



LHC 上的重大进展——发现 Higgs 粒子

冒亚军*, 班勇, 李强*, 王大勇, 徐子骏, 郭威, 温一闻, 张照茹, 李晶

北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871

* 联系人: 冒亚军, E-mail: maoyj@pku.edu.cn; 李强, qliphy0@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-07-30; 接受日期: 2013-08-14

国家自然科学基金(批准号: 11061140514/A0502, 11205008)和国家基础科学人才培养基金(编号: J1103206)资助项目

摘要 2012 年 7 月, 欧洲核子中心 CERN 的大型强子对撞机(LHC)上的 CMS 与 ATLAS 实验组相继宣布发现了质量在 125 GeV 附近的新粒子. 其后, 基于更多的数据和更深入的分析, CERN 于 2013 年 3 月 14 日发表声明: “新的结果表明 CERN 发现的粒子是 Higgs 玻色子”. 在简要回顾标准模型 Higgs 的理论以及在 LHC 之前的寻找结果之后, 我们将结合近年来参与 CMS 实验及 Higgs 寻找的工作经历, 详细介绍 LHC 上 Higgs 玻色子的发现历程, 以及对 Higgs 质量、耦合、自旋、宇称等性质的测量现状.

关键词 粒子物理, 标准模型, Higgs 粒子, LHC, 实验寻找

PACS: 12.15.-y, 14.80.Bn, 13.85.-t, 29.85.Fj

doi: 10.1360/132013-350

1 引言

2010 年 3 月 30 日, 瑞士日内瓦 CERN(欧洲核子中心)的 LHC^[1](大型强子对撞机)首次实现创记录的质心能量为 7 TeV 的质子-质子对撞, 标志着高能粒子物理暨人类对微观世界探索的新时代已经到来. LHC 上的 ATLAS^[2,3] 实验和 CMS^[4,5] 实验规模庞大, 最重要的物理目标是寻找 Higgs 玻色子以及 TeV 能级超出标准模型的新物理. 中国自 20 世纪末便已参与 LHC 实验: 1998 年, 中国政府签约, 首次投资国际高能物理大科学装置, 参与 LHC 合作, 中国科学院高能物理研究所和北京大学承担其中 CMS 实验的首批硬件任务. 北大组负责承担缪子触发用的大面积雪崩型阻性板探测器(RPC)^[6–8] 研制和安装测试, 历时 8 年圆满完成任务, 目前正在参与 RPC 的升级

工作. 在数据分析方面, 北大 CMS 组数年来积极参与了 CMS 实验的物理分析特别是 Higgs Boson(希格斯玻色子)的寻找工作.

2012 年 7 月 4 日, 基于 2011 全年 7 TeV 和 2012 上半年 8 TeV 质子-质子对撞所采集的共约 10 fb^{-1} 的数据, LHC 上的 CMS 实验报告了 Higgs 寻找的最新进展, 以 4.9 倍标准差(σ)的置信度(Confidence Level)看到了质量为 $(125.3 \pm 0.6) \text{ GeV}$ 的新粒子^[9]. 同时 ATLAS 实验宣布以 5 倍标准差看到质量为 126.5 GeV 的新粒子^[10]. 其后, 基于更多的数据和更深入的分析, 在 2012 年日本京都举办的 HCP 会议和 2013 年 Moriond 会议上, 新的结果得到展示. 新粒子的敏感度被提高到约 7 倍标准差, 它的存在已经无可质疑, 并且两个实验所看到的新粒子其特性也与我们寻找了几十年的标准模型 Higgs 玻色子相符

引用格式: 冒亚军, 班勇, 李强, 等. LHC 上的重大进展——发现 Higgs 粒子. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1216–1235

Mao Y J, Ban Y, Li Q, et al. Great progress at the LHC: Discovery of the Higgs boson (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1216–1235, doi: 10.1360/132013-350

合¹⁾. CERN 于 2013 年 3 月 14 日发表声明: 新的结果表明 CERN 发现的粒子是 Higgs 玻色子²⁾. 当然, 由于事例数还太少, 要想确切证实这个 Higgs 玻色子就是标准模型的 Higgs 还需要相当一段时间, 需要继续逐一检验标准模型对 Higgs 玻色子的自旋宇称、衰变分支比、与费米子和玻色子耦合强度等所给出的预言^[11,12]. LHC 现在已经进入长期停机状态, 在必要的维护和升级后, 预计将在 2015 年在更高能 (13–14 TeV) 和高亮度的情况下重新对撞取数³⁾, 相信届时会给予我们更加丰富的物理结果.

Higgs 为何如此备受瞩目? Higgs 玻色子提出于 1964 年^[13–16], 其动机是为了在非阿贝尔规范理论中通过对称性自发破缺恰当地赋予其他基本粒子以质量. 它是粒子物理标准模型 (the Standard Model) 长期缺失验证的关键一环, 而后者自 70 年代建立以来, 已经成为人类认知亚原子核尺度微观世界的成功理论, 相关工作多次获得诺贝尔物理学奖, 如 1979 年授予弱电相互作用统一理论^[17–19], 1999 年授予弱电理论的量子结构^[20], 等等. 因此, 它被很多人称为上帝粒子 (God Particle), 其重要性可见一斑.

在标准模型中, Higgs 玻色子自旋为 0, 宇称为正, 与费米子和玻色子都有耦合. 其中 Higgs 与费米子的耦合正比于后者的质量, 因而主要与第三代夸克相互作用; Higgs 与 W, Z 规范玻色子耦合正比于后者质量平方; Higgs 与光子和胶子的耦合则都是通过圈图诱导产生. Higgs 的质量 (M_H) 是标准模型中对称性部分唯一的未知参数. 理论上从么正性、微扰性以及稳定性等方面的考虑, 要求 $M_H \lesssim \mathcal{O}(1)$ TeV^[21,22], 否则即使 Higgs 不存在, 其他 TeV 能级的新物理也会出现. 值得一提的是在很多新物理模型中, 比如超对称 (SUSY)^[23] 和两个 Higgs 二重态模型 (2HDM)^[24] 中, 也包含 Higgs 部分, 通常具有多个 Higgs 粒子, 其中最轻的那个可以是类似标准模型的. 在本文, 我们将主要讨论标准模型 Higgs 玻色子的寻找.

对 Higgs 玻色子的寻找旷日持久, 经历了数代大型对撞机 (CERN 的 LEP^[25], 费米实验室的

Tevatron^[26] 及 CERN 的 LHC) 的探寻, 以及全世界众多实验和理论物理学家的不懈努力. 其最终发现及其性质的精确测量具有极为重大的意义, 一方面可以最终完善验证粒子物理的标准模型, 展现人类理性逻辑思辨的光辉; 另一方面, 这也意味着最微观尺度物理学新时代的到来, 基础物理学将迎来新的高潮.

在直接寻找 Higgs 玻色子之前, Higgs 质量由弱电精确测量数据得到间接限制^[27], 如图 1 所示. 由此可得到 Higgs 质量的单边 95% 置信度上限 (对应于 $\Delta\chi^2 = 2.7$): $M_H < 152$ GeV⁴⁾. 而左边纵向的黄色带子对应于 LEP 的直接寻找排除区域 (< 114 GeV). 右边的黄色带子对应于 Tevatron 2011 年 7 月的 95% 置信度排除区域即 $[156, 177]$ GeV^[28], 以及 2011 年冬季 LHC CMS 和 ATLAS 实验组所给出的 95% 置信度排除区域: $[127, 600]$ GeV^[29,30].

由图 1 可见, 截至 2011 年冬, 标准模型 Higgs 可能存在的质量范围已被限制到了一个很窄的范围, 也即 $[114, 127]$ GeV (注意这并非意味重 Higgs 的寻找分析已经停止. 事实上, 在更多的数据下, 这些分析进一步地限制了类似标准模型的 Higgs 的可能产生截面, 从而可以约束一些重要的超出标准模型的新物理如 SUSY 和 2HDM). 然而, 如图 2 所示, 就是在这段区域内, 在 119–125 GeV 附近, 实验看到了超过 2 标准偏差的信号超出^[30]. 2012 年夏天 ICHEP 会议的结果 (图 3) 进一步支持了这个发现, 总的敏感度在 125 GeV 附近达到了 4.9 个标准偏差^[9,31]. CMS 最新的结果 (2013 Moriond 会议结果, 见表 1)^[32] 和 ATLAS 类似的结果 (见表 2)⁵⁾也使得这个结果更加坚实.

在 LHC 上寻找 Higgs 的复杂性很大, 因为我们事先并不知道 Higgs 质量的确切值, 而随质量的变化, Higgs 的产生与衰变方式多样, 这会导致我们所寻找的信号事例的特性很不同, 因而必须分类区别处理.

在 LHC 上, Higgs 玻色子的产生机制主要包括如下方面 (参看例如文献 [21,22]).

1) 例如, 新粒子衰变到规范玻色子对, 意味着它是玻色子; 新粒子衰变到双光子, 表明其自旋不是 1^[9]

2) <http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/03/new-results-indicate-particle-discovered-cern-higgs-boson>

3) James Olsen, “CMS Future”, Snowmass: Seattle Energy Frontier Workshop, 1 Jul 2013

4) 这只是间接限制. 对于 LHC 的直接寻找, 将不局限于 152 GeV 以下的 Higgs 玻色子

5) <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsCONFnotes>

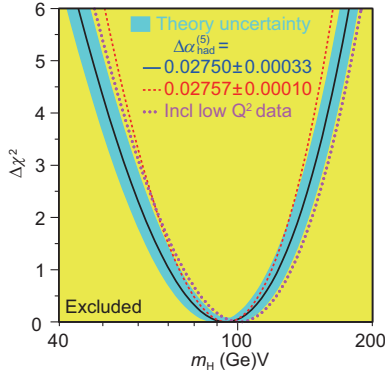


图 1 对于标准模型理论, 拟合电弱精确测量实验数据所得的 $\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi_{min}^2$ 与 M_H 的关系图. 实线包含所有大转移动量实验结果, 蓝色误差带来自理论误差. 纵向黄色带是 LEP, Tevatron 和 LHC 直接寻找的 95% 置信度的排除区域. 虚线对应于使用了不同的 $\Delta\alpha_{had}^{(5)}(M_Z^2)$ 值的情况. 点线则包含了小转移动量实验的结果 [27]

Figure 1 The $\Delta\chi^2$ curves as functions of the Higgs mass in the Standard Model: The solid curve is derived from high- Q^2 precision electroweak measurement, with blue band from theory uncertainty; the dashed curve corresponds to the case of different $\Delta\alpha_{had}^{(5)}(M_Z^2)$ exploited; the dotted curve involves in additional low- Q^2 measurement. The vertical yellow band represents the SM Higgs mass exclusion region from direct search at the LEP, Tevatron and LHC experiments [27].

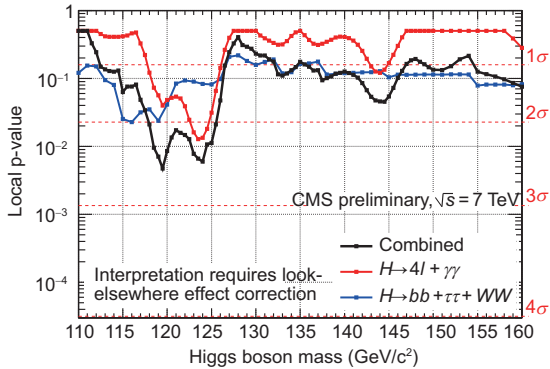


图 2 CMS 2011 年冬季寻找标准模型 Higgs 的结果 [30]: 在 [119, 125] GeV 的 Higgs 质量区域附近, 敏感度普遍超过了 2 个标准偏差. 左纵轴的 Local p-value 表示的是观测到的信号是由本底涨落得到的概率, 其对应的标准偏差大小在右纵轴给出

Figure 2 The SM Higgs search results from the CMS in winter, 2011 [30]: There is a broad excess over 2σ observed near the Higgs mass region [119, 125] GeV. The local p-values at the left vertical axis is an estimated probability of upward background fluctuation as high or higher than the excesses observed in data, the corresponding standard deviation value can be read from the right vertical axis.

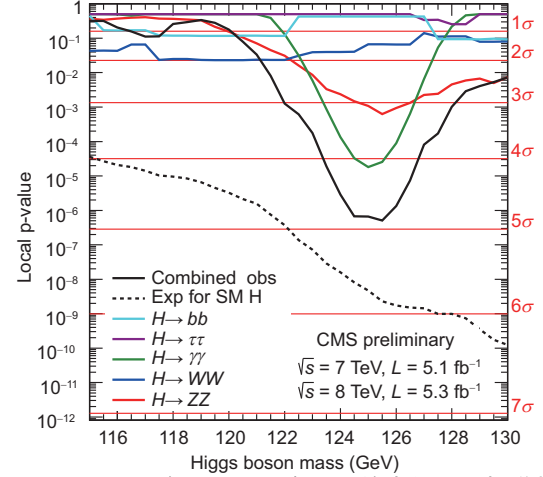


图 3 CMS 2012 年 ICHEP 会议所给出的寻找标准模型 Higgs 的结果 [9,31]. 当 Higgs 质量在 125 GeV 附近, 总的观测敏感度达到了 4.9 个标准偏差. $\gamma\gamma$, ZZ 和 WW 是最敏感的三个道

Figure 3 The SM Higgs search results from the CMS for 2012 ICHEP conference [9,31]. An excess of events above the expected SM background is observed with a local significance of 4.9σ for a Higgs boson mass hypothesis of around 125 GeV. $\gamma\gamma$, ZZ and WW are the three most sensitive channels.

