

# 轻强子谱学

刘北江

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 1. 难以理解的胶子

宇宙可见物质主要是星系、天体,它们主要由质子和中子构成;而质子和中子的质量的95%以上来自强相互作用。然而强相互作用的低能行为至今没有完全被理解。将近半个世纪以来,量子色动力学(QCD)被认为是描述强相互作用的基本理论,但其在低能区域具有非微扰性质和色禁闭机制(即实验上只能直接观测到色中性的强子,而不是孤立的夸克和胶子),对QCD理论的研究仍然存在巨大挑战。由于色禁闭,人们需要理解强子谱,然后才能深入理解如何从QCD基本理论衍生出强子结构与强相互作用的复杂现象。

胶子负责传递强相互作用,把夸克束缚为强子。与传递电磁相互作用的光子不同,胶子存在自相互作用。这一强相互作用的特性导致了强子质量(亦即整个可见宇宙质量)的动力学产生。对胶子的研究理解强相互作用力本质的核心问题。

## 2. 强子谱学与奇特强子态

如同历史上通过研究原子光谱获得原子结构的信息,强子谱学研究是对粒子物理发展有着重要意义。研究强子谱学的重要目的是对实验上观测到的强子进行分类,并由此探索和认知强子的内部结构和相互作用规律。当前,夸克模型是对强子进行分类的主要理论方法,在实验上已观测到的粒子大部分都是由一对正反夸克构成的介子和三个夸克构成的重子。但除此之外,标准模型预言了自然界还应该存在简单夸克模型的强作用新物质形态——奇特强子态,包括体现胶子自由度的胶球和混

杂态以及具有三个以上夸克的多夸克态等。完善强子谱学、寻找和研究新型奇特强子态对理解强子的结构以及内部的动力学机制、强子质量的起源、检验和发展强相互作用理论等具有重大的科学意义。随着近20年以来一系列新强子态的发现,强子谱学的实验和理论研究取得了显著进展。重味强子谱的一系列实验发现为多夸克态积累了愈发清晰的实验证据。由于非微扰QCD占主导,轻强子谱的物理图象更为复杂,胶球与混杂态的实验信息仍十分匮乏。理解胶球和混杂态性质于研究胶子场和理解色禁闭至关重要。

## 3. BESIII上的胶球研究

胶子之间有自相互作用,可以形成束缚态——胶球,这是强相互作用的重要特征。格点理论预期胶球最轻的三个态分别是标量( $0^{++}$ ,质量约在1.5~1.7 GeV)、张量( $2^{++}$ ,质量约在2.3~2.4 GeV)和赝标量( $0^{+-}$ ,质量约在2.3~2.6 GeV)。这些胶球具有常规量子数,与普通介子可能发生混合。因此,胶球的寻找和甄别非常困难,是强子物理的长期难题。在理论方面,胶球研究的主要困难是由于非微扰QCD占主导,传统的理论方法很难给出靠的理论判据。在实验方面,轻质量的胶球不具备区别于普通强子的明确特征,属于“隐式”奇特态。要在实验上甄别胶球态,必须通过系统研究,寻找难以归类于夸克模型介子谱的额外粒子;并且全面研究已知介子,寻找反常的产生衰变性质。国际上有大量不同的实验进行相关研究。

$J/\psi$ 辐射衰变是丰胶子过程,被公认为是寻找和

研究胶球的理想场所。作为高精度前沿, BESIII 已经采集了 100 亿  $J/\psi$  事例, 是世界上最大的  $e^+e^-$  湮灭产生的  $J/\psi$  数据样本。BESIII 开展了一系列研究, 在多个反应过程中观测到  $f_0(1710)$  的大量产生, 其产率比以往认为的胶球候选者  $f_0(1500)$  高了一个量级。 $f_0(1710)$  在  $J/\psi$  辐射衰变中的产生性质与格点 QCD 对标量胶球的预期相符。近期德国波恩大学和美国 JPAC 研究组都基于 BESIII 的结果进行了唯象分析, 一致认为  $f_0(1710)$  和基态的标量胶球有较大的重合。另外, 通过对  $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$  过程的分波分析, 在  $\eta\eta'$  系统中观测到显著的  $f_0(1500)$  而没有观测到  $f_0(1710)$ 。由于理论预期胶球衰变到  $\eta\eta'$  受到显著压低, 这一实验结果从衰变性质表明  $f_0(1710)$  有更多的胶球成分。

