

希格斯粒子及其实验寻找和发现

单连友 金山[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2013-11-01收到

[†] email: jins@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140105

Higgs particle: experimental search and discovery

SHAN Lian-You JIN Shan[†]

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

摘要 希格斯机制引入基本粒子物理的标准模型, 解决了规范对称性自发破缺和粒子质量起源的问题, 希格斯粒子成为粒子物理实验的最重要寻找目标。2012年大型强子对撞机(LHC)上的环状螺线管(ATLAS)和紧凑缪子螺线管(CMS)两个实验, 分别以超过5倍标准偏差的统计显著性发现了与希格斯粒子性质一致的新粒子。

关键词 希格斯粒子, 环状螺线管(ATLAS), 紧凑缪子螺线管(CMS), 大型强子对撞机(LHC)

Abstract The Higgs mechanism bridged the spontaneous breaking of gauge symmetry and the origin of mass, and predicted a neutral scalar particle called the Higgs boson. It has been the most important physics goal of many high energy physics experiments to find the Higgs boson. In 2012, both ATLAS and CMS experiments at LHC observed a new particle which is consistent with the Higgs boson properties with a statistical significance of more than 5 standard deviations.

Keywords Higgs boson, ATLAS, CMS, LHC

1 引言

基本粒子除了具有质量、电荷等属性之外, 还可以具有同位旋、颜色等属性, 这些区别于粒子的动量和时空坐标的属性可以归入“内部空间”。粒子在内部空间的分布(及取向)跟粒子间的相互作用, 这两者之间具有一定的关联性, 即从内部空间来看, 粒子间的相互作用往往具有某种对称性, 内部空间的坐标轴的选取应该不影响物理观测, 此所谓“规范原理”^[1]。规范原理不是简单地就可以体现出来的, 它需要在既定的内部空间引入能跟粒子耦合的某些“规范场”, 当粒子在内部空间转动某一幅度角时, 规范场同时也

要相应地以某些特定的方式转动一下, 以补偿粒子在内部空间变换时所发生的动能损失, 好在规范场和粒子所构成的完整体系可以满足规范原理, 粒子间的相互作用体现为规范场的扰动波在粒子之间的传递。这里指出(略去证明), 规范粒子只能是零质量(也只有横向的两个极化分量)才能保全体系的内部对称性。这样一种物理观念, 使得广泛的物理现象可以通过简短明确形式对称的粒子间的相互作用来描述, 并且仅涉及极少数目的物理参数, 使得理论具有预言能力。然而当“规范不变性”应用到电磁相互作用与弱相互作用的统一描述时, 却遇到了困难^[2]。当时人们已从实验上获悉, 弱作用的力程很短, 被交换的应该是质量较重的粒子。粒子间的相互作用的规范

对称性何以被破坏，粒子何以得到了质量，成为上世纪60年代初基本粒子物理的重要问题。受到电磁波获得有效质量的方法之启发，即把电磁波注入到某种媒质(例如在电子气)中去传播，则电磁场会得到一个惯性质量^[3]，人们设想让基本粒子的相互作用也是沐浴在一种不带电的、没有自旋、没有颜色和味道的凝聚媒质当中。为了使这些媒质不致于流泄散失，还需要有个“势能”把它约束在一起，并且该势能可以具有某种人们期待的内部对称性。由于所谓的“真空自发破缺”的机制^[4]，即使约束凝聚媒质自身的势能具有了对称性，物理上可能实现的真空态却不再拥有该对称性，一俟选定内部空间的某个方向做基态，其他方向上的态就在物理上沦为不可观测的了^[5]。同时，这种媒质所产生的(具有确定能量的)扰动原则上也可以对应一种物理上可以观测的粒子。遗憾的是，如果该媒质真的激发出了具有动能的粒子，就会破坏掉规范原理，这体现在内部空间坐标轴的选取将会依赖于时空点。对于这样的相对论的体系，Higgs P W 于1964年以一个简单的 $U(1)$ 对称性的电磁场作为例子^[6]，从理论上首先将对称性自发破缺跟规范场联系起来，给出了“对称破坏质量起源”这一问题的线索和实例；尽管在此之前 Englert F 和 Brout R 已经注意到规范粒子在简并(对称性破缺)的真空中传播时会获得质量^[7]。Higgs 和 Englert 的这两篇论文极具创造性，为后续的工作提供了观念上和数学上的准备，为此他们两人获得了2013年的诺贝尔物理学奖。借助于 Higgs 的机制，Weinberg S^[8] 和 Salam A^[9] 从1967年开始，陆续实现了 Glashow 试图将电磁相互作用与弱相互作用统一在一起的尝试，成功地建立了粒子物理的标准模型。该模型按前述的“规范原理”引入了总计4个规范场，并以局域对称群的规则建立规范场与真空(凝聚媒质)的耦合。从数学上讲，媒质场的动能将在转动中产生破坏规范对称性，幸好可以同时将矢量场做相应的变换以补偿和恢复预期的对称性；从物理上讲，媒质的一个激发模跟仅有两个极化分量的规范粒子耦合，使得规范粒子得到了纵向

