

CMS 实验中希格斯粒子的寻找

陶军全[†] 陈国明^{††}

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2013-11-06 收到

[†] email: taojq@ihep.ac.cn

^{††} email: chengm@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140104

Higgs searches in the Compact Muon Solenoid experiment

TAO Jun-Quan[†] CHEN Guo-Ming^{††}

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

摘要 2012年7月4日, 欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)上进行的两个实验—ATLAS实验和CMS实验, 发现了一个质量大约为125 GeV的新粒子。这个粒子后来进一步被证实, 其与粒子物理标准模型预言的希格斯粒子的属性相吻合。文章首先简单介绍了希格斯粒子及其发现历程, 以及LHC上进行的CMS实验, 然后主要介绍了CMS上希格斯粒子的发现和它的性质的测量结果, 以及中国科学家们在其中做出的重要贡献。

关键词 CMS实验, 希格斯粒子

Abstract On the 4th of July, 2012, the ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) and CMS (Compact Muon Solenoid) collaborations at the Large Hadron Collider (LHC) of CERN announced the discovery of a narrow resonance with mass near 125 GeV, whose properties were proved to be consistent with that of the Higgs boson predicted in the standard model of particle physics. We first present a brief review of the Higgs particle and a short introduction to the CMS experiment. Then the discovery of the Higgs particle, the measurements of its properties, and the contributions of Chinese scientists and engineers are described.

Keywords Compact Muon Solenoid experiment, Higgs particle

1 引言

粒子物理学中的“标准模型”被认为是最成功的物理模型, 这一理论认为, 应当存在自旋为零的粒子, 并且该粒子通过由英国物理学家Peter Higgs等提出的“希格斯机制”, 实现了真空对称性自发破缺, 因此, 这种粒子被称为希格斯(Higgs)粒子。根据标准模型, 希格斯粒子是质量之源, 其他粒子在希格斯粒子构成的“海洋”中游弋, 受它的作用产生惯性并最终有了质量。

标准模型的许多重要预言都得到了实验证实, 然而在理论中起核心作用的希格斯粒子在2012年之前仍未“显形”。若实验能够证实希格斯粒子存在, 将使标准模型得到完善; 反之, 若证实希格斯粒子不存在, 则意味着有超出标准模型的新物理存在, 人们对宇宙的理解也将发生重大变化。由于希格斯粒子在粒子中是质量之源, 同时长期以来实验上又捕捉不到它, 1998年诺贝尔物理学奖获得者Lederman称它为“上帝粒子”^[1]。

2012年7月4日, 欧洲核子研究中心(CERN)

大型强子对撞机(large hadron collider, LHC)上的紧凑缪子(μ)线圈实验(CMS)首先报道了寻找希格斯粒子的最新进展,以 4.9σ 的置信度(后来修正为 5σ , σ 为标准偏差)看到了质量为 125.3 ± 0.6 GeV的新粒子。稍后, LHC的超环面仪器实验(ATLAS)也宣布,以 5σ 的置信度看到了质量为126.5 GeV的新粒子。由于ATLAS的质量测量误差在126 GeV处是1.2 GeV,因此两个实验所看到的新粒子的质量在误差范围内一致,并且两个实验都是主要从双光子道和四轻子道观测到这一新粒子,其特性与科学家们寻找了几十年的希格斯粒子相符合。但由于当时事例数还太少,尚不能排除是其他粒子的可能。

随着数据的累积以及对新粒子性质的仔细研究(包括对它的产生机制、不同衰变模式以及自旋宇称测量等),希格斯粒子的寻找工作取得进展。在2013年3月份的意大利Moriond会议上, ATLAS和CMS国际合作组实验进一步证实了实验上新发现的粒子就是希格斯玻色子。虽然目前的测量结果与标准模型预言的希格斯粒子相吻合,但考虑到比较大的实验误差,还没法排除这个粒子属于其他理论模型,比如超对称模型。

正是因为希格斯粒子在LHC的两个实验上分别被证实,2013年诺贝尔物理学奖才授予了提出该粒子相关机制和理论的两位主要的科学家,比利时科学家弗朗索瓦·恩格勒和英国理论物理学家彼得·希格斯,以表彰他们提出的希格斯机制对于我们了解亚原子粒子质量起源的帮助。

2 LHC和CMS实验

我们的宇宙来自于一次大爆炸。各种基本粒子以及它们的反粒子同时产生。希格斯粒子也在这时产生,它给各种基本粒子赋予了质量,然后就马上衰变了。因此现在我们为了找到它,只能利用大型对撞机模拟大爆炸起始时刻,重新“制造”出希格斯粒子。位于瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)主要就是为了重

新“制造”出希格斯粒子、寻找希格斯粒子而建造的。LHC位于瑞士和法国边界地下大约100 m、周长大约27 km的环形隧道里,其设计的对撞能量为14 TeV。2010年3月开始运行,对撞能量为7 TeV,2011年对撞能量为7 TeV、2012年为8 TeV,2013—2014年为探测器停运检修和升级阶段。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希格斯粒子和其他新物理现象。

