

北京谱仪 III 开创探索正反物质不对称的新方法

王雄飞¹ 严亮² 李翠³

(1. 兰州大学 730000; 2. 复旦大学 200433; 3. 曲阜师范大学 273165)

北京时间2022年6月2日,北京谱仪III合作组在国际顶级期刊《自然》杂志发表以“Probing CP symmetry and weak phases with entangled double-strange baryons”为题的文章^①,科学家们利用处于量子纠缠的正反超子对的级联衰变,首次成功地把导致正、反物质不对称的弱作用相位从强作用中分离出来,为研究物质和反物质之间的差异提供了极其灵敏的实验探针。

一、什么是正反物质? 它们和对称性, CP破坏有什么关系?

宇宙之初,混沌初开。根据大爆炸假设理论,宇宙诞生于约150亿年前的一次大爆炸,然后创造了物质世界。在大爆炸之后应该产生等量的正反物质,但为什么当今的宇宙只由正物质组成而非反物质? 粒子物理标准模型告诉我们,任何一种粒子都有其对应的反粒子。正反粒子除了电荷相反之外,其他性质(质量、自旋、宇称、寿命等)完全相同,比如电子的反粒子就是正电子,质子的反粒子就是反质子。正物质一般指由正粒子构成的物质,反物质一般指由反粒子构成的物质。

1897年约瑟夫·汤姆逊(Joseph Thomson)(图1(a))在做阴极射线实验的时候,发现了电子,这是人类历史上第一次发现正物质粒子。随后,随着宇宙线实验和加速器实验的发展,许多正物质粒子被相继发现。1928年狄拉克(Paul Dirac)(图1(b))最先预言了“反物质”的存在,他提出的狄拉克方程

$((i\gamma^\mu \partial_\mu - m_0)\psi = 0)$ 预言正电子的存在。正电子带正电,其余性质和电子完全一样。后来的量子场论告诉我们,对于每一种粒子而言都必定存在与其对应的反粒子。

1932年,安德森(Carl Anderson)(图2)在用云室观测宇宙射线的时候,从拍摄的照片中发现了一条奇特的径迹,这条径迹和电子径迹有同样的偏转度,但却具相反的方向。说明这是某种带正电的粒子,即正电子。狄拉克预言的正电子就这样被发现了。这也是人类发现的第一个反物质粒子。正电子的发现也开启了一个全新的寻找反粒子之路,随后其他反物质粒子也都被相继发现。虽然安德森是第一个发现正电子的人,但在此之前,我国的赵忠尧先生(图3)早在1929年发现了硬伽马射线通过重金属时出现的“反常吸收”现象,并进一步观测到能量为0.511电子伏特的额外辐射,这正是电子的静止质量。这对应着正电子产生,并发生了湮灭^②。

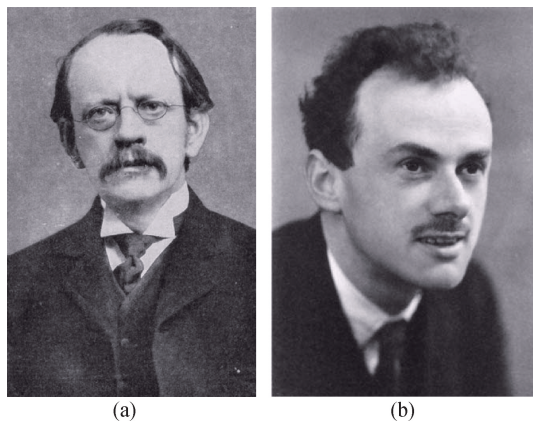
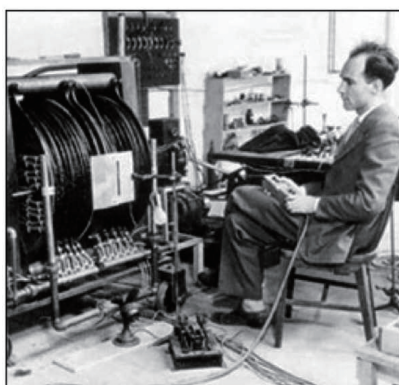
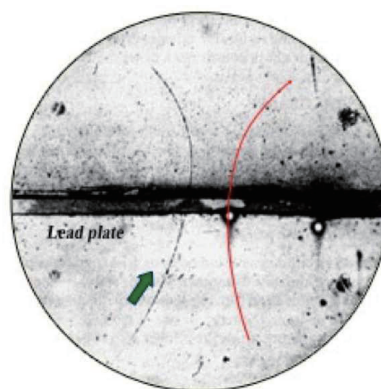


