

中国超级陶粲装置

彭海平^{1,2} 郑阳恒³ 周小蓉^{1,2,†}

(1 中国科学技术大学物理学院 合肥 230026)

(2 核探测与核电子学国家重点实验室 中国科学技术大学 合肥 230026)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

2020-07-20收到

† email: zxrong@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200803

Super Tau-Charm Facility of China

PENG Hai-Ping^{1,2} ZHENG Yang-Heng³ ZHOU Xiao-Rong^{1,2,†}

(1 School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 在粒子物理研究领域,陶粲能区具有独特的性质、丰富的前沿物理课题和重大的科学发现潜力,是该领域重点关注的能区之一。为了使我国在该研究领域继续引领世界,依托中国科学技术大学的国家同步辐射实验室,核探测与核电子学国家重点实验室等研究平台,科学家提出建设一台新一代的正负电子对撞机——超级陶粲装置。新一代的超级陶粲装置的设计亮度大于 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,对撞的质心能量覆盖2—7 GeV,相关性能比当前正在运行的北京正负电子对撞机BEPCLII有大幅度的提升。该装置将为探索宇宙中正反物质的不对称性(CP破缺)、深入研究强子内部结构及非微扰强相互作用本质、寻找奇异物质和超越标准模型的新物理现象等前沿重大课题提供关键平台。陶粲装置的预研和建设对我国现有已掌握的高能加速器和探测器相关关键技术提出了重大挑战,对我国的基础科学研究、高新技术的发展以及相关综合性人才的培养等方面具有重要的科学意义和战略地位。

关键词 正负电子对撞机,陶粲能区,量子色动力学,CP破坏,核子结构

Abstract The tau-charm region is one of the most important energy regions in the research of particle physics due to its unique properties, rich frontier topics and great potential for scientific discovery. In order to maintain our country's pioneering position in the tau-charm research field, we propose to build a new generation electron-positron collider—the Super Tau-Charm Facility (STCF), based on the Hefei National Synchrotron Radiation Laboratory, the State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, and other research platforms. The STCF would have a luminosity greater than $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, and a center-of-mass energy region of 2 to 7 GeV. Its performance is expected to be significantly better than the currently running BEPCII, and will provide a key platform for exploring the asymmetry of matter-antimatter (charge parity violation), in-depth studies of the internal structure of hadrons and the nature of non-perturbative strong interactions, as well as the quest for exotic particles and physics beyond the standard model. The construction of STCF poses a great challenge to the existing accelerator and detector technologies in China, but is very important scientifically and strategically not only for fundamental scientific research but also for the development of new technology and the cultivation of comprehensive expertise.

Keywords electron-positron collider, tau-charm region, quantum chromodynamics, CP violation, nucleon structure

1 引言

粒子物理研究比原子核更深层次物质构成及相互作用,与宇宙起源及演化密切相关,引领着人类基本时空观的发展,是人类认识世界最前沿的科学。粒子物理实验研究产生一系列新的技术原理,为能源、材料、信息等诸多科学领域提供知识基础;同时也衍生许多新的交叉学科,催生专用的大科学装置(如对撞机加速器装置)的建设,并发展为多学科交叉前沿研究的大型综合性平台,是科技发展的巨大推动力,具有重大的战略意义。

随着科技的发展和研究的进行,人类在微观领域的研究尺度深入到了 10^{-18} m(电子大小,比原子核的尺寸小4个量级),并且成功地构建了描述微观世界的基本理论模型——标准模型。在过去的几十年时间里,标准模型理论得到大量的实验验证,特别是2012年Higgs粒子的发现,使得其所预言的所有基本粒子和相互作用都被证实,也标志着人类对物质微观世界的认识达到了空前的高度。尽管如此,自然界仍有一系列最基本的科学问题,如暗物质是什么、CP破坏的起源等,得不到合理的理论解释。物理学家们普遍认为在自然界中应该存在一个更基本的物理模型,而标准模型只是该基本模型在现有实验所能达到能标的有效近似,亟待更多的实验来进一步揭开微观世界之谜。另外,作为标准模型的两个组成部分之一,量子色动力学(QCD)在高能区得到了大量实验的精确检验,但其在低能区的本质,在理论和实验方面都存在巨大的挑战,需要进一步的发展和完善。

历史证明,基于加速器的粒子物理实验是研究微观物质世界最有效的手段之一。当今基于加速器的粒子物理实验研究可分为高能前沿(High Energy Frontier)和高亮度前沿(High Intensity Frontier),两个不同的前沿相辅相成,互相补充,不可替代。作为高亮度前沿基于加速器的粒子物理实验装置的重要代表之一,正负电子对撞机——陶粲工厂运行在陶粲能区(质心能量为2—5 GeV),

在粒子物理研究的历史上具有光辉的历史,发挥着独特的作用。陶粲能区位于QCD的微扰与非微扰的过渡区域,是探索QCD色禁闭本质、发展QCD理论的关键区域;该能区具有丰富的共振结构,为研究奇特强子态、多夸克态、胶子球及混杂态等新型强子态提供重要研究平台;更重要的是在该能区可以在不同的阈值附近产生大量低本底的陶轻子和粲强子等,为相关的物理研究提供了独特的场所。鉴于陶粲能区一系列独特性能,在过去40年来一直是粒子物理研究领域关注的重点之一。由我国主持建设的北京正负电子对撞机/北京谱仪BES实验曾在历史上做出了包括陶轻子质量测量、 R 值测量、发现 $X(1835)$ 等令世人瞩目的物理成果,为中国的高能物理研究奠定了基础。目前正在运行的BEPCH/BESIII实验是2005年开始在原有的基础上作的重大升级改造,并于2009年开展运行。在过去的12年里,BEPCH/BESIII顺利运行,在该能区采集了大量的数据,发表了包括发现 $Z_c(3900)$ 等XYZ粒子,首次观测到 J/ψ 衰变中 Λ_c 极化现象以及抽取了超子衰变的不对称性,测量核子内夸克横向极化分布Collins碎裂函数,国际上最精确的中性粲介子强衰变角的测量等重大物理成果。北京谱仪的成功运行,使得中国在粒子物理研究领域从占有一席之地进入到国际领先行列,引领着国际的陶粲物理和强子物理的研究,同时也为我国其他相关的大科学工程奠定了基础,对推动中国相关高新技术的发展、高科技综合性优秀人才的培养、队伍的建设等发挥了巨大的作用。