极化，从而获得了质量^[10]。这一机制预言，自然界存在着至少一种不带电的、没有自旋的、没有颜色和味道的基本粒子，它像电子等基本粒子一样，通过交换规范粒子而与这个世界发生作用，它就是为规范粒子提供质量的凝聚媒质的“量子”(激发或扰动)，此后人们称之为希格斯粒子^[11]。

就这样，希格斯机制导致了3个规范粒子中的每一个又吸收了一个振动，变成了拥有质量的、包含三个极化自由度的粒子，其地位既关键又独特。图1摹画了粒子物理的标准模型的大家庭，其中粉色的夸克和浅绿色的轻子这些方块构成了自然界的基石，淡蓝色的方块传递相互作用将这些基石粘合在一起，而灰色的圆球即希格斯粒子，它为所有的基本粒子提供了质量，并以一种还算优雅的方式打破了我们原本不得不依赖的规范对称性。

除了希格斯玻色子之外的图1中所摹画的粒子在1996年之前已经逐一发现，并经受了很精确的实验检验。关于希格斯粒子的质量，从基本原理出发，目前只能从真空的稳定性，微扰论么正性，规范粒子的真空极化等三方面进行粗略估计和限制，理论无法预言其质量的数值大小。在实验上找到希格斯粒子不仅可以确定质量，更为重要的物理意义在于它能检验从规范对称性到真空自发破缺的一整套基本粒子理论体系。

