

## 北京谱仪实验物理成果\*

黄光顺<sup>1</sup> 李海波<sup>2,3</sup> 吕晓睿<sup>3,†</sup>

(1 中国科学技术大学 合肥 230026)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

2020-07-07收到

† email: xiaorui@ucas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20200802

## Highlights of the experiments performed on the Beijing Spectrometer

HUANG Guang-Shun<sup>1</sup> LI Hai-Bo<sup>2,3</sup> LYU Xiao-Rui<sup>3,†</sup>

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

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

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

**摘要** 当前描述物质微观基本结构最成功的理论是粒子物理的标准模型, 包括描述强作用力的量子色动力学, 描述弱相互作用和电磁作用力的电弱理论。在量子色动力学方面, 人们对夸克禁闭问题和低能非微扰性质还不能完全理解; 在电弱理论方面, 需要实验上提供更加精确的参数约束和检验。北京正负电子对撞机和北京谱仪实验是我国最早的大科学装置, 也是目前国际上唯一运行在陶粲能量区域的高亮度实验装置, 致力于在强子物理、量子色动力学的非微扰性质、电弱理论检验和寻找超标准模型的新物理等方面开展研究。文章将介绍北京谱仪多年来在实验上取得的科学成果, 包括陶轻子质量精确测量、 $R$ 值测量、奇特强子态研究和粲强子弱衰变测量等。

**关键词** 北京正负电子对撞机, 北京谱仪实验, 正负电子湮灭, 陶轻子质量, 粲物理

**Abstract** The standard model of particle physics is the most successful theory in describing the fundamental microscopic structure of matter in the universe. It consists of the theory of quantum chromodynamics for the strong interaction, and the electro-weak theory for the weak and electromagnetic (EW) interactions. In the quantum chromodynamics (QCD) theory, the nature of the quark confinement and low-energy non-perturbative property is still not clear; in the electro-weak theory, more stringent parameter constraints and experimental tests are required. The Beijing Electron-Positron Collider (BEPCII) and Beijing Spectrometer (BESIII) are amongst the earliest large-scale scientific facilities in China, and the only ones in the world still conducting high-luminosity experiments in the tau-charm energy region. They focus on research in hadron physics, non-perturbative effects in QCD, precision tests of the EW theory, and the search for new physics beyond the standard model. This article will review the highlights of the BESIII experiments during the past decades, such as the precise measurement of the tau lepton mass, the  $R$  value measurement, studies on the exotic hadrons, and measurements of the charmed hadron weak decays.

**Keywords** BEPCII, BESIII, electron-positron annihilation, tau lepton mass, charm physics

\* 国家自然科学基金(批准号: 11335008, 11822506, 11875054, 11935018)、国家重点研发计划(批准号: 2015CB856700)、中国科学院前沿科学重点研究(批准号: QYZDJ-SSW-SLH003)资助项目; 中国科学院重大科技基础设施开放研究项目; 中国科学院大学优秀青年教师科研能力提升项目(批准号: Y8540XX192)

## 1 引言

高能物理又称粒子物理，它是探索微观粒子内部基本结构和性质以及它们之间相互作用规律的一门学科，是基础物理学中的前沿科学。粒子物理的标准模型试图解决物质起源和基本相互作用的统一问题，标准模型框架下基本的费米子包括夸克和轻子，并描述了基本费米子之间的相互作用，它囊括了强、弱和电磁相互作用力以及传播相互作用力的中间规范玻色子。与基本粒子质量起源相关的Higgs玻色子，在2012年被欧洲核子研究中心大型强子对撞机(LHC)上的ATLAS和CMS实验发现，这标志着标准模型得到了完美的检验。目前为止，对撞机实验上没有发现任何超出标准模型的新物理信号。尽管标准模型被实验精确检验，人们对强子物质和奇特态物质的形成和产生机制仍然知之甚少，这是因为强相互作用力的夸克禁闭和量子色动力学(QCD)的非微扰特性，造成理论预言与实验检验都遇到困难。

基于加速器的高亮度前沿实验，包括日本的和美国的B介子工厂，正在投入运行的日本超级B工厂Belle II和LHC上的LHCb实验，以及正运行在陶粲能区的北京正负电子对撞机(BEPCII)上的北京谱仪实验BESIII等，都是用来研究强子产生和衰变的代表性大型实验装置。它们的研究内容包括：含底夸克和粲夸克的弱衰变研究；正反物质不对称(CP不对称)的研究；强子谱学和奇特态物质的寻找等。特别是21世纪初到现在，实验发现了一系列夸克模型预言之外的非常规强子态，它们可能不是由正反夸克组成的介子，也不

是三个夸克组成的重子态，而是其他的奇特态强子物质(图1)。这些发现对于强子物质谱学提出了挑战，暗示可能存在更多不为人知的强物质结构，其背后一定有新的规律等待人们去揭示。这是本世纪强相互作用领域最热门的研究课题之一，也是人类理解强相互作用禁闭机制的一个契机。本文主要介绍我国第一个大型对撞机BEPC上北京谱仪实验的历史、发展和未来规划。

## 2 北京谱仪实验的历史与现状

新中国成立前后，正值国际上高能物理开始迅速发展的时期。然而我国粒子物理实验研究几乎一片空白，50年代初期，在云南落雪山开展的宇宙线实验研究，是新中国早期研究高能核作用以及奇异粒子产生过程和性质的实验站装置。在国际上，粒子物理实验刚刚进入第一代加速器实验阶段，并取得了丰硕的成果。1956年，我国科学家制定了第一个科学发展十二年远景规划，首次提出建立一台高能加速器的设想，以之开始我国的加速器实验物理研究。但是自1956年到1982年的27年中，高能加速器始终处于各种方案的假设和争论中，没有形成一致方案。在困难时期高能加速器研究始终得到国家领导人的关心和支持，1972年周恩来总理指示要把高能物理研究作为重点来抓。1980年底，随着改革开放的开始，邓小平同志指出“高能物理不断线”。李政道先生一直关心祖国的科学发展，1981年3月李先生在美国费米实验室召开了一个非正式的学术研讨会<sup>[1]</sup>，特别邀请了中国科学院高能物理研究所有关人员参加，同时李先生也针对性地邀请美方实验物理专家参加。在这次会议上，美国斯坦福直线加速器中心的所长潘诺夫斯基教授建议中国建造 $2 \times 2.2$  GeV正负电子对撞机方案，与会者都认为这样一台正负电子对撞机规模适中，既可以做国际前沿的高能物理研究，也兼有同步辐射应用，在当时情况下是我国在高能实验物理起步的极好选择方案，十分适合中国的国情。这一提议很快得到了国内科学家的一致支持，最终确认了BEPC的建设方案。

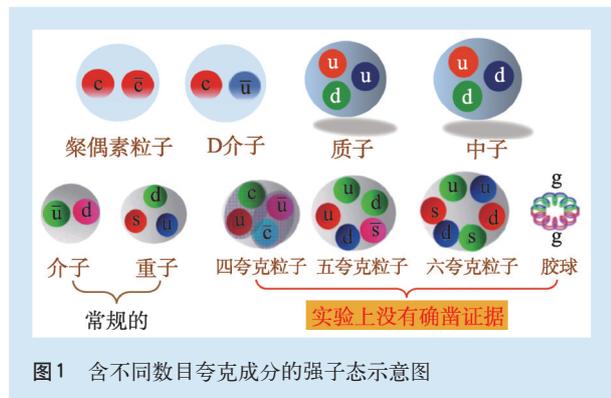


图1 含不同数目夸克成分的强子态示意图

从1984年开始,政府成立了BEPC工程领导小组, BEPC成为当时国内科技界最早最重要的大科学工程,是中国科学院高能物理研究所(以下简称高能所)最重要的一项工作任务。工程于1984年10月破土动工,至1989年7月通过国家技术鉴定,投入正式运行,用于粒子物理实验研究,同时开展同步辐射实验<sup>[2]</sup>。BEPC为我国培养了大批的加速器、探测器、电子学、大工程管理、低温、机械制造、精密仪器和相关计算机科学方面的专家学者。BEPC的建成结束了我国粒子物理没有自己的加速器设施的历史。安装在BEPC上的大型探测器装置——北京谱仪也开始了高能物理实验数据的获取。北京谱仪由多种粒子探测器以及对应的前端电子学读出系统、触发判选、在线数据获取、离线数据重建和物理分析框架系统组成。北京谱仪运行后第一个具有世界影响力的物理成果是第三代带电轻子——陶轻子质量的精确测量<sup>[3]</sup>,其测量得到的中心值比1992年以前的世界平均值低了7 MeV,而精度提高了10倍左右。这一结果解决了之前出现的三代轻子普适性破坏的“危机”,被粒子数据组选为50年来最有价值的测量之一。该结果精确检验了粒子物理标准模型的轻子普适性,是精确检验中的黄金测量。在BES一期运行期间,由于高能物理实验国际合作的需求,1991年高能所计算中心与美国斯坦福加速器中心(SLAC)实验室及国际能源超级计算中心(NERSC)建立了国内第一个网络连接,1994年5月高能所计算中心网络正式加入国际互联网和万维网。随后,北京谱仪利用获取的数据研究了含奇异夸克和粲夸克组成的 $D_s^+$ 介子的衰变常数,这是首次在阈值附近观测到实验证据。1995年夏, BEPC和BES实验开始第一次小范围的升级改造,把BEPC的对撞亮度提高了3—4倍,我们称这期间为北京谱仪实验二期(BESII)。BESII成功测量了2—5 GeV能量区间的“R值”<sup>[4]</sup>, R值是正负电子对撞产生单举强子末态和正负电子湮灭到正反缪轻子对玻恩截面的比值,这一比值可以被标准模型精确预言, BESII实验测量把R值精度提高到6%左右,这些测量对于缪轻子反常磁矩的物理解释有重要意义,同时也对当时未发

