

希格斯物理研究

以及机器学习与量子计算的一些应用

周辰

北京大学物理学院技术物理系
核物理与核技术全国重点实验室

味物理讲座
2025年3月27日

报告内容

本次报告将讨论

过去：希格斯玻色子的发现

现在：希格斯玻色子的性质研究

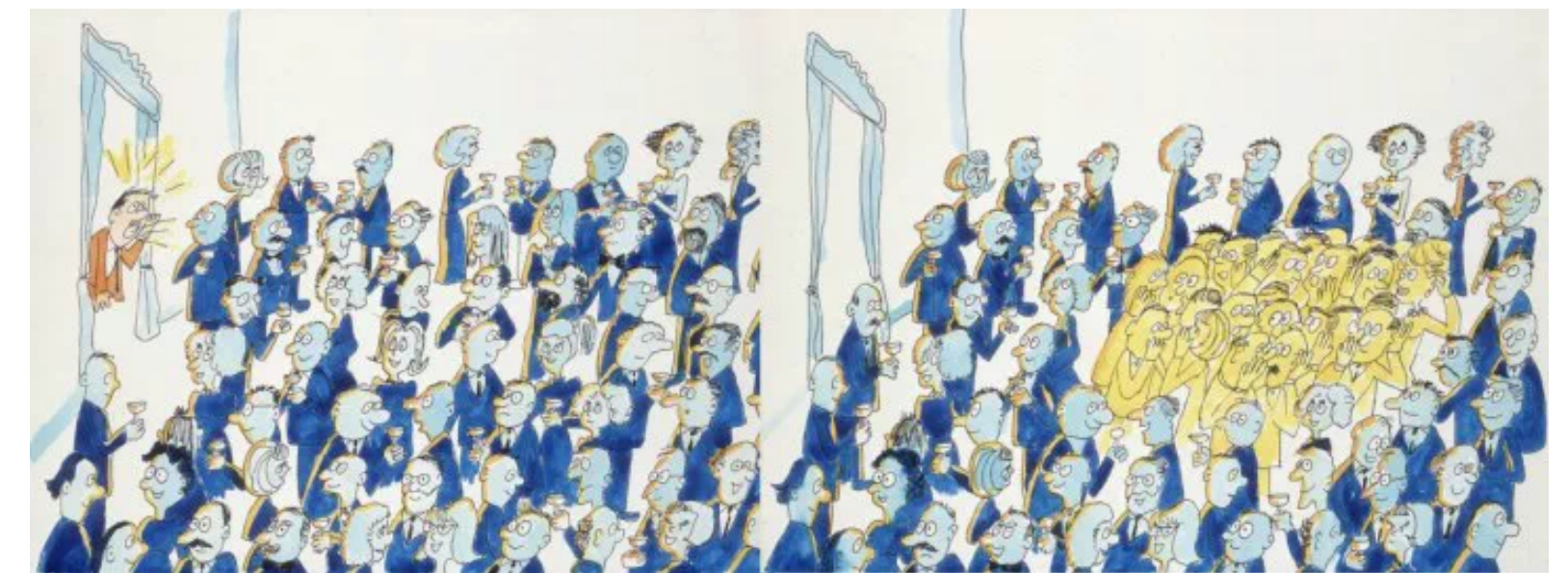
未来：希格斯工厂的物理预研

第2和第3部分将侧重本人做出直接贡献的一些结果，包括机器学习和量子计算的一些应用

1. 希格斯玻色子的发现

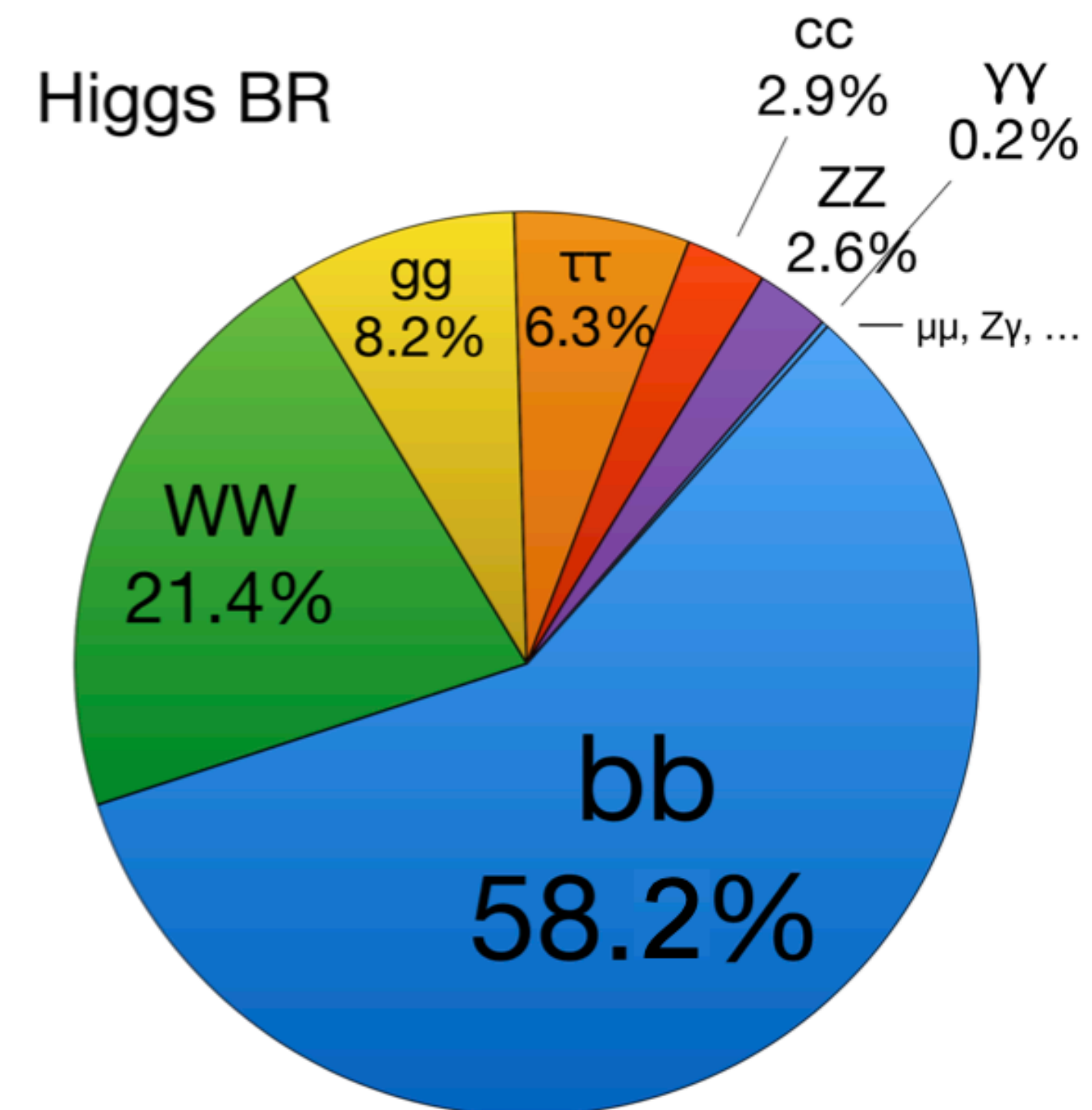
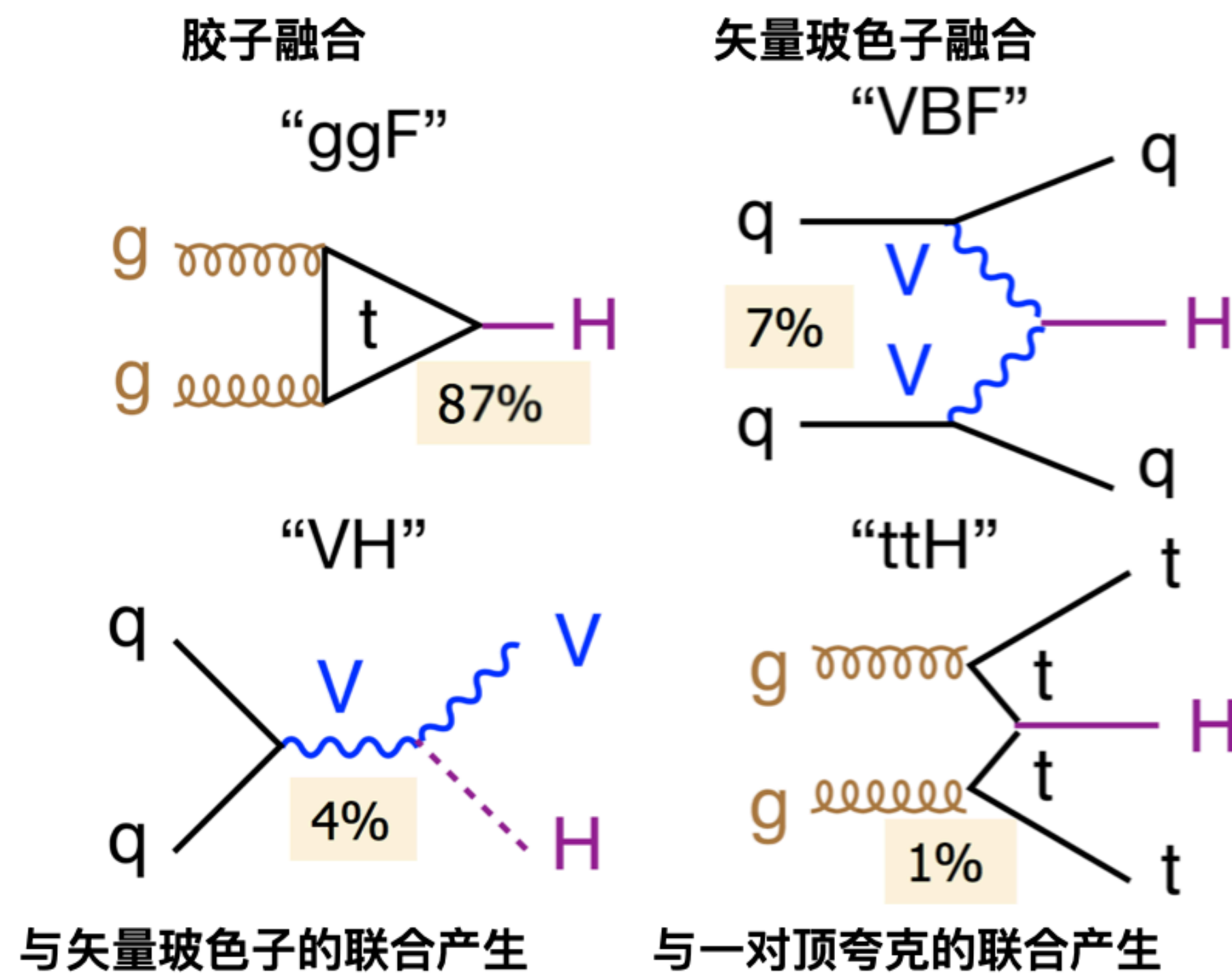
希格斯机制

- 1964年, *Robert Brout, François Englert, Peter Higgs, Gerald Guralnik, Carl Hagen, Tom Kibble* 提出一个机制来解释基本粒子怎样得到它们的质量