LHC的质子—质子对撞实际上是部分子之间的对撞(我们将夸克和胶子统称为部分子),因为质子由多个部分子构成,而被撞上的是其中的一个,其余的都是旁观者。旁观者碎裂成强子,保持其母质子的运动方向,顺着束流管道跑掉了。两个对撞的部分子发生相互作用,其末态粒子将偏离出束流管,从而被探测器探测到。一般来说,偏离的角度越大,越容易探测。绝大多数的末态粒子仍旧是胶子和夸克,它们是不能自由的,在离开对撞点之前就碎裂成大量强子,形成喷注,有的末态是光子,或者 Z^0 ,或者 W^+ ,或者 W^- 加上喷注,还有的是轻子,如电子, μ 子, τ 子加喷注。在高能物理中,像喷注中的 π 、 k 等强子,还有光子、电子、 μ 子都是长寿命粒子,而像 Z^0 、 W^+ 和 τ 等都是短寿命粒子,它们在没出束流管道前就衰变掉了,是没法直接探测的。短寿命粒子最后都衰变到长寿命粒子,飞出束流管,从而被探测器捕捉到。因此,对探测器的一个基本要求是能区分这些长寿命粒子:电子、 μ 子、光子、带电强子和中性强子。末态中还有一种长寿命粒子是中微子(ν),但无法探测,因为它们与物质几乎不相互作用。但我们可以通过动量守恒原理来确定动量丢失。要求 x 、 y 、 z 三个方向的动量相加为0,因为两质子对撞,初始的总动量是0。不为0的部分就是动量丢失。但由于顺着束流管跑掉的部分无法探测,我们将这个方向设为 z ,可以探测的是 x 、 y 两个方向的动量丢失,这两个方向的矢量和叫做横动量丢失^[2]。

CMS探测器如图1所示。总体上看是一个圆

柱体，长约21.6 m，直径约15 m，总重量约12500 t，是目前世界上最重的探测器。束流管是圆柱体的轴，其直径约6 cm，对撞点位于圆柱体的中心。这样对撞产生的粒子，除顺着束流管跑掉的部分，都能够被探测到。围绕对撞点套嵌着各种探测器，由内到外，分别是硅像素顶点探测器、硅微条径迹探测器、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、轭铁和 μ 子探测器。由于是套嵌结构，由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核心，但从外形尺寸来看，超导螺线圈、轭铁和 μ 子探测器是其主体，因此称之为紧凑的 μ 子螺线圈(compact muon solenoid, 简称CMS)。图2是各末态粒子在CMS探测器中的传播和探测^[3]。图中左下角为从对撞点到探测器最外层的一个横向小切片。各种颜色的曲线代表粒子传播的路径，例如红色曲线表示电子在磁场的作用下在径迹室内的路径，其能量最后沉积在电磁量能器里面。

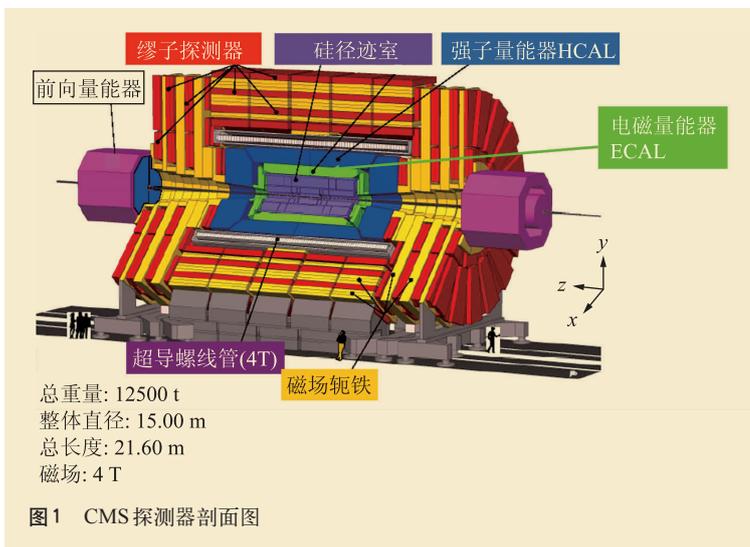


图1 CMS探测器剖面图

3 希格斯粒子的发现

利用大型强子对撞机重新“制造”出希格斯粒子，每亿万次的对撞才有可能产生一个希格斯粒子，并且该粒子会在极短的时间内衰变成其他粒子，因此实验上必须通过希格斯粒子的衰变产物进行探测。然而，希格斯粒子的质量的预言不是一个固定值，而是可以存在于114 GeV到1 TeV