现的Higgs粒子质量给出了强有力的约束,为Higgs粒子的寻找指明了方向。在BESII上,首次观测到正反质子阈值附近的生长结构,后来在其他末态中也发现了对应的量子态 $X(1835)$ ,这一发现使得BESII实验在轻强子谱学和奇特态寻找方面迈开新的一步,这些新的可能粒子态是未被夸克模型预言的,而实验上的丰富产生,显示出我们对强物质认知的匮乏。

原来的BEPC是一台单个储存环对撞机,在储存环里只有一对正负电子束团进行对撞,因此对撞亮度较低,单环设计也限制了对撞亮度的提高。随着谱学和重味夸克衰变实验的深入研究,人们认识到在陶粲能区建造一台亮度更高的对撞机的重要性。在这种情况下,美国康奈尔大学计划把原来运行在10 GeV的CESR对撞机改造到陶粲能区工作,亮度可以达到 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这是我国原来BEPC亮度的10倍。为了提高国际竞争力,继续保持我国粲物理和强作用研究在国际上的领先地位,经过多次研讨后,我国提出要在高能所原址新建一台第二代北京正负电子对撞机,称为BEPCII<sup>[5]</sup>,采用国际先进的双储存环、大交叉角对撞和多束团对撞模式,它的设计亮度可以达到 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,比BEPC提高100倍,比美国康奈尔大学的CESR-c提高了10倍。同时与新一代BEPCII对应,我们设计制造了一台全新的北京谱仪,称为BESIII<sup>[6]</sup>。BEPCII/BESIII于2008年建成,2009年8月开始正式数据获取,到目前为止, BEPCII已经运行了10年有余,在(类)粲偶素谱学、轻强子谱学、粲介子衰变的精确测量和重子/超子物理等方面都取得了瞩目的成果,得到世界同行的关注。随着数据统计量的增加, BESIII实验获得了许多非预期的实验结果,吸引了更多的国外顶尖高能实验学家参与到BESIII国际合作组。

北京谱仪实验是改革开放以来中国与国际接轨的第一个高水平、规范化的国际合作项目。北京谱仪国际合作组的规模也从最初的中美两国10家单位不足150人发展到如今的15个国家74家单位超过500余位科学家,其中中国外科研单位几乎占一半。BESIII国际合作组已经形成一个受国际

关注的大型国际实验组，研究工作极其活跃，每年收到高能物理各个领域的国际大型会议邀请数百次，每年发表重要实验数据论文达到40余篇，其中五分之一的论文发表在 *Physics Review Letters* 杂志上。

### 3 实验设施

BEPCHII 在 2004 至 2008 年进行了重大升级改造，加速器采用了双环、多束团方案，对撞亮度提高 100 倍；BESIII 实验全新建造的谱仪采用了超导磁铁、全吸收型电磁量能器，性能大幅提升。

#### 3.1 北京正负电子对撞机

BEPCHII 是双环多束团对撞机<sup>[5]</sup>，由三大部分构成，包括正负电子注入器、束流输运线和粒子



图2 BEPCHII的整体布局

表1 BEPCHII的主要性能参数

参量	指标(对撞模式)	单位
束流能量	1—2.3(~2.45)	GeV
设计亮度( $E_{\text{beam}} = 1.89 \text{ GeV}$ )	$1 \times 10^{33}$	$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
射频频率	499.8	Hz
射频电压	1.5	MV
对撞周期	8	ns
储存环长度	237.53	m
数团数目	93	
数团交叉角	$2 \times 11$	mrad
注入能量	1.55—1.89	GeV
正电子注入速率	50	mA/min

束团储存环，如图2所示。安装在地下隧道里的正负电子注入器是总长为202 m的直线加速器，可以将正负电子的能量提高到2.3 GeV。北京正负电子对撞机中的电子( $e^-$ )由电子枪产生，正电子( $e^+$ )由电子束轰击约1 cm厚的钨靶产生。经过直线加速器加速的正负电子由束流输运线分别注入到不同的储存环中。这两个储存环是两个周长为240 m的环形加速器，正负电子束团分别在储存环中加速和积累，最后在对撞点对撞。双储存环方案可以增加每个储存环中束团的个数，从而直接提高正负电子对撞的亮度。由于空间位置的限制，双环结构导致了碰撞时正负电子的动量方向存在22 mrad的夹角。表1列举了北京正负电子对撞机的主要性能参数。

2016年4月5日，BEPCHII在质心能量3.773 GeV达到设计对撞亮度 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了挖掘潜力，BEPCHII从两方面做了进一步的改进。一是采用所谓“topup”模式，即在储存环正负电子对撞的同时，保持正负电子的持续注入，使束流流强始终维持在最高水平，而不是之前的“注入—对撞—衰减—再注入”模式，因而使得积分亮度提高约30%；二是提高束流能量，BEPCHII设计束流能量最大为2.3 GeV，相应的对撞质心能量4.6 GeV不足以研究粲重子物理及寻找新的(类)粲偶素，为此加速器更新了储存环偏转磁铁，使束流能量提高到2.45 GeV，质心能量达到4.9 GeV，有效拓展了BESIII物理研究的范围。

#### 3.2 北京谱仪 BESIII

北京谱仪 BESIII 是一台大型通用磁谱仪<sup>[6]</sup>，安装在 BEPCHII 的南对撞点上。当正负电子在对撞点对撞产生的末态粒子穿过北京谱仪的各个部分并发生相互作用时，相应的电子学信号被记录下来，经过刻度和重建得到动量、能量、质量和位置等参数，进而识别这些末态粒子的种类并还原真实物理过程，最终研究和总结支配这些物理过程的基本规律。

BESIII 探测器系统由多个子探测器组合而成，布局 and 几何尺寸如图3所示(整个探测器沿束流管

旋转对称)。由内到外依次为束流管、主漂移室(MDC)、飞行时间探测器(TOF)、电磁量能器(EMC)、超导螺线管磁体和缪子鉴别器(MUC)。北京谱仪经过设计、建造和调试,各个子探测器的实际性能均达到或优于设计值,如表2所示。

BEPCCII/BESIII位于中国科学院高能物理研究所北京玉泉路园区,高能所作为北京正负电子对撞机国家实验室宿主单位是项目设计、建设和运行维护的主力,同时高等院校也发挥了重要作用,共同促进了中国高能物理事业的发展。例如,中国科学技术大学作为唯一参与BESIII探测器建造的高校,完成了亮度监测器和端盖飞行时间探测器的设计、研制、建造和升级,独立完成了部分电子学的设计建造。依托BESIII实验,在高能所和高校的共同努力下,中国高能物理研究从点到面、星火燎原,队伍从小到大、从弱到强,不仅实现了占有一席之地的小目标,在有些方面甚至独领风骚。

#### 4 北京谱仪实验物理亮点

BESIII实验运行的对撞能量范围为2.0—4.9 GeV,如图4所示,正是微扰与非微扰的过渡区域,可以通过阈值附近的产生过程,研究不同类型的粒子<sup>[7]</sup>,检验电弱理论和理解强相互作用QCD,进而精确检验标准模型。BESIII在前两代谱仪丰硕成果的基础上,继续开展相关的实验研究,并有重要突破,推动了对物质基本结构的进一步理解。在陶轻子质量方面,BESIII进一步提高测量精度;在R值测量方面,BESIII开展了专门的细致扫描,显著改善了测量精度。在传统的含有两个夸克的介子和含有三个夸克的重子方面,通过在阈值附近产生高统计量的粲偶素粒子、粲介子和粲重子数据,精细研究它们的衰变性质以及涉及的基本相互作用机制;对于QCD预

