CMS实验的希格斯性质研究

陈国明*

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

*联系人, E-mail: chengm@ihep.ac.cn

收稿日期: 2021-05-12; 接受日期: 2021-07-22; 网络出版日期: 2021-08-20

国家自然科学基金(编号: 11661141007)和国家重点研发计划(编号: 2018YFA0403900)资助项目

摘要 LHC (Large Hadron Collider)是目前世界上能量最高的强子对撞机. CMS (Compact Muon Solenoid)是LHC上的主要实验之一, 其目标就是要寻找希格斯粒子, 寻找超出标准模型的其他新粒子. 本文简要介绍CMS实验发现希格斯粒子和研究希格斯粒子性质的进展. 目前CMS已经发现了ggH, VBF, VH和ttH等4种产生道, 也看到了4轻子、两光子、WW、 $\tau\tau$ 和bb等衰变道, 确立了希格斯与矢量玻色子的耦合, 也确立了与第三代费米子t, b和 τ 的耦合, 测量了希格斯的质量、宽度、衰变分支比、自旋宇称、产生截面和微分截面, 在误差范围内没有发现与标准模型的明显偏离. 由于现在的研究结果主要来自2016年数据, 误差还比较大, 所有RUN2的数据分析完成以后, 结果预计会有改进.

关键词 LHC, CMS, 希格斯粒子

PACS: 01.30.Vv, 07.77.-n, 14.70.Pw

1 引言

大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC), 设计能量为14 TeV, 设计亮度为 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 在满负荷运行时, 每隔25 ns就有两个质子束团面对面相撞. 每个束团中有 10^{11} 个质子, 每对撞一次平均有26对质子碰上. 在满足负荷运行时强子末态的事例率为 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 10^{-25} \text{ cm}^2 = 10^9 \text{ s}^{-1}$.

LHC的能量最高, 亮度也最高, 处于人类认识微观世界的最前沿. LHC设有4个对撞点, 它们是ATLAS, ALICE, CMS和LHCb, 其中ATLAS和CMS是其主要实验, 这两个实验的目标是寻找Higgs粒子和其他新的物理现象.

LHC和它的四个实验由欧洲核子中心的成员国及其合作者建造. 中国参加了全部四个实验.

紧凑型 μ 子螺线管探测器(Compact Muon Solenoid, CMS)是一台大型通用型的粒子探测器. 总体上看是一个圆柱体, 长13 m, 直径6 m. 束流管是圆柱体的轴, 其直径6 cm, 对撞点位于圆柱体的中心.

围绕对撞点套嵌着各种子探测器, 由内到外, 它们是硅像素(Si-Pixel)顶点探测器、硅微条(Si-Strip)径迹探测器、钨酸铅晶体电磁量能器、黄铜闪烁体夹层强子量能器、超导螺线圈、钨铁和 μ 子探测器. 由于是套嵌结构, 从对撞点飞出的粒子必须先通过内探测器才能到达外探测器. 强子量能器以内是探测器的心脏, 但从外形尺寸来看, 超导线圈、钨铁和 μ 子探测器是

引用格式: 陈国明. CMS实验的希格斯性质研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 092004

Chen G M. Measurements of Higgs properties from CMS (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 092004, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0141](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0141)

其主体, 因此称之为紧凑的 μ 子螺线圈(Compact Muon Solenoid).

径迹探测器中硅像素的空间分辨约是 $15\text{ }\mu\text{m}$, 而硅微条的空间分辨约为 $25\text{ }\mu\text{m}$. 这两个探测器在 4 T 的磁场下工作. CMS实验的动量测量精度, 在带电粒子的动量在 $10\text{ GeV}/c$ 时, 其动量分辨 σ/p 为 5% , 在 $100\text{ GeV}/c$ 时, $\sigma/p=1.5\%$, 这里 p 代表动量, σ 为其测量误差.

电磁量能器由钨酸铅晶体构成, 用以测量电子和光子的能量. 当入射能量为 100 GeV 时, 能量分辨 $\sigma/E=3\%$. 强子量能器由铜板加闪烁体夹层而成, 可以将LHC对撞产生的强子能量全部吸收, 并测量其能量. 但强子能量的测量精度比电子、光子的能量测量要差. 在入射强子的能量为 100 GeV 时, $\sigma/E=10\%$, 主要原因是强子簇射的涨落较大, 特别是其中的中性成分如 k^0 、中子等, 不在取样介质中产生信号, 而 π^0 马上衰变成两个光子, 展开电磁簇射, 而这种次级中性强子的比例对于每个强子簇射并不一致.

CMS μ 子探测器是气体室, 共使用了三种气体室来探测 μ 子, 第一种是漂移管(Drift Tube), 第二种是阴极条室(Cathode Strip Chamber, CSC), 第三种是阻性板室(Resistive Plate Chamber, RPC). 第一种用在桶部, 第二种用在端盖, 第三种在桶部、端盖都使用, 主要用于触发. CMS μ 子动量的测量精度, 在 100 GeV 时为 1.5% , 在 1 TeV 时为 5% . 关于CMS探测器的详细描述可参考文献[1].

