

北京谱仪 III 上轻介子衰变研究

房双世

(中国科学院高能物理研究所 100049)

轻介子是指由轻夸克组成的强子,它们在粒子物理学的发展中扮演着重要角色。自 20 世纪 30 年代发现 π 介子之后,随着探测技术的不断进步,实验上陆续发现不同种类的轻介子,同时对轻介子的研究也不断深化。尤其是在 20 世纪 70 年代,利用高能粒子加速器和粒子探测器,实验上对轻介子(特别是针对 π 介子和 K 介子)的衰变模式、产生机制以及与其他粒子的相互作用进行了深入研究,并在实验研究和理论探索中取得许多重要的成果。特别是 K 介子中 CP 破坏效应的发现、奇异自由度的引入和带电 π 的弱衰变研究等,不仅深化了对物质的微观结构和相互作用的认识,还推动了夸克模型及标准模型的建立。特别是夸克模型诞生,使得我们对强子的内部结构有了深入的认识,认为轻介子是由一个轻夸克和一个反轻夸克组成的束缚态,并且根据 SU(3)群的对称性,比较自然地把轻介子归类到不同的家族。如图 1 所示, π 介子和 K 介子就属于基态赝标量介子成员。

虽然对轻介子性质的认识正逐步完善,但仍然还有很多工作亟需深入开展,特别是关于赝标量介子的另外两位成员 η 和 η' 。1961 年,美国劳伦斯实验室首次在 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 质量谱上发现 η ,但因为同位旋破坏,不符合夸克模型预言,曾一度认为不适合作为赝标量介子候选者。三年之后,劳伦斯实验室发现 η' ,因其质量比其他赝标量介子大很多,引发对其性质的深入研究。因为 η 和 η' 的电荷、自旋和同位旋都为零,并且宽度非常窄,也接近于零,是探究低能区强相互作用、检验基本对称性及寻找新物理等的理想

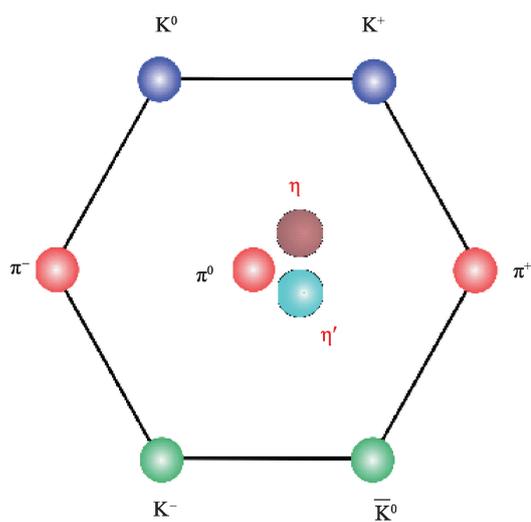


图1 赝标量介子九重态

场所,一直受到理论和实验上的广泛关注。但是, η 和 η' 的产生截面相对较低,受限于统计量,实验研究尚不如 π 和 K 介子深入。目前,国际上有多多个粒子物理实验正在开展 η 和 η' 介子衰变研究,比如德国的 A2 实验、意大利的 KLOE-2 实验、美国的 CLAS 和 GlueX 实验。虽然北京谱仪 III 实验设计用于 τ -粲物理研究,但 η 和 η' 等轻介子在 J/ψ 辐射和强衰变中产生几率都很高,使得北京谱仪 III 实验也相当于一个天然的轻介子工厂。结合所采集高统计量 J/ψ 事例和探测器的出色性能,北京谱仪 III 实验为探究轻介子衰变机制,特别是 η 和 η' 介子,提供了前所未有的机会。另外,相对于其他相关实验,北京谱仪 III 实验不但具有高统计量的优势,而且由于相空间压低,可以降低本底贡献,选出干净的轻介子事例,有助于深入开展高精度测量及寻找新的物理现象。

基于所采集的高统计量 J/ψ 数据, BESIII 实验在轻介子衰变研究领域取得了一系列创新性研究成果, 包括观测到新衰变模式、发现新衰变机制和发展新研究方法等, 为检验和发展低能区强相互作用理论提供了大量实验证据, 并在国际轻介子物理研究中扮演了十分重要的角色。近年来, 不但多次被邀请在国际会议上作大会报告, 还被推荐首次举办第 10 届国际手征动力学研讨会。同时, 北京谱仪 III 实验关于 η 和 η' 的重要研究进展, 不仅引起了粒子物理学家的关注, 为检验和发展低能区强相互作用理论提供了大量实验证据, 也引发国际上提出新的关于 η 和 η' 的实验研究计划。

北京谱仪 III 实验独辟蹊径, 利用 J/ψ 衰变打开了探究轻介子衰变的新窗口; 相对于其他实验, 北京谱仪 III 实验有什么标“新”立异之处?

