

# 漫谈希格斯粒子

吴雨生<sup>1,2,†</sup> 徐来林<sup>1,2</sup> 张扬<sup>3,4</sup>

(1 中国科学技术大学 粒子科学技术研究中心 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学 核探测与核电子学国家重点实验室 合肥 230026)

(3 中国科学技术大学 交叉学科理论研究中心 合肥 230026)

(4 彭桓武高能基础理论研究中心 合肥 230026)

## A sketch of the Higgs boson

WU Yu-Sheng<sup>1,2,†</sup> XU Lai-Lin<sup>1,2</sup> ZHANG Yang<sup>3,4</sup>

(1 Center for Particle Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Interdisciplinary Center for Theoretical Study, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(4 Peng Huanwu Center for Fundamental Theory, Hefei 230026, China)

2022-10-15 收到

† email: wuyusheng@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20221102

**摘要** 希格斯玻色子发现于2012年,是粒子物理学研究中的一件划时代的大事。它在粒子物理的“标准模型”中起关键性作用,通过神秘的对称性破缺机制给基本粒子带来质量,和高深莫测的量子真空息息相关,也被认为在宇宙演化的极早期起重要作用。在希格斯玻色子发现十周年之际,文章将从科普视角出发,描绘希格斯玻色子的理论背景、粒子特性、实验探测、研究现状和展望,揭开希格斯玻色子的神秘面纱,理解它的过去、现在和未来。

**关键词** 希格斯玻色子, 标准模型, 高能物理实验

**Abstract** The Higgs boson was discovered in 2012, which marked a new era of particle physics. This particle plays a key role in the Standard Model of particle physics, as it is expected to bring masses to elemental particles via the symmetry breaking mechanism, have salient connections with the quantum vacuum, and be indispensable in the evolution of very early Universe. At the 10th anniversary of the discovery of the Higgs boson, this paper unveils the mystery of the Higgs boson from the perspectives of science outreach, discussing about theoretical background, characteristics of the particle, experimental detection, as well as current status and outlook of Higgs boson physics.

**Keywords** Higgs boson, Standard Model, experimental high-energy physics

## 1 引言

粒子物理学研究物质世界的最基本组成成分及其相互作用规律,探索基本粒子间的微观“小宇宙”,追求对一系列根本问题的理解:物质到底

有没有究极的不可再分的最小单元?基本粒子之间的相互作用有哪些?产生相互作用的根本原因是什么?什么是时间空间的本性?

从古希腊时期的原子论,到现代的量子力学,直至基于量子场论的粒子物理标准模型,人类从哲学到科学,结合理论与大量实验发现,逐步建

立起了一套对微观粒子世界的成熟描述。标准模型中最后一个被实验证实的基本粒子是希格斯玻色子。它在媒体中常被戏称为“上帝粒子”，其对应的希格斯场被认为是基本粒子的质量来源，有举足轻重的地位。粒子物理学中还有诸多重大科学问题有待探究，如暗物质本性、宇宙正反物质不对称、中微子质量等等。

希格斯玻色子于2012年被发现<sup>[1, 2]</sup>，直接促成提出该粒子假设<sup>[3-5]</sup>的理论学家中的彼得·希格斯与弗朗索瓦·恩格勒获得2013年的诺贝尔物理学奖。对希格斯粒子的研究是粒子物理学中的一个重要方向，从此由搜寻模式进入了测量模式。科学家希望通过更多的实验数据审视这一埋藏于微观世界深处的新事物，期待发现它与新物理的联系。

2022年正值希格斯玻色子发现十周年，本文将从如下几个方面展开：理论背景、希格斯玻色子的特性、希格斯粒子的实验探测，以及希格斯物理研究的现状和展望。

## 2 理论背景

2012年7月4日，在同行们的掌声和欢呼声中，时任欧洲核子研究中心主任的物理学家Rolf Heuer正式宣布：经过数十年的探索，数千名科学家在大型强子对撞机(LHC)上发现了希格斯玻色子。希格斯玻色子是物理学家在理解粒子物理标准模型过程中的最后一块拼图，有了希格斯玻色子，粒子物理学的标准模型也就完整了。

