

Tau-Charm 粒子工厂

马基茂

所谓“Tau-Charm (τ -C) 粒子工厂”，是在低背景条件下极大量地产生 τ 轻子和 C(粲)粒子的加速器以及相关实验装置的总称。具体说，它包括一个工作能区 3—5GeV、峰值亮度 $\sim 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的双环 e^+e^- 对撞机和相应的高性能实验谱仪。 τ -C 粒子工厂主要用来研究我们至今知之不多的三个费米子 τ, ν_τ 轻子与 C 夸克的物理学。

一、粒子物理学的发展和粒子工厂的作用

粒子物理学在过去二十年的发展是引人注目的。弱、电磁和强相互作用的“标准模型”可以适应每一个确凿的实验结果，获得很大成功。但标准模型也留下许多基本问题没有回答。它缺少终极理论的简单性，有过多的任意参数。即使实验上发现了至今尚未发现的 top 夸克和 Higgs 粒子，它也不能解释为什么存在三个费米子家族及其质量值这样的基本问题。一般认为，在标准模型之上必然存在可以解释它的“任意”性质的更基本的物理。这就引出标准模型的扩展——各种形式的大统一理论，超对称理论，超弦理论，复合模型理论，人工色理论等。

历史上，粒子物理的重大进展是沿着两条互补的路线：1. 在“高能前沿”上发现新粒子和新相互作用。两类中微子 ν_e 与 ν_μ ， J/ψ 共振和 W^\pm 与 Z^0 中间玻色子的发现是最突出的范例。这类实验要求能量越来越高的加速器。近年来，这一前沿的代表性计划为 SSC 和 LHC PP 对撞机，但由于建造经费过高，其实施因 SSC 下马而受挫。2. 在“高精度前沿”上进行已知粒子及其相互作用的精细研究。这方面，具有基本意义的工作包括： K^0 衰变 CP 破坏参数，电子与 μ 子的反常磁矩，稀有 K^0 衰变和 Z^0 质量与耦合的测量。这类实验要求极高的统计性，因此要求极高的束流强度/亮度。粒子工厂就是适应这一要求的特定加速器，它们在选定能区上以高于一般机器 1—2 个甚至更多数量级的流强/亮度运行，对特定粒子的研究最佳化。由于其重大物理意义和造价相对适中，目前国际上提出的粒子工厂计划相当多，例如加拿大 TRIUMF 的 K 介子工厂 KAON，意大利 Frascati 的 ϕ 介子工厂 DAΦNE，美国 SLAC 和日本 KEK 的 B 介子工厂。西欧中心 (CERN) 也讨论了把 LEP 亮度提高 10 倍做成 Z^0 工厂的可能性。除 KAON 为进行固定靶实验的 P 加速器外，其它粒子工厂都是 e^+e^- 对撞机 (图 1)。此外，建造 τ -C 粒子工厂也一直是人们极为

