

观察到一种质量为 125 GeV 的新粒子

欧洲核子中心 (CERN), CMS 实验

2012 年 7 月 4 日

提要

今天,在欧洲核子中心 (CERN) 和在澳大利亚墨尔本召开的 2012 年国际高能物理大会“ICHEP 2012” [1] 共同举办的报告会上,大型强子对撞机 (LHC) 上紧凑型缪子线圈 (CMS) 实验的科研人员介绍了他们从截止到 2012 年 6 月所记录的数据中寻找标准模型中的希格斯玻色子所取得的初步结果。

CMS 在质量约为 125 GeV [2] 处观察到事例超出,它在统计学上的显著度高出本底期待值 5 个标准差 (5 Sigma) [3]。本底自身产生这么大 (或更大) 的涨落的几率大约是三百万分之一。此粒子的最强证据显示在质量分辨率最佳的两个末态:首先是双光子末态,其次是具有两对带电轻子 (电子或缪子) 的末态。我们将其解释为是由于产生了一种未曾见过的质量约为 125 GeV 的粒子。

CMS 实验的数据也在 95% 的置信水平上 [4] 排除了在 110-122.5 GeV 和 127-600 GeV 质量范围内标准模型希格斯玻色子存在的可能性—更低的质量范围早已被 CERN 的大型电子-正电子对撞机在同样的置信水平上排除了。

在统计和系统误差范围内,在不同的搜索渠道中得到的结果与标准模型希格斯玻色子的预期一致。然而,要确立到底这种新粒子是否具有标准模型希格斯玻色子应有的全部特征,或者是否有些特征不符合 (从而意味着超出标准模型的新物理), 我们还需要更多的数据。

LHC 还在以引人注目的进度提供新数据。到 2012 年底, CMS 希望现在的数据样本总量翻 3 倍多。这些数据将使 CMS 能进一步阐明这种新观察到的粒子的本性,也将允许 CMS 延伸对很多其他新物理的探索。

CMS 的研究思路

CMS 分析了在 2011 年全年和 2012 年截止到 6 月 18 日收集到的全部数据。其数据量是 2011 年质心对撞能量为 7 TeV 下 5.0 fb^{-1} 的积分亮度 [5] 和 2012 年质心对撞能量为 8 TeV 下的 5.3 fb^{-1} 。

标准模型预言希格斯玻色子在解体 (或“衰变”) 到其他已知粒子之前只存活非常短的时间。CMS 研究了 5 条主要的希格斯玻色子的衰变道。其中 3 条衰变道的产物是玻色子对 ($\gamma\gamma$, ZZ 或 WW), 另 2 条的产物是费米子对 (bb 或 $\tau\tau$), 这里 γ 代表光子, Z 和 W 代表弱相互作用力的传播子, b 代表底夸克, τ 代表陶轻子。 $\gamma\gamma$, ZZ 和 WW 道在 125 GeV 附近寻找希格斯玻色子的过程中具有相等的敏感度, 并且都比 bb 和 $\tau\tau$ 道更敏感。

$\gamma\gamma$ 和 ZZ 衰变道非常重要,因为它们可以用来精确测量新粒子的质量。通过 $\gamma\gamma$ 衰变道,由 CMS 的晶体电磁量能器 (图 1) 测量的两个高能光子的能量和方向来确定新粒子的质量。通过 ZZ 衰变道,新粒子的质量决定于两个 Z 粒子衰变到两对电子、或两对缪子、或一对电子和一对缪子 (图 2), 这些末态粒子是在电磁量能器、内部径迹探测器和缪子探测器中测量的。

