

重味强子物理的精确测量

高原宁 译

(清华大学 100084)

1. 引言

标准模型代表了描述基本粒子相互作用理论的最新发展水平。在标准模型的发展中,味物理发挥了关键的作用。自然界中夸克有六种味道 u, d, s, c, b, t ,其中 c, b 和 t 夸克的质量分别为 1.2 GeV , 4.2 GeV 和 171 GeV ,远远超过 u, d, s 夸克的质量($m_u=1.5\sim 3.3\text{ MeV}$, $m_d=3.5\sim 6.0\text{ MeV}$, $m_s=104\text{ MeV}$),因此, c, b, t 夸克称为重味夸克,而包含重味夸克的强子称为重味强子。研究重味强子物理既是检验CP破坏的理想场所同时也是对标准模型的极好验证,更是寻找超出标准模型新物理的重要场地。

标准模型可以精确地描述目前观测到的所有与电磁、弱和强相互作用相关的基本物理现象。但是,它无法解释一些重要现象,特别是无法回答一个最基本的问题:为什么在可观测范围内宇宙中反物质所占比例如此之低。基于萨哈罗夫(A. Sakharov)在1967年的工作,CP破坏——即物理规律在电荷共轭(C)和宇称(P)的联合变换下的不对称性——是从对称宇宙按动力学演化成重子不对称宇宙的一个必要条件。然而,标准模型中CP破坏程度过低,距解释观测到的宇宙中的重子不对称差几个量级。因此,一定存在超出标准模型的其他CP破坏来源,它们可以令一些CP破坏量与标准模型预言出现可观测的偏离。在标准模型中被强烈压低的稀有衰变尤其有趣,因为与标准模型相比,它们超出标准模型的衰变振幅可能相当大。

大型强子对撞机(LHC)利用第一个运行周期内收集的 7 TeV 和 8 TeV 质心能量下的质子-质子对撞数据,首次观测到了希格斯玻色子,但是没有发现

其他新粒子存在的迹象,也没有找到超对称或超出标准模型的直接信号。除了希格斯粒子的发现,ATLAS、CMS和LHCb实验运行第一年的分析结果在CP破坏和重味强子的稀有衰变领域也产生了重大影响。通过对末态包含 μ 子对的过程进行研究,LHCb发表了 c 和 b 夸克领域的大量味物理的观测结果,ATLAS和CMS则对 b 夸克研究作出了很大的贡献。这些测量也都没有发现超出标准模型的迹象。

尽管如此,持续改进味物理领域的理论和实验,对未来基本粒子物理学的发展是极为重要的。一方面,这些改进可以提高间接测量超出标准模型物理的能力,在没有直接探测到超出标准模型信号的情况下探索更高的能标。另一方面,一旦直接观测到新粒子,他们将使精确测定超出标准模型的拉氏量成为可能。本文从对重味物理发展历史的简短介绍出发,综述了目前的研究状况,着重介绍了LHC上各项实验的一些显著结果。

2. 历史回顾

2.1 小林-利川机制的起源

如前文所说,味物理在标准模型的发展中发挥了重要作用。比如小林(M.Kobayashi)和利川(T.Maskawa)在1973年一篇著名文章中预言了第三代夸克的存在,就是这方面最著名的预言之一。这项工作使他们获得了2008年的诺贝尔物理学奖,以表彰他们发现了对称性破坏的起源,进而预言了自然界中至少存在三代夸克。小林和利川拓展了卡比博机制(仅包括 u, d 和 s 夸克)和GIM机制(同时包括

了c夸克),指出如果存在六种夸克,CP对称性破坏就能被包含进标准模型的框架中。这一理论通常被称作小林-利川(KM)机制。必须强调的是,在他们提出这一机制时,实验上还只观测到了较轻的三个夸克组成的强子。1974年实验上发生了突破性的进展,布鲁克海文实验室和SLAC几乎同时发现了包含c夸克的新粒子。接下来FNAL又在1977年和1995年相继观测到了b夸克和t夸克。

小林和利川提出的这一概念在80年代初期以卡比博-小林-利川(CKM)夸克混合矩阵的形式纳入到了标准模型之中。CP对称性破坏这一早在1964年就由中性K介子衰变实验揭示的现象终于因CKM矩阵中一个不可约的复相角得到合理解释。这样一来,实验上对KM机制有效性的证明以及对CP破缺相角的精确测量就变得至关重要。

2.2 B物理的兴起

CKM矩阵的性质使得KM机制的精确检验需要将物理研究扩展到重味强子领域。20世纪80年代初CESR的CLEO实验在b夸克领域做出了开创性工作。同一时期,毕基(I. Bigi)、卡特(A. Carter)和森达(T. Sanda)发表了系列文章,研究在 B^0 衰变至 $J/\psi K_s^0$ 这一CP本征态的衰变概率中体现出明显CP破坏效应的可能性。另外,他们也指出这一测量结果可以用不包含强相互作用带来的相关理论不确定度的CP破坏相角来解释。然而,实验上面临两个难题:一是实验观测所需要的 B^0 介子数目远远超出了当时的产生和收集能力;二是需要一种精确测量衰变时间的方法并能够确定 B^0 介子产生时的味量子数。

