

# 大型强子对撞机上的实验进展\*

高原宁<sup>†</sup>

(北京大学物理学院 北京 100871)

2019-05-04收到

<sup>†</sup> email: yuaning.gao@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190501

## Status of the LHC experiments

GAO Yuan-Ning<sup>†</sup>

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**摘要** 大型强子对撞机的成功建成, 使人类对微观世界的探索深入到了 $10^{-18}$  m 这样一个全新的领域。文章介绍大型强子对撞机上实验的最新进展。

**关键词** 大型强子对撞机, Higgs 粒子, CP 破坏, 强子谱

**Abstract** Due to the completion of the Large Hadron Collider, our understanding of the microscopic world has been deepened to a new era, the scale as short as  $10^{-18}$  m. The most recent progress of experiments at LHC will be reviewed in this article.

**Keywords** LHC, Higgs boson, CP violation, hadron spectroscopy

## 1 引言

2018年12月, 欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)结束了第二个运行期(RUN2)的实验。计划停机两年进行加速器和探测器升级后, 于2021年开始第三个运行期(RUN3)的科学实验。相对第一运行期(RUN1)的7 TeV和8 TeV, 在这个运行期内质子对撞的质心系能量提高到13 TeV, 两个大型通用探测器ATLAS和CMS各自获取了积分亮度约 $160 \text{ fb}^{-1}$ 的数据, 专门用于底夸克实验的LHCb探测器获取了 $6 \text{ fb}^{-1}$ 。高能相对论重离子对撞实验ALICE也按计划顺利运行(本文限于篇幅将不涉及相关内容)。除了实验数据获取, 加速器专家们还在不同运行参数下试验了LHC的性能, 为未来升级到高亮度(HL-LHC)提供了技术准备。

LHC将人类对微观世界的探索带到了一个新的领地, 在这里粒子物理的标准模型理论再一次

取得了重大成功, 迄今为止LHC上的所有实验结果均与理论预言一致。作为其中的一个例子, 图1给出了高能质子对撞中一些过程的反应截面的测量值与理论值的比较<sup>[1]</sup>, 不同过程间相差超过八个数量级, 在这样一个跨度上理论预言与实验测量高度符合。

标准模型取得巨大成功的同时, 来自理论本身和天文观测结果所带来的问题也表明一定存在超出标准模型的新物理。LHC实验上发现Higgs粒子后, 寻找超出标准模型的新物理现象成为当代粒子物理前沿研究的最重要目标, 这也是当前和未来LHC实验的主要科学目标。Higgs粒子是标准模型中唯一的标量粒子(自旋角动量为0), 与电弱对称性自发破缺和基本粒子起源等本原问题直接相关, 这也意味着研究Higgs粒子是探索超出标准新物理的重要渠道; 直接探测超出标准模型的新粒子是在LHC上探索新物理的另一重要途径, 也是两个高能前沿实验ATLAS和CMS的主要科学目标; LHCb实验的目标则是间接发现新物理。在LHC的高能质子对撞过程中会产生大量

