

在北京谱仪Ⅲ实验上寻找超出标准模型的新物理*

尤郑昀¹ 赵明刚^{2,†} 王大勇^{3,4,††}

(1 中山大学物理学院 广州 510275)

(2 南开大学物理科学学院 天津 300071)

(3 北京大学物理学院 北京 100871)

(4 核物理与核技术全国重点实验室 北京 100871)

2025-03-04收到

† email: zhaomg@nankai.edu.cn

†† email: dayong.wang@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250404

CSTR: 32040.14.wl20250404

New physics beyond the Standard Model explored at the Beijing Spectrometer Ⅲ

YOU Zheng-Yun¹ ZHAO Ming-Gang^{2,†} WANG Da-Yong^{3,4,††}

(1 School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

(2 School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(3 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(4 State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Beijing 100871, China)

摘 要 文章介绍了在北京谱仪Ⅲ实验中通过稀有过程寻找超出标准模型新物理现象的研究。基于北京谱仪Ⅲ采集的大量 J/ψ 、 $\psi(3686)$ 、 $\psi(3770)$ 等粲偶素数据样本,可以寻找粲偶素弱衰变、粲夸克的味改变中性流、带电轻子味道破坏,以及重子数、轻子数、C宇称、CP宇称破坏等。另外,也可以寻找暗物质与不可见衰变,以及超出标准模型的轻奇特态等稀有过程。这些研究为在陶粲能区寻找超出标准模型的新物理提供了很多独特的机会。

关键词 粲夸克, 北京谱仪Ⅲ, 新物理

Abstract We review the search for new physics phenomena beyond the Standard Model through rare processes at the Beijing Spectrometer Ⅲ (BES Ⅲ). Utilizing the huge data samples of charmonium states such as J/ψ , $\psi(3686)$, and $\psi(3770)$, the BES Ⅲ collaboration hunts for rare processes such as weak decays of charmonium, flavor-changing neutral currents, charged lepton flavor violation, as well as violations of baryon number, lepton number, C parity, and CP parity. We also search for dark matter and invisible decays, as well as the exotic light states beyond the Standard Model. These studies offer unique opportunities to explore new physics beyond the Standard Model in the tau-charm energy region.

Keywords charm quark, BES Ⅲ, new physics

* 国家重点研发计划(批准号: 2023YFA1606000)、国家自然科学基金(批准号: 12035009; 12175321)资助项目

1 引言

标准模型的建立过程和相应的实验发现几乎构成了百多年来粒子物理发展的整个历史,其中1974年粲夸克的发现是标准模型发展历史上的里程碑之一^[1, 2]。然而,越来越多的实验结果表明,仍然有很多物理事实是标准模型无法解释的,这驱使人们不得不去寻找超越标准模型的新物理。

寻找超标准模型新物理的实验大致可以分为两大类:(1)特别设计的非对撞机实验,例如,各种暗物质粒子直接探测实验、质子衰变实验、无中微子双贝塔衰变实验、带电味道改变中性流实验等;(2)综合性的对撞机实验,例如,ATLAS和CMS等高能前沿实验等。两者都发表了大量的关于新物理寻找的实验结果,然而到目前为止,这两大类实验都没有找到超标准模型新物理的迹象。这意味着,我们应该在更大的能量范围内利用更大的数据样本进行探索。

第三代北京谱仪BESⅢ实验是一个高亮度前沿的正负电子对撞机实验^[3],其工作的能量区间是2—5 GeV,主要是用来研究其中的粲夸克和 τ 轻子的性质,因而称之为陶—粲能区。该能区有非常丰富的物理潜力,有丰富的共振态,包括粲偶素和粲强子,特别是该能区存在众多的阈值结构,包括D介子、 D_s 介子、粲重子和 τ 轻子等都可以成对产生,利用这个特点可以开展其他能量区间无法进行的特色研究。这个能区也是微扰和非微扰量子色动力学(QCD)的过渡区域,具有研究QCD强相互作用的独特能力。另外,我们还可以寻找奇特强子态。BESⅢ采集了大量的数据,有非常好的探测器性能和数据质量。基于这些数据,可以在比较低的能量范围,对超标准模型的可能迹象进行寻找,这些结果将是非对撞机实验和高能前沿实验的必要补充^[4, 5]。接下来将具体介绍BESⅢ实验在超出标准模型新物理寻找方面的一些特色工作。

