

# 北京谱仪 (BESIII) 的物理研究

王贻芳

世界上第一台粒子对撞机是 20 世纪 60 年代在意大利国家核物理实验室发展出来的。自原理验证样机 ADA 完成后, 第一台正负电子对撞机 ADONE 于 1969 年在罗马郊外的小镇 FRASCATI 建成, 并投入运行。稍后美国斯坦福大学建成了质心系能量为 3.1 GeV 的正负电子对撞机, 称作 SPEAR, 并在其上取得了极为丰硕的成果。如发现了  $\psi$  粒子, 后来与丁肇中发现的 J 粒子并称为  $J/\psi$  粒子, 这个粒子也在 ADONE 上得到了证实。这项发现使人们认识到, 世界上除了已知的三种夸克之外, 还存在着第四种夸克——粲夸克 (charm, 有时用 c 表示)。在 SPEAR 上人们还发现了一种新的与电子和  $\mu$  子 (muon) 相类似的粒子, 叫做  $\tau$  (tau) 轻子。这项发现使我们知道自然界除了存在电子和  $\mu$  之外, 还存在第三种轻子, 因此也应该存在与其对应的第五种和第六种夸克。果然人们后来发现了被叫做底夸克 (bottom, b) 和顶夸克 (top, t) 的第五种和第六种夸克。 $J/\psi$  和  $\tau$  的发现分别获得了 1975 年和 1995 年诺贝尔物理学奖, 以其为代表的研究工作奠定一个新的研究方向:  $\tau$ -粲物理。

自  $J/\psi$  和  $\tau$  发现以后, 人们从未停止对它的系统研究。美国斯坦福大学的 SPEAR 对撞机经过多次改造, 直到 1990 年我国高能物理研究所的北京正负电子对撞机 (BEPC) 投入运行后才停止工作。高能所的 BEPC 经过多年运行直到 2004 年美国康奈尔大学的 CESRc 加速器开始在这个能区运行后才停止

工作。2008 年, 北京正负电子对撞机重大改造工程 (BEPCII) 在完成了全部建设任务后, 开始投入试运行。也正是这一年, 美国康奈尔大学的 CESRc 停止运行。这些加速器的能量都维持在 2~5 GeV 之间, 刚好等于两个粲夸克质量或两个  $\tau$  轻子的质量, 一般称作为  $\tau$ -粲对撞机 (tau-charm collider)。而这些加速器的关键指标——亮度, 每一次升级都会提高 10 倍以上。

研究  $\tau$ -粲物理既可以在正负电子对撞机上进行, 也可以在更高能量的正负电子对撞机、强子对撞机和质子轰击固定靶等其他加速器上进行。但与其他加速器相比, 在质心能量刚好等于两个粲夸克质量或两个  $\tau$  轻子质量的正负电子对撞机—— $\tau$ -粲对撞机上研究  $\tau$ -粲物理具有以下不可比拟的优点:

(1) 在这类加速器的能区范围内, 能产生大量的各种粒子, 包括 6 种夸克中的 4 种及全部的 6 种轻子。特别是由 c 夸克对构成的  $J/\psi$  粒子家族, 种类丰富, 产生截面巨大, 如图 1 所示, 是研究各种粒子物理问题的理想平台。

(2) 由于加速器的能量刚好等于所产生的粒子对的质量, 意味着这类粒子产生时其动量为零, 即它们是在能量阈附近产生的, 这对我们的物理研究带来很多好处。比如本底较低, 因为更重的粒子由于能量守恒的要求, 无法被产生; 比如粒子都是成对产生的, 可以用标记一个来研究另一个的方法来降低本底和误差, 也可以研究对产生时粒子对之间