关注的。

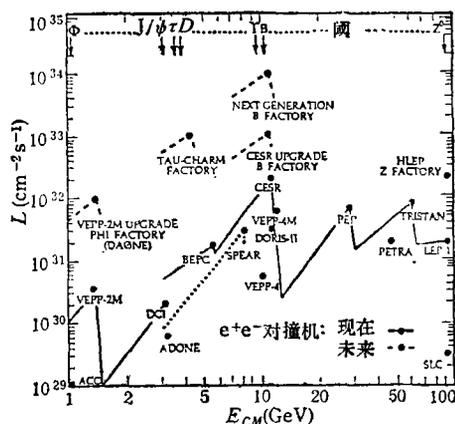


图 1 在质心能量范围 $1 \leq E_{CM} \leq 100\text{GeV}$ 内现有和未来 e^+e^- 对撞机的亮度 L 。

二、 τ -C 粒子工厂的提出及其实验特点

1987年，CERN 的 J. Kirkby 首先提出建造 τ -C 工厂的想法。这一想法在美国、法国、原苏联和西班牙得到了响应。在美国由于 τ -C 工厂计划与 SLAC 的发展规划不匹配，SLAC 和其它 8 所美国大学转而支持欧洲的计划。法国 LAL-Orsay 进行了 τ -C 工厂的全面研究，确认了达到 $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 亮度的可能性。苏联 Novosibirsk 平行的研究得到了关于亮度的同样结论，并提出一种新奇的对撞机单色器光学，可把对撞区束流的能散度大大减小。1990 年春，西班牙政府正式要求 CERN 帮助建造 τ -C 工厂。CERN 同法国与西班牙合作完成这一计划的总体研究。1991 年 5 月，CERN 认可 τ -C 工厂的科学目标，并委派 J. A. Rubio 建立专业组研究计划的细节。专业组由来自欧美约 100 位专家参加，在 CERN 和西班牙 Sevilla 两个基地同时工作，于 1992 年 2 月完成 τ -C 工厂设计，包括物理目标、加速器、探测器、计算机系统、土建工程等各个方面。1993 年 6 月，在西班牙 Marbella 召开的第三次 τ -C 工厂工作会议高度评价了这一设计方案，并深入讨论了同其它高能粒子工厂和固定靶实验在物理工作方面的竞争性与互补性。令人遗憾的是，尽管 CERN 充分肯定 τ -C 工厂的巨大物理价值和技术可行性，终因集中力量建造 LHC PP 对撞机而无暇顾及 τ -C 工厂计划。随后，国际上的目光自然地转向正在此能区工作并初获成就的中国 BEPC。

表1 τ -C 工厂同高能粒子工厂在年数据样本上的比较

粒子	Z工厂	B工厂	Tau-Charm 工厂
$D^0(\text{single})$	1.2×10^7	1.5×10^7	$5.8 \times 10^7(\psi'')$
$D^+(\text{single})$	0.5×10^7	0.7×10^7	$4.2 \times 10^7(\psi'')$
$D^+(\text{single})$	0.3×10^7	0.3×10^7	$1.8 \times 10^7(4.14\text{GeV})$
$\tau^+\tau^-(\text{pairs})$	0.3×10^7	0.9×10^7	$0.5 \times 10^7(3.57\text{GeV})$ $2.4 \times 10^7(3.67\text{GeV})$ $3.5 \times 10^7(4.25\text{GeV})$
J/ψ	—	—	1.7×10^{10}
ψ'	—	—	0.4×10^{10}

注: τ -C 和 B 工厂的样本相应于积分亮度 $10\text{fb}^{-1}(L = 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$, Z 工厂相应于 $2\text{fb}^{-1}(L = 2 \times 10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$.

τ -C 工厂如此受到物理学家们的青睐, 它的实验具有什么特点呢? 1. 能区 3-5GeV, 复盖了 τ 轻子、D 介子和 J/ψ 与其它 C 素的阈, 直接面对很宽范围的标准模型基本问题, 并能探索模型可能扩展的前沿。2. 亮度高达 $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 能大大提高实验的统计性和精度。表 1 给出 τ -C 工厂运行一年得到的数据样本。3. 在统计性陡然增高的情况下, 背景和系统误差将决定实验的精度。 τ -C 工厂能够有效地控制背景和系统误差, 其它高能装置无法比拟。图 2 表明 τ -C 阈区强子总截面比 R 值的分布, 显示了一系列的共振和 $\tau\bar{\tau}$ 与 $D\bar{D}$ 产生的阈。首先, 选择能量在阈值以下的工作点测出背景, 可极大地减小阈上目标实验的背景, 从而减小其不定性造成的系统误差。其次, τ -C 阈区实验可使用“单标记”分辨 $D\bar{D}$ 或 $\tau\bar{\tau}$ 事例, 即仅识别一个粒子的衰变而对另一粒子的衰变方式不提出任何要求。单标记事例中的系统效应是极小的, 特别适于绝对分支比的测量。此外, 在 τ -C 阈区实验中, 来自探测器性能不定性的系统误差可仔细监测。 J/ψ 和 ψ' 共振能提供高计数率信号, 经常地高统计地刻度探测器的响应与分辨率。通过周期性地记录 $\psi''(3.77)$ 处的数据和重建无背景的 $D^\pm \rightarrow S$ 叉事例, 可以达到低于 0.1% 的绝对动量标度误差, 来匹配探测器千分之几的动量分辨, 为当今对撞机探测器的极限。 τ -C 阈区实验还有对光子探测和粒子识别方面的优点。