2 BESⅢ上新物理的寻找

2.1 寻找粲偶素弱衰变

粲偶素是由一个粲夸克和一个反粲夸克组成的束缚态,粲偶素家族包括 J/ψ 、 $\psi(3686)$ 、 $\psi(3770)$ 、 η_c 、 χ_{cJ} 等,主要通过强作用和电磁作用衰变。然而,理论上也允许存在一个粲夸克通过弱作用衰变为较轻夸克的过程,例如,卡比博允许的粲夸克到奇异夸克的弱衰变,以及卡比博压制的粲夸克到下夸克的弱衰变^[6]。这些衰变通过交换W玻色子进行,依据W玻色子的不同衰变方式,可以分为强子过程如 $J/\psi \rightarrow D_s \rho$ 、 $J/\psi \rightarrow D_s \pi$ ^[7],半轻过程如 $J/\psi \rightarrow D_s e \bar{\nu}$ 、 $J/\psi \rightarrow D e \bar{\nu}$ 、 $J/\psi \rightarrow D \mu \bar{\nu}$ 等^[8]。然而,相对于强衰变和电磁衰变,粲偶素的弱衰变是极其罕见的,在实验上至今仍未被发现。标准模型预测粲偶素弱衰变的分支比通常在 10^{-10} 以下,而所有弱衰变过程的分支比总和大约在 10^{-8} 量级。这些粲偶素弱衰变过程可以在高亮度实验如BESⅢ、LHCb、Belle中,通过大量产生和精确测量粲偶素的衰变产物进行寻找。目前,使用BESⅢ采集的全部一百亿个 J/ψ 事例测量得到 J/ψ 各种弱衰变道的分支比上限大约在 10^{-8} — 10^{-7} 量级。这些测量结果与标准模型理论预测值 10^{-10} 相比,还有大约两个数量级的差距。

对粲偶素弱衰变的研究不仅可以提高对于强相互作用和QCD的理解,还能提供寻找标准模型之外新物理现象的窗口。如果观测值显著超出标准模型的预期,那么可能预示着新物理的贡献。随着实验技术的进步和下一代高亮度对撞机的建设,粲偶素弱衰变的寻找将更有希望,能够真正从实验上进入粲偶素弱衰变测量的窗口,进一步推动对标准模型的精确验证,并为新物理现象的探索提供更强有力的实验依据。

2.2 寻找粲夸克味道改变中性流

在以W玻色子作为传播子的带电弱相互作用中,不同代际耦合时轻子味道是严格守恒的,

即电子到电子型中微子, 缪子到缪子型中微子, 而不存在电子到缪子型中微子之类的跨代耦合, 这就是带电轻子的味道守恒。然而, W 玻色子对夸克的耦合并不严格遵从代际间的守恒。比如, 除了下夸克和上夸克的同代夸克之间的弱作用(反映为中子的衰变)外, 还存在奇异夸克到上夸克之间的夸克跨代耦合(反映为 Λ 粒子的衰变)。

1963 年, 卡比博建议引入一个卡比博角 θ_c 对重子的带电弱衰变进行修正, 在许多弱衰变过程中修正获得了很大的成功。但是, 对于 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 之类的衰变, 即味道改变中性流过程(flavor changing neutral current, FCNC), 计算得到的衰变率远大于实验测量的上限。为了解决这个矛盾, 1970 年(在粲夸克实验发现的前 4 年), 格拉肖、伊利奥普洛斯、马亚尼引入了第四个夸克(即后来发现的粲夸克), 其对奇异夸克和下夸克的耦合分别携带因子 $\cos\theta_c$ 和 $\sin\theta_c$, 这就是 GIM 机制。

GIM 机制通过引入粲夸克构造了两代夸克的混合矩阵。由于上夸克的振幅贡献刚好被粲夸克的抵消, 从而解释了 K^0 介子衰变中 FCNC 过程被高度压低的实验现象。此外, GIM 机制为引入第三代夸克(底夸克和顶夸克)提供了理论基础。1973 年(粲夸克被发现的前一年), 小林诚和益川敏英推广了卡比博—GIM 机制, 引入了第三代夸克, 从而完整构建了描述夸克味道混合的 CKM 矩阵。该矩阵可以由三个夸克味道混合角与一个 CP 破坏相角描述。