我国参加了CMS实验, 为CMS实验研制了三分之一的端盖 μ 子探测器和部分阻性板室, 各项性能指标达到或超过设计要求, 获得国际同行的好评. 图1为安装在探测器上的由中国组研制的阴极条室. 现阶段已转入物理研究工作. 我国科学家提出多变量识别光子方案、希格斯质量测量方案和 t 夸克标记方案被CMS采纳, 在两光子道发现希格斯以及随后在希格斯质量测量和 ttH 发现中做出重要贡献.

LHC在2010–2011年实现了总能量为 7 TeV 的对撞, 在2012年实现了 8 TeV 的对撞. 2012年6月, CMS和ATLAS实验同时发现了质量在 125 GeV 附近的希格斯粒子, 至2012年底RUN1结束. 停机检修2年后, 在2015年实现了 13 TeV 的对撞. 此次运行直至2018年. 2015–2018年的运行称为RUN2. CMS利用RUN2数据对希格斯粒子进行了详细的研究. 2019–2021年4月, LHC和CMS探测器都在进行升级改造.

图 1 (网络版彩图)安装在探测器上的由中国组研制的阴极条室

Figure 1 (Color online) The cathode strip chambers that produced by Chinese group were mounted on the CMS detector.

希格斯粒子找到以后, 标准模型所预言的粒子就全部找到了, 标准模型也达到了辉煌的顶点. 但标准模型也存在诸多问题, 比如不能解释什么是暗物质, 什么是暗能量, 也不能解释物质与反物质的不平衡, 我们需要寻找比标准模型更加普适的理论. 希格斯粒子的发现也打开了一扇研究自然的窗口, 我们可以通过希格斯性质的研究来确定 125 GeV 附近的新粒子是否属于标准模型, 通过理论与实验的对比来确定希格斯的产生和衰变过程是否存在新物理. 目前RUN1的数据分析已经完成, 从CMS RUN1的分析结果来看, 125 GeV 附近的新粒子的性质在误差范围内与标准模型预言的希格斯粒子相符合, 但误差比较大, 还不能确定它就只属于标准模型, 也不能确定希格斯的产生和衰变过程不存在新物理, 还需要进一步研究. CMS RUN2的数据量比RUN1大10倍以上, 可以提高测量精度. 本文先回顾希格斯玻色子的发现, 然后介绍CMS RUN2数据的分析结果. 实际上RUN2中, 2016年的数据分析已经基本结束了, 整个RUN2数据的分析目前还在进行当中. 所以本文将重点介绍2016年数据分析的结果.

2 希格斯玻色子的发现

根据标准模型, 希格斯的产生主要有4种模式. 首

先截面最大的是胶子-胶子熔合, 其次是矢量玻色子熔合, 然后是VH玻色子伴随产生, V代表W和Z, 再其次就是顶夸克对伴随产生.

希格斯的质量不同, 我们的寻找策略也不同. 在质量较轻时(比如110 GeV), 要通过b夸克对、c夸克对、WW、ZZ、 τ 子对、胶子对和光子对来寻找. 寻找希格斯灵敏度与下列因素有关: (1) 信号的探测效率; (2) 质量分辨率; (3) 信噪比. 胶子对和c夸克对淹没在QCD本底里, 几乎没有可能. b夸克对也很难. ZZ和双光子末态则相对容易一些. 质量较大时(比如250 GeV), 要通过WW和ZZ来寻找. 更大时加上顶夸克对来寻找. CMS和ATLAS从各种可能的衰变道寻找希格斯粒子, 最终从双光子末态和通过ZZ到4轻子末态找到了希格斯.

CMS通过双光子末态寻找希格斯. 相对于c, b夸克对和胶子对等强子末态, 双光子末态的分支比要小得多, 但更容易识别. 主要本底来自于QCD喷注中的 π^0 和 η , 它们衰变成两个光子, 但两个光子靠得很近, 被误判成一个光子. 根据标准模型, 高能质子-质子对撞也能产生双光子末态, 这是不可压低本底. CMS利用多个描述晶体量能器电磁簇射形状的变量以及多个描述光子孤立化的变量, 通过神经网络训练来识别QCD本底. 最后在双光子不变质量谱上发现了一个峰, 见图2^[2].

多变量的分析方案是由中国科学院高能物理研究所(高能所)提出来的, 另有其他小组使用简单cut方案证实了峰的存在. 由于多变量分析的灵敏度高于简单cut, CMS采用多变量分析方案的结果为正式结果.