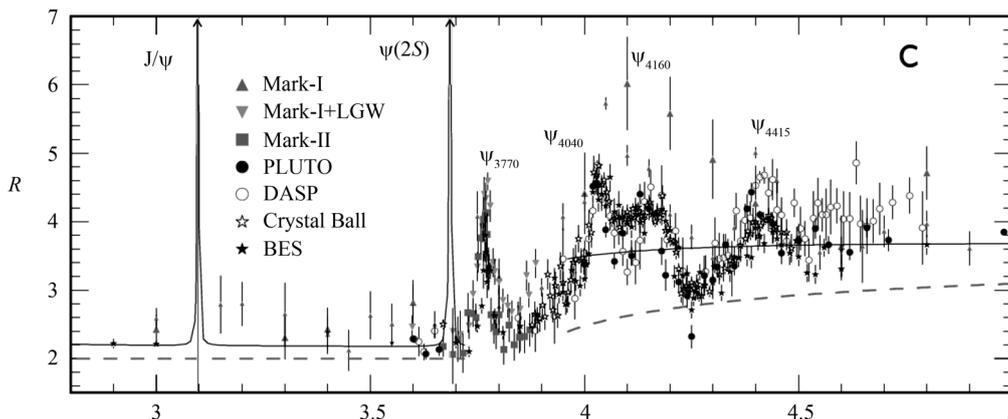


图 1  $\tau$ -粲能区正负电子对撞的强子产生截面, 单位是正负电子对撞后产生  $\mu$  对的截面。各种粒子共振态可以从图上清楚地看出来 (源自《Particle data Book》)

的量子关联等等。

$\tau$ -粲物理研究 30 多年长盛不衰，在整个粒子物理的研究历史中是很罕见的。究其原因，主要有以下几点：

(1) 粲夸克质量介于  $s$  夸克和  $b$  夸克之间。我们知道  $b$  夸克组成的粒子一般可以用量子色动力学中的微扰方法来处理，其计算与预言相对容易。而  $s$  夸克及其他轻夸克组成的粒子则无法用微扰方法来处理，其计算与预言几乎不可能。 $c$  夸克介于两者之间，人们希望通过研究  $c$  夸克找到解决其他轻夸克问题的路径。

(2) 目前人们一般认为处理量子色动力学中非微扰问题最好的方法是格点方法，即用计算机进行数值计算，以得到无法用解析方法得到的物理结果。近年来由于理论方法的发展和充足的计算资源供给，格点量子色动力学 (LQCD) 的预言水准大大提高。粲夸克物理的实验结果实际上提供了一个检验格点量子色动力学的试金石，对 LQCD 的发展具有重要意义。

(3)  $J/\psi$  粒子家族衰变到轻夸克组成的强子一般要通过一个所谓的三胶子过程，这就为人们寻找由胶子构成的新型强子提供了较好的条件，事实上这是目前人们已知的寻找由纯胶子构成的强子 (胶子球) 的最好场所。量子色动力学预研了胶子球等新型强子的存在，但到现在为止还没有被实验所证实。

(4) 在人类不断建造更高能量的加速器的同时，大家都认识到不能只关心高能量前沿，还应关心高精度前沿。高能量的新粒子一定在较低能量味物理的精确测量中通过虚粒子的次级效应反映出来。这与高能量下新粒子的直接产生形成互补，这种互补性对全面研究粒子性质是极为重要的。而由于  $J/\psi$  粒子的产生截面巨大，提供了精确测量的理想条件。

20 世纪 80 年代初，我国的高能物理学家作了一个正确的选择，决定建设位于  $\tau$ -粲能区的正负电子对撞机。自 20 世纪 90 年代初建成以来，在轻强子谱、粲偶素物理、量子色动力学和  $\tau$  物理等方面取得了一系列丰硕的成果。如通过精确测量，将  $\tau$  轻子质量的精度提高了一个量级，纠正了此前超过两倍标准误差的测量偏差，排除了对轻子普适性的怀疑。对 2~5 GeV 范围内强子的产生截面作了精确

测量，为标准模型提供了一个极为重要的参数，使精细结构常数的误差降低了一倍，排除了对 Higgs 粒子的质量预言与现有实验结果的矛盾。北京谱仪还发现了一系列新的共振态，对我们认识轻强子谱、理解量子色动力学起到了重要作用。

