

北京谱仪新物理研究亮点

王大勇

(北京大学物理学院,核物理与核技术国家重点实验室 100871)

值此北京谱仪 BESIII 实验发表 500 篇科学论文之际,本文尝试介绍 BESIII 在寻找超出标准模型新物理课题上的一些亮点工作。图 1 展示了粒子物理的标准模型中物质的基本组分粒子和传递基本相互作用的媒介粒子。BESIII 实验工作的能量区间是 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。由于工作在这样一个有非常丰富物理潜力的陶-粲能区,BESIII 可研究的课题非常广泛。这个能区有丰富的共振态,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、Ds 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。我们还可以寻找奇特强子态,包括胶球、混杂态、多夸克态等。由于 BESIII 采集了大量的数据,有非常好的探测器性能和数据质量,我们可以用它来寻找新物理。

之所以要寻找超出标准模型的新物理,是因为当代有很多重大科学问题需要解答。大家都比较熟知的包括暗物质、中微子质量问题、宇宙中正反物质不对称性问题等,这些都是非常重大的科学疑难。根据一些理论家的分类,可以把我们面临的这些问题分为三类。第一类问题是标准模型自身结构的问题,比如为什么标准模型有这么自由参数,这些参数是由什么来决定的等。第二类是粒子物理和天文观测所揭示的宇宙结构相关的问题,比如说暗物质、暗能量的本质是什么?天文观测中的一些反常现象如何去解释?第三类是更深层次的问题,也就是关于整个时间和空间性质的问题,这也是和标准模型密切相关的。要回答上述这些问题,我们需要从不同方面做不同的努力。但遗憾的是,在高能量前沿和宇宙学前沿的研究中,到目前为止都没有发现任何超出标准模型新物理的直接证据。比如,在具有最高对撞能量的欧洲大型强子对撞机上对新物理粒子和现象的直接寻找和在专门的地下暗物质直接探测实验,都还没有找到任何直接的新物理证据,只是设置了比较严格的上限。同时理论家也在持续地探索各种不同的新物理模型,提出了种种设想。有的想法很奇特,现象很丰富,但是目前为止没有任何一个得到了明确的实验支持。从这个角度看,在高能量前沿和宇宙学前沿以外,高亮度前沿实验特别是高亮度前沿的对撞机实验,将会为寻找新物理提供非常重要的实验输入,发挥越来越重要的作用。BESIII 就是这样一个处在高亮度前沿的一个高亮度对撞机实验。

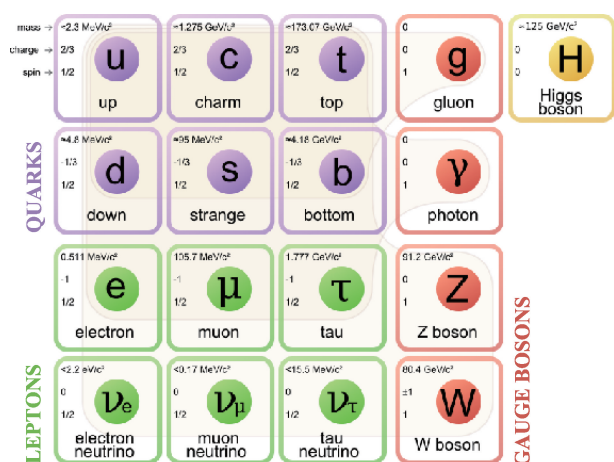


图 1 粒子物理标准模型中的基本物质组分粒子和传递基本相互作用的媒介粒子

在 BESIII 上寻找新物理需要扬长避短。通常新物理的贡献比较小,对于标准模型占主导的过

程,新物理的贡献被淹没在标准模型的贡献中不容易被发现。因此需要尝试去寻找标准模型的贡献被极大压低的过程,使得新物理的贡献可以凸显。或者是寻找标准模型的贡献直接被禁戒的现象,如果能观测到相关现象,就是新物理存在的直接证据。在 BESIII 上做新物理研究策略是重点关注后两类过程。对第一类过程, BESIII 也可以高精度地测量一些物理量,然后和理论计算比较,去寻找与标准模型的差异,也可以间接地揭示新物理的存在。