不久后的1987年,DESY上运行的ARGUS实验首次测量了 B^0 和 \bar{B}^0 介子的混合比,使通过 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ 衰变测量CP破坏成为可能。此外,正负电子储存环性能的极大提升也增强了这一可能性。20世纪80年代末,人们研究了多种不同的新实验装置的设计方法。其中,奥德温(P. Oddone)在1987年提出了一个新颖的设想:利用运行于 $\gamma(4S)$ 质心能量下的高亮度不对称环形正负电子对撞机。

因为束流能量的不对称,产生的B介子会向实验室系中更高能量束流的方向运动。B介子衰变长度由最先进的硅顶点探测器测量,从而实现衰变时间的精确测量。最终,两个基于奥德温想法的实验装置,即所谓的B工厂,被建造了出来。它们分别是美国SLAC的PEP-II实验和日本KEK的KEKB实验。相应的探测器,PEP-II上的BaBar和KEKB上的Belle分别于1993年和1994年通过了测试。如果说CESR最初能够每天产生几十对 $b\bar{b}$,那么PEP-II和KEKB就能够每天产生100万量级的 $b\bar{b}$ 。

同时,在20世纪90年代, Z^0 工厂,比如CERN的LEP实验及SLAC的SLD实验,也进行了很多b物理的实验测量。尽管数据量相对较少,但 Z^0 衰变产生的b强子具有明显前冲的特点,这使得所有b强子寿命和中性B介子振荡频率的测量得以实现。特别是,这是第一次使研究 B_s^0 介子和b重子,甚至是少数的 B_c^+ 介子衰变成为可能。Tevatron以强子碰撞作为b夸克的来源,利用它的第一个运行周期数据也做出了类似的开创性工作。

PEP-II和KEKB运行后不久就打破了之前粒子对撞机瞬时和积分亮度的纪录。在这两个项目结束时,BaBar和Belle以3%的相对精度测量了 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ 衰变中的CP破坏效应。在BaBar和Belle上收集到的大量B介子衰变事例促进了一系列味领域中实验的开展,这远远超出了最初的预期。同时,Tevatron的第二个运行周期的数据使它也在这些方面迈出了重大的一步。尽管与B工厂相比,FNAL的CDF和D0实验的研究范围有限,但是它们收集了大量重味强子衰变的事例,并进行了一些高精度的测量,尤其是在2006年第一次观测到 B_s^0 介子混合。

2.3 LHC时期

在BaBar和Belle探测器尚处于结构检查阶段,还未被批准运行的时候,就已经有三个明确的LHC上的b物理实验方案被提出,分别名为COBEX、GAJET和LHB。GAJET和LHB都是基于固定靶的实验,前者是将一个气体靶放置在LHC的束流管内

进行实验,后者则将束流引出,在外部进行实验。COBEX则基于质子-质子对撞模式。这三组实验的发起者们之后组成了一个团队,一起向LHC实验委员会提交了一个基于对撞机模式的实验方案,即LHCb。为发挥LHC在重味物理方面研究的潜力,LHCb探测器放置在质子-质子对撞的前向区间,以利用LHC束流前向(或后向)较大的 $b\bar{b}$ 产生截面。LHCb实验在1998年被批准通过,并在2009年LHC启动时开始采集数据。

LHCb探测器的结构如图1所示。探测器包含一个高精度的寻迹系统,该系统由一个包围pp对撞区域的硅条顶点探测器、一个放置于约有4Tm偏转能的偶极磁铁上游的大面积的硅条探测器和磁铁下游的三组硅条探测器及漂移管组成。寻迹系统能够测量带电粒子的动量,测量的相对误差从低动量时的0.5%到200 GeV/c时的1.0%不等。顶点探测器内的硅传感器距离LHC的束流只有8 mm,使得在对撞顶点附近的径迹测量能达到很高的精度。这对于区分b和c强子衰变的信号事例和本底至关重要,这些强子在实验室系中的飞行距离往往只有几个厘米。径迹到对撞顶点的距离,即碰撞参数的测量分辨率能达到15~30 μm 。

与ATLAS和CMS探测器相比,LHCb探测器有良好的带电强子鉴别能力。这主要通过两个放置在径迹探测器两边的环状切伦科夫(RICH)探测器实现。在粒子动量已知的情况下,这两个RICH探测器能够给出质子、K介子和 π 介子的鉴别信息。电磁量能器由闪烁体平板和预簇射探测器组

