

希格斯粒子性质测量*

鲁楠^{1,2,†} 刘衍文^{1,2}

(1 中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2022-10-15 收到

† email: nanlu@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20221104

Higgs boson property measurements

LU Nan^{1,2,†} LIU Yan-Wen^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要 2012年大型强子对撞机上的ATLAS和CMS实验发现希格斯粒子,这是粒子物理发展的一个里程碑。这一重大发现揭示了基本粒子质量的起源,极大地深化了人类对于物质世界的认知。希格斯粒子发现之后,测量希格斯粒子的性质是检验粒子物理标准模型并寻找新物理的重要途径。文章从质量、自旋、宇称和耦合等方面介绍希格斯粒子的性质测量。

关键词 希格斯粒子, 大型强子对撞机, 希格斯粒子性质, 粒子物理标准模型

Abstract The discovery of the Higgs boson by the ATLAS and CMS experiments was a milestone in particle physics, which revealed how elementary particles acquire masses. After the discovery, Higgs boson property measurements became a crucial method to test the Standard Model of particle physics, and to search for new physics beyond. This article provides an introduction to the measurements of the Higgs boson properties at the Large Hadron Collider, with regard to its mass, spin, parity, and couplings.

Keywords Higgs boson, Large Hadron Collider, Higgs boson properties, Standard Model

1 引言

粒子物理标准模型是描述物质世界的基本组成及其相互作用的迄今最成功的理论。费米子通过规范玻色子(胶子,光子,W和Z玻色子)传递强、电磁、弱三种基本相互作用。电、磁和弱相互作用可以在同一个理论框架下统一描述为电弱

相互作用。参加强相互作用的费米子包含6种夸克(上,下,粲,奇,顶,底),不参加强相互作用的轻子也有6种(电子、缪子、陶子和对应的电子中微子、缪子中微子、陶子中微子)。轻子和夸克都分为三代,三代费米子的性质除了质量不同之外完全相同。而基本粒子的质量起源于希格斯场:规范对称性的自发破缺赋予规范玻色子质量,费米子的质量来源于与希格斯粒子的汤川耦合,因此希格斯粒子是整个粒子物理的核心。希格斯机制相关理论被Brout和Englert^[1], Higgs^[2, 3], Guralnik, Hagen和Kibble^[4]于1964年首次独立

* 国家重点研发计划(批准号:2018YFA0404004)资助项目,国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(批准号:11961141014),国家自然科学基金创新研究群体项目(批准号:11721505)

提出。Higgs^[5]和 Kibble^[6]于 1966 年完善了理论的细节。

标准模型所预言的希格斯粒子是验证希格斯机制的关键。但是标准模型理论本身无法预言希格斯粒子的质量。实验物理学家先后在欧洲核子中心大型正负电子对撞机(LEP)^[7]，费米国家实验室质子—反质子对撞机(Tevatron)^[8]和欧洲大型强子对撞机(LHC)^[9]等对撞机上寻找了希格斯粒子。LEP 和 Tevatron 对撞机都未获得统计上显著的信号(粒子物理实验上衡量统计显著性的惯例是以五倍标准偏差为标准，即观测到的信号为本底统计涨落导致的概率小于或等于一个高斯分布的随机数取值偏离其均值五倍标准偏差以上的概率，约等于 5.7×10^{-7} 时，才可称为“发现”)。LHC 对撞机上的 ATLAS^[10]和 CMS^[11]实验于 2012 年分别独立在第一阶段取数(Run 1) 7、8 TeV 的质子—质子对撞中发现一个质量约为 125 GeV 的新粒子，当时所测得的性质与希格斯粒子一致。LHC 实验在 2015—2018 年第二阶段取数(Run 2)中，质子—质子质心能量升级到了 13 TeV，收集到的希格斯粒子增加了约 30 倍。基于这些数据，希格斯粒子的性质被更加精确地测定^[12, 13]。适逢希格斯粒子发现十周年，为了纪念这个人类认识物质世界不断深入的重要里程碑，我们从质量、自旋、宇称和耦合等方面介绍希格斯粒子的性质。