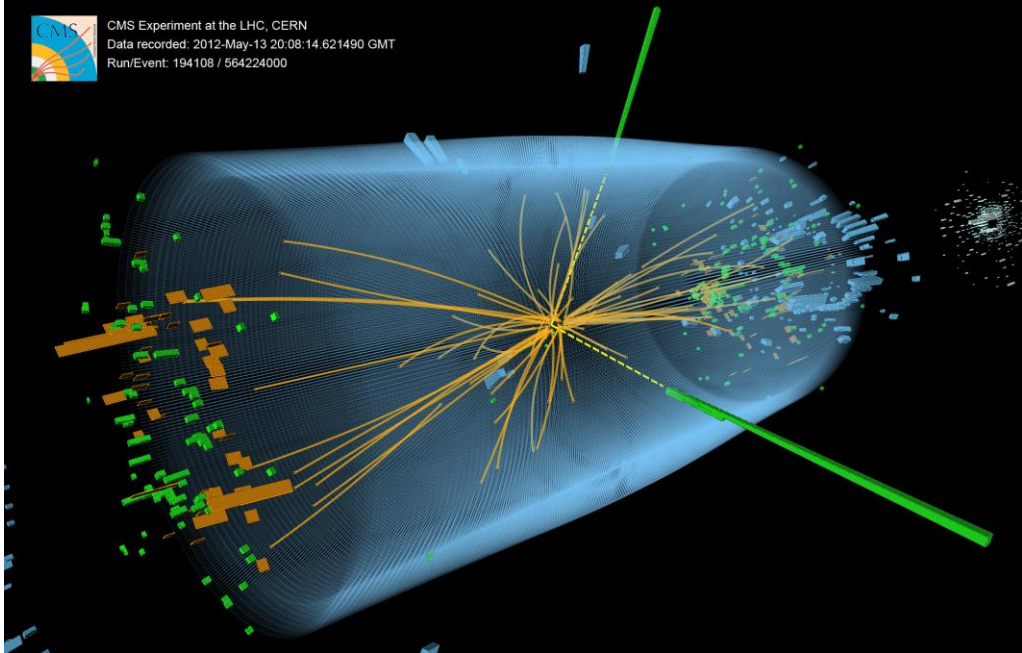


图 1: CMS 探测器 2012 年记录到的一个质子-质子对撞质心能量为 8TeV 的事例。该事例显示从标准模型希格斯玻色子衰变到一对光子 (黄虚线和绿细柱) 所期望的特征。已知的标准模型的本底过程也可能产生这样的事例。

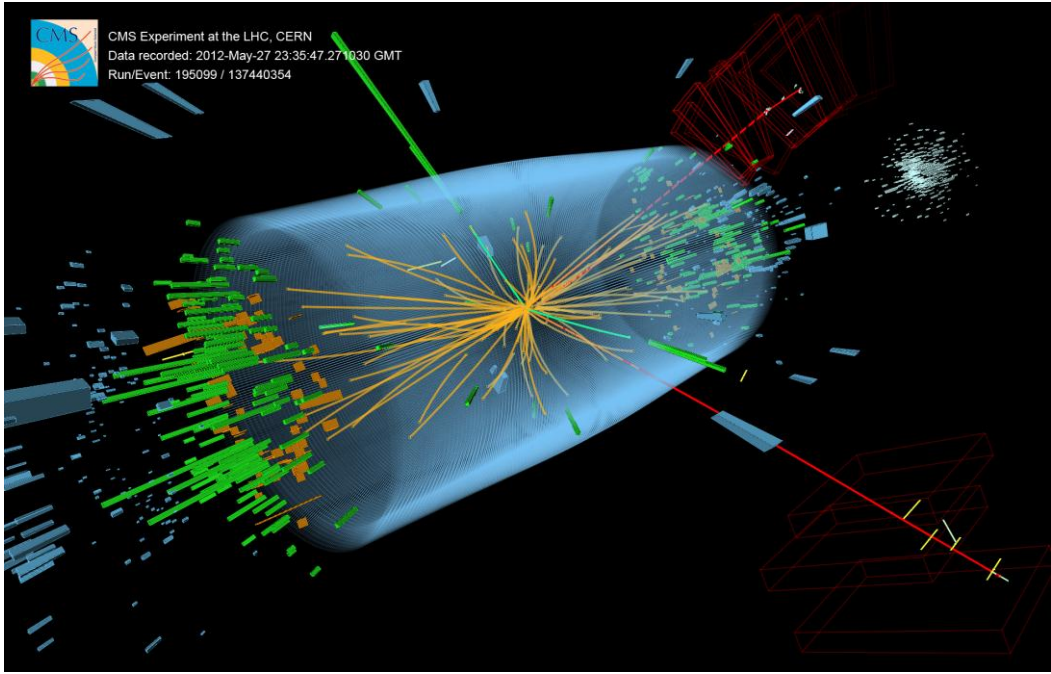


图 2 :CMS 探测器 2012 年记录到的另一个质子-质子对撞质心能量为 8TeV 的事例。该事例显示从标准模型希格斯玻色子衰变到一对 Z 玻色子所期望的特征,其中一个 Z 接着衰变成一对电子 (绿线和绿细柱), 另一个 Z 衰变成一对缪子 (红线)。已知的标准模型的本底过程也可能产生这样的事例。