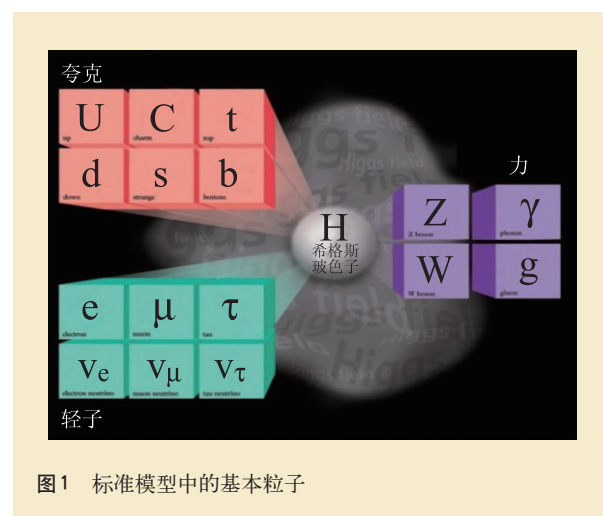


图1 标准模型中的基本粒子

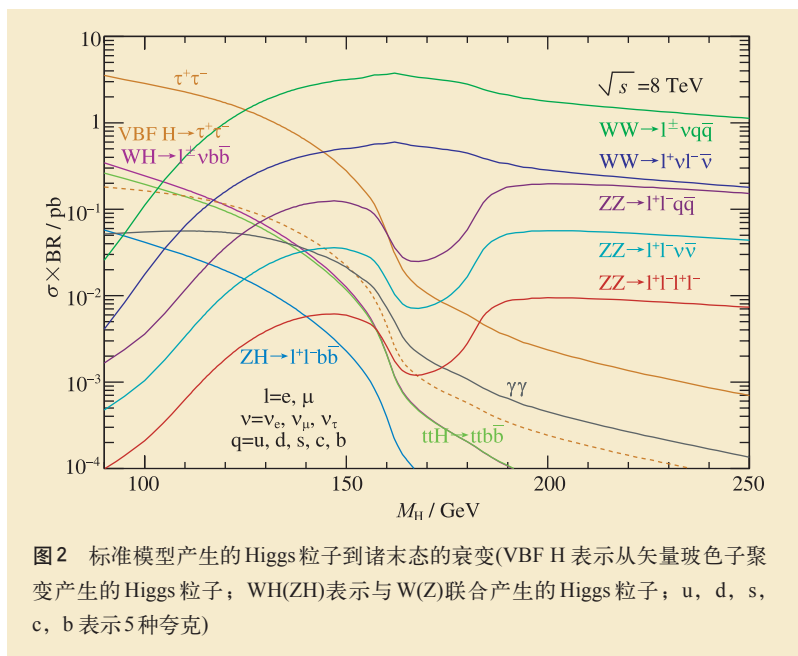


图2 标准模型产生的Higgs粒子到诸末态的衰变(VBF H表示从矢量玻色子聚变产生的Higgs粒子; WH(ZH)表示与W(Z)联合产生的Higgs粒子; u, d, s, c, b表示5种夸克)

2 希格斯粒子的实验寻找和发现

在标准模型的框架下, 对于给定质量的希格斯粒子, 其产生的截面和衰变的末态类型及分支比都是确定的, 在图2中(取自 LHC HIGGS cross section working group, 2012), 例如 $WW \rightarrow l^+ \nu q \bar{q}$ 对应的绿色曲线就表示希格斯粒子产生后随即就衰变到一对 W 粒子, 再级联衰变到轻子(及其中微子)和两个夸克, 这个过程的有效截面随着其质量的变化。从图中可见, 在 150 GeV 以上, 以 WW 和 ZZ 末态为主, 在 130 GeV 以下, 以一对 b, 或一对 τ , 及一对 γ 的末态为主。在不同的粒子对撞机上, 考虑到抑制背景过程的事例的需要, 往往选择不同的产生机制跟衰变末态的组合来寻找希格斯粒子。

2.1 大型强子对撞机(LHC)的实验

在大型正负电子对撞机(LEP, 建造于欧洲核子中心的在瑞士日内瓦城西深埋地下至少 50 m 的隧道里, 周长为 27 km)以及其升级版 LEP II 上, 希格斯粒子与规范粒子 Z 的联合产生最易为观测得到。截至 2001 年, LEP 实验在 95% 置信度上

给出希格斯粒子质量下限为 114.4 GeV。在质子—反质子对撞机(TEVATRON, 它由费米国家加速器实验室建造于芝加哥郊区, 周长为 6.3 km)上, 希格斯粒子与规范粒子 W 的联合产生具有最佳的信噪比, 希格斯粒子衰变到 $b\bar{b}$ 和 WW 两种末态都进行过寻找, 截至 2012 年, TEVATRON 上的 D0 和 CDF 两家实验综合了约 10/fb 的数据, 排除了 100—106 GeV 和 147—179 GeV 两个质量区间。在 115—135 GeV 的质量区间, TEVATRON 也报道了微弱的(相对于背景过程有 2.7σ 的显著度, σ 为标准偏差)的事例超出。

为了寻找希格斯粒子(另一主要目标是寻找超对称理论预言的一些粒子, 它不在本文范围), 欧洲核子中心在 LEP 的隧道里重新建造大型强子对撞机(LHC)^[12]。质子最终将被加速到 0.999999991 倍光速后(即 7 TeV, 但截至 2013 年, 仅是 4 TeV)注入 27 km 的真空管道, 在低温超导磁铁的约束下, 以大约 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的流强运行, 并在 ATLAS 和 CMS 等 4 个地点发生对撞。LHC 是目前世界上能量和亮度最高的粒子加速器。两个质子在 LHC 这样高的能量相向对撞时, 能量主要分布在其内部的胶子成分上, 这导致了胶子—胶子的对撞而产生希格斯粒子的过程, 这一过程在此特别重要。

2.2 ATLAS 实验

ATLAS 是一个在 LHC 上收集并探测质子—质子对撞产物的大型的通用型的粒子探测器(A Toroidal LHC ApparatuS, 缩写为 ATLAS^[13]), ATLAS 的名称源于其采用环状螺线管提供磁场。约 3000 位科学家(其中包括约 30 名中国的科技工作者)在该探测器上所展开的粒子物理实验也统称 ATLAS 实验。ATLAS 探测器总体上拥有 45 m 的长度和 25 m 的直径, 总重量 7000 t, 可分为 4 个