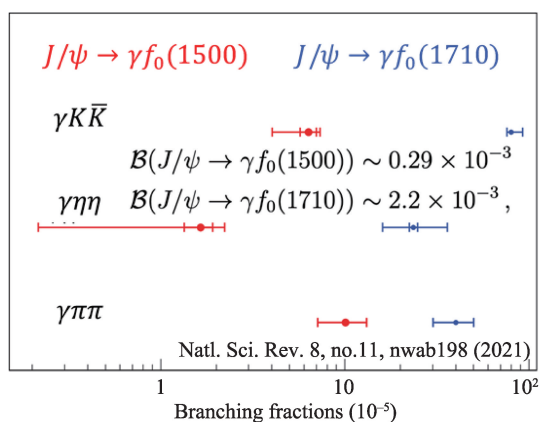


图1 BESIII 对  $J/\psi$  辐射衰变的系统研究中, 观测到  $f_0(1710)$  的大量产生, 比  $f_0(1500)$  高一个量级

张量介子谱的以往实验结果仍存在较大的误差, 亟需改进精度。BESIII 利用高统计量数据, 在多个反应过程的系统研究中观测到  $f_2(2340)$  大量产生。格点 QCD 预言张量胶球在  $J/\psi$  辐射衰变中有很大产率,  $f_2(2340)$  是否含有较高的胶子成分是一个值得进一步研究的有趣问题。

在赝标量胶球方面,  $\eta(1405/1475)$  是强子谱学长期以来著名的疑难问题。夸克模型预期在 1.4 GeV 附近只有一个赝标量介子, 但是实验上不同反应过程分别发现了两个位于不同质量的共振结构  $\eta(1405)$  和  $\eta(1475)$ 。通常认为  $\eta(1475)$  是普通介子, 而额外的  $\eta(1405)$  无法归类于夸克模型的赝标量

介子谱。有许多理论把  $\eta(1405)$  当作一个赝标量胶球候选者, 引发多家实验在 1.4 GeV 附近开展了胶球的寻找和研究。然而格点 QCD 理论计算预期赝标量胶球在 2.4 GeV 附近, 远高于 1.4 GeV。

如果将  $\eta(1405)$  解释为赝标量胶球, 则理论上很难理解这个巨大的差别。BESIII 首次发现同位旋破坏过程  $\eta(1405) \rightarrow f_0(980)\pi^0$ 。(同位旋是一种对称性, 在强相互作用中通常是守恒的, 在电磁相互作用中可以破坏。) 实验结果表明  $\eta(1405) \rightarrow f_0(980)\pi^0$  的同位旋破坏程度比电磁过程导致的同位旋破坏程度高了一个数量级, 反常的实验结果意味着存在新的物理机制。此外实验观测到的  $f_0(980)$  谱形的宽度显著低于其本征宽度。理论家根据 BESIII 的实验发现提出了一种特殊的反应机制—— $\eta(1405)$  和  $\eta(1475)$  可能是同一个共振态由于这种特殊机制在不同反应过程中产生了质量偏移。BESIII 实验在格点 QCD 预言赝标量胶球所在的能区发现了一个新粒子 X(2370), 并且发现了 X(2370) 多种衰变模式。这一系列研究使得 X(2370) 成为赝标量胶球的一个很好的候选者。进一步研究 X(2370) 的产生、衰变性质将对确定其内部胶球成分起到关键作用。

BESIII 的系统性研究显著改善了胶球的研究现状, 为研究胶球这一强子物理长期难题提供了关键信息。

#### 4. BESIII 上的混杂态研究

传统夸克模型认为介子由一对正反夸克组成。 $J^{PC} = 1^{+-}$  等量子数无法由简单的正反夸克系统形成, 被称为奇特量子数。具有奇特量子数的自旋奇特强子态必然是超出夸克模型的新型强子, 因此受到了理论和实验极大的关注。混杂态 ( $q\bar{q}g$ ) 是包含正反夸克对和激发的胶子场的一种奇特强子态, 其性质对于研究胶子场和理解色禁闭有重要意义。 $1^{+-}$  混杂态是格点 QCD 和唯象模型预言的最轻的、具有奇特量子数的混杂态, 质量在 1.7~2.1 GeV 附近。自旋奇特强子态的实验研究持续了近 40 年, 至今仍是国际奇特强子物理研究的前沿热点之

