

北京谱仪(BES III)上的粲物理研究

王贻芳[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 自J/Ψ粒子和τ轻子在20世纪70年代被发现后,τ-粲物理研究即蓬勃兴起,多个正负电子对撞机在此能量运行,取得了丰硕的成果.文章简要论述了国内外长期进行τ-粲物理研究的原因,介绍了其研究的主要内容与特点,并结合新近完成的北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPC II)及北京谱仪(BES III),举例介绍了BES III在轻强子谱、粲物理、粲偶素物理研究,量子色动力学及强子产生性质研究和τ轻子物理研究方面的主要科学目标、任务及新近取得的主要成果.

关键词 北京正负电子对撞机,北京谱仪,轻强子谱,粲物理,粲偶素,量子色动力学,τ轻子

Charm physics at BES III

WANG Yi-Fang[†]

(Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China)

Abstract Since the discovery of J/Ψ and the τ lepton in 70's, the study of τ-charm physics became very active; several dedicated e⁺e⁻ colliders were built and tremendous progress were obtained. In this paper, the main reasoning, the content and the characteristics of the τ-charm physics study are discussed, together with the scientific motivations and the latest results of the recently completed upgrade of the Beijing Electron-Positron Collider(BEPC II) and the new Beijing Spectrometer(BES III).

Keywords BEPC II, BES III, light hadron, charm physics, charmonium, quantum chromodynamics (QCD), τ

粲物理研究起源于20世纪70年代丁肇中和里克特(B. Richter)分别发现的J/Ψ粒子.这项发现使人们认识到,世界上除了已知的3种夸克之外,还存在着第4种夸克——粲夸克(charm,有时用c表示).在发现Ψ粒子的斯坦福SPEAR加速器上,人们还发现了一种新的与电子和μ轻子相类似的粒子,叫做τ轻子.这项发现使我们知道自然界除了存在电子和μ轻子之外,还存在第三种轻子,因此也应该存在与其对应的第三代,即第5种和第6种夸克.果然人们后来发现了底夸克(bottom,简称为b)和顶夸克(top,简称为t)(即第5种和第6种夸克).由此就像元素周期表完整描述原子层面的物质结构一样,粒子物理的标准模型把构成我们这个物质世界的最基本“元素”确定为以下6种轻子和6种夸克,即

$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \text{和} \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix} .$$

传递它们之间相互作用的是中间玻色子:光子(电磁相互作用),W[±]与Z粒子(弱相互作用)和胶子(强相互作用).标准模型中还有一个负责产生粒子质量的玻色子——希格斯粒子.目前人们发现的所有粒子均可由以上这12种“基本粒子”构成,所有的实验现象均可由这些粒子及其3种相互作用描述.

由于对粒子物理标准模型的建立起到重要作用,J/Ψ粒子(质量为1.59GeV)和τ轻子(质量为1.7GeV)的发现分别获得了1976年和1995年诺贝尔物理学奖,以其为代表的研究工作奠定了一个新的研究方向:粲物理和τ轻子物理.

2011-05-11 收到

[†] Email: yfwang@ihep.ac.cn

研究 τ -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 2 个粲夸克质量或 2 个 τ 轻子质量的正负电子对撞机—— τ -粲对撞机上研究 τ -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/Ψ 粒子家族,种类丰富,产生截面巨大(如图 1 所示^[1]),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,这是因为更重的粒子由于能量守恒的要求而无法产生;又比如粒子都是成对产生的,可以通过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的量子关联等等.

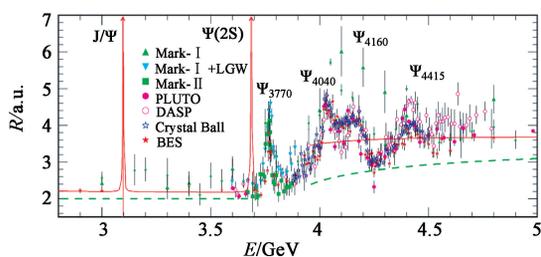


图 1 τ -粲能区正负电子对撞的强子产生截面^[1],单位是正负电子对撞后产生 μ 轻子对的截面(各种粒子共振态可以从图上清楚地看出来)

τ -粲对撞机的发展历史已长达三十多年.如图 2 所示^[2],这些加速器一代接着一代,能量都维持在 2—5GeV 之间,其关键指标——亮度,每次升级都会提高 10 倍以上.例如美国斯坦福大学的 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.高能物理研究所的 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(BEPC II)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.

