi$ 粒子族	$D$ 介子族	$F$ 介子族
$J/\psi$ (3095)	$D^+(c\bar{d})$	$F^+(c\bar{s})$
$\psi'(3684)$	$D^-(\bar{c}d)$	$F^-(\bar{c}s)$
$\psi''(3772)$	$D^0(c\bar{u})$	$F^{*+}(c\bar{s})$
$\psi(4030)$	$\bar{D}^0(\bar{c}u)$	$F^{*-}(\bar{c}s)$
$\psi(4100)$	$D^{*+}(c\bar{d})$	( $F$ 介子目前还没有肯定结果)
$\psi(4414)$	$D^{*-}(\bar{c}d)$	
$\psi_0(3415)$	$D^{*0}(c\bar{u})$	
$\chi_1(3510)$	$\bar{D}^{*0}(\bar{c}u)$	
$\chi_2(3550)$		

如  $c$  夸克确实存在,那么它们同样会与  $u, d, s$  (或反夸克  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ ) 等组成各种不同的介子(介子是由任意一个夸克和任意一个反夸克所组成),这种带有粲量子数(即包含一个  $c$  (或  $\bar{c}$ ) 夸克)的介子就叫做粲介子,因此显然还应该有一个粲介子族存在.为了搞清这二个问題,物理学家们进行了一系列实验.结果在能量范围为  $4-6\text{GeV}$  的  $e^+e^-$  对撞机 (SPEAR, DORIS) 中,果然找到了  $\psi$  粒子的家族以及  $D^0, D^\pm$  等粲介子族,如表 2 所示.

1975 年,在  $e^+e^-$  对撞机 SPEAR 上又发现了一个极为重要的新粒子,叫做  $\tau$  重轻子.这种粒子的存在,理论上早就有所猜测,因为从轻子的家谱来看,除了电子和  $\mu$  子以外,并不能排除有更重的轻子存在的可能性.这种始终在寻找中的重轻子,终于在  $e^+e^-$  对撞机上被发现了.由于它具有象电子  $e$  和  $\mu$  子一样的轻子性质,而质量却大得多,故把它称作  $\tau$  重轻子. $\tau$  重轻子的发现,使已知的二对轻子 ( $e^-, \nu_e$ ) ( $\mu^-, \nu_\mu$ ) 增加到了三对 ( $e^-, \nu_e$ ) ( $\mu^-, \nu_\mu$ ) ( $\tau^-, \nu_\tau$ ),  $\nu_e, \nu_\mu$  和  $\nu_\tau$  分别为电子中微子,  $\mu$  中微子和  $\tau$  中微子 ( $\nu_\tau$  目前实验上还没有发现).从理论上讲,这对阐明轻子和夸克之间的对称关系具有极大意义.

1977 年,美国莱德曼在费米实验室用质子加速器发现了另一种更重的新粒子 ( $Y$  粒子,质量为  $9.5\text{GeV}$ ) 以后,用四种夸克解释又不行了.于是理论学家又提出了可能存在着第五种夸克,记作  $b, \bar{b}$  夸克也带有新的量子数,叫做底数.且认为  $Y$  粒子是由  $b\bar{b}$  组成.由此提出了同样的问题,如何证明  $Y$  是由  $b\bar{b}$  组成?如何证明确有  $b$  夸克存在?为此又只能借助于  $e^+e^-$  对撞机.当时,西德 DESY 的对撞机 DORIS,其  $e^+e^-$  总能量是小于  $9.5\text{GeV}$ ,并不能产生  $Y$ ,为了稍为提高一些能量,他们改进了对撞机的能量指标.当总能量达到  $10.2\text{GeV}$  时,他们果然观察到了  $Y$  粒子也有一个由不同能量态描述的家族.现在分别记作  $Y, Y', Y'', Y'''$ .这些态的能量值与理论对  $b\bar{b}$  激发态的预言完全符合,这表明  $Y$  粒子由  $b\bar{b}$  组成确实是可信的.很显然,要进一步间接地证明  $b$  的存在,也还需要找到底介子族,甚至底重子族.这些粒子族也正是目前在  $e^+e^-$  对撞机上的寻找对象.