图1 (a)约瑟夫·汤姆逊;(b)狄拉克



Carl Anderson



Cloud (Wilson) chamber

图2 安德森和其发现的正电子轨迹,其中红线为电子轨迹



图3 赵忠尧先生(1902-1998)

1936年由于正电子的发现,年仅31岁的安德森获得了诺贝尔奖。反物质或者反粒子通常不能在我们日常生活环境中产生,只能在实验室产生,比如欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC),北京正负电子对撞机(BEPC)等,会产生成千上万的反物质粒子,也就是说反物质每天都在实验室中产生。

正反物质相遇会发生湮灭并产生巨大的能量(图4),释放出能量很高的光子。从狄拉克方程来看,正反物质的地位是完全等价的,两者互为正反物质,不存在谁比谁更优先;换句话说,正反物质产生湮灭过程在统计上应该是平衡的。假设宇宙在大爆炸发生时正物质和原初反物质的量是相等的,那么现在的宇宙中正物质和原初反物质的量也应该是相等的。但是天文观测数据却告诉我们,在可

观测的宇宙范围内,正物质和原初反物质严重失衡,换句话说,人类只发现了正物质,还没有发现原初反物质。假设宇宙中有原初反物质存在的区域,那么在正反物质的交界处会发生剧烈的湮灭爆炸,产生能量很高的伽马射线,但实际上宇宙观测中并没有发现这种高能伽马射线。目前在高能宇宙线中观测到的反物质,主要来自于宇宙线传播过程中产生的次级粒子,并不是来自宇宙大爆炸之处的原初反物质,其他的观测也给出了相同的结果。

到目前为止,虽然有很多理论来解释宇宙正反物质不对称,但是还没有任何一个理论能完美地解决这个问题。假设正反物质在局域水平上精确平衡,那么宇宙将只剩下一丁点儿的能量,宇宙中也将不会有生命存在。正是由于宇宙中物质和反物质的不对称,才形成了当今的这个物质世界。而对

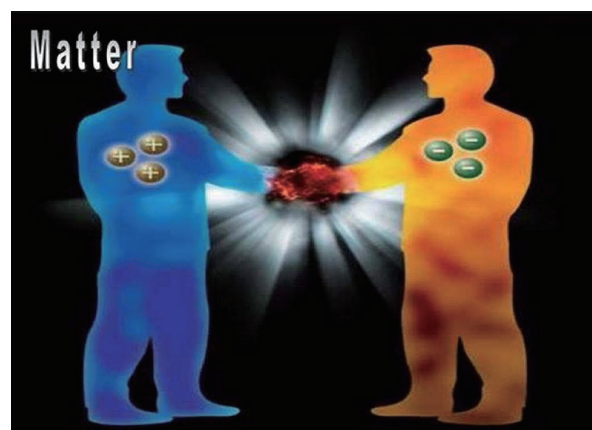


图4 正反物质湮灭示意图(百度图库)

此问题起源的研究是当今粒子物理和宇宙学中极具挑战性的问题,至今人们还不清楚该问题的本质。早在1967年,前苏联科学家 Sakharov 提出了重子数产生机制可能会解开正反物质不对称之谜^③。但是迄今为止,重子数产生机制尚未被理解,这也是基础物理学中最重要的尚未解决的问题之一。而要解决重子数产生机制需要三个前提。第一个前提是重子数破坏的物理过程。第二个前提是电荷(C)和电荷宇称(CP)对称性的破坏。C不对称是正反粒子交换的不对称,CP不对称是正反粒子交换、左和右交换联合的不对称(图5)。只要C或CP中的任意一个对称性存在,重子数破坏的反应过程就会产生相同数量的重子和反重子。第三个前提是脱

离热平衡。由CPT定理(T是时间反演)可知,正反粒子质量相等。如果处于热平衡,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^④。