从 20 世纪 90 年代中期开始，高能物理学家就开始讨论中国高能物理实验的未来发展。经过长期讨论，大家一致认为在北京谱仪已有的  $\tau$ -粲物理研究成果的基础上，继续开展  $\tau$ -粲物理研究，科学意义重大，是考虑到国力可接受的范围、已有的技术基础和经验、完成建设任务所需的时间等各方面因素的最佳选择，对发展我国高能物理研究、巩固我国在国际高能物理研究领域的一席之地具有重要意义。

从国际高能物理发展的现状来看，粒子物理的标准模型，尤其是弱电相互作用的成功已为大量精确测量所确认，特别是欧洲核子中心的大型正负电子对撞机 (LEP) 上的四个实验，将许多测量推进到小于 1% 的精度。目前，人们一方面期望在更高能量下寻找新的物理现象，另一方面则期望在对各物理量的精确测量中观察到新物理存在的迹象。前者以目前正在运行中的美国费米国家实验室的正负质子对撞机 (Tevatron) 和欧洲核子中心正在建造中的大型强子对撞机 (LHC) 为代表，而后者则以高亮度的粒子“工厂”为代表，如意大利国家核物理研究所 FRASCATI 实验室工作在  $\phi$  能区以研究  $s$  夸克的 DAΦNE；日本加速器研究机构 (KEK) 和美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 工作在  $Y$  能区以研究  $b$  夸克的 B 工厂。而北京谱仪则填补了  $\tau$ -粲能区的空白，对第三代轻子  $\tau$  和第二代上夸克粲夸克进行高精度精确测量并寻找新的物理现象。

北京正负电子对撞机重大改造工程 (BEPCII) 的设计峰值亮度在 1.89 GeV 处是  $10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，为  $\tau$ -粲能区有史以来计划的最高值。为满足相关物理研究的需要，并配合高亮度加速器的特别要求，我们设计了新的北京谱仪 (BESIII) 以探测并记录正负电子对撞后产生的各种次级粒子，研究其具体的产生与衰变过程，通过数据分析最终理解相关的物理问题。

BESIII 探测器每年会获取大量的正负电子对撞事例。考虑到束流的能散度后，各种物理过程的总截面如图 2 所示。由图 2 (a) 可以看出，在除  $J/\psi$  和  $\psi'$  以外的能量点，以巴巴散射和两光子末态的截

面为主；而如图 2 (b) 和 (c) 所示， $J/\psi$  处总截面高于 4300nb， $\psi'$  处约 1300 nb。由此可见，BESIII 上的物理事例率是相当高的， $J/\psi$  峰上约为 2600 Hz， $\psi'$  峰上约为 800Hz，其他各能量点主要为 QED 过程，事例率为在 100 Hz 以下。考虑到每年取数的时间和运行的平均效率，一年运行各种物理积累的事例数见表 1。

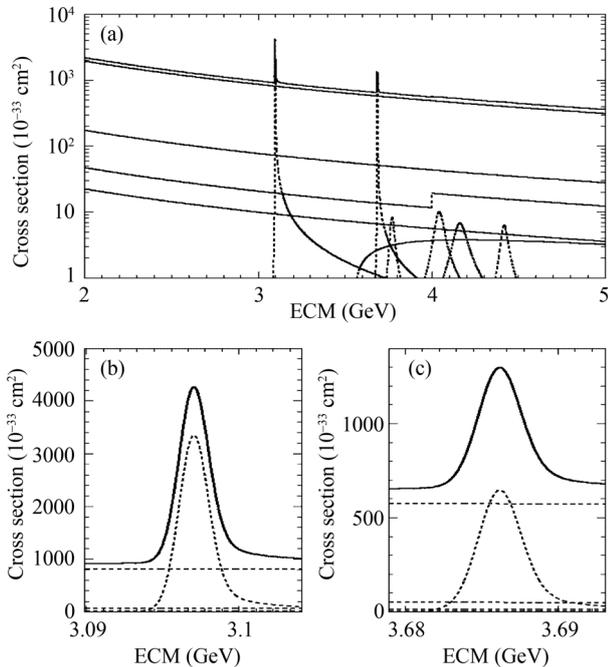


图 2  $\tau$ -粲能区的截面。(a)2~5 GeV 能区的总截面,5.0 GeV 处自上而下分别为总截面、 $B\bar{B}$ 、两光子末态、非共振态强子产生、 $2\mu$  和  $2\tau$  对的产生截面；共振态部分自左至右依次为  $J/\psi$ 、 $\psi'$ 、 $\psi(4040)$ 、 $\psi(4160)$  和  $\psi(4415)$ ；(b) 在  $J/\psi$  峰上的总截面、共振态和其他过程的截面；(c) 在  $\psi'$  峰上的总截面、共振态和其他过程的截面（源自苑长征等）