值得指出的是,通过寻找粲粒子和底粒子来间接地证实  $c, b$  存在的细致工作,利用质子加速器是很难进行的,只能依靠  $e^+e^-$  对撞机来完成.

1979 年,西德 DESY 由四个组独立完成的更高能量 ( $38\text{GeV}$ ) 的  $e^+e^-$  对撞实验,不但发现了二喷注事例,而且还观察到了三喷注现象.这些喷注很可能是夸克和胶子(传递夸克之间作用力的一种粒子)存在的一种迹象.显然,这对描述强作用的量子色动力学理论是有力的支持.在同一对撞机上,实验结果还向人们指出,在  $2 \times 10^{-16}$  厘米那么小的范围内,量子电动力学仍

六种轻子  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$

六种夸克  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

图: 六种轻子与六种夸克相对应

然是适用的,也就是说,在  $2 \times 10^{-16}$  厘米范围仍可把电子和  $\mu$  子看成是点粒子.此外,在验证著名的范伯格-萨拉姆的弱电统一理论 (W-S 理论) 方面,也取得了一定的成绩.

根据 W-S 理论,轻子和夸克在弱作用和电磁作用范围内有统一的描述,而从轻子与夸克联系的对称性考虑以及量子色动力学所取得的成就,物理学家们确信还存在着第六种夸克,取名为  $t$  (顶) 夸克.这样六种轻子就正好与六种夸克对应起来,如图所示.而此图可向人们揭示,  $e^+e^-$  物理正在变得越来越重要.

从 1935 年发现  $\mu$  子一直到 1974 年发现  $J/\psi$  粒子的这 40 年期间,人们为了阐明亚原子粒子的结构和微观世界的基本规律,建造了许多台高能质子加速器,而且能量越来越高,规模越来越大.耗费了巨大的资金.利用这些加速器,成千的物理学家进行了大量实验研究工作,从弱作用研究一直到强作用研究,发现了二百多种粒子以及许多新的现象和规律.但是光从粒子内部结构来看,根据盖尔曼在 1964 年提出的夸克模型,把那么多的强子归纳起来,最终不过是了解到了:所有的强子都是由三种更深一层的粒子——夸克(记  $u, d, s$ . 根据我国理论学家提出的层子模型,即相当于层子)和它们的反夸克组成.即强子中的重子是由三个夸克组成,强子中的介子是由一个夸克和一个反夸克组成.由此可以看到,图中所列出的六种轻子和六种夸克,其中电子  $e, \mu$  子和相应的中微子以及  $u, d, s$  夸克,主要是在 40 年期间利用高能质子加速器打静止靶的实验阐明的,而图中的  $\tau$  重轻子以及  $c, b$  夸克则是自 74 年以来的 8 年中由  $e^+e^-$  对撞实验阐明的.象  $c, b, t$  等这些新的更基本粒子的确认,无疑在阐明微观世界基本规律的理论更具有更深刻的意义.同样可以预料,如果  $t$  夸克确实存在,那么它们也将由  $e^+e^-$  对撞实验来加以证实.当然,由于预言的  $t$  夸克具有更重的质量,相应于  $t\bar{t}$  组成的粒子族以及带有  $t$  夸克的顶介子族,顶重子族,应具有更大的质量,这也是要求有更高能量的  $e^+e^-$  对撞机的一个重要原因.

从上述 40 年中高能质子加速器所取得的成就和还不到 10 年的高能  $e^+e^-$  对撞实验所取得的成就相对照,人们就不难看出,目前各国对建造更高能量的  $e^+e^-$  对撞机有如此大的兴趣,且给予特别支持的原因了.

