粲物理实验研究未来装置的展望

陈缮真[1,†]　周小蓉[2]　李　刚[1]
（1　中国科学院高能物理研究所　北京　100049）
（2　中国科学技术大学物理学院　合肥　230026）

2025－03－07收到
† email：shanzhen.chen@ihep.ac.cn
DOI：10.7693/wl20250406
CSTR：32040.14.wl20250406

Future prospects of experimental facilities for charm physics studies

CHEN Shan-Zhen[1,†]　ZHOU Xiao-Rong[2]　LI Gang[1]
（1　Institute of High Energy Physics，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China）
（2　School of Physical Sciences，University of Science and Technology of China，Hefei 230026，China）

摘　要　过去50年，粲物理研究以含粲夸克的粒子(如粲介子、粲重子及粲偶素态)为核心，揭示了强、弱相互作用的深层规律，并为探索新物理提供了独特窗口。粲夸克作为唯一可形成束缚态并研究弱衰变的“上型”夸克，其研究依赖于加速器实验，目前主要依托BESⅢ、BelleⅡ、LHCb等实验。面向未来，粲物理将依托新一代的高亮度实验装置，包括中国超级陶粲装置(STCF)和环形正负电子对撞机(CEPC)。这两个装置将形成互补：STCF深耕低能区的系统性测量，CEPC依托高能扩展相空间，共促强相互作用理论、宇宙正反物质不对称性及奇特强子态本质的突破。文章介绍了这些未来大科学工程的设计概况，以及最新的研究进展。这些未来的大科学装置不仅是粒子物理探索物质起源与基本相互作用的载体，更将引领技术革新，为人类理解宇宙开启新篇章。

关键词　粲物理，超级陶粲装置，环形正负电子对撞机

Abstract　Over the past 50 years, charm physics studies that focused on particles containing charm quarks (such as charm mesons, charm baryons, and charmonium states), have uncovered profound laws of strong and weak interactions and provided a unique window for exploring new physics. As the only “up-type” quark capable of forming bound states and studying weak decays, charm quarks rely on accelerator experiments, primarily conducted through facilities like BESⅢ, BelleⅡ, and LHCb. Looking ahead, charm physics will leverage next-generation high-luminosity experimental facilities, including China’s Super Tau-Charm Facility (STCF) and the Circular Electron-Positron Collider (CEPC). These two facilities will complement each other: STCF will focus on systematic studies in the low-energy regime, while CEPC will extend the phase space at high energies, jointly advancing breakthroughs in strong interaction theory, matter-antimatter asymmetry, and the nature of exotic states. This article outlines the design concepts of these future large-scale scientific projects and highlights recent progress. These cutting-edge facilities will not only serve as platforms for exploring the origin of matter and fundamental interactions in particle physics but also drive technological innovation, opening new chapters in humanity’s understanding of the universe.

Keywords　charm physics, Super Tau-Charm Facility, Circular Electron-Positron Collider

1　过去50年粲物理实验研究的历史进程

粲物理的研究对象包括含有粲夸克的各种复合粒子，对这些粒子的研究为验证标准模型的强相互作用和弱相互作用及超出标准模型的理论提供了独特的机会。作为三代夸克中第二代的“上夸克型”夸克，粲夸克是六种夸克中质量第三重的。含有粲夸克的粒子有很多种，包括包含一个粲夸克的开放粲介子，以及包含一个或多个粲夸克的开放粲重子，或者包含一对正反粲夸克的粲偶素态。此外，实验上还观察到了几种包含粲夸克的、无法用传统的介子或重子来解释的粒子，它们的确切性质是当今未解答的问题之一。