粒子物理学认为观测到的所有物质是由基本粒子组成的。标准模型认为世界上有三种带电轻子：电子、缪子和陶轻子，它们参与电磁和弱相互作用。世界上有三种不带电的中微子，它们只参与弱相互作用。原子核中的质子和中子不是基本粒子，它们是由夸克组成的。夸克是基本粒子，它们不能进一步分割。标准模型认为世界上有六种夸克(上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克和顶夸克)，它们参与电磁、弱以及强相互作用。量子场论认为物质的相互作用是通过媒介玻色子传递的：电磁相互作用通过光子传递。我们

知道根据量子力学波粒二象性，电磁波兼有粒子的属性，其对应的粒子就是光子。弱相互作用，例如核子的 $\beta$ 衰变，是由W、Z玻色子传递的。强相互作用是通过胶子传递的。随着1995年美国费米国家实验室发现了顶夸克，以上这些基本粒子都已经被发现。

在上述的相互作用中，弱相互作用为何如此之“弱”，是粒子物理发展史上的一个重要问题。例如，作为一种不稳定粒子，缪子的寿命相对非常长，究其原因是缪子的衰变来自于弱相互作用，该作用强度低，所以衰变不易发生。最早对弱相互作用的理论诠释是费米的“四费米子”理论，这个理论可以解释低能区域中 $\beta$ 衰变现象，但该理论在高能区域变得不自洽。而且这个理论形式上和费曼、施温格以及朝永振一郎的量子电动力学截然不同，让理论物理学家不禁质疑，是否还有一个更统一的理论来描述基本相互作用。

量子电动力学描述电磁相互作用，在这个理论中量子化的光子场传递相互作用。电磁势的规范变换，赋予了这个理论所谓的 $U(1)$ 规范对称性。数学上看， $U(1)$ 对称性相当于单位圆上的复数乘法。规范对称性的深刻想法被用于研究其他基本相互作用。盖尔曼提出了新的基本粒子——夸克，它们是核子的组成部分。盖尔曼认为，如果夸克存在一个新的物理自由度，即三种“颜色”，那么夸克模型可以用来描述核子谱。夸克参与强相互作用，在盖尔曼的理论中，强相互作用是通过胶子传递的。杨-米尔斯理论，即非阿贝尔规范理论，被用来描述强相互作用，并发展为量子色动力学。三种颜色对应着数学上的 $SU(3)$ 规范对称性。

“四费米子”理论与量子电动力学以及量子色动力学都不同，这个理论中没有传播相互作用的媒介粒子，也没有规范对称性。量子电动力学及色动力学的耦合常数都是无量纲的，但“四费米子”理论的耦合常数是能量的负幂次。这意味着这个理论是不可重正化的，在\*\*高能区域会不自洽，需要被某个更普适的理论代替。一种尝试是用杨-米尔斯理论描述弱相互作用，引入新的规范玻色子，来描述弱相互作用。然而，弱相互作用

是一种很弱的短程力，传递弱相互作用的规范玻色子必须是有质量的，这一点和量子电动力学及色动力学都不同。量子电动力学的传播子是无质量的光子，量子色动力学的传播子是无质量的胶子。在杨-米尔斯理论中直接加入规范玻色子质量，难以得到一个自洽的规范理论。

要在杨-米尔斯理论的框架下构建弱相互作用模型，全新的物理想法是必不可少的。这里成功的想法是自发对称性破缺与希格斯机制。格拉肖、温伯格、萨拉姆分别提出了电弱统一思想，将电磁相互作用与弱相互作用统一在杨-米尔斯理论框架之中。直接打破这种统一性，引入规范玻色子质量，如前所述，在理论上是非常困难的。此处，自洽的建模方式是，引入自发对称性破缺。也就是说，在统一的杨-米尔斯理论中，相互作用并不直接打破规范对称性，但量子场的基态打破了规范对称性。

在我们的宏观世界中，自发对称性破缺其实并不罕见。室温下磁铁的基态有自发磁化，一根条形磁铁一端N极，一端S极，两端的极性破坏了条形磁铁的对称性。注意电磁相互作用本身不破坏对称性，但条形磁铁的基态有两个，体系选择其中一个基态，自发地破坏了对称性。在量子场论中，类似于磁铁的模型，一个所谓的标量场可能也有多个基态，那么物理体系的基态选择自发地破坏了对称性。这里将要引入的标量场，就是大名鼎鼎的希格斯场(图1)<sup>[6]</sup>。