(1) 胶子融合 (GF) 过程, $gg \rightarrow H$, 由于 LHC 是质子对撞, 且胶子亮度很大, 因而该过程是 LHC 上 Higgs 粒子的最主要的产生方式.

(2) 规范玻色子融合 (VBF) 过程, $qq \rightarrow qqV^*V^* \rightarrow qqH$, 该过程产生截面仅次于 GF 过程, 但是因为其伴随产生的两个喷注 (Jet) 分得较开并且两者之间的 QCD 辐射较低, 因而可以有效压低 QCD 本底, 使得该道的敏感度较高并且可以用来精确测量 Higgs 和其他粒子的耦合强度 [46–48].

(3) 规范玻色子协同产生 (VH) 过程, $q\bar{q} \rightarrow V^* \rightarrow HV$ ($V = W^\pm, Z^0$), 该过程初态为正反夸克对, 在 Tevatron 上是最重要的产生过程. 在 LHC 上, 尽管产生截面不如 GF 和 VBF 过程, 其伴随产生的规范玻色子却可以被用来标记信号过程从而压低本底.

(4) 顶夸克协同产生 (ttH) 过程, $pp \rightarrow t\bar{t}H$, 该过程对于测量 Higgs 与顶/底夸克的耦合极为重要.

Higgs 的衰变方式也是多种的, 且分支比依赖于其质量. LHC 上对 Higgs 的寻找是通过其玻色子衰变及费米子衰变, 具体如下:

1) $H \rightarrow \gamma\gamma$,

表 1 CMS 实验在 Moriond2013 会议上所给出的通过不同寻找道寻找标准模型 Higgs 的预期及观测的灵敏度及信号强度

Table 1 The significance of the median expected and observed event excesses, and the signal strength, in individual decay modes for a SM Higgs boson hypothesis, from the CMS results for the Moriond 2013 conference

寻找道	预期值 ^[32] @ 125.7 GeV	观测值 ^[32] @ 125.7 GeV	信号强度 μ $\mu \equiv \sigma/\sigma_{SM}@125.7\text{ GeV}$
$H \rightarrow ZZ$	7.1σ	6.7σ	0.92 ± 0.28 ^[32,33]
$H \rightarrow \gamma\gamma$	3.9σ	3.2σ	0.77 ± 0.27 ^[32,34]
$H \rightarrow W^+W^-$	5.3σ	3.9σ	0.68 ± 0.20 ^[32,35]
$H \rightarrow b\bar{b}$	2.2σ	2.0σ	1.15 ± 0.62 ^[32,36]
$H \rightarrow \tau\tau$	2.6σ	2.8σ	1.10 ± 0.41 ^[32,37]
μ 综合值 = 0.80 ± 0.14 @ 125.7 GeV ^[32]			

表 2 ATLAS 实验在 Moriond2013 会议上所给出的通过不同寻找道寻找标准模型 Higgs 的预期及观测的灵敏度及信号强度

Table 2 The significance of the median expected and observed event excesses, and the signal strength, in individual decay modes for a SM Higgs boson hypothesis, from the ATLAS results for the Moriond 2013 conference

寻找道	预期值	观测值	信号强度 @ 125.5 GeV ^[38]
$H \rightarrow ZZ$	4.4σ @ 124.3 GeV ^[39]	6.6σ @ 124.3 GeV ^[39]	1.6 ± 0.3
$H \rightarrow \gamma\gamma$	4.1σ @ 126.5 GeV ^[40]	7.4σ @ 126.5 GeV ^[40]	1.5 ± 0.4
$H \rightarrow W^+W^-$	3.7σ @ 125 GeV ^[41]	3.8σ @ 125 GeV ^[41]	1.0 ± 0.3
$H \rightarrow b\bar{b}$	no excess	no excess ^[42,43]	-0.4 ± 1.0
$H \rightarrow \tau\tau$	1.1σ @ 125 GeV ^[44,45]	1.7σ @ 125 GeV ^[44,45]	0.8 ± 0.7
μ 综合值 = 1.30 ± 0.20 @ 125.5 GeV ^[38]			

- 2) $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, 2l2\nu, 2l2q,$
- 3) $H \rightarrow W^+W^- \rightarrow 2l2\nu, lv2q,$
- 4) $H \rightarrow b\bar{b},$
- 5) $H \rightarrow \tau^+\tau^-,$
- 6) $H \rightarrow \mu^+\mu^-, Z\gamma.$

对于重 Higgs, 其到规范玻色子的衰变分支比最大, 实验分析也主要依赖于这些模式. 对轻 Higgs ($M_H < 135\text{ GeV}$), 其到 $b\bar{b}$ 的分支比是最大的, 然而对应的 QCD 本底也更大, 所以通过 GF 过程寻找比较困难, 通常是利用 VH 过程, 因为其中伴随产生的规范玻色子 V 的衰变产物可以作为标记压低本底; Higgs 到规范玻色子对的衰变分支比其次, 但是末态相对较小, 特别是 ZZ 纯轻衰变道, 其本底包含 4 个轻子因而非常干净并且对 Higgs 质量的测量精度高; 而 Higgs 到 $\gamma\gamma$ 分支比尽管很小, 只在千分之几量级, 但是以往的研究表明, 它对 120 GeV 附近的 Higgs 非常敏感^[2-5]; Higgs 到 $\tau\tau$ 的分支比也不小, 但依赖于实验对 τ 的鉴别能力^[2-5]. $H \rightarrow \mu^+\mu^-, Z\gamma$ ^[49,50] 分支比小, 目前对标准模型 Higgs 尚不敏感.

对 Higgs 的寻找强烈依赖于对其产生截面和衰变分支比的精确计算及模拟, 为此, CERN ATLAS 和 CMS 实验组与理论界组成了 LHC Higgs 工作组 (LHC Higgs Working Group)^[52-54], 多方协作给出了推荐的结果, 例如图 4 和 5 所示.

基于这些理论知识以及已有的可行性模拟研究, LHC 上 CMS 和 ATLAS 实验组所做的 Higgs 寻找工作涵盖了质量范围 [110, 1000] GeV 的 Higgs, 并且针对不同质量段, 不同产生和衰变模式, 分化为多个不同的分析. 对每一个分析, 实验做了进一步的分类优化, 以最大程度地提高灵敏度. 表 3 和 4^[55,56] 分别给出 CMS 实验对轻质量和重质量区域 Higgs 寻找所涉及的各个具体分析. 注意在 CMS 综合多个分析道测

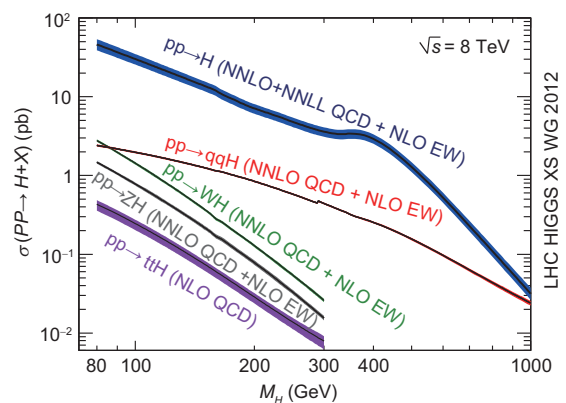


图 4 8 TeV LHC 上标准模型 Higgs 的产生截面^[52]

Figure 4 The SM Higgs production cross sections at the 8 TeV LHC ^[52].

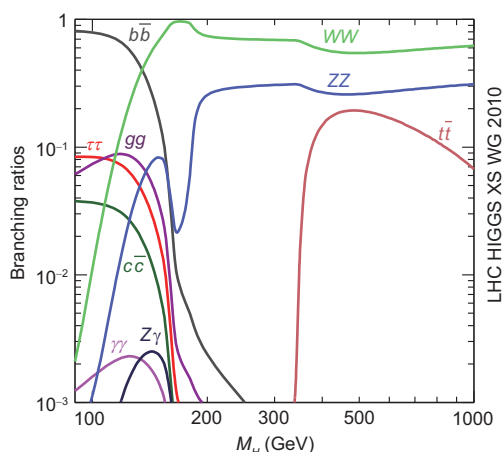


图 5 标准模型 Higgs 的衰变分支比 [52]

Figure 5 The decay branch ratio of the SM Higgs [52].

表 3 CMS 寻找 125 GeV 附近的轻的 SM Higgs 所采用的分析道 [55]. 在 CMS 综合多个分析道测量 Higgs 质量、耦合等性质的最新研究 [32] 中, 还加入了比如 VH 标记的 $\gamma\gamma$, WW 和 $\tau\tau$ 道, $t\bar{t}H$ 标记的 $b\bar{b}$ 道, 并且 $ZZ \rightarrow 4l$ 道被分为喷注数目大于等于 2 和小于 2 两类, 等等

Table 3 The production and decay channels exploited in the CMS searches for a light Higgs with a mass near 125 GeV [55]. Note in the updated CMS Higgs combination study on mass and coupling measurement [32], more channels are included, e.g. VH tagged $\gamma\gamma$, WW and $\tau\tau$ channels, $t\bar{t}H$ tagged $b\bar{b}$ channel, moreover, $ZZ \rightarrow 4l$ channel has been divided into two categories according to the jet number smaller than 2 or not

H 衰变模式	H 产生类	m_H 区域 (GeV)	m_H 测量精度
$\gamma\gamma$	无标记 (untagged)	110–150	1%–2%
	VBF- 标记	110–150	1%–2%
$ZZ \rightarrow 4l$	遍举 (inclusive)	110–180	1%–2%
$WW \rightarrow l\nu l\nu$	0 or 1 jet	110–160	20%
	VBF- 标记	110–160	20%
$\tau\tau$	0 or 1 jet	110–145	20%
	VBF- 标记	110–145	20%
$b\bar{b}$	VH- 标记	110–135	10%

量 Higgs 质量、耦合等性质的最新研究 [32] 中, 相比表 3, 还加入了比如 VH 标记的 $\gamma\gamma$, WW 和 $\tau\tau$ 道, $t\bar{t}H$ 标记的 $b\bar{b}$ 道, 并且 $ZZ \rightarrow 4l$ 道被分为喷注数目大于等于 2 和小于 2 两类, 等等.

6) CMS 最近公开了 $t\bar{t}H$ 产生的 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的分析结果[62], 但该分析对 125 GeV 附近的标准模型 Higgs 不敏感, 也没有纳入 CMS 的综合各道的结果中, 所以我们在本文并不详述

表 4 CMS 通过玻色子衰变信号寻找质量 145 GeV 以上的 SM Higgs 所采用的分析道 [56]

Table 4 The production and decay channels exploited in the CMS searches for a Higgs with a mass above 145 GeV [56]

H 衰变模式	H 产生类	m_H 区域 (GeV)	m_H 测量精度
$WW \rightarrow l\nu l\nu$	0/1- 喷注	145–600	20%
$WW \rightarrow l\nu l\nu$	VBF 标记	145–600	20%
$WW \rightarrow l\nu qq$	无标记	180–600	5%–15%
$ZZ \rightarrow 4l (l = e, \mu)$	遍举	145–1000	1%–2%
$ZZ \rightarrow 2l2\tau (l = e, \mu)$	遍举	200–1000	10%–15%
$ZZ \rightarrow 2l2q$	遍举	200–600	3%
$ZZ \rightarrow 2l2\nu$	无标记	200–1000	7%
$ZZ \rightarrow 2l2\nu$	VBF- 标记	200–1000	7%

在下面, 我们将详细介绍 Higgs 玻色子和费米子衰变道的分析结果. 其中, 北大高能物理实验组 CMS 团队近几年主要工作于 $WW \rightarrow l\nu + 2js$ [56–58] 以及 $l\nu + 1j$ [59] 寻找道. 后者即 $l\nu j$ 寻找道主要针对质量在 600 GeV 以上的重 Higgs, 此时 Higgs 衰变出来的 W 动量很大, 因而 W 衰变出来的两个夸克以很高几率被融合为一个胖喷注 (Fat Jet). 这个分析利用到了国际上近期兴起的喷注子结构 (Jet substructure) 技术[60] 以有效压低 QCD 本底, 这是该技术第一次在实验上被应用到 Higgs 的寻找中. 此外, 北大组在 2010–2011 年前向中心双喷注的分析工作 [61], 对于 VBF 双喷注的测量也有重要意义, 我们也将予以介绍.