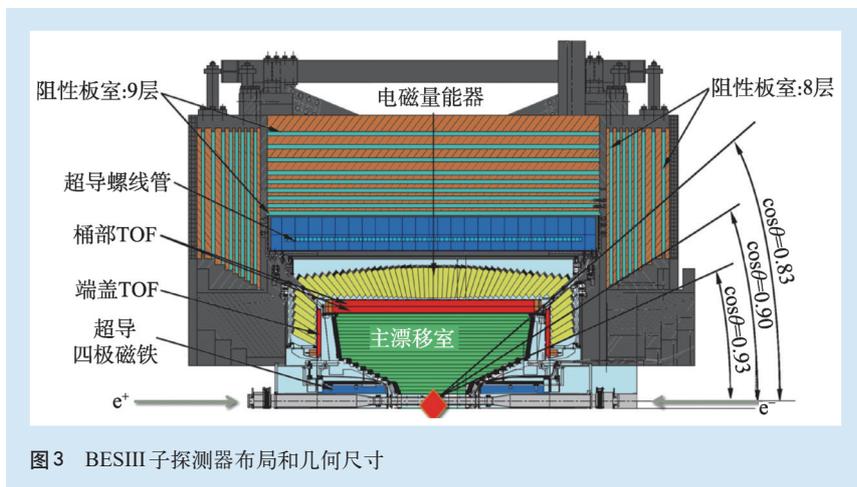


图3 BESIII子探测器布局和几何尺寸

表2 BESIII各子探测器的设计性能和实际性能的对比

子探测器	参量	设计性能	实际性能
主漂移室	位置分辨	120—150 μm	115 μm
	动量分辨率	0.5%—0.7% (1 GeV)	0.7% (1 GeV)
	dE/dx分辨率	6%—8%	5.8%
电磁量能器	能量分辨率	2.5%—3.0%	2.3%
飞行时间探测器	时间分辨(桶部)	100—120 ps	68 ps
	时间分辨(端盖)	100—120 ps	65 ps
μ子鉴别器	位置分辨	1.4—1.7 cm	1.5 cm

言的多夸克态(如四夸克粒子和胶球等强子态,由于实验上尚未被确认,寻找这些奇特态粒子是国际上强子物理研究的重要方向,可检验和发展QCD相关理论模型,北京谱仪在这些方向上成果显著。现将其中主要的研究成果介绍如下<sup>[8]</sup>。

##### 4.1 陶轻子质量测量

轻子最初的含义是质量小,例如电子(e)的质量仅约为质子(p)的两千分之一,因此分别被称为轻子和重子。现在我们知道,轻子有三代,电子是第一代;缪子(μ)为第二代,其质量约为电子的200倍;本节讲述的陶子(τ)则为第三代,其质量接近质子的2倍。按照标准模型,轻子是不参与强相互作用的费米子。

三代带电轻子虽然质量差别巨大,但理论上认为其参与弱相互作用的性质是相同的,此为轻子普适性原则。科学的描述是,三代轻子与弱相

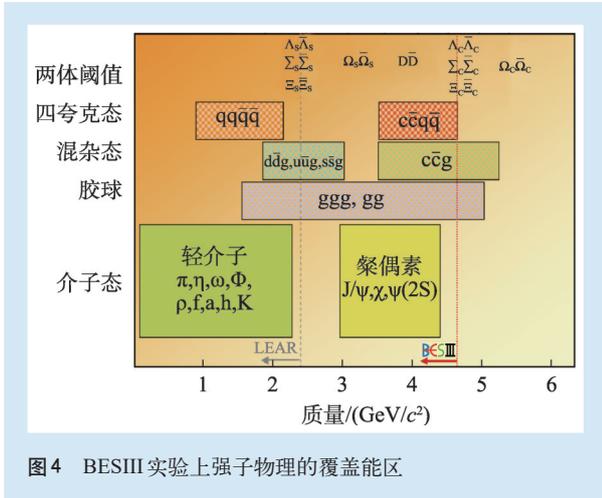


图4 BESIII 实验上强子物理的覆盖能区

相互作用传播子  $W^\pm$  带电流的耦合没有差别，即有一个共同的普适耦合常数  $g(=g_c=g_\mu=g_\tau)$ 。两个纯轻子衰变过程  $\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau$  和  $\mu \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\mu$  都是通过与  $W^\pm$  带电流的耦合实现的，理论上其耦合常数与衰变分支比的关系为

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{\tau_\mu}{\tau_\tau} \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5 \frac{B(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau)}{B(\mu \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\mu)} (1 + \Delta_c). \quad (1)$$

其中  $g_\tau$  和  $g_\mu$  分别表示带电流作用顶点的耦合常数， $\tau_\tau$  和  $\tau_\mu$  分别为  $\tau$  和  $\mu$  的寿命， $B(\tau \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\tau)$  和  $B(\mu \rightarrow e\bar{\nu}_e\nu_\mu)$  表示相应过程的衰变分支比， $\Delta_c$  表示修正因子。上述公式含有质量的五次方项，因此质量的精确测量对于轻子普适性检验非常重要。

在20世纪90年代初，根据当时的实验数据上述比值为  $0.941 \pm 0.025$ ，与轻子普适性预言偏离2.4倍标准偏差。彼时陶子质量测量世界平均值为  $1784.1^{+2.7}_{-3.6}$  MeV，精度较差，被怀疑是问题的根源。北京谱仪抓住这一历史机遇，于1991年11月18日开始 $\tau$ 质量测量实验，历时40天，至1991年12月28日结束，在12个能量点扫描取数。BES合作组通过分析  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 、 $\tau^+ \rightarrow \mu^+(e^+)\nu_\mu(\nu_e)\bar{\nu}_\tau$ 、 $\tau^- \rightarrow \mu^-(e^+)\bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_e)\nu_\tau$  衰变链，得到  $m_\tau = 1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.21$  MeV，比世界平均值低7.2 MeV，由此计算的普适性偏离减小到1.7倍标准偏差。其后BES合作组综合分析了陶子的6种衰变模式( $ee$ 、 $e\pi$ 、 $\mu\mu$ 、 $\mu h$  和  $hh$ ，其中  $h$  代表  $\pi^\pm$  或  $K^\pm$ )，给出了更精确的结果  $m_\tau = 1776.9^{+0.18+0.25}_{-0.21-0.17}$  MeV，结合其他改进的测量结果，普适性偏差进一步减小到1.3倍标

准偏差。这项工作被视为解决了粒子物理学的一个危机。

BES合作组的陶子质量测量精度领先世界十余年，开启了精确测量的新时代，被粒子数据组当作50年来高能物理的最重要实验数据之一。进入21世纪，经过重大升级改造的BEPCH/BESIII开始了超越自我的新挑战，在陶子质量测量方面把目标设定为将精度再提高一倍，使误差从0.2 MeV(世界平均值)减小到0.1 MeV(单个实验)，这是一项非常艰巨的任务。

在扫描法陶子质量测量实验中，系统误差的主要来源是加速器束流能量的不确定性，为此专门建造了高精度的束流能量测量系统。其原理是通过测量激光与正负电子碰撞产生的逆康普顿散射光子的能量，精确测定正负电子束流能量，精度达到  $2 \times 10^{-5}$ ，为各类高精度测量奠定了坚实的硬件基础。

结合理论预期，新的陶子质量测量优化了取数方案，以较少的数据点实现更高的精度。2011年底，BESIII进行了试验性扫描，得到  $m_\tau = 1776.91 \pm 0.12^{+0.10}_{-0.13}$  MeV，是迄今为止最精确的结果。由此得到耦合常数比值  $1.0016 \pm 0.0042$ ，在0.4个标准偏差的水平上验证了轻子普适性。正式陶子质量阈值附近的精细扫描于2018年4月14日至5月3日进行，历时20天，实验取得圆满成功，数据分析仍在严谨而有序地开展，预期能够得到更高的精度。在可预见的未来，BESIII将继续保持在陶轻子质量测量方面的领先优势。

#### 4.2 R 值精确测量

$R$  值是正负电子对撞产生强子(hadrons)的零阶总截面与产生  $\mu^+\mu^-$  轻子对的零阶截面之比：

$$R = \frac{\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma^0(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}. \quad (2)$$

其中  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  零阶截面可由量子电动力学(QED)理论计算得出，所以  $R$  值测量实际上就是强子产生总截面的测量。 $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$  过程的本质是正负电子湮灭产生正反夸克对  $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ，由于轻子和夸克都是最基本的费米子，上述两个