一般而言，场论中自发对称性破缺，由于所谓的戈德斯通机制，会产生无质量的标量粒子。如此构造粒子物理模型，虽然把电磁相互作用、弱相互作用都引入到了杨-米尔斯理论的框架，但无质量的标量粒子从来没有在实验上发现过，这依然是理论上的疑难。希格斯机制最终解决了这个疑难：本来无质量的规范玻色子吸收“吃掉”了自发对称性破缺产生的无质量的标量粒子。这样消除了无质量标量粒子，同时又赋予了弱相互作用规范玻色子质量，说明了弱相互作用是一种弱的短程力。从理论上来看，希格斯机制是电弱相互作用统一的关键一步。

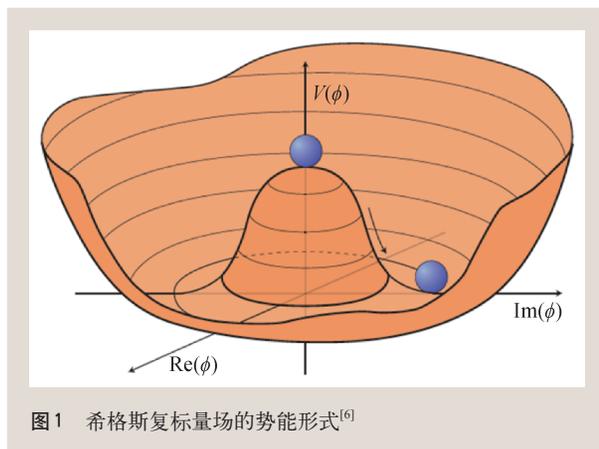


图1 希格斯复标量场的势能形式<sup>[6]</sup>

在具体的模型构建中，如何选择正确的对称性和破缺方式，对于预测新粒子的种类与相互作用是非常重要的。温伯格和萨拉姆选择了 $SU(2) \times U(1)$ 对称群以及一对复希格斯场。这对复希格斯粒子场的基态，会破坏 $SU(2) \times U(1)$ 对称性，残存的 $U(1)$ 对称性对应着电磁相互作用。被破缺的3个对称性，由于希格斯机制，导致产生了三个有质量的规范玻色子，分别是 $W^+$ 、 $W^-$ 和 $Z$ 玻色子。这三个粒子传递短程的弱相互作用。一对复希格斯场中的三个物理自由度被 $W$ 和 $Z$ 吃掉，剩下的唯一一个物理自由度对应的量子场论激发态，也就是所谓的“上帝粒子”——希格斯粒子。

希格斯场还和物质费米子场(如电子、缪子、陶轻子和夸克等)通过汤川机制耦合。在希格斯机制中，希格斯场的基态等效地变为了这些物质粒子的质量参数。通俗地说，希格斯场给予了基本粒子质量。温伯格与萨拉姆的电弱统一与自发对称性破缺模型，加上描述强相互作用的量子色动力学，构成了粒子物理的标准模型。

渐渐地，实验物理学家探测和发现了标准模型中除了希格斯粒子外的所有基本粒子。几十年来，只有希格斯玻色子躲过了所有探测它的尝试——直到2012年7月4日，日内瓦欧洲核子研究中心正式宣布希格斯玻色子被发现，标准模型的最后一块拼图完整了。这是自然界中第一种自旋为零的基本粒子。

标准模型被认为是完整的，但还有很多问题都远未得到解答。

### 3 希格斯粒子的特性

作为一个基本粒子，希格斯粒子也有其独特的量子参数。作为自然界基本粒子中唯一的标量玻色子，按照标准模型预言，其自旋为0、宇称为正。标准模型的希格斯机制不仅赋予了W、Z规范玻色子的质量，也决定了其与标准模型中其他基本粒子的相互作用。希格斯粒子作为一个玻色子是相当活跃的，可以与费米子以及其他规范玻色子产生相互作用。具体来说，希格斯粒子与费米子相互作用的耦合强度与费米子的质量成正比，因而在标准模型里希格斯粒子与质量最大的顶夸克的相互作用最强，与电子的相互作用耦合强度最弱。而在标准模型里中微子没有质量，因而希格斯粒子不与中微子产生相互作用。希格斯粒子与费米子的相互作用也被称为汤川耦合，也正是从这一相互作用中，费米子获得了质量。希格斯粒子与有质量的W、Z玻色子之间存在规范相互作用，而与无质量的光子和胶子没有相互作用。此外，希格斯粒子与自身也会产生相互作用，包括三希格斯粒子和四希格斯粒子耦合，被称为希格斯粒子的自相互作用。