CMS通过ZZ到4轻子寻找希格斯. 希格斯到ZZ的分支比较高, 但Z还要继续衰变. Z衰变到强子的分支比高, 但本底更高, 所以CMS通过ZZ衰变到4轻子来寻找希格斯. 在CMS, 轻子容易与强子区分, 并且有更好的能量分辨. 4个带电轻子的不变质量很窄, 并且本底低. 4轻子道的本底包括不可压低的标准模型ZZ到4轻子的过程, 也包括一些可以压低的本底过程, 比如Z+bb和tt过程, 末态包含两个孤立的轻子和两个与b夸克喷注混在一起的二手轻子. 事例选择要求存在两对味道相同但电荷相反的轻子. 由于 $4e$, 4μ 和 $2e2\mu$ 的本底率和质量分辨不一致导致对希格斯寻找的灵敏度不一致, 三道是分开来分析, 最后合并到一起. CMS要求电子的横动量大于7 GeV, μ 子的横动量大于5 GeV, 并

图2 (网络版彩图) CMS实验双光子不变质量谱. 图中黑点代表数据, 红色线条代表对数据的最佳拟合, 字母S代表信号, B代表本底^[2]

Figure 2 (Color online) CMS di-photon invariant mass distribution. Dots represent data and red line is the best fit to the data, S means signal, B means background [2].

且两者都是孤立的. 图3是CMS得到的4轻子不变质量分布图^[2].

从图中可以看到在125 GeV附近有一个峰. 在Z质量处也看到了另一个更高的峰, 原因是Z衰变到两个轻子, 其中一个轻子辐射出一个光子, 然后转换成一对轻子.

双光子道观测到的显著性是 4.1σ (期望值是 2.8σ), 4轻子道观测到的显著性是 3.2σ (期望值是 3.8σ), 两道合并, 观测到的显著性是 5.0σ (期望值是 4.7σ). 这样CMS就以5倍标准差的显著性观测到了一个质量在125 GeV左右的新粒子, 并且其产生截面乘以衰变分支比在误差范围内与标准模型的希格斯粒子所预言的符合. 实际上ATLAS实验也同时观测到了这个粒子. 两个实验在2012年6月在欧洲核子中心同时召开了新闻发布会, 公开了这一结果. 由于2012年LHC上ATLAS和CMS实验发现了希格斯粒子, 2013年诺贝尔物理学奖发给了Peter Higgs和Francois Englert这两位提出希格斯机制的物理学家.

CMS利用全部RUN1数据通过希格斯到4轻子, 希格斯到WW到两轻子两中微子和希格斯到两光子过程, 确定了希格斯的自旋. 发现自旋为0的假设与数据

图 3 (网络版彩图) CMS实验ZZ→4l分析中4轻子不变质量分布图. 实心圆点代表数据, 带颜色的直方图代表本底. 无填充的直方图代表125 GeV的希格斯信号预期. 右上角插图是 $K_D > 0.5$ 的4轻子不变质量分布, K_D 定义见文献[2]

Figure 3 (Color online) Distribution of the four-lepton invariant mass for the ZZ → 4l analysis. The points represent the data, the filled histograms represent the background, and the open histogram shows the signal expectation for a Higgs Boson of mass $m_H = 125$ GeV. The inset shows the m_{4l} distribution after selection of events with $K_D > 0.5$, as described in ref. [2].

符合, 而自旋为2和自旋为1的假设都被排除, 排除的置信度在99%以上. 在希格斯自旋为0的假设基础上, CMS利用所有RUN1数据, 通过希格斯到4轻子过程进一步确定希格斯是标量粒子还是赝标量粒子, 结果赝标量假设被99.98%置信度排除. 因此希格斯的 $J^P=0^+$ 与标准模型预言符合.

3 希格斯的性质研究

(1) 双光子道和4轻子道的研究

定义信号强度 $\mu = \sigma(\text{观测})/\sigma(\text{SM})$, 如果观测到的事例率与标准模型预测的一致, 则 $\mu=1$. CMS利用2016年获取的对撞能量为13 TeV的35.9 fb⁻¹的数据测量了 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的信号强度. 事例选择与2012年发现希格斯时一样, 使用多变量分析方法识别光子, 并要求第一个光子的横动量大于30 GeV, 第二个光子的横动量大于20 GeV. 同时利用多变量方法区分希格斯的产生途径, 包括ggH, VBF, VH和ttH, 便于观测各个产生道的事例率. 结果观测到ggH, $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的信号强度为 $\mu_{\text{ggH}} =$

$1.10^{+0.20}_{-0.18}$, 对应的信号显著度为6.9 σ . 观测到VBF, $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的信号强度为 $\mu_{\text{VBF}} = 0.8^{+0.6}_{-0.5}$, 对应的信号显著度为1.7 σ . 观测到VH, $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的信号强度为 $\mu_{\text{VH}} = 2.4^{+1.1}_{-1.0}$, 对应的信号显著度为2.6 σ . 观测到ttH, $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的信号强度为 $\mu_{\text{ttH}} = 2.2^{+0.9}_{-0.8}$, 对应的信号显著度为3.2 σ [3]. ggH和VBF产生道与标准模型预言在1倍标准差之内符合. VH和ttH产生道高于标准模型预言1倍标准差, 但小于2倍标准差.