产生过程有相同的物理机制，其截面之间存在简单的关系，取决于夸克的电荷及种类数(包括味道与颜色)，即

$$R = C \sum_f Q_f^2 / Q_\mu^2 = C \sum_f Q_f^2 \quad (3)$$

其中  $C$  表示夸克的颜色种类数，夸克有红、绿、蓝三种颜色即  $C=3$ ； $Q_f$  是味道为  $f$  的夸克携带的电荷量，其绝对值为  $1/3$  或  $2/3$ ，夸克共有 6 种味道，能够产生多少味道种类的夸克取决于对撞的质心能量；缪子的电荷量  $Q_\mu$  为单位电荷。(3) 式表明在零级近似下  $R$  值等于在特定能量所能产生的所有种类夸克的电荷的平方和，所以  $R$  值随能量变化表现为阶梯式的平台：随着新的味夸克产生阈的打开， $R$  值会出现跳变。由于对称性要求而引入的夸克颜色量子数在早期是受到强烈质疑的， $R$  值测量实验结果为此提供了有力证据。

$R$  值是重要的基本物理量，对粒子物理标准模型的发展和精确检验具有非常重要的意义。由于低能区(5 GeV 以下)微扰 QCD 不适用，在电弱理论的精确计算中，涉及到强相互作用的贡献都需要用强子产生截面(即  $R$  值)作为基本输入参数，其中最典型的例子如电磁跑动耦合常数  $\alpha(s)$  和缪子反常磁矩  $(g_\mu - 2)$  的理论计算，都强烈依赖于低能区的  $R$  值。

从强子产生阈到  $Z^0$  中间玻色子(质量约为 91 GeV)对应能标的能量范围内，世界上许多实验组都进行过  $R$  值测量，但在不同能区， $R$  值的测量误差有很大的差别，在 10 GeV 以上高能区精度接近于 1%，在低能区则误差较大，尤其是在北京谱仪工作的 2—5 GeV 能区，此前其他实验组给出  $R$  值的不确定性为 15%—20%。由于理论计算的输入是以  $R$  值的积分形式出现，所以  $R$  值测量通常以一定能量间隔在多个能量点进行，故称为“扫描”测量。

1998 年春季北京谱仪 BESII 开始运行， $R$  值测量是第一个物理课题，第一轮  $R$  值扫描持续时间约一个月，在连续能区的 6 个能量点获取了数据，总积分亮度  $0.928 \text{ pb}^{-1}$ 。1999 年春季 BESII 进行了第二轮细致扫描测量实验，历时约四个月，能量范围 2.0—4.8 GeV，取数能量点 85 个，每个

能量点的强子事例数 1000 个左右，总积分亮度  $4.64 \text{ pb}^{-1}$ 。2004 年，BESII 在 2.6 GeV、3.07 GeV 和 3.65 GeV 的 3 个能量点获取了较大统计量的  $R$  值测量数据，积分亮度达到  $10 \text{ pb}^{-1}$ 。

BESII 将 2—5 GeV 能区  $R$  值的测量误差从 15%—20% 降低到平均 6.6%，是中国对高能物理研究的一个重要贡献。图 5 显示了 5 GeV 以下能区  $R$  测量情况。BESII 的  $R$  值测量结果对粒子物理标准模型精确检验意义重大，2—5 GeV 能区测量精度提高 2—3 倍被称为“北京革命”。引入 BESII 测量结果以后，来自 5 种较轻夸克的贡献  $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(M_Z)$  的理论计算值由  $0.0280 \pm 0.0007$  变为  $0.02761 \pm 0.00036$ ，相应地 2—5 GeV 能区的  $R$  值对  $\Delta\alpha(M_Z)$  的误差贡献从超过 50% 减小到 30% 左右。这一改进使 Higgs 粒子的理论拟合质量从  $62_{-30}^{+53} \text{ GeV}$  变到  $98_{-38}^{+58} \text{ GeV}$ ，质量上限从 170 GeV 变到 210 GeV，这样才与当时欧洲核子中心大型正负电子对撞机(LEP2)实验对 Higgs 粒子的寻找结果不矛盾。与此类似，此前  $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$  的实验值  $a_\mu(\text{exp}) = 11659203(15) \times 10^{-10}$  与标准模型预言值  $a_\mu(\text{SM}) = 11659159.6(6.7) \times 10^{-10}$  之间存在 2.6 倍标准偏差( $\sigma$ )的差别，采用 BESII 的  $R$  值做输入，其中强相互作用相关部分  $a_\mu^{\text{had}}$  由  $(696.7 \pm 15.6) \times 10^{-10}$  变为  $(698.75 \pm 11.1) \times 10^{-10}$ ，从而使得  $a_\mu$  的理论值与实验值的差别小于  $1.5\sigma$ ，在当时被视为解决了一个危机。由于 BESII 上  $R$  值对标准模型精确

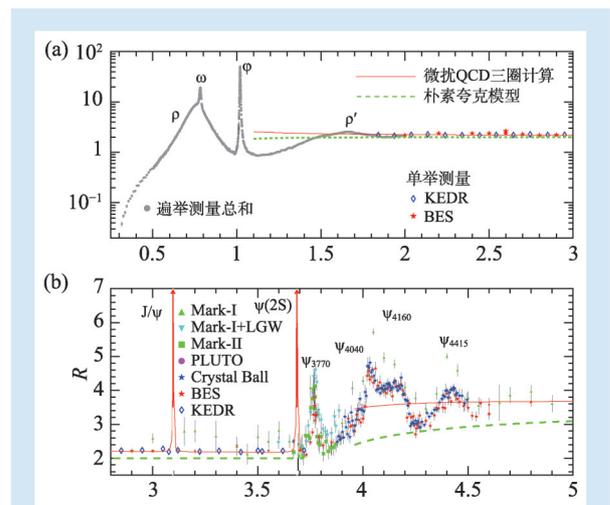


图5 5 GeV 以下能区 BESII 上  $R$  测量与其他实验组的比较<sup>[9]</sup>

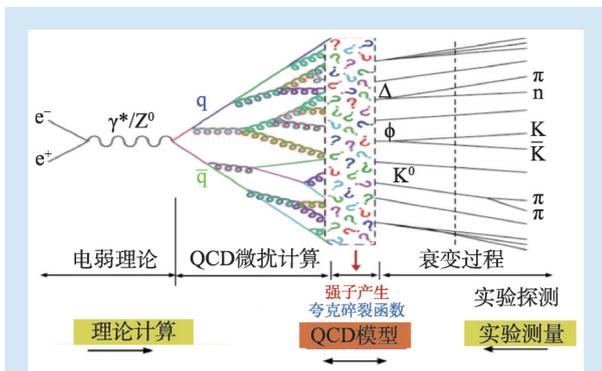


图6 正负电子湮灭过程中通过夸克碎裂到强子的产生示意图

检验的重要贡献，其物理价值被认为相当于 LEP2，因为规模巨大的 LEP2 直至使命结束也未能找到 Higgs 粒子，只是给出了大致的质量范围。此外，BESII 上  $R$  值结果，对于 LEP2 停止运行转向大型强子对撞机 LHC 开工建设起到了重要的推动作用。

之后 BESIII 继续开展  $R$  值测量工作，目标是使测量精度再提高一倍左右，即误差降低到  $\sim 3\%$ 。按照三阶段实验规划，2012 年夏天首先进行了  $R$  值扫描试运行，用了 8 天时间在 4 个能量点 2.2324 GeV、2.4 GeV、2.8 GeV 和 3.4 GeV 获取了  $12 \text{ pb}^{-1}$  数据；随后 2013 年底至 2014 年初历时一个半月完成了重粲能区 3.85—4.6 GeV 精细扫描，取数能量点 104 个，总积分亮度约  $800 \text{ pb}^{-1}$ ；2015 年初又历时 4 个月完成了低能区 2.0—3.08 GeV 扫描，取数能量点 21 个，总积分亮度约  $525 \text{ pb}^{-1}$ 。由于 BEPCII 亮度提高约 100 倍，BESIII 获取的数据统计量是空前的，每个能量点的强子事例数至少在 10 万以上， $R$  值测量精度将再次得到显著改善。

### 4.3 强子产生和强子结构

在粒子物理标准模型中，强子的产生在高能量区可以用 QCD 微扰展开计算精确地描述，但在低能量的非微扰能区无法进行可靠的计算，需要用 QCD 因子化模型下的碎裂函数来描述，函数的参数则利用实验测量数据来标定。BESIII 实验正好处于微扰和非微扰的过渡能区，可以通过正负电子湮灭过程测量单举强子产生对应的碎裂函数(如