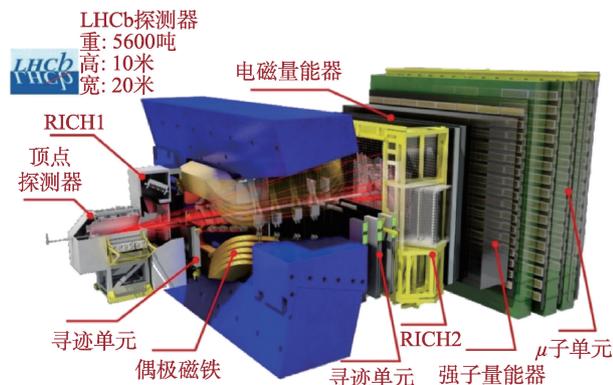


图1 LHCb探测器结构示意图

成,能够提供光子和电子的能量和位置信息,结合寻迹系统的信息,也能够对这些粒子进行鉴别。放置在电磁量能器之后的强子量能器能够提供强子的粒子鉴别信息。在探测器末端,是一个 μ 子鉴别系统,由铁和多丝正比室交替层叠而成。LHCb探测器能通过触发系统进行线上事例筛选。触发系统包括基于量能器和 μ 子鉴别系统的硬件触发和基于完整事例重建的软件触发。LHCb在远低于LHC束流峰值亮度的瞬时亮度下运行。这是为了使它能够接收范围覆盖的前向区域更好地将b和c强子衰变产生的带电粒子与其他pp对撞的产物区分开来。在LHC第一次运行期间,LHCb的对撞点上平均每一次质子束交叉会发生约1.7次pp对撞,对应的亮度为 $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。通过动态调整LHC束流的横向偏移,这个亮度得以保持不变。除了LHCb,ATLAS和CMS探测器的设计目标也包括进行b物理测量,但因为受限于触发系统,并且缺乏有良好的对带电强子进行粒子鉴别能力的子探测器,它们测量的对象主要是末态包含 μ 子对的事例。

3. LHC上的b物理回顾

3.1 CP对称性破坏

在B工厂的实验结果的基础上,我们得以对CKM相关的物理进行精确的测量。其中对CKM矩阵中单个CP相角以外的CP破缺来源的搜寻,对实验的灵敏程度提出了极高的要求。

LHC是一个 B_s^0 介子工厂。一方面,LHC具有非常高的 B_s^0 介子产生截面,另一方面,LHC上的各大实验可以精确测量 B_s^0 振荡。这为精确测量CP破坏相角 φ_s^{cs} 提供了一条可行的途径。LHC上的ATLAS、CMS和LHCb实验都曾对味本征态衰变 $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ 和 $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 进行过测量。最近,LHCb实验首次以一种依赖于极化的方法对 $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ 进行了测量,并借由 $B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$, $D_s^\pm \rightarrow K^+ K^- \pi^\pm$ 这一强子末态的衰变链对 φ_s^{cs} 进行了测量。综合所有结果,LHCb给出 $\varphi_s^{\text{cs}} = -0.010 \pm$

0.039 rad。结合其他实验,尤其是 CMS 和 ATLAS 的结果,不确定度可被进一步减小,得到 $\varphi_s^{\text{cs}} = -0.015 \pm 0.035$ rad。实验结果对 φ_s^{cs} 和衰变宽度差 $\Delta\Gamma_s$ 的约束,及相应的标准模型期望值如图 2 所示。

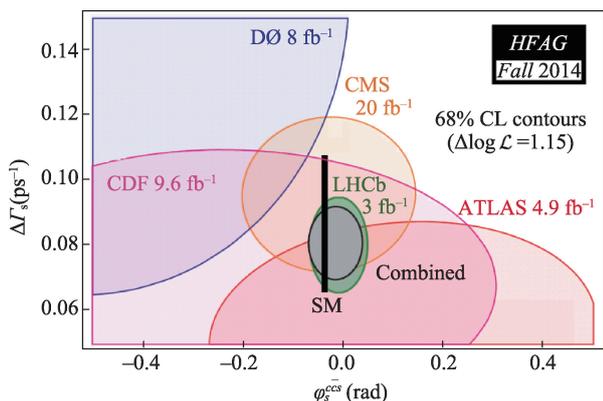


图 2 各实验测量结果对 $\Delta\Gamma_s$ 和 φ_s^{cs} 的约束

当精度达到几度,被压低的企鹅图贡献不能再被忽略。这一影响会使得 φ_s^{cs} 的测量值偏移 $\delta\varphi_s$ 。我们可以通过研究被卡比博机制压低的衰变道来估计它的大小。在这类衰变道中,企鹅图的贡献相对更加明显。这一研究计划中涉及的衰变道包括 $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$ 、 $B_s^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^{*0}$ 以及最近加入的 $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 。这些研究以 68% 的置信度范围将 $\delta\varphi_s$ 限制在 $[-0.018, 0.021]$ rad 之内。考虑到目前对 φ_s^{cs} 的测量误差仅为 0.039 rad, $\delta\varphi_s$ 需要被进一步约束。