CMS利用全部的2016年数据测量了 $H \rightarrow 4l$ 的信号强度和基准截面. 事例选择与2012年发现希格斯时相同, 要求电子的横动量大于7 GeV, μ 子的横动量大于5 GeV, 并且两者都是孤立的. 电子的横动量阈值高于 μ 子, 是因为电子更加难鉴别. 一般来说电子停留在电磁量能器内, 而强子在电磁量能器内留下部分能量, 大部分能量沉积在强子量能器内. 但有一些强子也与电子一样, 将所有能量沉积在电磁量能器内. 为此CMS发展了一套利用电磁量能器簇射形状的多变量分析方法区分电子和带电强子, 以提高电子的识别能力. 结果测得信号强度 $\mu = 1.05^{+0.19}_{-0.17}$ [4]. 基准截面为 $2.92^{+0.48}_{-0.44}(\text{stat})^{+0.28}_{-0.24}(\text{syst})$ fb, 标准模型预测的基准截面为 2.76 ± 0.14 [4], 两者在误差范围内符合. 同时使用RUN1的数据测量了对撞能量为7和8 TeV的基准截面, 结果总结在图4中[4]. 从图中可见测量结果与标准模型预言在误差范围内符合.

(2) WW, $\tau\tau$ 和bb衰变道的观测

CMS利用全部的2016年数据观测了 $H \rightarrow WW$ 的衰变. 要求两个W都衰变到轻子, 因此事例选择要求两个带相反电荷的轻子, 大的横动量丢失. 总体上事例分成 $e\bar{e}$, $e\mu$ 和 $\mu\bar{\mu}$ 三类. 考虑到胶子熔合, 矢量玻色子熔合, 矢量玻色子伴随和tt伴随产生途径, 每类又根据喷注数分成0, 1和2三类. 由于每类的本底不同, 选择条件也有所不同. 由于在WH和ZH产生道中, W和Z也能衰变到轻子, 因此允许事例中有3个或者4个轻子. 最后综合所有的事例类, 观测到 $H \rightarrow WW$ 的显著度为9.1倍标准差, 对应的期望显著度为7.1倍标准差[5]. 测得信号强度 $\mu = 1.28^{+0.18}_{-0.17}$ [5]. 观测到的事例数超过标准模型预言1倍标准差, 但在2倍标准差内符合.

CMS利用全部的2016年数据观测了 $H \rightarrow \tau\tau$ 的衰变. 观测分两个步骤进行, 先是观测了产生道为胶子熔合

图 4 (网络版彩图) CMS实验测得的希格斯衰变到4轻子的基准截面随 $\sqrt{s}$ 的变化. 图中圆点代表数据, 黑线代表统计误差, 红线代表系统误差, 蓝线代表标准模型预言^[4]

Figure 4 (Color online) The measured $H \rightarrow 4l$ fiducial cross section as a function of $\sqrt{s}$. Dots represent data, error bars from statistics are black and from systematic are red. And blue band represents SM prediction [4].

和矢量玻色子熔合的过程. 根据 τ 的衰变, 将事例分成4类: $e\mu$, $e\tau_h$, $\mu\tau_h$ 和 $\tau_h\tau_h$. 其中 τ_h 代表 τ 的强子衰变产物. 对于 $e\mu$ 事例类, 要求电子横动量大于24 GeV, μ 子横动量大于15 GeV. 对于 $e\tau_h$, 要求电子横动量大于26 GeV, τ_h 横动量大于30 GeV.

对于 $\mu\tau_h$, 要求对于 μ 的横动量大于23 GeV, τ_h 的横动量大于30 GeV, 对于 $\tau_h\tau_h$ 事例类, 要求第一个 τ_h 的横动量大于50 GeV, 另一个 τ_h 大于40 GeV. 对于胶子熔合产生道, 对喷注没有特别要求, 但对于VBF产生道, 要求至少存在两个喷注, 两个喷注的不变质量大于300 GeV. 在两个 τ 都是强衰变的情况下, 要求两个喷注的赝快度之差的绝对值大于2.5, 并且 $\tau_h\tau_h$ 的横动量之和大于100 GeV. 一个 τ 是强衰变, 另一个 τ 轻子衰变的情况下, 要求两个 τ 的衰变产物的横动量之和大于50 GeV. 结果将胶子熔合和矢量玻色子熔合两个产生道综合在一起测得希格斯到 $\tau\tau$ 的显著度为4.9倍标准差, 对应于期望显著度4.7倍标准差, 信号强度为 $1.09^{+0.27}_{-0.26}$ ^[6]. 然后观测了W, Z伴随产生的过程. 同样地, 根据 τ 的衰变, 将事例希格斯到 $\tau\tau$ 的衰变分成4类: $e\mu$, $e\tau_h$, $\mu\tau_h$ 和 $\tau_h\tau_h$, 要求 τ_h 的横动量大于20 GeV. 对于WH产生道, 为了压低tt和Z+jets(喷注)事例, 要求 $e+\mu\tau_h$, $\mu+e\tau_h$ 和 $\mu+\mu\tau_h$ 中两轻子

的电荷符号相同, 并且要求电子的横动量大于26 GeV, μ 子的横动量大于23 GeV. 在 $e+\tau_h\tau_h$ 和 $\mu+\tau_h\tau_h$ 中电子和 μ 子的横动量要求也是26和23 GeV. 为了压低本底, 放弃3轻子事例. 对于ZH产生道, 要求Z衰变到味道相同电荷相反的一对轻子, 不变质量在Z的质量窗口中. 结果将WH和ZH综合起来, 得到信号强度为 $2.5^{+1.4}_{-1.3}$ ^[7]. 将胶子熔合、矢量玻色子熔合和VH产生道综合在一起测得希格斯到 $\tau\tau$ 的显著度为5.5倍标准差, 对应于期望显著度4.8倍标准差, 信号强度为 $1.24^{+0.29}_{-0.27}$ ^[7].

