

探寻上帝粒子的踪迹

方亚泉 金山

1. 早期希格斯粒子的寻找

希格斯自发性对称破缺的理论在 20 世纪 60 年代提出。从 20 世纪 80 年代，科学家开始了希格斯粒子，又称上帝粒子的寻找。希格斯粒子是描述基本物质结构的标准模型最后一个未发现的粒子。所以它的发现对于标准模型的完备起着决定性的作用。

但因为这种机制并没有预言希格斯粒子的质量，又因为当时寻找受到加速器技术的限制，寻找的能量只是在几个 GeV（吉电子伏特，1 GeV 相当于 10^9 eV）量级，这比较现在发现的质量 ~ 125 GeV，的确是能量低了点，但科学的探索都是在未知中发展的。在 1984 年位于汉堡的德国电子同步加速器研究所（DESY）的双环储能（DORIS）正负电子加速器上的 Crystal Ball 合作组曾报道在 τ 衰变中 $\tau \rightarrow H + \gamma$ 发现了信号^①。但当时另一个位于康奈尔大学 CESR（康奈尔大学电子存储环）的 CUSB 合作组并没有能证实这个结果。前者后来的数据也没支持这个结果^②。另外位于瑞士的保罗谢勒研究所（PST）的 SINDRUM 合作组和位于康奈尔大学 CESR 的 CLEO 合作组也均无观测到信号。这些实验的探索都最终没有结果。但它们却给了希格斯粒子的质量的一个限制，就是它的质量必须大于 8 GeV 或 9 GeV。

2. 在 LEP 上寻找希格斯粒子

随着加速器技术的发展，大型正负电子加速器（Large Electron Positron Collider，简称 LEP）在法国和瑞士交界处一个位于地下 100 m，27 km 长的圆形隧道建成，并于 1989 年开始运行。它设计的是正负电子质心能量是 200 GeV。基于这个加速器上有 4 个探测器实验 ALEPH、DELPHI、L3 和 OPAL。希格斯粒子衰变主要有 b 夸克和反 b 夸克形成夸克对（ $b\bar{b}$ ），光子对（ $\gamma\gamma$ ），W 玻色子对（ W^+W^- ），Z 玻色子对（ Z^0Z^0 ），和 τ 轻子对（ $\tau^+\tau^-$ ）。LEP 上希格斯粒子的寻找是通过 $e^+e^- \rightarrow Z (\rightarrow l^+l^-, q\bar{q}, \nu\bar{\nu}) H (\rightarrow b\bar{b})$

这个过程。选择这个衰变的原因是它的分支比高。比起后面的强子对撞机，正负电子对撞机相对而言有较干净背景。LEP 第一次运行的数据将希格斯粒子 65 GeV 以下的质量范围给排除了。LEP 第二次运行有一些较为有趣的结果，其中一个实验 ALEPH 发现了第一个质量在 114 GeV 希格斯粒子候选事例之后，一共发现了 10 个质量在 115 GeV 附近的事例^③。虽然现在回过头来看这个质量不是后面发现的 ~ 125 GeV，但 LEP 在运行了 10 年之后关闭时，将能排除的质量的上限提高到 114.3 GeV。这大幅度缩减了寻找希格斯粒子的质量范围。

3. 在 Tevatron 上寻找希格斯粒子

和 LEP 基本同期的在美国费米实验室半径为 1 km 的圆形隧道中建成的 Tevatron 质子-反质子强子对撞机于 1987 年开始运行。它运行的最高质子-反质子的质心能量是 1.96 TeV（1 TeV=1000 GeV）。在这加速器上运行有两个实验：CDF 和 D0 实验。在强子对撞机上希格斯粒子的寻找主要是从胶子融合（gg Fusion），弱玻色子融合（Vector Boson Fusion，又称 VBF），希格斯制动辐射（W/ZH），顶夸克融合（ttH）等四种模式。

在 LEP 停机后的十年中，Tevatron 是唯一能从事寻找希格斯粒子的实验。但与正负电子对撞机上所不同的是，在强子对撞机上的量子色动力学（QCD）的背景较高，Tevatron 积累的较低的数据量还不足以证实希格斯粒子的存在，在低质量区也更不容易将希格斯粒子给排除掉。最终，Tevatron 在 2011 年关机，同年它将希格斯粒子可能的质量区间 156 \sim 177 GeV 给排除掉。2012 年，利用它所收集全部 10 fb^{-1} 数据，这个排除的范围又扩大到了 100 \sim 103 GeV，147 \sim 180 GeV。