2 希格斯粒子的质量、自旋、宇称

希格斯粒子的质量无法由标准模型理论预言，只能通过实验测量。根据相对论力学，一个粒子的质量 m 与其能量 E 和动量 p 的关系为： $m = \frac{1}{c} \sqrt{(E/c)^2 - p^2}$ 。希格斯粒子的寿命约为 1.6×10^{-22} s，只能根据能量、动量守恒，通过测量其衰变产物的能量和动量，得出希格斯粒子的质量。CMS 和 ATLAS 实验可以精确测量带电轻子和光子的能量和动量，因此，希格斯粒子的 $H \rightarrow \gamma\gamma$ ， $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 衰变是测量希格斯粒子质量最理想的衰变道。图 1 所示为 ATLAS^[14]与 CMS^[15]实验得到的希格斯粒子候选事例的四轻子和双光子不变质量。联合两个衰变道，当前 CMS 实验最新测量结果为： $m_H = 125.38 \pm 0.14$ GeV，ATLAS 实验的最新结果为 $m_H = 124.97 \pm 0.24$ GeV，测量精度比 2012 年发现希格斯粒子时分别提高了 4 倍和 2.5 倍。

在标准模型中，给定希格斯粒子的质量后，希格斯粒子的性质就都确定了。为了确定实验上所发现的新粒子是标准模型中的希格斯粒子，需要通过实验测量其特性，与标准模型的理论预言对比。在标准模型中，希格斯粒子是唯一的自旋为 0 的基本粒子，电中性，宇称为偶(即 $J^P = 0^+$)。实验上可通过粒子衰变末态特征确定自旋宇称量子数。

首先，由于观测到了希格斯粒子的双光子衰变，根据朗道—杨定理^[16, 17]，自旋为 1 的

可能性其实就被排除了。ATLAS 和 CMS 实验还是利用实验数据对其他可能的量子数 $J^P = 0^-, 1^+, 1^-, 2^+$ 等进行了统计上的假设检验。在 Run 1 期间，只有希格斯粒子的玻色子衰变道提供了足够的统计量，可以用来研究自旋—宇称。当时将实验观测到的新粒子看作自旋—宇称的本征态(即它有确定的自旋宇称量子数)，利用衰变末态运动学

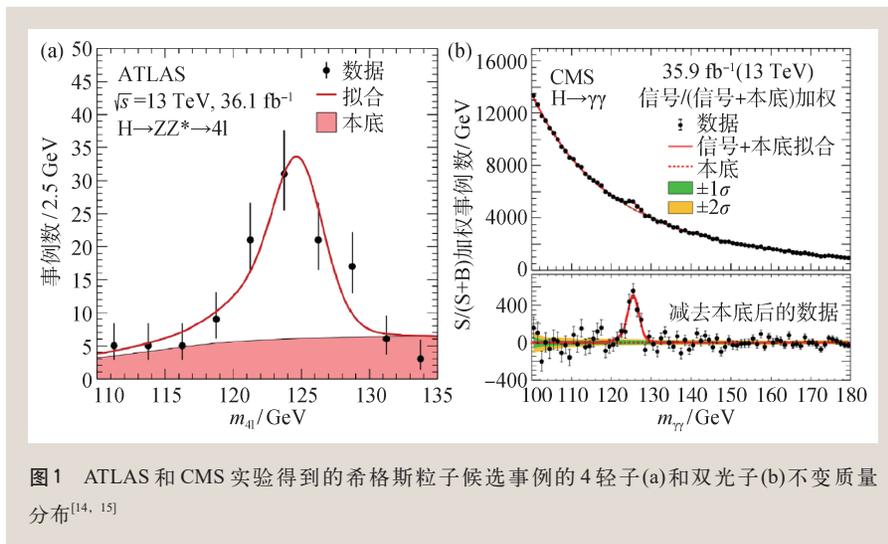


图1 ATLAS 和 CMS 实验得到的希格斯粒子候选事例的 4 轻子(a)和双光子(b)不变质量分布^[14, 15]

