

LHC/HL-LHC 未来规划

2012 年希格斯玻色子的发现表明粒子物理标准模型取得了巨大的成功，所有的基本粒子都被实验发现和验证。但是标准模型理论并不是终极理论，因为它不能解释夸克与轻子的味对称性、希格斯粒子的质量来源及其极小的数值、是否是真空的亚稳态，不能描述引力，也没有宇宙学观测结果所要求的暗物质、暗能量等，因此自然界必然存在超出标准模型的新物理。

而希格斯玻色子是第一个标量基本粒子，是基本粒子质量的起源，参与非规范相互作用，作为标准模型中最后一个被发现的基本粒子，希格斯粒子性质尚未被精确测量，很多重要问题亟待解答。例如，它是否是电弱对称性破缺的唯一起源、是否确实为基本粒子，物理真空是否稳定，希格斯标量势的形状是否与标准模型相符，自然界是否存在新的基本相互作用等。为了回答这些核心问题，我们需要系统、精确测量希格斯玻色子的性质，包括与标准模型中基本粒子之间的相互作用形式和耦合强度等。因此希格斯玻色子的研究是粒子物理的最前沿，是突破标准模型的最好窗口。

世界上多个国家或地区提出了下一代正负电子对撞机的不同方案来研究希格斯玻色子，如日本领导的国际直线对撞机 ILC，中国科学家主导的环形正负电子对撞机 CEPC，以及欧洲提出的未来环形对撞机 FCC-ee 等。但是这些方案都还需要至少十年的时间完成设计及建造。在未来十年甚至更长的时间段内，大型强子对撞机（LHC）及其后续升级仍将是世界上唯一的希格斯玻色子研究平台。

迄今为止，LHC 在 ATLAS 和 CMS 两个对撞点已分别产生了约 800 万希格斯玻色子，而 HL-LHC 结束时，数据样本将进一步增加 20 倍。基于已采集的部分数据，ATLAS 和 CMS 实验通过希格斯粒子衰变到双光子、ZZ、WW 等末态过程发现了希格斯粒子，确认了希格斯与矢量玻色子的相互作用，并对其产生和衰变、耦合进行了广泛的测量研究。过去两年又先后观测到希格斯粒子衰变到 $\tau\tau$ ，bb 模式以及 ttH 产生模式，确立了希格斯与费米子的 Yukawa 相互作用。

在希格斯与其它基本粒子耦合性质方面，强子对撞机上无法做到与模型无关的耦合参数测量。目前通常做法是基于 κ 框架，假定希格斯玻色子衰变过程中没有新的共振态（即希格斯粒子的衰变总宽度完全取决于与标准模型中的基本粒子的耦

合)，或者与规范玻色子的耦合不能大于标准模型预测值。后一种假设适用于绝大多数超出标准模型的新物理模型。下图左展示了 ATLAS 和 CMS 实验当前对希格斯粒子的相对于标准模型的耦合强度测量情况以及 HL-LHC 预期可达到的精度，这其中对假定了 $|\kappa_V| \leq 1$ 。对于玻色子和第三代费米子，目前的测量精度为 10-20%；对于缪子，误差约为 100%；针对希格斯衰变到新的不可见或未检测到的粒子的分支比上限为 20-30%。

利用 HL-LHC，所有相关的测量精度将提高约 5-10 倍。图 1 右展示了 κ 拟合中 HL-LHC 预期的误差组成，其中假定了希格斯的宽度完全由与标准模型基本粒子的耦合确定。除了缪子和 $Z\gamma$ 的结果是统计误差占主导，其它所有情况下，实验系统误差与统计误差相近，并且误差主要来源是理论误差(在此已经假设，与目前难以实现的误差相比，理论误差可以减少两倍，因此对于强子对撞机和轻子对撞机，进一步减少理论误差对于充分利用实验数据至关重要)。大多数情况下，希格斯玻色子耦合精度可以达到 1-3%。对希格斯不可见衰变分支比 (BR_{inv}) 以及希格斯衰变到未被标记的产物分支比 (BR_{undet}) 的探测灵敏度分别可达 2%和 4% (95%置信度的上限)。对希格斯与第二代费米子缪子的耦合测量精度也可达到约 4%。