\* 国家自然科学基金(批准号: 11575091)资助项目

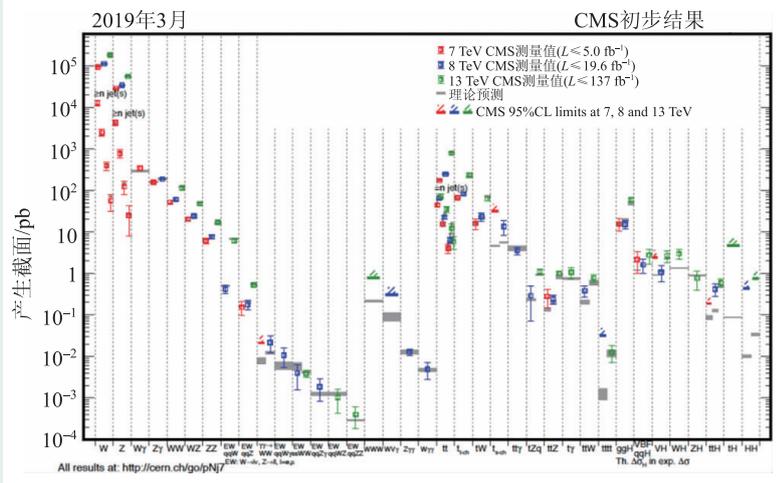


图1 LHC上高能质子对撞过程的产生截面

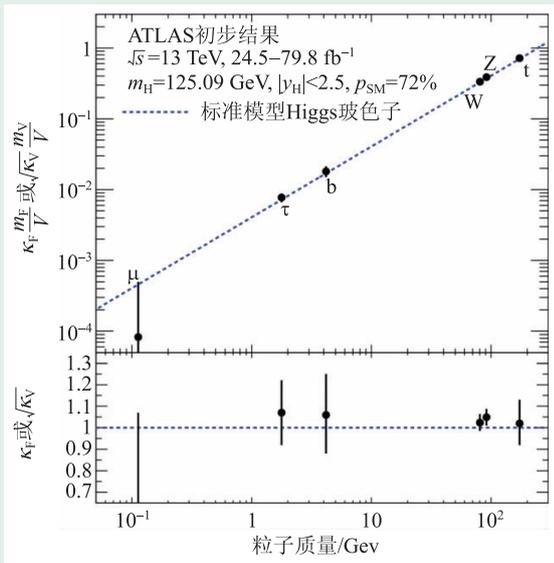


图2 Higgs 粒子与  $\mu^+\mu^-$ ,  $\tau^+\tau^-$ ,  $b\bar{b}$ ,  $W^+W^-$ ,  $ZZ$ ,  $t\bar{t}$  的耦合常数, 数据点是实验测量值, 虚线是标准模型预言

含重夸克的强子, 测量这些粒子的衰变性质可以对标准模型进行精确的实验检验, 从而探索新物理的迹象。LHCb 实验还可以进行强子谱等实验研究。

ATLAS, CMS 和 LHCb 实验引领着当代粒子物理前沿研究, 本文介绍这几个实验在 Higgs 粒子性质研究和新物理直接寻找、重味物理和强子谱研究的近期进展情况。由于数据的处理和分析需要一定的时间才能完成, 预期各实验组基于全部 RUN1 和 RUN2 数据的物理分析要到 2020 年前后才会陆续完成, 目前已有的大都还是基于一部分数据的阶段性结果。

## 2 Higgs 物理和新粒子寻找

精确测量 Higgs 粒子属性是 LHC 实验最重要的课题。综合 ATLAS 和 CMS 已有的测量结果, 2018 年的粒子表中<sup>[2]</sup>给出的 Higgs 粒子质量测量值为  $125.18 \pm 0.16 \text{ GeV}/c^2$ , 其精度已经接近千分之一。在标准模型中, Higgs 粒子的质量是一个自由参数, 这个参数的精确测定显著提高了标准模型理论的预言能力, 对超出标准模型的理论给出了更强的限制<sup>[3]</sup>。另外, 现有的

测量结果支持实验上发现的这个 Higgs 粒子的自旋为 0, CP 宇称为+, 符合标准模型的预言。

关于 Higgs 粒子性质研究的核心任务是测量其与其他基本粒子过程的耦合常数, 由于很多新物理模型预言这些耦合常数可以偏离标准模型的预言值, 相关实验受到特别的关注。在 RUN1 期间, ATLAS 和 CMS 实验首先观测到了 Higgs 粒子衰变到双光子、W 玻色子对和 Z 玻色子对的过程, 从而证实了 Higgs 粒子的存在。接下来, Higgs 粒子到  $\tau$  轻子对的衰变也在 RUN1 中得到了确认<sup>[4]</sup>。进入 RUN2 后, 随着数据量的大幅累积, 两个实验组先后观测到了 Higgs 粒子与 t 夸克对的伴随产生过程, 并从 Higgs 粒子与规范玻色子对的伴随产生过程中观测到了 Higgs 粒子到 b 夸克对的衰变。另外, 两个实验还对 Higgs 粒子到  $\mu$  轻子对等稀有衰变过程进行了寻找。假设在相关的产生和衰变过程中没有超出标准模型新物理的贡献, 这些实验结果可以用来测量 Higgs 粒子与 Higgs 与夸克对、轻子对以及 W 和 Z 规范玻色子对的耦合常数<sup>[5]</sup>, 图 2 中给出了 ATLAS 实验的测量值结果与标准模型预言的比较, 在实验误差范围内测量结果符合标准模型预言, CMS 实验也给出了类似的结果。