一、观测到新衰变模式

粒子物理学中, 通过观测一个粒子的衰变模式, 不仅可以更全面地了解其性质, 还为探究内部结构及相互作用提供重要信息, 进而验证理论模型对强相互作用的描述, 并提供实验数据用于改进和发展理论。北京谱仪 III 实验观测到 $\eta' \rightarrow \rho^+ \pi^-$ 、 $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 、 $\eta' \rightarrow \gamma e^+ e^-$ 、 $\eta' \rightarrow \gamma \gamma \pi^0$ 等多个新衰变模式。

在手征微扰理论和色散理论的框架下, 由于轻夸克之间存在质量差异, 虽然 η' 介子可以衰变 3π 违反同位旋对称性, 但提供了一种确定夸克质量比值的独特方法, 认为通过从 η' 衰变 3π 和 $\pi\pi\eta$ 分支比比值可以提取 u-d 夸克之间的质量差。然而, 有理论物理学家质疑 $\eta' \rightarrow 3\pi$ 衰变中存在中间态共振的强烈影响, 例如 $\eta \rightarrow \rho \pi$ 的 P 波贡献, 因此不能以这种简单的方式提取 u-d 夸克之间的质量差。因为缺少高统计量实验数据, 该争论一直未得到有效解决。2017 年, 北京谱仪 III 实验首次观测到的 $\eta' \rightarrow \rho^+ \pi^-$ (见图 2), 证实在 η' 衰变到 3π 中存在 P 波的贡献, 结束了理论上长达近 20 年的争论。同时, 发现 S 波也在 $\eta' \rightarrow 3\pi$ 衰变中起着重要作用, 特别是 $f_0(500)$ 的贡献为解释 $\eta' \rightarrow 3\pi^0$ 的达立兹图的负斜率参数提供了合理解释。目前, 一些理论物理学家对使用色散方

法研究 η' 衰变表现出极大兴趣, 进一步的理论研究以及未来更精确测量结果将有助于深入了解其衰变机制。

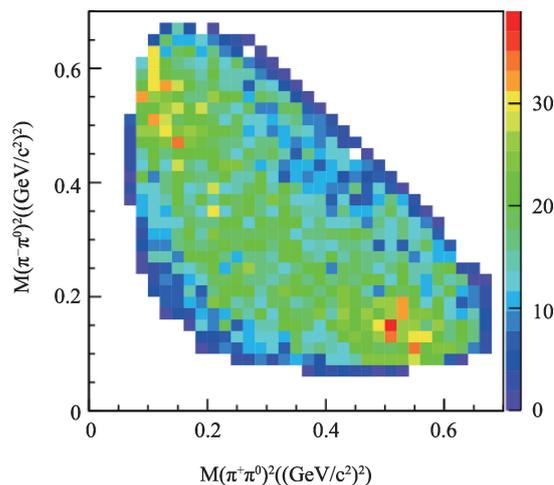


图 2 $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 的达立兹图。图中明显事例集中的地方对应于 $\eta' \rightarrow \rho^+ \pi^-$

二、发现新衰变机制

实验研究轻介子衰变对于理解量子色动力学在非微扰区域起着重要的指导作用。特别是 π - π 和 K - π 散射, 一直是强相互作用领域所长期关注的研究课题之一, 对于检验和发展手征有效场论有重要作用。在 $\pi\pi$ 相互作用中, 一个显著的特征是 $\pi^+ \pi^-$ 的 S 波电荷交换的散射反应, 即 $\pi^+ \pi^- \rightarrow \pi^0 \pi^0$, 在质心能量对应于两个带电 π 介子的质量阈值处产生起一个明显的突变, 被成为拐点效应 (Cusp effect)。对该效应的准确测量有助于高精度地确定 S 波 π - π 散射长度, 也就是说该效应可以用于确定 S 波 π - π 相互作用的强度, 揭示量子色动力学在低能的基本性质。大约十年前, 理论上预言 $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$ 中存在 Cusp 效应, 可能成为确定 π - π 散射长度的新来源。此后, 多个实验上试图在 $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$ 中寻找该效应, 但都未观测到。北京谱仪 III 实验利用约 35 万 $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$ 事例, 在非相对论有效场论框架下完成振幅分析。首次发现带电 π 介子质量阈值附近存在拐点效应, 并确定了相应的散射长度。这是世界上首次在 $\eta' \rightarrow \eta \pi^0 \pi^0$ 衰变中观测到拐点效应, 为探究 π - π 相互作用提供