- 在宇宙中, 有一个遍布整个空间的希格斯“场”, 将穿过它的无质量的粒子变成有质量的粒子
- 预言一个自旋为0的、有质量的新玻色子



希格斯玻色子的产生和衰变方式

- 希格斯玻色子与有质量的基本粒子耦合
- 这些耦合决定了希格斯玻色子的产生和衰变方式:



希格斯玻色子的发现

希格斯粒子的发现是一段漫长的超过30年的旅程!!

DESY、Cornell、PSI (80年代-90年代初)

欧洲核子研究中心 *LEP* (1989-2000)

费米实验室 *Tevatron* (1983-2011)

欧洲核子研究中心 *LHC* (2010-)



北京大学高原宁教授
曾担任*LEP*上*ALEPH*实验的
希格斯工作组召集人

LHC 希格斯寻找

希格斯粒子不稳定

我们观测希格斯粒子的唯一办法是
探测它的衰变产物

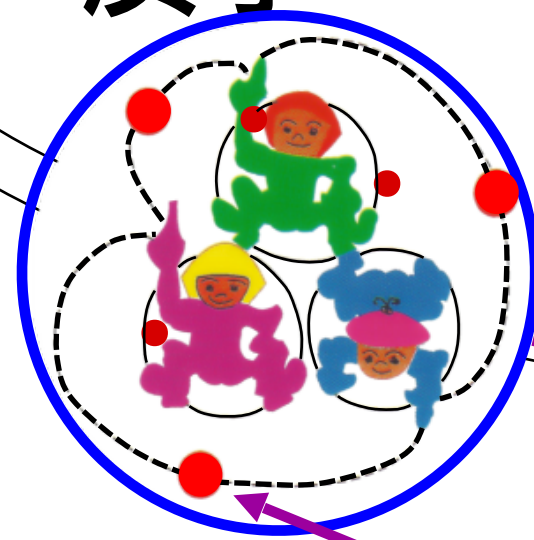
希格斯可以衰变到

双光子、四轻子、
或别的“衰变道”