由于顶夸克寿命太短无法形成束缚态，且上夸克质量太轻十分稳定，所以粲夸克是唯一一种可以研究弱相互作用衰变的“上夸克型”夸克。因此对粲夸克的研究具有独特意义。对于含有粲夸克的粒子的实验研究，在过去五十年内经历过多次热潮。第一次热潮是由丁肇中和伯顿·里克特(Burton Richter)分别实验发现粲夸克而带来的“November Revolution (十一月革命)”[1, 2]，此次发现证实了由GIM机制预言的第四种夸克[3]。此后，BaBar、CLEO、Belle等实验发现无法基于量子色动力学(QCD)的夸克模型解释D_{sJ}态[4—7]、BaBar和Belle实验发现中性粲介子的混合现象[8, 9]、BESⅢ等实验发现$Z_c(3900)$等奇特强子态[10, 11]、LHCb实验发现粲介子的CP破坏[12]等实验研究结果均引起了对含有粲夸克的粒子的研究热潮。

到目前为止，所有对粲夸克的研究都依赖于粒子加速器。由于在不同种类的加速器上含粲粒子具有不同的产生机制，因此具有很不相同的产生截面。在正负电子对撞机上，研究粲物理主要依靠两种不同的运行模式。第一种运行模式是将对撞机的质心能量调至略高于3770 MeV/c^2，此时在对撞机上可以产生ψ(3770)介子。这些介子几乎完全衰变为量子关联的D^0D^0或D^+D^-对。这种生产方式最早由SLAC的SPEAR对撞机上的MARKⅢ合作组开创，其也被用于CESR-c对撞机上的CLEO-c实验以及BEPCⅡ上的BESⅢ实验。类似的，如果将对撞机的质心能量调制到其他含粲介子的能量附近，也可研究其他粒子。

另外一种运行模式是在更高的质心能量下运行，以产生γ(4S)，它会衰变为量子关联的B^0B^0或B^+B^-对，而B介子则可以衰变为含有粲夸克的粒子。这种方法被位于PEP-Ⅱ对撞机上的BaBar实验、KEKB对撞机上的Belle实验，以及SuperKEKB对撞机上的BelleⅡ实验所采用。PEP-Ⅱ和KEKB以及SuperKEKB都是非对称对撞机，这意味着电子和正电子束的能量不同，它们的对撞质心系相对于实验室坐标系是有前冲的，因此可以进行对衰变时间依赖的研究。

在强子加速器上，除了丁肇中团队发现粲夸克时所用的束流打靶实验外，对含粲粒子的研究主要依赖于强子对撞机。由于在强子对撞机中参与相互作用的是强子中的部分子，因此即使在强子对撞机中两束束流能量相同，参与相互作用的部分子的能量也可以大不相同。在强子对撞机上，含粲粒子大多也是前冲的，因此也可以进行对衰变时间依赖的研究。在大型强子对撞机LHC上，LHCb实验的主要目标就是底强子、粲强子等重味粒子，因此被设计为单臂前向探测器。

目前，对于粲物理研究来说，最主要的实验包括BESⅢ实验、BelleⅡ实验，以及LHCb实验。这三个实验的预期粲粒子产额如表1所示[13]。

表1　BESⅢ实验、BelleⅡ实验、LHCb实验上含粲粒子的预期产额

实验	质心能量	预期亮度	粒子产额*	收集效率
BESⅢ	3.77 GeV 4.18—4.23 GeV 4.6—4.7 GeV	~ 20 fb^{-1} 7.3 fb^{-1} 4.5 fb^{-1}	$D^{0,+}$: 10^8 D_s^+: 5×10^6 Λ_c^+: 10^6	0 (10%)
BelleⅡ	10.58 GeV	~ 50 ab^{-1}	$D^{0,+}$: 10^{11} D_s^+: 10^{10} Λ_c^+: 10^{10}	0 (1—10 %)
LHCb	(7+8) TeV 13 TeV 13.6 TeV	(1+2) fb^{-1} 6 fb^{-1} 50 fb^{-1}	$D^{0,+}$: 5×10^{12} $D^{0,+}$: 10^{13} $D^{0,+}$: 10^{14}	0 (0.1%)