随着数据的积累, 通过bb观测希格斯也成为了可能. CMS利用2017年获取的对撞能量为13 TeV的 41.3 fb^{-1} 的数据通过VH产生道观测了 $H \rightarrow bb$ 的衰变. 末态要求包含两个通过多变量分析方法鉴别的b-jets, 然后按照轻子的个数分成3类: 0, 1和2个轻子. 轻子指的是电子和 μ 子, 要求这些轻子必须是孤立的. 在没有轻子的情形, 要求两个b-jets的横动量分别大于60和35 GeV. 在1个轻子的情形, 要求b-jets的横动量都大于25 GeV. 对于轻子的要求, 电子和 μ 子有所不同. μ 子的横动量要求大于25 GeV, 电子的横动量要求大于30 GeV. 在2个轻子的情形, 2个轻子的横动量以及两个b-jets的横动量都要求大于20 GeV. 然后将3个道合在一起, 得到VH, H到bb的显著度为3.3倍标准差, 对应于期望显著度3.1倍标准差, 信号强度为 1.08 ± 0.26 ^[8]. 最后将所有的希格斯到bb产生道合在一起, 同时将RUN1, 2016和2017的数据合在一起, 得到H到bb的显著度为5.6倍标准差, 对应于期望显著度5.5倍标准差, 信号强度为 1.04 ± 0.20 ^[8]. 图5显示VH道, 2016和2017年数据, 两个b-jets的不变质量^[8].

(3) ttH过程

上述希格斯玻色子的观测都是基于胶子-胶子熔合, 矢量玻色子熔合和VH玻色子伴随产生, ttH产生道由于截面小, 观测非常困难. CMS利用RUN1数据结合2016年数据对ttH过程进行了观测. 衰变道包括WW, ZZ, $\gamma\gamma$, $\tau\tau$ 和bb. 2016年获取的数据, 对撞能量为13 TeV, 总积分亮度为 35.9 fb^{-1} , RUN1数据分成2011年获取的7 TeV 5.1 fb^{-1} 的数据和2012年获取的8 TeV 19.7 fb^{-1} 的数据. 对于希格斯到bb的衰变, 事例选择要求至少有3个通过多变量分析识别的b-jets, 并将事例根据轻子数分成3种类型分别进行分析. 对于0轻子的情形, 具体分析请参考文献[9], 对于1轻子和2轻子的

图 5 (网络版彩图) 2016和2017年数据合并的VH, $H \rightarrow b\bar{b}$ 的两个b-jets的不变质量分布. 黑点代表数据, 红色直方图代表拟合得到的信号, 灰色代表VZ本底^[8]

Figure 5 (Color online) Dijet invariant mass distribution for events in the 2016 and 2017 data sets. Shown are data (points) and the fitted VH signal (red) and VZ background (grey) distributions [8].

情形, 具体分析请参考文献[10]. 这里的轻子指的是电子和 μ 子. 对于希格斯到双光子的衰变, 要求事例中包含两个大横动量光子、轻子和b-jets, 具体的选择条件请参考文献[3]. 对于希格斯到WW, ZZ或者 $\tau\tau$ 的衰变, 要求WW, ZZ最终都衰变到轻子, 因此被称为多轻子道. 这里的轻子指的是电子、 μ 子和强衰变的 τ_h . 多轻子道分析采用了我国高能所组提出的深度神经网络方法, 具体分析请参考文献[11,12]. 对于不同的衰变道统计上是独立的. 2016年数据分析与RUN1的数据分析总的来说是相似的, 但2016比RUN1有所改进. 将RUN1和2016年数据结合起来, 同时将上述所有衰变道结合起来, 得到 $t\bar{t}H$ 过程的显著度为5.2倍标准差, 对应于期望显著度4.2倍标准差, 信号强度为 $1.26^{+0.31}_{-0.26}$.

(4) 质量和宽度的测量

希格斯质量是标准模型中的一个基本的自由参数, 其精确测定可以显著提高标准模型理论的预言能力, 为希格斯其他性质的精确测量检验奠定基础, 对超出标准模型的理论给出了更强的限制. CMS利用2016年数据加RUN1数据, 通过希格斯衰变到4轻子($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$)和希格斯衰变到两光子($H \rightarrow \gamma\gamma$)这两个衰变道测量希格斯质量, 得到迄今最精确的希格斯质量

测量结果: $m_H = 125.38 \pm 0.11(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.})$ GeV, 精度达到0.11%^[13], 如图6所示^[13]. 我国高能所组在4轻子道分析中, 在原先的三维拟合方案基础上提出并实现了利用Z质量约束重新拟合的方法, 同时将该方法与包含每个事例的不变质量分辨率的三维拟合技术共同运用, 显著提升希格斯质量测量的精确度; 在双光子道分析中负责光子识别、光子能量线性检验、电子排除以及利用 $Z \rightarrow \mu\mu\gamma$ 过程验证真光子等; 是内部文章(Analysis Note, AN)撰写单位之一, 为希格斯的质量测量做出了重要贡献.