## 2. 更高能量的 $e^+e^-$ 物理

鉴于上述物理上的原因,目前世界上正在筹建更高能量的  $e^+e^-$  对撞机.日本已决定建造总能量为 60

GeV 的  $e^+e^-$  对撞机,并已于去年破土动工。西欧原子核研究中心也已决定建造总能量为 130GeV 的  $e^+e^-$  对撞机 (LEP)。可以预料,这二台对撞机的建成,将为粒子物理提供更多新的内容。在这二个对撞机上可以做的物理工作将是更重要的。

由 QCD 理论预言的  $t$  夸克物理,如由  $t\bar{t}$  组成的粒子族以及由  $t$  与其他夸克组成的顶介子族、顶重子族,可望在日本的 60GeV  $e^+e^-$  对撞机上得到结果。根据 W-S 理论,预言存在传递弱作用的中间波色子  $Z^0$  和  $W^\pm$ ,  $Z^0$  的质量约在 85GeV 左右,  $W^\pm$  质量比  $Z^0$  稍为小些。它们是否存在? 如果存在,则有哪些具体的物理性质? ……这些重要的问题,看来很有希望在 130GeV 的 LEP 中得到确切的解答。除此之外,象寻找夸克和胶子的进一步证据,精确测定夸克和粒子的弱中性耦合常数以及寻找  $H^0$  (Higgs) 粒子(它是为了解释电弱对称性破缺所需要的)都可望在 LEP 上得出结果。

值得指出的是,目前西欧中心的总能量为 540GeV 的质子-反质子对撞机已经正式运行,寻找中间波色子  $Z^0$  和  $W^\pm$  也是它的主要目标之一,不过由于亮度太低,碰撞率不够,所以还很难说一定能对中间波色子的存在及其性能作出确切结论。多数物理学家的希望仍寄托在  $e^+e^-$  对撞的 LEP 上。

### 3. 北京 $e^+e^-$ 对撞机上可做的物理工作

北京  $e^+e^-$  对撞机的设计总能量为 4.4GeV。如果稍作改进,也可能达到 5.6GeV。大家会问,在 4.4—5.6GeV 能区还可以做些什么物理工作? 此能区过去有人做过,目前也还在继续做,已经得到了不少结果,而且还将继续取得结果。可是,这方面的工作是否都做完了呢? 实际情况并不如此。只要我们在对撞机和探测器技术的主要指标上有所提高,是可以做不少细致工作的。事实上,由于各国的多数物理学家倾向于做更高能量的  $e^+e^-$  实验,以便抢先得到更新的结果,对于 4—6GeV 能区的工作,已不准备花很大力量进行了。

从表 1 可以看到,在 4—6GeV 能区,可以研究有关  $\phi$  粒子族,粲介子族,  $\tau$  重轻子以及粲重子等方面的问题,由于一般的,比较容易实现的工作已经在 SPEAR 和 DORIS 上大量地做过了。所以剩下的是一些比较难做的问题。具体来说,大致有以下一些方面工作可做。

(1)  $D$  介子物理  $D$  介子就是由  $c$  夸克与  $\bar{d}, \bar{u}$  反夸克或  $\bar{c}$  反夸克与  $d, u$  夸克组成的介子。这种介子质量在 1865MeV 附近,目前已知有  $D^+, D^-, D^0, \dots$  等多种。它们绝大部分是衰变为一个  $K$  介子加  $\pi$  介子等其他粒子。 $D$  介子问题,目前已有相当多的数据,不过对于稀少的过程,如卡比波抑制过程等的研究,实际上还没有数据。这方面如能取得足够多的数据,就有可能较精确地测定卡比波角。此外,象  $D$  介子的衰变分支