*　这里粒子产生截面的数据使用了$\sigma(D^0\bar{D}^0@3.77\ \text{GeV})=3.61$ nb，$\sigma(D^+D^-@3.77\ \text{GeV})=2.88$ nb，$\sigma(D_s^*D_s@4.17\ \text{GeV})=0.967$ nb，$\sigma(c\bar{c}@10.58\ \text{GeV})=1.3$ nb，$\sigma(D^0@\text{LHCb})=1661$ μb，截面数据主要来源于参考文献[13]。

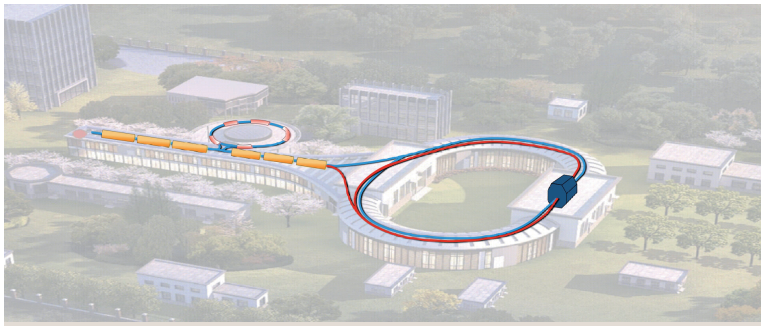

图1　超级陶粲装置(STCF)的结构示意图

图2　环形正负电子对撞机(CEPC)的结构示意图

目前，我们对含粲夸克的粒子的认知仍有很多缺失，比如，我们尚未理解多夸克态的本质是什么，尚未发现粲味重子中是否有CP破坏现象，也没有发现中性粲介子混合中是否存在CP破坏，虽然已在粲味介子的两体衰变中寻找到了CP破坏，但是仍未发现多体衰变中CP破坏在相空间内的分布情况。这些都需要更高统计量的数据来进行研究，因此，在未来的对撞机实验上，粲物理仍然是需要研究的重点课题。

2　未来粲物理的实验装置

当前，国际上的加速器粒子物理实验普遍开始了新一轮的迭代升级，对撞亮度较前一代实验普遍要求有数量级的提升。在B物理能区，位于日本高能加速器研究机构的B工厂率先开展升级工作，预期亮度提升40倍，并已进入了运行期。而在陶粲能区，我国北京正负电子对撞机已接近寿命和空间的极限，近期对加速器和探测器的升级预期将会把对撞机在高能区(束流能量2.35 GeV)的取数效率在原有基础上提升3倍，但已不具备进一步大幅度提升性能的潜力。近年来，北京正负电子对撞机上的一系列重大研究成果凸显了该能区的物理的重要性和研究前景，更是期待拥有更高性能的装置。因此，我国的粒子物理领域迫切需要建设新一代陶粲能区实验装置，抢占国际粒子物理研究前沿和新一代对撞机实验技术的高地。为此，我国粒子物理学界提出建设新一代的正负电子对撞机——超级陶粲装置(STCF)，它的结构示意图如图1所示。其设计质心能量为2—7 GeV，峰值亮度大于0.5×10^{35} $cm^{-2}s^{-1}$，预期每年将获取超过1 ab^{-1}的实验数据，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将运行在量子色动力学的微扰与非微扰的过渡区域，具有一系列独特的性能和丰富的物理课题，是研究宇宙中正反物质不对称(CP破坏)、探索强子内部结构、寻找奇特态物质和新物理等前沿物理课题的独特平台，进而促进对标准模型中强相互作用理论的理解和电弱对称性破缺机制的精确检验，在国际粒子物理的研究领域中发挥不可替代的作用。STCF上大统计量、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，特别是成对产生的粲强子、超子或者陶轻子对等具有的量子关联特性，能够为提高研究精度提供重要途径。

