

北京正负电子对撞机

综述及基本情况

中国科学院高能物理研究所于 1973 年在原子能研究所一部的基础上建立，是我国高能物理研究、先进加速器物理与技术研究、先进射线技术及射线应用研究的综合性研究所。

在党中央和邓小平同志的亲切关怀下北京正负电子对撞机工程于 1988 年 10 月建成。该工程主要包括正负电子对撞机（BEP）、北京谱仪（BES）和同步辐射装置（BSRF）。1991 年，国家计委正式批准成立北京正负电子对撞机国家实验室。BEP 自 1989 年运行以来，北京谱仪取得了一批在国际高能物理界有影响的重要研究成果，如： τ 轻子质量的精确测量、20—50 亿电子

伏特能区正负电子对撞强子反应截面（R 值）的精确测量、发现 X（1835）新粒子等，引起了国内外高能物理界的广泛关注。

2003 年底，国家批准了北京正负电子对撞机重大改造工程（BEP CII），这是我国重大科学工程中最具挑战性和创新性的项目之一，工程于 2004 年初动工，2008 年 7 月完成建设任务，2009 年 7 月通过国家验收。BEP CII 的建成得到了国际高能物理界的高度评价，是我国大科学工程建设的一个成功范例，也是中国高能物理发展的又一个重大的里程碑。

BEP CII 是一台运行在陶粲物理能区国际领先的对撞



北京正负电子对撞机鸟瞰图

机和高性能同步辐射装置，主要开展强子物理和粲物理研究，预期在多夸克态、胶球、混杂态等奇特强子态的寻找和特性研究上有所突破，保持我国在陶粲能区物理实验研究的国际领先地位；同时又可作为同步辐射光源

提供真空紫外至硬X光，开展凝聚态物理、材料科学、生物和医学、环境科学、地矿资源以及微细加工技术方面等交叉学科领域的应用研究，达到“一机两用”。

研究进展与成果

北京正负电子对撞机建成

1984年9月，国务院批准了原国家计委“关于审批北京正负电子对撞机（即8312工程）建设任务和规模的报告”（国家计委科〔1984〕1899号），明确了一机二用的方针，增加了同步辐射实验区的建设。1984年10月7日，BEPC破土动工。邓小平同志与其他党和国家领导人来到中国科学院高能物理研究所参加奠基典礼，为奠基石铲了第一锹土，并亲切接见了参加工程建设的科技人员和职工代表。邓小平同志题写了“中国科学院高能物理研究所北京正负电子对撞机国家实验

室”的题词。1990年7月21日，北京正负电子对撞机通过国家验收，同年获得国家科技进步奖特等奖。

北京正负电子对撞机重大改造工程

北京正负电子对撞机重大改造工程（BEPCII）包括注入器改造、新建双储存环对撞机、新建北京谱仪 BES III和通用设施改造等，在粒子加速器和探测器与电子学等的优化设计、关键技术、系统集成和工程管理方面实现了重大创新，得到了国际高能物理界的高度评价，是我国高能物理发展的一个重大的里程碑。2009年5月，BEPCII主要性能——对撞亮度达到

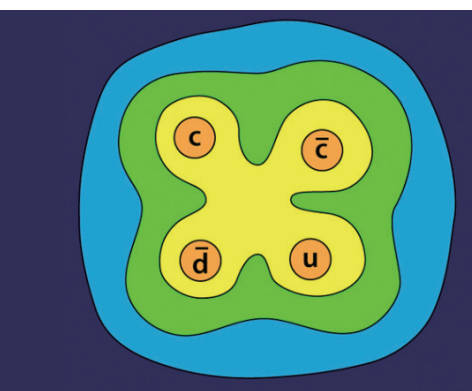
了 $3.2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，超过了验收指标，比改造前提高 30 多倍；2016 年 4 月，在 1.89 GeV 能量下峰值亮度达到设计指标 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，为改造前的 100 倍，成为粲能区（质心系能量 3—5 GeV）世界上亮度最高的正负电子对撞机。BESIII 建成后实现了稳定、高效运行，成为居国际领先地位的高能物理实验装置以及高性能的同步辐射装置，取得以“首次发现带电类粲偶素 $Z_c(3900)$ ”为代表的具有世界领先水平的一系列重大成果，为保持和发展我国在粲物理研究的国际领先地位奠定了基础。北京正负电子对撞机重大改造工程（BESIII）获 2016 年度国家科技进步奖一等奖。