比,  $D$  介子及其激发态的产生截面随能量的变化关系以及  $D^0$  衰变中  $CP$  是否守恒等问题都是值得研究的。

(2)  $F$  介子物理  $F$  介子是  $c$  夸克与  $\bar{s}$  反夸克或  $\bar{c}$  反夸克与  $s$  夸克组成的粒子。它的产生截面估计只是  $D$  产生截面的 1/10。这个领域的工作,由于对撞机的亮度以及探测器方面所存在的问题,目前还不能作仔细研究。虽然有的组报道说,已经得到了  $F$  介子的数据,但由于几家矛盾的结果而没有被大家承认。因此,这方面工作基本上仍是空白。研究  $F$  介子的首要条件是必须大大增加现有的亮度,同时要使探测器对通过衰变产物来鉴别  $F$  介子更为有效。从物理上看,这方面工作是很重要的,今后也许将成为这能区的重点物理工作。

(3)  $\tau$  轻子物理  $\tau$  轻子的质量约为 1.8GeV,产生  $\tau^+\tau^-$  轻子对的阈能是 3.6GeV。因此在稍高于 3.6 GeV 的能区(不宜超过 3.77GeV),最适合做  $\tau$  轻子工作,因为不会产生过多的粲粒子本底。研究  $\tau$  轻子在实验上并不容易,以 SPEAR 为例,一年约可产生 80000 对  $\tau^+\tau^-$ 。平均每一衰变道约有 8000 事例。如探测器效率为 30%,则每道可观察到 2400 事例。对于卡比波抑制过程,只占以上数目的 5%,事例数少得多了。

(4) 粲重子物理 粲重子是由  $c$  夸克和  $u, d, s$  等夸克组成的重子。目前世界上虽然有几个组宣布已观察到了粲重子,但是并没有相同的重复例子,因此对粲重子族的存在及其性质的研究,想必会成为这能区  $e^+e^-$  对撞研究的重要内容。

(5)  $\phi$  粒子族尚未解决的问题  $\phi$  粒子族中,有些粒子的量子数,如  $\eta_c$  等的自旋和宇称尚未测定,  $\eta_c', ^1P_1$  态以及由多个胶子组成的胶子球等工作还做得很少,因此确还有值得做的余地。当然,在这能区也不排除新的稀少现象存在的可能性。

需要指出,上述的主要物理工作能不能进行,实际上还取决于其他的一些因素,其中最主要的就是对撞机的亮度,其次是探测器的有效性。

一台  $e^+e^-$  对撞机,在能量指标达到以后,能否做更深入的物理研究则取决于对撞机的亮度。因为亮度大,才能有高的粒子产率,从而才能有足够的数据来分析稀少过程。如亮度低,则许多感兴趣的过程就完全探测不到了。此外,如亮度已足够大,而探测器的有效性、可靠性却很差,则同样不能有效地探测到作用中产生的稀少过程。因此可以断言,亮度大、探测器的可靠性好以及能长时间稳定运行是能否得到新数据的三大要素。这也是北京  $e^+e^-$  对撞机的亮度希望能比目前相同能区对撞机的亮度更大以及探测器的性能希望更好的原因。

在北京  $e^+e^-$  对撞机上做的工作,有没有可能与人家做过的工作重复呢? 这种可能性是完全存在的。因

为对我国来讲，建造对撞机和规模如此庞大的探测器还是第一次，利用它来进行完整的物理实验更是没有经验。所以，在全部装备建成以后，为了训练和培养实验物理和技术干部，同时也作为对仪器设备可靠性的考验，重复做一些人家做过的工作是不可避免的。当然，我们的主要目标应着眼于人家还没有解决的问题。

对撞机和探测器都是难度极大的技术，面非常广，工作量也很大，而且好多元器件、配件等国内还不能生产，需要依靠国外进口，因此这项任务是相当艰巨的，只有通过有关方面密切配合，大力协作，才有可能完成。相信通过  $e^+e^-$  对撞机的建造和  $e^+e^-$  实验物理工作的开展，必将使我国的基础物理研究及技术人才的培养打下良好的基础。