BESIII实验的成功除了按照计划成功地开展了如(类)粲夸克偶素谱学和衰变的研究、粲介子和粲中子衰变的精确测量、轻介子谱学和胶子球的研究、R&QCD、新物理的探索研究等工作,同时还开展了如在 J/ψ 衰变中超子极化和衰变不对称的研究、Collins碎裂函数测量等新研究方向。尽管如此,随着研究的深入,由于受到BEPCH质心能量(2—4.6 GeV)和对撞亮度($1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)的约束,在该领域中仍有一些重大的物理课题无法得到解决,如粲介子(半)轻子衰变和中性粲介子强

衰变角的精确测量需要更大统计量的 $\psi(3770)$ 样本、粲重子内部结构研究和显粲和奇异夸克的介子寻找需要大量的更大质心能量 (>4.6 GeV) 的样本、XYZ 粒子研究需要更大统计量的 $D\bar{D}$ 阈值以上的实验数据、超子衰变和 CP 破坏的研究需要更高统计量的 J/ψ 数据、 τ 轻子的 CP 破坏研究和相关新物理寻找需要更大统计量的 τ 样本等。此外, 至今为止, 在 5—7 GeV 能区正负电子直接对撞实验仍处于历史空白, 而在该能区预期有如强子的碎裂函数、双粲偶素产生机制、多夸克态等重大物理课题有待研究, 期待有正负电子对撞实验在该能区直接大量产生数据。由于受到地理位置以及部分基础设施条件的约束, BEPCII/BESIII 没有进一步大幅度提升性能的空间与潜力。另外, 随着探测器的老化以及国际上其他粒子物理实验 (如 BELLE-II, LHCb 实验等) 的竞争, BEPCII/BESIII 将于 5—10 年完成其历史使命。鉴于以上的物理需求和实验现状, 我们提出了在中国建设新一代的超高亮度对撞机——超级陶粲装置 (Super Tau-Charm Facility, STCF)。

计划建设的 STCF 的设计峰值亮度大于 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 比 BEPCII 提升了两个量级, 对撞质心能量覆盖能区 2—7 GeV, 比 BEPCII 扩大了一倍, 同时在设计时保留了未来进一步提升亮度和实现束流极化的空间。STCF 的建设与运行将为未来陶粲物理和强子物理的研究提供关键场所, 为研究宇宙中正反物质不对称 (CP 破坏)、探索核子内部结构、寻找奇异物质和新物理等前沿物理课题提供独特平台, 将继续延伸我国在该领域的引领国际研究的地位。随着我国国力和国民经济实力的发展, 以及过去 30 年来 BEPCII/BESIII 的运行经验, 人才培养及技术储备, 我国在陶粲领域的研究拥有非常成熟的队伍以及相关的实验技术, 被国际上认为是建设超级陶粲装置的最佳场所。STCF 建成后将成为国际上五大基于加速器的粒子物理研究中心之一, 将大幅度的提升我国的基础科学研究能力, 同时也推动高新技术的发展和优秀综合性人才的培养, 具有重大的科学意义和战略地位。鉴于以上的重要性, 从 2013 年, 受中国物理学会高能物理分会委托, 由中国科学技

术大学牵头组织和协调国内外的感兴趣的大学和研究所, 开展超级陶粲装置的预研究工作。先后召开了多次的国内、国际研讨会, 包括 2015 年在北京召开第 533 次香山科学会议, 探讨该项目的重要性、可行性以及相关的关键技术和研究战略^[1]。2018 年, 由中国科学技术大学牵头组织国内外感兴趣的单位, 启动了项目的预研工作。当前, 该项目的研究架构和研究团队已经成立, 正在开展项目的概念性设计, 取得了一定的进展, 形成了初步的概念性设计报告, 项目初步设计的布局如图 1 所示。

2 陶粲能区实验装置

如上所述, 鉴于陶粲能区在粒子物理研究领域的重要性, 历史上有多个不同类型的实验都在该能区开展相关的物理研究, 按照实验束流种类, 可以分为正负电子对撞机、强子对撞机或强子打靶实验。与陶粲能区物理研究相关的正负电子对撞机实验首当其冲的是陶粲装置。陶粲装置实验是根据物理目标, 通过调整正负电子束流能量直接在该能区运行, 收集正负电子对撞后的产物, 开展相关的研究。陶粲装置实验的重要特点是数据样本干净、本底低、探测效率和分辨率高、事例初始状态 (量子数和四动量) 已知等; 另外还有重要的性质是阈值处成对产生和量子关联效应, 为物理研究带来了独特的性能。历史上曾