τ -粲物理研究三十多年长盛不衰,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.由于

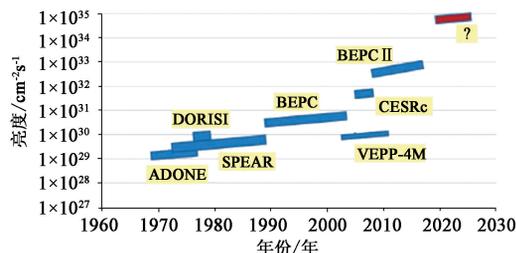


图 2 历代 τ -粲正负电子对撞机及其亮度

b 夸克粒子一般可以用微扰方法来处理与计算,而 s 夸克及其他轻夸克粒子则不行.人们希望通过研究介于两者之间的 c 夸克来找到解决问题的途径.

(2) 目前处理量子色动力学中非微扰问题最好的方法是格点计算.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)的预言水平大大提高.粲夸克物理的精确实验结果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/Ψ 粒子家族衰变到由轻夸克组成的强子一般要通过一个三胶子过程,这是目前人们已知的寻找由纯胶子构成的强子(胶子球)的最好方法.

(4) 在不断建造高能量的加速器以寻找新粒子的同时,应该关注虚过程产生的次级效应,这一般会体现在较低能量味物理的精确测量中.这与高能前沿的研究形成互补,对全面研究与理解粒子性质极为重要. J/Ψ 粒子的产生截面巨大,提供了精确测量的理想条件.

从国际高能物理发展的现状来看,人们一方面期望在更高能量下寻找新的物理现象,另一方面又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.前者以欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)为代表,而后者则以高亮度的粒子“工厂”为代表,例如意大利研究 s 夸克的 DAΦNE($\sim 1\text{GeV}$),日本和美国研究 b 夸克的 B 工厂($\sim 10\text{GeV}$)等.新的北京正负电子对撞机(BEPC II)介于两者之间,填补了 τ -粲能区($\sim 3\text{GeV}$)的空白.

自 20 世纪 80 年代末开始,北京谱仪(BES)合作组在北京正负电子对撞机(BEPC)上取得了一系列丰硕的成果.新的北京正负电子对撞机(BEPC II)^[3]的峰值亮度设计为 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,比 BEPC 提高了 100 倍,即每秒能获取的事例数提高了 100 倍.为了与加速器的高亮度相匹配,以得到比统计误差更小的系统误差,我们新建了一个高精度的探测器 BESIII^[4].

BESIII 探测器的设计瞄准 τ -粲物理需求,包括一个有 30000 根丝的小单元氦基气体漂移室,由高

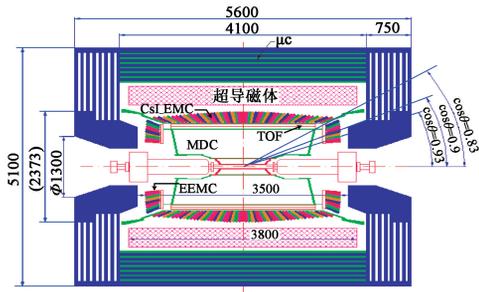


图3 BESIII总体结构端面视图

精度塑料闪烁体组成的飞行时间计数器,有6300根晶体的CsI(Tl)晶体量能器,磁场为1T的大型超导磁铁及总重达700吨的轭铁,其中穿插有2000m²的μ轻子计数器,如图3所示. BESIII探测器于2008年建造完成并开始试运行.

根据设计, BEPC II 运行一年可以积累的各种物理事例数^[5]见表1.