特征排除 $J^P=0^+$ 之外的假设。有了 Run 2 数据后,不但费米子衰变道的信号有了统计显著性,还可以研究新粒子为宇称混合态的假设,寻找希格斯衰变中可能的 CP 对称性破缺(这就意味着存在超过一个电中性、零自旋的 CP 本征态,这是超越标准模型的)。这样,希格斯粒子的自旋—宇称研究就和希格斯粒子反常耦合的寻找紧密联系起来了。在标准模型中,唯一的 CP 破坏的来源是夸克混合的 Cabibbo—Kobayashi—Maskawa (CKM) 矩阵中的相角,但它不足以解释宇宙中的重子反物质远远少于

正物质的不对称性。因此人们也格外关注新发现的粒子是否破坏 CP 对称性。

粒子的自旋—宇称决定了衰变末态粒子的角度分布。以希格斯粒子的双光子衰变为例,对于一个自旋为 0 的粒子而言,空间没有一个特殊的取向。在相对于希格斯粒子静止的参考系中,光子的发射角度是各向同性的。如图 2(a) 所示,在 Collins—Soper 参考系中^[18],希格斯粒子衰变末态中的光子发射角的余弦 ($\cos \theta^*$) 服从均匀分布(红色实线),与自旋为 2 的粒子对应的分布(虚线)形状明显不同^[19]。4 轻子末态 ($H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$) 有更加丰富的运动学信息可以用来区分不同的自旋—宇称,多元分析方法就有了用武之地。图 2(b) 为 ATLAS 实验利用散射矩阵元构造的多元分析方法,可以看到奇宇称和偶宇称可以较好地区分开来。散射矩阵元方法要用到初、末态所有粒子的能量、动量信息,适用于希格斯衰变的 4 轻子末态。而希格斯的 WW 衰变道: $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ 的末态包含两个不可直接探测的中微子,散射矩阵元就不易计算了。利用蒙特卡罗模拟不同的自旋—宇称信号,并用模拟样本训练增强决策树等机器学习分类器算法也可得到较好的区分度。CMS 和

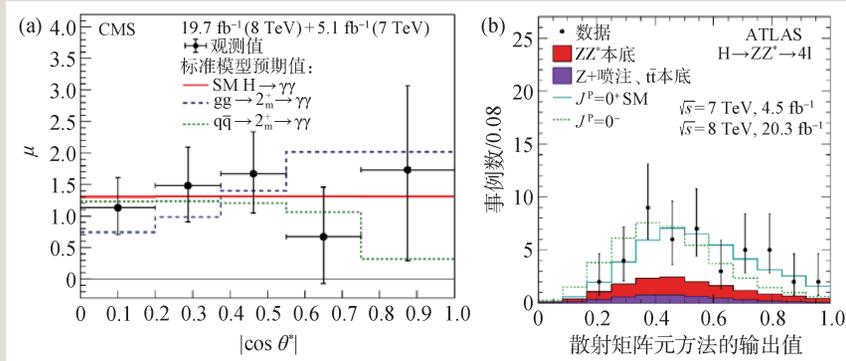


图 2 (a) CMS 实验得到的不同的 $\cos \theta^*$ 区间中的 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 信号强度^[19]; (b) ATLAS 实验采用的基于散射矩阵的多元分析区分 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 的宇称量子数^[20]