1956年,李政道(图6(a))和杨振宁(图6(b))提出了在弱相互作用中P破坏理论^⑤。果然在仅仅几个月后,吴健雄(图6(c))从放射性元素钴-60的原子核衰变中发现:离开钴-60核的电子会有倾向性地朝着某个方向发射^⑥。这意味着弱作用下P对称性是破坏的。

不久之后,物理学家们发现,C对称性也被打破了。那么是否存在着一种操作,它不仅能够反射左和右,还能把粒子变成反粒子,即粒子和反粒子互为镜像,换句话说,在C和P联合变换下,对称性是

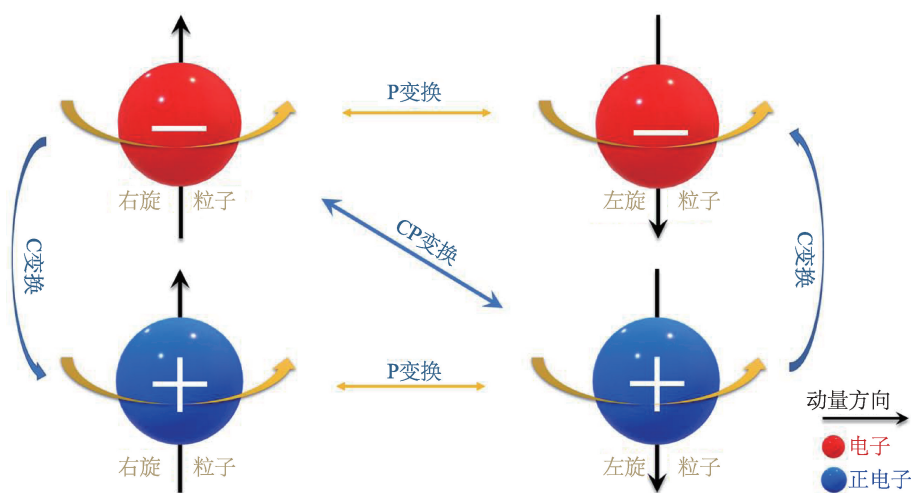


图5 以电子为例电荷(C)、宇称(P)以及电荷宇称联合(CP)变换示意图(王雄飞作图)

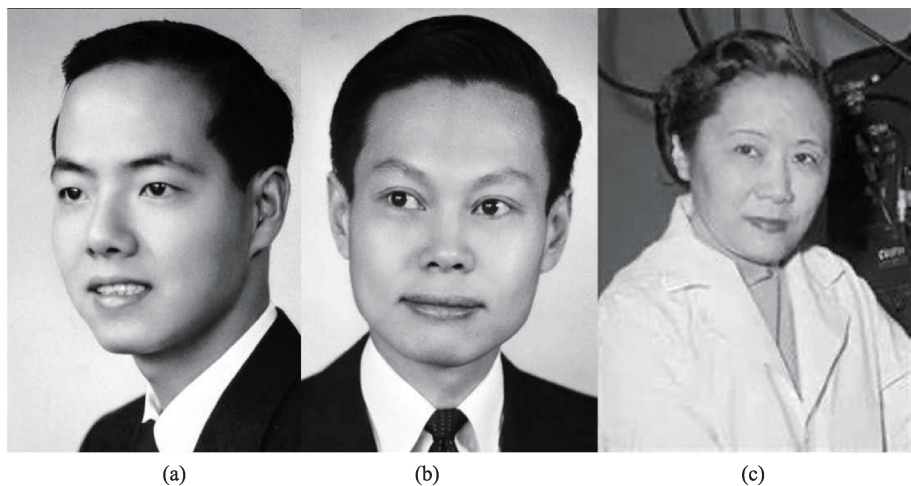


图6 (a)李政道;(b)杨振宁;(c)吴健雄

守恒的。很长一段时间里,大家都认为CP联合对称性应该是守恒的。然而事实并非如此,1964年,克罗宁(James Watson Cronin)等人在研究中性K介子混合和衰变的实验中^⑦,发现了一小部分的K介子没有遵从已有的CP对称,打破了CP联合对称性,这个发现对当时的理论框架提出了新的挑战。为此他们于1980年获得诺贝尔奖。在此之后,2001年BaBar实验和Belle实验分别独立地在B介子弱衰变中观测到了大的CP破坏^{⑧⑨}。