利用企鹅图主导的衰变,如 $B^0 \rightarrow \phi\phi$, 对混合相角 φ_s^{cs} 的测量,也是一种有趣的检验标准模型的方式。 φ_s^{cs} 的测量结果为 $-0.17 \pm 0.15 \pm 0.03$ rad, 与标准模型预期相符。

类似地,受企鹅图影响较大的 $B \rightarrow hh$ ($h = \pi, K$) 这类衰变道对 γ 和 β_s 的值较为敏感。LHCb 实验首次利用 $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$ 测量了 B^0 衰变中时间依赖的 CP 破坏。将 $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$ 的结果与来自 $B \rightarrow \pi\pi$ 的一些结果结合,可给出 $-2\beta_s = -0.12_{-0.16}^{+0.14}$ rad。为得到这一结果,利用了由树图阶衰变测得的 γ 角(见下文), $\gamma = (63.5_{-6.7}^{+7.2})^\circ$, 以及标准模型中 γ 和 $-2\beta_s$ 之间的关系。原则上,这些测量值对所涉及衰变的振幅中 U

旋度对称性(即 SU(3) 类似同位旋的一个子群,包含 d 和 s 夸克,而不是 d 和 u 夸克)的破坏较为敏感,此处最多容许 50% 的破缺。

上文用到的 γ 值可以与树图主导的衰变 $B \rightarrow DK$ 中的测量结果相比。这里的 CP 破缺相角的影响是在 $b \rightarrow c$ 和 $b \rightarrow u$ 的干涉中体现的。此处对树图阶衰变中 γ 的估计没有包括超出标准模型的贡献,同时不受强子过程不确定度的影响。精确测量 γ 仍对检验 KM 机制的一致性极为重要,它还可以作为与企鹅图主导衰变道的测量结果的比较。

目前对 γ 最为精确的测量是通过单个树图衰变 $B^+ \rightarrow DK^+$, $D \rightarrow K_s^0 h^+ h^-$, 其中 h 为 π 或 K 粒子,结果为 $\gamma = (62_{-14}^{+15})^\circ$ 。CP 不对称性是通过 D^0 和 \bar{D}^0 衰变到 $K_s^0 h^+ h^-$ 的过程之间的干涉来测量的。这个方法需要利用 CLEO-c 数据,将 D 衰变的 Dalitz 图中的强相角的测量值作为输入参数。这个衰变道还被用在了一个模型依赖的测量中。测量 γ 还可以通过 $B_s^0 \rightarrow D_s^+ K^-$ 来进行。在这种情况下,需要进行时间依赖且味道标记的 CP 破坏分析。利用 1 fb^{-1} 的数据, LHCb 实验测得 $\gamma = (115_{-43}^{+28})^\circ$ 。虽然这一结果仍无法与其他方法得到的值相比,但统计量上升之后,它可以为其他结果提供重要的检验。

结合文献 γ 的测量结果,可得 LHCb 测量的平均值。利用所有的 $B \rightarrow DK$ 衰变道, $\gamma = (73_{-10}^{+9})^\circ$, 这比 B 工厂给出的相应的平均测量值更为精确。LHCb 测量结果的似然分布如图 3 所示。

D0 合作组测量了相同电荷 μ 子对的不对称性,这可以看作是 B^0 和 B_s^0 衰变中的半轻衰变不对称性 A_{sl}^d 和 A_{sl}^s 的综合效应,与标准模型预言相差 3σ 。目前, LHCb 还不能对这一结果做出定论。LHCb 的相关测量是通过研究部分重建的 $B \rightarrow D\mu\nu$ 衰变中的 CP 不对称性得出的,其中 B 介子的味道由它衰变产生的 D 介子来确定。 A_{sl}^s 的测量值和最近给出的 A_{sl}^d 结果都同时与标准模型和 D0 的结果相符合。从图 4 可以看出,结合了 B 工厂和 D0 测量值的世界平均结果也无法给出更明确的论断。