需要指出的是, 目前实验关于耦合常数的测量结果还不是很精确, 实验误差大都在 15% 以上。很多超出标准模型的新物理理论均预言这些

耦合常数可能偏离标准模型预言值，但一般都不超过5%，目前的实验精度还不足以对这些理论进行实质性的检验。精确测量Higgs粒子与其他粒子的耦合强度、以及Higgs粒子的自耦合强度，将贯穿LHC实验的始终，同时也是下一代高能物理实验的核心任务。

很多超出标准模型的新物理理论都预言存在标准模型以外的新粒子，这些新粒子的产生和衰变均具有明显的特征，因此成为寻找新物理的最直接信号。从标准模型出发，新物理的理论模型有很多，为LHC上的新粒子寻找提供了丰富的素材，而实验结果也为判别理论模型提供了最直接的证据。在众多的理论模型中，基于超对称的唯象模型受到了实验较多的关注。实验上目前没有发现超对称粒子的迹象，ATLAS和CMS实验据此得出了超对称粒子的质量下限和对一些超对称模型参数空间的排除限<sup>[6]</sup>。虽然从实验结果推断这些粒子的质量下限时会强烈依赖理论模型，但大致可以说在TeV能区没有发现超对称粒子，这对一些简单的超对称理论模型提出了一定的挑战。在LHC实验上，对超对称以外的其他理论模型也进行了大量的实验研究，与寻找超对称模型的结果类似，目前还没有发现超出标准模型新粒子的迹象。

### 3 味物理和强子谱

在ATLAS和CMS实验直接寻找新物理的同时，LHCb实验的目标则是间接发现新物理。在LHC的高能质子对撞过程中会产生大量含重夸克(b夸克或c夸克)的强子，测量这些粒子的衰变性质可以对标准模型进行精确的实验检验，从而发现新物理的迹象，这类探索通常被称为味物理研究。这方面的内容非常丰富，自LHC运行以来LHCb进行了大量的相关测量，大大加深了我们对夸克间的转化过程的理解。

近期最重要的结果是关于粲介子电荷-宇称联合变换(CP)对称性破坏的发现<sup>[7]</sup>。基本粒子过程中的CP破坏现象是解释宇宙中正反物质不对称的关键一环，很多超出标准模型的新物理理论预言存在新的CP破坏物理机制，对此类过程的

精确测量是探索新物理的重要手段。之前的实验已经确认在奇异强子(含s夸克)和底强子(含b夸克)的衰变过程中存在CP破坏现象，标准模型理论预期粲强子(含c夸克)的CP破坏强度远远低于奇异强子和底强子，实验上的难度很大。LHCb发现粲介子的CP破坏大约 $1.5 \times 10^{-3}$ ，与标准模型的预期一致。首次确认粲介子中的CP破坏现象具有重要意义，相关研究可以在一个新的领域内开展。

LHCb实验近年来在强子谱研究上颇有建树，五夸克态、双粲重子以及一批新的强子激发态的发现为相关研究注入了新的活力。近期最受关注的是关于五夸克态的实验进展<sup>[8]</sup>。2015年LHCb发现五夸克态受到国际高能界的高度关注，但关于其性质还有很多问题有待回答。新的研究利用了迄今为止LHCb探测器采集的所有数据。通过重新优化的事例选择条件， $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ 信号接收效率又得到了显著提高，用于这次实验分析的数据有效统计量比2015年时几乎增加了一个数量级，在低统计量时无法观测到的细致结构清晰地显现出来：如图3所示，一个新的五夸克态 $P_c(4312)$ 得到实验确认，同时观测到2015年发现的五夸克结构 $P_c(4450)$ 实际上是由两个质量相近的共振态 $P_c(4440)$ 和 $P_c(4457)$ 叠加而成。