图1 超级陶粲装置布局图

有多个陶粲实验如美国 SPEAR 上的三代 MARK 实验：位于法国 ORSAY 的 DCI 对撞机上的 DM2 实验，北京正负电子对撞机 BEPC 上的北京谱仪 BES 实验，位于美国康奈尔大学的 CLEO-C 实验等，都为该能区相关的研究做出了突出贡献。目前正在运行的有北京正负电子对撞机 BEPCII 上的北京谱仪 BESIII 实验。与陶粲能区物理研究相关的另一个典型正负电子对撞机实验是 B 工厂。B 工厂运行在 Υ 能区，即质心能量处于 9.4—11.0 GeV，能够产生大量的 B 介子对。同时也大量产生陶轻子对和粲强子对，虽然在该能区的相应的产生截面在陶粲能区相对较低；另外由于对撞的正负电子有可能辐射一个光子(即所谓的初态辐射 ISR 过程)，而使得正负电子有效的质心能量落在陶粲能区，其后续的效应与陶粲装置是完全一致的。由于 B 工厂的对撞亮度极高(通常会比同一时期运行的陶粲工厂高一个量级以上)，通过正负电子直接对撞或初态辐射，也能大量产生陶轻子或粲强子(一些过程的总产额甚至比同时期运行的陶粲装置高得多)，所以通常 B 工厂也是陶粲工厂。另外 B 工厂产生大量的 B 介子，其衰变也为陶粲物理的研究提供了重要场所，与陶粲装置的研究互补。历史上的 B 工厂有美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的 BaBar 实验和位于日本高能加速器研究机构(KEK)的 Belle 实验，当前有正开始运行的 Super-KEKB 上的 BelleII 实验。与陶粲能区物理研究相关的强子对撞机或强子打靶实验装置的重要特点是其产生截面极高，并且能够直接产生在正负电子对撞机中不能直接产生的量子态。典型的实验有正在运行的大型强子对撞机 LHC 上的 LHCb 实验和正在建设的位于德国达姆斯塔特的亥姆霍兹重离子研究中心(GSI)的 Panda 实验。

当前国际上正在运行的陶粲物理相关研究的主流实验装置 BESIII 实验、LHCb 实验和 BelleII 实验，在相关物理研究方面竞争与互补共存。例如：强子对撞具有极高的粲强子产生截面，而正负电子对撞则具有丰富的运动学约束特性、接近 100% 的强子事例触发效率以及相对干净的本底；强子对撞可以直接产生不同量子态的粒子，而正

负电子对撞直接产生的粒子的量子数是已知的；陶轻子与粲强子在 BESIII 实验上能量阈值附近产生，其中成对产生的粲强子具有量子关联效应和相对本底低等特色^[2, 3]；在 LHCb 实验^[4, 5]与 BelleII 实验^[6]上产生的粲强子则具有统计量高，携带较高前冲动能，可以高效重建弱衰变粲强子的飞行顶点等特性。总之，在统计量方面，由于 LHCb 强子对撞极高的产生截面，以及 B 介子工厂很高的对撞亮度，BESIII 实验无法直接与 LHCb 实验和 Belle/BelleII 实验竞争；但 BESIII 实验利用其在阈值产生，丰富的运动学约束以及干净的本底等特色在重味强子谱学研究、 τ 轻子衰变、CKM 矩阵幺正性检验、核子与重子内部结构测量等方面与 LHCb 实验、BelleII 实验存在很强的竞争和互补性。

3 超级陶粲装置介绍

如上讨论，基于在陶粲能区物理的重要性的需求，以及当前国内外在该能区实验研究的现状，我们提出了在中国建设一台新一代的超高亮度正负电子对撞机——超级陶粲装置，以继续保持我国在该研究领域的领先地位。新一代的超级陶粲装置包括亮度大于 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，对撞的质心能量覆盖 2—7 GeV 的加速器设施，一台能够适应高亮度环境、满足物理研究需求的多功能磁谱仪以及相关的基础设施。该装置的预研和建设对我国现有已掌握的高能加速器和探测器相关关键技术提出了重大挑战，对我国的基础科学研究、高新技术的发展以及相关综合性人才的培养等方面具有重要的科学意义和战略地位。

3.1 加速器概述

超级陶粲装置加速器的核心技术是如何突破峰值对撞亮度。为了实现超高亮度，STCF 将采用广泛运用的扁平对称正负电子束和双环结构，其相应的对撞亮度可以表达为

$$\mathcal{L} = \frac{\gamma n_b I_b}{2e r_c \beta_y^2} \zeta_y H ,$$

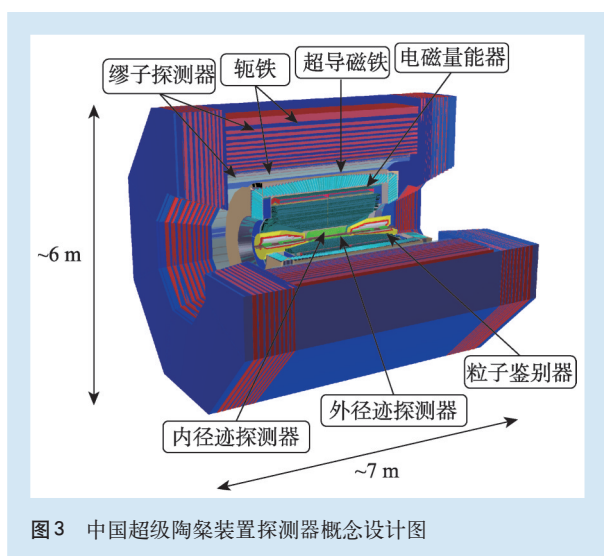


图3 中国超级陶粲装置探测器概念设计图

个直线加速段、正电子源、电子旁路漂移段以及正电子阻尼环等部分组成。直线注入器采用单脉冲双束团的注入方式，两束团分别用于打靶产生正电子以及电子注入。该设计能够有效减少建造成本，同时有利于未来正负电子束的波荡器极化改造。

储存环水平发射度正比于能量的平方，能量越高容许的单束团流强越大，此外高能量时集体效应容许的流强阈值也越高，因此在总流强不受高频功率限制时，对撞机的极限亮度与束流能量 E^4 成正比。因而，客观上说，技术水平无代差的超级B工厂比超级陶粲工厂的极限亮度更高，或同等亮度下超级陶粲工厂将面临更严峻的技术挑战。早年INFN验证了低亮度条件下大Piwinski角加crab waist方案的有效性，但超高亮度的装置目前仅有超级B工厂SuperKEKB，目前远未达设计指标。在此情况下，科学界迫切需要对高亮度前沿的下一代环形正负电子对撞机的关键束流物理问题和技术问题进行更深入和详细的研究。我国在该领域的研究具备部分基础，但面临激烈的国际竞争，开展相关的预研有非常强的必要性和紧迫性。