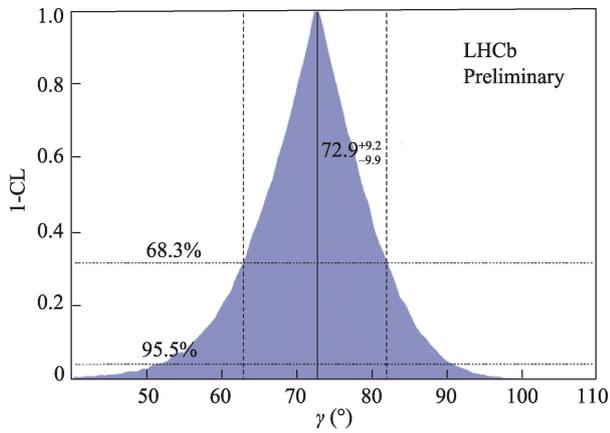


图3 LHCb实验利用 $B \rightarrow DK$ 衰变对 γ 测量的平均结果

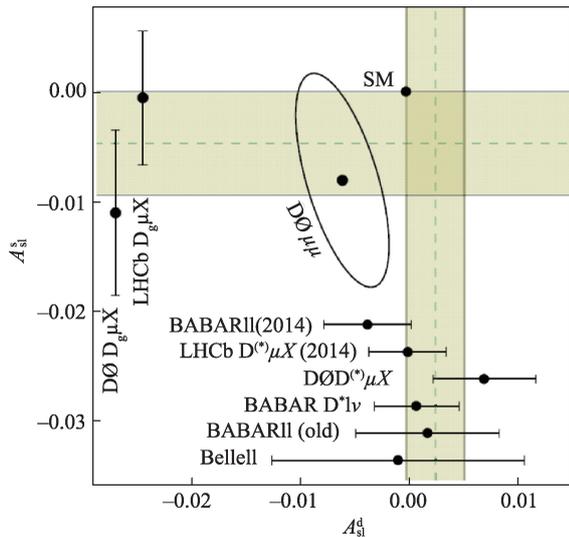


图4 各个实验给出的 $A_{||}^{s,l}$ 和 $A_{FB}^{s,l}$ 的测量结果。l代表电子或者 μ 子。水平和垂直方向上的误差带代表实验测量平均值的误差。椭圆区域代表D0实验对相同电荷 μ 子对不对称性的测量结果

在不含c夸克的b强子衰变,如 $B^+ \rightarrow h^+ h^+ h^+$ ($h=\pi, K$)及 $B^+ \rightarrow p\bar{p} h^+$ 中发现了显著的CP破坏。这些衰变的突出特征是,在没有任何共振态的小范围相空间里,观测到了极大的CP不对称性,其符号在 $B^{\pm} \rightarrow h^{\pm} K^+ K^-$ 和 $B^{\pm} \rightarrow h^{\pm} \pi^+ \pi^-$ 中相反。这一发现可能意味着存在长程的 $\pi^+ \pi^- \leftrightarrow K^+ K^-$ 二次散射。

另一重要的领域是b重子中CP破坏的研究。在LHC的前向区域,b夸克强子化成 Λ_b^0 重子的概率出乎意料得大,其产额几乎达到了 B^0 介子的一半。用 Λ_b^0 重子测量CP破坏可以带来比 B_s^0 更高的精确性。相关的一些研究已经有了初步结果,如LHCb对 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ 和 $\Lambda_b^0 \rightarrow K^0 p \pi^-$ 的分析,及CDF

对 $\Lambda_b^0 \rightarrow p \pi^-$ 和 $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^-$ 的分析等。目前为止,还没有在重子的衰变中发现CP破坏的迹象。

3.2 稀有电弱衰变

$b \rightarrow s l \Gamma$ 系列衰变可用于寻找超出标准模型的物理。特别是 $B^0 \rightarrow K^{*0} l^+ l^-$ ($l=e, \mu$)衰变,提供了非常丰富的可观测量。这些观测量对超出标准模型的物理具有不同的灵敏度,而标准模型对它们的预言受到不同程度的强子不确定性的影响。对于这些观测量的一些比值,大部分的理论不确定性会抵消,从而提供了清晰的标准模型检验标准。

多组实验测量了关于双轻子质量平方 q^2 的微分衰变宽度、前后向不对称指数 A_{FB} 以及 K^* 共振态的纵向极化分数 F_L 的值,未发现任何明显偏离标准模型预期的迹象。

在对已经发布的2011年数据的第二次分析中,LHCb发布了另一组角观测量的结果。特别地,在 q^2 的一个区间内,测得某一观测量与标准模型预期有 3.7σ 的局部偏差。这一结果引发了理论界的极大兴趣,大量解释此测量结果的文章被迅速投稿。目前尚不清楚出现差异的原因,可能是实验涨落,可能是低估了形状因子的不确定度,可能是由于存在重 Z' 玻色子,也可能是因为很多其他的解释。在LHCb观测到 $B^+ \rightarrow \psi(4160) K^+, \psi(4160) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 之后,人们怀疑这也可能是来自 $c\bar{c}$ 共振态的贡献。测量显示,在 μ 子对质量大于 $3770 \text{ MeV}/c^2$ 的区间内, $\psi(4160)$ 和它与非共振态部分的干涉共占了20%的产生率,远超预期。

有了这一异常角分布的线索,LHCb尝试了在一些不对称测量中寻找其他偏离。 $B^0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-$ 和 $B^{\pm} \rightarrow K^{\pm} \mu^+ \mu^-$ 衰变中的CP不对称性和预期为零一致, $B^0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-$ 和 $B^+ \rightarrow K^{(*)+} \mu^+ \mu^-$ 衰变的同位旋不对称性也是如此。在 $1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4$ 范围内,轻子普适因子 $R_K = \frac{B(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{B(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}$ 的测量值为 $0.745^{+0.090}_{-0.074} \pm 0.036$,与1相差 2.6σ 。该结果可以解释为可能出现了新的向量粒子,该向量粒子