为此,日本物理学家小林诚(Kobayashi Makoto)和益川敏英(Toshihide Maskawa)由于在标准模型框架下提出了CP破坏的机制而分享了2008年的诺贝尔物理学奖。到了2019年,欧洲核子中心的LHCb实验在中性D介子衰变中也发现了CP破坏^⑩。如果将水面比喻成一面CP变换的镜子,鸟巢和它的

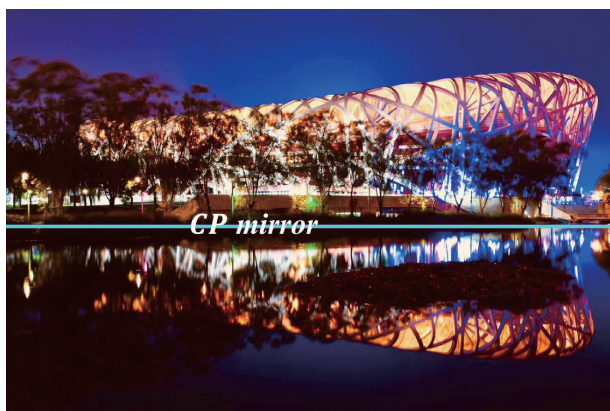


图7 为夜晚鸟巢及其倒影,类比于CP联合对称性破坏(王雄飞摄)

倒影表现了优美的对称性和细微的差别(图7)。至此,人类利用人造加速器在K介子、D介子和B介子等弱衰变中都发现了CP破坏(图8),但是这些结果仍然不足以解释自然界中所有的正反物质不对称。

在2017年,LHCb实验组宣布从 $\Lambda_b^- \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$ 弱衰变中看到了CP破坏的证据^⑩,但其只有 3.3σ 的信号显著性。虽然重子衰变中CP破坏的发现之路尚需时日,但未来可期。

二、标准模型和超子是什么? CP破坏在标准模型里的解释

在20世纪50~60年代,在宇宙线实验中发现了一系列新的粒子,如K介子和 Λ 超子。随着新粒子越来越多,物理学家们开始思考该如何把这些粒子归类。1961年盖尔曼(Gell-Mann)和尼曼(Y. Neeman)提出了SU(3)八重法方案,并预言了 Ω 重子的存在。1964年美国布鲁克海文实验室发现了预言的 Ω 重子。1964年盖尔曼和茨威格(G. Zweig)分别提出了强子结构模型,认为强子是由三种更基本的成分组成的,盖尔曼称这为“夸克”。至今实验上没有发现自由的夸克,夸克只能存在于强子内部,即夸克禁闭或色禁闭。随后,温伯格(S. Weinberg)、萨拉姆(A. Salam)和格拉肖(S.L. Glashow)提出电磁相互作用和弱相互作用统一理论,为标准模型的诞生奠定了基础。

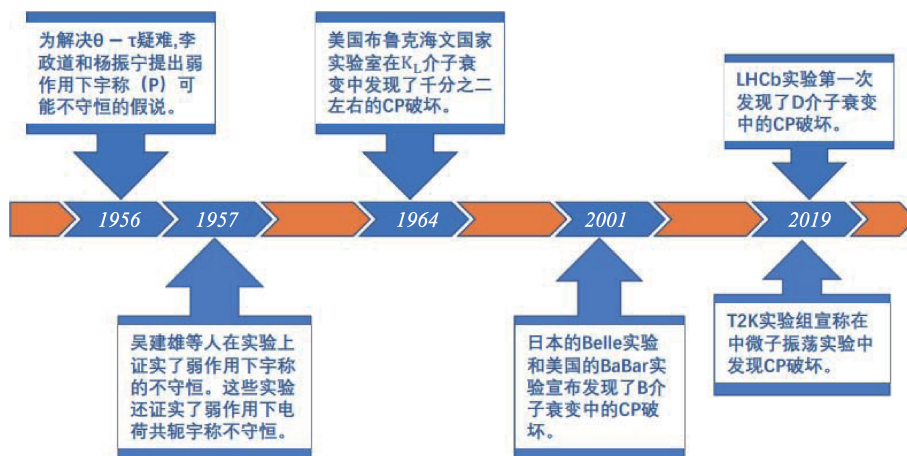


图8 宇称(P)破坏发现到CP联合破坏发现历程(图自张若愚学士论文)