3.2 探测谱仪概述

为了满足高亮度条件下的STCF物理研究需求，我们需要设计和建造一台由多种粒子探测器

组合而成的大型综合粒子探测装置——STCF探测谱仪，对正负电子对撞后产生的末态粒子(质子、 π 、K、电子、缪子和光子等)进行探测和种类鉴别。粒子物理实验要求探测谱仪有尽可能大的立体覆盖角，对带电粒子有高的探测效率、动量分辨和鉴别能力，对光子有高的探测效率以及能量、位置与时间分辨率。相对于BEPcII，STCF的质心系能量范围扩大了两倍，对撞亮度则提高了两个量级，其谱仪的设计将面临更大动态范围、更高辐射本底、计数率和有效事例率的挑战，由此，STCF探测器的设计和建设将采用当前最先进的技术方案，针对具体物理目标进行优化，预期性能需要很好地满足物理需求。

STCF探测器概念设计如图3所示，与其他同类实验的探测器类似，由内到外包括内径迹探测器、外径迹探测器、粒子鉴别器、电磁量能器、超导磁铁和缪子探测器。由于STCF上产生的大多数末态粒子的动量相对较低，其穿越探测器时受到的物质作用的影响较大，因此在探测器的设计中，电磁量能器以内的各探测器需要尽量减少物质质量，优化低动量粒子的探测性能；另外由于辐照剂量的大幅度提升，在内层探测器的设计中要重点关注抗辐照问题。下面分别介绍STCF探测器的各个组成部分。

(1) 内径迹探测器

内径迹探测器紧贴束流管，是STCF探测谱仪最内层探测器。它的主要功能是配合中心径迹探测器测量带电粒子的径迹和动量，此外对顶点重建有着重要作用。内径迹探测器靠近对撞区域，所处环境的辐照水平非常高，因此必须具有很强的抗辐照和计数率能力。内径迹探测器计划采用称为 μ RWELL的新型井形微结构气体探测器作为其基准技术方案。这种探测器结构简单紧凑，易于制成圆柱形，采用条形读出电极可以实现精确位置测量，通过阻性化设计可以进一步降低其物质质量，从而很好地满足内径迹探测器的要求。STCF内径迹探测器由三层同心的圆柱形 μ RWELL探测器组成，单层位置分辨为100 μm 。

(2) 外径迹探测器

外径迹探测器是包围着内径迹探测器的一个

大型圆柱形的精密漂移室，它承担了带电粒子径迹和动量测量的主要任务，同时测量带电粒子的电离能量损失，用于鉴别低动量带电粒子。漂移室内充满了气体，并沿轴向布置了大量的细金属丝，形成了大量漂移单元。通过测量带电粒子在单元内产生的电离电子的漂移时间，可以获得对应的漂移距离，结合阳极丝的位置就可以得到带电粒子径迹的位置。为了减少物理质量，漂移室采用氨基混合气作为工作气体，内筒和外筒均采用碳纤维；为了提高计数率能力，漂移室采用类正方形小单元结构，缩短漂移时间。STCF 漂移室共有 48 个丝层，单丝位置分辨为 120 μm 。

(3) 粒子鉴别器

粒子鉴别器紧靠漂移室的外界面，在 STCF 探测器接收度内将漂移室紧密包裹，主要用于分辨质子、 π 和 K 介子三类带电强子。STCF 物理目标要求探测谱仪能分辨动量高达 2 GeV/c 的 π 和 K 介子。为满足这一要求，STCF 粒子鉴别器采用基于契伦科夫辐射的探测器技术方案。粒子鉴别器分为桶部和端盖两部分，桶部采用基于液态 C_6F_{14} 辐射体的环像契伦科夫探测器，端盖采用高纯石英板作辐射体的内全反射型契伦科夫探测器。当带电粒子穿过契伦科夫辐射体时会产生微弱的辐射光，与带电粒子飞行方向有特定角度，与粒子飞行速度密切相关。结合径迹探测器提供的径迹和动量，桶部的环像契伦科夫探测器通过测量辐射角，而端盖的内全反射型契伦科夫探测器则测量在石英板内通过多次全反射最终到达边缘的契伦科夫辐射光子的到达时刻和位置，实现不同种类粒子的鉴别。

(4) 电磁量能器

电磁量能器包裹着粒子鉴别器，也包括桶部和两个端盖，其主要功能是精确测量光子的能量和位置。为了实现高辐照本底条件下能量的精确测量，STCF 电磁量能器采用发光快速的纯 CsI 晶体，并使用大面积 APD 作为光电读出。高能光子在晶体中产生电磁簇射并使得晶体发光，通过测量晶体的发光产额以及能量的分布可以得到入射光子的能量和位置。

(5) 超导磁铁

超导磁铁为 STCF 探测器提供强度为 1 T 的均匀轴向磁场。带电粒子在飞行过程中受这一磁场影响在横向平面中发生偏转，为径迹探测器测量带电粒子的动量提供条件。超导磁铁由超导线圈和轭铁两部分组成，超导线圈负责产生磁场，轭铁则为磁场提供磁回路，需要有好的导磁性能。同时，轭铁还是整个探测谱仪的支撑结构和缪子探测器的吸收体，要求具有很好的强度。

(6) 缪子探测器

缪子探测器位于探测谱仪的最外层，安装在轭铁之间的间隙内。致密厚实的轭铁(以及上游的电磁量能器)把对撞产生的大部分末态粒子都吸收了，而缪子具有足够的穿透力，可以比较容易地穿透轭铁，或者在轭铁内穿行足够长的距离。因此，在各层轭铁之间的间隙内安装对缪子敏感的探测器即可实现缪子鉴别。STCF 缪子探测器采用 RPC 和塑闪两种探测器的组合设计，内部 3 层采用电木 RPC 探测器，而外部 7 层则采用塑闪条探测器。这种组合设计既能有效降低辐射本底对缪子探测器的影响，又能提高缪子探测器对中性强子的探测灵敏度。