一。以往的实验结果主要来源于 $\pi$ 束流的固定靶实验(E852, VES, COMPASS等)和正反质子湮灭实验(Crystal Barrel 和 OBELIX)。2017年开始运行的GlueX实验的主要物理目标是通过光生反应研究 $1^{-+}$ 混杂态。以往实验结果仅发现3个自旋奇特强子态候选者,全部是同位旋矢量 $1^{-+}$ ,同位旋标量候选者一直没有实验迹象。实验寻找同位旋标量 $1^{-+}$ 奇特强子态对于理解强子构成等低能强相互作用性质有重要的物理意义。

BESIII利用100亿 $J/\psi$ 数据样本,在 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta'$ 过程中首次发现了一个新粒子, $\eta_1(1855)$ ,具有超出常规介子的 $J^{PC} = 1^{-+}$ 奇特量子数。该粒子的显著性水平大于19倍标准偏差,质量与理论预言的 $1^{-+}$ 混杂态一致。 $\eta_1(1855)$ 的发现引发了国际强子物理领域的关注。 $\eta_1(1855)$ 作为粒子物理重要国际会议Moriond QCD 2022亮点成果;美国粒子物理战略规划Snowmass2021的强子谱学总结报告及4个白皮书引用了 $\eta_1(1855)$ 的成果。 $\eta_1(1855)$ 是一种新类型的强作用物质形态,它的发现开启了自旋奇特强子态新的研究方向。该成果是强子谱学领域的一项重要重要的里程碑。

$\eta_1(1855)$ 标志着一种新类型的强作用物质形态,它的发现开启了自旋奇特态新的研究方向。 $1^{-+}$ 奇特强子态 $\eta_1(1855)$ 的性质是什么?如何区分混杂态、分子态、四夸克态等不同理论假设?如果 $\eta_1(1855)$ 和 $\pi_1(1600)$ 属于一组 $1^{-+}$ 多重态,在混杂态、分子态、四夸克态等不同理论假设下如何寻找其他家族成员? BESIII正在对这一系列重要问题开展系统的深入研究。

### 5. 轻强子物理的其他机遇

BESIII上的高统计量粲偶素衰变可以产生高统计量的 $\eta, \eta'$ 等轻介子,BESIII可以作为一个“轻介子工厂”,通过精确研究轻介子的衰变机制,可以检

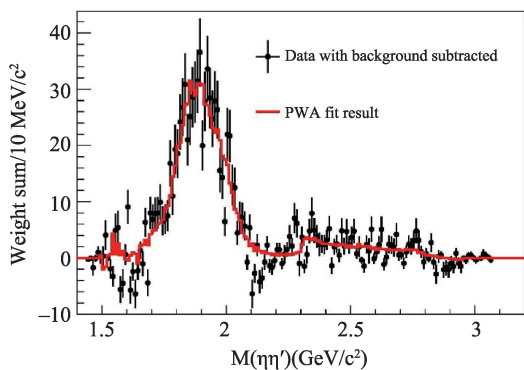


图2 BESIII首次发现同位旋标量 $1^{-+}$ 奇特强子态 $\eta_1(1855)$

验粒子物理的基本对称性和低能强相互作用理论。与光生和电生反应实验相比,利用阈值处产生的大统计量粲偶素数据研究重子激发态具有同位旋单一、分析简单和本底低等优势。BESIII在重子(包括核子和超子)激发态领域与国际上其他实验形成很好的互补。BESIII已经积累了粲能区世界上前所未有的高精度实验数据,并将继续运行至2030年左右。BESIII将继续为研究强相互作用的本质提供更多的新机遇。

\* National Key R&D Program of China under Contracts No. 2020YFA0406300

\* National Natural Science Foundation of China (NSFC) under Contracts No. 12235017