粒子物理的标准模型被认为是当前描述微观体系最成功的理论,它包括描述电弱相互作用的电弱统一理论和描述强相互作用的量子色动力学(QCD)两大部分。标准模型里的基本粒子(图9)分为自旋为半整数的费米子和自旋为整数的玻色子。基本费米子分为夸克家族和轻子家族,它们各有三代。轻子包含带电的轻子和中性的中微子。夸克参与所有的相互作用,带电轻子参与电磁和弱相互作用,而中微子只参与弱相互作用。基本玻色子包括传递相互作用的中间传播子和提供质量来源的希格斯(Higgs)粒子。传递强相互作用的是胶子,传递电磁相互作用的是光子,传递弱相互作用的是W和Z玻色子。希格斯玻色子于2012年在欧洲核子中心的实验上发现,这是标准模型里面最后一个在实验上被发现的基本粒子。

强子是夸克和胶子通过强相互作用组成的束缚态,它反映了夸克和胶子间的相互作用性质。强子分为两大类:由一对正反夸克组成的介子和由三个夸克组成的重子。质子和中子就是重子,质子由两个上夸克(u)和一个下夸克(d)组成,中子则是由一个上夸克和两个下夸克构成的。超子是在宇宙线实验中发现的一类重子,与质子和中子不同,其内部至少含有一个奇异夸克(s)。因此,超子也被称为奇异重子。图10所示基态重子八重态,这些重子在北京谱仪III实验上都可以成对产生。

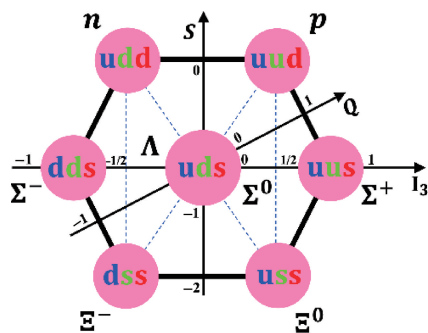


图10 基态重子八重态(王雄飞作图)

K 介子在研究弱作用理论中扮演着非常重要角色,τ-θ之谜,即带电K介子衰变的奇特性质,使杨振宁和李政道提出宇称不守恒的弱作用理论。中性K介子衰变证实了弱作用中存在CP联合变化对称性破缺的现象。为什么都和K介子有关,这是因为K介子是由奇异夸克组成的介子。

标准模型认为,CKM矩阵的相因子是CP破缺的来源,即CP破缺的KM机制。CKM矩阵是由提出和发展弱本征态理论的三位物理学家的姓氏Cabibbo-Kobayashi-Maskawa来命名的。三代夸克的CKM矩阵V是一个3×3的幺正矩阵,有3个实参数和一个相因子。在标准模型中,非零的相因子将导致CP破缺。

正如前述,实验学家们已经发现了K介子,D介子和B介子等弱衰变中的CP破缺现象,但还未在重子弱衰变过程中发现。在重子中寻找CP破缺源,将有助于揭示宇宙学中重子起源——物质-反物质不对称性的机制。

三、BESIII 实验和实验结果介绍

北京谱仪III实验(图11)是利用正负电子对撞,在质心系能量在2.0~4.95 GeV之间,即陶-粲能区开展研究的国际大科学实验装置。自2008年实现对撞,并与2009年开始物理取数以来,在这一能区共积累了约40fb⁻¹的积分亮度数据。其中在J/ψ峰上总共累积了100亿的J/ψ事例,是有史以来正负电子对撞中采集的最大的J/ψ数据样本,并且依然在稳定高效地运行。同时科学家们也正在考虑对下