与 μ 子耦合更强,并对标准模型中的矢量流产生破坏性的干涉。

3.3 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的首次观测

稀有衰变 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 和 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的分支比的测量被认为是在 LHC 上寻找超出标准模型效应的最有希望的途径之一。这些衰变通过味道改变中性流(FCNC)过程进行,在标准模型中被严重压低。而且,轴矢量项的螺旋度压低使得它们对标量和赝标粒子超出标准模型的贡献敏感,这些贡献会使其衰变分支比不同于标准模型预期。标准模型中,不做味道标记且进行时间积分后对这些衰变分支比的预言是

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9},$$

$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}.$$

这一结果采用了结合 LHC 和 Tevatron 实验 t 夸克质量测量值的最新结果。这两个分支比的比值 R 也是鉴别不同超出标准模型的物理模型的有力工具。在标准模型中,该比值被预言为

$$R = \frac{B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{T_{B^0}^0}{1/\Gamma_{\text{H}}^s} \left(\frac{f_{B^0}}{f_{B_s^0}} \right)^2 \left| \frac{V_{\text{td}}}{V_{\text{ts}}} \right|^2$$

$$\frac{M_{B_s^0} \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{M_{B_s^0}^2}}}{M_{B^0} \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{M_{B^0}^2}}} = 0.0295_{-0.0025}^{+0.0028},$$

其中 τ_{B^0} 和 $1/\Gamma_{\text{H}}^s$ 分别是 B^0 和 $B_s^0 - \bar{B}_s^0$ 系统重质量本征态的寿命, M_{B^0} 是质量, f_{B^0} 是 B^0 介子的衰变常数, V_{td} 和 V_{ts} 是 CKM 矩阵的矩阵元,而 m_μ 是 μ 子质量,在超出标准模型的最小味破坏的情况下,这两个衰变的分支比会改变,但它们的比值预计和标准模型下的值相等。

LHCb 合作组在 2012 年利用 2fb^{-1} 的数据首次发现了 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的迹象,显著度为 3.5σ 。一年后, CMS 和 LHCb 分别基于 25fb^{-1} 和 3fb^{-1} 的数据进行了结果更新。这两个测量精度相当,互相符合。但是,它们都不足够精确,不能断定首次观测到了 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变。2013 年, CMS 和 LHCb 简单结合了

二者的实验结果,但没有考虑共同物理量的所有关联,也没有给出信号的统计显著度。

不久前, CMS 和 LHCb 通过联合拟合两个实验的数据,进行了结果的组合。这一拟合正确考虑了输入参数间的关联。CMS 和 LHCb 实验采用了非常相似的分析策略。 $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例作为两条带相反电荷的径迹被筛选出来。为了在去除本底的同时保持高信号效率,进行了条件很松的初次筛选。经过这次筛选,剩余的本底主要包括来自半轻 B 衰变的 μ 子的随机组合(组合本底),强子被误鉴别成 μ 子的半轻衰变,如 $B \rightarrow h\mu\nu$ 、 $B \rightarrow h\mu\mu$ 和 $\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu^- \bar{\nu}$, 以及误鉴别的 $B_{(s)}^0 \rightarrow h^+ h^-$ (峰状本底)。信号和本底的进一步区分由多变量分类算法实现。事例分类利用 μ 子对的不变质量 $m_{\mu\mu}$ 和多变量算法的输出值完成。多变量算法通过运动学和几何变量来训练。 μ 子对质量 $m_{\mu\mu}$ 的标定通过 μ 子对的共振态实现。在 LHCb 中,还利用了 $B_{(s)}^0 \rightarrow h^+ h^-$ 衰变进行标定。两个分析的 $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 产额都归一化到 $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ 的产额,并且考虑了由 LHCb 实验测出的 b 夸克到 B_s^0 和 B^0 介子的强子化用值。LHCb 还用了 $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 衰变作为归一化衰变道。

$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 和 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变的分支比通过联合拟合得到。CMS 和 LHCb 实验的数据被当作一个组合实验的数据同时使用。对不变质量谱的不分区间的推广的最大似然拟合在这两个实验的多变量输出值的 20 个区间内联合进行,其中 LHCb 有 8 个区间, CMS 有 12 个。不同区间内信号纯度不同。在每个区间中,质量谱包括各种本底和两种信号。两个实验共用的参数包括两种待寻找信号衰变的分支比 $B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 和 $B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$, 已测量的共同的归一化衰变道的分支比 $B(B^+ \rightarrow J/\psi K^+)$, 以及强子化比例的比值 f_s/f_d 。标准模型预言在全部数据中有 94 ± 7 个 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例和 10.5 ± 0.6 个 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 事例。图 5 展示了 B_s^0 信号纯度最高的 6 个多变量区间内事例的 μ 子对质量分布。联合拟合的结果是