值得一提的是，希格斯粒子几乎所有的物理特性均由理论预言，唯独其质量是一个自由参数，需要由实验来测量。而正因为希格斯粒子质量的不确定性，实验学家们花费了巨大的时间和精力来寻找这一粒子，因为他们需要像大海捞针一样在未知的质量区间去寻找可能的希格斯粒子信号。希格斯粒子的质量虽然是一个自由参数，但它却与希格斯粒子的自相互作用耦合常数存在关联性，二者只要能确定其一，另一个参数也就确定了。与希格斯粒子质量相关的另一个重要量子参数是其质量宽度或衰变宽度。按照理论预言，一旦质量确定了，其质量宽度也随之确定了，而质量宽度决定了粒子的寿命。2012年发现的希格斯粒子，其质量大约是125 GeV，相当于质子质量的130倍，是标准模型的基本粒子中质量仅次于顶夸克的第二重的粒子。

希格斯粒子的重要性不仅仅在于它背后的希

格斯机制是基本粒子的质量起源，而且在于它与超出标准模型的新物理以及宇宙学等存在深刻的联系。一个典型的例子是矢量玻色子之间的相互作用。按照标准模型预言，矢量玻色子之间可以发生散射过程，其散射振幅包含了希格斯粒子与矢量玻色子之间的耦合。计算表明，如果没有希格斯粒子参与，这个散射振幅与入射粒子对的质心能量平方成正比。这意味着在没有希格斯粒子的情况下，这个散射振幅在能量很高时会发散，也就意味着会有新的物理现象出现。虽然希格斯粒子的出现可以避免这一发散的发生，但这只是众多可能性的一种，并没有理由认为没有其他的超出标准模型的新物理会参与这一矢量玻色子的散射过程。前面提到，希格斯粒子是弱相互作用自发对称破缺的重要参与者，这一相变过程发生在宇宙演化的极早期。而希格斯粒子的自相互作用决定了希格斯场的势能，这一势能函数也决定了电弱对称性破缺的相变过程，意味着希格斯粒子与宇宙演化有着深刻的联系。

希格斯玻色子与其他粒子的相互作用为物理学家们在实验上去寻找希格斯粒子指明了方向。根据它与其他粒子的相互作用，希格斯粒子可以在高能对撞机中产生出来，比如LHC。LHC可以将质子加速到极高的能量，质子—质子质心系能量可以达到14 TeV。LHC上希格斯粒子的产生模式比较复杂，计算表明，其主要产生模式是胶子—胶子融合过程，产生截面的占比约80%，其他产生模式依次是玻色子融合、玻色子伴随以及顶夸克对伴随产生过程。事实上，LHC上希格斯粒子的总产生截面是可观的，因此LHC实际是一个“希格斯玻色子工厂”。

虽然在LHC里能产生大量的希格斯玻色子，但希格斯粒子的寿命极其短暂以至于其产生瞬间就衰变了。就像自然界的放射性衰变现象一样，一个粒子衰变后会得到其他的产物。由于希格斯粒子非常活跃，其衰变机理也相当的复杂。物理学家们用衰变的概率，也就是衰变分支比，来衡量粒子发生某种特定衰变过程的难易程度。希格斯粒子的衰变分支比取决于几个相应的物理参数，例如希格斯粒子的质量、衰变末态粒子的质量，

以及希格斯粒子与衰变末态粒子之间的耦合强度等。一旦希格斯粒子的质量确定了,那么它在LHC上各种产生过程的截面和各个衰变末态的分支比就相应地确定了(图2)<sup>[7]</sup>。比如对于质量为125 GeV的希格

斯玻色子,它最主要的衰变末态是两个底夸克,分支比约为56%,其次是衰变到两个W玻色子(23%),其他各个玻色子或费米子末态的分支比大小不一。

事实上,在实验上观测到希格斯粒子的信号是极其复杂和具有挑战性的一项任务。由于希格斯粒子具有不同的产生和衰变模式,二者可以任意组合,就意味着有很多的途径去寻找希格斯粒子信号。产生的截面越高,衰变分支比越大,就代表着可以观测到越多的希格斯粒子事例,反之就越少,如图2所示。此外,希格斯粒子的衰变末态是需要通过实验仪器来探测到的,不同末态粒子的探测方法和难易程度也相差很大。比如对于衰变分支比最大的顶夸克对要远比衰变分支比小得多的四轻子末态探测起来更加困难。让寻找希格斯粒子的任务更加艰巨的是,LHC不仅是一个希格斯工厂,它还会产生数据量更大的其他物理过程,比如顶夸克产生过程、矢量玻色子产生过程等,并且实验仪器探测到的数据是这些不同的物理过程混杂在一起的。要从海量的数据里寻找出希格斯粒子的信号,用“大海捞针”来描述并非夸张。