1600个先进技术超导磁铁

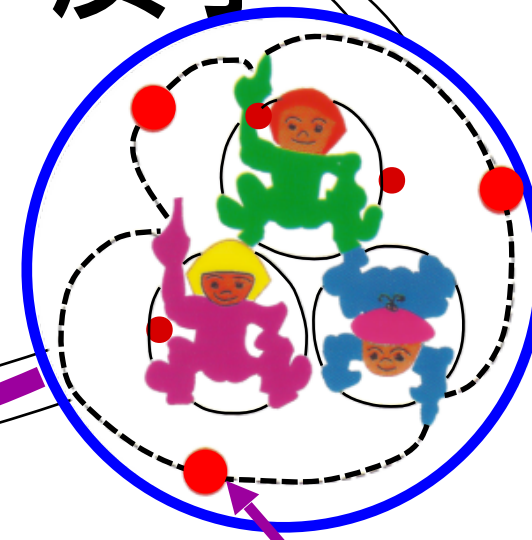
LHC

质子



胶子

质子



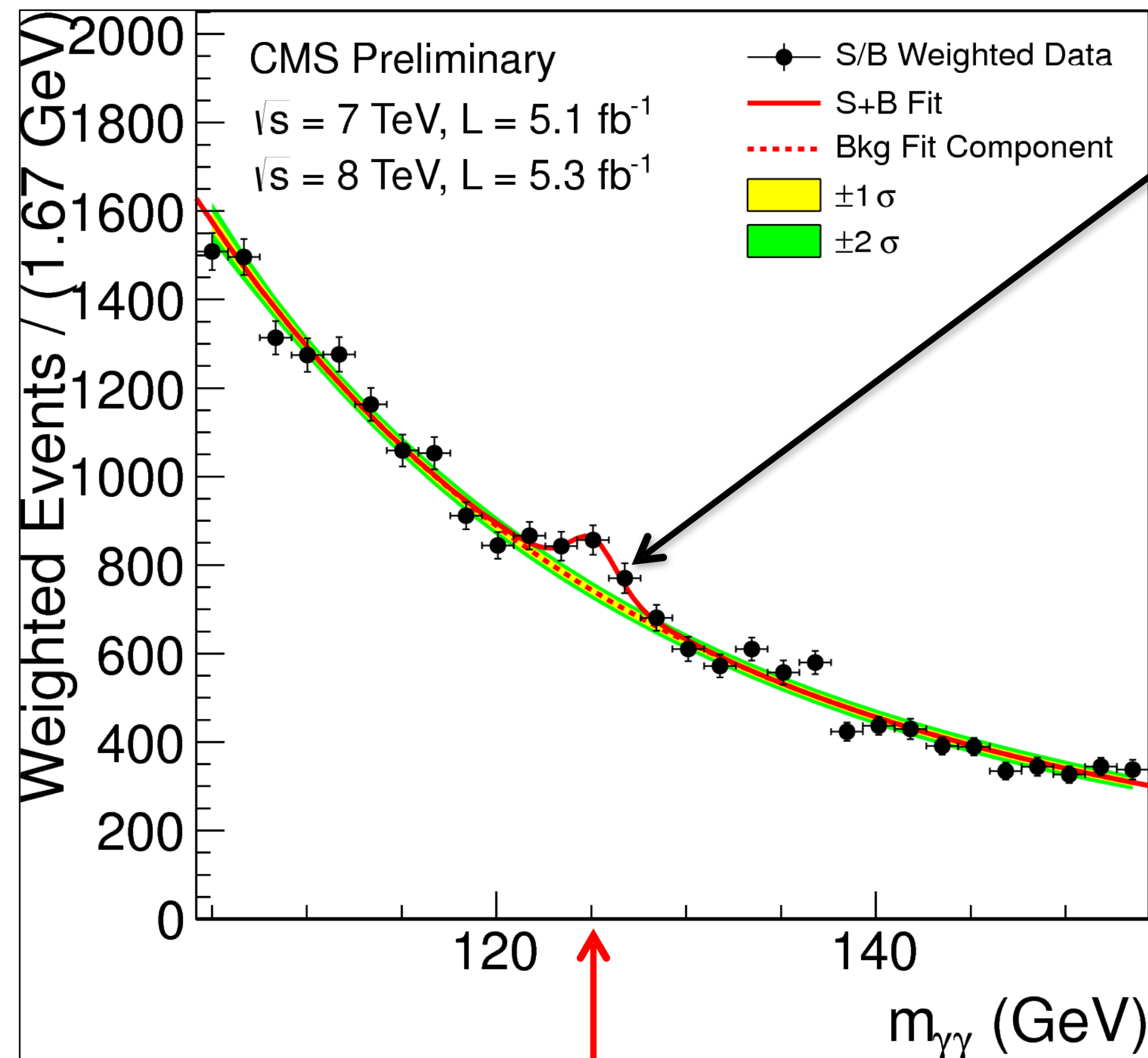
胶子

ATLAS 探测器

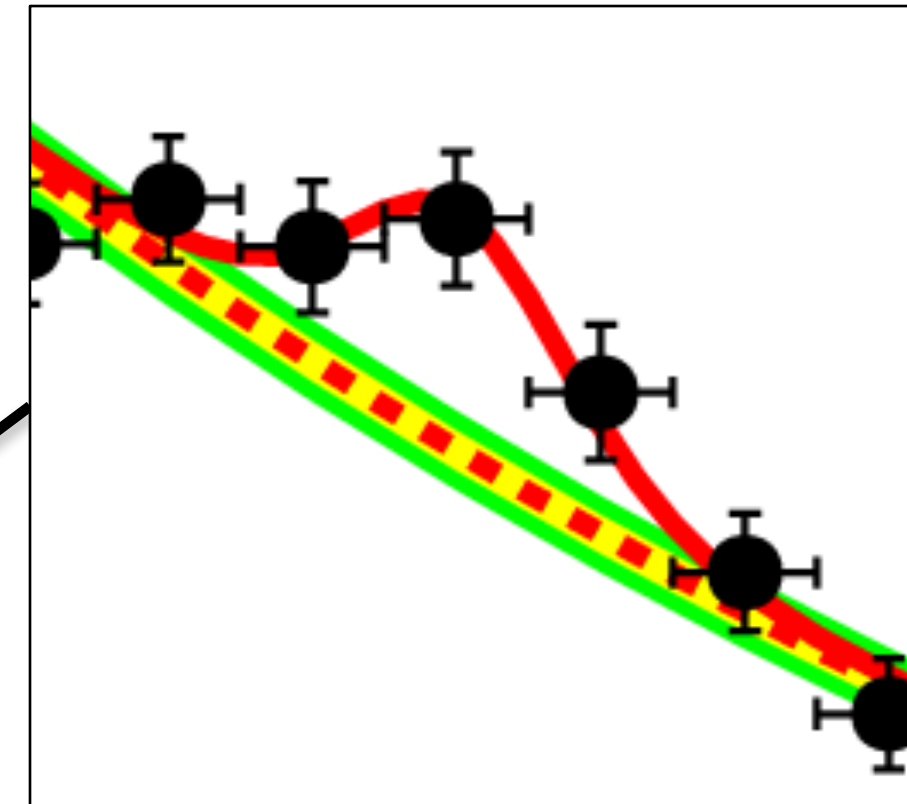