表 1 运行一年预期的事例数

物理	质心系能量 /GeV	峰值亮度/ $10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	物理截面/nb	每年产生事例数
$J/\psi$	3.097	0.6	$\sim 3400$	$10 \times 10^9$
$\tau$	3.670	1.0	$\sim 2.4$	$12 \times 10^6$
$\psi'$	3.686	1.0	$\sim 640$	$3.0 \times 10^9$
D	3.770	1.0	$\sim 6.5$	$32 \times 10^6$
$D_s$	4.040	0.6	$\sim 0.32$	$1.0 \times 10^6$
$D_s^*$	4.160	0.6	$\sim 1.0$	$3.0 \times 10^6$

BESIII 上的物理研究可以分为轻强子谱、粲偶素物理、粲物理、QCD 与  $\tau$  物理等五个方面。根据以上估计的 BESIII 能够获取的事例数及 BESIII 探测器的性能指标，我们组织了国内外几十位理论与实验物理学家全面回顾了这五个方面的研究现状，

提出了 BESIII 具体的物理研究目标，研究结果总结在一本题为《Physics at BESIII》的黄皮书中（参见《Physics at BESIII》，hep-ex/0809.1869）。下面简要总结一下黄皮书的内容。

**轻强子谱研究** 轻强子是指由轻夸克 (u, d, s) 组成的强子。系统研究轻强子谱有点类似于 20 世纪初人们研究原子光谱，通过积累大量的实验观测数据后，人们逐渐认识并理解了原子的结构，推动了量子力学理论的建立与发展。同样的，对轻强子谱的研究可以获得大量关于强子结构的信息，使人们可以深入理解夸克模型并推动量子色动力学的发展。

事实上，描述强相互作用的量子色动力学理论，其在高能下的“渐近自由”现象已被大量实验证实，而在低能下的行为由于非微扰的关系，有很多是未知的。比如我们知道，目前自然界已发现的强子都是由 2 个或 3 个夸克组成，但这些夸克到底是如何构成一个强子的，我们并不定量地知道。QCD 理论还预言了许多迄今为止实验上还未被确认的新型强子，如多于 3 个夸克的多夸克态、夸克-反夸克对或 3 个夸克与胶子组成的混杂态 ( $q\bar{q}g$ ,  $qqqg$ ) 以及纯胶子 ( $gg$ ,  $ggg$ ) 组成的胶子球等。目前国际上公认，采用 LQCD 可以对这类问题作最好的预言。作为一个例子，图 3 是目前国际上对胶子球质量谱的最好预言。