WW 衰变道更复杂。每个 W 由它衰变成的一个电子和一个中微子或一个缪子和一个中微子来鉴别。中微子将贯穿 CMS 探测器而不留任何痕迹，所以标准模型希格斯玻色子在 WW 衰变道中将展示成质量分布图上的一个较宽的事例超出，而不是一个细高的峰。bb 衰变道有来自标准模型过程的庞大本底，所以我们的分析主要寻找一个希格斯玻色子和一个 W 或 Z 粒子共生、然后衰变到电子或缪子的那些事例。ττ 衰变道是通过观察 τ 衰变成电子、缪子和强子来测量的。

CMS 结果的汇总

如果标准模型希格斯玻色子根本不存在，CMS 的数据样本应该足够敏感，从而可以在 95% 的置信水平上在 110-600 GeV 质量范围内将其完全排除。事实上，CMS 的数据确实已经在 95% 的置信水平上排除了两个很宽的质量范围（即 110-122.5 GeV 和 127-600 GeV）内的标准模型希格斯玻色子。

之所以在质量范围 122.5-127 GeV 内无法排除，是因为在我们分析的 5 条衰变道中的 3 条里看到了事例超出：

1. **γγ 衰变道：** 图 3 是 γγ 的质量分布图，在质量靠近 125 GeV 处有一个高于本底 4.1 个标准差的事例超出。观察到双光子末态意味着新粒子是玻色子，而不是费米子，并且不能是自旋为 1 的粒子。
2. **ZZ 衰变道：** 图 4 是四轻子（两对电子，或两对缪子，或一对电子和一对缪子）的质量分布图。考虑到衰变角度的特征，在质量靠近 125 GeV 处产生了一个高于本底 3.2 个标准差的事例超出。
3. **WW 衰变道：** 在质量分布图上观察到一个高于本底 1.5 个标准差的较宽的事例超出。
4. **bb 和 ττ 衰变道：** 没观察到事例超出。

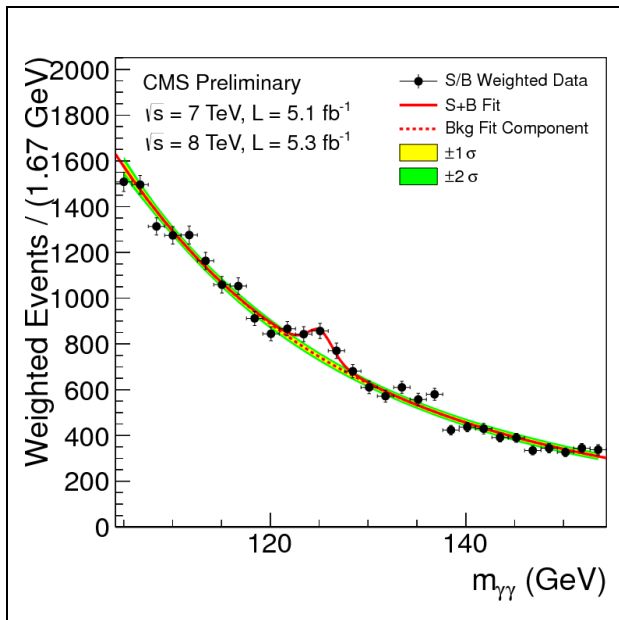


图 3. 2011 年和 2012 年 CMS 数据中的双光子 (γγ) 的不变质量分布图 (带误差棒的点)。这些数据对每一个子类的事例都加了信噪比的权重。实红线显示对信号加本底的拟合结果；实虚线只显示本底，