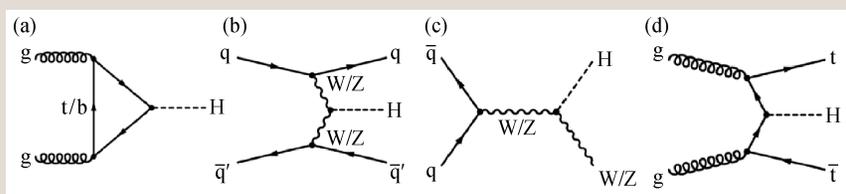


图 3 LHC 上希格斯粒子主要产生机制的领头阶代表性费曼图 (a) 胶子聚合产生机制; (b) 矢量玻色子聚合产生机制; (c) 伴随矢量玻色子产生机制; (d) 伴随顶夸克对产生机制

ATLAS 实验综合 $\gamma\gamma$, WW^* , ZZ^* 衰变道,把除 $J^P=0^+$ 之外的自旋—宇称在 99.9% 以上的置信度下全部排除了^[20, 21]。这就是说,新发现粒子的自旋—宇称的测量结果与标准模型一致。如果其自旋—宇称异于标准模型,仅仅是由于对撞数据的统计涨落使得单个实验的测量结果与标准模型如此一致的概率小于千分之一。

3 希格斯粒子的耦合

根据希格斯机制,我们身处于一个无处不在的希格斯场中,基本粒子通过与希格斯场相互作用获得质量。希格斯粒子与其他粒子以及自身的相互作用,称为耦合。在标准模型中,W 和 Z 玻色子和希格斯粒子的耦合强度与玻色子质量的平方成正比,费米子和希格斯粒子的耦合强度与费米子质量成正比。存在自耦合是希格斯粒子独特的性质。因此,精确测量希格斯粒子的耦合是检验标准模型以及寻找标准模型外的新物理的重要研究方向。ATLAS 和 CMS 实验通过测量希格斯粒子的产生和衰变率得到其与标准模型中其他粒子的耦合,其自耦合可通过双希格斯粒子的产