对于弱相互作用带电流(由 W 玻色子主导), 夸克味道变化是通过 CKM 矩阵元实现的。对于一个给定的夸克 FCNC 过程, 由于 CKM 矩阵的么正性和对角化, 导致了不同夸克贡献的相互抵消, 从而极大地压制了其发生几率。这种抵消效果是 GIM 机制的核心。因此, 在标准模型中 FCNC 过程并不能在树图阶发生, 而只能在更高阶的圈图中发生。

目前, KTeV、NA48、NA62 等实验已经在 K 介子的衰变中发现了奇异夸克到下夸克的 FCNC 过程, 其中 $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的分支比在 10^{-9} 量级,

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 的分支比在 10^{-10} 量级, $K_L^0 \rightarrow e^+ e^-$ 的分支比在 10^{-11} 量级。在 B 介子的衰变中, LHCb、Belle、BaBar 等实验也发现了底夸克到奇异夸克的 FCNC 过程 $B \rightarrow K/K^* \mu^+ \mu^-$ (在 10^{-7} — 10^{-6} 量级) 和 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (在 10^{-9} 量级)。但是粲夸克的 FCNC 过程至今仍未发现, 因此粲夸克的 FCNC 过程是一个重要的研究领域。由于 FCNC 过程在标准模型中被高度抑制, 对它们的研究在探寻超越标准模型的新物理现象中也具有重要意义。

在标准模型中, 粲夸克的 FCNC 过程主要包括以下几类。第一类是辐射衰变($c \rightarrow u\gamma$), 其中粲夸克转变为上夸克, 同时发射一个光子。这类过程通过圈图发生, 传播子包含下型夸克(如下夸克 d、奇异夸克 s 和底夸克 b)以及 W 玻色子。第二类是轻子对衰变($c \rightarrow u l^+ l^-$, 其中 l 代表轻子, 如电子或 μ 子), 同样粲夸克转变为上夸克, 同时发射一对轻子(如电子对或 μ 子对)。在实验观测上, 对粲夸克 FCNC 过程的寻找包括 D 介子衰变 $D^0 \rightarrow l^+ l^-$ 、 $D^+ \rightarrow \pi^+ l^+ l^-$, 粲偶素衰变 $J/\psi \rightarrow D^0 \gamma$ ^[9]、 $J/\psi \rightarrow D^0 l^+ l^-$ ^[10]。在 BES III 实验中, 使用目前采集的全部一百亿个 J/ψ 事例、27 亿个 $\psi(3686)$ 事例, 以及 $\psi(3770)$ 衰变产生的 D 介子对数据, 能够对一系列 FCNC 过程进行寻找, 并从中寻找可能的超出标准模型新物理的迹象^[11]。

2.3 寻找带电轻子味道破坏

如前所述, 在标准模型中轻子数和轻子味道是严格守恒的。因此, 在标准模型中没有任何机制能够改变轻子的味道。中微子振荡这一超出标准模型实验现象的发现, 表明中微子具有极小的质量, 从而导致了中性轻子(即中微子)的味道破坏。因此, 检验带电轻子是否严格遵循代际守恒就成为了粒子物理实验高精度测量的重要目标之一。

前文介绍的粲偶素弱衰变过程和粲夸克味道改变中性流过程虽然在实验上尚未发现, 但仍然是标准模型允许发生的过程, 只是因为被高度压低而导致其衰变分支比非常小, 而带电轻子的味

道破坏(charged lepton flavor violation, CLFV)过程在标准模型中却是严格禁戒的。但是,在超越标准模型的理论中,CLFV过程可能会以显著的概率发生。因此,任何实验上发现的CLFV过程都是超出标准模型新物理存在的直接而明确的证据。

CLFV过程既可以在轻子如缪子或陶子的衰变、大质量粒子如Higgs或 Z^0 玻色子的衰变中寻找,同时也可以通过B介子、D介子、K介子以及粲偶素、底偶素的衰变寻找,比如在BaBar、Belle、LHCb、BESⅢ等能够大量产生介子的对撞机实验上。