4. 在 LHC 上寻找希格斯粒子

大型强子对撞机（Large Hardron Collider，简称

LHC) 是在 LEP 的隧道中建成的质子-质子对撞机。它设计的对撞的质心能量是 14 TeV。在它的环上建有 4 个探测器: ATLAS、CMS、LHCb 和 ALICE。LHC 是一个传奇的加速器, 即便是第一年运行的能量 7 TeV, 也远远超过上一个对撞机 Tevatron 的 1.96 TeV。但它的运行不是一帆风顺的。2008 年 9 月 19 日, 在 LHC 运行了不到 10 天, 两块磁铁之间的电连接部件的差错导致了机械的损伤和液氦泄漏。LHC 在这次事故后长时间处于沉默。在一段时间的等待之后, 不少科学家又转移到 Tevatron 上进行新物理的寻找。一年之后, LHC 重振雄风, 在短暂的 900 GeV 热身运行之后, 立即于 2011 年进入 7 TeV 的运行。2012 年又刷新自己创造的记录, 进入 8 TeV 的运行。不仅如此, 如图 1 所示, LHC 的亮度也飞速增长(意味着收集的数据量增多)。

ATLAS 和 CMS 探测器分别是目前世界上最大和最重的人造探测器。以 ATLAS 探测器为例, 它长 44 m,

截面直径 25 m, 重 7000 t, 相当于一个埃菲尔铁塔的质量, 或 100 架波音 747 的质量。它们的设计是通过测量末态粒子: 光子、轻子 (e, μ) 和喷注 (jet) 等可以重建出研究的粒子(比如希格斯粒子)衰变前的状态和性质。因此, ATLAS 和 CMS 是由径迹探测器(测量带电粒子的径迹得到该粒子的动量状态)和对应的产生磁场的磁装置、电磁量能器、强子量能器和 μ 子量能器组成的。

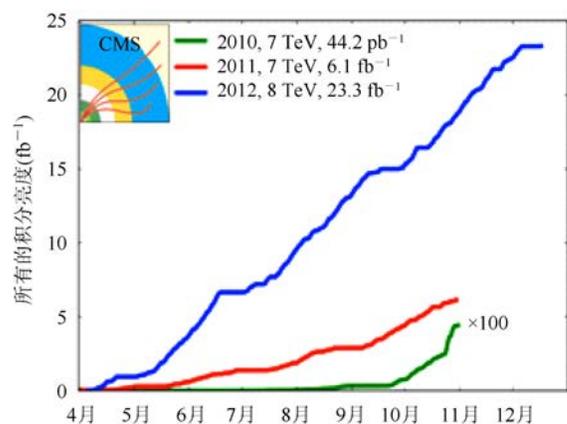
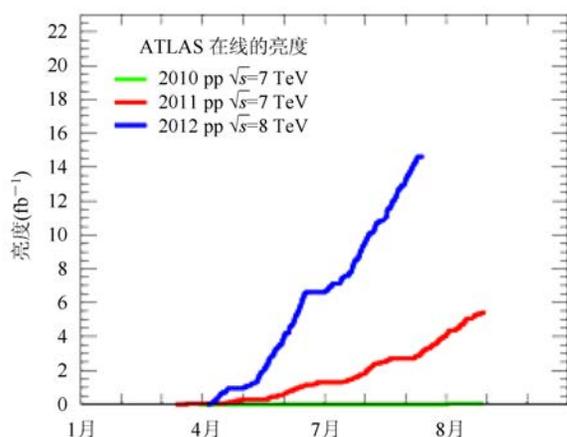


