奇特的强子 $X(3872)$ 及其质量精确测量的新方法

郭奉坤^{1,2}

1. 中国科学院理论物理研究所, 中国科学院理论物理重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049

E-mail: fkguo@itp.ac.cn

Exotic hadron $X(3872)$ and a novel method for precisely measuring its mass

Fengkun Guo^{1,2}

¹CAS Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

E-mail: fkguo@itp.ac.cn

doi: 10.1360/TB-2019-0219

质子和中子通过强相互作用束缚到一起形成各种各样的原子核, 再通过电磁相互作用与电子一起形成原子, 从而构成了宇宙中的可见物质. 强相互作用的基本理论是于 20 世纪 70 年代建立起来的量子色动力学 (quantum chromodynamics, QCD). 在 QCD 中, 参与强相互作用的基本粒子是夸克和胶子. 与质子和电子分别带正负电荷类似, 夸克带有 3 种不同的色荷; 与传递电磁力的光子不带电荷不同, 在夸克间传递强相互作用的胶子具有 8 种色荷, 从而胶子之间也可以直接发生相互作用, 使得 QCD 在低能量区成为非微扰的理论. 夸克和胶子通过非微扰的强相互作用组成了不带色荷 (称为色单态) 的强子. 强子分为自旋为整数的介子和半整数的重子, 质子和中子就是质量最小的两种重子. 强相互作用有一个未能完全理解的现象——色禁闭: 虽然作为基本组分的夸克和胶子都带色荷, 但是实验上只能直接观测到无色的强子. 因此, 强子谱成为研究强相互作用物质结构的核心问题之一.

夸克模型对实验上观测到的大量强子进行分类, 并且通过将介子和重子分别解释为一对正反夸克和 3 个夸克的束缚态, 在定量描述强子谱上取得了巨大的成功. 超出此图像的强子被称为奇特强子态, 其中一类便是含有多于 3 个 (反) 夸克的多夸克态, 它们是高能物理实验中长期寻找的对象. 2003 年以来, 日本高能加速器研究机构的 Belle 实验、美国 SLAC 国家加速器实验室的 BaBar 实验、中国基于北京正负电子对撞机的 BESIII 实验以及欧洲核子中心的 LHCb 实验等, 先后发现了大量性质与夸克模型预期不符的新的强子态, 其中包含一对正反重夸克的被特别统称

为 XYZ 态. 作为绝佳的奇特强子态的候选者, 它们受到了广泛关注. 然而, 其中大部分的内部结构仍然很不清楚, 争论颇多.

XYZ 态中最先被发现的是 Belle 合作组^[1]于 2003 年在 B 介子衰变中发现的 $X(3872)$, 括号中的数字表示该粒子以百万电子伏特 (MeV) 为单位的质量, 即其质量大约是质子质量的 4.1 倍. 随后, 世界各地的多个高能物理实验 (包括 BESIII, BaBar, CDF, D0, LHCb, ATLAS, CMS 等) 均确认了它的存在. 即使如此, 其量子数直到 2013 年才由 LHCb 实验确认为 $J^{PC}=1^{++[2]}$, 也就是自旋为 1, 宇称和 C 宇称皆为正 (做镜像变换和电荷共轭变换都变为它自身, 没有额外的相位). 该粒子具有诸多奇特的性质, 其中最有意思的是它的质量与一对正反粲介子 (D^{*0} 和 D^0 , 其中一个包含粲夸克, 另一个包含反粲夸克) 的质量之和 (称为阈值) 几乎精确相等. 综合目前所有的实验测量可以得到, D^{*0} 和 D^0 的阈值减去 $X(3872)$ 的质量 (下面称为 $X(3872)$ 的束缚能) 中心值为 0, 误差仅有约 180 keV, 小于 $X(3872)$ 质量的万分之五. 因为这个性质, 在大量理论文章中, $X(3872)$ 被认为可以近似地看成是正反粲介子结合成的复合体系, 即强子分子态^[3], 这样的体系可以看作质子和中子结合成的氦核的类比. 然而, 关于 $X(3872)$ 的内部结构也存在其他模型, 不同的模型对 $X(3872)$ 的性质会有不同的预言. 因此, 精确测量 $X(3872)$ 的性质对理解其内部结构, 从而理解其他 XYZ 态, 具有重要的意义. 上面提到的 $X(3872)$ 的束缚能便是其最重要的性质之一, 虽然目前的测量误差只有 180 keV, 但是仍然连其符号都不能确定.