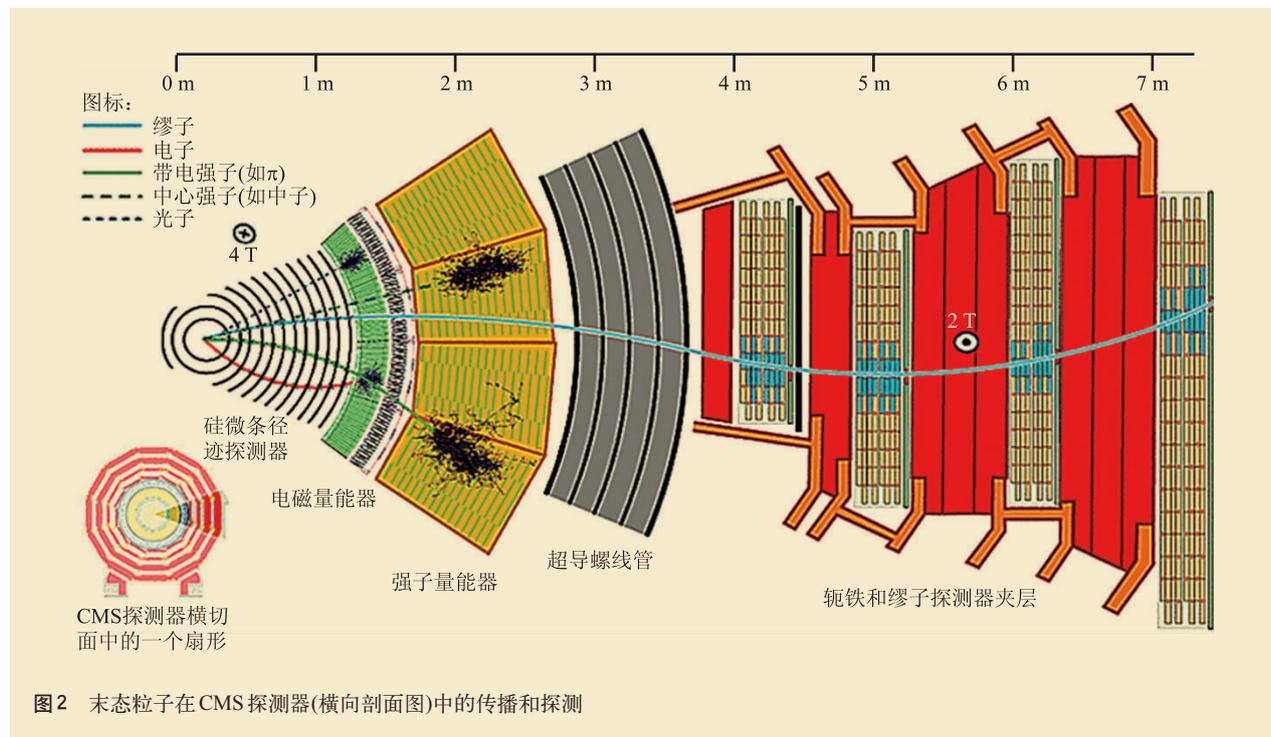


图2 末态粒子在CMS探测器(横向剖面图)中的传播和探测

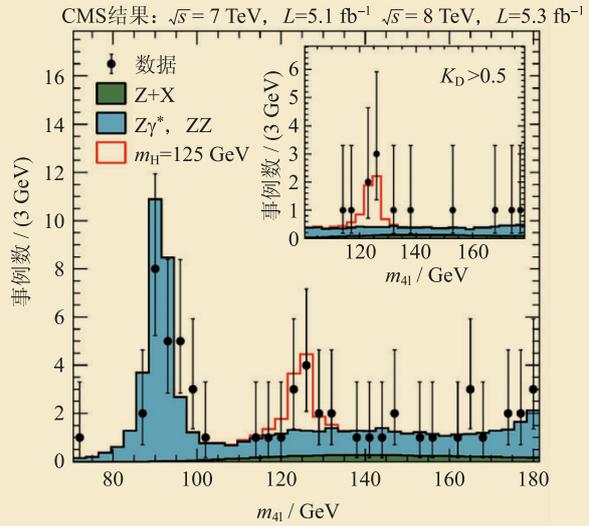
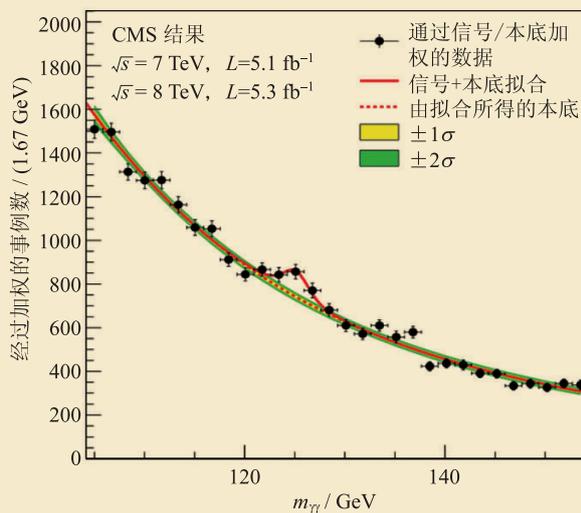


图3 2012年7月4日CMS公布的双光子(左图)和4轻子(右图)的不变质量谱(图中 \sqrt{s} 为对撞能量, L 为积分亮度, K_D 为四轻子末态动力学变量的神经网络输出值)

左右这样一个大的区间,因此我们需要针对各不同质量区间希格斯的产生及衰变的特殊性,采用不同的分析方法来进行寻找或排除的工作。在LHC上标准模型希格斯粒子产生的主要过程,贡献最大的来自于胶子—胶子熔合过程,其次是矢量玻色子熔合(vector boson fusion, VBF)过程,最后是关联产生过程,包括希格斯粒子和W粒子或Z粒子或者顶夸克对的联合产生(WH, ZH, ttH)。标准模型希格斯粒子的衰变主要有两大类:玻色子衰变和费米子衰变。对于大约125 GeV的低质量希格斯粒子,为了避免强子对撞过程中产生的大量QCD本底,在LHC上寻找希格斯粒子时,倾向于通过末态含有轻子或光子的衰变道,而不倾向于通过强子化的末态来进行希格斯的寻找。另外,由于轻子和光子比喷注具有更好的能量重建分辨率,使得轻子或光子等粒子的不变质量峰的宽度更窄。