而在更高的能区，由我国科学家提出并设计的环形正负电子对撞机(CEPC)以及由欧洲核子研究中心提出的未来环形对撞机的正负电子对撞阶段(FCC-ee)都可以运行在Z玻色子能区(对撞能量大约91 GeV)，并且都能够产生万亿数量级的Z玻色子，成为未来的高亮度的Z玻色子工厂。CEPC是中国牵头发起的国际高能物理旗舰型大科学工程，是一个周长达100 km、有至少两个对撞点的正负电子对撞机，它的结构示意图如图2所示。它的核心目标是探索希格斯物理，并探索新物理，同时可对标准模型、味物理、量子色动力学(QCD)等展开精确测量，具有巨大的物理潜力。在每束流50 MW同步辐射(SR)功率的运行场景下，CEPC的Z玻色子工厂模式将会产生大约

4×10^{12}个Z玻色子[14]，而Z玻色子有大约12%的几率衰变成一对正反粲夸克，因此，Z玻色子工厂为粲物理的研究提供了另一种研究模式，并成为未来粲物理研究的重要阵地。由于是正负电子对撞机，CEPC的含粲夸克粒子产额虽不及强子对撞机上的LHCb，但它却有三个独特优势：第一，粒子产生的环境更“干净”，信噪比远高于强子对撞机LHCb；第二，除了能产生大量粲介子和底介子外，也能产生其相应更高质量的激发态乃至重子态，还能通过双光子对撞过程产生丰富的其他量子数的粲偶素、底偶素粒子；第三，对撞事件的重建效率比LHCb有成数量级的优势，尤其是在中性粒子的重建方面，CEPC的优势更为明显，因此CEPC在粲物理研究方面也有独特的潜力。

STCF和CEPC的预期粒子产额如表2所示[15]。

3　装置的研发进展情况

3.1　超级陶粲装置

相对于当前正在运行的第二代陶粲装置北京正负电子对撞机BEPCⅡ/北京谱仪BESⅢ实验，STCF质心能量覆盖范围往高能区域扩展了2 GeV，峰值亮度提升了两个量级，由此，在加速器和探测谱仪的设计和建设中面临重大的物理和技术挑战。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。STCF加速器的对撞环为双环对称结构，周长约800—1000 m，正负电子束流能量相等。储存环不对束流进行加速，维持正负电子束流在设定的能量，对循环束流由于同步辐射造成的能量损失进行补充。STCF全环目前设计的是一个对撞点(interaction point，IP)，设置两个较长的直线节，分别作为对撞区和注入区使用；另外设置多个直线节用于安装阻尼扭摆器等。对撞环的加速器磁元件排列结构已有初步设计，但仍需要大量优化和充分讨论。在开展加速器磁元件结构的进一步设计的同时，对撞环的设计还需要考虑以下因素：对撞区的各种磁元件的非线性效应、漏磁、对探测器磁场的抵消；纵向动力学和集体效应、束流寿命的优化；束—束效应研究和基于工作点的亮度扫描；误差分析与轨道校正；阻尼扭摆器等。这些工作将相互迭代、共同推进。在装置技术设计完成前，可以有不同的设计方案，会充分考虑对撞机的聚焦磁铁和散焦磁铁顺次排列的结构和第四代同步辐射光源的MBA结构的优点，以兼顾横向及纵向束流动力学的需求。此外，多个直线节还可为未来升级安装西伯利亚蛇保留空间，以期在二期工程中升级为正电子束—极化电子束对撞。

为了满足高亮度条件下的STCF物理研究需求，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。此外，STCF的物理目标和运行环境要求探测谱仪有强的抗辐照和计数率能力、尽可能大的立体覆盖角，对末态带电粒子有高的探测效率、动量分

表2　STCF和CEPC的预期粒子产额

实验	质心能量	峰值亮度	积分亮度	粒子产额*
STCF	2—7 GeV	0.5×10^{35} cm^{-2}s^{-1}	1 ab^{-1}每年	$D^{0,+}$: 5×10^{9} (能量3.77 GeV) D_s^+: 5×10^{8}(能量4.18—4.23 GeV) Λ_c^+: 10^{8}(能量4.6—4.7 GeV)
CEPC Z工厂	91.2 GeV	1.92×10^{36} cm^{-2}s^{-1} (50 MW方案)	50 ab^{-1}每年 (50 MW方案，两个对撞点之和)	D^0: 8.3×10^{11} D^+: 4.9×10^{11} D_s^+: 1.8×10^{11} Λ_c^+: 6.2×10^{10}