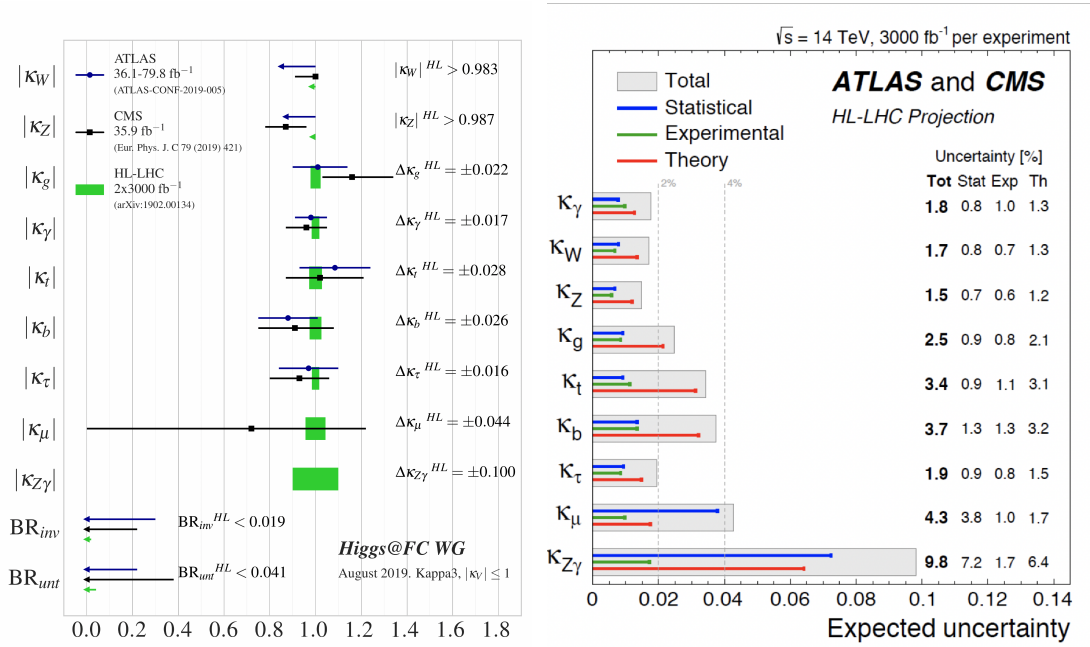


图 1 左：ATLAS 和 CMS 实验对希格斯粒子与其它基本粒子的耦合强度的当前测量结果以及 HL-LHC 可能达到的精度（基于 $\kappa_V \leq 1$ 的约束）。右：HL-LHC 上希格斯耦合强度测量的预期误差，分为统计、实验和理论上的误差（假定不可见衰变和无标记衰变的分支比为零）。

与希格斯相关的三种相互作用形式只剩下希格斯自相互作用尚未被发现。希格斯的自耦合即自相互作用是一种全新的基本相互作用。它的观测有助于深入理解弱电真空自发破缺机制，确定希格斯场参与真空相变的形式（真空相变是一级相变还是二级相变直接决定了宇宙中正反物质产生不对称性的条件），从而显著扩展我们对宇宙早期历史的了解。因此确定与希格斯势有关的参数是所有未来对撞机实验研究的核心目标之一。这个方向主要是通过双希格斯产生过程(HH)来研究，因为 HH 的截面很小（标准模型的预测约为 40 fb），目前积累的数据还不够多，实验上还没有发现其迹象。随着数据量的增加，希格斯自耦合的研究将成为 LHC 以及 HL-LHC 实验的研究重点和热点。预计 HL-LHC 可以大约 50% 的精度确定希格斯自耦合强度。希格斯自相互作用还可以通过圈图影响单个希格斯产生过程，甚至影响电弱的精密可观测量。因此，也可以使用单希格斯玻色子截面测量值来约束希格斯自耦合强度。

