

浅谈 T-charm 工厂的物理

吴 济 民

近年来,高能物理学界一直在酝酿建造粒子工厂。就在美国决定超导超级对撞机(SSC)下马前后,美国批准在 SLAC 建造 B粒子工厂。日本也批准在 其高能物理所(KEK)建立 B粒子工厂。意大利决定建造 中粒子工厂。美国还改建 CESR 对撞机,其最后目标也是要建成一个 B粒子工厂。

目前所指的粒子工厂,就是指比现有亮度提高 100—200 倍的 e[†]e⁻ 对撞机,达到 10³³/厘米·秒. 它们的质心系总能量分别选择在中共振态、τ-J/中共振态家族或 bb 共振态家族能区(~10GeV). 分别称为 中粒子工厂,τ-charm 工厂(以下简称 τCF)和 B粒子工厂,从而像工厂生产产品那样能大量产生所要研究的粒子. 其目的是使人们能像了解 u、d、s 夸克物理和 e、μ 轻子物理那样,深入地了解 c、b 夸克物理和 τ轻子物理。到目前为止,与后看有关的一些相当重要的实验没有完成,还不能全面地检验粒子物理学的标准模型。如果一旦发现实验与理论预言之间有偏离,将会发现新物理。

高能物理实验有两个发展方向: 向高能量区域发展和向精密实验方向发展. 在前一个方向上已取得一些重要成果. 例如,发现了 ν_{μ} ,反质子 $\bar{\rho}$ 以及 z^{o} ,W±粒子等等. 不久前,又发现了顶夸克存在的迹像. 而在精密实验方向上同样也得到了高能物理学的重要结果. 例如,关于 K^{o} 衰变中 CP 破坏参数的测量;在极化 e^{-p} 散射的测量中发现了弱中性流的字称 破 坏鬼象:测量 $e^{,\mu}$ 的反常磁矩;发现了 J/ψ 粒子;弱带电流 V^{-A} 型结构的测量等等. 目前,以 τ 轻子为例,世界上 7 个 $e^{+}e^{-}$ 实验组总共才记录下一百多万对 $z^{+}v^{-}$ 轻子对事例. 这个数目远远比不上记录下来的 μ 轻子事例数. 利用这些事例不可能完成对 τ 轻子物理的全面检验. 所以,提高对撞机的亮度,增加事例数是十分自然的要求.

要能建立一个"粒子工厂",就要求在选定的能量下,那里的粒子产生截面大,本底小,粒子分辨性能好("实验环境好"). 这些要求在粒子对产生阈附近能得到满足. 以 $e^+ + e^- \rightarrow r^+ + r^-$ 为例,图 1 是它的截面随质心系能量 E_{cm} 的变化图. 当 E_{cm} 超过阈能后,截面很快上升达到最大值. 随后按 $\frac{1}{S}$ 规律下降($S=E_{cm}^2$),在 $E_{cm}=3-5$ GeV 范围内正好是这个截面最

大的范围. 这个能区范围还覆盖了 $c\bar{c}$ 家族, $D^{\pm}D^{\mp}$, $D^{0}\bar{D}^{0}$, $D^{\ddagger}D^{\mp}$ 的阈能区. 所以这里是建立 τCF 合理的能区. 也就是说,在目前北京正负电子对撞机 BEPC 所选的能区内,提高对撞机的亮度,建造 τ -charm 工

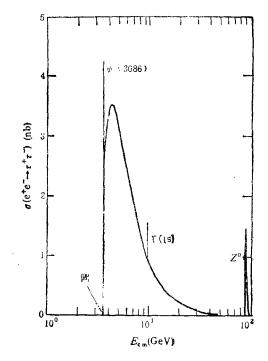


图 1 表 1

产生粒子	粒子数目	
J/ψ	3×10 ¹⁰	
$\psi'(3686)$	8×10°	ė.
D+D-	4.2×10^{7}	在 4′′(3770)
$\mathbf{D_0} \underline{\mathbf{D}_0}$	5.8×10 ⁷	在 4''(3770)
D+D;	1×107	在 4.03GeV
r+r-	0.7×10^7	在 3.57GeV
	6.9×107	在 $oldsymbol{\phi}'$
	5.3×10 ⁷	在 4.25GeV

厂是比较理想的. 按亮度为1033/厘米2·秒计算,运行一年所得的事例数见表1.