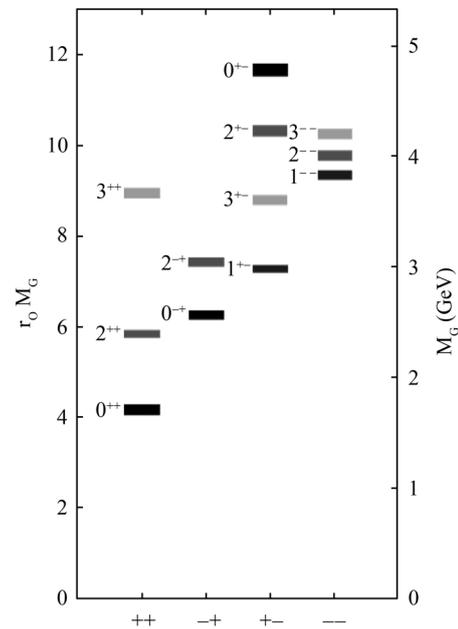


图 3 目前国际上对胶子球质量谱的最好预言（源自 Y. Chen）

因此，实验上积累各种强子的实验数据并确定其性质，寻找胶子球、混杂态和多夸克态等新型强子并与理论预言对比，对检验和发展 QCD 理论具有重大的意义。 $J/\psi$  衰变是目前国际上公认的寻找新型强子态的理想场所之一，BESIII 将能够提供约 100 亿左右的  $J/\psi$  事例。据此我们可以对强子谱进行系统研究，建立完整的轻介子谱和重子谱，发现新型强子并确定其自旋、宇称及产生和衰变的性质，以彻底理解强子结构，理解强耦合非微扰机制下的强相互作用，发展 QCD 的理论。

事实上在 BESIII 将获得的事例数中，如果还不能发现胶子球和混杂态，QCD 理论将面临重大挑战。

北京谱仪 (BESII) 曾发现了一些异于普通强子的新的共振态，BESIII 将确认其存在并确定其基本性质，寻找新的衰变模式，以理解并确认新粒子的属性与分类。

**粲偶素物理研究** 粲偶素是指由两个正反粲夸克 (cc) 构成的介子，其不同的轨道与自旋角动量的组合构成该介子不同的基态与激发态，形成一个粒子家族。粲偶素物理就是研究该家族粒子的性质及其跃迁、产生、衰变的规律。通过这些研究我们可以理解并检验夸克模型和 QCD 理论，为格点 QCD 提供标杆。

自 20 世纪 70 年代初  $J/\psi$  被发现以后，人们已发现十几个粲偶素介子。图 3 所示为目前已发现的各种粲偶素的介子的质量及其对应的量子态，这其中还有些许多尚未命名的态。这些态都是近五年来 B-工厂等国际许多实验刚发现的，我们对他们的性质了解得还不充分，许多问题还没有理解，因此无法给出其在粲偶素谱中的位置。这些在粲夸克的质量阈附近的新粒子，有些可能是粲偶素介子，有些可能是新型强子，如多夸克态、混合态等。改造前的北京谱仪 (BESII) 由于光子能量分辨率的限制，失去了发现其中质量较小、量子数合适的一部分粒子的机会。现在我们有了一个国际最好水平的探测器，相信可以深入研究已发现的这些新粒子的性质，并寻找新粒子。由于粲夸克介于微扰与非微扰之间，可能是理解非微扰物理的关键，全面研究粲偶素介子的产生与衰变性质，理解他们之间的跃迁规律，显然具有极为重要的意义。

BES 合作组曾测量了许多强衰变的分支比或其上限。它们的统计和系统误差大体在 (10~20)% 之

间。在 BEPCII/BESIII 的情形下，统计误差可以减小到 (1~3)%，系统误差下降到 (2.5~8)% 左右，即总误差约为 (2.7~8)%，较之 BESII 的结果有 4 倍的改善。对于分支比上限，BESIII 的灵敏度将比 BESII 提高 100 倍。

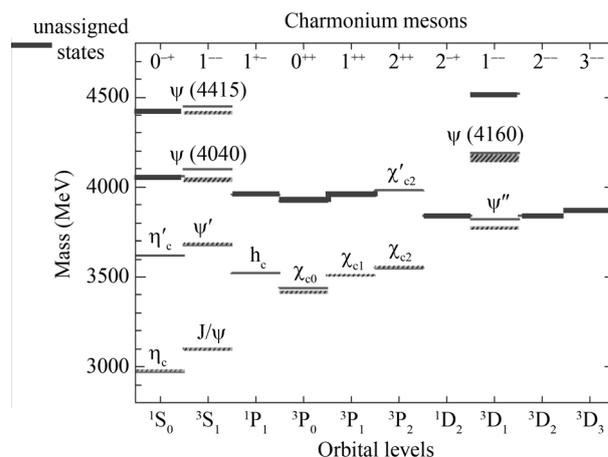


图 4 已发现的粲偶素的介子的质量及其对应的量子态

理论预期  $J/\psi$  和  $\psi(2S)$  通过  $ggg$  或  $\gamma^*$  或  $\gamma gg$  衰变为轻强子末态，服从所谓的 PQCD 12% 规则。事实上大部分衰变服从这一规则，但仍有相当部分呈现压低与反常现象，需在 BEPCII/BESIII 中以更高的精度和统计量进行仔细研究，理解其来源及机理。