4 中国超级陶粲装置重要物理展望

经过几十年的发展，描述微观世界的粒子物理标准模型取得了巨大的成功，得到了大量的实验验证，特别是 2012 年 Higgs 粒子的发现，使得人类对微观世界的认识达到了空前高度。尽管如此，仍有一些重大的科学问题不能得到很好的解释。陶粲能区具有一系列独特的性质，为研究 QCD 色禁闭和 CP 破缺本质，更高精度检验标准模型和探索新物理提供了关键的平台。未来的 STCF 运行在 2—7 GeV 能区，预期每年将获取超过 1 ab^{-1} 的实验数据。预计 STCF 运行 15 年，共将获取超过 20 ab^{-1} 的实验数据。大统计量、高精度、低本底的实验数据将为上述的重大科学问题提供重要信息。鉴于此，STCF 具有非常丰富的物理课题，有

望突破部分关键科学问题。

4.1 QCD和强子物理

作为非阿贝尔群规范场论的量子色动力学(QCD)是描述夸克和胶子之间强相互作用的动力学理论。夸克是构成核子和强子的基本单元,而胶子则传递夸克之间的相互作用,使它们相互结合,形成核子和强子,或者相互分离,发生衰变等。经过几十年的发展,目前我们已经确立描述强子结构及强相互作用的基本理论是量子色动力学,强子物理是研究和发展量子色动力学理论的天然场所。但是,由于QCD的基本特性,即高能标度下的渐近自由、低能标下色禁闭以及动力学手征对称性破缺,使得对核子结构和性质的描述与标度相关。特别是在低能标下,由于“夸克禁闭”这一世界难题,使得我们迄今为止仍未能对组成世界万物的核子的基本结构,包括所有强子的基本结构,有彻底的了解。

4.1.1 强子与奇特强子态

谱学的研究是人类探索与认识强子基本结构和相互作用规律的重要手段,例如历史上通过研究原子光谱获得原子结构的信息。目前自然界已经发现的物质大部分都是由两个夸克构成的介子和三个夸克构成的重子,但QCD理论预言了多夸克态(四夸克、五夸克等)、夸克与胶子组成的混杂态以及由纯胶子组成的胶球等新型粒子态(如图

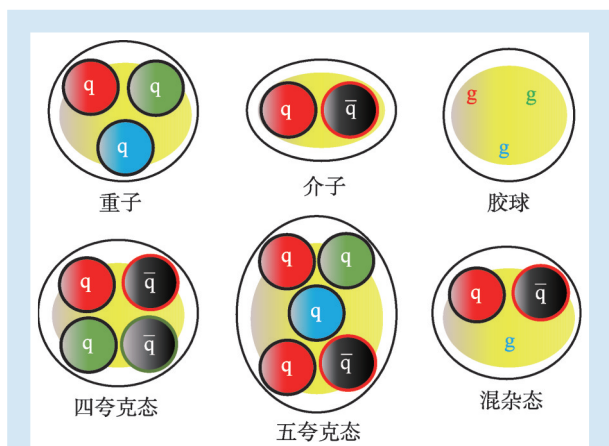


图4 QCD理论允许存在的各种强子态,重子和介子为普通强子态,其他称之为奇特强子态

4所示)的存在。寻找和研究这些新型粒子态对于理解强子的结构及强子内部夸克与胶子间的相互作用、检验和发展强相互作用理论等具有重大的科学意义。STCF运行在陶粲能区,能够产生不同类型的粒子和共振结构,由超高亮度而产生的大统计量的数据为寻找新型强子及研究其性质提供了关键场所,将为理解强子结构和强耦合非微扰机制下的强相互作用,为格点QCD提供标杆。

粲夸克偶素谱: 粲夸克偶素是指由正反两个粲夸克构成的介子,其不同的轨道与自旋角动量组合构成该类介子不同的基态与激发态,形成一个独特的粒子家族。粲夸克偶素位于非微扰和微扰QCD的过渡区域,研究粲夸克偶素的跃迁和衰变、完善其谱学以及寻找新的类粲偶素态是研究QCD的重要途径。经过多年的努力,粲夸克偶素谱学的研究取得了重大进展,我们已经完全建立了由夸克偶素势模型预言的 $D\bar{D}$ 质量阈值以下粲夸克偶素谱学,但在 $D\bar{D}$ 质量阈值以上,仍有多个粒子态没有在实验上发现。更重要的是,近十年来,不同的实验先后发现了一系列质量高于 $D\bar{D}$ 质量阈值的类粲偶素态,如X(3872)、Y(4260)、Z_c(3900)等^[12]。这些新发现的粒子态包含粲夸克对,但以不同寻常的衰变模式出现在夸克偶素势模型没有预言的位置上,是四夸克态、分子态、混杂态等新型强子态的候选者。但当前的实验条件限制了我们对其内部结构性质和类粲偶素谱的整体认识,需要更高的统计量和更宽的质心系能量的实验数据,开展系统性的研究和精确测量。STCF实验将系统性地开展(类)粲偶素的产生机制、精确地测量(类)粲偶素的跃迁和衰变、寻找夸克偶素势模型预言地“丢失粒子”并完善粲偶素谱、建立新型类粲偶素谱学。另外,STCF还将开展如含“隐性”粲夸克对的混杂态、五夸克态以及双粲偶素的寻找和研究工作。历史经验证明在正负电子对撞机上开展粲偶素的研究具有明显的特点,刚刚开始运行的BelleII实验也将为粲夸克偶素的研究提供重要场所。与BelleII实验比较,STCF实验不论是在统计量,还是在探测效率等方面,都具有绝对的优势。未来STCF实验将引领国际粲夸克偶素领域的实验研究,为突破QCD“色