玻色子衰变中最重要的两个道是双光子衰变($H \rightarrow \gamma\gamma$)道和末态为4轻子的ZZ衰变($H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu/2\mu 2e/4e$)道,它们的特点是包含本底的质量谱上有明显的信号峰,其分辨率大约为1%到2%。图3就是2012年7月4日CMS合作组宣布发现新粒子时给出的,双光子和4轻子的不变质量谱。由双光子的不变质量谱可以看出,该分析道存在

大量的本底事例,包括QCD过程通过胶子熔合以及正反夸克对直接湮灭的真实双光子事例以及假光子本底。ZZ到4轻子过程则可以很好地压制本底,但信号事例数同时也受到了抑制。H \rightarrow WW衰变的末态主要研究过程是2轻子2中微子过程($H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$),这一过程在高质量区域(约2倍于W玻色子质量)的分支比最大,是研究高质量希格斯粒子的最灵敏道,在低质量区域,由于末态中微子丢失而导致的低质量分辨率($\sim 20\%$),使得该研究道对希格斯粒子发现的贡献不是那么重要。低质量区域(~ 125 GeV)H \rightarrow Z γ 的衰变分支比与H $\rightarrow\gamma\gamma$ 差不多,并且具有好的末态重建不变质量分辨率,但由于Z衰变到轻子的分支比,使得H \rightarrow Z γ 的事例率受到抑制,并且该过程存在大量的、不可压制的初态辐射的Drell—Yan本底,所以该过程对希格斯粒子发现的贡献基本上可以忽略不计。

通过费米子衰变研究希格斯粒子的末态主要包括b夸克对和 τ 轻子对。在低质量区域,虽然H \rightarrow bb的分支比最大,但b夸克对碎裂成强子喷注,与普通强子事例很难区分。希格斯粒子衰变到 τ 轻子对的几率也很大($\sim 7\%$),但 τ 轻子也不是稳定粒子,它衰变到轻子加中微子的几率是35%,强子加中微子的几率是65%,而末态强子和中微子

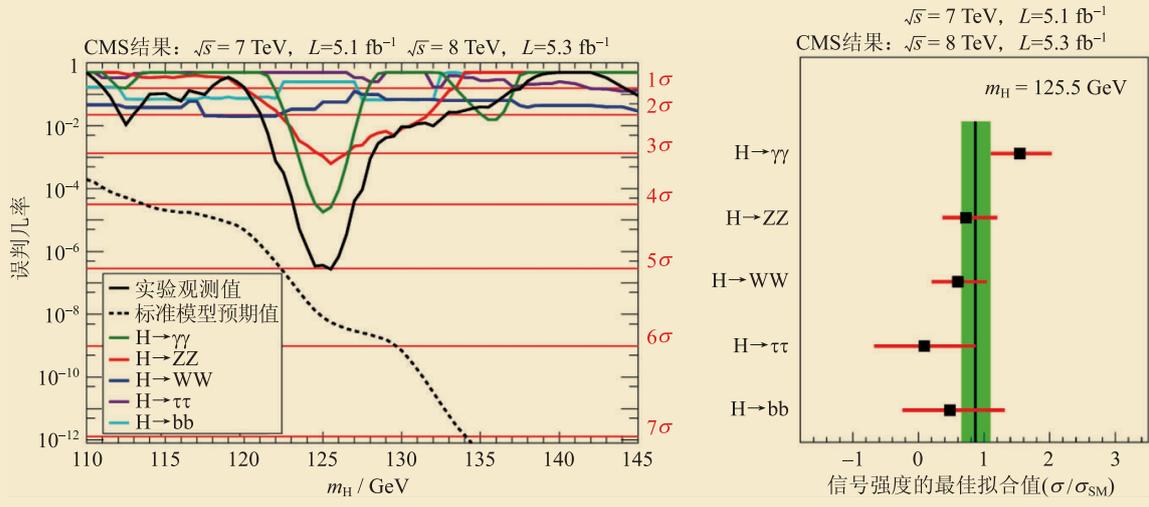


图4 2012年7月4日CMS发现希格斯粒子的显著性(左图)和相对于标准模型预言的信号强度(右图)