在BESⅢ实验中,CLFV过程的寻找主要集中在粲偶素 J/ψ 、 $\psi(3686)$ 及其中间态粒子,以及 D^0 介子的衰变中。由于BESⅢ采集了世界上最大的阈值处 J/ψ 样本,目前已经得到了若干世界上最严格的 J/ψ 的CLFV衰变分支比上限测量结果,包括 $J/\psi \rightarrow e\tau$ 、 $J/\psi \rightarrow e\mu$,如图1所示^[12]。同时,基于 J/ψ 衰变过程中产生的大量中间态强子,也可以在 η 、 η' 等介子的衰变中寻找CLFV过程。BESⅢ实验也采集了世界上最大的阈值处 $\psi(3686)$ 事例共27亿个。基于这些 $\psi(3686)$ 事例,不仅可以寻找 $\psi(3686) \rightarrow e\mu/e\tau/\mu\tau$ 等CLFV过程,也可以在

$\psi(3686)$ 衰变产生的 χ_{c0} 等中间态中寻找CLFV过程。此外,通过寻找两个不同味道带电轻子伴随一个辐射光子末态的过程,能够在更多的维度上探测不同的新物理。

2.4 重子数、轻子数、C破坏与CP破坏

所有微观粒子都有反粒子,且这些反粒子的物理特性与物质粒子完全对称。物质和反物质的地位应该是对等的,没有谁比谁更优越。按照大爆炸宇宙学模型,物质和反物质等量产生,因此宇宙中物质和反物质的数量应该是一样多的。然而,现代天文和宇宙学观测结果表明,宇宙中两者的地位严重失衡,物质数量远远超出反物质的数量,这就是宇宙正反物质不对称疑难。

前苏联物理学家萨哈罗夫指出,若想解决这个疑难,需满足三个条件。第一是存在重子数不守恒过程,因为如果重子数在任何过程中都守恒,则正反物质将永远等量。第二是C和CP对称性的破坏,若C或CP中的任意一个对称性存在,则重子数破坏过程就会产生相同数量的重子和反重子。第三是脱离热平衡,如果宇宙一直处于热平衡中,则重子与反重子将具有相同的热分布,因而会有相同的密度和数量。

理论家们提出了各种各样的理论和模型来猜测这些破坏效应,实验家们也在非对撞机和对撞机上做了大量实验来进行寻找。经过长达半个多世纪的探索,人们于1964、2004、2019年分别在K介子、B介子和D介子的衰变中发现了CP破坏现象,然而这些CP破坏的大小远远没有达到足以解释正反物质不对称疑难的程度。所以,在更多的强子或轻子衰变中寻找新的CP破坏来源仍然是极为重要的。BESⅢ利用100亿 J/ψ 粒子及其衰变产生的次级产物,对可能存在直接和间接CP破坏效应的各种衰变进行了仔细研究,遗憾的是至今没有看到新的CP破坏来源。

另一方面,重子数破坏过程是解决不对称疑难的另外一个重要因素。虽然很早就有实验在寻找核子(包括质子和中子)的衰变,但大统一理论

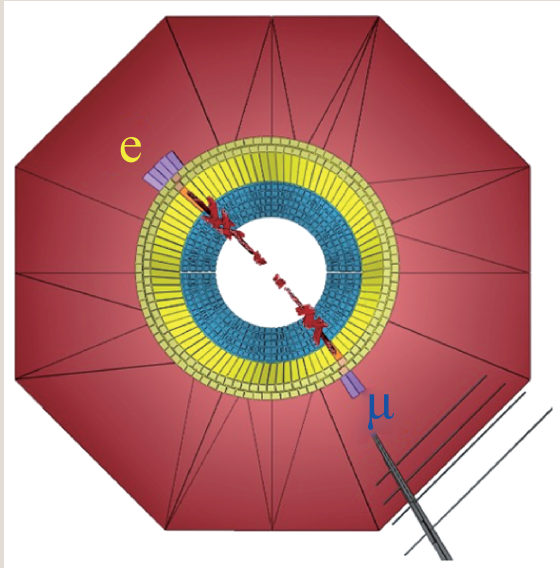


图1 在BESⅢ实验中,粲偶素 J/ψ 衰变到电子和缪子的带电轻子味道破坏过程的模拟信号事例显示

提出后, 质子寿命成为验证大统一理论的重要证据, 这种寻找才真正多了起来。从20世纪80年代的SOUDAN-1实验, 到现在的超级神冈实验, 人们对诸多可能的核子和反核子衰变进行了寻找, 对质子寿命上限最严格的实验约束已经达到 10^{34} 年, 这表明重子数守恒是非常严格的。然而, 核子是由第一代夸克组成的, 质子衰变实验的结果实际上只是对第一代夸克构成的强子的约束, 第二代或第三代夸克构成的强子衰变时会不会破坏重子数守恒呢? 为了回答这个问题, 实验家们在各种各样的强子衰变中寻找重子数破坏过程。北京谱仪实验利用100亿 J/ψ 粒子及其衰变产生的次级粒子, 对若干可能的重子数破坏过程进行了首次研究^[13], 如图2所示, 为重子数破坏过程的研究做出了重要贡献。