当然,建造一台高能加速器是在综合考虑了政治、

经济和科学技术等诸多因素之后才能作出决定的. 仅就科学技术而言,目前对是否建造 τCF 来作肯定和否定的断言尚有相当多的研究工作要做. 这里 仅 就 τ-charm 工厂的物理做一粗略的讨论.

 J/ψ 粒子和 τ 轻子已经发现了 20 年,已经完成了相当多的实验,在这个能区内还有哪些有意义的实验呢? 这些精密实验对高能物理有重要意义吗? B 粒子工厂能代替 τ CF 吗?让我们来讨论这些问题. τ CF 上的物理工作可分成三个大方面:(一) τ 轻子物理,(二) J/ψ 物理,(三) 粲粒子物理.

(一) を轻子物理

目前从实验知道, τ 粒子是自旋为 $\frac{1}{2}$ 的 轻 子.

初步测得了它的质量、寿命和主要分支比.确定了工是系列轻子,也就是说,像(ν_{e} , e^{-})、(ν_{μ} , μ^{-})二重态一样,应当还存在工中微子 ν_{r} , (ν_{r} , τ^{-})组成的轻子二重态出现在标准模型理论中.但是,仍然有若干重要测量没有完成.这包括:确定工 $-\nu_{r}$ —W 顶点是否为V—A 型,测定 ν_{r} 质量的上限,在工的半轻子衰变中测量和解释谱函数的性质,检验矢量流守恒假设,精确测定强耦合常数 α_{r} (m_{r}),寻找是否存在二类流过程,在工的稀有衰变中寻找标准模型的禁戒过程,测量工程子的反常磁矩,电偶极矩,在 $2\tau^{+}\tau^{-}$ 顶点上检验标准模型等等。其中有几个实验具有理论上的重要性,许多实验可以在 τ CF上完成.我们选两个加以讨论.

1. 测量 ፣ 中微子质量的上限值.

中微子质量问题一直是粒子物理和字亩学关心的大问题. 现有的粒子物理实验给出 ν_e, ν_μ 和 ν_r 的质量上限分别是 7.3eV, 270keV 和 31MeV。如果中微子的质量不为零,那么中微子的质量本征态(ν_1, ν_2, ν_3)不等同于中微子的弱作用本征态(ν_e, ν_μ, ν_r)。两者之间存在一个混合矩阵 V_\bullet

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_{\mu} \\ \nu_{\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu_1} & V_{\mu_2} & V_{\mu_3} \\ V_{\tau_1} & V_{\tau_2} & V_{\tau_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

这个混合矩阵 V 也会出现在轻子的弱作用流中.

$$lr_{\mu}(1-r_{s})V\nu$$
.

这样,在三代轻子家族之间可以发生跃迁,就会出现轻子"味道"改变的过程,即中微子振荡和轻子的 CP 破坏现象. 例如有:

 $\tau^- \longrightarrow l^- + X$ (X 为中性粒子或总电荷为零的粒子组)

$$\mathbf{T}^{\bullet} \longrightarrow l^{-} + \gamma(l^{-} = e^{-}, \mu^{-})$$

$$\longrightarrow \mu^{-}\mu^{+}\mu^{-}, \mu^{-}e^{+}e^{-}, e^{-}\mu^{+}\mu^{-}, e^{-}e^{+}e^{-},$$

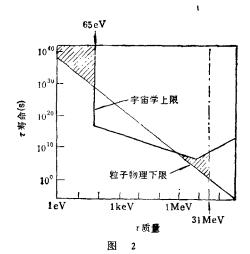
$$\longrightarrow l^{-} + h^{0}, h^{-}e^{-}\mu^{+}$$

$$\nu_{r} \longrightarrow 3\nu, \nu_{e}X, \nu_{\mu}X$$

一旦发现上述过程,就表明工中微子的质量不为零,或

根据宇宙学的观察结果,宇宙学的标准模型理论也对中微子的质量值给出了限制. 联合宇宙学和粒子物理学两者的结果就把中微子的质量限制在图 2 的两个分立的区域内. 因此,如果粒子物理实验能把 vr 的质量上限向更小数值方向推进,就会使问题有很大的进展,鉴别各种模型理论. 所以,宇宙学对此也有极大兴趣.