2 Higgs 玻色子衰变道的分析结果

2.1 CMS $H \rightarrow \gamma\gamma$

尽管这一道的分支比很小 (对于质量 125 GeV 附近的标准模型 Higgs, 在 0.1% 量级), 但是末态很干净, 且能以 1%–2% 的高精度重建 Higgs 质量. 这一道主要的本底是光子对的直接产生, 以及喷注被误判为光子的污染. 其中后者可以通过改善光子鉴别得到压低. 为了提高敏感度, 事例被分为若干类, 按产生过程分为无标记, VBF 和 VH 标记几类⁶⁾.

CMS 双光子道分析采用的是通过双光子触发的 2011 年 5.1 fb^{-1} 和 2012 年 19.6 fb^{-1} 数据. 本底的估计完全由数据拟合外推得到. 信号模拟采用的是 POWHEG^[64,65] 产生子, 并接口到 PYTHIA6^[66], 随后过了 CMS 的探测器模拟. 此外, GF 产生过程的 Higgs 横动量谱还参照理论上更精确的 HqT 程序^[67] 做了调整.

CMS 双光子道分析有两个独立的方法: (1) mass-fit-MVA 方法, 对事例分类和光子鉴别都利用了多变量分析 (Multi-Variate-Analysis 或 MVA) 技术, 而信号大小是通过拟合本底的双光子质量 $m_{\gamma\gamma}$ 谱而抽取出来; (2) cut-based 方法, 对事例分类和光子鉴别都只是利用了对若干变量的截断, 信号提取方法则同前. 其中方法 (1) 的结果是 CMS 的推荐.

在其他条件相同的情形, 达到 5σ 所需亮度与双光子的质量分辨率的平方成反比^[63], 后者由单光子能量分辨率和两个光子夹角的分辨率决定. 在 CMS 探测器中, 光子的重建由电磁量能器 (ECAL) 中的能量沉积及在此基础上集群得到的 Supercluster 得到. 为了与喷注伪装的光子区分开来, 分析中光子的鉴别采用了 MVA 方法, 采用的变量包括簇射的拓扑变量, 光子孤立度变量, 能量密度, supercluster 的位置变量等^[34].

光子的能量测量由 ECAL 晶体里得到的原始能量开始. 为了达到最好的光子能量分辨率, 除了依靠探测器本身的刻度, CMS 还采用了多变量回归算法 (MVA Regression) 来估计重建的光子能量的刻度系数, 所考虑的多变量包括 supercluster 的位置, 簇射的形状变量等等, 在探测器端部区域, 还考虑了 preshower 探测器记录的能量与 ECAL 记录的 supercluster 能量比值^[34]. 两个光子之间角度的分辨率则是由强相互作用顶点的位置重建的分辨率决定的. 而相互作用顶点的挑选则同样利用了 MVA 方法, 涉及的变量包括双光子系统的横动量和事例中的径迹的变量. 由于一半以上的光子会转化为电子, 在这种情况下, 电子的轨道信息也将被用于确定顶点^[34].

在 CMS 双光子道分析中, 事例共被分为 14 类, 分类基于运动学变量, 双光子分辨率和光子鉴别的

MVA 输出: 经过初选条件包括 $P_T^{\gamma}(1) > m_{\gamma\gamma}/3$, $P_T^{\gamma}(2) > m_{\gamma\gamma}/4$ 之后, 首先, 通过了 μ 轻子标记的事例被挑选出来, 其次是电子标记、双喷注标记、以及大丢失横动量标记的事例, 最后剩下的是无标记的事例. 无标记的事例被进一步用 MVA 方法分成四组, 分组主要根据两个光子是否在端部和在 3×3 的晶体区域中能量的比率 (即所谓 R_9 值, 越高的话代表光子转化电子的概率越低)^[34]. 在所有 14 类情况中, 本底都是从数据得到, 通过多项式等函数拟合.

CMS 利用 2011+2012 年全部数据通过双光子道分析寻找 Higgs 的结果如下: (1) mass-fit-MVA 方法 (见图 6), 在 125 GeV 处观测到最大的信号敏感度 3.2σ , 预期值为 4.2σ , 信号强度是 $\mu = 0.78^{+0.287}_{-0.26}$; (2) Cut-based 方法, 在 124.5 GeV 处观测 (预期) 的敏感度 $3.9(3.5)\sigma$, 信号强度是 $\mu = 1.11^{+0.32}_{-0.30}$. 两个分析的自治度也已被检验, 发现在 1.5σ 水平内匹配^[34].

2.2 ATLAS $H \rightarrow \gamma\gamma$ ^[40,68]

ATLAS 双光子道分析工作^[40] 利用了 ATLAS 记录的 2011 年 4.8 fb^{-1} 和 2012 年 20.7 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范围为 $[110, 150] \text{ GeV}$. 与 CMS 类似, 根据

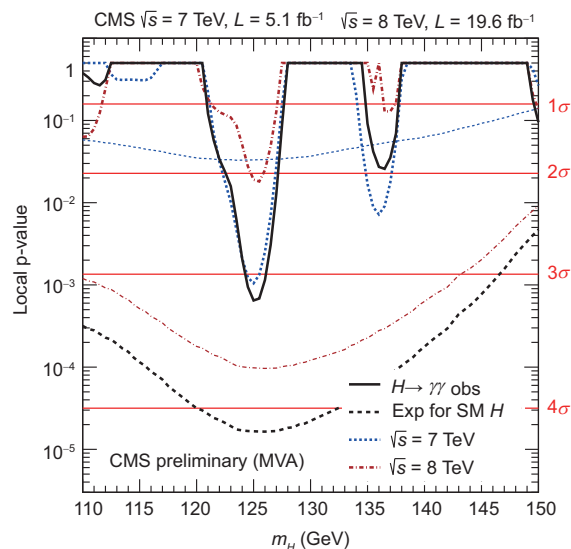


图 6 CMS 利用 2011+2012 全部数据通过 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 道寻找 Higgs 的敏感度结果

Figure 6 The Higgs search results via $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel, with the full 2011+2012 data recorded by the CMS.

7) 这里的结果与表 1 中略有差别, 是因为后者是多个分析道综合的拟合结果

Higgs 产生方式的不同、是否存在转化为电子对的光子、快度 (η) 区域不同等, 实验数据被分为 14 个不同的类分别进行分析以提高敏感度. 在初选条件和分类的细节上, 与 CMS 有所不同 [40, 68]. 此外, 对本底的估计也是从数据全局拟合得到, 不同分类采用不同的拟合函数, 函数形式则根据蒙特卡罗 (MC) 模拟的样本来确定. 结合 $\sqrt{s}=7$ TeV 和 $\sqrt{s}=8$ TeV 时的所有分类的数据样本, 对于标准模型 Higgs, 最大的信号敏感度在 126.5 GeV 处, 其观测 (预期) 值为 $7.4(4.1)\sigma$. 如果让信号强度浮动, 对双光子不变质量的拟合得到的 Higgs 质量最佳结果为 $m_H = 126.8 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})$ GeV, 在这一质量的信号强度为 $\mu = 1.65 \pm 0.24(\text{stat})^{+0.25}_{-0.18}(\text{syst})$ [40]. 值得一提的是, ATLAS 给出了单独 VBF 类事例的贡献, 其观测敏感度也已接近 3σ [40].

2.3 CMS $H \rightarrow ZZ$

2.3.1 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, 2l2\tau, (l = e, \mu)$ [33, 69–71]

这个道一向被认为是“黄金道”. 尽管分支比相对较低, Higgs 衰变产物的所有运动学量都能被重建, 由末态 4 个轻子可以很好得到角度信息, 包括两个 Z 衰变平面的夹角. 由于 Higgs 质量低于 $2M_Z$, 所以 Higgs 衰变出来的两个 Z 会有一个或两个不在质量壳上. 该道其信号特征是有两对同味道, 电荷相反的轻子 (该分析也考虑了末态辐射光子的事例, 以尽可能地增大信号效率). 本底主要包括标准模型的 ZZ 过程; 单个 Z 与重味夸克对的产生, 其中重味夸克衰变产生出轻子; 以及喷注被误判为轻子的污染. 这个分析利用了 CMS 记录的 2011 年的 5.1 fb^{-1} 和 2012 年的 19.6 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范围为 [110, 1000] GeV. 分析将有 0/1 喷注的事例和最少有两个喷注的事例划分为不同的类别 [33], 后者用来优化 VBF Higgs 信号. 分析也采用了如下一些区分量来提高敏感度: (1) MELA (Matrix Element Likelihood Approach) 方法构造的 K_D [9], 是通过矩阵元的理论解析或数值结果构造的区分信号与本底的运动学区分量; (2) 利用最硬的两个喷注的赝快度与不变质量构造的 V_D , 用于区分出 VBF 类型的事例; 利用 4 轻子系统的 p_T/m_{4l} 来区分 GF 事例与 VBF, VH 事例.

相应的分析结果有 3 组: (1) 1 维结果, 即, 只考虑 m_{4l} 区分; (2) 2 维结果, 考虑 m_{4l} 与 K_D ; (3) 3 维结果, 考虑 m_{4l} 与 K_D 以及 V_D 或 p_T/m_{4l} . 其中 3 维结果是推荐值, 其他两组主要是用来检验.

通过最终挑选条件后的 4 轻子不变质量的分布在图 7 中显示. 可以清楚看到 M_Z 处 $Z \rightarrow 4l$ 的峰. 此外, 在 126 GeV 附近处的共振峰很明显 [33]. 3 维分析给出在 125.8 GeV 处得到最大观测信号敏感度 6.7σ , 预期值为 7.2σ . 对应的信号强度为 $0.91^{+0.30}_{-0.24}$. 图 7 中则显示 Higgs 截面的排除曲线, 其中虚线为由纯本底假设得到的预期值, 绿色和黄色带分别对应预期的 1σ 和 2σ 误差, 实线则为观测值. 实线的 y 轴值在 1 以下则代表标准模型 Higgs 的假设被否定, 可以看到 [130, 827] GeV 区域的标准模型 Higgs 已被排除.

2.3.2 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l2q$ [56, 72]

这一道在所有的 $H \rightarrow ZZ$ 道中具有最高的分支比, 却也具有最大的本底 $Z+\text{jets}$. 该分析目前只利用了 CMS2011 年记录的 5.1 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范围为 [130, 600] GeV. 对于重 Higgs, 还特别考虑了理论上新近提出的复极点方案 (Complex-pole Scheme) [73–75] 及信号本底干涉 [76–78] 带来的信

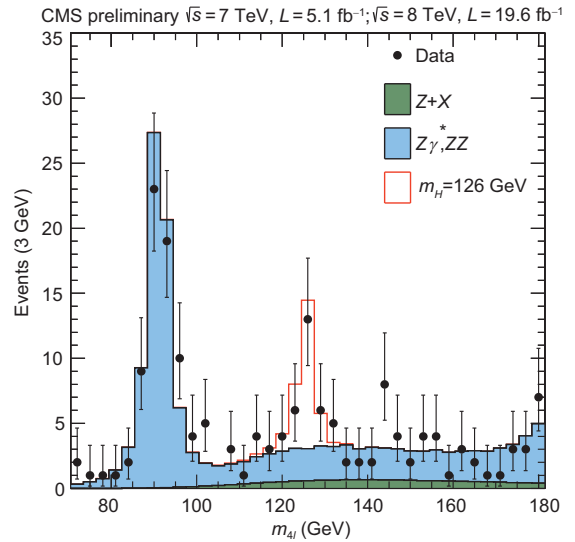


图 7 $4e, 4\mu, 2e2\mu$ 道的四轻子的质量分布

Figure 7 The invariant mass distributions of the 4-lepton system, for the $4e, 4\mu, 2e2\mu$ channels.

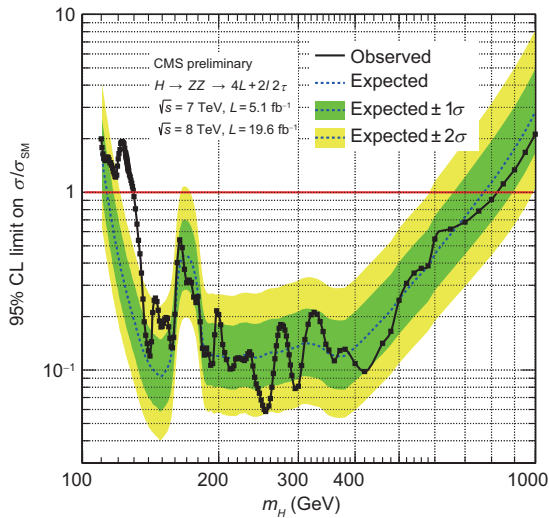


图 8 CMS 利用 2011+2012 记录的数据通过 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, 2l2\tau$, ($l = e, \mu$) 分析道所给出的 95% 置信度水平上的 Higgs 信号强度的上限与 Higgs 质量的关系. 其中实线则为观测值, 虚线为由纯本底假设得到的预期值, 绿色和黄色带分别对应预期曲线的 68% (1σ) 和 95% (2σ) 水平的误差

Figure 8 The 95% CL upper limits on the signal strength parameter for the SM Higgs boson hypothesis as a function of the Higgs boson mass, via $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l, 2l2\tau$, ($l = e, \mu$) analysis with the full 2011+2012 data recorded by the CMS. The observed values as a function of mass are shown by the solid line. The dashed line indicates the expected median of results for the background-only hypothesis, while the green and yellow bands indicate the ranges that are expected to contain 68% and 95% of all observed excursions from the median, respectively.