图 6 所示)，用于刻度 QCD 的因子化模型，深入理解 QCD 理论在高能标和低能标之间的演化行为。

在 BESIII 实验上可以在 2.0—4.9 GeV 范围内测量碎裂函数，这些碎裂函数结合核子的深度非弹性散射实验数据，可以研究核子的结构分布和自旋来源。例如我们并不清楚核子内部这些夸克和胶子的具体分布行为，特别感兴趣的是内部的夸克和胶子如何形成总自旋为  $1/2$  的核子。与核子中横极化分布相关的 Collins 碎裂机制阐述了核子中横极化的夸克在真空中转化为强子后的物理效应，对它的测量提供了理解强相互作用动力学的重要数据。BESIII 实验上利用  $e^+e^-$  湮灭数据，在 3.65 GeV 能量处通过测量带电  $\pi$  介子对产生  $e^+e^- \rightarrow \pi\pi X$  过程，观测到了  $\pi$  介子对之间由 Collins 效应带来的方位角分布的不对称性。BESIII 实验测量的不对称度与深度非弹散射实验数据联合分析，可以提取核子内的横向极化分布。与日本的 Belle 实验和美国的 BaBar 实验的相关分析相比，BESIII 数据与深度非弹散射实验数据能量更接近，能有效压低联合分析的能量演化不确定性。

正负电子湮灭还可以研究产生特定强子末态的过程，不仅直接提供了强子产生的动力学信息，而且是揭示强子结构的有效途径，强子产生截面随能量演化的谱形还可以直观地展现是否存在新的粒子态。强子内部的电、磁结构可以用形状因子描述，它是普通空间电磁分布在动量空间的变换，有结构粒子的产生截面不同于类点粒子，这种偏离就体现为形状因子，可从实验上测量产生强子的角分布得到。BESIII 利用大统计量的  $\psi(3770)$  数据采用初态辐射技术测量了质心能量 600—900 MeV 之间  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  的产生截面，并提取了  $\pi^+$  的形状因子，该截面数据是缪子反常磁矩  $a_\mu$  理论计算的重要输入量；利用质心能量 2—3.08 GeV 的对撞数据，测量了  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ 、 $K^+K^-\pi^0\pi^0$ 、 $K^+K^-K^+K^-/\phi K^+K^-$  等反应过程的截面，从相应的截面谱形中发现几个未知的共振态，可能与奇异夸克偶素有关，如  $\phi(2170)$ 。

重子的内部结构是 BESIII 的一个重要研究课题。核子(包括质子和中子)是最轻的重子，是组成普通物质世界的基本单元，但其基本性质如半

径、自旋、磁矩等尚未被完全认识。北京谱仪运行的能量范围覆盖所有自旋1/2八重态重子和自旋3/2十重态重子，因此是重子研究的理想场所。重子对的产生截面理论上可以计算，由于相空间和库仑相互作用的共同因素，在产生阈值附近中性重子对的截面为零而带电重子对的截面为非零的常数。对于核子的情况，以往的实验显示质子—反质子在阈值附近截面不为零，而中子—反中子则缺乏实验数据，BESIII以前所未有的精度发现二者在阈值附近的截面皆不为零，给理论带来了挑战。BESIII测量了质子的有效形状因子、电磁形状因子比值、磁形状因子并首次测量了电形状因子；测量了中子的有效形状因子并首次测量了电磁形状因子比值。对于更重的中性超子对  $\Lambda\bar{\Lambda}$  和带电超子对  $\Lambda_c^+\Lambda_c^-$ ，BESIII首次发现其产生截面在阈值处均呈现阶跃式的跳变(图7)，这些奇特现象用现有理论尚无法解释，表明低能强子产生机制依然是未解之谜。

#### 4.4 重子对阈值附近的新结构

自BESII实验以来，利用高统计量的  $J/\psi$  辐射跃迁衰变数据，发现了一系列新的共振结构。2003年BESII实验在  $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$  过程中，首次发现了质子—反质子阈值奇特增强结构 X(p $\bar{p}$ )，质量约为1860 MeV，宽度小于30 MeV；2005年BESII实验在  $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\eta'$  中发现新共振结构 X(1835)。由于它们质量相近，但均与夸克模型预言的介子激发态不相符，激发了国际理论和实验的广泛研究兴趣，被认为可能是重子—反重子分子态或六

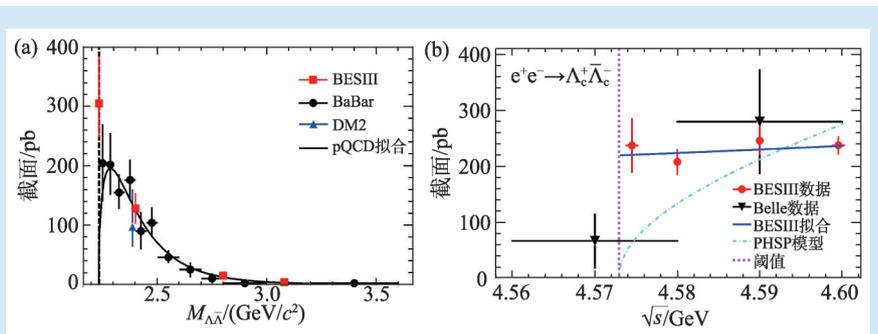


图7 (a)  $e^+e^- \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$  和(b)  $e^+e^- \rightarrow \Lambda_c^+\Lambda_c^-$  两过程的截面谱形，虚线指示产生阈值

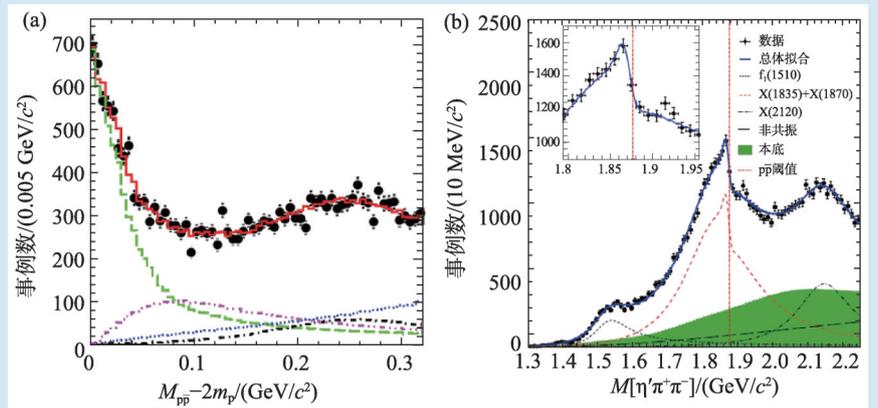


图8 在  $J/\psi$  辐射衰变中质子—反质子阈值增强结构 X(p $\bar{p}$ ) (a) 和  $\eta'\pi^+\pi^-$  质量谱上拟合 X(1835) (b)

夸克态等奇特强子态的候选者。

BESIII利用更高统计量的  $J/\psi$  数据，重新细致分析了  $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$  和  $\gamma\pi^+\pi^-\eta'$  过程，进一步确认了 X(p $\bar{p}$ ) 和 X(1835) 的存在(图8)，并测量自旋—宇称量子数为  $0^+$ 。同时在更高统计量  $\pi^+\pi^-\eta'$  不变量谱上清楚地看到在质子—反质子对质量阈值处有共振线形的突变，揭示了 X(p $\bar{p}$ ) 和 X(1835) 之间的关联。另外在  $J/\psi \rightarrow \gamma\omega\phi$ ， $\gamma 3(\pi^+\pi^-)$ ， $\gamma K_S K_S \eta$ ， $\omega\eta\pi^+\pi^-$  和  $\gamma\gamma\phi$  等过程中，发现了质量和宽度接近 X(1835) 的共振参数的结构，对进一步理解 X(p $\bar{p}$ ) 和 X(1835) 的性质有重要帮助。另外，BESIII利用精细的能量扫描数据和高能量数据的初态辐射事例，研究了质子—反质子和  $\Lambda-\bar{\Lambda}$  超子对质量阈值附近的产生截面，发现在这些正反粒子的阈值处均出现了出人意料的突然增强结构，也非常有可能是六夸克态或者重子—反重子的分子态等强子态。虽然目前理论上还很不清楚它们的真正来源，但BESIII实验无疑将对理解其性质扮演主导角色。