在 BESIII 上寻找新物理有很多独特的优势,其研究特点可以总结为四点。第一点就是独特的能区和数据。如前所述, BESIII 运行的能区具有非常丰富的独特的物理,在这里采集了大统计量的数据,包括 100 亿的 J/ψ 数据, 27 亿的 $\psi(3686)$ 数据,以及 2.9 fb^{-1} 的 $D-\bar{D}$ 数据,在 4.17 GeV 能量点的 D_s 数据和粲重子对阈值附近的数据等,这些都非常的独特,数据量也比之前的实验提高了几个量级。到目前为止, BESIII 数据的总积分亮度已经达到了 47 fb^{-1} ,广泛分布在 2.0 到 4.95 GeV 能区,这为新物理寻找提供了很好的条件。在这些大统计量的数据里还有大量的次级粒子样本也可以用来寻找新物理,比如 J/ψ 衰变产生的 $K_s, \eta, \eta', \omega, \phi$ 和超子等粒子的样本都具有很大的统计量,在寻找相应的新物理方面具有独特的优势。第二个特点是数据统计量大,数据质量好,对低动量的电子、光子和中性强子等有很好的效率和鉴别区分能力。第三个特点是 BESIII 数据多数是在阈值附近产生的,可以采用关联标记的技术去进行数据分析,如图 2 所示。这样的分析方法有非常干净的信号,本底得到大大压低。又因为很多系统误差可以抵消,因此系统误差低,还可以做绝对分支比的测量。第四个特点是紧密的理论和实验的合作。因为寻找新物理需要理论家提供很重要的输入和新的想法,实验分析可以参考这些想法去寻找有潜力的研究过程,从而提供更有竞争力的一些结果。以上这些特点,将会体现在下面的一些例子里。

BESII 设置了专门的新物理工作组,其任务是

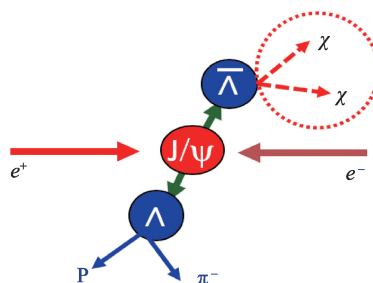


图2 关联标记的分析技术示意图

凝聚合作组内的力量共同开展寻找超出标准模型新物理方面的研究工作。我们发展了共同的分析方法、标准和工具,包括盲分析的策略和数据集、统计处理的标准和工具、一些特定数据的处理方法、工具等。主要新物理研究课题根据研究过程的稀有程度可分为三类:第一类是所谓的稀有过程,就是在标准模型中允许但是非常稀有的过程,包括味道改变中性流过程、粲偶素的弱衰变、其他的稀有过程等;第二类是守恒律和对称性破坏过程,包括重子数和轻子数破坏过程、带电轻子味破坏过程和其他的对称性破坏过程;第三类是直接寻找超出标准模型新物理的粒子,包括暗光子、不可见衰变的粒子、轻希格斯粒子和其他的奇特共振态等。

在稀有衰变研究方面,味道改变中性流(FCNC)是最典型的一类过程。由于 GIM 机制,他们在最低阶的树图层次上是被禁戒的,因此只能通过圈图过程得以发生,所以其发生概率在标准模型中是被严重压低的。在 BESIII 上所做的工作主要是探究 c 夸克到 u 夸克之间的味道改变中性流,特别是伴随着正负电子对的过程。对这些过程的研究与在 B 工厂和 ϕ 工厂上所研究的 b 夸克和 s 夸克的 FCNC 过程互补,特别是它是唯一的 u 型夸克的 FCNC 过程,具有独特性。这些过程里长程贡献不可忽略甚至占主导地位,需要把新物理的短程贡献从里面分离出来,这是比较有挑战性的,需要理论和实验之间的合作。尽管如此,在实验上寻找这些过程具有重要的意义。我们在 BESIII 上做了一系列这样的工作,包括寻找 $J/\psi [\psi(3686)] \rightarrow D^0 e^+ e^-$, $\psi(3686) \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{p} e^+ e^-$, $D \rightarrow h(h') ee$ 等过程的研究,都是世界上首次寻找或者把之前世界上最好的