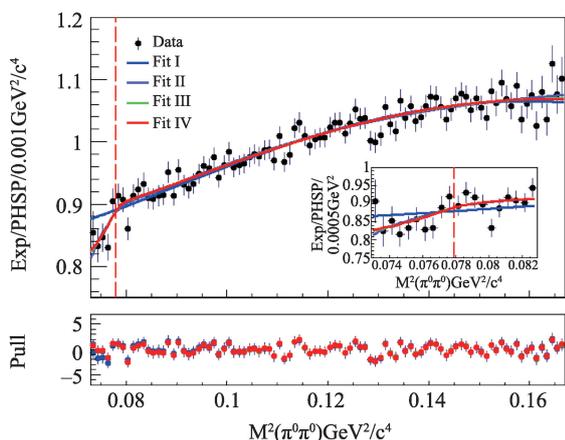


图3 $\pi^0\pi^0$ 不变质量的分布,其中虚线用于标识 $\pi\pi$ 质量阈值之处的拐点效应

了一种新的方法。

作为 η' 的主要衰变模式之一, $\eta' \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ 衰变早已被实验观测到,并确认主要贡献来自 $\eta \rightarrow \gamma\rho$ 。但是,理论上最感兴趣之处在于此衰变可以用于检验理论上高阶费曼图的贡献,进而加深对强相互作用动力学的理解。因为该贡献的费曼图像一个盒子(见图4),被形象地称为盒子反常(box anomaly)效应。因为该反常效应的贡献相对较低,所以统计量和本底贡献对验证是否存在该效应非常关键。虽然多个实验曾尝试寻找盒子反常效应,但一直没有得到明确结论,甚至部分实验的结果之间存在相互矛盾之处。

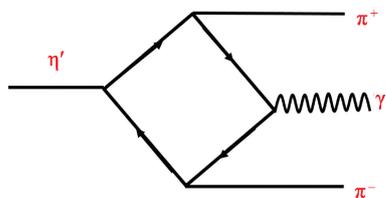


图4 手征理论中 $\eta' \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ 高阶贡献费曼图

2018年,北京谱仪III实验筛选出近100万 $\eta' \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ 事例,并且本底只占1%左右。详细分析表明仅有矢量介子 ρ 和 ω 及其它们之间干涉的拟合无法描述数据;需要显著的额外贡献,可能是盒子异常或 $\rho(1450)$ 的贡献,以满足对数据的良好描述。物理结果发表之后,立即引发理论上对该衰变的深入讨论,认为北京谱仪III实验上的高统计量和干净的 η' 样本推动对 η' 研究进入前所未有的高精度时代,结合最近提出的理论模型,对 $\eta \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ 和 $\eta' \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ 的联合分析有

可能为它们的衰变动力学提供更自洽的理论图像。

三、提出新研究方法

虽然实验致力于使用不同的方法研究 η 和 η' 介子的衰变动力学,但由于标记难以标记 η 和 η' 介子的单举衰变,迄今为止,实验上都仅仅给出相对测量结果。光与物质相互作用的主要形式之一为电子对效应,光子在原子核库伦场作用下,光子可以转化为正负电子对(见图5)。北京谱仪III实验主漂移室中带电径迹的良好动量分辨率,提出利用电子对效应所产生的正负电子用于重建来自辐射 J/ψ 衰变的单举光子能谱,进而通过反冲正负电子对的质量得到 η 和 η' 介子单举衰变的新方法。蒙特卡罗研究表明,使用光子转换电子对事例,辐射光子的能量分辨率可以提高3倍,这非常有助于压低本底,提高信号显著性,使得能够标记 η 和 η' 介子的单举衰变成为可能,进而精确测量 η 和 η' 介子衰变的绝对分支比,并可以精确测量 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 的分支比。利用该方法,北京谱仪III实验精确测量了 η 和 η' 介子主要衰变模式的绝对分支比,并测量了 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 的分支比,大幅提高了测量精度。同时,该方法也为探究其他轻介子衰变提供了新研究思路。

目前,利用高统计量 J/ψ 事例,北京谱仪III实验在国际上针对 η' 衰变研究中占主导地位。虽然也取得了一系列关于 η 衰变的物理成果,但发现来自 J/ψ 衰变和正负电子对撞所产生的大量本底使得难以提高对 η 衰变的测量精度。特别是寻找其稀有衰变时,受本底影响较大。以寻找稀有衰变 $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-$ 为例,主要的本底来自于 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$,特别是中间共振态 $f_0(500)$ 的贡献使得本底无法有效排除。另外,因为 η

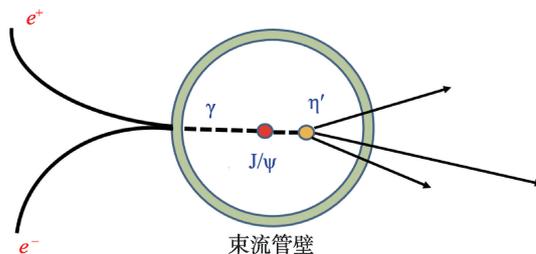


图5 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 衰变中辐射光子击中束流管壁后转换为正负电子对的示意图