* CEPC数据来源于参考文献[15]。

辨和粒子种类鉴别能力，对末态光子有高的探测效率以及能量与位置分辨率，对堆积的物理事例有强的区分能力，具有高效触发判选和高速数据获取与处理的能力。项目组已完成物理和探测器概念性设计[16]，并在安徽省的支持下，开展关键技术攻关，已取得了重大的研究进展。通过关键技术攻关项目，解决并完全掌握加速器和探测谱仪的核心技术和工艺，形成完备的建设方案，同时培养项目的国际研究团队和技术队伍，为项目奠定了技术和人才基础。关键技术攻关项目计划于2025年12月份完成。

3.2 环形正负电子对撞机

早在1989年至1995年间，在欧洲核子研究中心有一台能量在Z玻色子产生能量，即91 GeV运行的对撞机，它就是大型正负电子对撞机LEP。在LEP上运行的4个探测器实验于6年多的数据采集阶段，每一个实验都记录下了大约450万个Z玻色子衰变的事例。然而CEPC的Z粒子工作模式的设计瞬时亮度比LEP高出了大约6个数量级，这给加速器和探测器的设计带来了极高的挑战。

由于CEPC可在Z玻色子(对撞能量91 GeV)、WW玻色子对(对撞能量160 GeV)、希格斯粒子(对撞能量240 GeV)等多个能区运行，因此高亮度、对撞能量可灵活切换的加速器，以及高效、精准的探测器是实现其科学目标的必要条件。考虑到科学需求、技术成熟度和先进性、性价比等各方面的平衡，加速器采用局部双环(希格斯模式)、双环(W/Z模式)可兼容的创新设计。为达到加速器的设计指标，自项目被提出以来，CEPC加速器预研团队依托第四代同步辐射光源——高能光源(HEPS)的建设，开展并完成了一系列加速器核心部件的研制，包括国际上率先开始研制的P波段高效速调管，关键性能参数国际领先的超导高频腔，大尺寸、高精度、极弱场二极磁铁以及高精度双孔径磁铁等关键磁铁等。同时，一系列技术在CEPC预研过程中得以突破和完善，这包括已达到国际先进水平的电源和快脉冲磁铁技术等。此外，CEPC面向未来，积极布局了先进高场超导磁体技术预研，率先研究了铁基高温超导磁体技术在加速器领域的应用；并基于高能物理的需求，布局研究性能先进的等离子体加速技术。

除了尖端的加速器技术以外，CEPC的建设需要超大规模科学装置的建设能力。HEPS是我国最长、综合指标最高的储存环加速器。HEPS的建设为CEPC所需的高标准基建技术，高精度机械准直与安装，高效稳定的大型超导低温系统，大科学工程组织管理等奠定了基础，同时也培养了专业工程队伍。HEPS作为辐射亮度国际领先的第四代同步辐射装置，在先进加速器物理和尖端技术方面为CEPC的预研做了验证。例如，HEPS和CEPC的希格斯粒子能区工作模式都采用在轴注入方式，涉及到的时序设计与实现，快脉冲磁铁技术在HEPS先期验证，后续可以直接用在CEPC上；HEPS和CEPC都需要大规模使用非蒸散型吸气剂(NEG)真空镀膜技术，提高真空度、降低束流不稳定性，该技术已经通过HEPS的建设成功实现；HEPS要求极高的设备准直精度，开发的一系列专利技术可以应用于CEPC：研发了大批量的超高精度磁铁的生产和测试手段，奠定了磁铁系统的基础；通过快反馈控制系统，抑制储存环束流的不稳定性，解决了相关的技术难题；超导高频系统成功建设运行的经验也可以用于CEPC。