希格斯粒子性质的实验测量意义重大。希格斯耦合直接与自然性问题、真空的不稳定性以及是否有新的物理学将其稳定在电弱尺度上有关。希格斯粒子耦合的精确测量对检验新物理模型至关重要。假设当前的理论误差将减少两倍，HL-LHC 将极大地提高希格斯粒子耦合参数的测量精度，从目前的约 15% 提升到几个百分点，从而对许多新物理模型提供重要的约束。HL-LHC 预期对希格斯自耦合强度的测量精度可以达到 $\sim 50\%$ 。希格斯自耦合即使是与标准模型值相差 100%，也可能对宇宙学产生重大影响，它的测定将能够让我们深入理解早期宇宙中发生的电弱相变的性质以及目前物质-反物质不对称性的来源。

CEPC 希格斯物理战略规划

1) CEPC 物理目标

随着希格斯玻色子在大型强子对撞机上的发现，基础物理学发现它自己处在其历史上最令人兴奋的十字路口之一。目前的核心问题也是那些已经提出了几十年的最深刻的问题涉及到的基本粒子的最终起源，甚至时空起源本身。对这些问题的突破需要有主要来自于实验的新的输入。这使得基础物理学在未来 20-50 年的发展将依赖于启动一个巨大的新的加速器项目。它在精度和能量上可以比 LHC 的最终观测能力超过至少一个数量级。这就是 CEPC/ILC/FCC-ee 的目标。

2) CEPC vs LHC

LHC 将只能提供一个关于希格斯粒子的模糊画面。我们将无法得知它是否为真正的“基本”粒子。为了解决这个问题，就必须把希格斯放在更强大的“显微镜”下来观测。CEPC 将通过产生数以百万计的希格斯粒子来做到这一点。希格斯粒子和标准模型粒子的相互作用可以被测量到极其精准。

LHC 尤其是 HL-LHC 将会提供许多非常宝贵的关于希格斯性质的补充信息。例如，LHC 将可以通过 $t\bar{t}h$ 过程直接测量顶夸克的 Yukawa 耦合强度。另外，LHC 可以利用微分截面来区分顶夸克和其他重粒子的圈图修正对于希格斯和胶子耦合的贡献。类似的，微分截面也可以用来区分不同的六维算符对于希格斯和矢量玻色子的耦合修正。同时，LHC 的大量数据会提升希格斯的诸如到双光子等稀缺衰变的耦合强度精度。值得注意的是，大部分强子对撞机固有的系统误差在取测量到的截面的比值时会相消。例如，CEPC 上测量的 hZZ 耦合强度，结合 LHC 上测量的 $pp \rightarrow h \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $pp \rightarrow h \rightarrow ZZ^*$ 的截面比值会大大提高 κ_γ 的精度。这些比值是 LHC 对于 CEPC 来说最有效的输入。

3) CEPC 希格斯物理的测量特点和测量精度

3a) 测量特点:

1) 测量其不受潜在事例和事例堆积现象的影响；2) 产生过程的理论计算对高阶 QCD 初态辐射修正的依赖减弱，从而可以对理论预言进行更精确的检验；3) 利用反冲不变质量谱来标记 $e^+e^- \rightarrow ZH$ 过程的方法不依赖希格斯粒子的衰变。这一轻子对撞机上所具有的独一无二的特点，为进行不依赖于理论模型来测量希格斯粒子的产生截面和衰变分支比提供了非常有效的分析基础。通过将不同测量结果进行统计合并分析，可以测量出希格斯玻色子的总衰变宽度，以及希格斯粒子与费米子和玻色子的耦合常数，这也为寻找标准模型以外的新物理提供了有效的探测手段。

3b) 测量精度:

CEPC 能够产生上百万的希格斯粒子，并且能够非常精确地测量希格斯和规范玻色子以及费米子的耦合达到小于百分之一的精度（如图 1 所示）。另外，由标准

模型的希格斯耦合项衍生的 CP 破坏的预言可以被测量到百分之一的精度。希格斯粒子的占据非常小分支比的不可见衰变道以及稀有衰变道可以被测量到 10^{-4} 精度

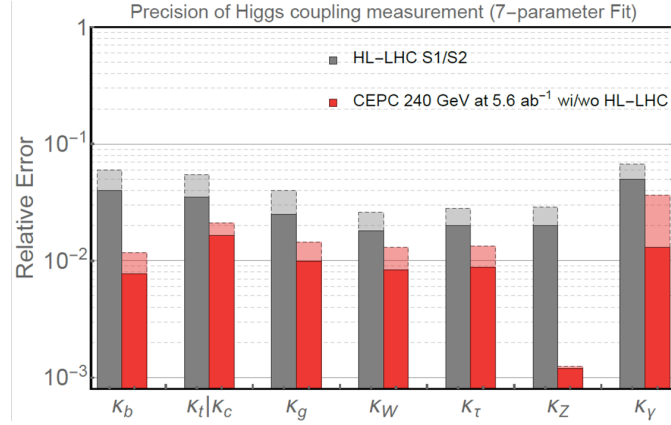


图 1：CEPC 希格斯粒子各耦合参数的测量精度以及与 HL-LHC 对比。

4) CEPC 上希格斯相关的新物理

在过去的四十年里，物理学家们提出了很多超出标准模型的新物理理论（BSM）。其中心课题在于：解决电弱对称性破缺相关的一系列问题。这些新物理模型大多都修正了希格斯粒子与标准模型粒子的相互作用。

大量新物理模型对希格斯耦合常数的修正在 1% 以下，超出了 LHC 的探测能力。CEPC 将对 LHC 形成重要的补充，并有能力使对希格斯玻色子性质细节的研究达到史无前例的精度，从而揭开它的神秘面纱。CEPC 对几乎所有希格斯耦合常数的测量精度都将优于 1%。更为重要的是，CEPC 使得人们可以对诸如总衰变宽度和衰变分支比等希格斯玻色子的重要性质进行模型无关的测量，这极大地提高了它寻找潜在新物理的覆盖范围。另外，CEPC 上洁净的事例环境使得人们可以对已知衰变道进行细节研究，亦可以对在 LHC 上不能鉴定的潜在的未知衰变道进行鉴定。

ILC/FCC 等国际合作

ILC（国际直线对撞机）基于线性加速正负电子，没有韧致辐射造成能损的原理，获得较高的对撞能量。ILC 在希格斯粒子发现之前就已经提出，世界范围内有 300

个研究所和大学一千多人参与加速器的设计和探测器的研发。加速器长度约 31 公里，由 16000 个纯铌材料制成的超导加速腔构成。计划把 100 亿个正负电子对分成 5 纳米长的束团（每个束团包含 200 亿个电子或正电子），以每秒 14000 次的频率接近光速碰撞在一起。计划对撞质心能量为 500 GeV，也可以通过升级加速器至 50 公里长获得 1 TeV 的质心能量。希格斯粒子发现后，ILC 也有意在 250 GeV 质心能量上进行阶段性运行，获得精确研究希格斯粒子性质的数据。2013 年，ILC TDR 分 5 册向大众公布，分为项目简介、物理、加速器、探测器、设计到实现五个部分。

在电弱部分希格斯物理具有重要指标，希格斯粒子在 250 GeV、500 GeV、1 TeV 三个质心能量点上有 ZH 、 $H\nu_e\bar{\nu}_e$ 、 Hee 三种主要产生方式，如图 1 所示。通过对电子（正电子）束实现 $\pm 80\%$ （ $\pm 30\%$ ）的极化，可以对这三种产生方式进行 14%–234%范围内的调节，从而调整对不同粒子耦合参数的敏感度。