由于希格斯的本征宽度很窄, 大约4 MeV, 实验的测量误差很大, 目前, 4轻子和两光子的不变质量误差大约是1 GeV, 因此直接测量希格斯的宽度很困难. 但通过在壳(on-shell)和离壳(off-shell)的产率对比可以对希格斯的宽度给予比较精确的限制. CMS使用2016年获取的13 TeV 35.9 fb^{-1} 数据, 2017年的13 TeV 41.5 fb^{-1} 数据, 2011年获取的7 TeV 5.1 fb^{-1} 的数据, 2012年获取的8 TeV 19.7 fb^{-1} 的数据, 以及2015年获取的13 TeV 2.7 fb^{-1} 的数据, 通过4轻子道的在壳($105 \text{ GeV} < m_{4l} < 140 \text{ GeV}$)和离壳($m_{4l} > 220 \text{ GeV}$)的比较, 对HVV的反常耦合参数和希格斯的衰变宽度进行了限制. 为了提高测量的灵敏度, 拟合时充分利用了4轻子及其喷注的4动量信息. 假设不存在HVV的反常耦合, 那么对希格

图 6 (网络版彩图) CMS通过希格斯衰变到4轻子($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$)和希格斯衰变到两光子($H \rightarrow \gamma\gamma$)这两个衰变道测量希格斯质量的结果^[13]

Figure 6 (Color online) A summary of the measured Higgs boson mass in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ decay channels, and the combination of the two is presented here [13].

斯宽度的限制为 $3.2^{+2.8}_{-2.2}$ MeV, 期望的限制为 $4.1^{+5.0}_{-4.0}$ MeV^[14]. 如果放开对HVV的反常耦合的限制, 那么数据对HVV反常耦合和希格斯宽度的共同限制请见图7, 在68%置信度下, 希格斯宽度被限制在[0.5 MeV, 7 MeV]之间^[14]. 其中反常耦合参数 $f_{a3}\cos(\varphi_{a3})$ 的定义请参考文献[14].

(5) 希格斯与费米子及玻色子的耦合测量

CMS使用2016年数据, 对希格斯与费米子及玻色子的耦合进行了综合测量. 分析研究了希格斯到4轻子、两光子、WW、 $\tau\tau$ 、bb和 $\mu\mu$ 的衰变. 对于前三个衰变道, 分别研究了胶子-胶子融合(ggH)、矢量玻色子融合(VBF), VH玻色子伴随产生(VH)和ttH等全部产生道. 对于希格斯到 $\tau\tau$ 的衰变, 研究了ggH和VBF两个产生道. 对于bb的衰变, 研究了VH和ttH产生道. 对于 $\mu\mu$ 的衰变, 研究了ggH, VBF和VH三个产生道. 假设标准模型所有的产生和衰变和实际情况只相差一个共同的因子, 称之为共同的信号强度, 那么可以测得这个信号强度 $\mu=1.17\pm0.10$ ^[15]. 放开产生和衰变的强度有共同调节因子的限制, 但假设衰变道之间的比例与标准模型一致, 则可以测量各个产生道的信号强度 μ_{ggH} , μ_{VBF} , μ_{WH} , μ_{ZH} 和 μ_{ttH} , 结果如图8^[15]所示. 假设希格斯产生道

图 7 (网络版彩图) CMS实验数据对HVV反常耦合参数 $f_{a3}\cos(\varphi_{a3})$ 和希格斯宽度 Γ_H 的限制^[14]

Figure 7 (Color online) The constraints on anomalous HVV coupling parameter $f_{a3}\cos(\varphi_{a3})$ and Γ_H [14].

之间的比例与标准模型一致, 则可以测量各个衰变道的信号强度 $\mu_{\gamma\gamma}$, μ_{ZZ} , μ_{WW} , $\mu_{\tau\tau}$, μ_{bb} 和 $\mu_{\mu\mu}$, 结果见图8^[15]. 在此基础上可以测量希格斯的耦合. 引入 κ 参数来代表实测的耦合与标准模型的偏离:

图 8 (网络版彩图)左图: 拟合得到的各产生道的信号强度. 右图: 拟合得到的各衰变道的信号强度. 黑点代表数据, 蓝粗线代表1倍标准差, 蓝细线代表2倍标准差. 红线代表1倍的系统误差^[15]

Figure 8 (Color online) Summary plot of the fit to the per-production mode (left) and per-decay mode (right) signal strength. The thick and thin horizontal bars indicate the $\pm 1\sigma$ and $\pm 2\sigma$ uncertainties, respectively. Also shown are the $\pm 1\sigma$ systematic components of the uncertainties [15].

$$\kappa_j^2 = \sigma_j / \sigma_j^{\text{SM}}$$

或者

$$\kappa_j^2 = \Gamma_j / \Gamma_j^{\text{SM}},$$

对于标准模型, κ 为 1. 假设在 ggH 和 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的圈图中没有 BSM 的贡献, 我们可以拟合出 κ_W , κ_Z , κ_t , κ_τ , κ_b 和 κ_μ , 结果如图 9^[15] 所示. 耦合与质量的关系见图 10^[15]. 为了将希格斯与费米子的耦合和希格斯与矢量玻色子的耦合放在一张图中, 希格斯与矢量玻色子的耦合做了变形, 放在图中的是

$$\sqrt{\kappa_V} \frac{m_V}{V},$$

其中分母的 V 代表真空期望值, 取 246.22 GeV^[15].