禁闭”这一重大科学问题提供关键数据。

粲重子谱：粲重子包含一个粲价夸克和一对轻价夸克，为研究轻夸克在重夸克环境中的动力学机制、强相互作用的SU(3)味对称性、研究CP破坏等重大物理课题提供了重要平台。另外，作为最轻的粲重子， Λ_c 是大部分的粲重子和含b夸克重子的衰变末态产物，所以 Λ_c 弱衰变的精确测量结果是研究粲重子和b夸克重子谱学以及它们性质的重要输入。相对于粲介子，当前对粲重子的性质的了解还很缺乏。过去的10年中，在B介子衰变发现了许多粲重子态，但是与夸克模型预期的重子谱还相差甚远。粲重子衰变的测量还不是很精确，许多重要的衰变过程，如单Cabibbo压低衰变过程、半轻衰变过程等，在实验上还没有被发现。虽然近年来BESIII实验成功运行在 $\Lambda_c\bar{\Lambda}_c$ 质量阈值(4.6 GeV)以上，开展了系列的绝对分支比的精确测量，为检验理论上计算非微扰效应的参数化方法和相关理论唯象模型，提供重要的实验数据。但与粲介子的衰变相比，其测量精度仍有待进一步改善。一些关键的前沿课题，如粲重子衰变的CP破坏等，与标准模型的预言相差甚远。STCF可以在阈值附近大量产生粲重子对，相对其他实验，阈值处有实验环境本底小、重建效率高、优秀运动学约束等优点。STCF的高亮度和宽的质心能量范围，将为粲重子谱学(包括双粲重子谱)的研究、粲重子衰变的精确测量等提供关键平台。鉴于优秀的运动学约束，STCF可以系统性的开展其他实验，可以是LHCb实验等不能开展的研究，如含中子或中微子末态的研究。STCF可以利用粲重子对的量子关联性质，构造新的CP破坏观测量，研究其CP破坏。此外，STCF可以在近阈值处精确测量粲重子对的产生截面，将为研究其相应的产生和核子的内部动力学机制提供重要数据。

轻强子谱：轻强子是指由轻夸克(u,d,s)组成的强子，系统的研究轻强子谱能够获得大量关于强子结构的信息，并通过寻找胶球、混杂态等奇特强子与理论对比^[13]。STCF将绘出尽可能完整、精确的轻介子和重子谱。由于介子谱和胶球的能谱重叠，实验上如何区分胶球是一个难题，比较

胶球和介子分别与光子和双光子的耦合将有助于澄清这些粒子的性质。STCF能够提供足够的统计量研究双光子过程。

4.1.2 QCD的精确测量

要精确检验粒子物理标准模型，必须能精确地计算所涉及到的基本理论参数，发展能更好地处理QCD非微扰效应的方法。通过STCF上积累的大量数据，精确测量一些基本参数与QCD计算比较，并提供一些QCD无法计算的基本参数，使微扰QCD在高能区具有更好的预言能力。

核子内部结构：核子内部结构的研究是人类探索物质世界基本组成的前沿。虽然核子已经被发现100多年，但是其内部结构、自旋/质量来源等依然是未解之谜。通过研究部分子(夸克和胶子)碎裂到强子的过程能够帮助检验人们对部分子碎裂过程的认识^[14]。碎裂函数与深度非弹散射上的部分子分布函数耦合，可以研究核子内部结构及自旋来源。STCF与中国拟建造的极化电子离子对撞机(Electron Ion Collider, EicC)能区一致，碎裂函数的测量结果能够直接作为EicC的输入，提高部分子分布函数测量的精度，理解自旋危机。核子的电磁形状因子是研究其内部结构和动力学机制的关键参数，并且能够检验基于QCD的各种理论模型。联合类时和类空的电磁形状因子能够全面了解核子内部的结构^[15]。BESIII实验利用能量扫描数据研究了重子对的产生截面分布，在阈值处均发现奇特的增强结构，目前理论上还不清楚这些阈值增强结构的来源。STCF覆盖能区有众多的重子、介子对的阈产生过程，利用更高的统计量可以系统的研究重子对产生阈值结构，有助于揭示夸克之间的相互作用，为深入的理论探索提供丰富完备的信息。

陶轻子精确测量：陶轻子是三代轻子中最重的粒子，最有可能与标准模型的预言发生偏差，测量陶轻子的各项参数可以精确地检验标准模型理论。陶轻子对产生截面的峰值位于 $E_{cm}=4.26$ GeV，STCF一年能收集近35亿对陶轻子过程，且具有高截面、低本底等特点。STCF上的陶轻子物理研究将与BelleII以及超级Z工厂等各具特色，相互补充。未来STCF能够通过精确测量陶轻子的质

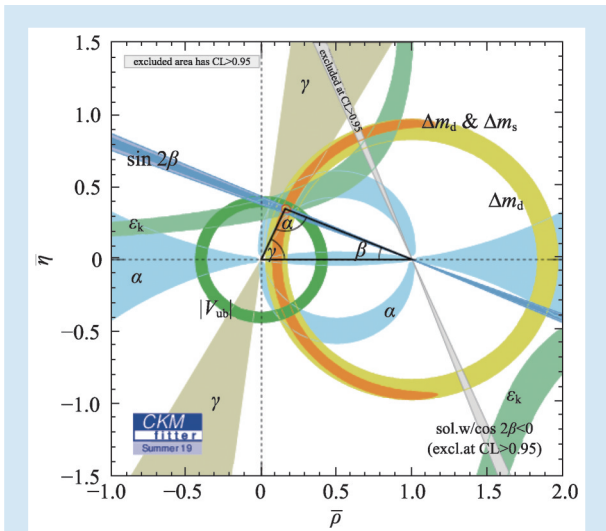


图5 利用各个实验组的结果得到的最新的 $\bar{\rho}$ 和 $\bar{\eta}$ 的平面图, $\bar{\rho} + i\bar{\eta} = -(V_{ud}V_{ub}^*)/(V_{cd}V_{cb}^*)$, 是表征CKM矩阵的幺正三角形, 图中阴影处是实验结果的误差带来的不确定性(图片由CKMfitter组提供)