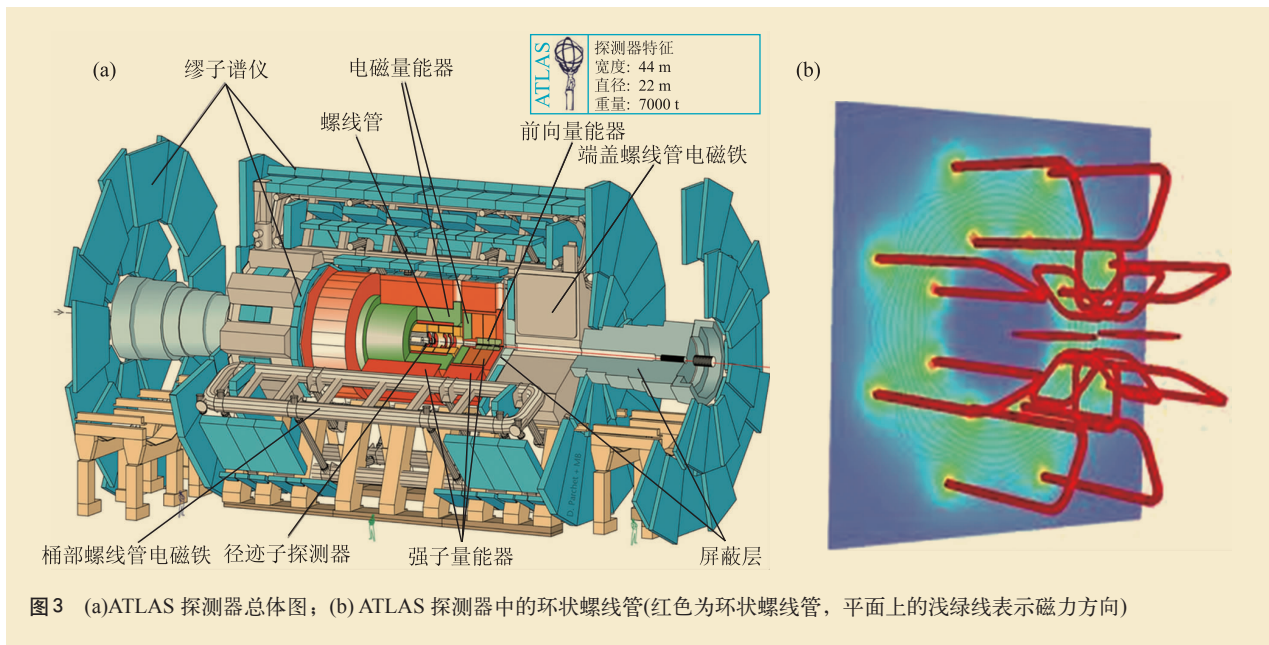


图3 (a)ATLAS 探测器总体图; (b) ATLAS 探测器中的环状螺线管(红色为环状螺线管, 平面上的浅绿线表示磁力方向)

主要部分。

从图3可见,以质子质子束流的对撞点作为中心,向外逐层依次安装的是,内部的径迹探测器,中间的电磁量能器及强子量能器,环状螺线管磁铁系统,和最外层的缪子谱仪。径迹探测器和电磁量能器一起工作可以探测电子;电磁量能器还能很好地探测光子;径迹探测器和缪子谱仪及环状螺线管磁铁系统联合工作可以探测缪子;强子量能器可以探测喷注,它们从夸克或胶子簇射而来。ATLAS探测器经历了多年的经验模拟和实验束的测验,其性能很理想,自2010年以来,它不断地采集和获取LHC上的质子-质子对撞事例数据,经过必要的预处理后,通过欧洲核子中心的计算平台和网络网格(GRID)系统分发到世界各地,供物理学家们从这些事例中寻找希格斯粒子的踪迹。

经过近两年的努力,直到2011年底,实验者在ATLAS和CMS实验中发现,希格斯粒子衰变到一对光子这一过程,以及希格斯粒子衰变到一对Z规范粒子,然后再衰变到4个轻子(电子和缪子)这一过程,似乎有一些迹象。