图 1 2010、2011 和 2012 年, ATLAS (a) 和 CMS (b) 收集数据的亮度

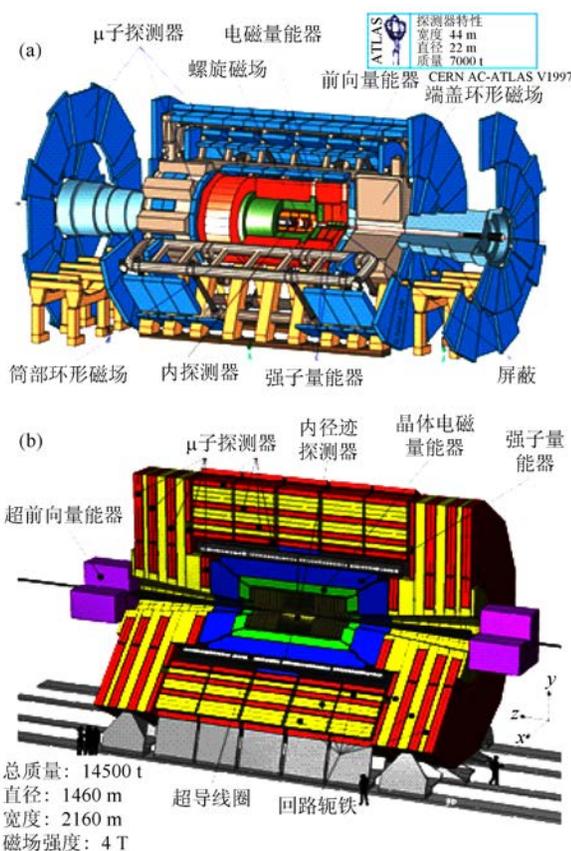


图 2 ATLAS (a) 和 CMS (b) 探测器示意图

在如前所说的各个衰变道中, 希格斯粒子衰变到 $b\bar{b}$ 具有较高的分支比。但强子对撞机上的 QCD 背景量太多, 再加上这个重建的质量峰太宽, 因此不能作为发现道。另一个衰变道 $\tau^+\tau^-$ 中, 如果是强子衰变同样受到 QCD 背景影响较大。轻子衰变又受无法探测到的中微子影响不能重建希格斯粒子的质量峰。 W^+W^- 衰变道也为了减少 QCD 背景的影响只能在低质量区采用 $W \rightarrow l\nu$ 的衰变过程, 所以同样无法重建质量峰。但这个道的事例数较多, 如果能对背景的估算较可靠, 也是可行的一个道。 Z^0Z^0 衰变道伴随 Z 衰

变到轻子道的特点是可以重建希格斯粒子的质量，有较好信号背景比。但它的统计量不是很高。 $\gamma\gamma$ 道的特点是除了它可以重建希格斯粒子的质量峰，它还有很好的边带 (sideband) 来估算背景在信号区的大小。该分析难度就是背景比较强，信号的质量峰难以从中脱颖而出。通常情况下，希格斯粒子的分析会根据信号和背景比值不同将事例分为不同的类，然后再将其合并起来。比如说可以将事例根据喷注 (jet) 数分为三类 (0 jet, 1 jet, 2 jets)。双光子也分为 2 jets 和非 2 jets 类。两者又进行进一步的细分。这种分类看似随机但却也和它的物理机制相联系在一起。CMS 分析不少用了多变量分析方法 (multivariate analysis)。ATLAS 主分析中大都用了切割 (cut) 为基础的分析方法。前者比较激进，后者比较保守。如果对数据理解较好，前者因为用了分析变量的形状信息，故可以提高分析敏感度。后者的好处是在分析的初期对数据的理解不是很深入时会确保分析的牢靠。

2011 年上半年，ATLAS 和 CMS 都没有观测到任何希格斯粒子的迹象。但在下半年，ATLAS 和 CMS 在 W^+W^- 衰变道低质量区 145 GeV 和 120 GeV 观测到 2σ 效应。如前所说， W^+W^- 衰变道无法重建希格斯粒子质量峰，所以该道观测到的质量却无实际意义，但它却暗示着希格斯粒子有可能在低质量区。随后在 2011 年底的 CERN Council 会议上 ATLAS 和 CMS 在双光子道和 Z^0Z^0 道 125 GeV 附近都出现超过 2σ 效应。如果将各个道合并起来，ATLAS 和 CMS 分别观测到 3.6σ 和 2.6σ 的效应。通常 3σ 被认为是观测到新粒子的证据。