在 τ CF 中如何改进 ν_r 质量上限值呢?在 10^{13} / 厘米'· 秒亮度下,已有 Monte Carlo 模拟计算给出如下结果: (1)通过 $\tau^- \longrightarrow K^+K^-\pi^-\nu_r$ 过程,观察 $K^+K^-\pi^-$ 等效强子质量分布的端点行为.如果 ν_r 的质量的确很小的话,可以得到 $m_{\nu r} < 7 \text{MeV}$ (运行一年)或 < 3 MeV (运行二年). (2)通过 $\tau^- \longrightarrow (5\pi)^-\nu_r$ 过程,观察 $(5\pi)^-$ 质量端点行为,可得到 $m_{\nu r} < 5 \text{MeV}$ (运行一年)或 < 3 MeV (运行一年)。



如果 ν_{τ} 质量在 100eV 与 1MeV 之间,就会有: $\nu_{\tau} \longrightarrow \nu_{e}X, \quad \nu_{\tau} \longrightarrow \nu_{\mu}X$ $\tau^{-} \longrightarrow e^{-}X, \quad \tau^{-} \longrightarrow \mu^{-}X.$

Monte Carlo 模拟计算也表明,在 $\tau^- \longrightarrow e^- X$, $\mu^- X$ 过程中的 e^- 、 μ^- 能谱上有一个近乎单能的峰. 这清楚地表明上述过程的存在. 在 τ CF 情况下,对撞产生的 τ 轻子速度很小,两体衰变就给出单能衰变产物。相比之下,B 工厂产生的 τ ,其能量很高,它的两体衰变产物就不是单能的了. 因此看不到上述过程.

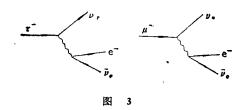
模拟计算还表明,在同样条件下,B工厂测定的 br质量上限是 τCF 测得的四倍. 可见,在此问题上,B工厂略逊一筹. 原因是,B工厂产生的 τ 轻子能量为 5 GeV,它的衰变产物能量也高,造成粒子分辨性差. 另外,各个 charm 道都打开了,造成本底大,实验误差也大.

实验组	$m_r(\text{MeV})$	过 程	积分亮度	事 例 数
BES	1776.9 +0.4 ±0.2	e+e ⁻ →τ+τ ⁻ →eνν̄ →μνν̄	5Pb-1	10个eμ 事例
ARGUS	1776.3±2.4±1.4	$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \nu$	341Pb ⁻¹	10959 个事例(2161 个本底
CLEO	1777.8±0.7±1.7	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow h\bar{\nu}$ $h^+\nu$	1430Pb ⁻¹	35255 个事例

在 rCF 做 r 轻子实验的优势, 已经在北京谱仪 (BES) 测量 r 轻子质量中显示出来(见表 2). BES 在这个测量中的积分亮度和事例数远远小于 其 他 两 个组. 但是所得到的系统误差却远小于这两 个 组 的 结果. 实验水平也高于后者. 所以,我们说,这个能区不仅是物理的"富矿区",而且有良好的"实验环境".

2.测量 τ-ν_τ-W 顶点的 (V-A) 型结构

按照标准模型, $\tau - \nu_\tau - W$ 顶点像 $\mu - \nu_\mu - W$ 顶点一样 (见图 3),应当是 (V - A)型的. 这需要通过实验检验,测量上述过程的。或 μ 能谱,这能谱的形状由 4 个参