(6) 希格斯的稀有衰变

希格斯与第三代费米子 t , b 和 τ 的耦合已经确立, 但是由于第二代费米子的质量轻, 要确立希格斯与第二代费米子的耦合比较困难. μ 子虽然质量小, 但是信

图 9 (网络版彩图) 假设在 ggH 和 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的圈图中没有 BSM 的贡献, 我们可以拟合出 κ 值. 拟合时 κ_t 取正值. 黑点代表最佳拟合值, 蓝粗线代表 1 倍标准差, 蓝细线代表 2 倍标准差. 拟合中 κ_W , κ_Z 和 κ_b 正负都是允许的, 其中 κ_W 负值被排除在 2 倍标准差之外^[15].

Figure 9 (Color online) Summary of the κ -framework model assuming ggH and $H \rightarrow \gamma\gamma$ loops are resolved and there is no contribution from BSM. The points indicate the best fit values while the thick and thin horizontal bars show the 1σ and 2σ CL intervals, respectively. For this model, both positive and negative values of κ_W , κ_Z , and κ_b are considered. Negative values of κ_W in this model are disfavored by more than 2σ [15].

图 10 (网络版彩图) 希格斯与费米子以及希格斯与矢量玻色子的耦合与质量的关系. 图中 κ_b 取了绝对值. 希格斯与矢量玻色子的耦合形式做了变形. (M, ϵ) 的定义见文献[15]

Figure 10 (Color online) The relation between HVV or Hff coupling and mass. The absolute value of κ_b is shown in the plot. On the plot the HVV coupling is deformed. The definition of (M, ϵ) refers to ref. [15].

噪比高, CMS 利用全部 RUN2 数据 (对撞能量 13 TeV, 共计 137 fb⁻¹), 通过全部 4 个产生道, 寻找希格斯到 $\mu\mu$ 的衰变. 结果以 3 倍标准差观测到了希格斯到 $\mu\mu$ 的衰变迹象. 期望值为 2.5 倍标准差^[16]. 璨夸克 c 的质量比 μ 子大, 但由于信噪比差, 要观测希格斯到 cc 的衰变比较困难. 尽管如此, CMS 利用全部 2016 年的数据通过 VH 产生道对希格斯到 cc 的衰变进行了寻找. 结果给出了产生截面的上限: $\sigma(\text{VH})\text{Br}(H \rightarrow cc) \leq 4.5$ pb, 相当于 70 倍标准模型的截面 (95% 的置信水平)^[17], 期望值为 37 倍标准模型截面. CMS 还利用 2016 年数据观测了希格斯到 $Z\gamma$ 的衰变, 结果也是在 95% 的置信水平上给出了产生截面的上限: 3.9 倍标准模型截面^[18], 期望值是 2 倍标准模型截面.

双希格斯末态的寻找. 根据标准模型, 希格斯存在自耦合, 也就是存在三希格斯顶点. 为此 CMS 利用 2016 年数据从 $bb\gamma\gamma$, $bb\tau\tau$, $bbbb$ 和 $bbVV$ ($V=W, Z$) 末态进行了双希格斯寻找. 结果在 95% 的置信水平上给出了产生截面的上限: 22.2 倍标准模型截面^[19], 期望值是 12.8 倍标准模型截面.

希格斯到不可见的衰变的寻找. 根据标准模型, 希格斯可以衰变到 ZZ , 再衰变到 4 个中微子, 逃脱探测器

的探测, 分支比大约 10^{-3} . 但根据一些非标准模型的理论, 希格斯可以衰变到暗物质, 分支比可以很高^[20-23]. CMS利用2016年数据, 从VBF产生道寻找希格斯到不可见的衰变, 没有看到本底以外的超出, 给出95%置信水平的分支比上限: 33%, 期望值为25%^[24]. 结合全部RUN1数据, 分支比上限为19%, 期望值为15%^[24].

4 总结与展望

CMS已经发现了ggH, VBF, VH和ttH 4种产生道, 也发现了4轻子、两光子、WW、 $\tau\tau$ 和bb等衰变道, 确

立了希格斯与矢量玻色子的耦合, 也确立了与第三代费米子t, b和 τ 的耦合, 测量了希格斯的质量、宽度、衰变分支比、自旋宇称、产生截面和微分截面, 在误差范围内没有发现与标准模型的明显偏离. 不过目前的误差还比较大, 还不能排除BSM的可能性. 希格斯到 $\mu\mu$ 的衰变只有3倍标准差, 到cc的衰变和双希格斯末态则离发现还差很远. 全部RUN2数据的分析结果即将发表, 对于希格斯性质的测量精度将有所提高. 高亮度LHC将进一步提高希格斯性质的测量精度. 对希格斯性质更精确的测量则需要像CEPC这样专门的正负电子对撞机.