通过大样本的粲偶素介子衰变，我们可以寻找超出标准模型的新物理。如  $J/\psi$  通过弱衰变产生  $D_s$  或  $D$  的分支比大概在  $10^{-8}$  量级，BESIII 上的数据将有可能测量到这种效应，从而定量地检验这些预言的可靠性。而测量结果对于估计值的反常增大或压低，都预示着新的机制、或者新物理的贡献。轻子数破坏或重子数破坏的过程，是标准模型中严格禁戒的，在  $Z^0$  衰变、 $\tau$  衰变和  $\mu$  衰变中已有很强的约束，利用大的  $J/\psi$  样本可以将诸如  $J/\psi \rightarrow e\mu$ 、 $e\tau$ 、 $\mu\tau$ 、 $e\rho$ 、 $\mu\rho$ 、 $\tau\rho$  等过程的分支比上限测量至  $10^{-9}$  量级，这对于很多超出标准模型之外的模型的检验将提供一个有效的约束。

**粲物理研究** 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，因此两个本征态之间存在一个变换矩阵，称之为 CKM 矩阵：

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

作为标准模型的基本参数，上述矩阵中每个矩阵元均具有重要的意义。精确测量每个矩阵元，可以检验 CKM 矩阵的么正性以及归一化特性。任何显著的与期望值的偏离都预示着 CKM 矩阵是不完备的，从而表明新物理的存在。

含有一个粲夸克的介子一般称为粲介子，如  $D^+$  介子 ( $cu$ )、 $D^0$  介子 ( $cd$ ) 和  $D_s$  介子 ( $cs$ )。通过测量这些粲介子的纯轻子，即衰变产物中只包含两个轻子如电子、muon、tau 和中微子，和半轻子衰变，即衰变产物中包含一个强子和两个轻子，我们可以精密地测定 CKM 矩阵元  $V_{cs}$  和  $V_{cd}$  及相关的衰变常数  $f_D$  和  $f_{D_s}$ 。

粲介子衰变的绝对分支比  $Br(D^0 \rightarrow K^- \pi^+)$ 、 $Br(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+)$  以及  $Br(D_s^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^-)$  是粲介子衰变分支比的重要归一化常数，同时也是 B 介子衰变分支比的归一化常数。 $V_{cb}$  的测量是由 B 到 D 的衰变宽度测得，其精度受 D 标记中标记道分支比测量精度的影响。因此，D 衰变绝对分支比测量精度的提高对于粲介子和 B 介子其他分支比的测量精度以及  $V_{cb}$  测量精度的提高至关重要。

通过以上的直接和间接测量，可以将 CKM 矩阵元的精度由目前的 (5~30)% 提高到 (1~5)% 左右。

粲介子的各种非轻子衰变模式，目前的实验结果与理论预期的差别较大，大多数人认为末态相互作用在其中起了很大的作用，直到现在还没有令人信服的解释。粲介子的非轻子衰变过程为研究末态相互作用提供了丰富的信息，同时也提供了一个理想的研究  $pp$ 、 $K\rho$  共振态的场所。

标准模型中的  $D_0 \bar{D}_0$  混合和  $D_s$  或 D 衰变中的 CP 破坏效应都很小，而新物理的贡献可能会使这种效应有很大增强。研究 D 介子的混合，对理解弱电统一物理，特别是寻找粲夸克中的 CP 破坏具有重要意义。目前 B-工厂、CLEOc 等国际高能物理实验已观察到  $D_0 \bar{D}_0$  混合，该混合与标准模型的预言符合，但处于其上限，这是否预示着新物理的可能，需要更多的试验数据。在 BESIII 上可以通过研究  $D \rightarrow K\pi$  衰变， $D \rightarrow K e \nu_e$ ， $K \mu \nu_\mu$  衰变或 Dalitz 图分析  $D \rightarrow K^* \pi$ ， $K\rho$  等衰变道来研究  $D_0 \bar{D}_0$  混合，并寻找新物理存在的迹象。