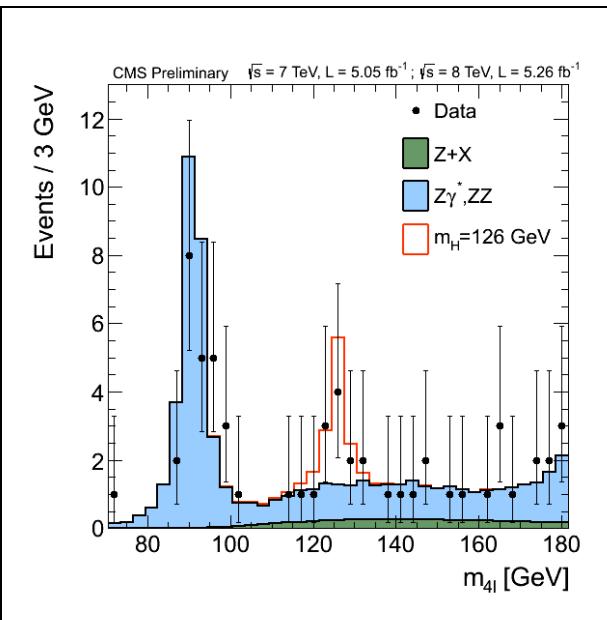
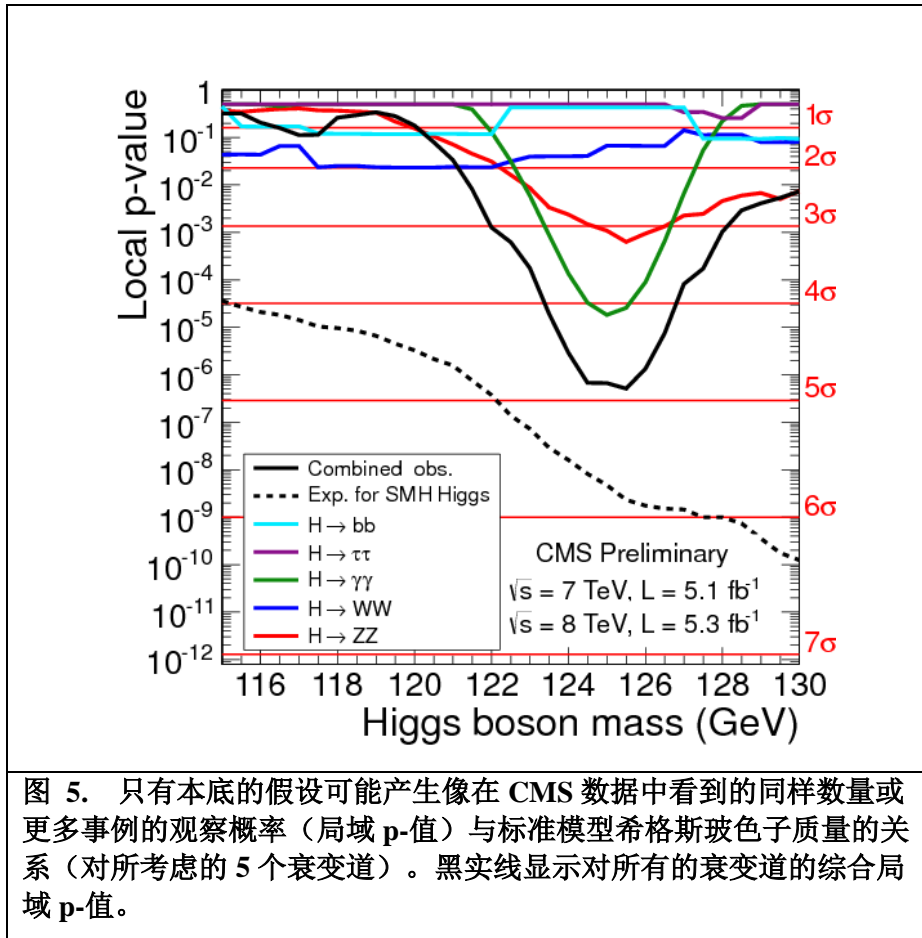


图 4. 汇总了 4e、4μ、和 2e2μ 衰变道的四轻子重建质量分布图。点代表数据，填充了的直方图代表本底，未填充的代表预期的信号。分布图由直方图的堆积来表示。测量包括了在质心能量为 7 TeV 和 8 TeV 收集到的数据总和。

对以上 5 个衰变道的联合拟合（图 5）得到的统计学上的显著程度比本底期待值高出 4.9 个标准差。只对两条最敏感和高分辨率的衰变道($\gamma\gamma$ 和 ZZ)的联合拟合产生了在统计学上 5.0 个标准差的显著程度。本底自身产生这么大（或更大）的涨落的几率大约是三百万分之一。



不管如何假设各衰变道的预期相对产额，新粒子的质量被确定为 125.3 ± 0.6 GeV。测量出来的这种新粒子的产生率(σ_{DAT})与预言的标准模型希格斯玻色子的产生率(σ_{SM})一致：即 $\sigma_{\text{DAT}}/\sigma_{\text{SM}} = 0.80 \pm 0.22$ 。

我们也已经非常仔细地考虑了对诸多细节的理解，如探测器的性能、事例的选择、本底的确和其他各种可能的系统误差和统计误差。我们的 2011 年分析[6]曾显示了在 125GeV 附近的一个事例超出。所以，为了避免对 2012 年数据的事例选择标准产生可能的潜在偏见（即人为加强事例超出），我们对 2012 年的数据分析实行了“盲选” [7]，即不去对有兴趣的质量范围做检验，直到所有的分析判据都被完全仔细核查和审批之后。