量以及陶轻子到第一、二代带电轻子的跃迁等精度检验轻子普适性, 精确测量陶衰变的电子(或缪子)能谱形状确定米歇尔参数的大小, 测量陶轻子的强子衰变确定强相互作用常数 α_s , 测量陶轻子对的产生截面谱确定电偶极矩等等。

4.2 味物理和CP破坏

4.2.1 CKM矩阵元的精确测量

在粒子物理的标准模型中, 夸克的弱相互作用本征态与其质量本征态并不一致, 两个本征态之间存在一个变换矩阵, 称作CKM矩阵。CKM矩阵是标准模型的基本参数, 精确测量每个矩阵元, 可以检验CKM矩阵的幺正性, 并且不同方法测量同一CKM矩阵元应得到相同的结果。任何显著与期望值的偏离都预示着CKM矩阵是不完备的。图5是用幺正三角形图像来表示的CKM矩阵^[16], 图中阴影处是实验上各项参数的不确定度。

粲介子的衰变将为CKM矩阵元的精确测量和幺正性的检验、 $D\bar{D}$ 混合强度的测量等重大物理课题提供重要场所。STCF在阈值附近采集大量的粲介子对数据具有一系列独特性质, 如粲介子对量子关联性、CP标记技术、双标记c事例重建、

低本底等, 使得STCF在粲物理的研究中具有强有力的竞争优势。STCF将通过粲介子D的半轻或纯轻衰变测量CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 。此外, 研究STCF上超子和陶轻子的衰变也能够对CKM矩阵元进行精确检验, 预研结果显示STCF将在 $\mathcal{O}(10^{-3})$ 或更好的统计精度下确定CKM矩阵元。CKM矩阵元的提取需要衰变常数作为输入参数, 这项参数也是测量CKM矩阵元的最主要误差来源, 随着格点量子色动力学对衰变常数的计算日趋精确, 该项系统误差带来的影响将大大减小。

4.2.2 CP破坏

标准模型中, CKM矩阵元里用以描述夸克味混合的相因子 ϕ 被认为是CP破坏的唯一来源。迄今为止, 人们已经在K介子、D介子和B介子上分别观测到CP破坏, 其结果与标准模型的预言非常一致。虽然标准模型的CP破坏在介子家族取得了巨大成功, 但不能提供足够的CP破坏用于解释宇宙中的物质—反物质不对称现象。因此进一步检验标准模型中的CP破坏机制、寻找CP破坏的新起源已经成为粒子物理研究的重要内容之一。STCF将在重子家族和轻子家族中精确测量CP破坏, 精确检验标准模型, 探讨新物理效应。

重子的CP破坏: BESIII实验利用13亿 J/ψ 事例, 挑选出42万个 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$ 衰变事例。利用 Λ 超子和它的反超子形成的自旋纠缠系统, 通过角分布分析, 测量了 Λ 超子和 $\bar{\Lambda}$ 反超子的衰变不对称常数, 在2%的灵敏度下确认了超子衰变中不存在CP破坏^[17]。标准模型预言 Λ 超子的CP破坏大小为 $10^{-4}—10^{-5}$ 。STCF一年能获取1万亿的 J/ψ 事例, 经过重建后将有3亿个 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$ 衰变事例, 能够在 $\mathcal{O}(10^{-4})$ 的灵敏度下检验CP破坏。

轻子的CP破坏: 在轻子家族中, 陶轻子由于其质量重, 最有可能与标准模型的预言发生偏差, 此外其丰富的强子衰变末态, 有利于构造CP破坏观测量, 因此陶轻子被认为是研究CP破坏最好的场所^[18]。新的CP破坏来源可以体现在陶轻子的产生上, 如电偶极矩的测量, 非零的电偶极矩意味着CP破坏的存在。STCF一年收集的35亿陶轻子对能够提高电偶极矩的测量精度至

少2个量级。新的CP破坏来源也可以体现在陶轻子的衰变，BaBar实验利用 $\tau \rightarrow K_s \pi \nu$ 过程观测到 $(-0.36 \pm 0.23 \pm 0.11)\%$ 的衰变不对称，与标准模型的预言相差2.8个标准偏差。在STCF上，我们能以更高的精度下验证该过程的CP破坏与标准模型预言的差别。

4.3 新物理寻找

粒子物理标准模型虽然取得了巨大的成功，尤其Higgs粒子的发现，规范相互作用得到了越来越精确的实验验证。但粒子物理学界相信，标准模型并非是一个最基本的理论。标准模型中关于夸克禁闭和对称性破坏等基本问题仍然悬而未决，并且模型中涉及到19个参数，它们的起源并不明确。我们一方面可以通过上述过程，如强子谱学研究、QCD参数精确测量、CKM矩阵元精确测量及寻找重子和轻子的CP破坏检验标准模型；另一方面也可以从不同角度出发，提出各种新物理理论和模型，对标准模型加以扩充。以下简单介绍在STCF上可以探索新物理的几种方式。

寻找标准模型禁戒和稀有过程：如味改变中性流(FCNC)、轻子数破坏(LNV)、轻子味破坏(LFV)等过程。其中寻找带电轻子味破坏(cLFV)过程是检验标准模型和寻找新物理的黄金过程。标准模型不存在轻子味破缺过程，即使考虑了中微子质量及其混合，轻子的味破缺过程还是很小，根本无法和当前的实验上限比较。随着实验精度的不断提高，轻子味破缺过程作为对新物理模型重要实验限制的地位也在不断提高。不少超出标准模型新理论计算轻子味破缺衰变过程 $\tau \rightarrow lll$ ， $\tau \rightarrow \gamma \mu$ 的分支比在 $10^{-7} - 10^{-9}$ 量级^[19]。STCF上一年35亿的陶轻子对产生能够达到这个精度，从而对各种理论模型进行有力的验证。