三代物质粒子(费米子)					
	I	II	III		
夸克	质量 ≈2.2 MeV/c ² 电荷 2/3 自旋 1/2 u 上	质量 ≈1.28 GeV/c ² 电荷 2/3 自旋 1/2 c 粲	质量 ≈173.1 GeV/c ² 电荷 2/3 自旋 1/2 t 顶	质量 ≈125.09 GeV/c ² 电荷 0 自旋 0 H 希格斯玻色子	标准玻色子
	质量 ≈4.7 MeV/c ² 电荷 -1/3 自旋 1/2 d 下	质量 ≈96 MeV/c ² 电荷 -1/3 自旋 1/2 s 奇	质量 ≈4.18 GeV/c ² 电荷 -1/3 自旋 1/2 b 底	质量 0 电荷 0 自旋 1 g 胶子	
	质量 ≈0.511 MeV/c ² 电荷 -1 自旋 1/2 e 电子	质量 ≈1.0566 MeV/c ² 电荷 -1 自旋 1/2 μ μ子	质量 ≈1.7768 GeV/c ² 电荷 -1 自旋 1/2 τ τ子	质量 0 电荷 0 自旋 1 γ 光子	
	质量 ≈2.2 eV/c ² 电荷 0 自旋 1/2 ν_e 电中微子	质量 ≈1.7 MeV/c ² 电荷 0 自旋 1/2 ν_μ μ中微子	质量 ≈15.5 MeV/c ² 电荷 0 自旋 1/2 ν_τ τ中微子	质量 ≈91.19 GeV/c ² 电荷 0 自旋 1 Z Z玻色子	
				质量 ≈80.39 GeV/c ² 电荷 ±1 自旋 1 W W玻色子	
	轻子				

图9 标准模型中的基本粒子

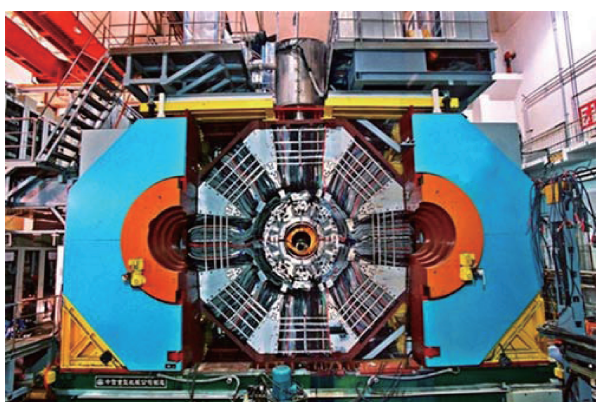


图11 北京谱仪III

一代实验的升级改造。北京谱仪III由内而外是由四个子探测器组成,分别是主漂移室、飞行时间计数器、电磁量能器、缪子计数器。利用这些探测器给出的信息,我们不仅可以测量到末态粒子的能量和动量,而且能够区分不同粒子的类型。

为了研究正反物质的不对称,科学家们选取了 J/ψ 衰变产生的正反超子对,通过比较它们各自衰变性质的细微差别,来探测研究物质和反物质之间的差异。为何科学家们会选择这样粒子来研究呢?它们究竟有哪些与众不同的性质而备受青睐呢?

在北京谱仪III上首先进行了 Λ 超子对的研究。如图12所示,正反电子像台球一样被加速后,相互碰撞湮灭之后产生了正反超子对,需要特别说明的是,以这种方式产生的超子对是带有横向极化信息的,这对于后面的衰变参数的测量十分重要。

那么我们如何比较正反 Λ 超子对的衰变性质呢?相对于比较正反超子衰变几率的差异,CP破坏对于它们的衰变参数的差异更为敏感。图13展

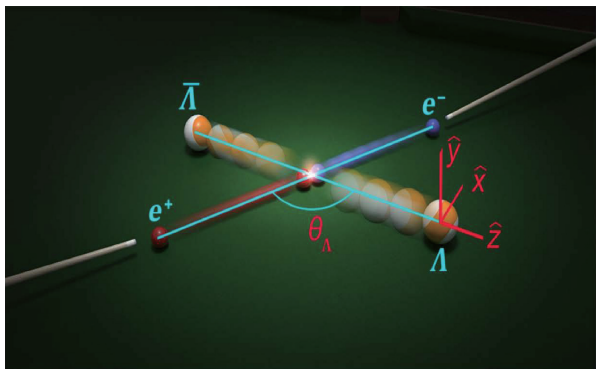


图12 正反 Λ 超子产生示意图

示了 Λ 超子衰变和CP变换示意图。李政道和杨振宁在20世纪50年代的时候给出了自旋1/2的超子衰变的参数表示,考虑到可以通过两种衰变模式S波和P波进行衰变。当时使用了 α, β, γ 三个参数来表示,不过这三个参数并不独立,人们可以用两个独立参数来代替表示它们,记作 α 和 ϕ 。通过对比正反超子衰变中这两个参数的不同来寻找CP破坏。