近些年来, 由于中微子振荡的发现, 轻子数破坏开始被人们重视起来。在标准模型中, 虽然重子数和轻子数可以通过Sphaleron过程被破坏, 但其差值是守恒的, 于是重子数破坏可以由轻子数破坏转化而来。而且, 轻子数破坏过程也能为验证中微子是否含有马约拉纳成分提供实验依据。所以, 很多实验开始寻找轻子数破坏过程。BESⅢ对粲介子、 J/ψ 、 $\psi(3686)$ 及各种次级粒子如 ϕ 、 ω 等可能的轻子数破坏衰变进行了寻找, 首次给出了多个实验约束^[14]。

2.5 暗物质寻找与不可见衰变研究

暗物质是超出标准模型新物理的最强证据之一。其存在有诸多宇宙观测的支持, 如宇宙微波背景辐射、宇宙大尺度结构、星系(团)旋转速度曲线和引力透镜等。最新的观测结果表明, 宇宙总能量的26.5%由暗物质提供, 而已知标准模型物质仅占5%, 剩下的约68.5%由暗能量提供。标准模型内的粒子都不可能是暗物质的候选者, 所以其根源极可能是超出标准模型的新物理。

目前搜寻暗物质的实验可分为直接探测、间接探测、天文宇宙学和加速器探测等四大类别。前三类都需要天文宇宙学的参数输入, 所以受限

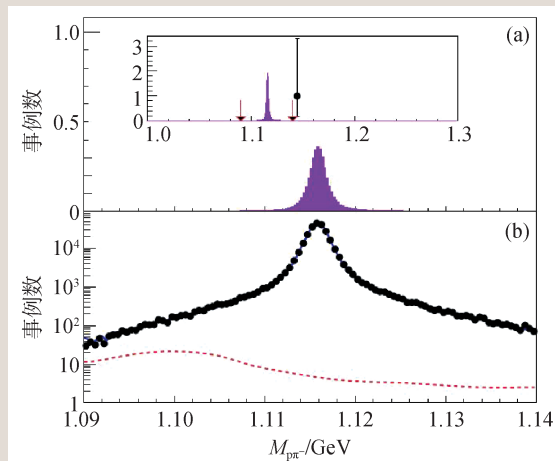


图2 在BESⅢ实验中, 通过质子和 π 介子重建 Λ 重子的不变质量谱, 从而探测 $\Lambda-\bar{\Lambda}$ 重子振荡以寻找重子数破坏过程。错误符号过程(a)和正确符号过程(b)的 Λ 重子质量分布图。其中, (a)中内插图在更宽范围内展示了同一个分布。实验数据表示为黑色数据点, 蒙特卡罗模拟的振荡信号用紫色实心直方图表示, 本底则用红色的虚线表示

于天文宇宙学理论和实验的不确定性。而加速器实验没有这方面的局限, 其结果更具一般性。陶粲能区高精度加速器实验可以搜寻低质量暗物质候选粒子存在的踪迹。

目前对暗物质粒子的研究主要集中在“弱作用大质量粒子”(weakly-interacting massive particles, 即WIMPs)上, 但这不是暗物质粒子唯一的候选者。迄今为止, 在高能量前沿实验(如ATLAS、CMS等)和深地暗物质实验(如PandaX、CDEX、XENON等)都没有看到明确的WIMPs信号, 所以应该在更宽质量范围内寻找暗物质粒子, 包括MeV—GeV甚至更轻的暗物质粒子。BESⅢ实验对探测轻的暗物质粒子有独特的优势。此外, 我们还可以通过探寻暗物质模型中的其他粒子来研究暗物质。

BESⅢ研究了 $e^+e^- \rightarrow \gamma\chi\chi$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma + \text{invisible}$ (不可见)过程^[15], 其中 χ 代表暗物质粒子。因为 χ 无法直接探测, 所以该过程的特征是单光子末态。这些测量可以用来约束暗物质。