如果希格斯粒子在LHC的质子对撞中产生,就会通过前述的标准模型的机制(甚或其他某

些机制)衰变成一对光子,光子在ATLAS探测器里会被探测出来。如果两个光子是从希格斯粒子衰变而来,那么双光子不变质量就应该等于希格斯粒子的质量。如果在所有的双光子事例中真的有相当数量来自希格斯粒子,那么某个不变质量区间分布的事例的数目就会“超出”。所谓“超出”就是将其他所有已知的物理过程在双光子事例中的贡献(当然这种贡献是一种背景污染)加在一起,还不足以达到实际探测到的数目。由于夸克或胶子簇射而成的喷注,在探测器看来,一定程度上也会误判作光子,也由于那些已知的其他物理过程在具体的选择双光子事例的程序当中的污染程度并不容易估计,还由于探测器找到光子的效率和能量的测量值总是有一定程度的不可消除的不确定性,双光子事件即使集中到某个不变质量区间,也并不绝对意味着全都是希格斯粒子。实验者们一方面要尽力理解并扣除那些背景污染,以降低实验中的不确定性,另一方面,又要发展复杂的统计方法,来评估实验上观测到的这些“超出量”是来自于这本底过程的可能性,这种可能性愈小,则新物理信号的统计显著性愈高。在四轻子过程甚至其他过程,具有完全类似的情况。

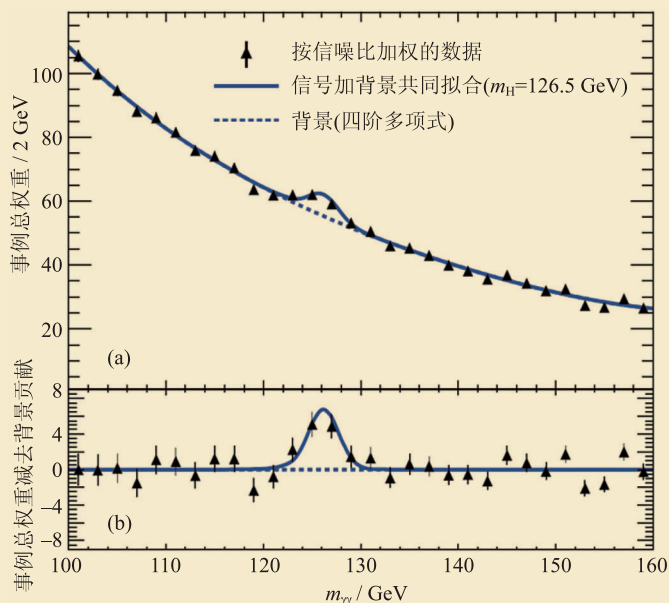


图4 ATLAS实验双光子不变质量(上半部分(a)图的纵坐标为每2 GeV能量间隔当中的事例总权重, 下半部分(b)图则减除了背景的贡献。实心黑色三角形表示观测到的事例数据, 所附带的竖短线之长度表示误差的大小。蓝色虚线表示背景的贡献, 蓝色实线是将背景跟126.5 GeV Higgs粒子信号放在一起拟合得到的事例数据。“额外超出”体现在虚线与三角形明显偏离处(约125 GeV处))