一个 τ -C 工厂实验将具有如下引人注目的特性:

	现有实验	τ -C 实验
统计性	10^5-10^6	$\sim 10^8$
背景	1-10%	<0.1%
系统误差	1-10%	$\sim 0.1\%$

三、 τ -C 粒子工厂的物理目标

τ -C 工厂的物理兴趣在于三个很宽的领域: τ 与 ν_τ 轻子; C 粒子 ($D^0, D^\pm, D_s^\pm, A_c^\pm, \Sigma_c, \Xi_c, \Omega_c$ 等); C 素 ($J/\psi, \psi', \chi_c, \eta_c$ 等) 和轻夸克与胶子谱学。这里仅举出几个较突出的课题。

1. τ 中微子 ν_τ 质量的探测

ν_τ 质量的直接测量——通过测量 $\tau \rightarrow 5\nu_\tau$ 过程中的 5π 和 $\tau^\pm \rightarrow K^-K^+\pi^\pm\nu_\tau$ 过程中的 $K^-K^+\pi^\pm$ 质量谱的端点, 可以直接测量大到几个 MeV/c^2 的 ν_τ 质量。 τ -C 工厂在 3.67GeV 处运行两年的数据样本给出 ν_τ 质量上限灵敏度约 $3\text{MeV}/c^2$, 而目前的上限为 $31\text{MeV}/c^2$ 。

ν_τ 质量的间接测量——从几百 eV/c^2 到几个 MeV/c^2 更低的 ν_τ 质量可以通过间接方法测量。为了同观测到的宇宙密度相符, 任何重于几百 eV/c^2 的 ν_τ 必须衰变, $\nu_\tau \rightarrow \nu_l X$ ($l = e, \mu$), 其中 X 为一种无质量、参与弱作用、自旋为零的 Goldstone 粒子。同样, τ 也会衰变, $\tau^- \rightarrow l^- X$, 同 ν_τ 质量相关的分支比计算值在 $10^{-6}-10^{-2}$ 之间。探测器的分支比灵敏度约为 10^{-3} 。

2. 探索粒子“代”的内涵——为什么自然界出现三个基本粒子家族?

这个课题包括对标准模型的许多精密检验, 例如:

精确的 τ 衰变分支比——目标是以更高精度测量 τ 衰变的所有分支比, 通过 10 或更大的因子减小现有误差, 对单叉衰变可达千分之几。 τ 分支比的精确测量也可提供强耦合常数 α_s 的最准确的测量。

$\tau-\nu_\tau$ -W 顶点的流结构——目标是测量 τ 衰变中达到可同现有 μ 衰变实验相比的精度的弱流性质, 后者提供了至今弱衰变流纯 V-A 性质的最精确的测量。

纯轻子 D 衰变的精确测量—— D^\pm 与 D_s^\pm 的纯轻子衰变可用标准模型严格计算, 它们在确定弱衰变常数 f_D 与 f_{D_s} 中很重要。最大分支比的实验精度接近 2%。此外, D^\pm 与 D_s^\pm 纯轻子衰变率之比将提供 CKM 矩阵元 V_{cd} 与 V_{cs} 之比的精确测定。