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.8_{-0.6}^{+0.7}) \times 10^{-9},$$

$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.9_{-1.4}^{+1.6}) \times 10^{-10}.$$

利用 Wilks 定理计算可得 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 和 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的统计显著性分别是 6.2σ 和 3.2σ 。标准模型预测 B_s^0 和 B^0 的显著性分别为 7.4σ 和 0.8σ 。由于 Wilks 定理给出了略大于 3σ 水平的 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 信号显著性, 一种基于 Feldman-Cousins 构造的改进方法也被应用到了 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变道。这种方法得出的统计显著性是 3.0σ 。在 $\pm 1 \sigma$ 和 $\pm 2 \sigma$ 处对应的 Feldman-Cousins 置信区间分别是 $[2.5, 5.6] \times 10^{-10}$ 和 $[1.4, 7.4] \times 10^{-10}$ 。

图 6 展示了 $B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) - B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 平面的似然轮廓图。图中还展示了每个信号道的似然

曲线。计算得出 $B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 和 $B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 与标准模型的符合程度分别在 1.2σ 和 2.2σ 的水平。对 B^0 与 B_s^0 比值的单独拟合结果为 $R = 0.14^{+0.08}_{-0.06}$ 与标准模型在 2.3σ 的水平相符。 R 的似然曲线如图 7 所示。

4. 总结

大型强子对撞机是一个全新的 b 强子工厂。在接下来的十年间, 甚至在更远的高亮度大型强子对撞机阶段, ATLAS、CMS 和 LHCb 实验将同即将问

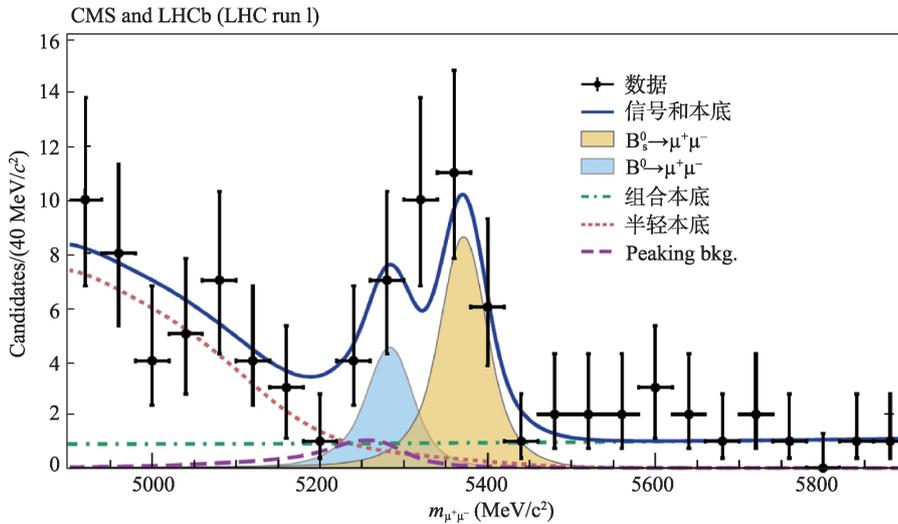


图 5 B_s^0 信号纯度最高的 6 个多变量区间内事例的 μ 子对质量分布。图中同时展示了联合拟合的结果

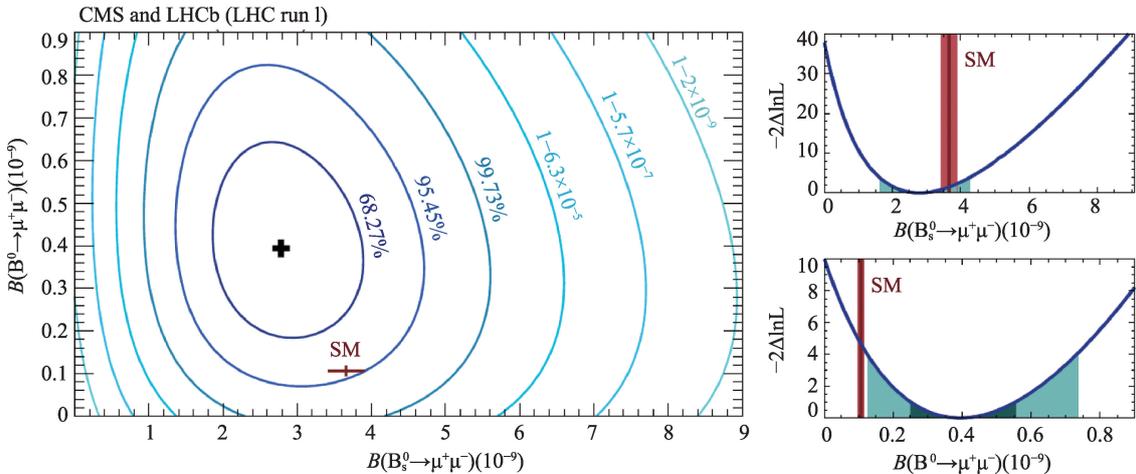


图 6 (左) $B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) - B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 平面的似然轮廓图。 $B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ (右上) 和 $B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ (右下) 的似然曲线。深色和浅色区域分别定义了 $\pm 1 \sigma$ 和 $\pm 2 \sigma$ 的置信区间。标准模型预言由垂直的带状区域表示