#### 4 实验探测

如前所述,希格斯粒子的实验现象十分稀有,需要从海量的噪声中如“大海捞针”一般去寻找

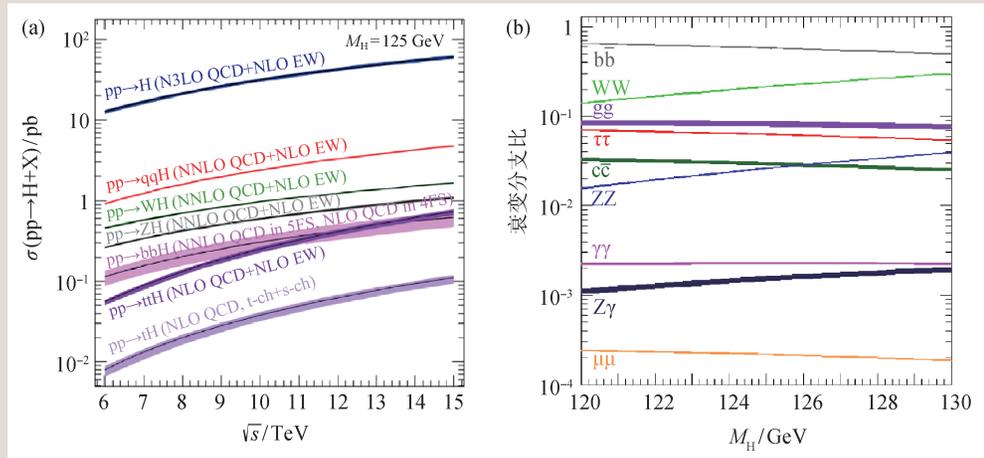


图2 质子—质子对撞机上希格斯玻色子的产生截面(a)和衰变分支比(b)<sup>[7]</sup>

它,加之它的质量无确定预言,这些因素给寻找工作带来了极大的困难。事实上,从希格斯机制、希格斯粒子的提出(1964年)到它的发现(2012年),历时近半个世纪,这也从侧面反映了实验探测的艰苦卓绝。

实验上,科学家利用粒子加速器将常见的易获取的粒子(如电子、质子)加速到很高能量,然后轰击靶材料(打靶实验),或者与另外一束高能粒子相向对碰(对撞机实验),产生微观粒子世界的相互作用。只要质心能量足够,相互作用初始条件合适,就有可能产生可观的科学家们感兴趣的微观现象(即信号过程)。当然,诸如希格斯玻色子这样的不稳定粒子几乎立即衰变,最终观测到的实验末态包含的其实都是相对长寿命的粒子或现象,如光子、电子、缪子、陶轻子以及量子色动力学喷注等。只不过,这样看似寻常的实验末态中蕴含着我们孜孜求索的信号痕迹。探测这些实验末态并进行数据分析可以获得与信号过程相关的物理结果。下面描述实验探测中的几个关键环节。

首先,粒子加速器要能将参与反应的粒子加速到足够的能量。科学家通常利用强电场来加速带电粒子,产生医用X射线的小型电子加速器长度在米量级,而要触摸到希格斯玻色子所在的电弱物理能标,直线加速器的长度得在十公里量级。如果参与反应的粒子只有小部分能量转换为目标

粒子的质量，则实际加速能量需要更高，加速长度需要更长，在适合的条件下，往往采用环形加速器。粒子在圆圈中循环往复地加速和贮存，等待时机参与粒子间的相互作用。LHC是目前最大的环形加速器，周长达27 km。这样的巨型设施需要的是全世界之合力，且合并的不仅仅是人力智慧，还包括各种尖端技术，如用于加速的超导射频腔、偏转准直的超导磁铁和控制测量的超快抗辐射电子学系统等。