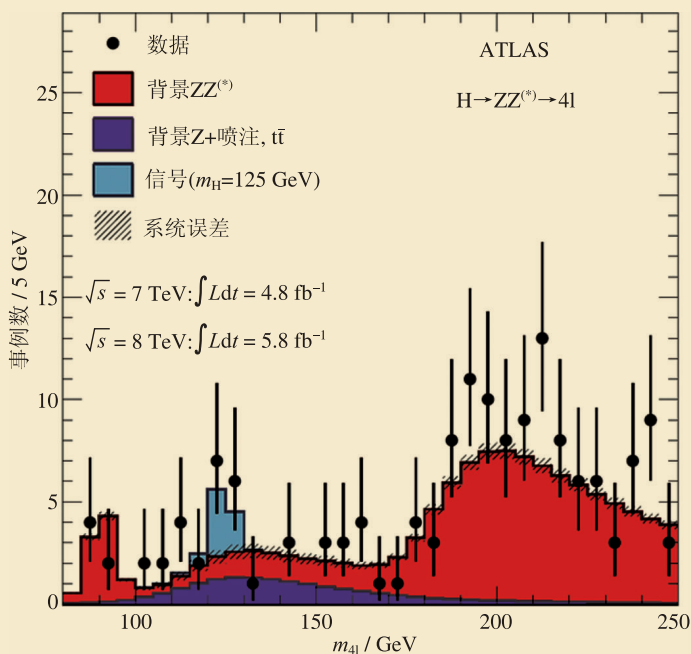


图5 四轻子不变质量, 纵轴为每5 GeV能量间隔当中的事例数目。带竖划线的黑圆点表示观测到的数据。红色为背景中(并非源自Higgs粒子)的一对Z粒子事例之贡献, 紫色表示Z粒子(或许连带喷注)及顶夸克对事例($t\bar{t}$)背景之贡献, 淡蓝色为125 GeV Higgs粒子信号的贡献。斜线厚度表示系统误差的大小。累计分析了质子能为7 TeV(8 TeV)数据的数量是4.8/fb(5.8/fb)

2.3 LHC 实验发现Higgs粒子候选者

经过大量艰辛的工作, 实验者们分析了2011年和2012年两年总共的约10/fb的质子—质子对撞数据, 于2012年7月4日, ATLAS和CMS两个实验组同时但是独立地宣布, 在寻找希格斯粒子的研究中发现了与Higgs粒子性质一致的新玻色子。

以ATLAS实验结果为例^[14], 图4是筛选得到的双光子事例随着不变质量的分布, 可以看到, 在125 GeV附近, 事例有所聚集, 但是根据其他所有的已知的物理过程估计, 在这里至多只能贡献其中的6340个事例, 此外, 尚剩余“额外超出”约200个事例。也有可能这200个额外事例是由于统计涨落, 或者由于我们不完全充分地掌握所有实验细节, 导致低估了背景污染, 造成了虚假“超出”, 但是这个可能性极小, 只有0.000002之概率。所以这些“超出”的事例应该来自与希格斯粒子一致的新物理过程, 统计显著度为4.5个标准偏差。

另一个重要的证据是图5所示的四轻子事例。由图5可以看见, 在125 GeV附近, 已知的直接产生的ZZ和Z+喷注等背景过程的贡献不超过6个事例, 但是在实验中总共观察到了13个事例。如果说由于统计涨落或者实验系统的误差(图5中每个数据点所在的竖划线的长度就表示这些误差的幅度)导致了预期的背景污染过程有所亏缺, 那么这种可能性只有0.0003, 存在新过程(源自Higgs粒子吗?)的显著性为3.4个标准偏差。相反, 如图中淡青色阴影面积所示, 假设此处存在着希格斯粒子产生并衰变到ZZ, 直到四个轻子的过程, 那么超出的7个事例大致能够得到自洽的解释。

希格斯粒子衰变至WW这一过程的

观测,使得所有证据基本完整自洽。这一过程的末态除了一对带电轻子(电子或缪子),还有一对无法探测到的中微子,所以只能观测到希格斯粒子不变质量的“横向(垂直于入射对撞方向)部分”。如图6所示,在很宽的横向质量范围(94—125 GeV),实验数据(带误差的黑色圆点)约有185个事例,对比预期的背景(相应区间累叠起来的彩色部分面积)超出了约43个。考虑到16个事例左右的实验误差,虽然这个实验仅仅给出约2.5个标准偏差的超出,但是它和双光子及四轻子末态的结论基本是自洽吻合的。

将以上三个物理过程的结果进行联合分析,则存在一个类Higgs粒子的统计显著性达到6倍统计偏差,粒子物理实验中新发现的标准是信号显著性为5倍标准偏差,因而ATLAS实验宣布发现了与Higgs粒子性质一致的新玻色子,质量约为126 GeV。CMS实验的联合分析的统计显著性也超过5倍标准偏差,结果与ATLAS实验一致,此处不再赘述。新近的实验数据分析结果公布于HCP2012和Moriond 2013两个国际会议上^[15]。这一结果的公布,除了使人们对希格斯粒子候选者的研究更为细致外,还激发人们在更宽广的范围内去讨论更加深入的希格斯粒子相关问题。

在LHC实验上发现类希格斯粒子被认为是近三十年物理学最重要的新发现。中国物理学家不仅在ATLAS和CMS实验的探测器建造中做出了

贡献,而且直接参与了两个发现类希格斯粒子的实验分析。ATLAS中国组由来自于中国科学院高能物理研究所、中国科学技术大学、山东大学、南京大学和上海交通大学的约30位研究人员组成,中国组在希格斯粒子($H \rightarrow \gamma\gamma$, ZZ^* , WW^*)寻找研究中,提出原创分析方法,在光子触发效率研究、双光子过程和顶夸克对等重要的本底研究等方面发挥主要作用。CMS中国组由来自于中国科学院高能物理研究所和北京大学的约30位研究人员组成,他们在希格斯粒子衰变到双光子过程的寻找研究中,对光子的鉴别提供了关键的识别方法。

3 哪一种希格斯机制?