表1 BEPC II 运行一年可以积累的事例数

参数事例	质心系能量 /GeV	峰值亮度 / (10 ³³ cm ⁻² · s ⁻¹)	物理截面 /nb	每年产生事例数
J/Ψ	3.097	0.6	~3400	10×10 ⁹
τ	3.670	1.0	~2.4	12×10 ⁶
Ψ'	3.686	1.0	~640	3.0×10 ⁹
D	3.770	1.0	~6.5	32×10 ⁶
D _s	4.040	0.6	~0.32	1.0×10 ⁶
D _s	160	0.6	~1.0	3.0×10 ⁶

根据以上估计的事例数及探测器的性能指标,我们研究了国际上轻强子谱、粲偶素物理、粲物理、QCD与τ轻子物理等方面研究的现状,提出了BESIII的物理研究目标,完成了黄皮书*Physics at BES III*^[6]的编写. BESIII自2008年开始试运行以来,已获取了2亿J/Ψ粒子、1亿Ψ'粒子和2.5 fb⁻¹ Ψ(3770),取得了一批重要成果^[7]. 下面结合BESIII的最新成果,简要介绍BESIII的物理目标.

1 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,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.

描述强相互作用的量子色动力学(QCD)已被大量实验证实,特别是在高能下的“渐近自由”现象

等实验. 但在低能下由于非微扰的关系,理论的预言能力有限,与实验也多有不符. 比如我们知道,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,目前仍无定量结论. QCD理论还预言了许多迄今为止尚未被实验确认的新型强子,如多于3个夸克的多夸克态(qqqq̄, qqqq̄q̄, q̄q̄qq̄q̄…),夸克-反夸克对或3个夸克与胶子组成的混杂态(qq̄g, qqg)以及纯胶子(gg, ggg)组成的胶子球等.

因此,通过实验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/Ψ粒子衰变是目前国际上公认的寻找新型强子的理想方法之一. BESIII实验能够获得约100亿左右的J/Ψ粒子事例,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将获得的事例数下,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(BES II)曾发现了一些异于普通强子的新共振态, BESIII也确认了它们的存在,一个典型的例子如图4所示^[8]. BESIII确认了BES II发现的X(1835)粒子,同时也发现了新的X(2120)与X(2370)粒子. 我们并不知道这些粒子的确切属性,其基本性质如自旋、宇称、各种衰变分支比等,还有待人们进行更多的测量与研究. 通过获取更多的事例,寻找更多的衰变模式,我们将进行更仔细的分析,以理解并确认新粒子的属性与分类.

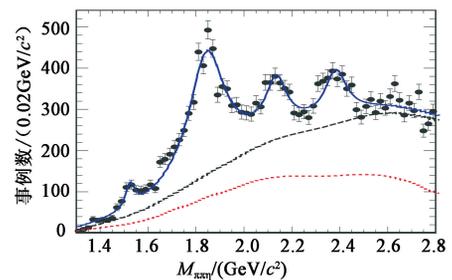


图4 北京谱仪(BESIII)在J/Ψ→γη'π⁺π⁻实验中观测到的X(1835)、X(2120)与X(2370)等新粒子

2 粲偶素物理研究

粲偶素是指由两个正反粲夸克(c c̄)构成的介子,其不同的轨道与自旋角动量组合构成该介子不

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/Ψ 粒子被发现以后, 人们已发现十几个粲偶素介子. 图 5 所示为目前已发现的各种粲偶素介子的质量及其对应的量子态, 包括尚未被理解与命名的态. 在粲夸克质量阈附近有许多新粒子, 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. 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, 理解它们之间的跃迁规律, 显然具有极为重要的意义.