每分钟大约产生一个希格斯粒子

Higgs 发现道 #1

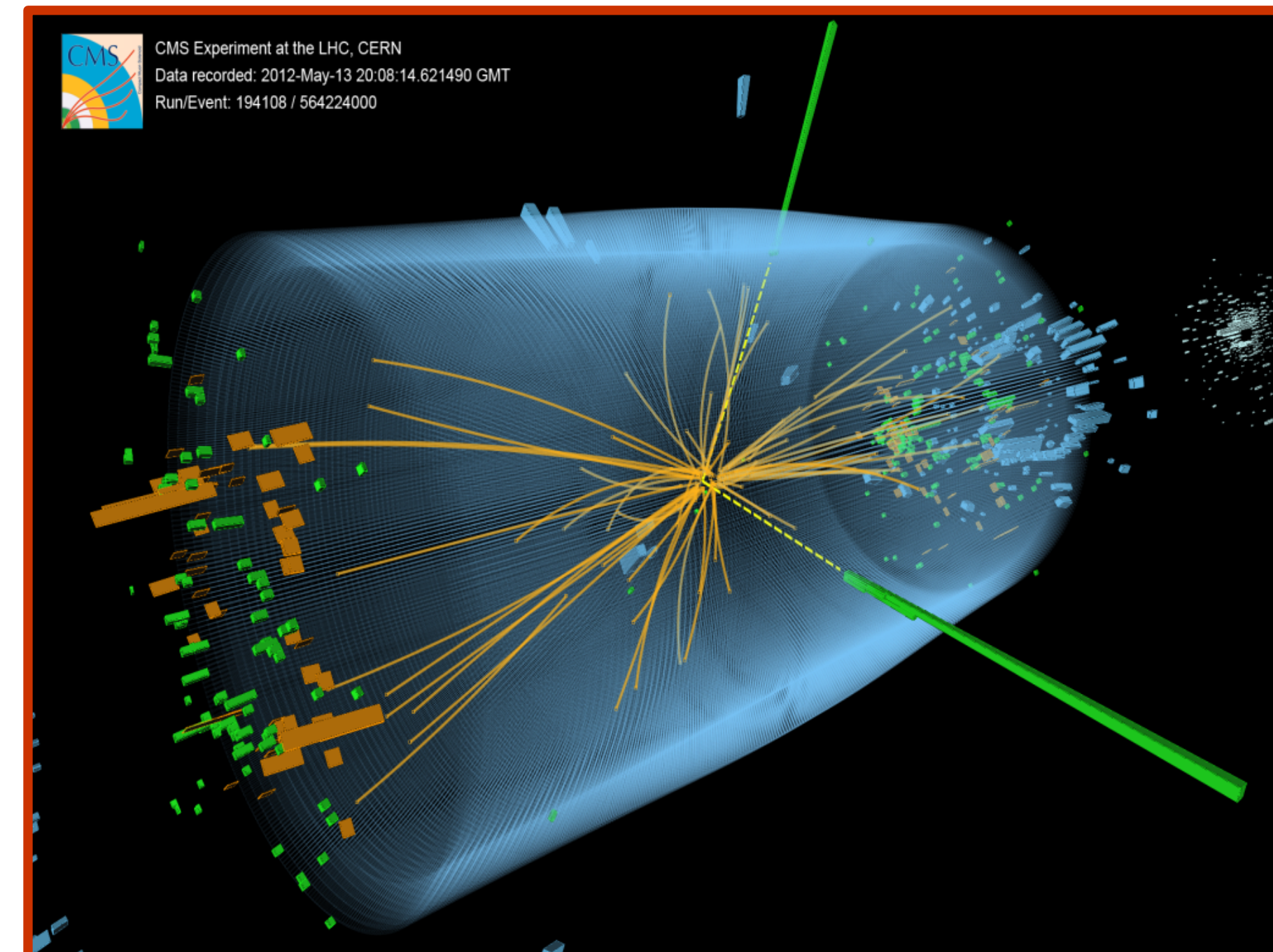
$H \rightarrow two\ photons$



Mass = 125 GeV
(1 GeV = 10^9 eV)