5. 希格斯粒子的发现

2012 年，LHC 以 8 TeV 运行，于当年初夏，收集了足够的数，ATLAS 合并各个道，在质量为 126.5 GeV 观测到 5σ 效应。类似地，CMS 在质量为 125 GeV 观测到 4.9σ 效应，在高能物理行业， 5σ 通常被认为是发现了新粒子。另一个宣称发现的重要条件是两个独立的实验都能观测到类似的信号。此时，这两个条件都具备了！2012 年 7 月 4 日，在 CERN 的礼堂举办了报告会，宣称了发现了新粒子。笔者之一当日早上 5 点去排队入会场被告知位置已经被占

满。当天提出希格斯理论部分作者恩格勒特 (Francois Englert)、希格斯 (Peter Higgs)，古拉尔尼克 (Gerald Guralnik) 和哈根 (Carl Richard Hagen) 等出席了会议。会上，ATLAS 的女发言人法比奥拉·吉亚诺蒂和 CMS 的发言人乔·因坎迪拉宣布这一激动人心的结果。会后，有人幽默地和希格斯说“我们很努力的寻找你已经很多年了”，希格斯风趣地回答“你们现在找到了我”。随后，该相关结果发表于 *Physics Letter B* (图 3)^{③④}。Tevatron 于 2012 也发表了更新的希格斯粒子实验结果，他们也在 120 ~ 135 GeV 之间观测到 3.3σ 的证据^⑤。

当时有人预言 2012 年诺贝尔奖会颁给希格斯粒子。但同行都知道现在是确定发现了一个新粒子，但这个新粒子是不是标准模型的希格斯粒子还未可知，因为截止 7 月 4 日，所收集的数据量不足以证实新发现的粒子是不是标准模型的希格斯粒子。在这关

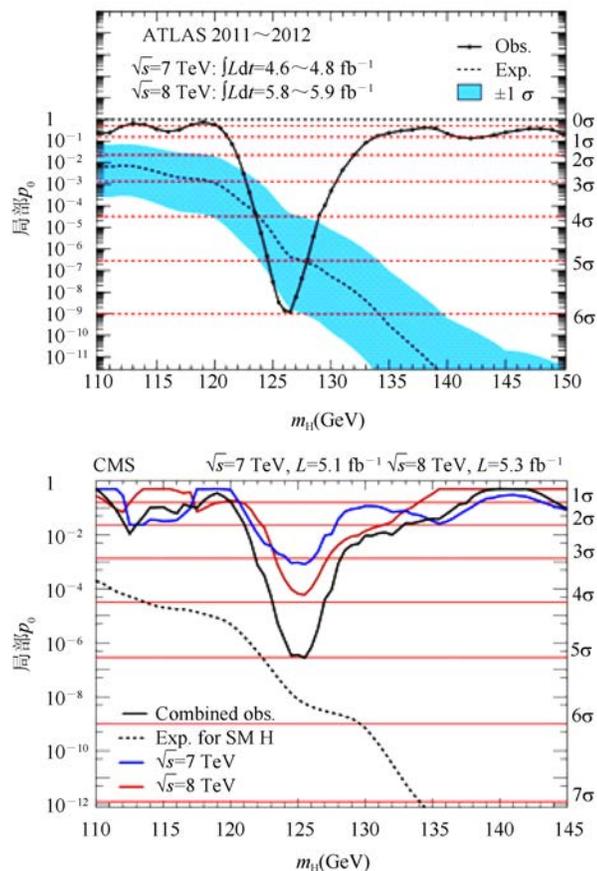


图 3 ATLAS 和 CMS 发现新粒子的敏感度图示。ATLAS 观测的敏感度比起 2012 年 7 月 4 日结果提高到约 6σ 置信水平是因为合并了 W^+W^- 衰变道

键时刻，CERN 英明地做出了一个决定，推迟 LHC 关闭时间，一直将机器运行到 2012 年底。最终在 2013 年 3 月的 Moriond 和 6 月的 Lepton-Photon 国际大会上，ATLAS 和 CMS 最新结果从信号强度、耦合、自旋、宇称方面的证据都支持新发现的粒子是标准模型的希格斯粒子^{⑥⑦⑧}。其中值得一提的是 ATLAS 还在 VBF 模式观测到 3.3σ 的证据^⑥。其中双光道作出主要贡献。中国 ATLAS 组在这个道起着核心领导作用。笔者之一任该分析的召集人。