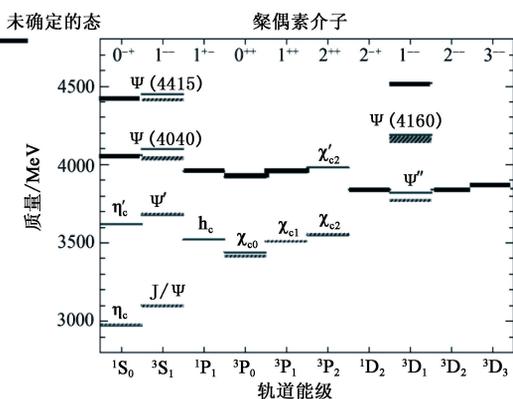


图 5 各种粲偶素介子的质量及其对应的量子态, 包括一些尚未确定的态

理论预期 J/Ψ 和 $\Psi(2S)$ 应通过 ggg 或 γ^* 或 γgg 衰变为轻强子末态, 服从所谓的微扰 QCD 12% 规则. 事实上大部分衰变服从这一规则, 但仍有相当一部分呈现减小与增大等反常现象, 需在 BEPC II / 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.

BESIII 将提高分支比的测量精度 4 倍以上, 提高新的分支比上限约 100 倍. 这对精确检验标准模型, 寻找超出标准模型的新物理(如 J/Ψ 粒子通过弱衰变产生 D_s 或 D , 轻子数破坏或重子数破坏的过程 ($J/\Psi \rightarrow e\mu, e\tau, \mu\tau, e\rho, \mu\rho, \tau\rho$)) 等, 具有重要意义.

BESIII 最新的一个重要结果如图 6 所示^[9]. 在 $\Psi' \rightarrow \gamma VV$ ($V = \phi, \omega$, 为矢量粒子) 的过程中, 我们发现了清楚的 χ_{cJ} 信号, 其中 $\chi_{cJ} \rightarrow \omega\phi$, 及 $\chi_{cJ} \rightarrow \omega\omega, \phi\phi$ 是首次被发现. 这里 $\chi_{cJ} \rightarrow \omega\phi$ 是双 OZI 压制过程, 但其分支比并不小; $\chi_{cJ} \rightarrow \omega\omega, \phi\phi$ 只能在 $L=2$ 时被允许, 但我们没有看到随 L 增加分支比降低的现象. 这是一个让人困惑的现象, 其物理内涵值得深入研究.

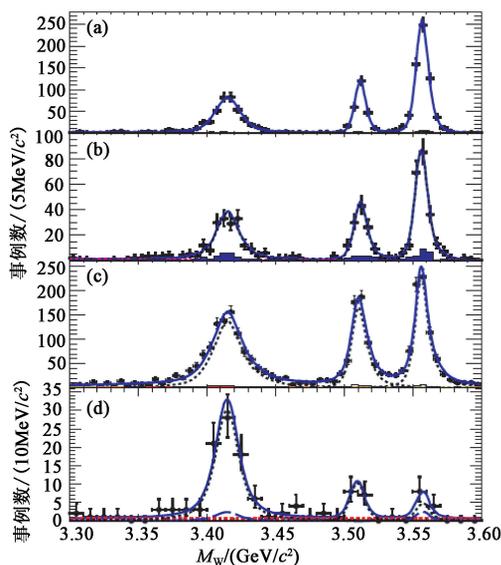


图 6 BESIII 观测到的 VV 不变质量谱 (a) $\phi\phi$ 在 $(K^+ K^- K^+ K^-)$ 模式下; (b) $\phi\phi$ 在 $(\pi^+ \pi^- \pi^0 K^+ K^-)$ 模式下; (c) $\omega\omega$ 在 $(\pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^+ \pi^- \pi^0)$ 模式下; (d) $\omega\phi$ 在 $(\pi^+ \pi^- \pi^0 K^+ K^-)$ 模式下

3 粲物理研究

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衰变(即衰变产物中只有 2 个轻子, 如电子、 μ 轻子、 τ 轻子和中微子等)和半轻子衰变(即衰变产物中包含一个强子和 2 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} . 通过测量粲介子强衰变的绝对分支比, 可以对 V_{cb} 的测量等提供重要帮助. 通过这些直接和间接测量, 我们可以将 CKM 矩阵元的精度由目前的 (5—30)% 提高到 (1—5)% 左右. CKM 矩阵作为三代夸克质量本征态与弱作用本征态之间的转换矩阵, 是粒子物理中的基本参数. 提出该矩阵的日本物理学家小林诚和益川敏英获得了 2008 年诺贝尔物理学奖.