介子在 J/ψ 辐射衰变中的产生几率要比 η' 介子小 5 倍,也使得在研究 η 介子衰变时受到统计量限制。

为此,我们引入了一种通过 $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ 探究 η 衰变的新方法。根据《粒子数据手册》上的相关测量结果估计,通过 $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ 筛选出的 η 衰变事例比 J/ψ 辐射衰变所产生的统计量高约 2 倍。同时, η' 的宽度非常窄,也使得直接来自 J/ψ 衰变的本底可以利用 η' 质量的约束进行压低,进而研究 η 衰变的灵敏度。该方法已经被成功运用到研究 $\eta \rightarrow \gamma e^+ e^-$ 和 $\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-$ 及形状因子测量,相对于之前的研究方法,不仅有效降低了来自 J/ψ 和正负电子对撞产生的本底, η' 质量的约束还有助于降低 μ 和 π 的误判效率。

利用 J/ψ 衰变中轻介子丰富产生和探测器的出色性能的优势,北京谱仪 III 实验上为研究轻介子衰变提供了独一无二的机遇。除了改进已知轻介子衰变性质的精度外,北京谱仪 III 实验还首次观测到一系列 η' 新衰变模式,这些重要研究成果表明北京谱仪 III 实验在轻介子衰变研究中发挥着重要作用。尽管取得一系列令人印象深刻的研究进展,但仍有许多轻介子衰变尚未被观测到,需要进一步探

索和研究。不仅可利用 100 J/ψ 亿事例开展轻介子衰变实验研究,北京谱仪预计将于 2024 年夏天在 3.773 GeV 处获取 20 fb^{-1} 数据,将可以使用不同的数据分析方法(比如双光子湮灭过程)进行轻介子物理的研究,例如轻介子的双光子宽度及形状因子的测量等。特别是可以深入到以前未探索的电磁跃迁形状因子区域,不仅可以在类时和类空区域之间建立定量联系,还可以减少理论上对 μ 轻子的反常磁矩的计算误差。总之,联合其他高精度实验(如意大利的 KLOE-2、德国的 A2 及美国的 GlueX 等)一起,北京谱仪 III 实验积累的高统计量轻介子样本对轻介子衰变和相互作用模式的实验研究和理论探索,不但有助于深化对强相互作用、标准模型、强子谱以及对称性破缺等关键概念的认识,并在手征有效场论和格点量子色动力学的发展中发挥重要作用,为理解非微扰区域的强子物理做出重要贡献。另外,随着更多关于针对轻介子实验装置的建立,比如中国的超级陶-粲工厂、美国的 η 介子工厂等,对轻介子实验研究的必将逐步深入,为我们揭示更多粒子物理学的奥秘。



科苑快讯

利用 ChatGPT 背后的人工智能加速药物发现

麻省理工学院和塔夫茨大学(MIT and Tufts University)的研究人员开发了一种名为 ConPlex 的新型人工智能模型,该模型通过预测药物-蛋白质的相互作用,无须计算分子结构,从而大大加速了药物的发现。该模型可在一天之内筛选超过 1 亿种化合物,这可以显著降低药物开发失败率和成本。

巨大的药物化合物库可能包含多种疾病的潜在治疗方法,如癌症或心脏病。理想情况下,科学家们希望对每种化合物针对所有可能的目标进行实验测试,但进行这种筛选非常耗时。

麻省理工学院和塔夫茨大学的研究人员现在设计了一种被称为大型语言模型的基于人工智能算法的非传统算法。这些模型中最著名的例子,就是可以分析大量文本的 ChatGPT。

研究中,蛋白质模型与特定药物都有数字表示,

通过神经网络转化为共同的共享空间。他们根据已知的蛋白质-药物相互作用对网络进行训练。这使其能够学习将蛋白质的特定特征与药物结合能力联系起来,而无须计算任何分子的 3D 结构。

这个方法的另一个优点是,它考虑到了蛋白质结构的灵活性,当与药物分子相互作用时,蛋白质结构可以“扭动”,呈现出略微不同的形状。为了使他们的模型不太可能被诱饵药物分子欺骗,研究人员还结合了一个基于对比学习概念的训练阶段。利用这种方法,研究人员给模型提供了“真正的”药物和冒牌货的例子,并教它区分。

研究人员认为,药物研发如此昂贵的部分原因是失败率很高,如果能够通过提前告知这种药物不太成功来降低失败率,这将大大降低药物研发成本。

(高凌云编译自 2023 年 6 月 20 日 SciTechDaily 网站)