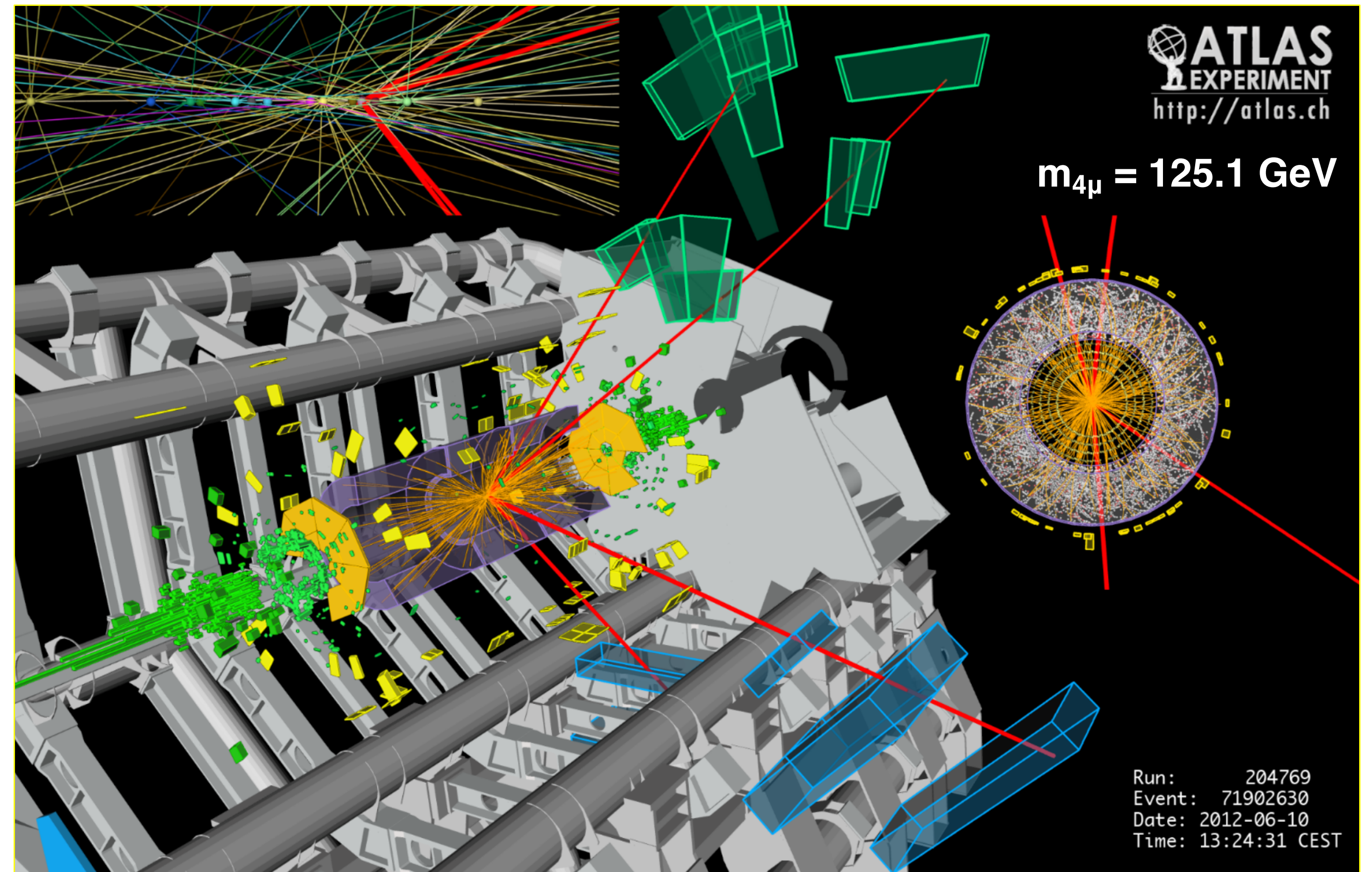
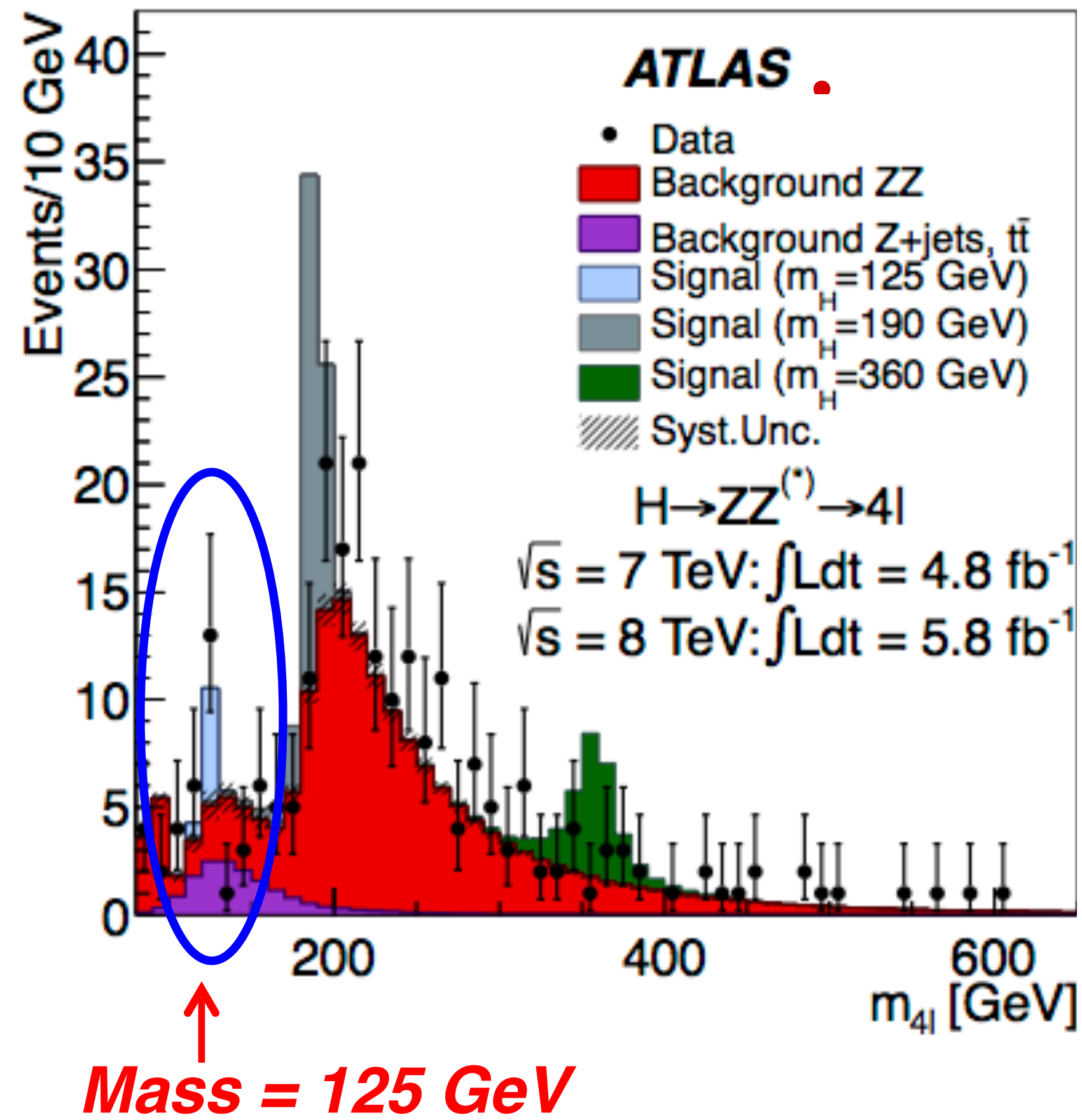