其次，需要极其大量重复实验才可探究如希格斯玻色子这样的稀有现象。我们知道，微观世界的观测量都是由一定的统计分布描述的。实验上准确测量这些分布，才能探索其背后的深刻物理，而要准确获得分布的全貌显然需要大统计量的重复实验。另外，微观世界的反应是十分复杂的，例如在LHC上，高能质子-质子对碰产生的是一个“万花筒”，每朵“花”对应一个反应过程，有不同的出现几率。包含希格斯玻色子的反应过程的出现几率极其低，低至每当质子-质子相互作用约一百亿次，才能出现一次希格斯玻色子。正是因为这些原因，加速器要能在有限的时间内(通常数年)尽可能多地触发反应(对应的实验术语叫积分亮度)，同时庞大的设施在经年累月的运行中要保证足够稳定，避免差错。

最后，依赖高精度的探测与高超的数据分析

才能获得物理结果。前面说过，大量重复实验后，极少数的实验末态中才有可能有信号的踪迹，科学家依靠大型但又精密的探测器去全面捕获末态的信息。如希格斯玻色子那样的目标粒子诞生于实验反应的时间、坐标零点，但转瞬即逝，最终衰变产物次级粒子淹没在动辄数百粒子的实验末态中。因此，探测器必须有能力追踪每一个末态粒子，并准确测量它的路径、能量、种类等信息，最终我们利用这些信息窥探零点发生了什么(术语叫“重建”)。图3展示了ATLAS实验对希格斯粒子衰变为双缪子实验末态的一次探测。探微知著的总体科学目标使得对这些测量的精度要求极其严苛，诞生与发展了一系列先进的探测技术，其中许多技术后来又广泛应用于国计民生，如医学成像、地球勘探，辐射探测等。大统计量的实验末态集合乘以每个末态对应的大量探测器信息，构成了一个真正意义的大数据集。科学家们小心翼翼地开展大数据分析，对比模拟数据和真实数据，应用来自探测器和来自理论计算的修正因子，巧妙地利用物理规律设计筛选条件来压制噪声，提高信号探测的显著程度。经过反复锤炼的数据分析最终给出可靠的物理结论和令人信服的误差分析。

受限于篇幅，关于实验探测的更深入的介绍无法展开，但笔者希望如上的描述能帮助读者从大方向上把握实验探测的宏大精妙之处。讨论完这些基本环节之后，下面简略描述希格斯粒子的探索历程。

真正系统性地对希格斯粒子进行现象学讨论和实验寻找的起点大体可以追溯回1975年附近。那时，通过对低能核物理数据进行分析，并利用低能强子对撞，科学家在兆电子伏和吉电子伏区间对希格斯玻色子进行寻找，显然并没有找到其存在的迹象，因此推论它的质量应该在这个能量段之上。

时间来到了大型对撞机时代中的20世纪90年代，科学家们重点在欧洲核子研究中心的大型正负电子对撞机(LEP)以

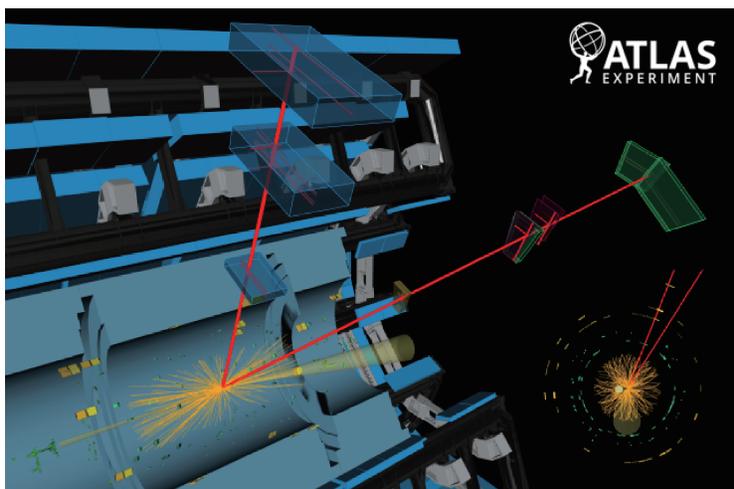


图3 LHC上ATLAS实验探测到的一次希格斯粒子衰变为双缪子实验末态的图像展示。红色径迹为缪子，图中展示了部分探测器结构(图片来源:欧洲核子中心)