数描写,称之为米切尔参数 $\rho, \varepsilon, \delta, \eta$ 。 如果这个顶点是 V-A 型的,则应有 $\rho=3/4, \varepsilon=1, \delta=3/4, \eta=0$. 如果实验结果与之有偏离,就有可能存在新型相互作用. 目前只有德国的 ARGUS 组给出了关于 ρ 值的较好的结果. 但是,实验结果的系统误差仍然 偏大.只能说这结果与 V-A 型作用自治,但不能作肯定的给论. ARGUS 组在 B工厂能区工作,正如前面所说的,衰变产物 ε, μ 的速度仍然很大,使得它们的能谱发生了畸变,造成系统误差大. 因此,降低系统误差就非常必要了. 在 τ CF 中完成这项测量有 其 优势. Monte Carlo 模拟表明,经一年运行后, ρ 和 $\varepsilon, \delta, \eta$ 的误差可分别达到 ± 0.003 和 ± 0.01 的水平. 这就可以做较为肯定的结论了(为了全面检验这个作用顶点的性质,还须做 $\nu_{\tau}e^{-} \longrightarrow \tau^{-}\nu_{e}$ 散射实验. 这是短期内难以实现的).

(二) J/ψ 物 理

由于胶子之间有直接相互作用,可以纯粹由两个或多个胶子束缚在一起组成新型的强作用束缚态——胶子球.格点规范理论和其它一些模型理论,预言这些胶子球的质量大约在 1~2.5GeV 之间. 此外,除去正反夸克可以组成介子态之外,夸克、反夸克与胶子在一

起还可以组成混合态,以及四夸克态等等. 这些都是能显示量子色动力学性质的束缚态, J/ψ 的衰变道就成了寻找这些新状态的理想场所.

为什么我们对寻找胶子球一直很有兴趣呢? 这是因为,从理论上讲,强作用和电弱统一理论都是非阿贝尔规范理论. 它有一个重要的基本性质还没有得到实验证实. 这就是应当存在规范粒子之间的自相互作用顶点(图4). 在强子一强子碰撞中应有这样的作用顶



点,但在实验上不好区分夸克和胶子引起的喷注现象,也就不好肯定这种作用顶点的存在。不过,如果能确定胶子球的存在,则能肯定胶子球的胶子相互作用中存在这种作用顶点,这无疑检验了量子色动力学的一个重要性质。顺便应当提到,计划在 1996 年运 行的 LEP 11 对撞机,将通过 e+e-—→W+W- 过程来检验 弱规范粒子之间的自相互作用是否存在。

目前寻找胶子球的实验现状如何呢? 已经在 J/ b 的衰变过程中发现了若干个胶子球、混合态和四夸克态的侯选者。但是过程的事例数太少,难以下结论。例如在 BES 上发现下列候选者:

$$J/\psi \longrightarrow \omega + \theta(1720)$$
 约 60 个事例
$$\downarrow_{K+K^-}$$
 $J/\psi \longrightarrow \omega + \theta(1720)$ 约 30 个事例
$$\downarrow_{\rightarrow \pi^+\pi^-}$$
 $J/\psi \longrightarrow r + \xi(2230)$ 30~40 个事例
$$\downarrow_{K+K^-}$$

$$J/\psi \longrightarrow r + \psi \psi \longrightarrow K\bar{K}$$
 18 个事例
$$\downarrow_{K\bar{K}}$$

$$J/\psi \longrightarrow r + \omega \psi$$
 2~3 个事例

要分析这些态的自旋-字称就很困难,因为那需要成百

上干个事例. 又例如,在 E_{cm}≌1.4GeV 附近,也有复杂的结构. 据目前分析,有三个态集中在这里. 利用现在收集到的约 200 个事例再作分析,也是很困难的.

综上所述,在 J/ψ 的衰变产物中,我们已经隐约看到了一些新现象。由于问题比较复杂,要想得到肯定的结论,实验上的首要要求就是要增加事例数,建造τCF 是走出困境的必要之路。与此同时,τCF 上 J/ψ物理实验还会大大推动胶子球等束缚态理论的发展。这就要研究强作用理论中的非微扰效应。目前,这方面的理论情况较差。发展并完善有关理论,是确认胶子球的发现的必要一步。