CMS



Higgs 发现道 #2

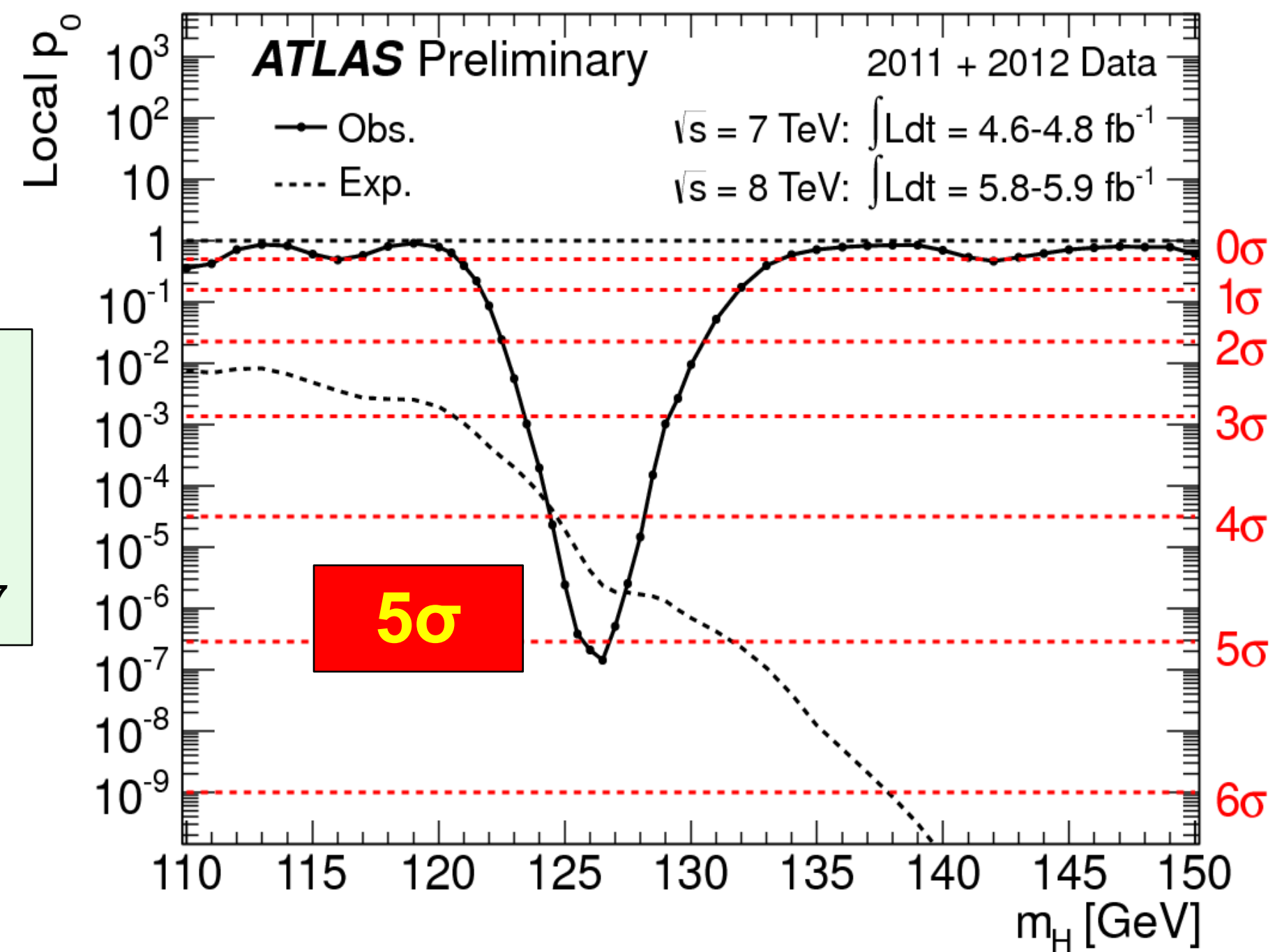
$H \rightarrow 4 \text{ leptons}$



Higgs 联合分析

联合两个“发现道”的结果 $H \rightarrow 2 \text{ photons}$ 与 $H \rightarrow 4 \text{ leptons}$ + 灵敏度相对弱的道 $H \rightarrow WW, H \rightarrow \tau\tau, H \rightarrow bb$

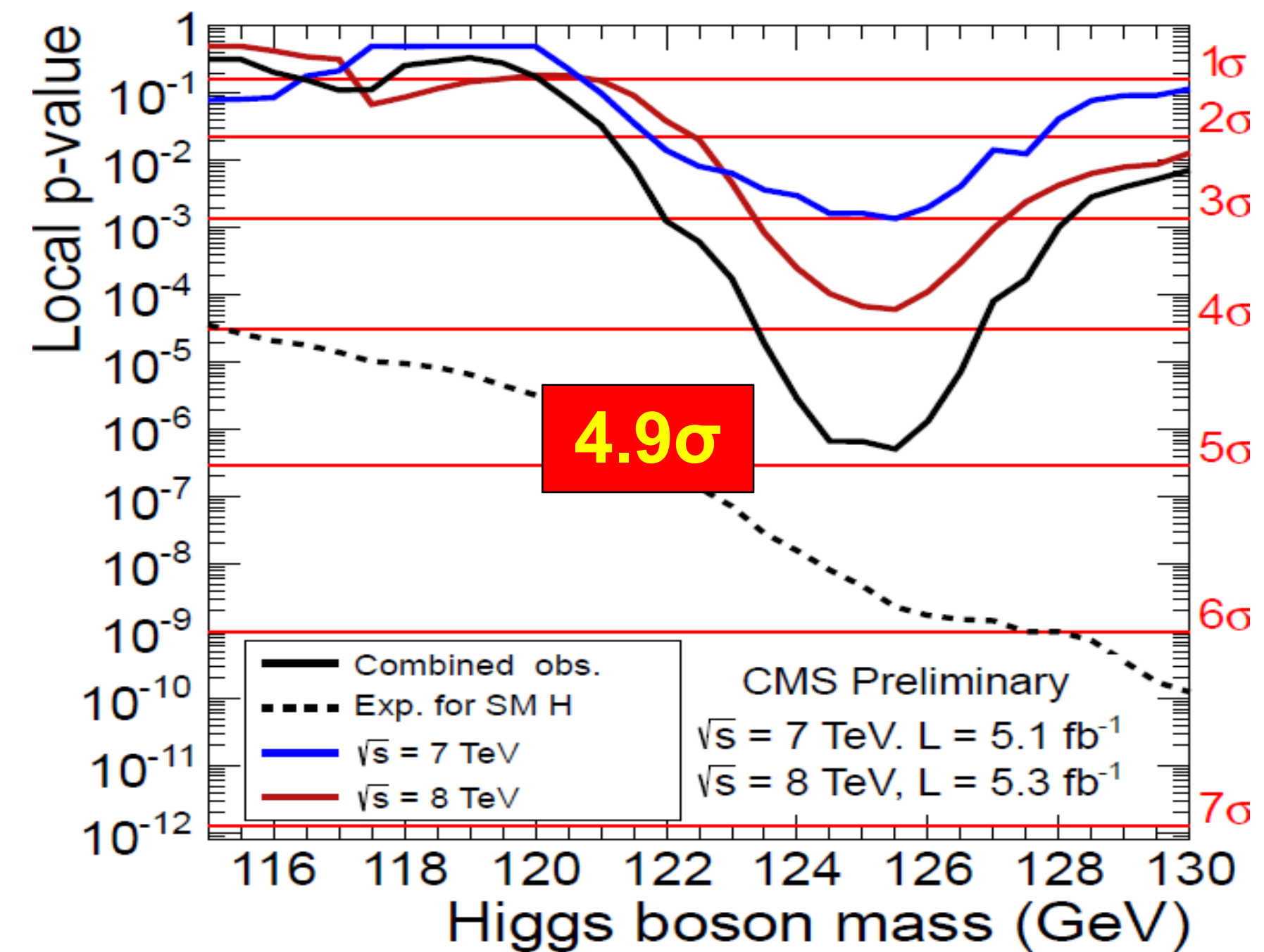
ATLAS



最大的超出:

5 σ around $m_H = 126.5 \text{ GeV}$

CMS



最大的超出:

4.9 σ around $m_H = 125 \text{ GeV}$

希格斯粒子发现的时刻

大型强子对撞机上的**ATLAS**和**CMS**实验各自独立地得到 **5σ** 的希格斯玻色子的信号显著度后，**CERN**的主任**Rolf Heuer**宣布：

“I think we have it”



“我们现在找到了粒子物理学缺失的基石。我们有一个发现。我们观察到了一种与希格斯玻色子一致的新粒子。”

2012年7月4日，
宣布发现希格斯玻色子

希格斯粒子发现的时刻

2012年7月4日, “*Discovery!*”



希格斯粒子发现的时刻

7月4日，在CERN研讨会结束时，吴秀兰教授与彼得·希格斯教授握手。

吴教授告诉希格斯教授：
“我找你已经20多年了。”

希格斯教授回答说：“现在，你找到我了。”

Professor Higgs



Professor Englert

Professor Wu

Nobel Prize in Physics 2013



The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider".