及美国费米国家实验室的质子—反质子对撞机(Tevatron)上寻找希格斯玻色子。LEP运行到千禧年后停机改造成LHC,而Tevatron运行到2011年。LEP上没有找到希格斯玻色子的迹象,给出了质量下限114 GeV,而Tevatron上的数据分析到2011年也未有发现,排除了156—177 GeV区间。考虑到最终发现希格斯玻色子的质量为125 GeV,可以说这两次尝试都很接近,但由于历史的偶然性,是不幸运的。LEP受限于对撞能量,而Tevatron受限于统计量。

值得一提的是,现象学研究对寻找希格斯玻色子来说十分重要。考虑标准模型是基于量子场论的一个可重整化理论,它决定了希格斯玻色子的质量与电弱理论中的其他许多物理量之间有内在联系,精确测量这些物理量(如W玻色子质量等)可以间接限制希格斯玻色子的质量。在发现希格斯玻色子的前夕,这样的研究给出了质量的最可期区间120—130 GeV。

希格斯玻色子的发现定格在2012年7月4号,LHC上的大型国际合作实验ATLAS和CMS共同宣布以很高的统计置信度发现了疑似希格斯玻色子的粒子。发现该粒子主要采用了探测灵敏度最高的希格斯玻色子衰变到双Z玻色子、双光子以及双W玻色子末态。以双Z玻色子最终衰变到4个带电轻子末态为例,真正测得的希格斯玻色子屈指可数,但该末态信噪比很好,因此统计上十分重要;这些信号是在近 $10^{13}$ 倍于己身的噪声数据集中发现的!在粒子物理实验领域,发现新粒子往往表述成:真实数据以几倍高斯标准偏差的显著度否决了没有信号存在的假设检验。2012年的发现于单个实验都是5倍标准偏差统计显著度,等效于说不存在这个新粒子的可能性为百万分之一。

这个重大发现具有划时代的意义,它帮助填补了标准模型的最后一块拼图,使得标准模型电弱统一得以真正完成,而基本粒子的质量有了真正理论来源。初期的研究发现这个新粒子基本符合期待已久的希格斯玻色子,但其真正自然本性有待更大统计量数据的精确检验。

## 5 展望

希格斯玻色子的发现具有里程碑意义,2012年之后,希格斯物理时代自然就来临了:这样一个新生的神秘的“旧”事物值得仔细审视,研究它的粒子内禀属性,研究它和其余基本粒子的耦合,研究它背后希格斯机制的自洽性(如双玻色子散射过程),以及研究它和新物理(如暗物质)的关联等。希格斯物理研究成为当下粒子物理学的一个核心方向。从2012年的8 TeV对撞质心能量往后,LHC的质子—质子对撞能量继续提高到13—13.6 TeV,创造了新的世界纪录。十年后的今天,获得的希格斯粒子数目相较2012年增长了近15倍,科学家们相继验证了它的标量粒子特性、它与一系列基本粒子(顶夸克、底夸克、Z玻色子、W玻色子、陶轻子、缪子)的耦合,并将一些主要希格斯过程的测量精度提升至10%<sup>[8, 9]</sup>。

科学家们大体已经认可了这个希格斯玻色子确实是标准模型需要的那个粒子。希格斯物理研究的未来或许会更加多样化:继续探索LHC实验上可观的希格斯过程,精确检验标准模型预言;充分利用LHC实验数据探索稀有希格斯物理过程,如希格斯玻色子与更轻费米子的耦合、其自耦合,以及其不可见衰变等,以期发现异常,揭示其与新物理现象的关系;探索希格斯玻色子在宇宙演化、真空电弱相变中的作用,探讨可能的互补实验观测等等。现在是希格斯物理的第一个十年,希望第二个、第三个十年时会有新的激动人心的发现。

## 参考文献

- [1] ATLAS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 1
- [2] CMS Collaboration. Phys. Lett. B, 2012, 716: 30
- [3] Englert F, Brout R. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 321
- [4] Higgs P W. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 508
- [5] Guralnik G S, Hagen C R, Kibble T W B. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 585
- [6] Ellis J, Gaillard M K, Nanopoulos D V. 2012, arXiv: 1201.6045
- [7] LHC Higgs Cross-section Working Group. 2016, arXiv: 1610.07922
- [8] ATLAS Collaboration. Nature, 2022, 607 (7917): 52
- [9] CMS Collaboration. Nature, 2022, 607 (7917): 60