在探测器方面，由于粲物理研究对于末态粒子鉴别、粒子顶点识别等有较高要求，因此目前预研的CEPC探测器，在顶点测量方面，采用了利用CMOS图像传感器技术的新型硅像素顶点探测器，可同时满足高空间分辨率、超低物质量与高计数率的物理要求，并可准确识别底夸克和粲夸克的次级衰变顶点。在径迹测量方面，CEPC探测器采用了硅探测器与气体探测器相结合的径迹系统，可同时精确测量粒子径迹、动量并鉴别粒子种类。在量能器方面，CEPC采用了支持粒子流算法的晶体电磁量能器和闪烁玻璃强子量能器，以追求尽可能好的光子能量分辨、强子能量

分辨、喷注能量重建等。而在磁场方面，CEPC探测器采用高温超导电缆获得了极薄的磁体，以减少物质量，提高精度。

目前，CEPC预研团队已完成了百公里加速器的物理设计和一系列探测器的技术预研，一系列关键技术的样机研制已达到国际先进水平，如图3所示。CEPC研究团队正在争取于“十五五”期间开始项目的建设。

图3 CEPC关键技术的样机 (a) 1.3 GHz超导模组全尺寸样机；(b) 650 MHz、800 kW高效速调管样机；(c) 18 kW@4 K大型低温制冷机样机；(d) 增强器低场二极铁全尺寸样机

4 对未来的展望

对于含有粲夸克的粒子，或者更广泛的考虑包含c和b两种重夸克的粒子，STCF和CEPC两个装置都为未来的研究提供了难得的机遇。STCF的亮度比BEPC Ⅱ提升2个量级，会在2—7 GeV的粲夸克能区对其进行系统和精确的研究；而CEPC在91 GeV的能区将产生4万亿Z玻色子，Z玻色子的衰变产物中包含千亿级的c夸克和b夸克，同时其高能量带来的大相空间，能产生多种潜在的包含重夸克的强子。二者的探测器都针对重味夸克的研究采用了最先进的技术，但物理目标各有侧重。因此，CEPC和STCF可以相得益彰、互为补充。

总体来看，粒子物理学的未来项目对于推动物理学的发展至关重要，它们不仅是技术上的突破，更是人类对自然界深层次理解的追求。通过这些实验，我们希望能够解开宇宙的更多秘密，为人类的知识宝库增添新的篇章。同时，投资于这些前沿科学项目也是对未来的一次投资，它们将帮助我们更好地理解所处的宇宙，并可能为人类带来新的技术革新。

参考文献

[1] Aubert J *et al*. Phys. Rev. Lett.,1974,33:1404

[2] Augustin J *et al*. Phys. Rev. Lett.,1974,33:1406

[3] Glashow S,Iliopoulos J,Maiani L. Phys. Rev. D,1970,2:1285

[4] BaBar Collaboration, Aubert B *et al*. Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 242001

[5] CLEO Collaboration, Besson D *et al*. Phys. Rev. D, 2003, 68: 032002

[6] Belle Collaboration, Abe K *et al*. Phys. Rev. Lett., 2004, 92: 012002

[7] BaBar Collaboration, Aubert B *et al*. Phys. Rev. D, 2004, 69: 031101

[8] BaBar Collaboration, Aubert B *et al*. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 211802

[9] Belle Collaboration, Staric M *et al*. Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 211803

[10] BES Ⅲ Collaboration, Ablikim M *et al*. Phys. Rev. Lett., 2013, 110:252001

[11] Belle Collaboration, Liu Z *et al*. Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002

[12] LHCb Collaboration, Aaij R *et al*. Phys. Rev. Lett., 2019, 122: 211803

[13] Polycarpo É, dos Reis A C. Int. J. Mod. Phys. A, 2014, 29(24): 1430051

[14] CEPC Study Group. Radiat. Detect. Technol. Methods,2024,8:1

[15] Ai X *et al*. 2024,arXiv:412.19743

[16] STCF Study Group. Front. Phys.,2024,19:14701