2. 希格斯玻色子的性质研究

发现了希格斯玻色子，我们的工作就结束了吗？

没有！

希格斯玻色子的性质研究

- 希格斯玻色子是第一个自旋为0的基本粒子，所以LHC发现的不仅是一个新粒子，而是一种新的基本粒子。
 - 许多人将希格斯玻色子的发现视为粒子物理在过去50年最重要的一步：它开始了粒子物理的新纪元
- 希格斯玻色子与基本粒子的耦合都是理论中新的相互作用，并且尚未被实验完全证实
 - 对这些相互作用的研究引起了高能物理学界的高度兴趣

希格斯玻色子的性质研究

- 希格斯玻色子的发现为我们打开了深化理解粒子物理的一个新道路
- 高能物理学家进行了关于希格斯玻色子性质的大量研究
 - 如果测量结果与标准模型预言有偏差，将可以为我们提供新物理的线索
 - 确定标准模型的希格斯机制是否正确及更复杂的希格斯机制是否存在



Why is the electroweak interaction so much stronger than gravity?

- Are there new particles close to the mass of the Higgs boson?
- Is the Higgs boson elementary or made of other particles?
- Are there anomalies in the interactions of the Higgs boson with the W and Z bosons?

Why is there more matter than antimatter in the Universe?

- Are there charge-parity violating Higgs decays?
- Are there anomalies in the Higgs self-coupling that would imply a strong first-order early-Universe electroweak phase transition?
- Are there multiple Higgs sectors?

What is dark matter?

- Can the Higgs boson provide a portal to dark matter or a dark sector?
- Is the Higgs lifetime consistent with the Standard Model?
- Are there new decay modes of the Higgs boson?

What is the origin of the vast range of quark and lepton masses in the Standard Model?

- Are there modified interactions to the Higgs boson and known particles?
- Does the Higgs boson decay into pairs of quarks or leptons with distinct flavours (for example, $H \rightarrow \mu^+ \tau^-$)?

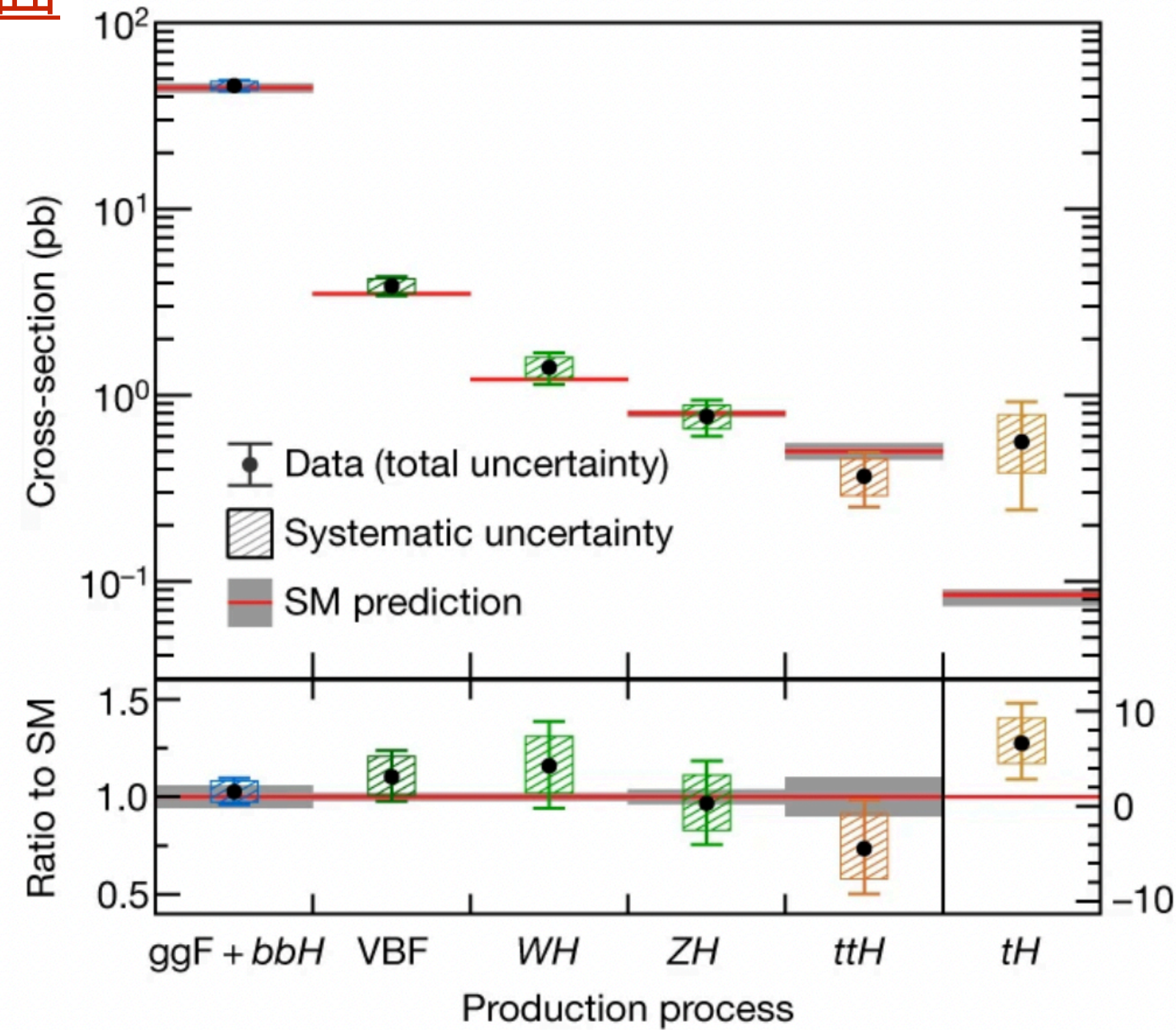
What is the origin of the early Universe inflation?

- Any imprint in cosmological observations?

