



浅谈 τ -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 ϕ 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 10^{33} /厘米·秒。它们的质心系总能量分别选择在 ϕ 共振态、 τ - J/ψ 共振态家族或 $b\bar{b}$ 共振态家族能区 ($\sim 10\text{GeV}$)。分别称为 ϕ 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,深入地理解 c, b 夸克物理和 τ 轻子物理。到目前为止,与后者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标准模型。如果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{p} 以及 z^0, W^\pm 粒子等等。不久前,又发现了顶夸克存在的迹象。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^0 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宇称破坏现象;测量 e, μ 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 $\tau^+\tau^-$ 轻子事例。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 $e^+ + e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$ 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 $E_{cm} = 3-5 \text{ GeV}$ 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, $D^\pm D^\mp, D^0 \bar{D}^0, D_s^\pm D_s^\mp$ 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

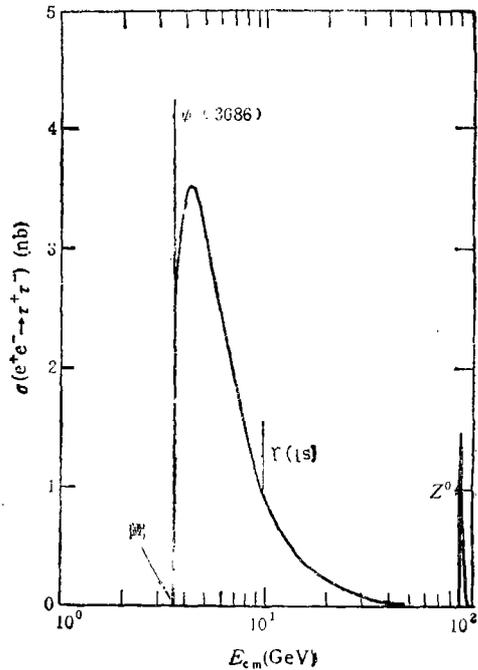


图 1

表 1

产生粒子	粒子数目	
J/ψ	3×10^{10}	
$\psi'(3686)$	8×10^9	
$D^+ D^-$	4.2×10^7	在 $\psi''(3770)$
$D^0 \bar{D}^0$	5.8×10^7	在 $\psi''(3770)$
$D_s^+ D_s^-$	1×10^7	在 4.03 GeV
$\tau^+ \tau^-$	0.7×10^7	在 3.57 GeV
	6.9×10^7	在 ψ'
	5.3×10^7	在 4.25 GeV

厂是比较理想的。按亮度为 10^{33} /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 τ CF 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) τ 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 τ 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 τ 中微子 $\nu_\tau, (\nu_\tau, \tau^-)$ 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 τ - ν_τ -W 顶点是否为 V-A 型,测定 ν_τ 质量的上限,在 τ 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 $\alpha_s(m_\tau)$, 寻找是否存在二类流过程,在 τ 的稀有衰变中寻找标准模型的禁戒过程,测量 τ 轻子的反常磁矩,电偶极矩,在 $Z\tau^+\tau^-$ 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 τ 中微子质量的上限值。

中微子质量问题一直是粒子物理和宇宙学关心的大问题。现有的粒子物理实验给出 ν_e, ν_μ 和 ν_τ 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 $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ 。两者之间存在一个混合矩阵 V 。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{e1} & V_{e2} & V_{e3} \\ V_{\mu 1} & V_{\mu 2} & V_{\mu 3} \\ V_{\tau 1} & V_{\tau 2} & V_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

这个混合矩阵 V 也会出现在轻子的弱作用流中。

$$i\gamma_\mu(1 - \gamma_5)V\nu.$$

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:

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

$$\begin{aligned} \tau^- &\longrightarrow l^- + \gamma (l^- = e^-, \mu^-) \\ &\longrightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-, \mu^- e^+ e^-, e^- \mu^+ \mu^-, e^- e^+ e^-, \\ &\longrightarrow l^- + h^0, h^- e^- \mu^+ \end{aligned}$$

$$\nu_\tau \longrightarrow 3\nu, \nu_e X, \nu_\mu X$$

一旦发现上述过程,就表明 τ 中微子的质量不为零,或

者有超出标准模型之外的产生机制。所以,有必要做 τ 轻子衰变的精密实验 (τ CF 可以经一年运行测得分支比为 10^{-5} 以上的过程)。

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 ν_τ 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_τ 质量上限值呢? 在 10^{33} /厘米²·秒亮度下,已有 Monte Carlo 模拟计算出如下结果: (1) 通过 $\tau^- \longrightarrow K^+ K^- \pi^- \nu_\tau$ 过程,观察 $K^+ K^- \pi^-$ 等效强子质量分布的端点行为。如果 ν_τ 的质量的确很小的话,可以得到 $m_{\nu_\tau} < 7\text{MeV}$ (运行一年)或 $< 3\text{MeV}$ (运行二年)。(2) 通过 $\tau^- \longrightarrow (5\pi)^- \nu_\tau$ 过程,观察 $(5\pi)^-$ 质量端点行为,可得到 $m_{\nu_\tau} < 5\text{MeV}$ (运行一年)或 $< 3\text{MeV}$ (运行二年)。