北京正负电子对撞机重大改造后的储存环双环

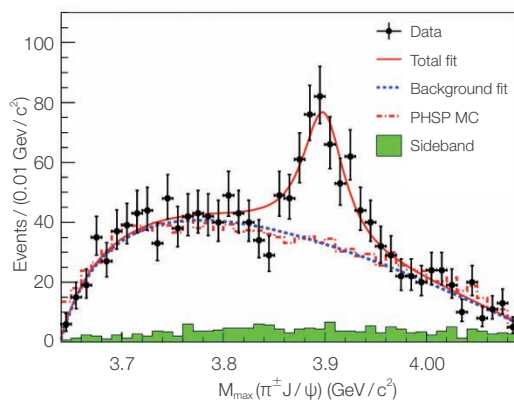
发现“四夸克物质” $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$

BESIII 在 2013 年采集的数据中发现一个新的共振结构，命名为 $Z_c(3900)$ 。它含有 1 对粲夸克和反粲夸克且带有电荷，提示其中至少含有 4 个夸克，可能是科学家长期寻找的一种奇特态粒子。

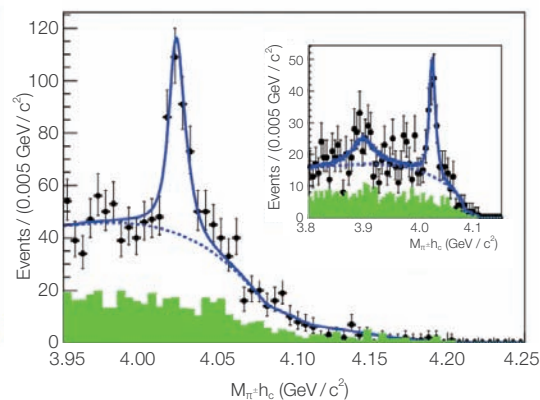
论文被 *Physical Review Letters* 编辑推荐，并配发题为“新粒子暗示存在四夸克物质”的评论；*Nature* 杂志发表题为“夸克‘四重奏’打开物质世界新大门”的报道。在美国 *Physics* 杂志公布的 2013 年物理学领域 11 项重要成果中，“发现四夸克物质”位列榜首。该成果入选科技部主办、多家学术期刊协办的 2013 年度“中国科学十大进展”和中国科学院“十二五”25 项重大科技成果及标志性进展。随后，北京谱仪实验确定了其同位旋、自旋、宇称等量子数，发现了该粒子的其他多种衰变模式，并发现了其高质量伴随态 $Z_c(4020)$ 。