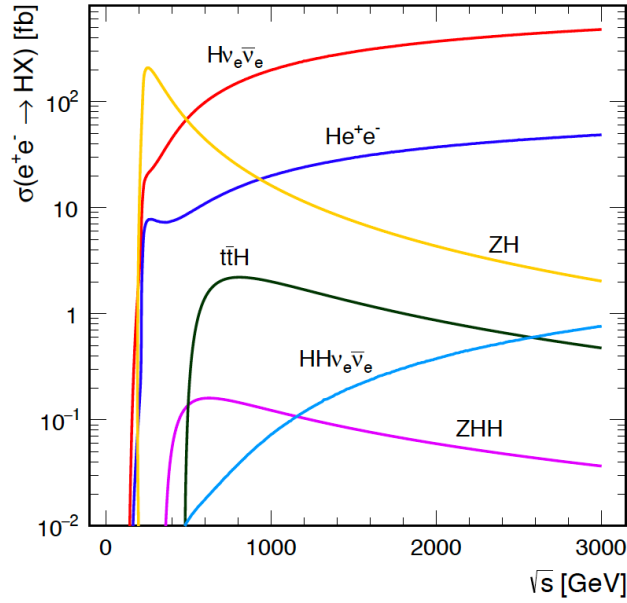


图 1: 在正负电子对撞机上不同希格斯粒子产生截面和质心能量的关系[1]。

在 ILC 上，希格斯粒子与其它基本粒子耦合参数的测量精度如图 2 所示，可以看到这些精度指标和 CEPC 类似，超越了 LHC 能达到的指标。希格斯粒子的产生主要通过 W/Z 的耦合，其与这两种粒子的耦合参数精度可达 0.24%–0.30%的水平。由于可以利用反冲动量信息把希格斯粒子的产生和衰变分开测量，所以可以对 $H \rightarrow \text{invisible}$ 等新物理过程进行更精确的与模型无关的限制，同时 $H \rightarrow gg$ 这样在强子对撞机上无法甄别的衰变也能测量。

Topic	Parameter	Accuracy $\Delta X/X$	
Higgs	m_h	0.03%	$\Delta m_h = 35 \text{ MeV, } 250 \text{ GeV}$ 250 GeV and 500 GeV
	Γ_h	1.6%	
	$g(hWW)$	0.24%	
	$g(hZZ)$	0.30%	
	$g(hb\bar{b})$	0.94%	1000 GeV
	$g(hc\bar{c})$	2.5%	
	$g(hgg)$	2.0%	
	$g(h\tau^+\tau^-)$	1.9%	
	$BR(h \rightarrow \text{invis.})$	< 0.30% (95% conf.)	
	$g(ht\bar{t})$	3.7%	
	$g(hhh)$	26%	
	$g(h\mu^+\mu^-)$	16%	

图 1: 在 ILC 上对希格斯粒子耦合参数测量的精度指标[2], 这些指标基于 $250 \text{ fb}^{-1}@250 \text{ GeV}$, $500 \text{ fb}^{-1}@500 \text{ GeV}$ 和 $1000 \text{ fb}^{-1}@1 \text{ TeV}$ 的样本总和, 其中电子/正电子束极化率设计为 80%/30%@250/500 GeV, 80%/20%@1 TeV。

欧洲粒子物理规划 2013 年更新[3]中提到, 利用 LHC 对希格斯粒子性质做精确测量是首要任务, 应在下一次规划更新时对后 LHC 时代的加速器项目给出建议, 同时欢迎并积极参与 ILC 项目。2020 年, 欧洲粒子物理规划筹备会物理简报[4]中推荐考虑 CLIC (质心能量 380 GeV–3 TeV) 和 FCC-ee (质心能量 90 GeV–365 GeV) 进行正负电子对撞, 以 FCC-hh (质心能量 100 TeV) 进行后续质子质子对撞, 发展路线类似于我国的 CEPC–SPPC 计划。在欧洲粒子物理规划 2020 更新中, 超导高磁场以及高温超导技术, 100 TeV 的强子对撞机是未来先导, 正负电子对撞机可以作为第一阶段发展, 同时也乐见 ILC 的实现并愿意共同合作。

在 FCC-hh 能量高至 100 TeV 时, 胶子融合和矢量波色子融合仍是希格斯粒子主要产生过程, 但是双希格斯粒子产生过程将被有效提升, 这个过程对测量希格斯粒子自相互作用 λ_3 意义重大。HE-LHC、ILC、FCC-hh 对 λ_3 的测量精度将分别达到 50%、10%和 5%。在对希格斯粒子耦合参数测量精度方面, ILC/FCC-ee/CEPC 的指标非常接近, 并且大部分指标优于 HL-LHC 大概 2–10 倍。希格斯粒子和 top、muon、 γ 、 $Z\gamma$ 的耦合可以在 FCC-hh 上得到提升, 如图 3 所示, FCC 实验对希格斯粒子耦合精度的综合提升进入了 0.2%的区间。