我们^[4]最近提出了一个全新的可以精确测量 $X(3872)$ 的束缚能的方法, 原理如图 1 所示. 在 高能粒子实验中产生一个不带电荷的中性 D^{*0} 介子和它的反粒子 $\bar{D}^{*0}$, 其中一个(如 D^{*0})放出一个光子变成质量更小的中性粲介子 D^0 , D^0 再与 $\bar{D}^{*0}$ 发生反应产生 $X(3872)$. 在这对正反 D^{*0} 介子的质心系中, 正反 D^{*0} 介子朝相反的方向飞离, 当它们的总能量稍微超过它们的阈值的时候, 由 D^{*0} 介子辐射衰变出来的 D^0 的运动速度会比 $\bar{D}^{*0}$ 的速度更快; 如果 D^0 和 $\bar{D}^{*0}$ 的运动方向相同, 那么 D^0 就可以追上 $\bar{D}^{*0}$, 从而与之相撞产生 $X(3872)$. 这时, 图 1 所示的过程可以作为经典过程发生. 它的振幅作为能量的函数具有一个特殊的对数奇点, 称为三角奇点(triangle singularity), 会在一定的能量区间提升过程的反应几率. 这一提升效应对能量的依赖体现为一个窄峰, 窄峰的形状对 $X(3872)$ 的束缚能极其敏感. 这一点可以很容易地从图 2 中看出, 图中所示的形状为反应几率对能量的依赖(称为 $X(3872)$ 和光子的线形), 几条曲线对应于现有误差范围内的束缚能的不同取值. 因此, 可以通过测量 $X(3872)$ 和光子的线形来精确确定 $X(3872)$ 的束缚能.

目前, $X(3872)$ 的束缚能是通过分别对 $X(3872)$, D^{*0} 和 D^0 的质量进行测量而得到的, 从而它的误差会受到这 3 个粒子的质量测量误差的限制. 而图 2 所示的线形直接依赖于 $X(3872)$ 的束缚能, 从而甚至可以突破 D^{*0} 和 D^0 的质量测量误差(各仅为 50 keV)的限制. 通过蒙特卡罗方法, 可以研究要达到一定的测量精度所需要的事例数. 我们发现利用该方法只需要几百个事例即可能获得远超现有结果的测量精度(可能提高 1 个数量级). 任何可以大量产生具有 $J^{PC}=1^{++}$ 量子数的正反 D^{*0} 介子对的实验都可以采用这个方法来精确测量 $X(3872)$ 的束缚能, 包括正负电子对撞、正负质子对撞等. 该研究成果近期发表于 *Phys Rev Lett*^[4].

我国的正负电子对撞 BESIII 实验最近观测到了 $X(3872)$ 的新的衰变模式^[5], 并且正在收集更多的数据; 德国的正负质子对撞 PANDA 实验将于 2025 年开始运行, 在

图 1 (网络版彩色)产生 $X(3872)$ 和光子的三角图机制

Figure 1 (Color online) Triangle diagram mechanism for producing the $X(3872)$ and photon pair

图 2 (网络版彩色)束缚能 δ 取不同的值时, $X(3872)$ 和光子的线形. 数据来源于文献[4]

Figure 2 (Color online) The $X(3872)$ and photon line shape with the binding energy δ taking different values. Data are taken from Ref. [4]

几年之内对 $X(3872)$ 的实验研究将进入精细测量的阶段. 可以预期新的实验结果将能够揭示 $X(3872)$ 内部结构的更清晰的图像, 并会促进对整个 XYZ 态问题的理解, 从而对色禁闭机制的研究有新的启示.

推荐阅读文献

- Choi S K, Olsen S L, Abe K, et al. Observation of a narrow charmonium-like state in exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 262001
- Aaij R, Beteta C A, Adeva B, et al. Determination of the $X(3872)$ meson quantum numbers. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 222001
- Guo F K, Hanhart C, Meißner U G, et al. Hadronic molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 015004
- Guo F K. Novel method for precisely measuring the $X(3872)$ mass. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 202002
- Ablikim M, Achasov M N, Ahmed S, et al. Observation of the decay $X(3872) \rightarrow \pi^0 \chi_{c1}(1P)$. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 202001