较轻的暗物质粒子也可以出现在强子和介子的衰变末态, 表现为介子和强子的不可见衰变。例如BESⅡ实验对 J/ψ 的不可见衰变进行过测量,

利用 $J/\psi \rightarrow \chi\chi$ 衰变约束了与光子或粲夸克耦合的暗物质粒子。BESⅢ采用 J/ψ 的标记数据给出了赝标量介子 η 、 η' 和矢量介子 ϕ 和 ω 不可见衰变的上限, 约束了暗物质粒子的性质。

为解释宇宙中正反物质不对称性和中子寿命问题而提出的一些暗物质模型, 预言 Λ 超子可以衰变到不可见末态。BESⅢ通过 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$, $\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p}\pi^+$ 过程标记 $\bar{\Lambda}$ 的产生, 然后利用反冲侧寻找 Λ 超子的不可见衰变过程^[16]。该研究首次直接通过实验约束了超子不可见衰变, 给出 Λ 不可见衰变的分支比上限为 7.4×10^{-5} 。BESⅢ利用 $J/\psi \rightarrow \phi K_s K_s$ 开展了 K_s 不可见衰变的寻找, 首次直接通过实验约束了 K_s 的不可见衰变^[17], 给出 K_s 的不可见衰变的分支比上限为 8.4×10^{-4} 。

BESⅢ还研究了含有不可见末态的味道改变中性流过程, 如 $D^0 \rightarrow \pi^0 + \text{invisible}$, $D^0 \rightarrow \gamma/\omega + \text{invisible}$, $\Lambda_c \rightarrow p + \text{invisible}$ 、 $\Sigma^+ \rightarrow p + \text{invisible}$ 等过程^[18], 这些结果都可以限制相关暗物质的理论模型。

2.6 寻找超出标准模型的轻奇特态

一类重要的新物理工作是寻找超出标准模型的轻奇特态, 例如暗区粒子的寻找。很多新物理模型都预测在标准模型之外存在暗区 (dark

sector)。暗物质预示可能存在一个或多个暗区。暗区中会出现新的相互作用和多种奇特粒子, 包括暗物质粒子。暗区可以通过媒介子引入特定的微弱相互作用与标准模型产生联系, 从而改变标准模型的一些过程, 也会引入一些新共振态。暗区相关的新物理处于能量前沿、亮度前沿和宇宙学前沿交叉的部分, 有丰富的现象学。

BESⅢ实验可以寻找一些较轻的暗区粒子, 包括自旋为1的暗矢量玻色子、自旋为1/2的暗费米子和自旋为0的暗(赝)标量粒子等。

典型的暗矢量玻色子是暗光子。暗光子与标准模型粒子的相互作用和光子类似, 但作用强度远小于光子。对暗光子的讨论可以推广到更一般的暗矢量玻色子上。BESⅢ在寻找暗光子过程中发表了一系列结果, 包括通过正负电子对撞的初态辐射过程寻找衰变为轻子对的暗光子和不可见的暗光子。同时也利用 J/ψ 衰变如 $J/\psi \rightarrow \eta' e^+ e^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \eta e^+ e^-$ 过程, 在末态正负电子的不变质量谱上去寻找共振结构, 给出了对特定范围参数空间的限制, 约束了特定的质量区间的暗光子质量以及其与标准模型光子的混合参数的关系。

轴子是一类赝标量粒子, 最初是为了解决强CP问题而被提出的。在新物理模型中还存在其他与轴子性质类似的赝标量粒子, 统称为类轴子粒子。寻找轴子和类轴子的实验包括光穿墙实验、微波腔实验、太阳望远镜实验、束流收集和对撞机实验等。BESⅢ分别利用27亿 $\psi(3686)$ 事例中的 $\psi(3686) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 过程(图3)和正负电子对撞直接产生的100亿 J/ψ 事例, 通过 $J/\psi \rightarrow a\gamma$, $a \rightarrow \gamma\gamma$ 过程去寻找类轴子过程, 给出联合分支比上限。将这些上限转化成轴子和光子的耦合参数后, 可以排除类轴子—光子耦合常数大于 10^{-4} 的空间, 在类轴子质量区间0.165—2.85 GeV内给出了世界上最严格的结果^[19]。