D 半轻子分支比的研究和 CKM 矩阵元 V_{cd} 与 V_{cs} 的测量——许多半轻子分支比可测到好于 1% 的

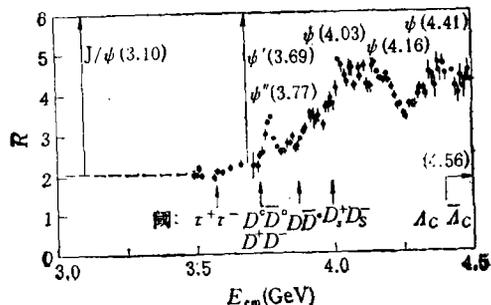


图 2 在 τ -C 阈区的强子截面比 R

精度, 而现有误差很大(10—50%)。使用精确数据可消除理论(强形状因子)中的不定性, 得到 V_{cd} 与 V_{cs} 的精确值。

3. 在 K^0 系统之外寻找 CP 破坏

在 D 衰变中的 CP 破坏—— $D^0\bar{D}^0$ 混合及其产生的 CP 破坏在标准模型中被高度压低, 而模型的许多扩展引出加强的比率。予期 $D^0\bar{D}^0$ 振荡的比率约为 10^{-3} , 可在 τ -C 工厂上用一年的数据测到。在 CP 破坏情况下, 一些 D^{\pm} 与 D_s^{\pm} Cabibbo 压低道的计算预示着存在显著的直接 CP 破坏不对称性的可能性。其衰变率不对称性约为 $(1-3) \times 10^{-3}$, 一年的实验数据可接近所需的探测灵敏度。

在超子衰变中的 CP 破坏——有可能通过某些过程产生的超子与反超子的衰变参数之差来直接测量 CP 破坏。由于预期的差值很小, 实验将要求极高的统计性 ($> 10^{11} J/\psi$), 采用对撞机单色器光学能够达到。

4. 胶子物质及其谱的高统计研究

这个课题包括在 C 素衰变的富胶子环境中 ($J/\psi \rightarrow \gamma gg, gg; \eta_c \rightarrow gg; \chi_c \rightarrow gg$ 等) 系统地测量轻夸克和胶子(胶球, 混合态等)的强子谱, 以及 $D\bar{D}$ 阈以上混合 C 素 ($c\bar{c}g$) 的研究。

5. 超越标准模型的物理学

新物理有可能在上述任一个实验中发现。另一渠道是寻找稀有 τ, D 和 J/ψ 衰变, 测量分支比的灵敏度约在 $10^{-7} - 10^{-4}$ 之间。

四、 τ -C 粒子工厂的加速器

一个典型的 τ -C 工厂设计示意图见图 3, 它包括三个主要部分: e^{\pm} 注入系统, 双环 e^+e^- 对撞机和高性能实验谱仪。图中只有一个对撞点, 但保留第二对撞点的可能性。加速器的实际设计可采用各种方案, 特别是要尽可能利用已有设备和条件以节约建造费用。在本例中, 注入器包括一个产生 e^{\pm} 的 200MeV 强流直线加速器, 跟随以 400MeV 直线加速器, 最后是 2.5 GeV 快循环增强器同步加速器。它将在 10 分钟内以全能量 e^{\pm} 注满对撞机双环。新注入的束流到达对撞区前必须走过 3/4 环长, 以极小化注入对探测器产生的本底。双环对撞机周长 360m, 工作能区 3—5GeV,

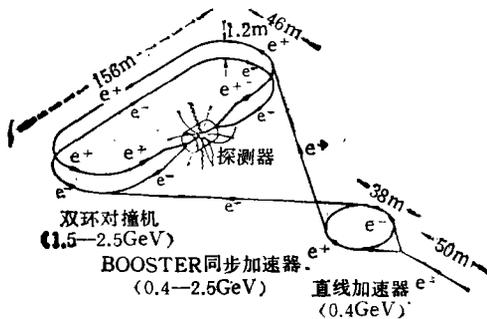


图3 τ -C 工厂的布局示意

在 4GeV 处峰值亮度为 $10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。亮度的提高由高存贮电流和在对撞点处紧密的束流聚焦达到。高电流通过 30 个 e^+e^- 束团形成, 它们均匀地分布在整个环上。对撞点处的紧密聚焦借助超导 micro- β 四极磁铁(可能同永久磁铁联用)来达到。为得到紧密聚焦对亮度的好处, 束团长度 σ_z 必须小, $\sigma_z \leq \beta_z^* = 1 \text{cm}$, β_z^* 为垂直 β 函数。对撞机的主要参数列在表 2。对撞机的进一步发展包括采用单色器光学减小对撞点束流散度从 1MeV 到 0.1MeV, 采用连续同步注入机制补偿束流寿命损失, 采用对撞点的非零交叉角增加束团数以及采用纵向束流极化以增加物理工作潜力等。