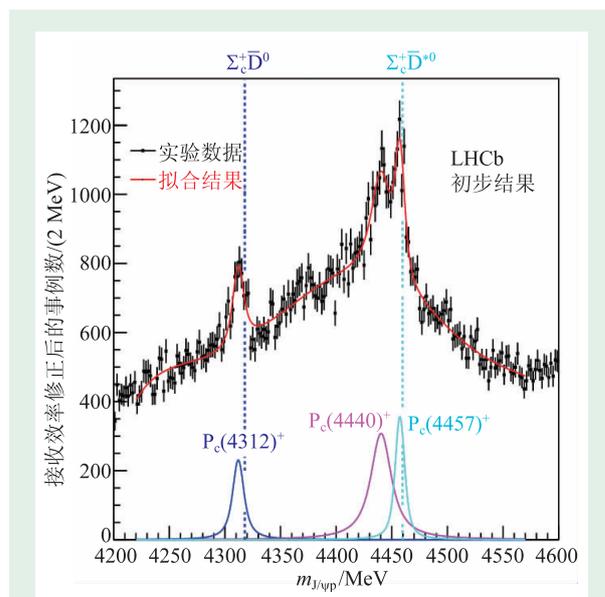


图3 粲夸克偶素(J/ψ)和质子(p)不变质量谱中三个五夸克态信号。 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ 事例按末态粒子相空间处的接收效率修正加权

五夸克态的内部结构有很多的可能性,如紧束缚的五夸克态、重子-介子分子态等,当然也可能是这些量子态的叠加。LHCb实验发现的这三个五夸克态的宽度都很窄,质量略低于粲重子和反粲介子质量之和,有可能是粲重子和反粲介子形成的束缚态,但目前也不能排除有其他可能的解释。对五夸克粒子结构的研究成为国际高能物理研究的前沿,为探索强相互作用非微扰性质打开了一个新窗口。

## 4 总结和展望

自2010年LHC正式运行以来成果丰硕,Higgs粒子的发现使标准模型得到确立的同时,又开启了寻找超出标准模型新物理的科学前沿。迄今为止,LHC的实验结果均符合标准模型的理论预言。值得注意的是,LHC目前获取的数据量还只是计划中的5%,其中大量用于物理分析的只是1%,LHC实验还仅仅处于起步阶段,相信在未来20年间LHC上的实验会不断地将高能前沿研究引向深入。

LHC的建成使高能物理的实验前沿达到了TeV能区,这相当于对微观世界的探索达到了 $10^{-18}$ 米,人类对自然界的探索到达了一个全新的领域,这也是LHC的最重要的意义。LHC也许只能让粒子物理的探索前进一小步,但这无疑是人类文明史上的一大步。

## 参考文献

- [1] CMS Collaboration. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsCombined>
- [2] Tanabashi M *et al.* (Particle Data Group). *Phys. Rev. D*, 2018, 98: 010001
- [3] Haller J *et al.* (The Gfitter Group). *Eur. Phys. J. C*, 2018, 78: 675
- [4] ATLAS and CMS Collaborations. *JHEP*, 2016, 08: 45
- [5] ATLAS Collaboration. ATLAS-CONF-2018-031; CMS Collaboration, arXiv: 1901.00174
- [6] ATLAS Collaboration. <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/SupersymmetryPublicResults>; CMS Collaboration. <http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/SUS/index.html>
- [7] LHCb Collaboration. arXiv: 1903.09252
- [8] LHCb Collaboration. arXiv: 1904.03947



## 大连齐维科技发展有限公司

地址:大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: [info@chi-vac.com](mailto:info@chi-vac.com) HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