2013 年 10 月 8 日，诺贝尔物理学奖颁给了提出希格斯理论的比利时科学家恩格勒特和英国科学家希格斯。在 CERN 数百名科学家聚集在 40 号楼（该楼设计的形状为 H，代表希格斯的首字母），共同在电

视上目睹了这一激动人心的时刻，CERN 的所长豪雅（Rolf Heuer）出席并在之后的即兴演讲中说“你们做实验的也应该得奖”。不管如何，工作于加速器、探测器和物理分析的数以千计的科学家、工程师数十年的汗水终于得到了回报。

（中国科学院高能物理研究所 100049）

① H. J. Trost, Proc. 22nd Int. Conf. on High Energy Physics, Vol. 1, July 19 ~ 25, 1984. ② ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collabs., CERN EP/2001-005. ③ ATLAS Collabs., *Physcis Letters B* 716(2012) 1 ~ 29 ④ CMS Collabs., *Physics Letters B* 716(2012) 30 ~ 61 ⑤ T. Aaltonen et al., *Physical Review Letters* 109, 071804 (2012) ⑥ ATLAS Collabs., *Physics Letters B* 726(2013) 88 ~ 119 ⑦ ATLAS Collabs., *Physics Letters B* 726 (2013), 120 ~ 144 ⑧ CMS Collabs., *CMS Physics Analysis Summary*, HIG-13-005

钱三强百年诞辰暨钱三强何泽慧 科技思想座谈会在京举行

2013 年 10 月 16 日上午，钱三强百年诞辰暨钱三强何泽慧科技思想座谈会在中国科学院学术会堂举行。本次活动由中国科学院、中国科学技术协会、中国核工业集团公司共同主办。中国科学院院长、党组书记白春礼，中国科学技术协会常务副主席、党组书记、书记处第一书记申维辰，中国核工业集团公司党组成员、副总经理杨长利，清华大学党委书记胡和平出席座谈会并讲话，中国科学院副院长李静海、詹文龙、党组副书记方新、副秘书长曹效业，谢家麟、黄祖洽等 26 名中国科学院院士、中国工程院院士，以及钱三强、何泽慧两位先生的亲属、学生、同事、好友等参加了座谈会。座谈会由詹文龙主持。

白春礼首先代表中国科学院讲话：他指出，缅怀和纪念国际著名的核物理学家、我国科技界卓越的领导人钱三强先生及其科学伴侣、我国著名女物理学家何泽慧先生，具有十分重要的意义，他们是原子核三分裂和四分裂现象的主要发现者。钱三强先生是一位卓有成就的核物理学家，他们是我国科技界的卓越领导人，为中国科学院的建立和新中国科技事业的发展做出了重大奠基性贡献；是“两弹元勋”，为国家安

全和我国原子能科学事业的发展做出了重大贡献；是一位高瞻远瞩的战略科学家，为我国重大科技决策的科学化民主化做出了重要贡献。

申维辰、杨长利、胡和平等也分别代表中国科学技术协会、中国核工业集团公司、清华大学讲话。程开甲院士、李惕碛院士、何祚庥院士、钱三强何泽慧子女钱民协和钱思进，以及学生代表李璐发言，从不同侧面缅怀了钱三强何泽慧两位先生热爱祖国、献身科学、严谨求实、提携人才等感人至深的事例及生活片段，畅谈了感想，抒发了情怀。

出席此次活动的还有钱三强何泽慧两位先生曾倾心关注的有关学校师生、曾领导和工作过的中国原子能科学研究院、中国科学院高能物理研究所、浙江大学、中国物理学会的负责同志，以及中国科学院有关研究所的科研人员和中国科学院大学的研究生等，共计 450 余人。

据了解，为了纪念钱三强、何泽慧两位先生，中国科学院组织编写出版了《钱三强年谱长编》，并发行了钱三强科技纪念封和何泽慧科学纪念封，中国科学技术协会组织编写出版了《钱三强传》、《何泽慧传》等图书。

（本文摘自 2013 年 10 月 17 日中国科学院网站 http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201310/t20131017_3957606.shtml）