结果在精度上改善了两个数量级以上,产生了很重要的影响。第二类稀有衰变的例子是粲偶素的弱衰变过程。粲偶素特别是 J/ψ 和 $\psi(3686)$ 的衰变是以强相互作用和电磁相互作用为主导的,都已经被广泛深入地研究。而弱衰变过程非常稀有,因此之前的实验对其研究比较少。在 J/ψ 和 $\psi(3686)$ 衰变里,由于运动学的约束,它们都不能衰变到 D 介子对但可以衰变成单独的一个 D 介子或 D_s 介子。我们寻找粲偶素衰变到单个的 D 或 D_s 的过程,可以检验标准模型的理论去寻找新物理。之前我们用 2.25 亿个 J/ψ 数据也寻找了 $J/\psi \rightarrow D_s^{(*)-} e^+ \nu_e$, $J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+$, $J/\psi \rightarrow \bar{D}^0 \bar{K}^0$, 等过程。最近又开展了对 $\psi(3686) \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Sigma}^-$ 的首次寻找,和对 $J/\psi \rightarrow D^- e^+ \nu_e$ 和 $J/\psi \rightarrow D^- \mu^+ \nu_\mu$ 这样的包括中微子的半轻弱衰变过程的寻找,约束了对应的分支比上限都达到了 10^{-8} - 10^{-7} 量级。特别是最近发布的对 μ 子道的寻找,是世界上首次寻找。我们还在超子稀有衰变和粲介子的稀有衰变方面做了一系列的工作。发表了 $D^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $D^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$, $D_s^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ 等过程的结果,都具有一定的竞争力。但受限于统计量,能研究的粲介子衰变过程给出的上限还比较有限,只能达到 10^{-4} - 10^{-5} 量级。未来 BESIII 即将完成 20 fb^{-1} 数据的积累,将提供更好的机会去做这样的研究,特别是 BESIII 对于寻找包含低能量电子、光子、 π^0 的过程具有独特的优势,相应分析的灵敏度可以得到进一步提升。

新物理寻找里面第二类的工作是寻找对称性破坏的过程。大家知道,对称性是一个在粒子物理里面具有非常基础性地位的原则。很多的基础对称性包括一些守恒定则可以限制很多过程的发生,比如由于中微子具有非常小的质量,在标准模型中扩展后带电轻子味破坏过程只能通过中微子的混合来进行,其导致的衰变率对应的分支比非常低。比如 μ 子和电子之间的跃迁的分支比是低于 10^{-54} , 这么小的分支比是无法在实验上观测到的。但如果存在某些来自新物理的贡献,这些过程的分支比将被大大提升,甚至可以达到实验上可以探测的程度,实验寻找这样的过程就有重要意义了。BESIII

上开展了一系列的相关工作,主要寻找带电轻子味破坏的粲偶素衰变过程。许多新物理模型,包括超对称模型、重中微子模型、扩展的 Higgs 模型、复合模型、轻子夸克模型,还有其他的反常耦合和新规范玻色子模型等都预测了新物理的贡献,增强这些过程的分支比,比如 $J/\psi \rightarrow e\mu$ 的分支比可以提升 10^{-16} 到 10^{-9} 范围, $J/\psi \rightarrow e\tau$ 的分支比可以提升 10^{-10} 到 10^{-8} 范围。BESIII 已经获取的大统计量 J/ψ 数据,其实验灵敏度已经可以检验这些模型。我们用九十亿的 J/ψ 数据更新了对 $J/\psi \rightarrow e\mu$ 衰变的寻找,得到的 90% 置信度分支比上限是 4.5×10^{-9} , 把之前的上限精度提升了三十倍以上,也是目前为止在重夸克偶素衰变中最严格的带电轻子味道破坏的寻找结果。我们也使用了一百亿 J/ψ 数据分析了 $J/\psi \rightarrow e\tau$ 过程,约束其分支比小于 7.5×10^{-8} , 该结果比之前的实验结果改善了一百倍以上,和理论模型的预期已经非常接近,因而对这些新物理的理论有了很好的约束。BESIII 上也开展了一系列对另外类型的对称性破坏的过程的研究,包括重子数和轻子数破坏的过程。在很多新物理模型里,重子数和轻子数的破坏往往联系在一起,通常要求重子数和轻子数之间的差别是零或二。我们采用了 D 介子、 J/ψ 、 $\psi(3686)$ 、超子等数据做了一系列的研究,一些典型结果汇总在了表 1 之中。在其中一个非常有特色的 Λ - $\bar{\Lambda}$ 振荡的研究中,我们通过 $J/\psi \rightarrow pK^- \bar{\Lambda}$ (正确符号的过程,RS) 去标记 Λ 粒子,通过振荡可以转化成 $pK^- \Lambda$ 这样的过程(错误符号的过程,WS)。通过 WS 比 RS 的比例,可以得到 Λ 振荡率对时间的积分,还可以转换成对 Λ 振荡参数的约束。BESIII 数据的分析结果是 Λ 振荡概率 $P(\Lambda) < 4.4 \times 10^{-6}$, Λ 振荡参数 $\delta m_{\Lambda\bar{\Lambda}} < 3.8 \times 10^{-15} \text{ MeV}$ 。这是世界上对该过程的首次寻找,给出了很好的上限,对约束新物理模型有非常重要的意义。