表 2 τ -C 工厂对撞机的主要参数

参 数	τ -C 工厂	BEPC
能量 (E), GeV	2	2.8
周长 (C), m	360	240
包络函数 (β_z^*), m	0.01	0.10
RF 频率 (f_{RF}), MHz	400	200
束团数 (Kb)	30	1
束团间隔 (Sb), m	12	240
总电流/束 (I), mA	570	50
RMS 束团长度 (σ_z), mm	6.3	~60
束流-束流参数 (ξ_y)	0.04	0.04
亮度 (L), $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	1.0×10^{31}	1.7×10^{31}

本研究与完善屏蔽对高质量实验的成功具有根本意义。对撞机产生的本底主要是同步辐射和来自真空室内剩余气体的束流散射粒子与韧致辐射。关于对撞机实验本底的计算与屏蔽, 已经积累了相当丰富的经验, 机器正常运行时的辐射剂量对探测器的辐射损伤将在安全限以内。

五、 τ -C 粒子工厂的探测器

τ -C 粒子工厂的物理目标要求建造一个在此能区前所未有的高性能通用谱仪。这些特性应包括: 对带电粒子的高动量分辨率, 对 τ 的高能量分辨率, 极强的 $e/\mu/\pi/K/P$ 识别能力和完整的密闭性, 即以最大接收度测量除中微子以外的所有带电的与中性的粒子, 从而测量丢失能量以推断中微子的存在。一个设计例子如下:

1. 径迹探测器

采用一种大立体角覆盖的 ($90\% \times 4\pi \text{Str}$) 圆柱漂移室, 测量带电粒子的径迹, 动量和能量损失 dE/dX 。内半径 4cm, 外半径 75cm, 具有锥形端板以适应 micro- β 低温容器并只接收来自对撞点的径迹, 从而极小化本底粒子的占有, 改进径迹触发的选择性。工

作磁场强度 $1.2T$,由厚 0.75 辐射长度的超导螺线管提供。由于大部分带电粒子的动量在 $1GeV$ 以下,需利用各种方法把粒子通过的物质质量减到极小。束流管与漂移室内壁合二而一,采用 $1mm$ 的 Be 。漂移室的电场成形丝采用 Al 丝,其工作气体以 He 为基本成分。在这些条件下,漂移室的动量分辨率将达到 $\sigma_p/P(GeV/c) = 0.3\%P \oplus 0.3\%/\beta$,有效测量的粒子最小动量为 $P_{min}^* = 50MeV$ 。

2. 粒子识别

采用飞行时间计数器 (TOF),契伦科夫计数器 (Ce) 和漂移室 dE/dX 测量联合进行,在 $1GeV$ 以下区域达到高质量的粒子识别。TOF 设计基于闪烁塑料光纤技术,瞄准时间分辨率 $\sigma_t = 120ps$ 。C₀ 可采用快环形成像装置 (RICH),固体 NaF 或液体 Freon (C_6F_{14}) 辐射体。中微子的识别通过探测器对所有其它粒子的探测而推知。这种密闭性由径迹探测器、电磁量能器、特别是最外的强子量能器/ μ 探测器完成。有效标记中微子的最小能量为 $E_{min}^* = 100MeV$ 。

3. 电磁量能器

采用晶体型,对 τ 具有低有效探测能量和高能量分辨率。它由约 $10K$ 块 $CsI(Tl)$ 或 $CsI(Na)$ 晶体组成,所有晶体的轴都指向对撞点,每块晶体沿纵向分成前段和后段,分别由 Si 二极管读出。纵向分段可以改进假 τ 的排除并提供 π/e 分离的深度信息。电磁量能器的能量分辨率可达到 $\sigma_{E/B}(GeV) = 2\%/E^{1/2} \oplus 1\%$,对 τ 有效测量的最小能量为 $E_{min}^* = 10MeV$ 。