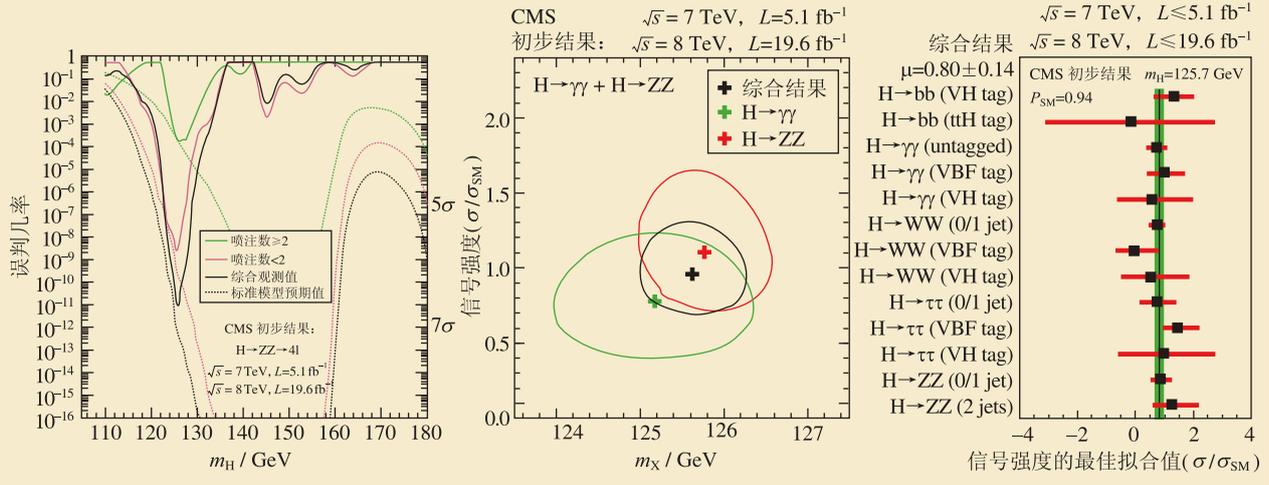


图5 CMS上的最新测量结果 左图为H→ZZ的信号显著性；中间图为希格斯粒子的质量测量；右图为希格斯粒子的信号强度(图中tag为标签，标记为某子过程的事例；jet为喷注； P_{SM} 表示质量为125.7 GeV时，标准模型的几率)

是很难在实验上得到满意的重建结果的。

图4左图给出的是2012年7月CMS合作组通过各衰变道以及当时已有数据结合到一起进行分析时，得到数据中新发现的希格斯粒子的显著性(黑色实线)，在125 GeV左右达到了粒子物理实验中新发现的标准，即5倍标准偏差(σ)。可以看出， $H \rightarrow \gamma\gamma$ (绿色实线)和 $H \rightarrow ZZ$ (红色实线)是CMS试验中希格斯粒子发现最显著的两个衰变道。图4右图给出的是各个衰变道观测到的信号强度(截面)相对于标准模型预言的比值(σ/σ_{SM})，可以看出，在测量误差范围内是与标准模型预言相吻合

的。图中黑色竖直线是各个道结合的结果，绿色阴影为实验上 1σ 的测量误差，信号强度测量结果为 $\sigma/\sigma_{SM} = 0.87 \pm 0.23^{[4]}$ 。

4 新发现粒子的性质

希格斯粒子发现之后，实验物理学家们迫切想尽可能精确地测量它的性质，以验证它是否就是标准模型预言的希格斯粒子。同时，LHC的继续对撞和CMS探测器高于95%的有效数据获取，到2012年底，CMS合作组获取了大约20 fb⁻¹的、

质心对撞能量为8 TeV的数据。结合2011年大约5 fb⁻¹的、质心对撞能量为7 TeV的数据，利用一年的时间，实验物理学家们通过努力分析，新粒子的属性变得越来越清晰。

CMS合作组在~125 GeV处观测到的超出变得越来越明显，单个衰变道的信号显著性已经超过5σ，图5左图给出了H→ZZ的信号显著性，实验观测到6.7σ的超出(图中黑色实线)^[5]。希格斯粒子的质量可以通过H→γγ和H→ZZ到4轻子末态进行精确的测量。图5中间的图给出的是这两个衰变道测得的希格斯粒子质量与希格斯粒子信号强度的二维分布。图中绿色十字为通过H→γγ得到的质量中心值，绿色圈为实验上1σ测量误差，测量结果为125.4±0.5(统计误差)±0.6(系统误差) GeV。图中红色十字为通过H→ZZ测得的质量中心值，红色圈为实验的1σ测量误差，该结果为125.8±0.5(统计误差)±0.2(系统误差) GeV。可以看出，两个衰变道给出的质量测量结果在1σ的测量误差内是自洽的。综合这两个测量道，得到的

希格斯粒子的质量为m_H = 125.7 ± 0.3(统计误差) ± 0.3(系统误差) GeV。图中黑色十字为CMS实验测得的质量中心值，黑色圈为实验的1σ测量误差。结合CMS上已经进行的希格斯粒子的不同衰变道以及事例分类的结果，CMS实验上测得的希格斯粒子的平均信号强度(图5右图中的绿色竖线)为σ/σ_{SM} = 0.80 ± 0.14^[6]。

确定发现的新粒子是否为希格斯粒子，其中最重要的一点是要确定它的自旋宇称。假如新观测到的粒子是希格斯粒子，那么它的自旋应该为0。由于衰变粒子的自旋角动量不一样，其衰变出来的末态粒子的角分布也不尽相同。在实验上，就是通过分析末态粒子的角分布来确定新粒子的自旋和宇称。根据杨—米尔斯(Yang—Mills)理论，由于实验上观测到了双光子末态(H→γγ)的超出，那么新观测到的粒子的自旋就不可能为1^[7]。但是通过H→γγ来研究新粒子的自旋宇称，并不是一个好的选择，因为LHC实验上大量的双光子本底对于自旋宇称分析造成很大的干扰。研究