此外, BESⅢ实验还寻找了其他超出标准模型的新粒子。一些超对称模型预言CP是奇数的轻希格斯粒子 A^0 , BESⅢ通过 $J/\psi \rightarrow \gamma A^0$, $A^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 来寻找这个新粒子, 得到的分支比上限达到了 10^{-8} 左右, 对模型中真空期望值的混合

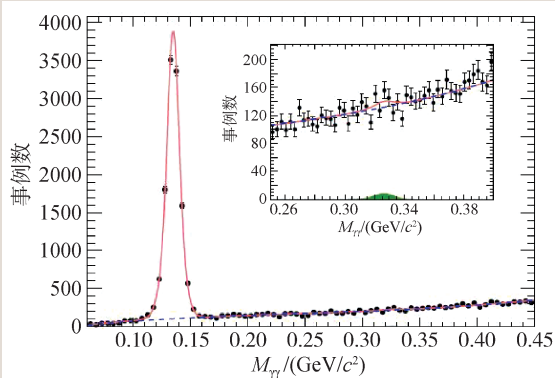


图3 在BESⅢ实验中, 通过重建双光子不变质量谱在 J/ψ 辐射衰变中寻找类轴子。其中, 黑色点是实验数据, 蓝色虚线是非峰状本底, 绿色实心直方图是信号形状, 红色实线是拟合结果, 内插图是主图在 $0.32 \text{ GeV}/c^2$ 附近的放大图

角参数的约束,在轻希格斯质量区比 BaBar 实验的结果更严格^[20]。

3 结语

综上所述, J/ψ 、 $\psi(3686)$ 等粲偶素衰变提供了很多寻找超出标准模型新物理的独特机会。经

过十五年来的物理运行和数据分析, BES III 在物理研究上取得了非常好的结果。BES III 探测器性能表现依然良好, 在 1.85—5.6 GeV 已经或者即将取得大批量高质量的数据样本。在此基础上, 利用独特的数据集和分析技术, 通过和理论家的紧密合作, 将开展更为广泛的寻找新物理的研究, 在世界同类研究中展现独特的优势。

参考文献

- [1] Aubert J J *et al* [E598]. Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1404
- [2] Augustin J E *et al* [SLAC-SP-017]. Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1406
- [3] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Nucl. Instrum. Meth. A, 2010, 614: 345
- [4] Chen S J, Olsen S L. Natl. Sci. Rev., 2021, 8(11): nwab189
- [5] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Chin. Phys. C, 2020, 44: 4
- [6] Li H B, Zhu S H. Chin. Phys. C, 2012, 36: 932
- [7] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2014, 89: 071101(R)
- [8] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2014, 90: 112014; JHEP, 2021, 06: 157; JHEP, 2024, 01: 126
- [9] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2024, 110: 112012
- [10] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2014, 96: 111101(R)
- [11] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2018, 97: 072015; Phys. Rev. D, 2018, 97: 091102(R); Phys. Rev. Lett., 2024, 133: 121801
- [12] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2021, 103: 112007; Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Sci. China-Phys. Mech. Astron., 2023, 66: 221011; Li Z *et al*. Front. Phys. (Beijing), 2024, 19: 64201
- [13] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2019, 99: 072006; Phys. Rev. D, 2020, 101: 031102; Phys. Rev. D, 2022, 105: 032006; Phys. Rev. D, 2022, 106: 112009; Phys. Rev. D, 2023, 108: 012006; Phys. Rev. Lett., 2023, 131: 121801
- [14] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2019, 99: 112002; Phys. Rev. D, 2020, 101: 112005; Phys. Rev. D, 2021, 103: 052011; Chin. Phys. C, 2025, 49: 043001; JHEP, 2025, 01: 109
- [15] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2020, 101: 112005; Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Lett. B, 2023, 839: 137785
- [16] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2022, 105: L071101
- [17] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). 2025, arxiv:2501.06426
- [18] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2025, 111: L011103; Phys. Rev. D, 2022, 106: 072008; Phys. Lett. B, 2024, 852: 138614
- [19] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Lett. B, 2023, 838: 137698; Phys. Rev. D, 2024, 110: L031101
- [20] Ablikim M *et al* (BES III Collaboration). Phys. Rev. D, 2016, 93: 052005

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美, 本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰, 色泽饱满, 富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用, 均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至: physics@iphy.ac.cn; 联系电话: 010-82649029。

《物理》编辑部