第三类新物理工作是寻找超出标准模型的共振态。这里一个重要的例子是暗区粒子的寻找。很多新物理模型都预测了在标准模型之外存在所谓的暗区(dark sector),其中有一系列新的粒子和新

表1 BESIII寻找重子数和轻子数破坏的一些结果汇总

Data	Source	Mode	$ \Delta(B-L) $	UL on BF @ 90% CL
$\sqrt{s} = 3.773 \text{ GeV } 2.93 \text{ fb}^{-1}$ $N_{D^+D^-}^{\text{tot}} = (8,296 \pm 31 \pm 64) \times 10^3$ $N_{D^0\bar{D}^0}^{\text{tot}} = (10,597 \pm 28 \pm 98) \times 10^3$	D mesons	$D^+ \rightarrow \bar{\Lambda} e^+$	0	6.5×10^{-7}
		$D^+ \rightarrow \bar{\Sigma}^0 e^+$	0	1.3×10^{-6}
		$D^+ \rightarrow \Lambda e^+$	2	1.1×10^{-6}
		$D^+ \rightarrow \Sigma^0 e^+$	2	1.7×10^{-6}
		$D^0 \rightarrow \bar{p} e^+$	2	$1.2(2.2) \times 10^{-6}$
		$D^+ \rightarrow \bar{n} e^+$	0/2	$1.4(2.5) \times 10^{-5}$
		$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ e^+ e^+$	2	2.8×10^{-6}
		$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^- e^+ e^+$	2	3.3×10^{-6}
		$D^+ \rightarrow K^- \pi^0 e^+ e^+$	2	8.5×10^{-6}
$\sqrt{s} = 3.097 \text{ GeV}$ $N_{J/\psi}^{\text{tot}} = (1,310.6 \pm 7.0) \times 10^6$	J/ ψ meson	$J/\psi \rightarrow \Lambda_c^+ e^-$	0	6.9×10^{-8}
		$J/\psi \rightarrow pK^- \bar{\Lambda} \rightarrow pK^- \Lambda$	2 [BF ratio $P(\Lambda) < 4.4 \times 10^{-6}$]	
	Σ^- hyperon	$\Sigma^- \rightarrow p e^- e^-$	2	6.7×10^{-5}
		$\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+ X$	2	1.4×10^{-4}
$N_{J/\psi}^{\text{tot}} = (1.0087 \pm 0.0044) \times 10^{10}$	Ξ^0 hyperon	$\Xi^0 \rightarrow K^\pm e^\mp + cc.$	2	$3.6 (1.9) \times 10^{-6}$

的相互作用,它们可以通过特定的所谓门户和标准模型产生相互联系,从而改变标准模型所预言的一些过程,也会产生一些新共振态。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。其中的门户也有多种类型,包括赝标量轴子、标量希格斯粒子、重的中微子作为费米子门户等。最著名的也是最广泛采用的模型,是利用矢量门户用来在暗区和标准模型之间传递相互作用,对应的矢量粒子叫作暗光子(dark photon)。我们重点研究的也是这一类的过程。图3展示了BESIII在寻找暗光子过程中的一些结果。其中包括通过正负电子对撞的初态辐射过程,即 e^+e^- 到光子加上电子对或者 μ 子对,去寻找暗光子,我们用两年的数据得到的结果和Babar实验十年数据的结果精度相当。我们同时也在 J/ψ 衰变数据中通过介子衰变去寻找这样的过程,包括 $J/\psi \rightarrow \eta' e^+ e^-$ 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,都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和其与标准模型光子的混合参数的关系。除此以外,我们还寻找了其他的超出标准模型新粒子。一些超对