号修正⁸⁾.

对比于本底中喷注主要来自胶子和轻夸克, 信号中强子衰变的 Z 产生的两个夸克, 却有相当部分是重的 b 夸克. 这一特点可以用于重味标记算法将信号相对本底增强: 根据挑选出的 b 标记喷注的个数将事例分为 $0b$, $1b$ 和 $2b$ 标记类型. 在每一类中都利用了相关的区分量来进行优化. 例如, $0b$ 标记的事例中本底喷注来自胶子的居多, 而信号主要是轻夸克, 利用夸克-胶子区分量发现可以压低本底近 40% 而不影响信号.

此外, 本底还被 $70 \text{ GeV} < M_{ll} < 110 \text{ GeV}$ 和 $75 \text{ GeV} < M_{jj} < 105 \text{ GeV}$ 的选择条件压低. 本底的估计通过 M_{jj} 的非信号区 (side-band) 的数据修正得到. 最

8) 同样的修正也被应用到 CMS 所有重 Higgs 寻找的分析中, 下面不再赘述

后的分析结果在 95% 置信度上排除了 $[350, 400] \text{ GeV}$ 左右的标准模型 Higgs, 对其他区域的 Higgs 可能的截面也给出了限制^[56, 72].

2.3.3 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l2\nu$ [56, 79, 80]

该分析利用了 CMS2011 年记录的 5.0 fb^{-1} 数据和 2012 年的 19.6 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范围为 $[200, 1000] \text{ GeV}$. 该道的信号特征是具有一对鉴别很好的相同味道的轻子 (e^+e^- 或 $\mu^+\mu^-$), 以及大的横动量丢失 E_T^{miss} . 对于轻 Higgs, Z +jets 和 $t\bar{t}$ 是主要的本底; 对于重 Higgs ($> 400 \text{ GeV}$), ZZ 和 WZ 是主要的本底. Z +jets 的大小是从 γ +jets 控制区的数据估算得到; ZZ 和 WZ 本底则从模拟得到; $t\bar{t}$ 等不含共振双轻子的本底主要由异味的 $e\mu$ 控制区域得到. 本分析还考虑了 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 对信号及本底的影响.

对于这一道利用的分析方法是基于 E_T^{miss} 和双轻子横质量 m_T 的挑选. 事例分为 VBF 和非 VBF 类, 对非 VBF, 又按有无喷注继续分类. 此外, 为了压低 Z +jets 的本底, 要求把 E_T^{miss} 和其相邻的 jet 的方位角小于 0.5° 的事例排除; 为了排除轻子被误判的事例, $E_T^{\text{miss}} > 60 \text{ GeV}$ 和 $\Delta\phi(l, E_T^{\text{miss}}) < 0.2$ 的事例被排除; 为了压低 top 夸克的本底, 要求含有 $p_T > 30 \text{ GeV}$ 和 $|\eta| < 2.4$ 的喷注的事例被排除; 为了排除 WZ 全部衰变到轻子的本底, 任何具有 $p_T > 10 \text{ GeV}$ 并且通过了挑选要求的第三个轻子的事例被排除.

最后的分析结果在 95% 置信度上排除了 $[248, 930] \text{ GeV}$ 区域的标准模型 Higgs, 对某些简单非标准模型的 Higgs 也做了初步的限制.

2.4 ATLAS $H \rightarrow ZZ$ [39, 81–84]

ATLAS $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 分析利用了 ATLAS 2011 年记录的 4.6 fb^{-1} 数据和 2012 年的 20.7 fb^{-1} 数据. 事例也被分为 VBF, VH 和 GF 类型, 但分类方式和选择条件和 CMS 有所不同, 例如没有使用 MELA. 最终, 在 124.3 GeV 处得到观测 (预期) 信号敏感度置信度 $6.6(4.4)\sigma$. 对应的信号强度为 $1.7^{+0.5}_{-0.4}$ [39].

ATLAS $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l2q$ 分析目前只利用了 ATLAS 2011 年记录的 4.7 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范

围为 $[120, 180]$ GeV 和 $[200, 600]$ GeV. 事例被分为两类: $0/1b$, 和 $2b$ 标记类型. 最后的分析结果在 95% 置信度上排除了 $[300, 310]$ GeV 和 $[360, 400]$ GeV 区域的标准模型 Higgs, 对其他区域的 Higgs 可能的截面也给出了限制^[82,83].

ATLAS $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2l2\nu$ 分析只利用了 ATLAS 2011 年记录的 4.7 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范围为 $[200, 600]$ GeV. 对重 Higgs (> 300 GeV), 通常所用的窄宽度近似失效, 为了恰当地描述 Higgs 的产生与衰变, 以及信号与本底的干涉, 所采用的方法是对信号归一化常数引入一个保守的系统误差 (CMS 早期的做法也是如此), 即 $1.5 \times M_H^3 \text{ TeV}$, 这一点与节所述不同. 最后的分析结果在 95% 置信度上排除了 $[320, 560]$ GeV 区域的标准模型 Higgs^[84].

2.5 CMS $H \rightarrow WW$

2.5.1 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ ^[32,35,56]

在这一道, 两个 W 都衰变到轻子. 事例的选择要求有两个独立的带有相反电荷的具有高横动量的电子或者 μ 子以及较大的 E_T^{miss} ^[35]. 同时要求喷注数目不超过 2. 由于末态有两个中微子, Higgs 的质量不能够重建出来. 这个分析利用了 CMS 记录的 2011 年的 4.9 fb^{-1} 和 2012 年的 19.5 fb^{-1} 数据, 涵盖 Higgs 质量范围为 $[110, 600]$ GeV⁹⁾.

WW 道的事例按喷注数目分为 0, 1, 2 三类, 按轻子味道分为相同味道 (ee 或 $\mu\mu$) 和相反味道 ($e\mu$). 对 0 喷注情形, 主要的本底来自非共振 WW 产生; 对 1 喷注情形, 顶夸克产生的本底也很大; 双喷注情形则主要被用来优化 VBF Higgs 产生信号, 其主要本底是顶夸克产生. 对同味情形, Drell-Yan 产生 $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*/Z^* \rightarrow l\bar{l}$ 的本底非常大, 而异味过程没有这个大本底, 敏感度也更高.

为了压低顶夸克本底, 分析通过软 μ 子和 b - 标记来否决可能的顶夸克事例. 在本分析的选择条件下, 对 0 喷注情形, 否决效率可达 50%, 对大于 0 喷注的情形, 可达 80%; 为了压低 W +jets 本底, 要求双轻子系统的横动量超过一定值; 为了压低 WZ 过程, 对

有第 3 个轻子出现的事例不予考虑; 对 Drell-Yan 本底, 采用了包含 E_T^{miss} 、运动学和拓扑等变量的 MVA 方法, 发现可以压低本底 3 个量级, 而信号只减小 50%.

在经过一系列事例挑选后, 这个道最主要的本底来自没有共振的 W 粒子对的产生过程. 区别信号和本底的最主要的变量是两个轻子的横向夹角 ($\Delta\phi_{ll}$). 理论上我们期望信号上对应的这个角度要小于本底对应的角度, 这样做是因为, 由于 W 玻色子的极化来自于自旋为 0 的粒子的衰变, 轻子 (反轻子) 更倾向于沿 W 玻色子飞行方向的平行方向 (反平行方向) 产生.

这个道的分析结果有两组, 其一是 cut-based; 其二是基于双轻子的不变能量和横质量的二维空间分布的形状分析, 主要是对 0/1 喷注的轻子异味情形, 其中后者更为敏感. 如图 9 所示, 通过这个道, CMS 在 95% 置信度上排除了 $[128, 600]$ GeV 区域的标准模型 Higgs. 同时在 128 GeV 以下的区域, 发现信号显著超出. 在 125 GeV 能量处, 信号对于本底有 4.0σ 增益, 对应信号的散射截面是标准 Higgs 预言的 0.76 ± 0.21 倍^[35].

2.5.2 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu 2q$ ^[57,58]

WW 的半轻衰变道中, 一个 W 衰变为轻子和中微子, 而中微子将导致探测器上出现大横动量丢失; 而另一个 W 衰变为两个夸克, 这两个夸克又分别演化为两个喷注. 所以, 此反应道的末态为一个轻子, 大的横动量丢失和两个以上的喷注. 其中轻子信号和大横动量丢失可以显著压低 QCD 过程带来的本底.

由于 W 强子道衰变的分支比是轻子道的数倍, 故 WW 的半轻衰变事件数要明显多于全轻衰变过程. 此外, 由于只丢失一个中微子, 尽管其纵向动量无法直接测量, 但可通过要求电子 (或缪子)- 中微子对的不变质量等于 W 的不变质量而得到, 进而得到 Higgs 不变质量谱, 这也是半轻道相对全轻道的一个重要优势.

9) VBF 分析目前仍有待更新, 2012 年数据只使用了约 12 fb^{-1} . 此外, CMS 还公开了 VH 产生的 $H \rightarrow WW$ 的分析结果^[85], 但该分析对 125 GeV 附近的标准模型 Higgs 不敏感, 所以我们在本文并不详述

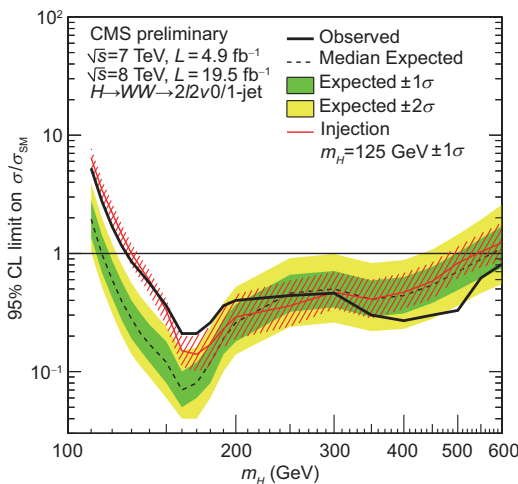


图 9 CMS 利用 2011+2012 记录的数据通过 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 分析道所给出的 95% 置信度水平上的 Higgs 信号强度的上限与 Higgs 质量的关系. 其中虚线为由纯本底假设得到预期值, 绿色和黄色带分别对应预期的 1σ 和 2σ 误差, 黑实线则为观测值, 红实线是将标准模型 Higgs 加入本底事例后的检验结果

Figure 9 The 95% CL upper limits on the signal strength parameter for the SM Higgs boson hypothesis as a function of the Higgs boson mass, via $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ analysis with the full 2011+2012 data recorded by the CMS. The observed values as a function of mass are shown by the solid line. The dashed line indicates the expected median of results for the background-only hypothesis, while the green and yellow bands indicate the 68% and 95% deviations from the median, respectively. The red solid line is for validation by injecting the SM Higgs into background.

在事例的选择上, 喷注数目可以是两个或三个, 包含电子或 μ 子的事例被分为两组, 两个横动量最高的喷注被认为来自于 W 粒子的强衰变. 为了提高 m_H 质量的分辨率, 两个 W 都要经过运动学拟合来将其质量限制在已知的宽度内. 同时, 为了更好的压低本底, 还要求此 W 的横质量大于 30 GeV. 为了防止误判, 和轻子距离太近的喷注在此分析中不被考虑. 而当末态中有多于两个喷注时, 挑选横动量最大的两个可以保证较高的正确率. 同时分析中还要求喷注对的不变量质量 m_{jj} 落在 65 GeV 到 95 GeV 之间, 这即保证了信号有 80% 以上的通过率, 又明显压低了最主要的本底 W +jets 过程.

由于信号过程与本底过程在运动学上是不一样的, 故本分析中利用多变量分析 MVA 方法从而进一步压低本底, 考虑的变量包括 Higgs 玻色子衰变产物

之间的五个夹角, WW 系统的横动量和赝快度, 以及轻子的电荷. 经过以上种种选择条件后, 剩下的本底主要为 W +jets, Top, Z +jets 以及双玻色子过程. 各个本底过程最后所剩的事件数和四体质量 $m_{l\nu jj}$ 分布可以通过分析控制区的数据或者理论计算模拟得到, 这些将作为得到最终统计结果的输入. 但对于最主要的本底 W +jets, 其数量和 $m_{l\nu jj}$ 分布的不确定度是整个分析中最主要的误差之一.

整个分析使用了 CMS 上记录的质心能量为 7 TeV 的亮度为 5 fb^{-1} 的数据和质心能量为 8 TeV 的亮度为 12 fb^{-1} 的数据. 通过比较实测数据与预期的信号和各本底道的数量和 $m_{l\nu jj}$ 分布, 并且充分考虑各项误差, 虽然没有找到 Higgs 存在的证据, 但在 95% 置信度下排除了 [215, 490] GeV 和 [525, 600] GeV 区间内 Higgs 存在的可能性, 见图 10 [57, 58].

