

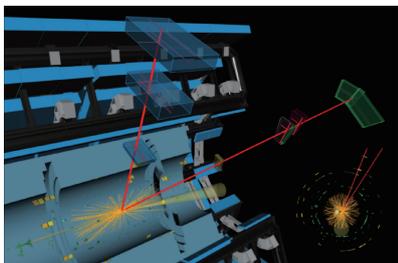
# 希格斯粒子物理学时代

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Dan Garisto. *Physics*, July 1, 2022)

2012年7月4日，欧洲核子研究中心主任 Rolf Heuer 宣布发现了一种新粒子——希格斯粒子。这一发现在物理学界引起了热议。

标准模型预测基本粒子通过与希格斯玻色子相关的场获得质量，希格斯粒子的发现再次表明标准模型的正确性。然而，标准模型本身还存在着缺陷，它不能解释如暗物质、引力和中微子质量的问题。而近十年来对希格斯粒子的研究仍不能给出超出现有理论的线索。研究希格斯粒子的物理学家认为重要的是对希格斯粒子了解了多少，以及还有多少需要了解。

科学家们一直在努力验证所发现的希格斯玻色子确实与理论家预测的希格斯玻色子相同。大型强子对撞机的两个实验 ATLAS 和 CMS 的研究人员继续对所发现的粒子进行越来越严格的测试，使用新技术来发现隐藏在相似事件中的稀有事件(例如罕见的希格斯衰变)。这项努力可以回答有关希格斯粒子如何与其他粒子耦合以及它是否只是众多类似希格斯粒子之一的悬而未决的问题。确定这些希格斯粒子的特



在 ATLAS 探测器中希格斯玻色子衰变成两个  $\mu$  子(红色径迹)

性还可以解决潜在的谜团，例如暗物质的性质或物质—反物质不对称的起源。

2012年初，质量大约为 125 GeV 的希格斯玻色子的迹象出现在 3 sigma 置信度附近，低于通常声称发现所需的 5 sigma 水平。研究人员最初将探测到的粒子称为“希格斯玻色子候选者”。

2013年获得了完整的第一轮数据。分析表明，新发现的希格斯粒子确实是一个自旋为 0 的粒子，CP 为偶数，这意味着它与粒子的耦合方式和它与具有反向宇称的反粒子的耦合方式相同。此外，来自 ATLAS 和 CMS 的测量结果将希格斯质量控制在了 125 GeV，误差小于 1%。

从 2015 年到 2018 年的第二轮实验使 ATLAS 和 CMS 的数据增加了 6 倍。新的机器学习方法能够筛选嘈杂的背景，清楚地识别像底夸克这样的粒子。理论方面，研究人员竭尽全力减少不确定性，通过考虑代表两个粒子之间相互作用的无限级数中的其他更小的项，对顶夸克生产等过程能够做出精确预测。对探测器的改进也能更好地鉴别事件。这一进展的代表是对希格斯衰变到两个  $\mu$  子的测量。这种罕见事件的信号通常会在 Z 玻色子衰变为两个  $\mu$  子的噪声中丢失。ATLAS 和 CMS 合作组最近报道了希格斯粒子衰变为两个  $\mu$  子的 3 sigma 证据——这为研究人员很快发现这种看似遥不可及的探测提供了希望。

$\mu$  子的衰变是很独特的，因为

它是希格斯与较轻的费米子相互作用的第一个证据——以前对希格斯—费米子相互作用的观察都涉及最重的费米子的产生(底夸克、顶夸克和  $\tau$  轻子)。发现所有具有质量的粒子都从希格斯粒子中获得质量，这是对标准模型的关键性确认。

理论家的新想法也影响了实验工作。大型强子对撞机的有效场理论(EFT)方法最好地概括了这种富有成效的相互作用。使用 EFT 方法，理论家可以指导实验家对未发现的粒子进行精确测量。例如，希格斯粒子衰变到 Z 玻色子和光子是由所有粒子的贡献导致的。如果衰变率偏离预测，这可能是一个看不见的重粒子的迹象。

即使希格斯衰变与标准模型预测相匹配，仍然可以提供有价值的信息。CMS 的希格斯物理联合负责人 Nicholas Wardle 指出，一些替代的希格斯模型预测希格斯玻色子与轻子(例如电子)的耦合不同于夸克。因此，确定所有的耦合强度和其他希格斯参数是对理论进行限制的一项重要工作。

第三轮实验 2022 年 7 月 5 日正式开始，将使粒子物理学家获得一批新的数据。LHCb (LHC 实验之一)也可以通过探测希格斯与粲夸克的耦合来发挥作用。高亮度 LHC (计划于 2029 年进行升级)将能够通过两个希格斯粒子的生产来测量希格斯粒子的自耦合。

希格斯粒子剩余的秘密继续激励着粒子物理学家。