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大大增强这种效应. 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, 且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, 需要更多的实验数据来证实. 在 BESIII 上, 我们可以提高 $D_0 \bar{D}_0$ 混合参数的测量精度, 寻找新物理存在的迹象. 同时我们也可以从粲粒子的稀有衰变(如味道改变)的中性流(FC-

NC)中(比如 $D \rightarrow \pi e^+ e^-$, $\pi \mu^+ \mu^-$, $\rho e^+ e^-$, $\rho \mu^+ \mu^-$ 等过程中),寻找新物理或对新物理的贡献加以限制.

4 量子色动力学(QCD)和强子产生性质研究

我们知道,量子色动力学在低能区域由于可以采用微扰方法而取得了完全的成功.在低能区域由于必须采用非微扰方法,这些方法各有其优缺点,我们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 τ -粲能区介于微扰与非微扰之间,但其实我们并不知道严格的分界线在哪里.通过在 BES III 上积累大量的强子产生数据,我们可以研究微扰 QCD 在 τ -粲能区的适用范围,特别是微扰 QCD 在低能下的行为.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 在低能区有更好的预研能力.

一个典型的例子是正负电子湮灭产生强子的截面—— R 值,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 α 的计算,辐射修正和真空极化的计算以及希格斯质量的估算等)都将产生显著的影响.

最近发现的新粒子 X, Y, Z 等,有些可能是粲偶素粒子.因此今后的工作包括:理论方面需要计算粲介子对产生阈值(3.77 GeV)之上的粲偶素能谱和观测截面公式,同时考虑不同粲偶素共振态之间的相互作用,例如耦合道效应等;实验方面需要确定新粒子的性质,测量各种粲介子对的产生截面等,以和理论预期相比较.

5 τ 轻子物理研究

τ 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 τ 轻子物理研究的一个重要课题.在 BES III 上将通过对阈值附近不同能量点的扫描,利用 τ 轻子对在阈值上下观测截面突变的特点直接拟合 τ 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,有望将 BES II 测得的 τ 轻子质量的误差从 0.3 MeV 减小到 0.1 MeV 的水平.

利用 τ 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 τ 轻子衰变的各种分支比,并可以得到强相互作用常数 α_s , s 夸克的质量和 CKM 矩阵元 V_{us} 等.通过测量 τ 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, BEPC II / BES III 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高质量海量实验数据. τ -粲物理研究领域还有许多重要问题尚未解决,我们相信, BES III 实验将会取得丰硕的成果, τ -粲物理研究在未来十年内将会因此而有革命性的进展.

参考文献

- [1] Amsler C *et al.* Particle data group. Phys. Lett. B, 2008, 667:1
- [2] Wang Y F. Physics of tau and Charm. ArXiv:1007.2911[hep-ph], plenary talk given at the XXIV International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Hamburg, Germany, Aug. 17-22, 2009
- [3] 北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPC II 工程指挥部. 北京正负电子对撞机重大改造工程 BEPC II 初步设计. IHEP-BEPC II-SB-03-4, Nov. 2003
- [4] Ablikim M *et al.* BES III coll. Nucl. Instrum. Methods, 2010, A 614 :345
- [5] 苑长征, 张炳云, 秦庆. 高能物理与核物理, 2002, 26:1201 [Yuan C Z, Zhang B Y, Qin Q. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2002, 26:1201(in Chinese)]
- [6] Chao K T, Wang Y F (Eds.). Physics at BES III. In: Int. J. Mod. Phys. , 2009, A24(1) :Supp
- [7] BES III 的最新物理成果. 见: <http://bes3.ihep.ac.cn/pub/physics.htm>
- [8] Ablikim M *et al.* BES III coll. Phys. Rev. Lett. , 2011, 106: 072002
- [9] Ablikim M *et al.* BES III coll. Submitted to Phys. Rev. Lett. , arXiv:1104.5068[hep-ex]