2.5.3 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu j$ [59]

对于更大质量 Higgs ($M_H > 600 \text{ GeV}$) 的寻找, 上述分析方法将失效. 因为大质量的 Higgs 衰变产生的 W 将会有很大的横动量, 其产生的两个喷注会靠的很近, 从而形成一个胖喷注. 当 Higgs 质量大于 600 GeV 后, 有超过一半的事件如此. 故此分析利用末态有一个电子或缪子, 大横动量丢失和一个胖喷

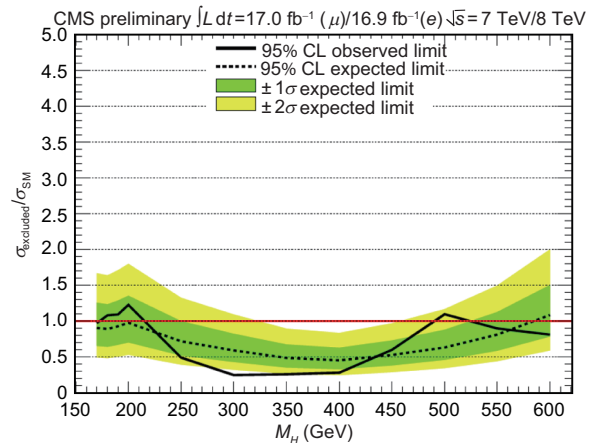


图 10 CMS 利用 2011 5 fb^{-1} +2012 12 fb^{-1} 的数据, 通过 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu q\bar{q}$ 道给出的 95% 置信度水平上的 Higgs 信号强度的上限与 Higgs 质量的关系

Figure 10 The 95% CL upper limits on the signal strength parameter for the SM Higgs boson hypothesis as a function of the Higgs boson mass, via $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu q\bar{q}$ analysis with the 2011 5 fb^{-1} +2012 12 fb^{-1} data recorded by the CMS.

注的事件来寻找质量 [600, 1000] GeV 的 Higgs.

胖喷注的寻找使用的是 Cambridge-Aachen(CA) 算法^[86], 半径 $\Delta R = 0.8$. 除了上述过程, 由于 QCD 过程以及多喷注随机组合也都有可能产生胖喷注, 故分析中使用胖喷注的不变质量和喷注的子结构来帮助挑选信号压低本底. 由 W 产生的胖喷注的不变质量谱在 W 的不变质量附近有一个明显的峰, 而本底过程是连续分布, 见图 11(a). 为了减少软 QCD 过程和 Pileup 效应对喷注测量的影响, 本分析中使用了专门的喷注修剪 (Jet Pruning) 算法^[87]. 修剪之后, 信号的不变质量峰明显变窄, 分辨率约为 10%, 且更加接近 W 的不变质量; 而绝大部分本底的不变质量落在 0 附近.

除了修剪过后的喷注质量, 喷注的子结构 (Jet Substructure) 也可被用于区分信号和本底, 譬如 Mass Drop^[60], N-subjettiness^[88], 和 Qjets^[89] 等区分量. Mass Drop 技术是通过计算子喷注的质量与胖喷注的质量比值来区分信号和本底. W 产生的胖喷注的 Mass Drop 值倾向于 0, 而 QCD 喷注则倾向于 1. N-subjettiness 技术则引入了描述喷注形状的变量 τ_N : 如果胖喷注是由 N 个子喷注组成的, 则 τ_N 值接近 0. 故在此分析中, 用 τ_2/τ_1 作为区分信号和本底的变量. W 产生的胖喷注 τ_2/τ_1 倾向于 0, 而本底倾向于 1, 见图 11(b). 此外, 分析还利用了 $t\bar{t}$ 控制区域, 对 τ_2/τ_1 选择效率做了数据和模拟之间差别的修正. 本分析的其他部分与 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ 基本一致, 不再赘述. 另一个差别是, 本分析中不再使用末态粒子间的角度关联来甄别信号, 取而代之的是要求强子道衰变的 W 与轻子道衰变的 W 背对背飞行.

此分析使用了 CMS 2012 年记录的约 19.3 fb^{-1} 的 8 TeV 数据, 未在 [600, 1000] GeV 区间内看到明显的 Higgs 信号, 从而对 Higgs 可能的截面给予了限制^[59]. 在 2015 年 LHC 重新开机后, 由于对撞能量将进一步提升到 13–14 TeV, 更多通过强子衰变对新物理的寻找将涉及到胖喷注及喷注修剪算法, 子结构分析技术的研究也将越来越热门.

2.6 ATLAS $H \rightarrow WW$ [41,90–92]

ATLAS $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 分析利用了 ATLAS 2011 年记录的 4.6 fb^{-1} 数据和 2012 年的 20.7 fb^{-1} 数

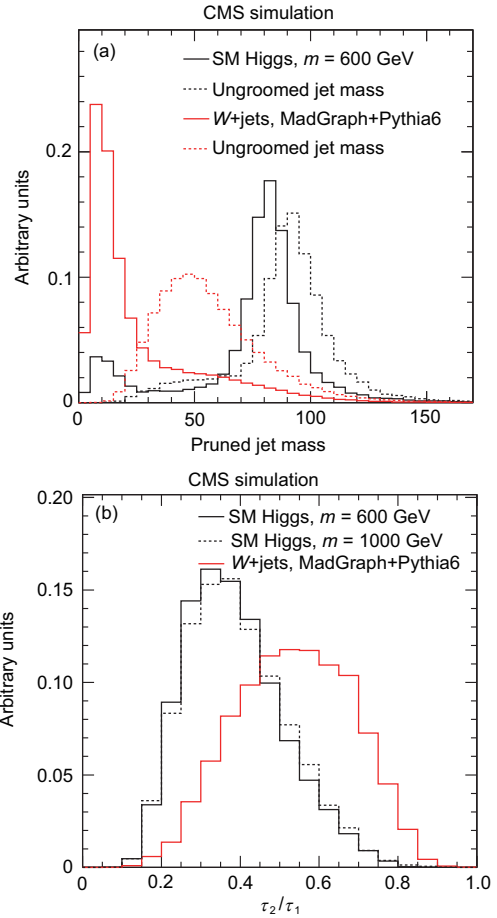


图 11 (a) 为 CMS 模拟的信号和本底在喷注修剪之前和之后的喷注质量分布; (b) 为相应的 τ_2/τ_1 的分布

Figure 11 (a) The jet mass distribution before and after pruning; (b) the τ_2/τ_1 distributions, for the CMS simulated signal and background, respectively.

据. 事例也被分为 VBF, 0/1 喷注, 同味及异味等诸类, 但分类方式、选择条件及本底估计和 CMS 有所不同. 在 $m_H = 125 \text{ GeV}$, ATLAS 以 3.8σ 的灵敏度看到了新粒子, 信号强度为 $\mu = 1.01 \pm 0.31$. 单独考虑 VBF 信号的话, 观测灵敏度为 2.5σ , 信号强度为 $\mu = 1.66 \pm 0.79$ ^[41].

3 Higgs 费米子衰变道的分析结果

3.1 CMS $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ [32,37]

τ 轻子的强子衰变可以被重建和分辨出来, 使用的算法是基于粒子流 (Particle Flow 或 PS) 技术的

Hadron Plus Strips(HPS) 算法^[94]. 粒子流技术把每个 CMS 子探测器的性能结合起来, 可以区别出事例里稳定单独的粒子包括带电强子、中性强子、光子、电子和 μ 子. 在此基础上, 可以重建喷注, 丢失的横动量等. HPS 算法从 PF 喷注开始进行强子衰变的 τ 粒子重建, 目标定为 τ 的两种最主要的强子衰变模式, 第一种是衰变成一个带电强子和最多两个中性 π 介子, 第二种是衰变成三个带电强子. 一个从中性 π 介子衰变出来的光子在径迹探测器中会转变为正负电子对, 它们会韧致辐射光子. 这使得 ECAL 的能量沉积在横向角度 ϕ 方向上展开, 并且会被重建成许多光子. 中性 π 介子可以通过在沿着 ϕ 角方向的窄条对重建光子归并成团的方法鉴别出. 将重建的 π 与 PF 强子结合起来, 我们就可以确定 τ 的强子衰变模式, 它的动量以及孤立度参数. CMS 强子衰变 τ 总体的鉴别效率是 60%–65%, 而把喷注误判为 τ 的出错率为 2%–3%^[37].

CMS 双 τ 道分析采用的是 2011 年采集的约 4.9 fb⁻¹ 和 2012 年约 19.4 fb⁻¹ 数据 (CMS 还公开了 VH 产生的 $H \rightarrow \tau\tau$ 的分析结果^[95], 但该分析对 125 GeV 附近的标准模型 Higgs 不敏感, 所以我们在本文并不详述), 涵盖 Higgs 质量范围为 [110, 145] GeV. 末态分为五类, 每个道选取的触发也不同. 这五类分别是 $\mu\tau_h$, $e\tau_h$, $e\mu$, $\mu\mu$, $\tau_h\tau_h$, 其中电子和 μ 子来自 τ 子的轻子衰变, τ_h 表示该 τ 粒子来自于强子衰变. 利用基于 τ 子动力学的最大似然拟合方法^[37], 可以进行双 τ 子的不变质量重建. 以上的五种类的每一种又都可以根据事例中喷注的数目 0, 1 或 2 再细分, 其中双喷注类用来优化 VBF 信号敏感度, 而 0- 喷注的类用于非 $\tau_h\tau_h$ 类, 主要用来限制本底归一化、鉴别效率和能量尺度.

在以上每一类中, 都从重建的双 τ 子不变质量分布中寻找可能超出. 最大不可降低的本底是 $Z \rightarrow \tau\tau$ 道, 我们使用 $Z \rightarrow \mu\mu$ 的数据样本来估计它, 技巧是把重建的 μ 子替换为模拟得到的 τ 子. 这种方法称为嵌入法. 一些可减少的本底. $Z \rightarrow ll$ 本底来自轻子误判成 τ , 大小来自自由 $Z \rightarrow \mu\mu$ 数据修正归一化的 Drell-Yan 模拟样本, 系统误差则由数据与模拟测得的误判率不同得到. W +jets 本底来自喷注被误判为 τ , 其大小可由轻子和 E_T^{miss} 的大横质量区外推得到.

$t\bar{t}$ 本底则由 b 标记的顶夸克控制区得到; QCD 多喷注本底则完全由数据得到, 主要是从轻子喷注同号 (SS) 的数据里边使用同号 (SS) 数据和反号 (OS) 数据的比值和放松轻子孤立度来估计.

对于在 110–145 GeV 质量范围内的标准模型 Higgs 玻色子, 图 12 给出这个分析对 Higgs 截面的 95% 置信度上限. 在 Higgs 粒子质量 125.8 GeV 处观测到 2.85 个 σ 的信号超出. 图 13 给出了 Higgs 质量 125 GeV 处不同道的信号强度^[37]. 这些结果第一次给出了 Higgs 和轻子的耦合的直接证据.

3.2 ATLAS $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ [44,45]

ATLAS $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ 分析利用了 ATLAS 2011 年记录的 4.6 fb⁻¹ 数据和 2012 年的 13.0 fb⁻¹ 数据. 事例按 τ 衰变, VBF, VH 产生模式, 喷注数, 双 τ 系统动量大小等分类. ATLAS 的 τ 鉴别效率在 50% 左右, 喷注误判为 τ 的出错率则低于 1%. 双 τ 子的不变质量也通过动力学拟合重建. 本底估计与 CMS 大致一样. 在 $m_H = 125$ GeV, 在 95% 置信度上限限制了 Higgs 产生截面小于标准模型预言的 1.9 倍, 预期为 1.2 倍. 对

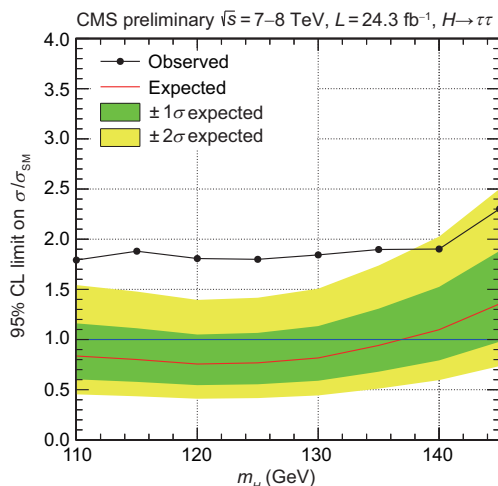


图 12 CMS 利用 2011 及 2012 记录的数据通过 $H \rightarrow \tau\tau$ 分析道所给出的 95% 置信度水平上的 Higgs 信号强度的上限与 Higgs 质量的关系

Figure 12 The 95% CL upper limits on the signal strength parameter for the SM Higgs boson hypothesis as a function of the Higgs boson mass, via $H \rightarrow \tau\tau$ analysis with the full 2011+2012 data recorded by the CMS.