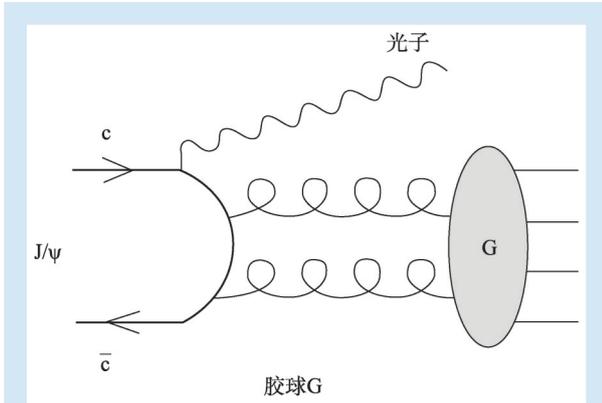


图9 J/ψ 辐射衰变到胶球 G 的过程示意图

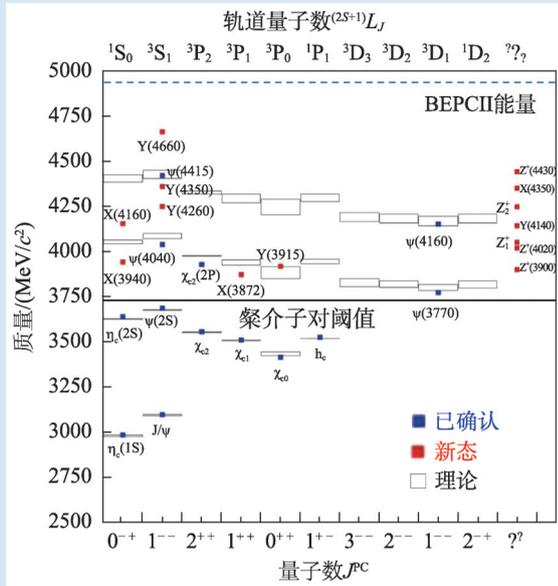


图10 粲偶素家族谱系

### 4.5 寻找胶球

QCD理论中，胶子之间有自相互作用，可以形成束缚态——胶球(图1)，这是强相互作用的重要特征。寻找胶球是对强相互作用的直接检验，对于研究胶子场和理解夸克禁闭有重要意义。根据格点QCD计算，自旋为0的偶宇称的标量胶球质量在1.5—1.7 GeV，自旋为2的张量胶球在2.3—2.4 GeV，自旋为0的奇宇称赝标量胶球质量在2.3—2.6 GeV。由于普通量子数的胶球很难和普通含两夸克的介子的性质区分，这为确切判断一个胶球带来很大挑战，需要通过研究其产生和衰变的多种信息，并与普通介子态进行比较，联合确定。如图9所示，J/ψ 的辐射衰变被认为是胶

球大量产生的场所，BESIII实验积累了国际上统计量最高的100亿J/ψ数据，利用这一过程可以系统开展寻找胶球的工作。BESIII实验发表了J/ψ辐射跃迁到ηη和K<sub>s</sub>K<sub>s</sub>的分波分析结果，均发现了显著的f<sub>0</sub>(1710)态；在J/ψ→γπ<sup>0</sup>π<sup>0</sup>的模型无关振幅分析中，也看到1.7 GeV处的0<sup>+</sup>增强结构。此外，在以上过程的研究中也看到了质量约为2.1 GeV的f<sub>0</sub>激发态，也可能含有标量胶球成份。BESIII实验在J/ψ辐射衰变ηη、K<sub>s</sub>K<sub>s</sub>和φφ中，观测到一个可能的张量胶球候选态f<sub>2</sub>(2340)；在J/ψ辐射衰变π<sup>+</sup>π<sup>-</sup>η<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>K<sup>-</sup>η<sup>+</sup>中发现了X(2120)和X(2370)，也均为赝标量胶球的候选态。以上成果都处于国际胶球研究的前沿，为确认胶球和深入了解胶球的性质做出了重要贡献。目前对这些共振态的性质还没有确切结论，需要进一步开展更高统计量、更多衰变末态的系统性研究，尤其还要跟理论计算，包括格点QCD计算结合，最终揭示它们的本质。

### 4.6 粲夸克偶素性质

1974年，丁肇中和里克特分别领导实验组发现了第一个粲偶素粒子J/ψ，包含正反粲夸克c $\bar{c}$ ，这揭开了粲偶素家族研究的新篇章。图10给出了当前粲偶素粒子的理论和实验的情况。BESIII实验在峰值获取了世界上统计量最高的100亿J/ψ数据和5亿ψ(2S)数据，可以研究粲介子对阈值以下粲偶素态的性质，这些研究包括：(1)精确测量粲偶素h<sub>c</sub>辐射跃迁到η<sub>c</sub>的分支比；(2)首次发现ψ(2S)辐射跃迁到η<sub>c</sub>(2S)；(3)精确测量η<sub>c</sub>(1S)的质量和宽度；(4)粲偶素通过双电子e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>的电磁达利兹衰变到更轻的粲偶素或者无粲轻强子。这些研究结果对理解夸克模型中正反粲夸克间的色禁闭和相互作用势的性质有促进作用。

在高于粲介子对阈值之上，实验上发现了大量的类粲偶素的候选态(图10)，由于其中很多新的类粲偶素态与夸克模型预言的粲偶素家族粒子并不完全相符，仍需要进一步研究，因此被称为

XYZ 态, 其中带电的被称为 Z 态, 不带电荷的则被称为 X 和 Y 态。BESIII 实验在 4.0—4.7 GeV 能量以上获取了约  $20 \text{ fb}^{-1}$  亮度的实验数据, 可以细致研究 XYZ 态的性质, 完善我们对粲偶素家族粒子的细致理解<sup>[8]</sup>。

#### 4.7 寻找四夸克态

强子态是夸克和胶子通过强相互作用组成的束缚态, 它的性质体现了夸克和胶子间的相互作用性质。实验上寻找和确认奇特的四夸克态对理解强子结构和夸克禁闭有重要意义。2013 年, BESIII 实验在 4.26 GeV 附近分析了  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  过程, 发现了一个新的类粲偶素的共振结构  $Z_c(3900)^+$ , 衰变到  $\pi^+J/\psi$  末态(图 11)。因为其电量为  $+e$ , 且内部含有一对粲夸克和反粲夸克, 所以内部至少含有  $u\bar{d}c\bar{c}$  的四夸克成份, 这很可能是科学家们长期寻找的四夸克态粒子。同年 BESIII 又在同样能量点上在  $D^+\bar{D}^{*0}$  和  $\pi^+h_c$  的两种衰变模式下发现了另一个新的四夸克候选态  $Z_c(4020)^+$ , 并新发现了  $Z_c(3900)^+$  衰变到  $(D\bar{D})^+$  末态, 而这个新的  $Z_c(4020)$  很可能是  $Z_c(3900)$  对应的质量较高的激发态。国际物理学界高度评价了 BESIII 上的这一系列发现, 比如在美国物理学会主编的 *Physics* 杂志公布的 2013 年 11 项国际物理领域重要成果中, “发现四夸克物质” 位列榜首。此后 BESIII 又积累了更多实验数据, 并利用详尽的分波分析技术, 精细测量了  $Z_c(3900)$  的质量和宽度, 并确定了其自旋—宇称量子数为  $1^+$ 。

此外, BESIII 实验在 4.26 GeV 附近开展了正负电子湮灭截面的精细扫描, 在多个含粲强子产生的过程截面上发现此前已知的类粲偶素态 Y(4260) 并非简单的单峰结构, 很可能是两个

共振结构叠加的, 为进一步理解 Y(4260) 性质提供了重要的数据; 同时在 4.26 GeV 上首次发现了辐射产生 X(3872) 的过程, 并发现了 X(3872) 新的衰变模式  $X(3872) \rightarrow \pi^0\chi_{c1}$  和  $\omega J/\psi$ 。利用高统计量的直接产生机制, BESIII 在奇特强子态研究方面成为了国际上极具特色的重要前沿实验设施。

#### 4.8 粲强子衰变性质精细测量

在标准模型中, 粲量子数在强作用和电磁作用中是守恒的, 这导致基态的粲介子和粲重子(图 12 中  $D^0/D^+/D_s^+$  和  $\Lambda_c^+$ ) 只能通过弱作用衰变。粲夸克的寿命正比于弱作用常数(费米常数)和 CKM 矩阵乘积的平方, 研究含粲介子或者含粲重子的衰变对于理解粲夸克弱衰变有重要意义, 更重要的是含粲强子的衰变, 特别是纯轻子和半轻子衰变过程(比如  $D_s^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$ ,  $D^+ \rightarrow K^-e^+\nu_c$  等), 对于理解初末态强子内部夸克强相互作用机制有不可替代的作用。在纯轻子衰变中精确测量带电粲介子的衰变常数( $f_{D^+}/f_{D_s^+}$ ), 以及在半轻子衰变中精确测量粲介子和粲重子跃迁形状因子都是 BESIII 的亮点工作, 也是检验格点 QCD 的黄金过程, 这些实