事实上,从第一节中我们已经看到,标准模型(连同它所预言的希格斯粒子)从上个世纪70年代其理论完全建立的时间来说,将近半个世纪已经过去。它仅仅是我们根据目前已知的部分事实在所探索到的能量不是很高(刚刚几百个GeV)的条件下,对自然界的一个基本有效描述。即使对于已经观测到的现象(比如宇宙中大量的暗物质和正反物质不对称等现象),在标准模型的框架内也很难给出完满的解释。也难相信,在粒子间相互作用的能量越来越高(比如到普朗克能标)时,标准模型依然有效,如下面将提及的研究所指出,那至少意味着,要对理论参数进行相当精细

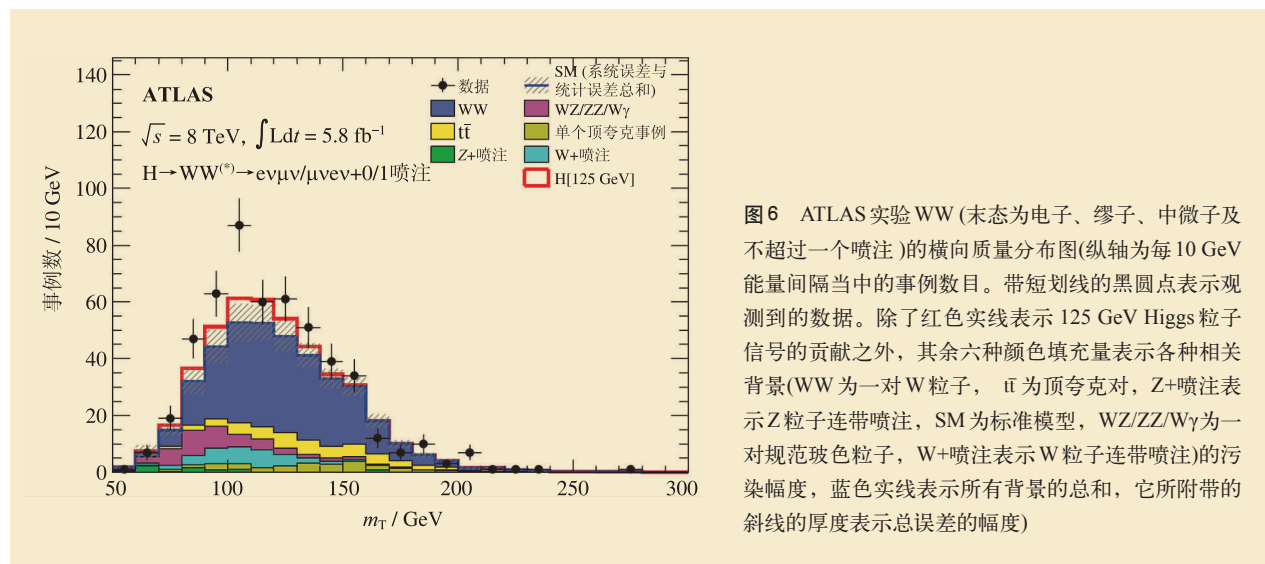


图6 ATLAS实验WW(末态为电子、缪子、中微子及不超过一个喷注)的横向质量分布图(纵轴为每10 GeV能量间隔当中的事例数目。带短划线的黑圆点表示观测到的数据。除了红色实线表示125 GeV Higgs粒子信号的贡献之外,其余六种颜色填充量表示各种相关背景(WW为一对W粒子, $t\bar{t}$ 为顶夸克对, Z+喷注表示Z粒子连带喷注, SM为标准模型, WZ/ZZ/W γ 为一对规范玻色子, W+喷注表示W粒子连带喷注)的污染幅度,蓝色实线表示所有背景的总和,它所附带的斜线的厚度表示总误差的幅度)