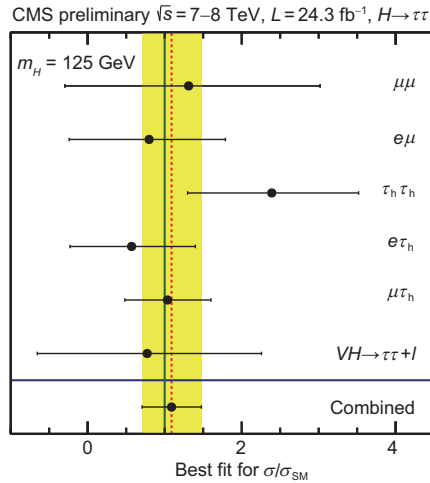


图 13 CMS 利用 2011 及 2012 记录的数据通过 $H \rightarrow \tau\tau$ 道分析道所给出的信号强度

Figure 13 Signal strength values from the $H \rightarrow \tau\tau$ analysis with the full 2011+2012 data recorded by the CMS.

应的敏感度观测值为 1.1σ , 预期为 1.7σ , 信号强度为 0.7 ± 0.7 [44, 45].

3.3 CMS $H \rightarrow b\bar{b}$ [32, 36, 97]

底夸克的鉴别使用的是组合次级顶点 (CSV) b - 喷注标记算法 [96]. 它充分的利用了所有的变量如径迹的碰撞参数、次级顶点和喷注动力学, 能把 b - 喷注和非 b - 喷注区别开来. 在顶夸克对和 μ 子 + 喷注的样品中可测得其效率, 例如, 如果 CSV 区分参数要求大于 0.5, 那么 b - 标记的效率为约 73% 的效率, c 夸克被误标的概率为 23%, 轻夸克和胶子误标的概率为 3%. 此外, 在分析中, 使用次级顶点和喷注的性质、丢失横向能量方向和软轻子信息, 可以通过 MVA 方法修正 b - 喷注的动量, 从而提高 Higgs 15%–20% 的重建质量分辨率.

CMS 通过 VH 产生道寻找 Higgs 的分析 [36], 使用的是 2011 年约 5.0 fb^{-1} 和 2012 年约 19.0 fb^{-1} 数据, 研究了 [110, 135] GeV 质量区域的 Higgs. 事例包括以下几种情况: $W(\mu\nu)H$ 、 $W(e\nu)H$ 、 $Z(\mu\mu)H$ 、 $Z(ee)H$ 与 $Z(\nu\nu)H$. 按规范玻色子横动量大小事例继续分为若干类. 本底过程有 $V + jets$, $t\bar{t}$ 是由数据的控制区域得到, 单顶夸克, 双玻色子 (VV) 以及 QCD 多喷注产生则由理论模拟得到. 信号与本底

的分离是基于多变量构成的 MVA 区分量. 最后的结果由对 MVA 输出的形状分析得到.

图 14 给出了 CMS VH 分析对 Higgs 截面的 95% 置信度上限. 对 125 GeV 质量的 Higgs 玻色子截面的观测上限是 1.89, 预期上限是 0.95, 观察到的事例有 2.1 个 σ 的信号超出. 信号强度为 1.0 ± 0.5 [36].

CMS 通过 VBF 产生道寻找 Higgs 的分析 [97], 使用的是 2012 年约 19.0 fb^{-1} 数据, 研究了 [110, 135] GeV 质量区域的 Higgs. 最主要的本底是 QCD 多喷注产生, 其次是 $V + jets$ 其中规范玻色子强子衰变, 以及 top 本底. Higgs GF 产生也会贡献出与信号相类似的事例. 信号与本底的区分采用的也是 MVA 方法. 图 15 给出了 CMS VBF 分析对 Higgs 截面的 95% 置信度上限. 125 GeV 质量的 Higgs 玻色子截面的观测上限是 3.6, 预期上限是 3.0, 拟合信号强度 0.7 ± 1.4 .

此外, CMS 利用 2011 年记录的约 5.0 fb^{-1} 和 2012 年约 5.1 fb^{-1} 数据, 还对 $t\bar{t}H$ 道做了分析, 对 125

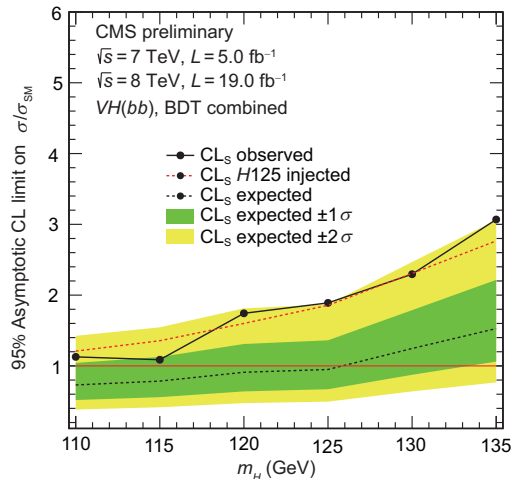


图 14 CMS 2011+2012 VH($H \rightarrow b\bar{b}$) 道给出的 95% 置信度水平上的 Higgs 信号强度的上限与 Higgs 质量的关系. 其中黑虚线为由纯本底假设得到预期值, 绿色和黄色带分别对应预期的 1σ 和 2σ 误差, 黑实线则为观测值, 红虚线是将标准模型 Higgs 加入本底事例后的检验结果

Figure 14 The 95% CL upper limits on the signal strength parameter for the SM Higgs boson hypothesis as a function of the Higgs boson mass, via VH($H \rightarrow b\bar{b}$) analysis with the full 2011+2012 data recorded by the CMS. The observed values as a function of mass are shown by the solid line. The dashed line indicates the expected median of results for the background-only hypothesis, while the green and yellow bands indicate the 68% and 95% deviations from the median, respectively. The read solid line is for validation by injecting the SM Higgs into background.

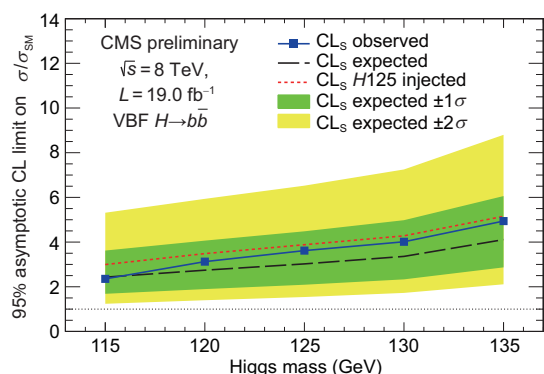


图 15 CMS 2011+2012 VBF($H \rightarrow b\bar{b}$) 道给出的 95% 置信度水平上的 Higgs 信号强度的上限与 Higgs 质量的关系

Figure 15 The 95% CL upper limits on the signal strength parameter for the SM Higgs boson hypothesis as a function of the Higgs boson mass, via VBF($H \rightarrow b\bar{b}$) analysis with the full 2011+2012 data recorded by the CMS.

GeV 质量的 Higgs 玻色子截面的观测上限是 5.8, 预期上限是 5.2^[98].

3.4 ATLAS $H \rightarrow b\bar{b}$ ^[42,43]

ATLAS 使用 2011 年约 4.7 fb^{-1} 和 2012 年约 13.0 fb^{-1} 数据, 通过 VH 产生道寻找了 Higgs. b - 标记的方法是 MV1, 效率约为 70%, c 夸克误标的概率为约 20%, 轻夸克和胶子被误标的概率为约 0.6%. 事例按轻子数, 喷注数, 规范玻色子的动量被分为 16 类. 分析结果没有看到明显的信号超出. 对 125 GeV 质量的 Higgs 玻色子截面的观测上限是 1.8, 预期上限是 1.9.

3.5 $H \rightarrow \mu^+\mu^-$ ^[49], $Z\gamma$ ^[50,51] 等次敏感的道

$H \rightarrow \mu^+\mu^-$ 衰变极其稀有, 在 [110, 150] GeV 质量区间的分支比为 28×10^{-5} 至 6×10^{-5} . 但这是唯一已探测的 Higgs 与第二代费米子耦合的衰变道. 这个道的优点是有清晰的双 μ 子信号, 会有优良的质量分辨率, 但也具有很难压低的 Drell-Yan 本底污染. ATLAS 使用了 2012 年记录的约 20.7 fb^{-1} 的 8 TeV 数据对这个道作了分析. 事例按 μ 子快度分布分为中心和非中心两类. 在两类情形中, 都利用了信号和本底对应的函数对 μ 子对的质量谱做了拟合. 最终结果未在 [110, 150] GeV 区间内看到明显的 Higgs 信号, 对于 125 GeV 的 Higgs, 在 95% 置信度上限制了

其产生截面小于标准模型预言的 9.8 倍 (期望值为 8.2)^[49].

$H \rightarrow Z\gamma$ 衰变也极其稀有, 在 [120, 150] GeV 质量区间, 其分支比大致为 0.111% 到 0.246%. CMS 使用了 2011 年记录的约 5.0 fb^{-1} 的 7 TeV 数据和 2012 年记录的约 19.6 fb^{-1} 的 8 TeV 数据, 未在 [120, 150] GeV 区间内看到明显的 Higgs 信号, 在 95% 置信度上限制了 Higgs 产生截面小于标准模型预言的 3 至 31 倍.^[50] ATLAS 使用了 2011 年记录的约 4.6 fb^{-1} 的 7 TeV 数据和 2012 年记录的约 20.7 fb^{-1} 的 8 TeV 数据, 未在 [120, 150] GeV 区间内看到明显的 Higgs 信号, 在 95% 置信度上限制了 Higgs 产生截面小于标准模型预言的 5.4 至 37 倍^[51].

4 Higgs 性质的测量

综合所有的分析结果, CMS 最新所给出的 Higgs 的质量与耦合的结果^[32] 如图 16 所示. 其中显示了由 $\gamma\gamma$ 和 ZZ 分析道所给出的 Higgs 质量与信号强度 (σ/σ_{SM}) 的 68% 置信度的 2 维等高线, 注意 $\gamma\gamma$ 和 ZZ 两道之间的信号强度的相对关系由标准模型的预期所限制. 由此, CMS 所测得的 Higgs 质量为 $125.7 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 0.3(\text{syst}) \text{ GeV}$, 对应的耦合强度为 $\mu = 0.80 \pm 0.14$ ^[32]. 图 17 给出的是 ATLAS 所测得的结果, Higgs 质量为 $125.5 \pm 0.2(\text{stat.})^{+0.5}_{-0.6}(\text{syst.}) \text{ GeV}$, 对应的耦合强度为 $\mu = 1.30 \pm 0.20$ ^[38,99].

图 18 及 19 则更细致地给出了 CMS 和 ATLAS 所测得的各个单独道所对应的耦合强度. 我们可以看到, 在误差范围内, 测量结果与标准模型的结果没有大的偏差. 当然, 由于数据所限, 误差棒还比较大, 要完全确定我们看到的 Higgs 与标准模型的预期一致还需要更多的检验.

此外, 通过对各个道的数据的拟合, 我们可以间接限制在某些新物理中可能出现的 Higgs 不可见衰变的分支比 (Br_{inv})^[100,101]. CMS 给出的 95% 置信度区间是 $Br_{inv} < 52\%$ ^[32], ATLAS 的结果是 $Br_{inv} < 60\%$ ^[38]. 值得一提的是, ATLAS 通过 ZH 联合产生过程直接探测了 Higgs 的不可见衰变, 对 125 GeV 的 Higgs, 要求在 95% 置信度下, $Br_{inv} < 65\%$ ^[102].

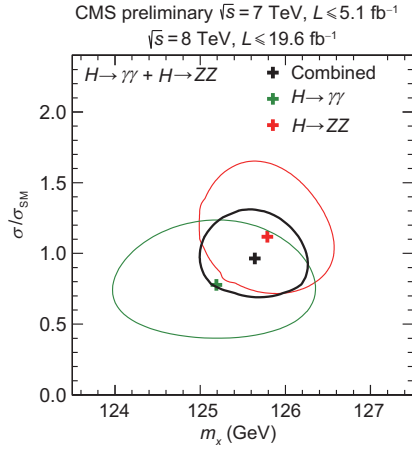


图 16 CMS $\gamma\gamma$ 和 $ZZ \rightarrow 4l$ 分析道所给出的 Higgs 质量与信号强度 (σ/σ_{SM}) 的 68% 置信度的 2 维等高线, 其中 $\gamma\gamma$ 和 ZZ 两道之间的信号强度的相对关系由标准模型的预期所限制 [32]

Figure 16 The 68% CL contours for the signal strength versus the boson mass for the $\gamma\gamma$ and $4l$ final states, and their combination. In this combination, the relative signal strength for the two decay modes is constrained by the expectation for the SM Higgs boson [32].

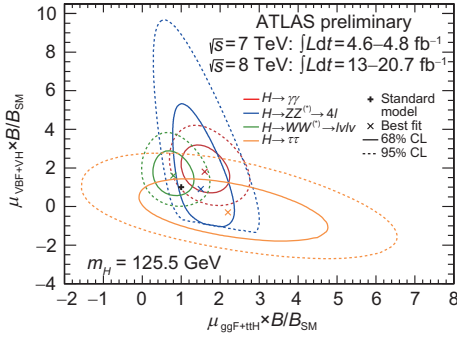


图 17 ATLAS 所给出的 Higgs 质量与信号强度 (σ/σ_{SM}) 的 68% 及 95% 置信度的 2 维等高线 [38,99]

Figure 17 The ATLAS 68% and 95% CL contours for the signal strength versus the boson mass [38,99].