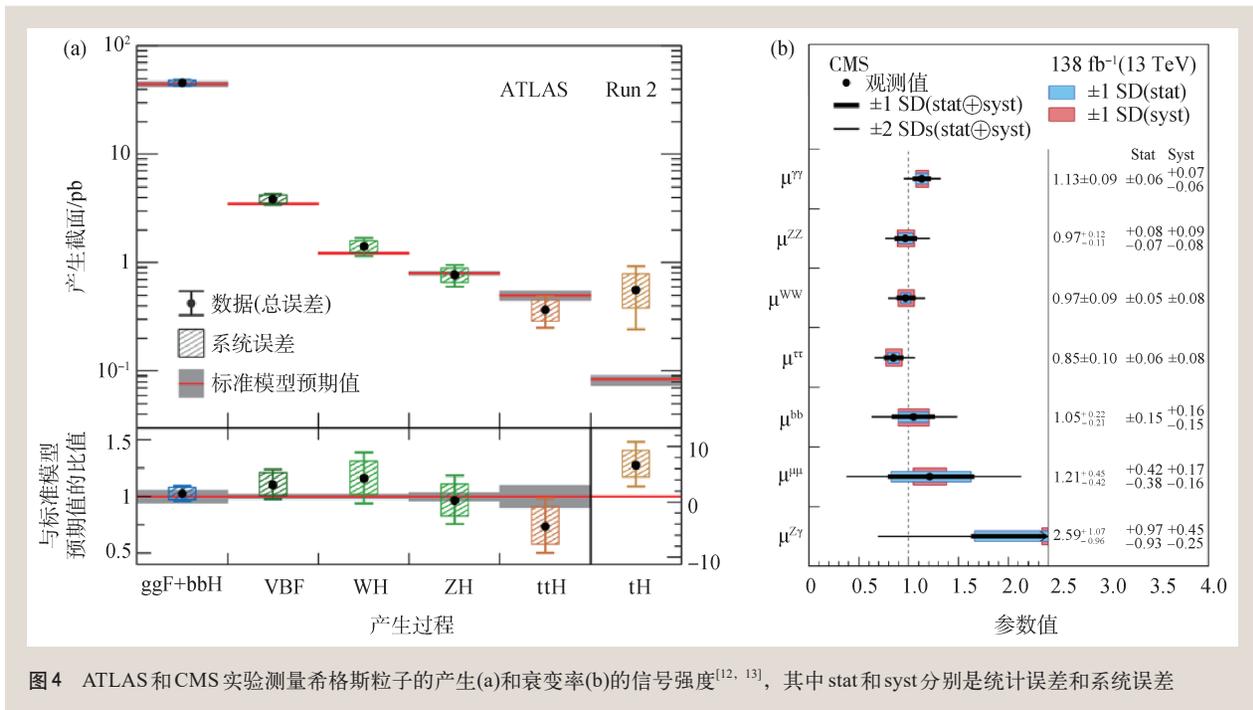


图4 ATLAS和CMS实验测量希格斯粒子的产生(a)和衰变率(b)的信号强度^[12, 13], 其中stat和syst分别是统计误差和系统误差

生以及电弱修正对于希格斯粒子的产生和衰变的影响来研究。

3.1 希格斯粒子和标准模型中其他粒子的耦合

在标准模型中, 希格斯粒子在 13 TeV 质子-质子质心能量的 LHC Run 2 的总产生截面约为 56 pb^[22]。根据此理论预期值, 我们预计 Run 2 质子-质子对撞中共产生了约九百万个希格斯粒子。LHC 上希格斯粒子的最主要的四种产生机制的代表性领头阶费曼图如图 3 所示。胶子聚合产生机制(图 3(a))是 LHC 上希格斯粒子最主要的产生方式, 占总产生截面的 87%。其次是矢量玻色子聚合产生机制(图 3(b)), 占总产生截面的 7%, 在实验上可以通过具有较大不变质量和赝快度差别的两个喷注这一特点来标定。其他的产生机制包括伴随矢量玻色子产生(或称为希格斯韧致辐射产生, 图 3(c))和伴随顶夸克对产生机制(图 3(d))等, 在实验上可分别通过矢量玻色子衰变产生的电子或者缪子, 以及中微子不能被探测器捕捉到而造成的丢失的能量, 和来自顶夸克衰变产生的底夸克喷注等特点来标定。这四种产生机制都已经被 ATLAS 和 CMS 实验观测到。

我们用来研究希格斯粒子性质的主要衰变道有 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow bb$ 和 $H \rightarrow \tau\tau$ 等。其中玻色子衰变道 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 有良好的信号和本底过程的比例, 并且能够在 $1\% \times m_H - 2\% \times m_H$ 分辨率下重建出希格斯粒子的质量, 而 $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ 道因其较大的分支比在希格斯粒子候选事例数目上有很大优势。光子的质量为零, 不能直接和希格斯粒子耦合, 希格斯粒子需要通过圈图过程衰变成双光子, 因此双光子道对该圈图中可能存在的新粒子敏感。bb 和 $\tau\tau$ 末态则对希格斯粒子与费米子的耦合敏感。

实验上测量得到的希格斯粒子的产生截面 σ_i 和分支比 BR_f 与标准模型预期值的比值称为信号强度, 即 $\mu_{if} = \frac{\sigma_i \times BR_f}{\sigma_i^{SM} \times BR_f^{SM}}$, $\mu_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{SM}}$ 以及 $\mu_f = \frac{BR_f}{BR_f^{SM}}$ 。假设所测量的产生和衰变过程的信号强度一致, ATLAS 和 CMS 实验测量全局信号强度的精度已经达到 6%, 希格斯粒子的产生和衰变率的信号强度测量结果如图 4 所示, 均与标准模型的预期符合^[12, 13]。