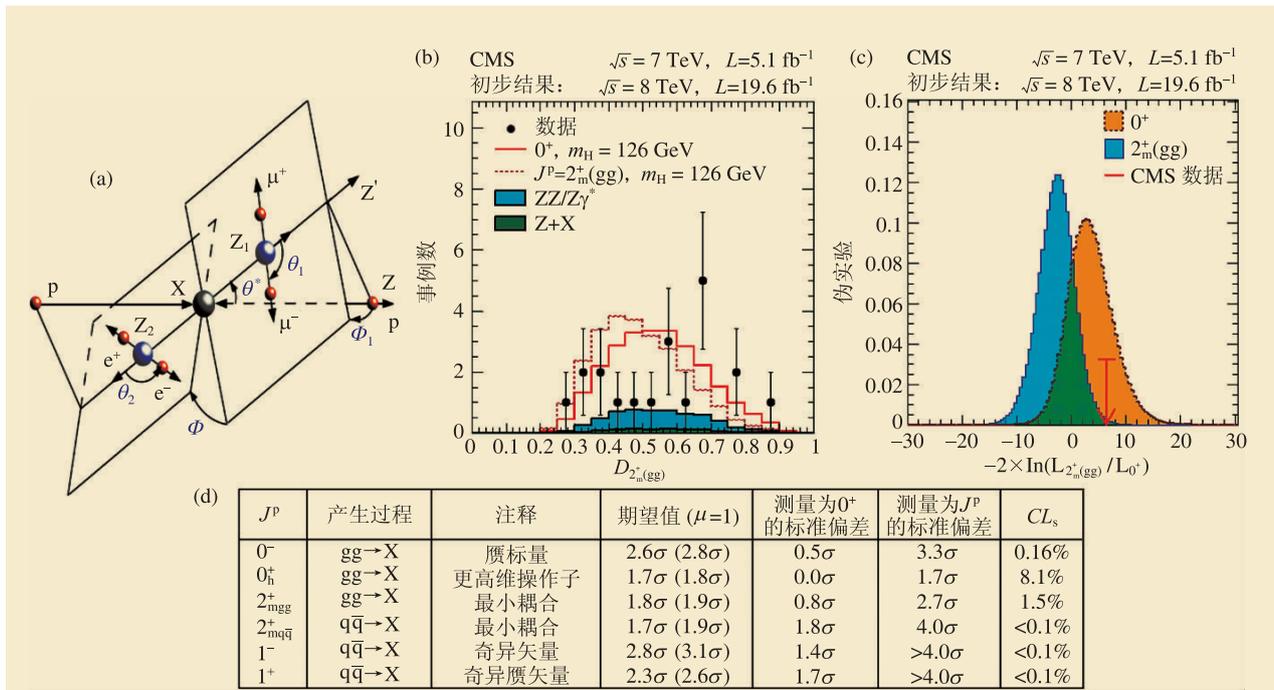


图6 CMS上自旋宇称的测量结果 (a)H→ZZ自旋宇称分析中用到的角分布示意图；(b)H→ZZ分析中结合各个角分布得到多变量分析输出(其中横坐标为区分信号(图中红色实线)和本底(图中有颜色填充的直方图)、不同自旋宇称假设的信号(图中红色实线和红色虚线)之间的多变量分析输出值)；(c)H→ZZ分析中区分0⁺和2⁺的统计分析结果(其中横坐标为统计假设的最小似然法的值)；(d)通过H→ZZ对自旋宇称分析中各个假设的统计分析结果

新粒子的自旋宇称，最灵敏的渠道是 $H \rightarrow ZZ$ 到 4 轻子的末态^[8]。如图 6(a) 所示，在利用 $H \rightarrow ZZ$ 到 4 轻子的末态进行自旋分析中，结合末态粒子之间的角分布 ($\cos\theta^*$, $\cos\theta_1$, $\cos\theta_2$, Φ_1 和 Φ) 以及 Z_1 和 Z_2 的不变质量 (m_{Z1} , m_{Z2})，通过多变量分析 (MVA)，得到能够区分信号和本底并具有不同自旋宇称假设的输出值 (图 6(b))，来进行自旋宇称的统计分析 (图 6(c))。图 6(d) 中的表格给出了通过 $H \rightarrow ZZ$ 对自旋宇称分析中各个假设的统计分析结果。从图 6(d) 表格最后一列 CL_s (只有信号假设的置信水平) 的值可以看出，除了标准模型预言的假设 (0^+)，其他各种假设都在 95% 的置信水平 ($1-CL_s > 95\%$)^[5] 上被排除掉了，即其他各种假设 $1-CL_s > 95\%$ ^[5]。通过 $H \rightarrow ZZ$ 对自旋宇称的分析，新发现的粒子更倾向于标准模型预言的希格斯玻色子。

新粒子的另外一个重要的属性测量就是它与衰变中的矢量玻色子以及费米子的耦合强度，看这些耦合强度是否与标准模型预言的一致。图 7 是结合各个衰变道的结果，给出新粒子与矢量玻色子以及费米子的耦合强度相对于标准模型预言的结果。图中黑色十字为实验测量的中心值，黑色虚线为 95% 置信水平的测量误差，图中红色线交叉处的黄色点为标准模型的预言 (即与矢量玻色子的耦合强度 $\kappa_V=1$ ，与费米子的耦合强度 $\kappa_f=1$)。可以看出，在 95% 的置信水平下，实验测量值与标准模型的预言一致。同时，图中也给出了各个衰变道单独的分析结果。