在高亮度下尝试对稀有衰变的测量以及非标准

模型过程的寻找可以用来探测新物理或对新物理的贡献加以限制。 $\tau$ -粲能区主要包括利用  $J/\psi$  衰变测量  $D_s$  或 D 的产生、寻找轻子或重子数破坏的衰变；测量  $D_0 \bar{D}_0$  混合、D 衰变中味道改变的中性流 (FCNC) 等。粲粒子的稀有衰变如味道改变的中性流 (FCNC) 的测量也为新物理的寻找打开了一个窗口。标准模型预言， $D \rightarrow \pi e^+ e^-$ 、 $\pi \mu^+ \mu^-$ 、 $\rho e^+ e^-$ 、 $\rho \mu^+ \mu^-$  等的分支比都在  $10^{-6}$  量级，在 BESIII 上的测量将可以检验这些预言，并观测新物理的贡献。

QCD 和强子产生性质的实验研究 我们一般知道量子色动力学在能区由于可以采用微扰方法，取得了完全的成功。在低能区域由于必须采用非微扰方法，且目前已知的各种方法均有其局限性，并没有一个普适的处理方法解决 QCD 的有关问题。我们虽然知道  $\tau$ -粲能区介于微扰与非微扰之间，但其实并不知道严格的分界线在哪里。通过在 BESIII 上积累大量的强子产生数据，可以研究微扰 QCD 在  $\tau$ -粲能区的适用范围，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 在能区有更好的预言能力。

一个典型的例子是正负电子湮灭产生强子的截面—— $R$  值。图 1 实际上是目前国际上测量得到的  $R$  值与 QCD 预言的比较。 $R$  值作为粒子物理中最基本的物理量之一，其测量精度对于相关的理论计算，譬如跑动耦合常数  $\alpha$  的计算、辐射修正和真空极化的计算以及 Higgs 质量的估算等都将产生显著的影响。精确测量 2~4GeV 能区的  $R$  值对于减小标准模型理论计算的不确定性具有重要的意义。通过截面扫描实验进行  $R$  值测量、矢量共振态参数的测量(包括共振态质量、总宽度、分宽度与分支比等的测量)是高能物理实验的一项基础性的工作。BESII 曾对此参数做过测量，精度达到 6% 左右。在 BESIII 上，基于理论与实验两方面的工作进展，预计  $R$  值测量的总误差能够达到 1%~2% 的水平， $J/\psi$ ， $\psi(2S)$ ， $\psi(3770)$  以及更高粲偶素共振态参数的测量精度达到 3%~5% 的水平。这样的精度将比现有共振参数的测量精度普遍提高了十倍以上。

新近发现的若干新型粒子 X, Y, Z 等，有些被认为是粲偶素粒子。这对传统的势模型以及今后的实验都提出了挑战。今后的工作，从理论方面讲，需要根据势模型理论计算粲介子对产生阈值 (3.77GeV) 之上的粲偶素能谱；需要得到观测截

面的公式，并考虑到不同粲偶素共振态之间的相互作用，例如耦合道效应等。从实验方面讲，需要确定各个新型粒子的性质，测量各种粲介子对的产生截面等，这是获取能和理论预期相比较的信息的重要而基础的工作。

亮度的提高与数据样本的剧增使得在 BESIII 可以开展形状因子的系统化研究，内容包括介子形状因子的测量（譬如  $\pi\pi$ ,  $KK$ ,  $\omega\pi\phi\pi$  等）和重子形状因子的测量（譬如  $p\bar{p}$ ,  $\Lambda\bar{\Lambda}$ ,  $\Sigma\bar{\Sigma}$ ,  $\Delta\bar{\Delta}$  等重子对）。根据测量结果对各类理论模型和预言进行检验，加深对强相互作用的理解，为深入的理论探索提供丰富完备的信息。我们也需要研究各种微扰 QCD 在低能下的行为，以确定微扰 QCD 的适用范围。