之前使用的测量衰变参数的方法,无法将极化和衰变参数分割开来,我们只能得到二者的乘积。对于处在由正负电子对撞产生的 Λ 超子对,处于量子纠缠的状态。其非零的极化使得正反超子的衰变参数贡献互相独立,这样我们就可以分别给出测量的结果。北京谱仪III实验仅仅使用了2009和2012年收集的部分 J/ψ 事例给出了 Λ 超子衰变参数 α 的测量结果,其结果相对于之前的测量有17%的差别。因为这个参数的重要意义,另一组科学家们在CLAS实验中重新进行了测量,发现其结果和北京谱仪III的结果是吻合的。这一方法也很快运用到了 Σ^+ 超子衰变参数的测量中,科学家们不仅使用了 J/ψ 的数据,同时也使用了 $\psi(2S)$ 的数据。并观测到

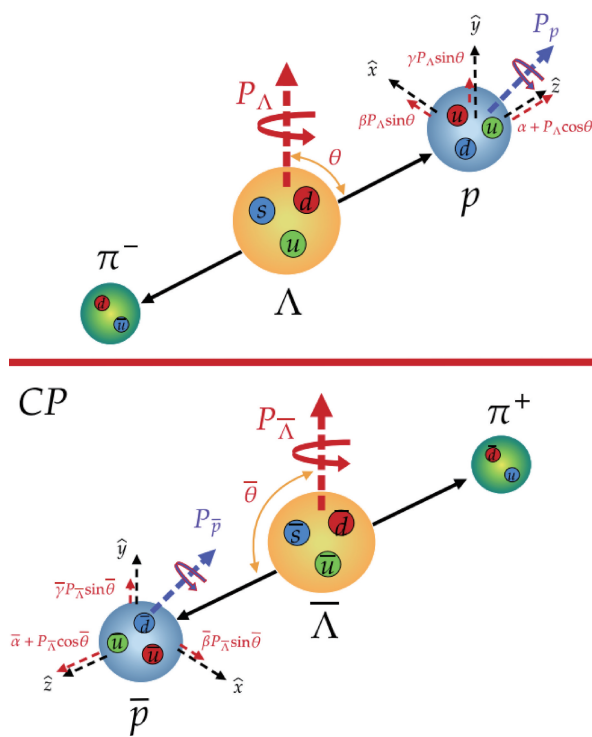


图13 Λ 超子对在CP变换下衰变(图自张剑宇博士论文)

符合相反的极化现象。科学家们通过比较正反 Λ 超子和 Σ^+ 超子衰变参数的差别,在 10^{-2} 的精度上没有发现CP破坏。需要说明的是,这仅仅使用了约1/7的数据量。科学家们已经马不停蹄地开始了新的数据分析工作,这需要付出更加艰苦的工作,因为统计量的提高意味着统计精度的提高,同时我们需要更加严格地控制系统误差。在100亿J/ ψ 数据的分析中,我们已经把CP破坏的误差从 10^{-2} 推进到了 10^{-3} ,并且测量结果与之前符合得非常好。

在分析了 Λ 和 Σ^+ 超子之后,科学家们将目标瞄准了科西(Ξ)粒子。首先科西粒子是可以发生级联衰变的,这为研究其衰变的性质提供独特的方法。科西粒子衰变成 Λ 粒子和 π 介子(图14)。为了搞清楚科西粒子的衰变,我们自然要去测量它衰变得到的粒子的信息。所以科学家们设计了精密的探测器去探测它们,得到了其运动方向和能量。但是这些微观粒子特有的性质(极化)的测量却不那么容易。如果科学家们没法测量出 Λ 粒子的极化,那么就不能完整地描述科西粒子的衰变。幸运的是,子粒子 Λ 粒子会继续衰变(即发生了科西粒子的级联衰变)。我们可以对 Λ 粒子衰变的末态粒子进行测量,而 Λ 粒子的极化会影响末态粒子的空间分布情况。这样我们就有了研究科西粒子衰变的全部信息 α 和 ϕ 了。