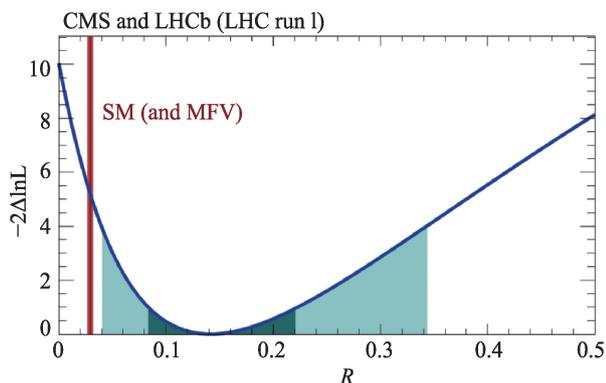


图7 R 的似然曲线。深色和浅色区域分别定义了 $\pm 1\sigma$ 和 $\pm 2\sigma$ 的置信区间。标准模型预言由垂直的带状区域表示

世的 BelleII 实验一起,主导重味物理的研究。在第一个运行周期期间,ATLAS, CMS 和 LHCb 已经在 CP 破坏和 B 介子的稀有衰变领域完成了多项基础测量。本文讨论了其中的几项分析,重点介绍了 $b \rightarrow c\bar{c}s$ 衰变中 B_s^0 介子混合相角 ϕ_s^{cs} , 树图阶衰变中的幺正三角形 γ 角, B^0 和 B_s^0 半轻衰变的不对称性, $b \rightarrow s l^+ l^-$ 转换中角观测量和 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰变分支比的测量。其中 $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 以超过五倍标准偏差的显著度被首次观测到。迄今为止的观测结果没有提供任何显著超出标准模型预言的迹象。但是,它们对很多超出标准模型的理论提供了很强的约束。在接下来的第二个运行周期,对撞的质心能

量有了显著增高, $b\bar{b}$ 的产生截面也会因此增大,这将促进 B 物理的分析的重大提升,并有希望带来标准模型之外的新物理现象的发现。

夸克领域的重味物理不只局限于底夸克强子。大型强子对撞机同样可以产生大量的 c 夸克强子,它们提供了另一个有趣的寻找新物理的研究领域。LHCb 最近对 D^0 介子的 CP 混合相关的观测量的实验结果做了优化,这进一步引起了大家对 c 夸克强子 CP 破坏测量的兴趣。LHCb 实验在大型强子对撞机的第三期运行阶段会进行探测器升级,它和 BelleII 实验会以极高的精度对 c 夸克混合的 CP 破坏进行探测。t 夸克也是一个寻找超出标准模型的新物理的极佳的工具。ATLAS 和 CMS 实验已经收集了空前规模的数据量,这为我们提供了对 t 夸克产生和衰变过程中的 CP 破坏进行研究的重要机会。

本文由高原宁译自 *60 years of CERN Experiment and Discoveries* 中 Patrick Koppenburg 和 Vincenzo Vagnoni 所著的 *Precision Physics with Heavy-Flavoured Hadrons*。海容摘编。希望了解更多细节的读者也可参考“CERN60 年的实验与发现”中译本(将于近期由科学出版社出版)的相应章节。

科苑快讯

政治如何改变一个人的口音

语言学家会告诉你,你说话的方式,尤其是口音,受到你的故乡、年龄,甚至是所观看电视节目内容的影响。然而,一个新的报告却发现,政治立场(至少对政客们是这样)在其中起着重要作用。英国爱丁堡的一个研究小组分析了英国下议院苏格兰籍成员的至少 10 个小时的演讲,测量了其中元音的音质,研究哪些因素可以解释广泛的差异。他们发现关联性最强的,不是社会阶层和演讲者的成长地区,而是其所在政党,研究者在《语言演变》(*Language Variation and Change*)期刊上做了报告。

比如苏格兰民族党 (Scottish National Party, SNP) 党员与工党党员相比,像“cat”、“that”这类词中元音的发音更低。降低的“cat”元音在过去的研究中,与苏格兰的反体制态度有关,这可以解释支持独立的苏格兰民族党采取这种发音的原因。这些发现支持了以前的研究结果,即使是微小的语言差异,也能表明政治背景,并有助于形成身份认同。

(高凌云编译自 2017 年 11 月 22 日 www.sciencemag.org)