CMS 和 ATLAS 还测量了 Higgs 的自旋及宇称。虽然还不能完全排除其他可能的解释, 如自旋为 2 的张量粒子, 宇称为负的赝标量粒子, 但现有结果表明, Higgs 玻色子相比更倾向于标准模型所预期的标量粒子 [32,35,103–107]。

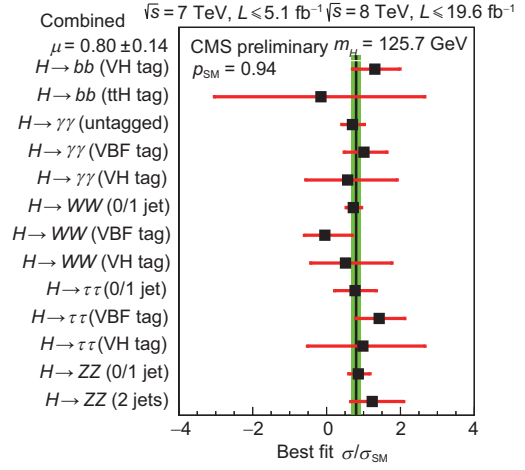


图 18 CMS 对各个单独道所给出的 Higgs 信号强度 (σ/σ_{SM})。纵向的带子对应的是综合结果 $\mu = 0.80 \pm 0.14$ [32], 横向的误差棒对应的是各个道的 1 个标准偏差的不确定度 (统计和系统误差都包括在内) [32]

Figure 18 Signal strength values for the combination (solid vertical line), and for individual decay modes. The vertical band shows the overall signal strength uncertainty. The horizontal bars indicate the ± 1 standard deviation uncertainties in the signal strength values for the individual modes [32].

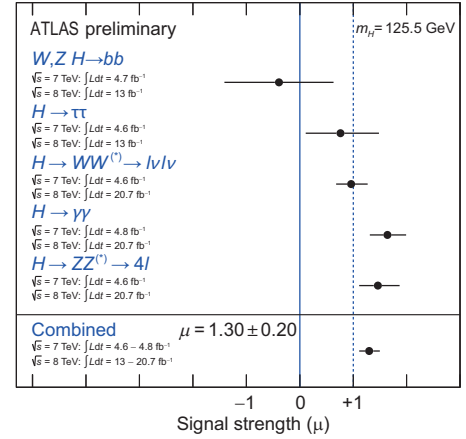


图 19 ATLAS 对各个单独道所给出的 Higgs 信号强度 (σ/σ_{SM})。横向的误差棒对应的是各个道的 1 个标准偏差的不确定度 (统计和系统误差都包括在内) [38,99]

Figure 19 The ATLAS signal strength values for the combination (solid vertical line), and for individual decay modes [38,99].

5 北大组在 CMS 实验寻找 Higgs 中的工作

北大 CMS 组长期工作于 Higgs 的 $WW \rightarrow l\nu + 2js$ 和 $WW \rightarrow l\nu + 1j$ 寻找道, 在对重的标准模型或超出标准模型的 Higgs 的寻找上做了相当贡献, 详见第 2.5.2 与 2.5.3 节.

除此之外, 北大 CMS 组还在 VBF 过程寻找上作了如下工作:

VBF 过程是 LHC 上除胶子融合以外的最重要的 Higgs 产生机制, 且该过程会同时产生一对分别前后向飞行的喷注. 这两个喷注横动量大, 赝快度高, 且喷注对的不变质量特别大, 能够被有效的用于区分信号和本底. 文献 [108] 模拟了质心能量为 10 TeV 亮度为 60 fb^{-1} 的情形下, 测量两个同号 W 的散射过程并寻找 Higgs 的可行性. 同号 W 散射过程虽然不能直接测量 Higgs 质量谱, 但只要 Higgs 粒子存在, 就可以通过 T-channel 来影响 WW 末态的分布. WW 全轻衰变产生的同号缪子对的不变质量和空间方位交角的分布便可作为判别量.

除了 W 的末态, 矢量玻色子融合过程产生的喷注对也值得研究. 喷注运动学上准确的理论模拟非常有助于压低本底, 减少系统不确定性. 在文献 [61] 中, 就测量了全举前向喷注的产生截面和前向中心喷注关联产生截面. 喷注的产生和动力学分布与质子结构直接相关, 而前向区域中的喷注则涉及大或小 x 区域的部分子分布. 测量同时拥有前向和中心两个方向喷注的事件可用于检验演化方程中的部分子簇射的动力学理论描述, 如 DGLAP(适用于较大 x 区域), BFKL(适用于小 x 区域), 或 CCFM(兼顾普通 x 和小 x 区域) 演化方程. 通过比较 CMS 记录的质心能量为 7 TeV 亮度为 3.14 pb^{-1} 的真实数据与多个蒙特卡罗产生子模拟结果, 可以发现, 对于全举前向喷

注的模拟, 在误差范围内, 各个理论模型与实验都符合较好; 而对于前向中心关联产生截面, HERWIG 产生子能够很好地描述总截面和分布的形状, 而其他理论模型相对较差, 这反应了前向和中心喷注的关联可能很强, 需要做更多研究. 虽然理论上喷注对模拟的不准确性为 VBF 测量过程带来一定的困难, 但更少的本底非常有助于准确测量 Higgs 的具体性质.

6 总结

2012 年 7 月, 欧洲核子中心 CERN 的大型强子对撞机 LHC 上的 CMS 与 ATLAS 实验组相继宣布发现了质量在 125 GeV 附近的新粒子. 其后, 基于更多的数据和更深入的分析, CERN 于 2013 年 3 月 14 日发表声明: “新的结果表明 CERN 发现的粒子是 Higgs 玻色子”. 在简要回顾标准模型 Higgs 的理论以及在 LHC 之前的寻找结果之后, 我们结合近年来参与 CMS 实验组 Higgs 寻找的工作经历, 详细介绍了 LHC 上 Higgs 玻色子的发现历程, 以及对 Higgs 质量、耦合、自旋宇称等性质的测量现状.

我们还介绍了北大 CMS 组的一系列相关工作. 在硬件方面, 北大 CMS 组圆满完成了硬件贡献缪子触发用的大面积雪崩型阻性板探测器 (RPC) 研制和安装测试, 现正在继续有关升级工作. 在 Higgs 寻找的数据分析上, 北大 CMS 组长期工作于 Higgs 的 $WW \rightarrow l\nu + 2js$ 和 $WW \rightarrow l\nu + 1j$ 寻找道, 在对重的标准模型或超出标准模型的 Higgs 的寻找上做了相当贡献, 特别是第一次将喷注子结构技术应用到 Higgs 的寻找上来. 此外, 我们首次研究了通过同号 W -VBF 散射测量寻找 Higgs 的可行性; 以及利用 CMS 7 TeV 亮度为 3.14 pb^{-1} 的数据首次测量了 VBF 类型的前向喷注和中心喷注的关联.

致谢

感谢欧洲核子中心加速器部门的不懈努力使得 LHC 得以良好运行, 感谢 CMS 实验组的各国同事们的大力合作使得 CMS 这个大规模的实验能够顺利进行并取得一系列重大成果. 感谢中国国家基金委、科技部、中国科学院高能物理研究所及北京大学物理学院特别是核物理与核技术国家重点实验室对北大高能物理实验组的大力支持.

参考文献

- 1 Bruning O S, Collier P, Lebrun P, et al. LHC Design Report. CERN 2004-003, 2004
- 2 ATLAS Collaboration. Detector and Physics Performance Technical Design Report. CERN-LHCC/99-14/15, 1999

- 3 Aad G, Abat E, Abbott B, et al[ATLAS Collaboration]. Expected performance of the ATLAS experiment-detector, trigger and physics. arXiv:0901.0512[hep-ex]
- 4 Bayatian G L, Chatrchyan S, Hmayakyan G, et al[CMS Collaboration]. CMS Physics: Technical Design Report Volume 1: Detector Performance and Software. CERN-LHCC-2006-001, CMS-TDR-8-1
- 5 CMS Collaboration. CMS physics technical design report, volume II: Physics performance. J Phys G: Nucl Part Phys, 2007, 34: 995
- 6 Chatrchyan S, Hmayakyan G, Khachatryan V, et al[CMS Collaboration]. The CMS experiment at the CERN LHC. JINST, 2008, 3: S08004
- 7 Costantini S, Beernaert K, Cimmino A, et al. Uniformity and stability of the CMS RPC detector at the LHC. JINST, 2013, 8: P03017
- 8 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Performance study of the CMS barrel resistive plate chambers with cosmic rays. JINST, 2010, 5: T03017
- 9 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. Phys Lett B, 2012, 716: 30–61
- 10 Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al[ATLAS Collaboration]. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. Phys Lett B, 2012, 716: 1–29
- 11 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Observation of a new boson with mass near 125 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. JHEP, 2013, 06: 081
- 12 Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al[ATLAS Collaboration]. Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data. arXiv:1307.1432 [hep-ex]
- 13 Higgs P W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields. Phys Lett, 1963, 12(2): 132–133
- 14 Englert F, Brout R. Broken symmetry and the mass of Gauge vector mesons, Phys Rev Lett, 1964, 13(9): 321–323
- 15 Higgs P W. Broken symmetries and the masses of Gauge Bosons, Phys Rev Lett, 1964, 13(16): 508–509
- 16 Guralnik G, Hagen C, Kibble T. Global conservation laws and massless particles. Phys Rev Lett, 1964, 13(20): 585–587
- 17 Glashow S L. Partial symmetries of weak interactions. Nucl Phys, 1961, 22: 579–588
- 18 Weinberg S. A model of leptons. Phys Rev Lett, 1967, 19: 1264–1266
- 19 Salam A. Weak and electromagnetic interactions. In: the Proceedings of the 8th Nobel Symposium on ‘Elementary Particle Theory, Relativistic Groups and Analyticity’. Stockholm, 1968. 367–377
- 20 Hooft G ’t, Veltman M. Regularization and renormalization of gauge fields. Nucl Phys B, 1972, 44: 189–213
- 21 Djouadi A. The anatomy of electro-weak symmetry breaking. I: The Higgs boson in the standard model. Phys Rept, 2008, 457: 1–216
- 22 Gomez-Bock M, Mondragon M, Muhlleitner M, et al. Concepts of electroweak symmetry breaking and Higgs physics. arXiv:0712.2419 [hep-ph]
- 23 Kazakov D I. Beyond the standard model: In search of supersymmetry. In: the Proceedings of the European School of High-Energy Physics. Geneva: CERN, 2001. 125–199
- 24 Branco G C, Ferreira P M, Lavoura L, et al. Theory and phenomenology of two-Higgs-doublet models. Phys Rept, 2012, 516: 1–102
- 25 Lep Design Report, Vol 1: The Lep Injector Chain. CERN-LEP/TH/83-29, 1983; LEP Design Report, Vol 2: The LEP Main Ring. CERN-LEP-84-01, 1984
- 26 Group T. Design Report Tevatron 1 Project. FERMILAB-DESIGN-1982-01, FERMILAB-DESIGN-1983-01, FERMILAB-DESIGN-1984-01
- 27 Schael S, Barate R, Bruneliere R, et al[ALEPH and DELPHI and L3 and OPAL and LEP Electroweak Working Group Collaborations]. Electroweak measurements in electron-positron collisions at W-boson-pair energies at LEP. arXiv:1302.3415 [hep-ex]
- 28 Tevatron New Phenomina and Higgs Working Group, CDF and D0 Collaborations. Combined CDF and D0 upper limits on Standard Model Higgs boson production with up to 8.6 fb^{-1} of data. arXiv:1107.5518 [hep-ex]
- 29 ATLAS Collaboration. Combination of Higgs Boson Searches with up to 4.9 fb^{-1} of pp Collisions Data Taken at A Center-of-Mass Energy of 7 TeV with the ATLAS Experiment at the LHC. ATLAS-CONF-2011-163
- 30 CMS Collaboration. Combination of SM Higgs Searches. CMS-PAS-HIG-11-032
- 31 CMS Collaboration. Observation of A New Boson with A Mass Near 125 GeV. CMS-PAS-HIG-12-020
- 32 CMS Collaboration. Combination of Standard Model Higgs Boson Searches and Measurements of the Properties of the New Boson with a Mass Near 125 GeV. CMS-PAS-HIG-13-005
- 33 CMS Collaboration. Properties of the Higgs-like boson in the decay H to ZZ to $4l$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-13-002
- 34 CMS Collaboration. Updated Measurements of the Higgs Boson at 125 GeV in the Two Photon Decay Channel. CMS-PAS-HIG-13-001
- 35 CMS Collaboration. Evidence for a Particle Decaying to $W+W-$ in the Fully Leptonic Final State in A Standard Model Higgs Boson Search in pp Collisions at the LHC. CMS-PAS-HIG-13-003, CMS-PAS-HIG-12-042
- 36 CMS Collaboration. Search for the Standard Model Higgs Boson Produced in Association with W or Z Bosons, and Decaying to Bottom Quarks for LHCp 2013. CMS-PAS-HIG-13-012