按照标准模型,如果通过正反超子 α 参数的差别来观测CP破坏(即正反粒子 α 参数的差别非零),需要存在具有不同弱相位和强相位的贡献(乘积的形式),二者缺一不可。但是因为强相位的贡献非

常小,那么就会大大压低弱相位的影响。使得 α 参数对于CP破坏的灵敏度降低。但比较参数 ϕ 的差别,当强作用带来的贡献很小时,它将只和S波与P波过程弱相位差有关,意味着CP灵敏相对于 α 参数提高了一个数量级。

另外正反科西超子对的同时产生,也有着巧妙的作用。当两者同时产生时,它们处于 $C=-1$ 的反对称状态,两者是量子关联的,这会让正反科西超子对有额外的约束。通常我们进行测量的时候,如果可以把需要测量的物体放置得更有序,更规则,那么我们的测量就可以更精确。因此我们通过同时测量正反科西超子对的衰变参数,并进行比较的时候,会得到更精确的结果。此外因为对称性和守恒量的要求,正反科西超子对的产生中的本底事例也会很低,这也无疑提高了测量的精度。

更重要的是经过BEPCh和BESIII十三年稳定的运行,探测器的指标全面提升,这样才累积了高质量的海量数据样本。而软件和计算能力有力地保证了我们可以准确、高效地得到可靠的实验结果。相比于之前的实验(HyperCP),我们的单事例敏感度提高了一千倍。

四、展望未来

尽管我们没有发现CP破坏的迹象,但是为研究正反物质的不对称性开创了新的方向。科学家们已经开展了基于更大统计量的数据分析工作,并且预计未来的PANDA和超级陶粲工厂可以获取更大的超子反超子对的样本。科学家们计划采用极化的对撞束流对撞,这样会带来更丰富的实验信息。同时在探测技术上,引入新的硅像素探测器,提高了顶点的分辨率。随着科学技术的不断发展,我们相信科学家们将会不断挑战标准模型的预言,给我们带来更大的惊喜。

参考文献

- ① M. Ablikim et al. (BESIII Collaboration), Nature 606, 64 (2022).
- ② C. Y. Chao, Phys. Rev. 36, 1519 (1930).

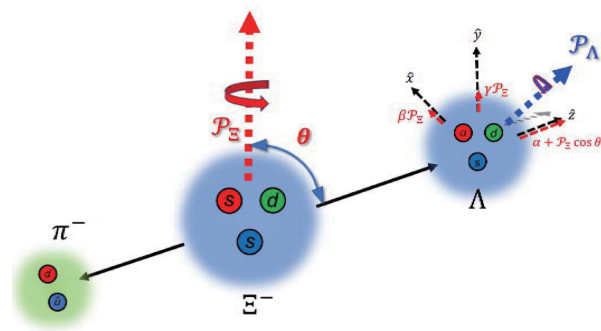


图14 科西粒子级联衰变示意图(来自 Nature)

- ③ A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967).
 ④ F. P. Huang, M. Z. Li, P. H. Gu and X. M. Zhang, Chin. Sci. Bull. 61, 1151 (2016).
 ⑤ T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 104, 254 (1956).
 ⑥ C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes and R. P. Hudson, Phys. Rev. 105, 1413-1414 (1957).
 ⑦ J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, and R. Turlay, Phys. Rev. Lett. 13, 138 (1964).
 ⑧ B. Aubert et al. (BABAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. 87, 091801 (2001).
 ⑨ K. Abe et al. (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001).
 ⑩ R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. 122, 211803 (2019).
 ⑪ R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Nature Phys. 13, 391 (2017).



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2022年《现代物理知识》每期定价15元,全年6期90元,欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者,请按下列价格付款。

2010~2021年单行本每期10元;2010~2019年合订本每本60元。

订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号:2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

名称:中国科学院高能物理研究所
 开户行:工商银行北京永定路支行
 账号:0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部:联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买:搜淘宝店、微店店铺名称:中科期刊;
 淘宝购买链接:

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w4002-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>

微店购买链接:

<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>
 或扫描下方二维码:



淘宝网购刊



微信购刊