作为基态赝标量介子中的自旋单态粒子， η 和 η' 对理解低能QCD有重要作用。研究 η/η' 的衰变能够解决一系列物理问题如 $\pi^0 - \eta$ 混合，轻夸克质量测量和 $\pi - \pi$ 散射。此外，作为宇称(P)、电荷共

轭(C)和联合(CP)的本征态粒子，研究 η/η' 的稀有衰变过程为理解这些基本对称性提供了独特的平台^[20]。在STCF上，通过 J/ψ 的衰变，一年可获得近10亿个 η/η' 粒子，能够在极高的精度下研究其稀有衰变并与理论预言对比。

暗物质寻找：理论上，大量且难以探测的暗物质被认为占到宇宙总质量的85%，但标准模型对其身份仍然“缄口不提”。不少新物理理论预言了不同能区下这些暗物质与标准模型粒子的耦合，寻找轻暗物质或者暗光子，探索暗物质物理检验暗物质湮灭机制，寻找QED之外的U(1)规范相互作用对理解暗物质来源至关重要。STCF上产生的大统计量的粲偶素数据，为轻的暗物质粒子寻找提供理想场所。

5 总结

陶粲能区具有独特性质和重大的科学发现潜力。作为我国目前唯一基于高能加速器的大科学工程项目，北京正负电子对撞机/北京谱仪实验由于设计寿命和对撞亮度的限制，将完成其历史使命，而STCF项目将是北京正负电子对撞机项目的自然延续。作为我国未来基于高能加速器的粒子物理实验装置选项之一，尽快开展并完成STCF相关技术预研工作是国内本领域的共识。截至目前为止，超过50个国内外大学和研究所表示意愿参与预研与建设，其中超过20个单位来自欧美国家，其余主要来自国内长期参与BES实验的单位，具有很强的研究能力和基础。STCF的加速器与探测器技术预研工作正依托中国科学技术大学国家同步辐射实验室，核探测与核电子学国家重点实验室全面展开，并且进展顺利。作为高亮度前沿的粒子物理实验代表之一，STCF设施的建设将使我国在陶粲能区的研究领域继续引领世界20年以上，有望在探索CP破缺、核子内部结构、非微扰强相互作用，以及新型强子态和新物理等重大前沿课题取得突破，提升我国的基础科学研究能力。STCF的加速器和探测器建造将挑战众多国际最前沿的关键技术，拉动我国工业制

造、新工艺和新技术水平的显著提升, 填补国家战略空白, 进而服务于国家安全、能源、医疗、信息、环境等重大战略需求; STCF 将培养大批适应现代化管理、掌握高新技术、具备大科学工程经验和国际视野的优秀综合性人才; STCF 还将吸引

世界顶尖科学家和引进国际上最先进的科学技术, 成为国际人才和科学技术的创新基地。

致谢 感谢刘建北和罗箐在文章写作过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 中国物理学会高能物理分会关于基于加速器的中国高能物理未来发展的意见: http://www.ihep.cas.cn/xh/gnwlxh/zxdt/201609/t20160912_4661283.html
- [2] Fang S, Huang G, Zheng Z. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2017, 32(0): 1730004
- [3] 陈和生, 张闯等. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 1005
- [4] Alves Jr A A *et al* (LHCb Collaboration). *JINST*, 2008, 3: S08005
- [5] Aaij R *et al* (LHCb Collaboration). Physics case for an LHCb Up-grade II - Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era, arXiv: 1808.08865
- [6] Kou E *et al* (Belle- II Collaboration). *PTEP*, 2019, 2019(12): 123C01
- [7] Dugan G. Dependence of Luminosity in CESR on Bunch Length for Flat and Round Beams, CBN-96-15
- [8] Zobov M, Alesini D *et al*. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 174801
- [9] Bona M, Garra Tico J *et al*. SuperB A High-Luminosity Heavy Flavour Factory Conceptual Design Report, Presented to INFN March, 2007
- [10] Biagini M, Boni R *et al*. Tau/Charm Factory Accelerator Report, arXiv: 1310.6944
- [11] CEPC Study Group. CEPC Conceptual Design Report: Volume 1- Accelerator, arXiv: 1809.00285
- [12] Yuan C Z. *Int. J. Mod. Phys. A*, 2018, 33(21): 1830018
- [13] Yang Y B. *et al* (CLQCD Collaboration). *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111:(9):091601
- [14] Collins J C. *Nucl. Phys. B*, 1993, 396: 161
- [15] Xiong W *et al*. *Nature*, 2019, 575(7781): 147
- [16] Charles J *et al* (CKMfitter Group). *Eur. Phys. J. C*, 2015, 41(1): 1
- [17] Ablikim M *et al* (BESIII Collaboration). *Nature Phys.*, 2019, 15: 631
- [18] Tsai Y S. *Phys. Rev. D*, 1995, 51: 3172
- [19] Babu K S, Kolda C. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89: 241802
- [20] Jarlskog C, Shabalin E. *Phys. Rev. D*, 1995, 52: 248

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕
—〈物理〉四十年集萃》

为答谢广大读者长期以来关爱和支持, 《物理》编辑

户名: 中国科学院物理研究所
帐号: 11 250 1010 4000 5699
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话: 010-82649029; 82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅2年《物理》杂志, 将获赠《岁月留痕—〈物理〉四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章, 476页精美印刷, 定价68元, 值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址: 北京市中关村南三街8号中科院物理所, 100190

收款人姓名: 《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行: 农行北京科学院南路支行