的调节(否则标准模型不能在高能量处继续保持有效),该调节是那样的极端精细,是那样的充满人为斧凿之痕迹,实在不像是自然界会有的自然选择。其实在标准模型建立之际,已经有了“超对称”这样的新观念,使得粒子相互作用中自旋为整数的跟自旋为半整数的粒子对偶起来^[16],它对标准模型的扩充虽然比较自然,但还是不可避免地引入了更多的希格斯粒子及超对称粒子。也有可能完全从另一个角度诠释规范对称性的破坏,比如夸克等费米子从来没有得到质量,它们通过交换某种“人工色”而相互作用,在能量低的时候,这种人工色作用变得更强,导致费米子“动力学地”凝聚成另外一种希格斯粒子,这类假说的最新的版本现已演化为“小希格斯”(Little Higgs)模型^[17]。甚至,如果万有引力能与弱电相互作用统一在一起,它可能发生在我们的生活所在的四维时空之外所存在的额外维度,其中引力波或额外维度时空的扰动或激发会影响我们的世

界,包括规范对称性^[18]。目前看来,这些不同的学说均不如标准模型所预言的希格斯粒子更符合LHC观测到的新粒子,尽管如此,却也无法完全排除它们。

为了更好地测量和研究新发现的类希格斯粒子的性质,以确定其是否是标准模型的希格斯粒子,或者存在超出标准模型的新的基本理论,LHC将持续积累数据至2030年。但是由于LHC强子对撞机受到本底的影响很大,在LHC上测量希格斯粒子与其他粒子的耦合强度的精度将受到系统误差的约束。因此粒子物理学家普遍相信,为了使测量希格斯粒子与其他各种粒子的耦合常数能达到1%—5%的精度,建造一个直线或环形的正负电子对撞机的大量产生希格斯粒子的工厂(Higgs factory)是必要的。在质量为126 GeV的类Higgs粒子被发现后,建造下一代基于正负电子对撞的希格斯粒子工厂成为国际高能物理界的讨论热点。

参考文献

- [1] Weyl H. Z. Phys., 1929, 56: 330; Yang C N, Mills R L. Phys. Rev., 1954, 96: 191
- [2] Glashow S L. Nuc. Phys., 1961, 22: 579
- [3] Anderson P W. Phys. Rev., 1963, 130: 439
- [4] Goldstone J, Salam A, Weinberg S. Phys. Rev., 1962, 127: 965
- [5] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Broken symmetries and the Goldstone theorem. Advances in Physics(vol.2). New York: Interscience Publishers, 1967. 567—708
- [6] Higgs P W. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 508
- [7] Englert F, Brout R. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 321
- [8] Weinberg S. Phys. Rev. Lett., 1967, 19: 1264
- [9] Salam A. Weak and Electromagnetic Interactions. Elementary Particle Theory. In: Proceedings of the Nobel Symposium Held in 1968 at Lerum, Sweden. Stockholm: Svartholm, N Almqvist & Wiksell, 1968. 367—377
- [10] 戴元本. 相互作用的规范理论. 北京: 科学出版社, 1987
- [11] Yukawa H *et al.* Prog Theor. Phys., 1955, Supplement 1: 46
- [12] LHC weblink: <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [13] ATLAS weblink: <http://atlas.ch>
- [14] Gianotti F. Status of Standard Model Higgs Searches in ATLAS. In: CERN seminar, Atlas Collab. Physics Letters B, 2012, 716: 1
- [15] HCP2012 weblink: <http://kds.kek.jp/conferenceDisplay.py?confId=9237>, Moriond weblink, <https://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=7411>
- [16] Wess J, Zumino B. Nucl. Phys. B, 1974, 70: 39; Phys. Lett., 1974, 49B: 52; Haber H E, Kane G L. Phys. Rev. C, 1985, C117: 75
- [17] Weinberg S. Phys. Rev. D, 1979, 13: 974; Phys. Rev. D, 1979, 19: 1277; Susskind L. Phys. Rev. D, 1979, 20: 2619
- [18] Arkani-Hamed N, Cohen A G, Georgi H. Phys. Lett. B, 2001, 513: 232; Low I, Skiba W, Smith D. Phys. Rev. D, 2002, 66: 072001