- 37 CMS Collaboration. Search for the Standard-Model Higgs Boson Decaying to Tau Pairs in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-13-004
- 38 ATLAS Collaboration. Couplings Combination of Higgs Analyses. ATLAS-CONF-2013-034
- 39 ATLAS Collaboration. H to 4l HSG2 for winter 2013. ATLAS-CONF-2013-013
- 40 ATLAS Collaboration. Higgs to Gamma Gamma, Mass and Couplings, for Winter 2013 (Higgs HSG1). ATLAS-CONF-2013-012
- 41 ATLAS Collaboration. Update of the $H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$, 0,1 and 2-jets Analysis with the ATLAS detector, ATLAS-CONF-2013-030
- 42 ATLAS Collaboration. SM H to bb 2012 for HCP. ATLAS-CONF-2012-161
- 43 Aad G, Abbott B, Abdallah J, et al[ATLAS Collaboration]. Search for the Standard Model Higgs boson produced in association with a vector boson and decaying to a b-quark pair with the ATLAS detector., Phys Lett B, 2012, 718: 369–390
- 44 ATLAS Collaboration. SM H to tautau 2012 for HCP. ATLAS-CONF-2012-160
- 45 [ATLAS Collaboration. Search for the Standard Model Higgs boson in the H to $\tau^+\tau^-$ decay mode in $\sqrt{s} = 7$ TeV pp collisions with ATLAS. JHEP, 2012, 1209: 070
- 46 Rainwater D L, Zeppenfeld D. Searching for $H \rightarrow \gamma\gamma$ in weak boson fusion at the LHC. JHEP, 1997, 9712: 005
- 47 Rainwater D L, Zeppenfeld D, Hagiwara K. Searching for $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ in weak boson fusion at the CERN LHC. Phys Rev D, 1998, 59: 014037
- 48 Kauer N, Plehn T, Rainwater D T, et al. $H \rightarrow W^+W^-$ as the discovery mode for a light Higgs boson. Phys Lett B, 2001, 503: 113–120
- 49 ATLAS Collaboration. H to Mumu Winter 2013. ATLAS-CONF-2013-010
- 50 CMS Collaboration. Search for the Standard Model Higgs Boson in the Z Boson Plus A Photon Channel in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-13-006
- 51 ATLAS Collaboration. H to Zgamma for Winter 2013 (Higgs HSG1), ATLAS-CONF-2013-009
- 52 Dittmaier S, Mariotti C, Passarino G, et al [The LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration]. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 1. Inclusive Observables. arXiv:1101.0593 [hep-ph]
- 53 Dittmaier S, Mariotti C, Passarino G, et al[The LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration]. Handbook of LHC Higgs Cross Sections: 2. Differential Distributions. arXiv:1201.3084[hep-ph]
- 54 Heinemeyer S, Mariotti C, Passarino G, et al[The LHC Higgs Cross Section Working Group Collaboration]. Handbook of LHC Higgs cross sections: 3. Higgs properties. arXiv:1307.1347[hep-ph]
- 55 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Observation of a new boson with mass near 125 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. JHEP, 2013, 06: 081
- 56 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Search for a standard-model-like Higgs boson with a mass in the range 145 to 1000 GeV at the LHC. Eur Phys J C, 2013, 73: 2469
- 57 CMS Collaboration. Search for the Standard Model Higgs Boson in the H to WW to $l\nu jj$ Decay Channel. CMS-PAS-HIG-12-003, CMS-PAS-HIG-12-021
- 58 CMS Collaboration. Search for the Standard Model Higgs boson in the H to WW to $l\nu jj$ Decay Channel in pp Collisions at the LHC. CMS-PAS-HIG-12-046
- 59 CMS Collaboration. Search for a Standard Model-like Higgs Boson Decaying into WW to $l\nu q\bar{q}$ in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. CMS-PAS-HIG-13-008
- 60 Butterworth J M, Davison A R, Rubin M, et al. Jet substructure as a new Higgs search channel at the LHC. Phys Rev Lett, 2008, 100: 242001
- 61 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Measurement of the inclusive production cross sections for forward jets and for dijet events with one forward and one central jet in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. JHEP, 2012, 1206: 036
- 62 CMS Collaboration. Search for ttH Production in Events Where H Decays to Photons at 8 TeV Collisions. CMS-PAS-HIG-13-015.
- 63 Carminati L. Search for a standard model Higgs boson in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ channel with the ATLAS detector. Acta Phys Polon B, 2007, 38: 747–754
- 64 Alioli S, Nason P, Oleari C, et al. NLO Higgs boson production via gluon fusion matched with shower in POWHEG. JHEP, 2009, 0904: 002
- 65 Nason P, Oleari C. NLO Higgs boson production via vector-boson fusion matched with shower in POWHEG. JHEP, 2010, 1002: 037
- 66 Sjostrand T, Mrenna S, Skands P Z. PYTHIA 6.4 physics and manual. JHEP, 2006, 0605: 026
- 67 Florian D de, Ferrera G, Grazzini M, et al. Transverse-momentum resummation: Higgs boson production at the Tevatron and the LHC. JHEP, 2011, 1111: 064
- 68 ATLAS Collaboration. Observation and Study of the Higgs Boson Candidate in the two Photon Decay Channel with the ATLAS Detector at the LHC. ATLAS-CONF-2012-168
- 69 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Observation of Z decays to four leptons with the CMS detector at the LHC. JHEP, 2012, 1212: 034

- 70 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Search for the standard model Higgs boson in the decay channel H to ZZ to 4 leptons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. Phys Rev Lett, 2012, 108: 111804
- 71 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Search for the standard model Higgs boson in the H to ZZ to $\ell\ell\tau\tau$ decay channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. JHEP, 2012, 1203: 081
- 72 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Search for a Higgs boson in the decay channel H to $ZZ(*)$ to q qbar $\ell^- \ell^+$ in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. JHEP, 2012, 1204: 036
- 73 Passarino G, Sturm C, Uccirati S. Higgs pseudo-observables, second Riemann sheet and all that. Nucl Phys B, 2010, 834: 77–115
- 74 Gorla S, Passarino G, Rosco D. The Higgs Boson lineshape. Nucl Phys B, 2012, 864: 530–579
- 75 Kauer N, Passarino G. Inadequacy of zero-width approximation for a light Higgs boson signal. JHEP, 2012, 1208: 116
- 76 Passarino G. Higgs interference effects in $gg \rightarrow ZZ$ and their uncertainty. JHEP, 2012, 1208: 146
- 77 Campbell J M, Ellis R K, Williams C. Gluon-Gluon contributions to $W^+ W^-$ production and Higgs interference effects. JHEP, 2011, 1110: 005
- 78 Kauer N. Signal-background interference in gg to H to VV . arXiv:1201.1667v4[hep-ph]
- 79 [CMS Collaboration]. Search for a Heavy Higgs boson in the H to ZZ to $2l2\nu$ Channel in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-13-014
- 80 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Search for the standard model Higgs boson in the H to ZZ to $2\ell 2\nu$ channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. JHEP, 2012, 1203: 040
- 81 Aad G, Abbott B, Abdallah J, et al[ATLAS Collaboration]. Search for the standard model Higgs boson in the decay channel $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4\ell$ with 4.8 fb $^{-1}$ of pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS. Phys Lett B, 2012, 710: 383–402
- 82 ATLAS Collaboration. Search for a Standard Model Higgs Boson in the Mass Range 200–600 GeV in the H to ZZ to $llqq$ Decay Channel with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2012-017
- 83 ATLAS Collaboration. Higgs Search in the Low-mass Higgs to ZZ to $llqq$ Channel. ATLAS-CONF-2012-163
- 84 ATLAS Collaboration. Search for a Standard Model Higgs boson in the H to ZZ to $ll\nu\nu$ Decay Channel Using 4.7 fb $^{-1}$ of $\sqrt{s} = 7$ TeV Data with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2012-016
- 85 CMS Collaboration. VH with H to WW to $l\nu l\nu$ and V to jj . CMS-PAS-HIG-13-017
- 86 Dokshitzer Y L, Leder G D, Moretti S, et al. Better jet clustering algorithms. JHEP, 1997, 9708: 001
- 87 Ellis S D, Vermilion C K, Walsh J R. Recombination Algorithms and jet substructure: Pruning as a tool for heavy particle searches. Phys Rev D, 2010, 81: 094023
- 88 Thaler J, Tilburg K V. Identifying boosted objects with N-subjettiness. JHEP, 2011, 1103: 015
- 89 Ellis S D, Hornig A, Roy T S, et al. Qjets: A non-deterministic approach to tree-based jet substructure. Phys Rev Lett, 2012, 108: 182003
- 90 ATLAS Collaboration. Spin Properties Measurements of the Higgs-Like Particle in the $l\nu l\nu$ Channel with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2013-031
- 91 ATLAS Collaboration. H to WW to $l\nu l\nu$ for HCP 2012, ATLAS-CONF-2012-158; H to WW to $l\nu l\nu$ MVA with 2011 data, ATLAS-CONF-2012-060
- 92 Aad G, Abbott B, Abdallah J, et al[ATLAS Collaboration]. Search for the Standard Model Higgs boson in the $H \rightarrow WW(*) \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ decay mode with 4.7 fb $^{-1}$ of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV. Phys Lett B, 2012, 716: 62–81
- 93 CMS Collaboration. Combination of Standard Model Higgs Boson Searches and Measurements of the Properties of the New Boson with A Mass Near 125 GeV. CMS-PAS-HIG-12-045
- 94 CMS Collaboration. Performance of tau-lepton reconstruction and identification in CMS. JINST, 2012, 7: P01001
- 95 CMS Collaboration. Search for the Standard Model Higgs Boson Decaying to Tau Pairs Produced in Association with a W or Z boson. CMS-PAS-HIG-12-053
- 96 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Identification of b-quark jets with the CMS experiment. JINST, 2013, 8: P04013
- 97 CMS Collaboration. Higgs to bb in the VBF Channel. CMS-PAS-HIG-13-011
- 98 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. Search for the standard model Higgs boson produced in association with a top-quark pair in pp collisions at the LHC. JHEP, 2013, 1305: 145
- 99 ATLAS Collaboration. Combined Measurements of the Mass and Signal Strength of the Higgs-like Boson with the ATLAS Detector Using Up to 25 fb $^{-1}$ of Proton-Proton Collision Data. ATLAS-CONF-2013-014
- 100 Eboli O J P, Zeppenfeld D. Observing an invisible Higgs boson. Phys Lett B, 2000, 495: 147–154
- 101 Davoudiasl H, Han T, Logan H E. Discovering an invisibly decaying Higgs at hadron colliders. Phys Rev D, 2005, 71: 115007
- 102 ATLAS Collaboration. Search for invisible decays of a Higgs boson produced in association with a Z boson in ATLAS. ATLAS-CONF-2013-011

- 103 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al[CMS Collaboration]. On the mass and spin-parity of the Higgs boson candidate via its decays to Z boson pairs. Phys Rev Lett, 2013, 110: 081803
- 104 CMS Collaboration. Updated Results on the New Boson Discovered in the Search for the Standard Model Higgs Boson in the ZZ to 4 Leptons Channel in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. CMS-PAS-HIG-12-041
- 105 CMS Collaboration. Properties of the Observed Higgs-Like Resonance Using the Diphoton Channel. CMS-PAS-HIG13-016
- 106 ATLAS Collaboration. Higgs to Gamma Gamma, Spin, for Winter 2013 (Higgs HSG1). ATLAS-CONF-2013-029
- 107 ATLAS Collaboration. Spin Properties Measurements of the Higgs-Like Particle in the $l\nu l\nu$ Channel with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2013-031; Higgs Spin Combination for Winter 2013. ATLAS-CONF-2013-040
- 108 Zhu B, Govoni P, Mao Y, et al. Same sign WW scattering process as a probe of Higgs boson in pp collision at $\sqrt{s} = 10$ TeV. Eur Phys J C, 2011, 71: 1514

Great progress at the LHC: Discovery of the Higgs boson

MAO YaJun*, BAN Yong, LI Qiang*, WANG DaYong, XU ZiJun, GUO Wei,
WEN YiWen, ZHANG ZhaoRu & LI Jing

Department of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

In July, 2012, the CMS and ATLAS experiments at the CERN LHC claimed they have found a new particle with a mass near 125GeV. After that, with more accumulating data analyzed and sophisticated technique exploited, CERN made a further statement on Mar. 14, 2013, that "New results indicate that particle discovered at CERN is a Higgs boson". In this paper, after a brief introduction of the Standard Model Higgs theory and the search results pre-LHC, we present a detailed review on the experimental analyzes leading to the discovery of the Higgs boson at the LHC, based on our own Higgs search experiences inside the CMS collaborations during these recent years, we also mention the status of measuring the mass, coupling strength, spin and parity of the Higgs boson.

particle physics, standard model, Higgs boson, LHC, experimental search

PACS: 12.15.-y, 14.80.Bn, 13.85.-t, 29.85.Fj

doi: 10.1360/132013-350