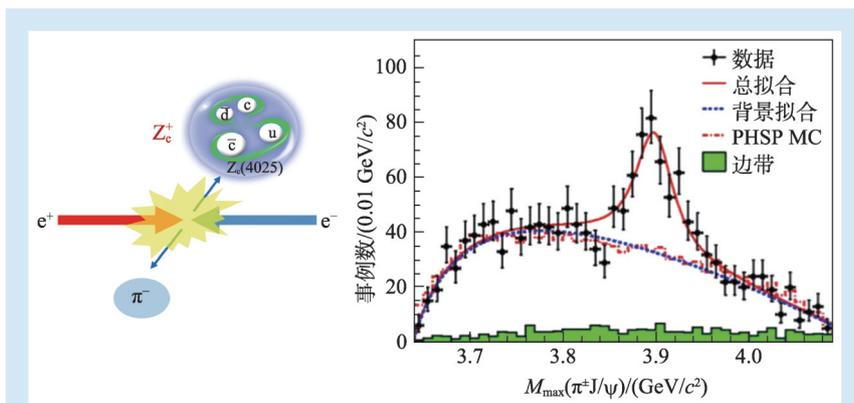


图 11 四夸克态  $Z_c$  产生示意图

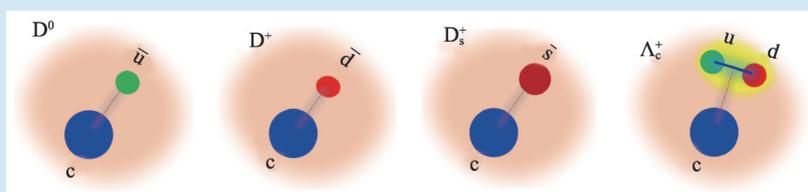


图 12  $D^0/D^+/D_s^+$  和  $\Lambda_c^+$  强子的夸克成分示意图

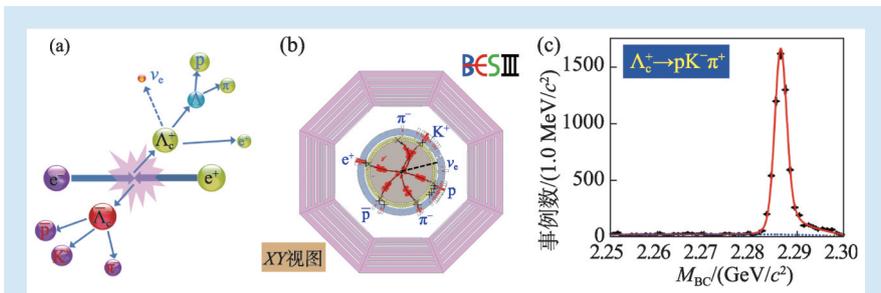


图 13 (a) BESIII 实验上  $\Lambda_c^+$  对产生和衰变反应示意图; (b)  $\Lambda_c^+$  对衰变后在 BESIII 探测器内留下的径迹; (c)  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$  的重建信号

$D^0$  介子衰变到电荷—宇称本征强子末态  $K_s^0\pi^+\pi^-$  的强相差实验测量，可以将含底夸克介子衰变中 CP 破坏相位测量的系统误差降低至约  $1^\circ$  甚至更低的水平，对 LHCb 和 Belle II 实验的 CP 破坏相位测量至关重要。而未来进一步升级的 LHCb 实验强烈地

依赖 BESIII 未来更进一步的强相对相角的精确测量，这是 BESIII 实验对重味物理 CP 破坏测量的重要贡献。BESIII 可以同时测量粲介子和粲重子强子末态衰变分支比作精确测量，这些精确测量为标准模型预言粲强子衰变中的 CP 不对称提供重要的实验输入，使得标准模型的预言变得更为精确，从而可以与实验做比较，来检验 CP 破坏的来源和可能的物理的贡献。

实验上发现首个含粲夸克的重子  $\Lambda_c^+$  是在 20 世纪 70 年代末，夸克成份为  $udc$ ，是质量最轻的含粲重子。但实验上关于  $\Lambda_c^+$  的衰变性质研究非常有限，很多重要的衰变过程完全没有实验数据，已经测量的衰变道的精度也很差，这造成了粲重子相关理论模型发展缓慢。2013 年 BESIII 实验首次在  $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  对的阈值能量 4.6 GeV 处获取了 10 万对  $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  事例，开展了模型无关的  $\Lambda_c^+$  衰变分支比的绝对测量(产生示意图如图 13 所示)。由于  $\Lambda_c^+$  在阈值处产生，因此测量具有很多独特优势：产额高、本底低、系统误差小且可以利用阈值动力学约束。基于这批数据，BESIII 实验取得了许多领先的研究成果：(1) 世界上首次在阈值上精确测量了  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$  的绝对分支比，精度达到 6%，与当时 Belle 结果精度相当，比之前世界平均值的精度提高 5 倍。同时另外 11 个强子衰变分支比的精度比世界平均值提高 3 到 6 倍；(2) 利用双标记和丢失中微子质量的方法，世界上首次直接测量了含轻子末态的衰变  $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+ \nu$  和  $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \mu^+ \nu$  的绝对分支比，精度大大好于之前通过间接方法测量的结果；(3) 利用丢失中子质量方法，首次发现了  $\Lambda_c^+$  衰变到含中子末态的过程  $\Lambda_c^+ \rightarrow nK_s^0\pi^+$ 。BESIII 实

验研究是强子物理乃至重味物理学的核心课题。北京正负电子对撞机可以运行在各种粲介子对和粲重子对的阈值附近，在阈值附近仅仅可以产生粲强子对，没有其他任何多余粒子产生，利用这一特性实验上可以用单标记技术，完整地重建一个粲介子或者粲重子，得到其中一个粲粒子的四动量，因为初态正负电子的四动量已知，我们可以知道另外一个粲粒子的四动量。也就是说，正负电子在粲强子对产生阈值附近对撞，我们可以得到一束四动量已知的“粲粒子束流”，从而研究其衰变。这允许我们研究粲粒子到含有不可见粒子末态的衰变过程，如前所讲的含有中微子末态的纯轻子和半轻子衰变过程。标记一个粲粒子，观测另外一个粲粒子衰变就叫做“双标记”技术，它允许我们研究粲强子衰变的绝对分支比，“绝对”的含义是不依赖于实验的对撞亮度或者是正反粲粒子的产额，也不依赖于另外一个粲粒子衰变的分支比。这是 BESIII 实验独特的优势，是任何其他实验不可替代的，不仅可以做到对物理量的“绝对”测量，而且可以很大程度上压低本底，是对撞物理实验中的“低本底”实验，是精确测量的代表。BESIII 实验目前对形状因子和衰变常数，以及分支比的绝对测量是目前世界上最好的，也是系统误差最小的，对格点 QCD 提供精确和无偏的刻度。正负电子对撞产生的正反粲强子处于量子纠缠状态的，加上双标记实验技术这一特点可以允许实验上测量干涉量，从而得到强相互作用和弱作用相对相角，目前的统计量 BESIII 实验能够给出世界上最好的中性粲介子相对强相角，例如 BESIII 完成了国际上最精确的中性

依赖 BESIII 未来更进一步的强相对相角的精确测量，这是 BESIII 实验对重味物理 CP 破坏测量的重要贡献。BESIII 可以同时测量粲介子和粲重子强子末态衰变分支比作精确测量，这些精确测量为标准模型预言粲强子衰变中的 CP 不对称提供重要的实验输入，使得标准模型的预言变得更为精确，从而可以与实验做比较，来检验 CP 破坏的来源和可能的物理的贡献。

实验上发现首个含粲夸克的重子  $\Lambda_c^+$  是在 20 世纪 70 年代末，夸克成份为  $udc$ ，是质量最轻的含粲重子。但实验上关于  $\Lambda_c^+$  的衰变性质研究非常有限，很多重要的衰变过程完全没有实验数据，已经测量的衰变道的精度也很差，这造成了粲重子相关理论模型发展缓慢。2013 年 BESIII 实验首次在  $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  对的阈值能量 4.6 GeV 处获取了 10 万对  $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$  事例，开展了模型无关的  $\Lambda_c^+$  衰变分支比的绝对测量(产生示意图如图 13 所示)。由于  $\Lambda_c^+$  在阈值处产生，因此测量具有很多独特优势：产额高、本底低、系统误差小且可以利用阈值动力学约束。基于这批数据，BESIII 实验取得了许多领先的研究成果：(1) 世界上首次在阈值上精确测量了  $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$  的绝对分支比，精度达到 6%，与当时 Belle 结果精度相当，比之前世界平均值的精度提高 5 倍。同时另外 11 个强子衰变分支比的精度比世界平均值提高 3 到 6 倍；(2) 利用双标记和丢失中微子质量的方法，世界上首次直接测量了含轻子末态的衰变  $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+ \nu$  和  $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \mu^+ \nu$  的绝对分支比，精度大大好于之前通过间接方法测量的结果；(3) 利用丢失中子质量方法，首次发现了  $\Lambda_c^+$  衰变到含中子末态的过程  $\Lambda_c^+ \rightarrow nK_s^0\pi^+$ 。BESIII 实

验上  $\Lambda_c^+$  衰变性质测量的重要进展,也触发了国际上关于粲重子相关的理论研究和实验研究的进展,特别是促进了理论上预言双粲重子  $\Xi_{cc}$  的性质,支持了 LHCb 实验上首次发现含两个粲夸克的双粲重子  $\Xi_{cc}^{++}$  (夸克成分 ucc)。国际上普遍关注 BESIII 上的粲重子衰变研究,期待更多  $\Lambda_c^+$  衰变的实验精确测量。