为了检验希格斯粒子的耦合与标准模型预

期是否符合，我们使用一个领头阶的耦合模型 κ -framework^[22]，将信号强度的测量转化为对耦合的测量。希格斯粒子与W和Z玻色子的耦合在ATLAS和CMS实验Run 1数据中已经观测到，Run 2数据进一步将其测量精度提高到5%^[12, 13]。在希格斯粒子与费米子的耦合方面，ATLAS和CMS实验基于Run 2数据通过ttH产生机制、 $H \rightarrow bb$ 和 $H \rightarrow \tau\tau$ 衰变道，确立了希格斯粒子与第三代费米子顶夸克、底夸克和陶轻子的汤川耦合^[23-28]。接下来一个重要的物理目标是研究希格斯粒子和第二代费米子的耦合。使用Run 2数据通过寻找 $H \rightarrow \mu\mu$ 衰变道，ATLAS和CMS实验发现了希格斯粒子和第二代费米子缪子耦合存在的迹象^[29, 30]，通过寻找VH, $H \rightarrow cc$ 过程给出希格斯粒子和第二代费米子粲夸克耦合的上限^[31-33]。以ATLAS实验使用Run 2数据对希格斯粒子耦合的联合测量为例，如图5所示，费米子质量与耦合成正比，玻色子质量和耦合的平方根成正比，与标准模型一致^[12]。

3.2 希格斯粒子的自耦合

双希格斯粒子(HH)产生过程可用于测量希格斯粒子的自耦合，对理解和认识希格斯势结构意义重大。寻找HH是目前LHC和未来高亮度LHC的重要研究方向。

在LHC上HH产生截面极小，在13 TeV质子-质子质心能量下约为34 fb，仅为单个希格斯粒子产生截面的千分之一。其中HH最重要的两个产生机制是胶子聚合和矢量玻色子聚合，它们产生过程的截面分别为31.05 fb^[34, 35]和

1.73 fb^[36]。希格斯粒子自耦合研究的灵敏度主要来自胶子聚合产生过程，而矢量玻色子聚合产生过程特别对希格斯粒子与矢量玻色子的四点耦合敏感。目前ATLAS和CMS实验寻找HH的主要衰变道有 $HH \rightarrow bbbb$ ， $HH \rightarrow bb\tau\tau$ 和 $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ (事例展示如图6所示^[37-39])，其他衰变道也有一定贡献。由于HH产生截面极小，所以在实验上一般要求其中一个希格斯粒子衰变成分支比最大的末态即一对底夸克 $H \rightarrow bb$ ，以确保一定的信号事例数量。因此底夸克喷注的鉴别对于多个HH分析都有重要作用。基于深度神经网络的新方法，底夸克喷注以及高动量的希格斯粒子(boosted Higgs)衰变为底夸克对的大半径喷注的鉴别在近几年有重要进展^[40, 41]。

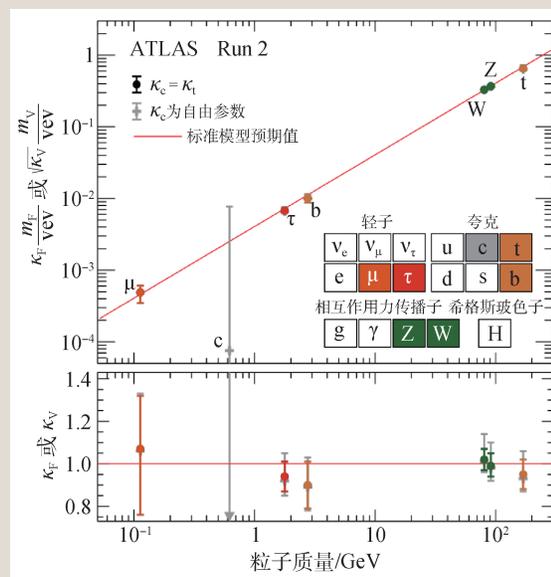


图5 ATLAS实验测量希格斯粒子的耦合^[12]。 m_F 和 m_V 分别为费米子和玻色子的质量， κ_F 和 κ_V 分别为费米子和玻色子与希格斯粒子的耦合，vev为希格斯场真空期望值