**$\tau$  轻子物理**  $\tau$  轻子是三代轻子中最重的粒子，也许最有可能与粒子物理标准模型的预言发生偏差。研究它的性质并与其他轻子比较，可以确定轻子的普适性，检验标准模型。

质量的精确测定与轻子的普适性密切相关，是

$\tau$  物理研究的一个重要课题。在 BESIII 上将通过对阈值附近不同能量点的扫描，利用  $\tau$  轻子对在阈值上下观测截面突变的特点直接拟合  $\tau$  轻子的质量。通过一个可以准确标定加速器束流能量值的能量测量系统，可以使束流能量的相对精度达到  $5\times 10^{-5}$ 。在这一基础之上，有望将 BESII 测得的  $\tau$  质量的误差从 0.3 MeV 缩小到 0.1 MeV 的水平。

利用  $\tau$  轻子还可以进行许多其他测量，如利用阈值附近独特的动力学特性，测量  $\tau$  轻子衰变的各种分支比，并可以得到强相互作用常数  $\alpha_s$ ， $s$  夸克的质量和 CKM 矩阵元  $V_{us}$ 。通过测量  $\tau$  轻子衰变的洛伦兹函数，可以寻找超出标准模型的新物理等。

总之，BEPCII/BESIII 是我国高能物理发展的一个重要里程碑，其出色的性能，会为我们提供前所未有的海量的高质量实验数据。从以上的讨论可以得知，BESIII 实验将会取得丰硕的成果， $\tau$ -粲物理研究在未来十年内会因此而有革命性的巨大进步。

（中国科学院高能物理研究所 100049）



## 科苑快讯

### 物理学家发现磁单极子准粒子

几十年以来，科学家一直在坚持不懈地寻找磁单极子。现在已观察到的磁性粒子南北极都是成对出现的，而要找的磁单极子仅有一个南极或一个北极。2009 年 9 月 3 日出版的《科学》杂志上，两个凝聚态物理科组独立报告了他们的可喜发现：固体材料中微小的波动行为很可能是磁单极子存在的迹象。

磁单极子在磁场中的地位与电子在电场中地位相当，有几个原因使得物理学家认为磁单极子应该存在。1931 年，英国著名物理学家狄拉克指出，磁单极子的存在将解释电荷的量子化特征：每个电子带有完全相同的电荷，而每个质子带有反向同量电荷。20 世纪 80 年代，理论物理学家发现磁单极子的存在是“大统一理论”一个基本的预言，“大统一理论”认为电磁力、束缚原子核的强力及产生某种放射性衰变的弱力均为某种单一力的三个不同方面。

最近，法国和德国的两个科组发现在他们称之为“自旋冰激凌”的晶体中有类似磁单极子的结构。该种磁离子位于角对角连接的四面体的 4 个顶点上。在绝对零度附近，它们按一简单规则排布：在一个四面体内，两个离子的北极向外而另两个北极指向四面体内。

该样品的缺陷处即为磁单极子。如果某离子获得能量而发生反转，就会出现其所在四面体有 3 个离子指向中心而相邻四面体仅有 1 个离子指向中心。这两个非平衡的四面体就类似于南北两个磁极。如果相邻离子自旋也出现反转，这种不平衡性将从一个四面体移到下一个四面体，于是南北两极最终因为一个离子极性反转而对接。非平衡的四面体成为磁单极子。

为了探测该磁单极子，法国研究组用极化的中子辐照准备好的自旋冰激凌——钛酸钶样品，发现当温度升高，试验和计算机模拟出的曾经存在磁单极子的情况一致。

德国的研究组制备了类似的钛酸镱材料，他们先用一个外加磁场，使得样品自旋冰激凌中连接不平衡四面体的弦拉紧；再用中子散射来揭示弦的存在，而磁单极子就位于弦的两端。研究人员也将样品加热，结果显示温度的升高首先需要一种特殊的热量，好像固体中充满磁单极子气体，它们之间互相推拉。

这种磁单极子准粒子仅是离子的一种存在方式，而不是真实粒子，所以还不是大统一理论需要的粒子，也没有量子数。研究人员认为，该试验结果的意义在于暗示其他的准粒子可能在此类固体中存在。

（萧娃编译自 ScienceNoW Daily News, 4 sep 2009）