#### 4.9 超子物理

寻找新物理主要有两种途径:一是通过高能前沿,比如 LHC 上的实验来直接寻找新的粒子和新相互作用;另外一种是通过高亮度前沿,比如对撞物理中 Belle II 和 LHCb 实验等,以及未来计划中的超级粲工厂在粲介子/重子衰变中寻找超出标准模型的新现象。高亮度前沿最为代表性的实验是超出标准模型 CP 破坏来源的寻找。目前为止,我们只在 B, K 和 D 介子系统中观测到显著的 CP 破坏,实验结果与标准模型 CKM 机制预言一致。实验寻找 CP 破坏已产生两次诺贝尔奖,一次是首次发现 K 介子 CP 破坏的实验家,另一次是构造 CKM 矩阵的两位日本理论家,当然两个 B 介子工厂的实验检验起到至关重要的作用。目前实验上还没有在重子弱衰变中发现显著的 CP 破坏效应,而标准模型的预言在  $10^{-4}$  以下量级,新物理的贡献有可能提高一到两个量级,对于含底夸克重子衰变中的 CP 破坏寻找,目前最好的实验场所是 LHCb 实验,而含奇异夸克(s)的重子(特别是自旋为 1/2 的重子八重态),理想的场所之一是 BESIII 实验,这是因为 BESIII 实验在 2019 年 2 月 7 日为止已经获取了 100 亿  $J/\psi$  衰变事例。除去  $\Omega$  超子外,其他自旋为 1/2 的奇异超子都可以在衰变中成对产生。BESIII 上 100 亿  $J/\psi$  衰变中可以产生几千万个正反超子对。得益于正负电子对撞实验本底低、重建效率高,比如仅通过  $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  衰变道就可以重建四百万个  $\Lambda \bar{\Lambda}$  正反超子对,实验测量

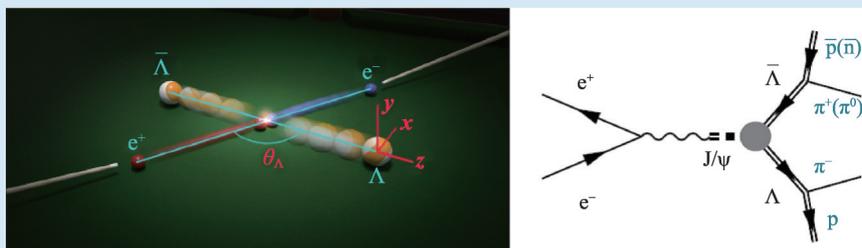


图 14  $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$  反应过程中  $\Lambda$  超子产生和极化示意图

超子衰变 CP 破坏的敏感度可以达到千分之五水平,不仅可以用来检验标准模型对 CP 破坏的预言,还可以寻找新的 CP 破坏来源。

振奋人心的是利用 2009 年和 2012 年获取的 13 亿  $J/\psi$  衰变事例, BESIII 成功地重建出约 42 万对正反  $\Lambda \bar{\Lambda}$  对,考虑到量子纠缠效应,利用 5 维的联合角分布拟合(图 14)同时抽取了正反超子的衰变不对称参数。BESIII 数据测得的  $\Lambda$  衰变参数比 40 年前固定靶实验测量值大了 17%, 偏离大于 7 倍标准偏差,这一测量是超子物理的里程碑,它不仅纠正了超子衰变本身的 CP 破坏测量值,而且也有利于含重味夸克(粲和底夸克)重子的 CP 破坏的测量。利用 100 亿的  $J/\psi$  衰变事例,我们预期对 CP 破坏的敏感度可以达到千分之一水平。与此同时, BESIII 实验正在研究  $J/\psi \rightarrow \Xi \bar{\Xi}^+$  过程,其中  $\Xi^-$  衰变到  $\Lambda \pi^-$  末态,利用量子纠缠信息和末态  $\Lambda$  的极化信息,可以预期会给出最好的  $\Xi$  和  $\Lambda$  超子衰变中 CP 破坏的测量,更重要的是  $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$  产生的  $\Lambda$  几乎 100% 极化,使得我们不仅可以测量  $\Xi^-$  衰变中的 CP 不对称,还可以直接实验抽取 CP 弱相角,这将是超子 CP 破坏测量中又一个里程碑。我们拭目以待,并且期望未来的超级粲工厂能给出挑战标准模型预期的测量。

## 5 总结与展望

BEPC/BES 实验是中国第一台高能物理实验装置,自 1988 年建成并成功运行实验以来,获得了系列重要成果。中国的高能物理实验队伍在 BEPC/BES 实验设施的设计、建造和运行过程中逐步成长壮大,从开始时学习和借鉴国外加速

器、探测器和电子学等器件的先进技术，到全新自主创新设计的 BESIII 探测器，积累了大科学工程建设的经验，培养了几代高能物理实验人才。与此同时，BEPC 一机两用，开展高能物理实验和同步辐射光源，开拓了我国的同步辐射装置的先河，为我国核科学、材料科学、化学、生命科学、考古和地球资源科学等开辟了新的研究手段，培养了大批跨学科人才。正是由于 BEPC 这颗种子，我国逐渐建设了新的同步辐射装置、东莞散裂中子源和正在研制的缪轻子源等。正是由于 BEPC/BES 实验的成功，我国才有能力去开展中微子、暗物质和宇宙学相关的实验，并且获得了巨大的成功。从 BEPC/BES 实验上走出的人才遍布在国际各种大型实验装置上，为我国开展深入的国际合作奠定了基础，并且在国内各大高校生根发芽。我们正在看到高校在各种国际大型合作实验中的身影，并发挥着重要作用，获得重要物理结果。BEPC/BES 实验的成功促进了我国计划下一代的对撞机实验，包括高能量前沿实验和高亮度前沿实验等。我们有今天，是几代物理学家的努力，从建国之初的规划，一直到改革开放之初打开国门开始国际高能物理实验的合作，才有今天的占有一席之地的成就，才有今天在中微子物理、粲物理领先世界的地位。

BEPCII/BESIII 实验自从 2009 年运行至今，在陶粲物理能区积累了约  $35 \text{ fb}^{-1}$  积分亮度的实验数据，并取得了很多丰硕成果。在强子物理领

域，BESIII 实验占据了引领地位，每年有大量的实验数据发表在国际数据手册中。此外，BESIII 实验在精确检验标准模型和寻找新物理方面也有独特优势。BESIII 实验取得了许多预期的物理成果，包括高精度的陶轻子质量测量、粲介子含轻衰变和轻强子谱学等，还获得了类似于四夸克粒子候选态、粲重子衰变和 Collins 碎裂函数测量等超出预期的成果。考虑到目前 BEPCII 加速器和 BESIII 探测器的优良性能和状态，BESIII 国际合作组正在计划未来 5—10 年的物理取数研究计划，包括加速器和探测器的进一步升级计划，期待会有更多“出乎预料”物理亮点成果出现。

在未来的高能物理实验设施方面，为了更好地在强子物理和 QCD 研究、标准模型精确检验和新物理寻找方面取得突破，需要设计和建造全新一代的加速器和探测器，以提高对撞能量和亮度，提高粒子的探测能力，最终大幅度提高测量精度。在正负电子对撞机方面，我国提出了超级陶粲装置，亮度是 BEPCII 的 50 倍以上，能量范围达到 2—7 GeV，预期将在高精度新物理现象寻找、电弱理论精细检验和奇特强子态研究方面给出更重要的结果；在电子—核子对撞实验方面，我国提出了中国极化电子—离子对撞机项目，在理解核子自旋结构、原子核介质效应和强子谱学方面开展精细研究。这两个项目互为补充，共同推动 QCD 的微扰和非微扰性质的深入研究。

## 参考文献

- [1] 叶铭汉. 现代物理知识, 2018, 30:0545
- [2] 苑长征, 吕晓睿, 李海波. 现代物理知识, 2019, 31:0403
- [3] 郑志鹏, 朱永生. 北京谱仪: 正负电子物理. 南宁: 广西科学技术出版社, 1998
- [4] 郑志鹏, 李卫国. 北京谱仪 II: 正负电子物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009
- [5] Zhang C *et al.* An Overview of the BEPCII Project: Proceedings of 40th ICFA ABDW 2008. Russia: Novosibirsk
- [6] 王贻芳等. 北京谱仪(BESIII)的设计与研制. 上海: 上海科学技术出版社, 2010
- [7] Asner D M *et al.* Int. J. Mod. Phys. A, 2009, 24: S1
- [8] Ablikim M *et al.* Chin. Phys. C, 2020, 44: 040001
- [9] Zyla P A *et al.* (Particle Data Group). Prog. Theor. Exp. Phys., 2020, 2020: 083C01