(三) 粲粒子物理

在 rCF 能量范围内, 粲粒子物理也有很丰富的内 客, 它包括粲介子和粲重子两大部分, 以粲介子 D+ 为例,这是由一个重夸克和一个轻反夸克组成的强子 束缚态,是研究相互作用性质的又一种结构形态. 但 是,目前关于粲粒子的实验状况仍然比较差. 例如,尚 有 28% 左右的 Dt 粒子衰变道没有被实验辨认确 定 下来,已有的测量结果是以 $D_{\bullet} \longrightarrow \phi\pi$ 的衰变为标准 给出的,缺少绝对测量,其中最为精确的测量结果是 D^o, D[±] 的寿命. 相对误差小于5%. 其余测量结果的 相对误差都大于5%,有的竟达20%。所以,目前的测 量结果只限于检验实验结果间的自治性,还没有达到 能检验理论模型的程度, 归根到底是因为测得的事例 数太少. 这里, D*D*对产生的截面只有约0.7nb(相 比之下, J/ψ 共振产生截面高达 2300nb)。 粲粒子经 弱作用衰变成许多道,每一衰变道的分支比都比较小. 因此,增加事例数也成为出好结果的必然要求. 在 rCF 上可望达到的主要目标如下:

- 1. 引起强子衰变的图形有许多种(用图形表示 相互作用和衰变机制)。 我们希望通过测量来分辨各种机制对不同衰变过程的贡献. 预 期 rCF 运 行 一 年,Cabibbo 允许过程的测量精度能达到 1%,二级 Cabibbo 压制过程的测量精度达 10% (目前尚未 发现).
- 2. 半轻子衰变过程. 重要的目标是精确测量夸克混合矩阵中的元素 V_{ed} , V_{ed} , 目前测得 V_{es} 值在 0.65-1.00 之间, V_{ed} 值在 0.187-0.221 之间,前者相对误差达 20%,预期 τ CF 运行一年,两者精度分别达 0.1% 和 0.3%.
- 3. 纯轻子衰变,例如 $D_{\tau}^{t} \longrightarrow l^{+}\nu_{l}$. 标准模型已经清楚地给出了这个过程的预言。 在 τ CF 上可以利用有关公式给出最可信的 D 粒子衰变常数 f_{D} , f_{D} 。值。 假设具有 μ - τ 普适性,则标准模型预言:

$$\frac{BR(D_s^+ \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu)}{BR(D_s^+ \longrightarrow \tau^+ \nu_\tau)} = 0.109$$

rCF 运行一年,分支比可测得精确到 2%,上述预言能得到检验.

和 rCF 上产生 r+r 对一样,这里也是在阈附近产生粲粒子对, 所以有同样好的实验测量环境.

在 B 粒子工厂也可以做部分桑粒子实验. 那里产生桑粒子有两个途径: (1) 通过 e^+e^- 对撞直接产生桑粒子对,总共截面约 1.3nb. 终态包括 $D^\pm D^\mp$, $D^{\pm *}$, $D^{\pm *}$, $D^0 \bar{D}^0$, $D^0 \bar{D}^0$, $D^0 * \bar{D}^0$,

$$e^+e^- \longrightarrow r(4s) \longrightarrow BB \longrightarrow \overline{D} + \cdots$$

 $\longrightarrow D + \cdots$

总共约 1.15 nb. 这样就要测量第二个衰变顶点。用这种途径不可测量粲粒子的纯轻子和半轻子衰变。另外,在某些固定靶实验中也可以做若干粲粒子实验,但那里往往使用专用探测器(在 e⁺e⁻ 对撞机上安装通用探测器),所以难以对问题作系统研究。

以上只是粗粗地讨论了 rCF 上的物理工作. 可以看到,这里有相当丰富的物理内容,其中有若干实验是十分重要的. 预期在 rCF 上,可以基本上完成对 c 夸克和 r 轻子物理的标准模型的检验.

国际上对 τ CF 问题已经酝酿了五年以上。例如,1989 年在 SLAC 召开了专门会议,讨论在 τ CF 上的 J/ψ 物理、築物理和 τ 轻子物理问题,发现 B工厂上可以做部分 τ 轻子物理和粲粒子物理实验,但是系统误差偏大,优势在 τ CF 方面。另外,不言而喻, J/ψ 物理只能在 τ CF 上进行。所以,B工厂不可能 代替 τ CF。

从物理上看,建造 rCF 是北京正负电子对撞机 BEPC 的自然延伸,它将使我国的基础理论研究特别 是粒子物理学在国际上继续占有一席之地.