从 2012 年希格斯粒子发现以来，经过对新粒子属性的分析，CMS 测量的结果表明：(1) 新粒子的衰变分支比和耦合强度基本上与标准模型预言的希格斯粒子的表现相吻合；(2) 通过末态粒子角分布对新粒子的自旋宇称测量，结果 ($J^P=0^+$) 与标准模型的预言相一致，从而进一步证实新发现的粒子就是一个希格斯玻色子。当然，目前的数据

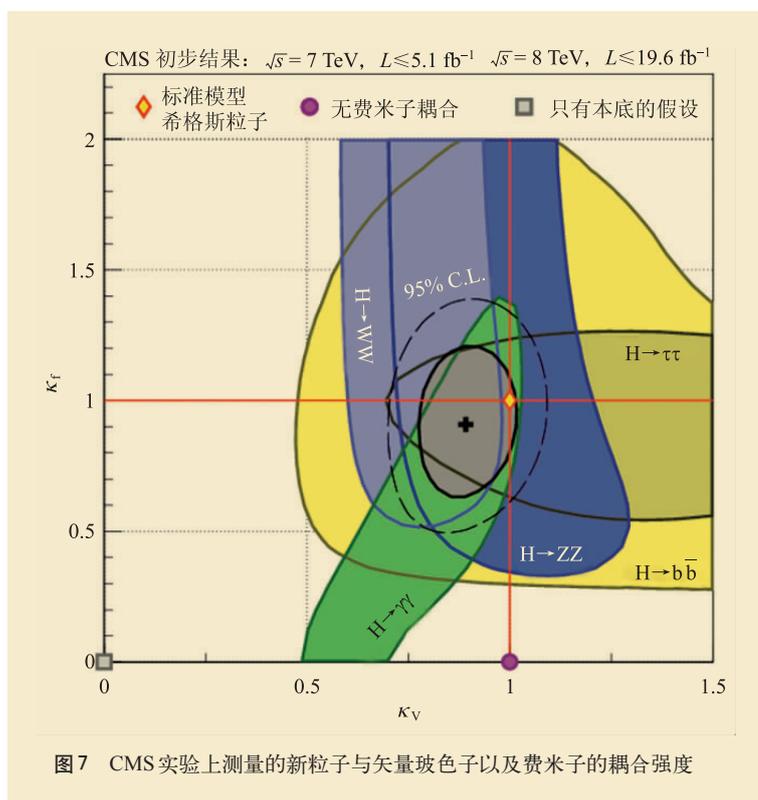


图 7 CMS 实验上测量的新粒子与矢量玻色子以及费米子的耦合强度

结果仍旧不能排除新发现的粒子作为其他理论的希格斯粒子的可能性。

5 中国科学家的贡献

CMS 实验是大型的国际合作组实验，有来自 41 个国家的大约 190 个研究所和大学、包括约 800 位学生在内的近 4300 位科学家、工程师和技术员的参与，其中包括中国的两个研究单位 (合称“CMS 中国组”)——中国科学院高能物理研究所和北京大学。在该实验中，中国科学家做出了重要贡献，不仅对探测器的建造起到重要作用，而且在寻找希格斯玻色子的物理分析中也有出色表现。

CMS 中国组的硬件总贡献占 CMS 探测器建造总经费的大约 1%。在 CMS 探测器的研制建造过程中，中国科学院高能物理研究所研制了近 1/3 的端盖缪子探测器，北京大学研制了部分的缪子触发探测器。这两个缪子探测器是 CMS 从 4 个轻子寻找希格斯粒子的关键子探测器，同时也对 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的探测起到了关键作用。同时，完成了

CMS 部分磁铁支架和桶部漂移室高压分配板的研制, 以及对实验厅地板的支持。中国工程师以及物理学家们参加了 CERN 探测器的现场安装和测试, 以及运行期间探测器性能监测和计算机数据传输、存储等的值班工作。

CMS 中国组的高能所组参加了 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的研究分析, 特别是在本底的排除方面做出了重要贡献。希格斯粒子到两光子的本底分为可抑制和不可抑制两种。可抑制本底指两质子对撞产生了强子, 而强子被误判成光子, 我们把这种误判的光子称为假光子。由于希格斯粒子的产率很低, 而强子本底的产率则比希格斯粒子的产率高 12 个量级, 这好比在一大堆沙子里找出一颗金沙子。因此如何识别假光子寻找希格斯粒子的关键。高能所组近几年来一直致力于真假光子的鉴别^[9, 10], 在数据分析中, 提出了独特的多变量区分强子和光子的方法, 区分效果优于 CMS 的其他小组, 因而被 CMS 合作组采用在希格斯粒子的发现中。不可抑制本底指两质子对撞直接产生两个光子, 而不是来自希格斯粒子的衰变。高能所组与法国组合作, 测量了这种事例的产率, 分析了在这种事例中两个光子的不变质量、动量和夹角分布, 在这些细致的研究中找出不同之处, 对提高希格斯粒子寻找的灵敏度有重要意义^[11]。高能所组指出, 由希格斯粒子衰变的两个光子与两质子对撞直接产生两个光子具有干涉作用, 并给出了由此产生的对希格斯粒子信号的修正因子^[12], 被 CMS 实验采用。同时, 高能所组从 2007 年开始一直致力于 $Z \rightarrow \mu\mu\gamma$ 事例的分析, 该分析道可以得到高纯度和高能量的光子样本, 可以用来对光子的能量重建进行校准, 对光子的鉴别进行验证, 对光子 MC 模拟进行纠正以及对电子排斥能力进行分析, 这些结果都被应用在 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 的数据分析中。