4. 强子量能器/ μ 探测器

采用细颗粒 Fe -漂移室叠层结构,厚约 6 吸收长度,用来标记中性强子 K_L^0/n 的存在,识别 μ 子和提供磁通量回程。它也最后完成探测器的密闭性。总重

达 1500 吨。TOF 配合识别强子量能器最小识别射程 ($250MeV/c$) 以下的 μ 子。强子量能器和内探测器探测 K_L^0/n 的失效率 $< 5\%$ 。

5. 小角度探测器

这是由 16 辐射长度的 BGO 电磁量能器及其前面的 Si 径迹探测器组成,位于 $micro-\beta$ 低温容器的内表面,提供对撞机亮度监测到 0.1% 。

6. 数据获取 (DAQ) 系统

τ -C 工厂实验的 $1kHz$ 事例率产生约 $20M$ byte/s 的数据率,每 8 分钟将填满一个 $10G$ byte 的合带。从短的束团间隔 ($40ns$) 看,要求无死时间的 $1/2$ 级触发,即事例数据在等待判选时必须存贮在输送线上。为避免存贮介质和离线分析工作的饱和,要求很强的在线处理机,在分析、选择和压缩数据后再把感兴趣的事例写入磁带或磁盘。因此, τ -C 工厂实验的触发和 DAQ 系统也将遵照强子对撞机的方法:输送线式的前端电子学,多级触发和事例的在线处理。这将要求几个 10^4 MIPS 的在线处理能力和几个 10^4 byte/年的数据存贮能力,并且大量数据(几十 Tbyte/年)要放在磁盘上以满足随机快进出的需要。此外,中心数据库和合作组计算机之间也需要建立传送速率约 $2Mbyte/s$ 的高速网络连接,以满足远程处理数据的要求。

综上所述,粒子物理实验“高精度前沿”上的重要进展,要求建造特定的加速器及相关实验装置——粒子工厂,它对特定粒子的研究最佳化。 τ -C 粒子工厂是研究 τ 与 ν_τ 轻子和 C 夸克物理的最理想工具。国际实验室独立研究证明,建成 τ -C 工厂在技术上是可行的。

(上接第 16 页)

在唱片中近 60 种语言的问候语包括了世界上几乎所有的语种,如英法、德、俄、中、日,甚至还包括了中国的广东话、厦门话和客家话等。中国的汉语官话(普通话)说的是:“各位都好吧,我们都很想念你们,有空请到这里来玩!”阿拉伯语说:“向群星上的朋友们致敬,我们希望有朝一日见到你们!”一位儿童用英语说:“地球这颗行星上的儿童们问你们好!”古吉拉特语说:“地球上的人类向你们致敬,请联系。”……

由上述可见,地球人是怎么想与“外星人”联系啊!但愿这不是一种“自作多情”吧!用心良苦的科学家、艺术家们用心血制作的礼物“外星人”何时才能收到呢?他们会找到地球人吗?

据前苏联著名天文学家什克洛夫斯基认为,“当‘先驱者’号飞船(或‘旅行者号’飞船)以 $10\sim 20$ 千米/秒的速度向最近的恒星运动时,须经历几十万年以后才能到达那里。在几百万年和几千万年的时间里,脉冲星的脉冲周期会发生强烈变化,而且在这段时间里它们相对于太阳的位置也是变化的,届时‘外星人’不得不解决一个难题:在银河系什么地方和什么时候出现过如图 1 那种‘人类’以辐射状图所示意的情形的?他们(指外星人)也许是非常聪明的,……”当外星智慧生物研究这块金属板或地球之音唱片时,地球上的文明也许早已不存在了。但是,这也无需悲观,外星人也许像我们那样有一门学科——“太空考古学”。那时的人类或许早已在别的星球上重建家园了。(待续)