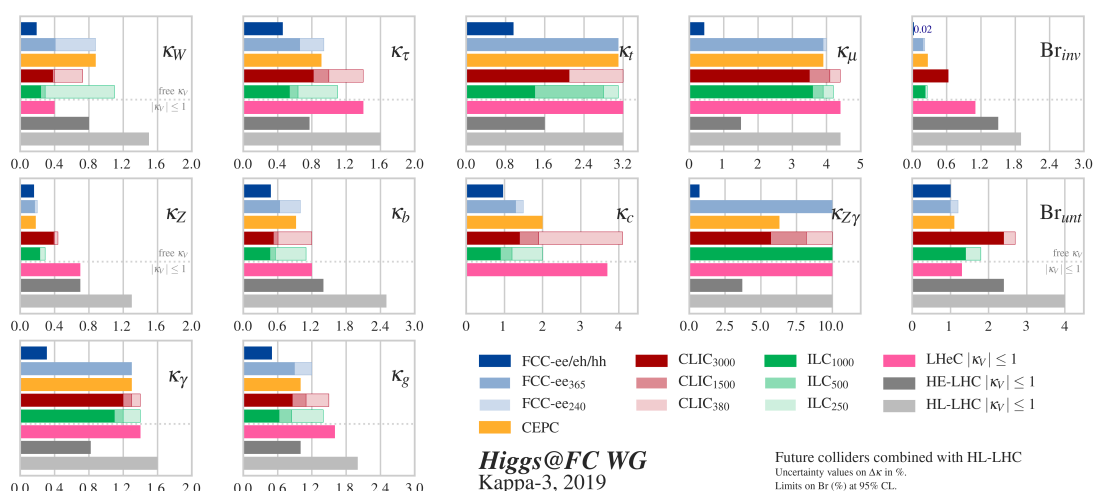


图 3: 不同实验预期达到的对耦合参数测量的相对精度, 以及希格斯粒子衰变至不可见和不可甄别末态的分支比的上限, 摘自[5]。

我国积极参与了欧洲核子中心高能前沿的 ATLAS、CMS 等实验项目, 在这些实验上我们处于学习、跟跑水平, 通过合作学习到了一些先进技术, 积累了知识经验。下一代对撞机仍有一些尖端技术需要解决, 国际合作必不可少, 如果 ILC、FCC 等在未来立项, 我们因该积极参与这些项目的建造、运行、数据分析, 积极地分享经验和参与人员交流, 通过几代人的努力逐步提高我们在高能前沿领域的研究环境、水平与影响力。

- [1] H. Abramowicz et al., “Higgs physics at the CLIC electron-positron linear collider”, [Eur. Phys. J. C77 \(2017\) no. 7, 475](#), [arXiv:1608.07538](#).
- [2] ILC Technical Design Report, Volume 1 - Executive Summary.
- [3] <https://cds.cern.ch/record/1567258/files/esc-e-106.pdf>
- [4] Physics Briefing Book, European Strategy for Particle Physics Preparatory Group, [arXiv:1910.11775](#).
- [5] J. de Blas et al., Higgs Boson Studies at Future Particle Colliders, [arXiv:1905.03764](#).

人才培养计划

希格斯粒子是粒子物理物理领域里程碑式的发现, 未来几十年内仍然会是这一领域研究的焦点之一, 是培育具有前沿创新性人才的重要抓手。目前国内参与

ATLAS、CMS 实验的有 11 家科研院所和高校，其中具有院士、千人、杰青、优青、青千、百人等称号的人才占总事编人员 70%左右，背后还有多个博后、研究生构成的研究梯队，总体发展向好。通过进一步参与国际合作，发展国内基于加速器的物理项目，我们可以拓宽在希格斯粒子物理领域研究的广度和深度，吸引更多国际人才，培育更多的粒子物理领域的高手，推动我国在这一领域的发展。