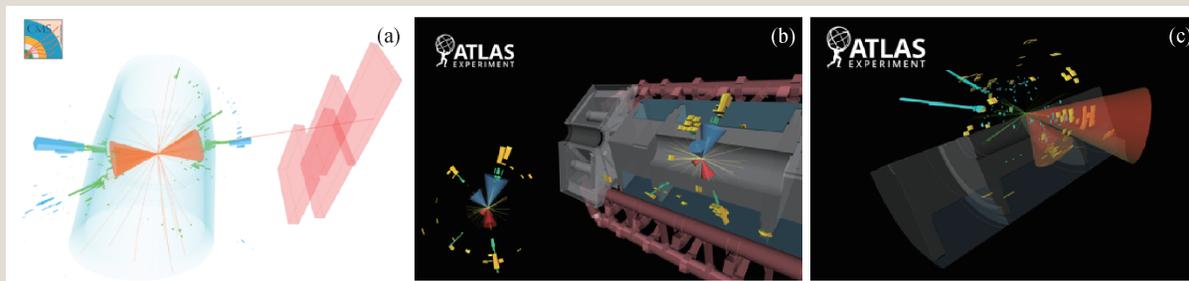


图6 $HH \rightarrow bbbb$ (a), $HH \rightarrow bb\tau\tau$ (b)和 $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ (c)候选事例展示^[37-39]

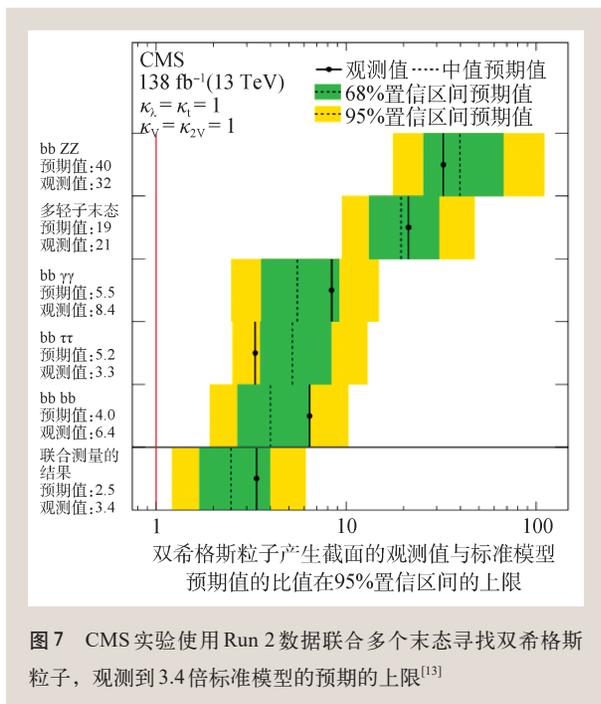


图7 显示了CMS实验使用Run 2数据联合多个末态寻找HH, 观测到信号截面的上限为3.4倍标准模型的预期值^[13]。使用单个希格斯粒子产生和衰变过程中电弱修正的影响, 与双希格斯粒子

参考文献

- [1] Englert F, Brout R. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 321
- [2] Higgs P W. Phys. Lett., 1964, 12: 132
- [3] Higgs P W. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 508
- [4] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 585
- [5] Higgs P W. Phys. Rev., 1966, 145: 1156
- [6] Kibble T W B. Phys. Rev., 1967, 155: 1554
- [7] Barate R *et al.* Phys. Lett. B, 2003, 565: 61
- [8] Aaltonen T, Abazov V M, Abbott B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 109: 071804
- [9] Evans L, Bryant P. J. Instrum., 2008, 3: 08001
- [10] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 1
- [11] CMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 30
- [12] ATLAS Collaboration. Nature, 2022, 607: 52
- [13] CMS Collaboration. Nature, 2022, 607: 60
- [14] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2018, 784: 345
- [15] CMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2020, 805: 135425
- [16] Landau L D. Dokl. Akad. Nauk Ser. Fiz., 1948, 60: 207
- [17] Yang C N. Phys. Rev., 1950, 77: 242
- [18] Collins J C, Soper D E. Phys. Rev. D, 1977, 16: 2219
- [19] CMS Collaboration. Eur. Phys. J. C, 2014, 74: 3076
- [20] ATLAS Collaboration. Eur. Phys. J. C, 2015, 75: 476
- [21] CMS Collaboration. Phys. Rev. D, 2015, 92: 012004
- [22] LHC Higgs Cross Section Working Group, Heinemeyer S *et al.*