参考文献

- 1 Collaboration T C, Chatrchyan S, Hmayakyan G, et al. The CMS experiment at the CERN LHC. *J Inst*, 2008, 3: S08004
- 2 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. 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, arXiv: 1207.7235
- 3 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *J High Energy Phys*, 2018, 2018(11): 185
- 4 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of properties of the Higgs boson decaying into the four-lepton final state in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *J High Energy Phys*, 2017, 2017(11): 047
- 5 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of properties of the Higgs boson decaying to a W boson pair in pp collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Lett B*, 2019, 791: 96–129
- 6 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Observation of the Higgs boson decay to a pair of τ leptons with the CMS detector. *Phys Lett B*, 2018, 779: 283–316, arXiv: 1708.00373
- 7 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Search for the associated production of the Higgs boson and a vector boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV via Higgs boson decays to τ leptons. *J High Energy Phys*, 2019, 2019(6): 093
- 8 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Observation of Higgs Boson decay to bottom quarks. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 121801, arXiv: 1808.08242
- 9 CMS Collaboration. Search for ttH in all-jet final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. arXiv: 1803.06986
- 10 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Search for ttH production in the $H \rightarrow b\bar{b}$ decay channel with leptonic tt decays in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *J High Energy Phys*, 2019, 2019(3): 026
- 11 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Evidence for associated production of a Higgs boson with a top quark pair in final states with electrons, muons, and hadronically decaying τ leptons at $\sqrt{s}=13$ TeV. *J High Energy Phys*, 2018, 2018(8): 066
- 12 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Observation of ttH Production. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 231801
- 13 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. A measurement of the Higgs boson mass in the diphoton decay channel. *Phys Lett B*, 2020, 805: 135425
- 14 Sirunyan A, Tumasyan A, Adam W, et al. Measurements of the Higgs boson width and anomalous HVV couplings from on-shell and off-shell production in the four-lepton final state. *Phys Rev D*, 2019, 99: 112003, arXiv: 1901.00174
- 15 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Combined measurements of Higgs boson couplings in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Eur Phys J C*, 2019, 79: 421
- 16 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Evidence for Higgs boson decay to a pair of muons. *J High Energy Phys*, 2021, 2021(1): 148
- 17 Grinberg M, Maldacena J. Proper time to the black hole singularity from thermal one-point functions. *J High Energy Phys*, 2021, 2021(3): 131
- 18 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Search for the decay of a Higgs boson in the $\ell\ell\gamma$ channel in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *J High Energy Phys*, 2021, 2021(4): 165

- 13 TeV. *J High Energ Phys*, 2018, 2018(11): 152
- 19 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Combination of searches for Higgs Boson pair production in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 121803
- 20 Djouadi A, Lebedev O, Mambrini Y, et al. Implications of LHC searches for Higgs-portal dark matter. *Phys Lett B*, 2012, 709: 65–69, arXiv: [1112.3299](#)
- 21 Baek S, Ko P, Park W I, et al. Higgs portal vector dark matter: Revisited. *J High Energ Phys*, 2013, 2013(5): 036
- 22 Djouadi A, Falkowski A, Mambrini Y, et al. Direct detection of Higgs-portal dark matter at the LHC. *Eur Phys J C*, 2013, 73: 2455, arXiv: [1205.3169](#)
- 23 Beniwal A, Rajec F, Savage C, et al. Combined analysis of effective Higgs portal dark matter models. *Phys Rev D*, 2016, 93: 115016, arXiv: [1512.06458](#)
- 24 Sirunyan A M, Tumasyan A, Adam W, et al. Search for invisible decays of a Higgs boson produced through vector boson fusion in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV. *Phys Lett B*, 2019, 793: 520–551, arXiv: [1809.05937](#)

Measurements of Higgs properties from CMS

CHEN GuoMing^{*}

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The Large Hadron Collider (LHC) exhibits the highest colliding energy in the world. The compact muon solenoid (CMS) is one of the main experiments conducted on the LHC, and its objective is to discover the Higgs boson and new particles. In this report, the discovery of the Higgs Boson and the measurements of Higgs properties using CMS RUN2 data were briefly presented. Higgs production modes— ggH , VBF , VH , and ttH —were observed using the CMS, and decay modes— ZZ to four leptons, diphotons, WW , $\tau\tau$, and bb —were discovered using the CMS. Higgs coupling with vector bosons and third-generation fermions t , b , and τ were measured. Moreover, the Higgs mass, width, decay branching ratio, spin and parity, cross-section, and differential cross-section were studied. The results are consistent with those obtained using the standard model within an error range. The results are mainly obtained using 2016 data, and the errors are large. Nevertheless, the results will be improved when all RUN2 data analyses are published.

LHC, CMS, Higgs particle

PACS: 01.30.Vv, 07.77.-n, 14.70.Pw

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0141](#)