称模型预言了CP是奇数数值的轻希格斯粒子 A^0 ,我们通过 $J/\psi \rightarrow \gamma A^0, A^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 来寻找这个新粒子。我们曾经用不同统计量的数据去做过这个分析,最新结果是采用了九十亿 J/ψ 数据给出的结果,得到的分支比上限达到了 10^{-8} 左右,对超对称模型中的真空期望值的混合角参数的约束,在希格斯粒子质量小于0.7 GeV的时候比Babar实验的结果更严格。BESIII还发表了通过 $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi \pi, J/\psi \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma \gamma$ 过程去寻找类轴子过程的一个研究结果,给出的90%置信度的联合分支比上限 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 的量级。将这个上限转化成轴子和光子的耦合参数后,排除了参数大于 10^{-4} 的空间,其中类轴子质量在0.165~1.468 GeV范围内我们给出了世界上最严格的结果,比之前Belle-II实验的相关结果改善了三到四倍。我们还首次寻找了重子不可见衰变。该研究的背景是为了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。该研究通过 $J/\psi \rightarrow \bar{\Lambda} \Lambda, \Lambda \rightarrow \bar{p} \pi^+$ 过程标记 Λ 的产生,然后去看反冲侧 Λ 的衰变,去寻找该不可见衰变过程。该研究给出了世界上首次对重子不可见衰变直接实验约

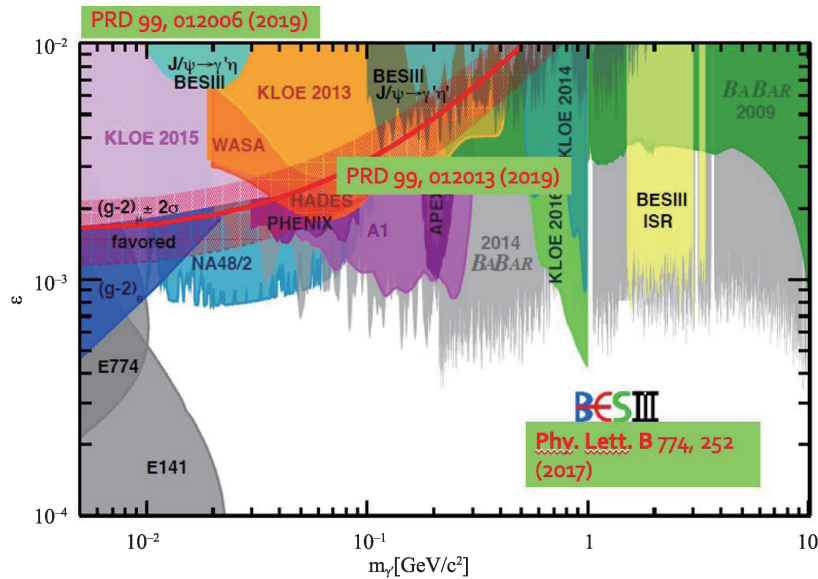


图3 BESIII寻找暗光子的一些结果

束,给出了 Λ 不可见衰变的分值比上限为 7.4×10^{-5} 。在更早的BESIII的研究中也同样采用 J/ψ 的标记数据给出了赝标量介子 η, η' 和矢量介子 ω 和 ϕ 不可见衰变的上限,这些都是非常独特的结果。同时我们还研究了其他的一些含有不可见衰变特征的过程,包括 J/ψ 衰变到光子加不可见粒子,通过初态辐射过程寻找不可见的暗光子和含有不可见末态的味道改变中性流的过程如 $D^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$,给出 $B(D^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.1 \times 10^{-4}$,这是世界上首次对粲强子衰变到包含两个中微子的过程所作的限制。我们还利用粲重子衰变数据,寻找 Λ_c 到质子加一个不可见的暗光子的过程,给出了对一种无质量的暗光子的约束,限制其分支比上限是小于 8.0×10^{-5} 。

综上所述,通过十五年来的物理运行和数据分析,BESIII在物理研究上取得了非常好的结果。BESIII探测器性能表现依然良好,在2.0~5.6 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,开展了非常广泛的关于新物理寻找的课题的研究,在世界上同类研究中展现了独

特的优势。到目前为止,已经有超过三十篇的论文在国际期刊上发表,其中有很多是世界上首次寻找或者世界上最好的约束。经过加速器和探测器升级,BESIII预期还有五到十年的运行取数计划,这将给我们提供更多的机会去探究更多的未知领域,即拉丁语中所谓的Terra Incognita。相信未来会有很多惊喜等待着我们,BESIII同仁已经做好准备,去迎接新的挑战,勇于创新,获得更好的研究结果。