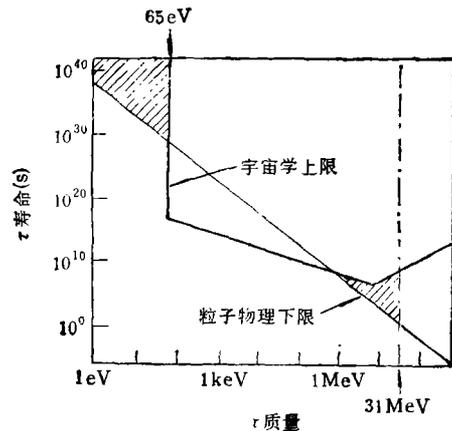


图 2

如果 ν_τ 质量在 100eV 与 1MeV 之间,就会有:

$$\begin{aligned} \nu_\tau &\longrightarrow \nu_e X, \quad \nu_\tau \longrightarrow \nu_\mu X \\ \tau^- &\longrightarrow e^- X, \quad \tau^- \longrightarrow \mu^- X. \end{aligned}$$

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 ν_τ 质量上限是 τ CF 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。

表 2

实验组	$m_\tau(\text{MeV})$	过 程	积分亮度	事 例 数
BES	$1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.2$	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ \downarrow $\mu\nu\bar{\nu}$	5Pb^{-1}	10个 $e\mu$ 事例
ARGUS	$1776.3 \pm 2.4 \pm 1.4$	$\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^-\pi^+\nu$	341Pb^{-1}	10959个事例(2161个本底)
CLEO	$1777.8 \pm 0.7 \pm 1.7$	$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow h^+\bar{\nu}$ \downarrow $h^+\nu$	1430Pb^{-1}	35255个事例

在 τCF 做 τ 轻子实验的优势, 已经在北京谱仪 (BES) 测量 τ 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 $\tau-\nu_\tau-W$ 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 e 或 μ 能谱, 这能谱的形状由 4 个参

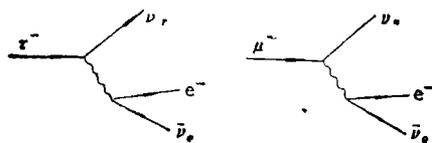


图 3

数描写, 称之为米切尔参数 ρ, ξ, δ, η . 如果这个顶点是 V-A 型的, 则应有 $\rho = 3/4, \xi = 1, \delta = 3/4, \eta = 0$. 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 型作用自洽, 但不能作肯定的结论. ARGUS 组在 B 工厂能区工作, 正如前面所说的, 衰变产物 e, 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 τCF 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 ξ, δ, η 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 $\nu_\tau e^- \rightarrow \tau^- \nu$ 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 $1 \sim 2.5\text{GeV}$ 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-强子碰撞中应有这样的作用顶



图 4

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 II 对撞机, 将通过 $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ 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/ψ 的衰变过程中发现了若干个胶子球、混合态和四夸克态的候选者. 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:

$$J/\psi \rightarrow \omega + \theta(1720) \quad \text{约 60 个事例}$$

$$\downarrow$$

$$K^+K^-$$

$$J/\psi \rightarrow \omega + \theta(1720) \quad \text{约 30 个事例}$$

$$\downarrow$$

$$\pi^+\pi^-$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma + \xi(2230) \quad 30 \sim 40 \text{ 个事例}$$

$$\downarrow$$

$$K^+K^-$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma + \phi\phi \rightarrow K\bar{K} \quad 18 \text{ 个事例}$$

$$\downarrow$$

$$K\bar{K}$$

$$J/\psi \rightarrow \gamma + \omega\phi \quad 2 \sim 3 \text{ 个事例}$$

$$\downarrow$$

$$\begin{matrix} \downarrow & \downarrow \\ K\bar{K} & 3\pi \end{matrix}$$

要分析这些态的自旋-宇称就很困难, 因为那需要成百