$Z_c(3900)$ 的夸克结构示意图



BESIII 实验发现的 $Z_c(3900)$

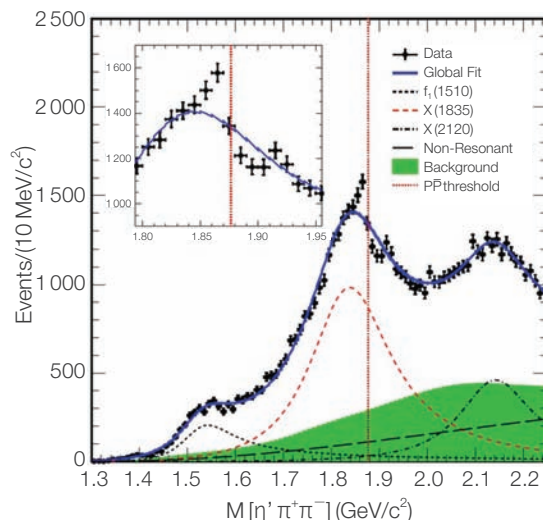


BESIII 实验发现的 $Z_c(4020)$

发现 X(1835) 和 $p\bar{p}$ 质量阈值结构的联系

基于当时世界上最大的 5 800 万 J/ψ 事例样本，BESII 于 2005 年发现了新粒子 X(1835)。2016 年，BESIII 在利用高统计量 J/ψ 数据对 X(1835) 谱形的精细研究中，在 $\eta' \pi^+ \pi^-$ 不变质量谱质子-反质子质量阈值附近发现了显著的反常结构，建立了 X(1835) 和 $p\bar{p}$ 质量阈值结构的联系。X(1835) 谱形的反常结构可以用一个质量在 1.85 GeV 并且与 $p\bar{p}$ 有很强耦合的宽共振态描述，也可以用接近 $p\bar{p}$ 质量阈值的一个相干的窄共振态描述，为质子-反质子分子态或者质子-反质子束缚态的存在提供了重要的实验证据。

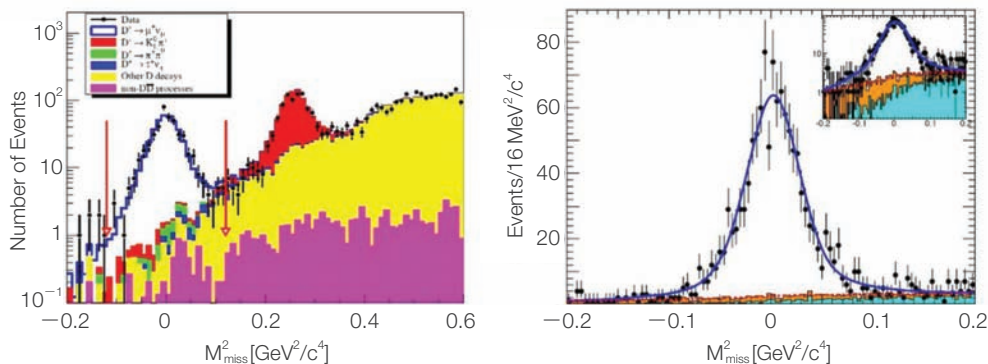
BESIII 在质子—反质子质量阈值附近发现的反常结构



粲粒子弱衰变精确测量

BESIII 在 $\psi(3770)$ 和 $\psi(4160)$ 峰上采集了世界上最大的近阈粲介子样本，精确测定了 D 和 Ds 介子的衰变常数、半轻子衰变形状因子、夸克混合矩阵元 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 等。这些结果为检验夸克混合矩阵的幺正性、检验和刻度格点量子色动力学的计算、检验弱衰变中的轻子普适性提供了重要数据。2014 年，首次在粲重子对阈值上获取了世界上最大的近阈粲重子 Λ_c 衰变样本，首次测定了多个强子衰变和半轻子衰变的绝对分支比。CERN Courier 对此刊文报道：BESIII 首次使用近阈数据开展了粲重子 Λ_c 衰变的直接测量。

BESIII 测量的 D 介子 (左) 和 Ds 介子 (右) 纯轻子衰变信号



发现超子极化并应用于寻找物质反物质不对称性来源

2019 年 5 月，*Nature Physics* 杂志发表 BESIII 实验发现正负电子对撞中兰布达超子存在横向极化，以及利用这个发现对兰布达超子衰变非对称参数和对物质、反物质不对称性来源的高灵敏度探测结果。

利用 13 亿 J/ψ 事例，选出了纯度高、质量好的 42 万事例，通过对自旋量子纠缠的兰布达超子角分布的分析，发现由此产生的兰布达超子存在高达 25% 的横向极化。这种效应使得首次在实验上同时以 1.3% 的高精度测量正反兰布达超子衰变的非对称参数，并使得通过重子探测宇宙中物质、反物质不对称性 (CP 破坏) 来源的灵敏度达到 3%，为目前世界最高灵敏度。

BESIII 的测量结果意味着过去 40 多年被广泛使用的兰布达超子的非对称参数被低估了 17%。新的测量将纠正这一历史错误，并更新《粒子数据表》中众多其他超子和粲重子非对称参数。BESIII 实验观测到的超子横向极化，成为新的实验手段，拓展了正负电子对撞中对超子极化物理和重子衰变中 CP 破坏的研究。