作为一个全面的核查，所有的分析都由至少两个独立的团队分头进行。一些其他特点加强了我们对分析结果的自信心：

- 在 2011 年 7TeV 的事例样本和 2012 年 8TeV 的事例样本中都在 125GeV 附近看到了事例超出；
- 在高分辨率的衰变道($\gamma\gamma$ 和 ZZ)都看到了相同质量的事例超出；
- 在 WW 衰变道看到的事例超出与从一个 125GeV 粒子将产生的相一致；
- 事例超出是在包括光子、电子、缪子和强子的一系列末态中都看见了。

今天报告的初步结果将被继续推敲，目标在夏末提交公开发表。

今后的计划

在 125GeV 附近观察到的新粒子，在有限的统计精确度的范围内，与标准模型希格斯玻色子不矛盾。但是，我们需要更多的数据去测量该粒子的特性，如不同衰变道($\gamma\gamma$, ZZ , WW , bb 和 $\tau\tau$)中的衰变率，和最终该粒子的自旋和宇称，从而认定它确实是标准模型希格斯玻色子，还是超出标准模型的新物理的产物。

LHC 继续以绝佳的状态运行着。到 2012 年底，CMS 预期将收集到的数据样本总量会翻 3 倍多，由此将进一步探索这种新粒子的本性。如果此 125GeV 新粒子确实是标准模型希格斯玻色子，它的特性和对标准模型的影响将被仔细地研究。如果它不是标准模型希格斯玻色子，CMS 将探索其中隐含的新物理的本质，那可能包括 LHC 上可能观察到的其他新粒子。不论是哪种情况，我们都将继续研究探索在未来更高的束流能量和流强中运行的 LHC 上可观察的新粒子或新的作用力。

关于 CMS

更多信息可在 <http://cern.ch/cms> 中找到，或请联系：cms.outreach@cern.ch。

CMS 是 LHC 上为了探索新物理而建造的两个多用途实验之一。它被设计成是为了探测在 LHC 的高能质子-质子对撞中产生出来的各式各样的粒子和现象，将能帮助回答一些问题，诸如：宇宙究竟是由什么组成並有什么作用力运作于其中？什么提供万物的质量？CMS 也将会以前所未有的精确度来测量现今已知的基本粒子，同时寻找全新的，出乎预料的现象。这些研究工作不仅会增加我们对宇宙运行的了解，而且最终也会刺激新技术的研发，改变我们的日常生活，就像过去时常发生的那样。

CMS 实验的方案设计可以追溯到 1992 年。建造这个庞大的探测器（直径 15 米，近 29 米长，重 14,000 吨），经过了全世界最大的国际科学合作组之一的 16 年的艰苦努力。此国际合作组集合了遍布全球 41 个国家的 179 个研究机构的超过 3,275 位物理学家（包括 1535 位学生）和 790 位工程师和技术人员。

脚注

[1] ICHEP 的全称是“第 26 届国际高能物理大会，墨尔本，澳大利亚，2012 年 7 月 4-11 日。”此结果将同时报告：现场在 CERN 和实时视频连至 ICHEP 会场。

[2] 电子伏特 (eV) 是个能量的单位。GeV 是十亿电子伏特。在粒子物理中，质量和能量经常互相转换，通常我们用 eV/c^2 作为质量的单位（由爱因斯坦的著名公式 $E = mc^2$ 而来，其中 c 是真空中光速）。更通常的是采用一种自然单位制，将 c 设为 1（从而 $E = m$ ），于是用 eV 和 GeV 作为质量的单位。

[3] 标准差描述一组测量数据围绕其平均值的离散程度。它可以用来定量衡量一组数据相对于一个假设的偏离水平。物理学家使用“Sigma”作为标准差的单位。Sigma 值越高，数据相对于那个假设越远。典型地讲，一个发现越出乎意料，物理学家要求越高的 Sigma 值使他们信服。

[4] 置信水平是一种统计学的度量，看在 100 次测试结果中多少次可被指望落在某一特指范围之内。例如，95% 的置信水平意味着一项测量的结果将在 95% 的时间里符合期望值。

[5] <http://news.stanford.edu/news/2004/july21/femtobarn-721.html>

[6] <http://cms.web.cern.ch/news/cms-search-standard-model-higgs-boson-lhc-data-2010-and-2011>

[7] <http://cms.web.cern.ch/news/blinding-and-unblinding-analyses>