CMS 中国组的北京大学组参加了 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ 的研究分析。该分析利用 2011 年 LHC 7 TeV 对撞的 5 fb^{-1} 和 2012 年 8 TeV 对撞的 5.1 fb^{-1} 数据, 排除了 230—480 GeV 区域的希格斯粒子, 结果通过了内部审查, 并在 2012 年国际高能物理大会(ICHEP)上得到了展示。北京大学组的主要贡献

在如下诸方面: 早期 MC 模拟给出敏感度预期; 2011 数据分析中电子效率的测量; 2012 数据分析所需的信号 MC 样本的产生及检验; VBF 喷注测量及 VBF 道数据分析; 重质量区域信号和模拟的干涉效应, 这些都被 CMS 合作组所采用或重视。另外, 近期该分析道也在向轻希格斯粒子区域特别是 125 GeV 附近移动, 拟采用 MVA 的方法有效重建低质量的信号峰, 并用 2 维拟合方法控制本底, 在这部分工作中也都做出了相当的贡献。

6 总结和展望

从 2010 年 3 月 LHC 开始运行到 2012 年底结束运行, LHC 和 CMS 实验都表现出了优良的预期性能。2012 年 7 月, 希格斯玻色子的发现以及后来实验上的证实, 是人类科学史上的一个里程碑, 是希格斯理论提出 50 年来对科学家们不断辛苦寻找的回报。

希格斯粒子的发现, 并不暗示着粒子物理学研究的终点, 还有许多问题急需解决。比如, 它是怎样的希格斯玻色子, 是标准模型的还是非标准模型的? 尽管在目前实验的误差范围内, 它符合标准模型预言的希格斯粒子的最低要求, 但它也像是最小超对称标准模型(MSSM)中的一个希格斯粒子^[13]。如果它是标准模型的希格斯粒子, 我们需要解释电弱对称性破缺机制。如果 MSSM 模型是正确的, 那么就有可能存在多个希格斯粒子。另外, 一个 125 GeV 的希格斯粒子与其他所有已知质量的粒子(比如顶夸克)放到标准模型里面, 可以预测到真空是不稳定的^[14], 可能有新物理的存在。

同时, 目前 LHC 实验上对于新发现的希格斯粒子的属性测量的精度完全不够, 由于强子对撞存在很大的本底, 对于它是标准模型的希格斯粒子(意味着验证了标准模型)还是标准模型以外的希格斯粒子(意味着发现了新物理), 目前普遍认为 LHC 上的实验无法给出明确的答案, 十分需要未来建造正负电子对撞的希格斯工厂来做精确测量, 例如技术设计较成熟的国际直线对撞机

(ILC)、紧凑型直线对撞机(CLIC)和我国提出的中国环形正负电子对撞机希格斯工厂(CEPC)。

最后,标准模型还存在许多不足之处,它不会是最终的理论,它无法解释宇宙中的暗物质、暗能量、物质与反物质不对称等问题,探索能更

好反映自然界的超出标准模型的新物理将会是粒子物理研究的主要方向。CMS实验同时进行了超对称、超弦模型中新粒子的寻找,但到目前为止,都没找到任何信号,超标准模型的理论还没有被发现或排除。

参考文献

- [1] 陶军全,陈国明. 文明,2012,(12):62
- [2] 陈国明. 现代物理知识,2012,24(1):26
- [3] CMS Collaboration. JINST,2008,3:S08004
- [4] CMS Collaboration. Phys. Lett. B,2012,716:30
- [5] CMS Collaboration. CMS PAS HIG-13-002, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/Hig13002TWiki>
- [6] CMS Collaboration. CMS PAS HIG-13-005, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/Hig13005TWiki>
- [7] Yang C N, Mills R. Physical Review, 1954, 96 (1): 191
- [8] CMS Collaboration. CMS PAS HIG-13-016, <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/Hig13016TWiki>
- [9] TAO J Q, Chen G M *et al.* Chinese Physics C, 2011, 35(3): 269
- [10] XIAO H, TAO J Q *et al.* Chinese Physics C, 2012, 36(10): 979
- [11] CMS Collaboration. Journal of High Energy Physics, 2012, 2012 (1): 133
- [12] TAO J Q *et al.* Mod. Phys. Lett. A, 2013, 28(10): 1350081
- [13] Heinemeyer S. arXiv: 1301.7197 [hep-ph]
- [14] Degrassi G *et al.* CERN-PH-TH/2012-134, RM3-TH/12-9.arXiv: 1205.6497 [hep-ph]

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——<物理>四十年集萃》

的关爱和支持,《物理》编辑部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅两年(2014—2015年)《物理》杂志的订户,将免费获得《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏)。

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址:100190,北京603信箱

《物理》编辑部收

2012年
《物理》创刊
40周年,为
答谢广大读
者长期以来的

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

户名:中国科学院物理研究所

帐号:11250101040005699

(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

咨询电话:(010)82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