产生过程联合起来, 可同时测量自耦合和与顶夸克的耦合^[42]。矢量玻色子聚合产生机制尤其对希格斯粒子和矢量玻色子的四点耦合敏感, 在假设标准模型预期的希格斯粒子耦合前提下, CMS实验以6.6倍标准偏差的统计显著性观测到希格斯粒子和矢量玻色子的四点耦合的存在^[13]。

4 总结

2012年ATLAS和CMS实验发现希格斯粒子, 开启了粒子物理领域希格斯粒子性质测量这一新篇章。之后十年以来, 两个实验对希格斯粒子性质开展了深入的研究, 其质量测量精度达到千分之一, 自旋和宇称量子数的检验结果与标准模型的预期 $J^P = 0^+$ 符合并开始研究宇称混合态的假设, 与W和Z玻色子以及第三代费米子耦合的测量精度达到5%—10%, 与第二代费米子缪子耦合的迹象已经观测到, 与粲夸克耦合的研究也取得突破性进展。在LHC第三阶段取数开始之际, 让我们期待在未来几年里希格斯物理领域的新发现和发现。

Report No.: CERN-2013-004. <https://doi.org/10.5170/CERN-2013-004>

- [23] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2018, 784: 173
- [24] CMS Collaboration. Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 231801
- [25] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2018, 786: 59
- [26] CMS Collaboration. Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 121801
- [27] ATLAS Collaboration. Phys. Rev. D, 2019, 99: 072001
- [28] CMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2018, 779: 283
- [29] CMS Collaboration. J. High Energy Phys., 2021, 01: 148
- [30] ATLAS Collaboration. Physics Letters B, 2021, 812: 135980
- [31] ATLAS Collaboration. Eur. Phys. J. C, 2022, 82: 717
- [32] CMS Collaboration. JHEP, 2020, 03: 131
- [33] CMS Collaboration. 2022, arXiv: 2205.05550
- [34] Grazzini M, Heinrich G, Jones S *et al.* JHEP, 2018, 05: 059
- [35] Baglio J, Campanario F, Glaus S *et al.* Phys. Rev. D, 2021, 103: 056002
- [36] Dreyer F A, Karlberg A. Phys. Rev. D, 2018, 98: 114016
- [37] CMS Collaboration. 2022, arXiv: 2205.06667
- [38] ATLAS Collaboration. 2022, arXiv: 2209.10910
- [39] ATLAS Collaboration. Phys. Rev. D, 2022, 106: 052001
- [40] ATLAS Collaboration. Eur. Phys. J. C, 2019, 79: 970
- [41] Qu H, Gouskos L. Phys. Rev. D, 2020, 101: 056019
- [42] ATLAS Collaboration. 2022, arXiv: 2211.01216



高品质真空互联系统

安捷伦清洁真空及泄漏检测全套方案

- 超高真空离子泵
- 吸气剂复合型离子泵
- 钛升华复合型离子泵
- 多通道离子泵控制器
- 超高真空分子泵
- 无油静音前级泵
- 无油氦质谱检漏仪
- 真空阀门及管件
- 多种型号真空计
- 最高 12 通道真空计控制器



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部

800 820 6778（固定电话拨打）

400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，
或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(点击“产品”选择“真空产品”)。