2.1 希格斯玻色子的耦合性质

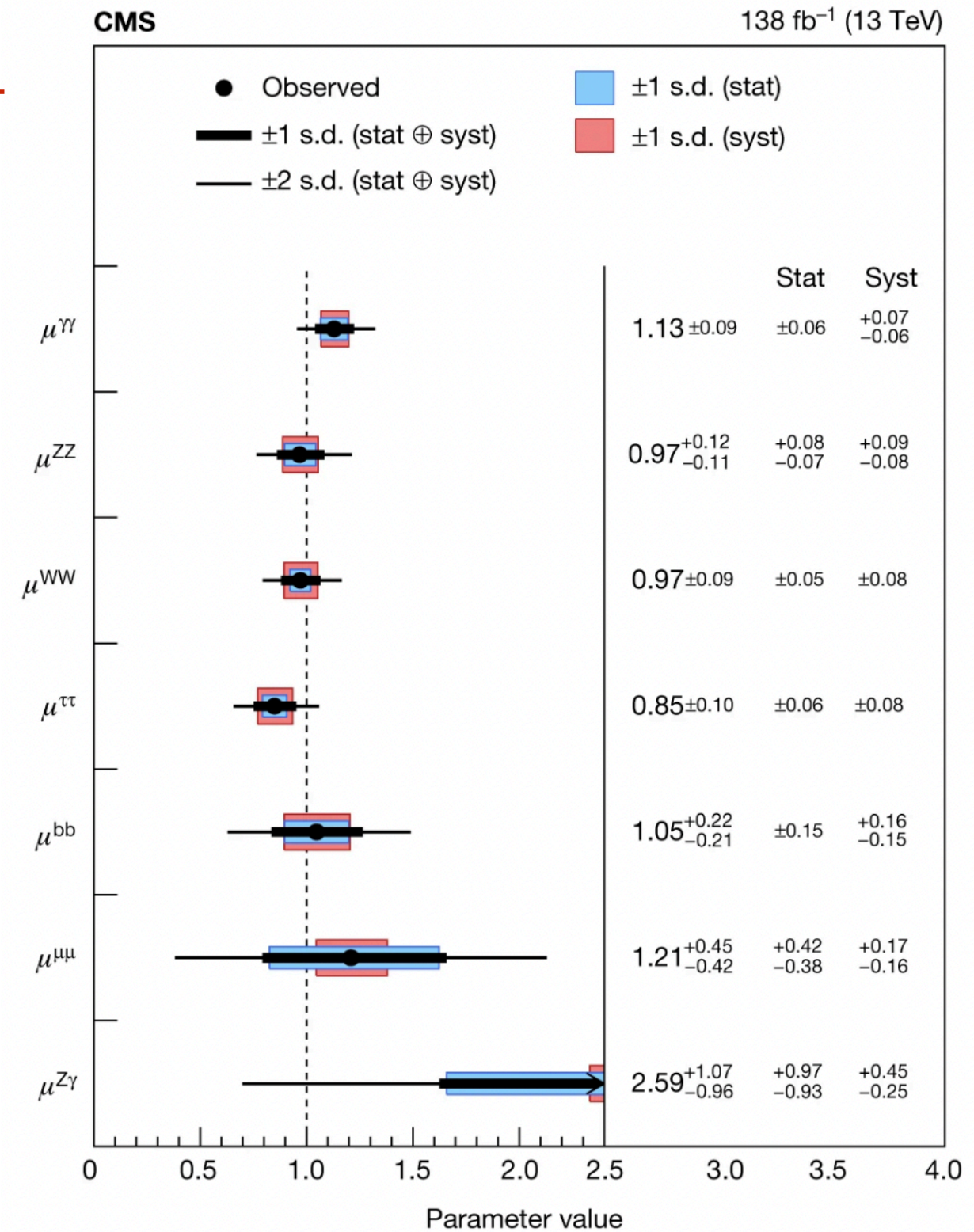
希格斯玻色子的产生和衰变率

产生截面



[Nature 607 \(2022\) 52-59](#)

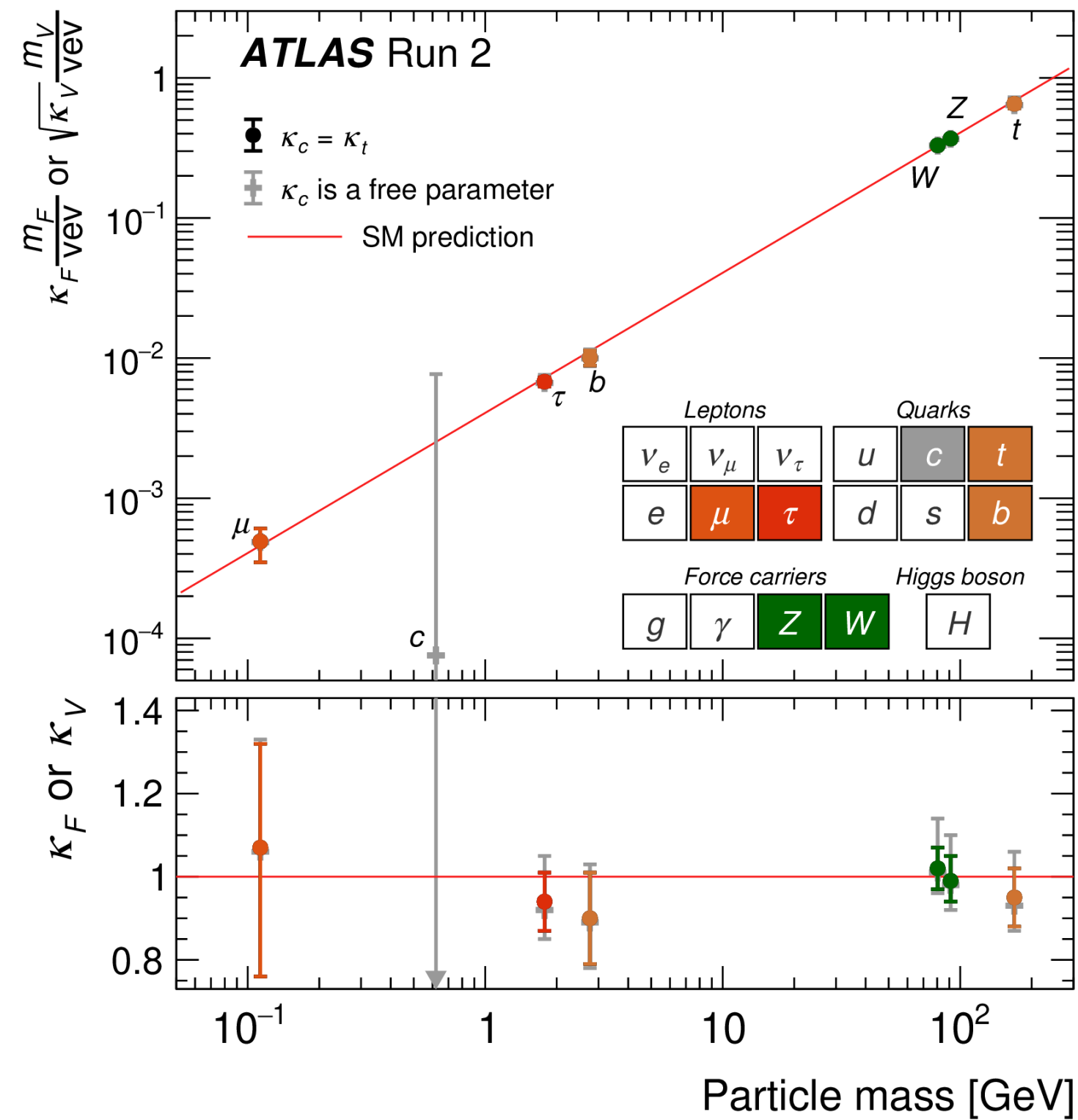
衰变分支比



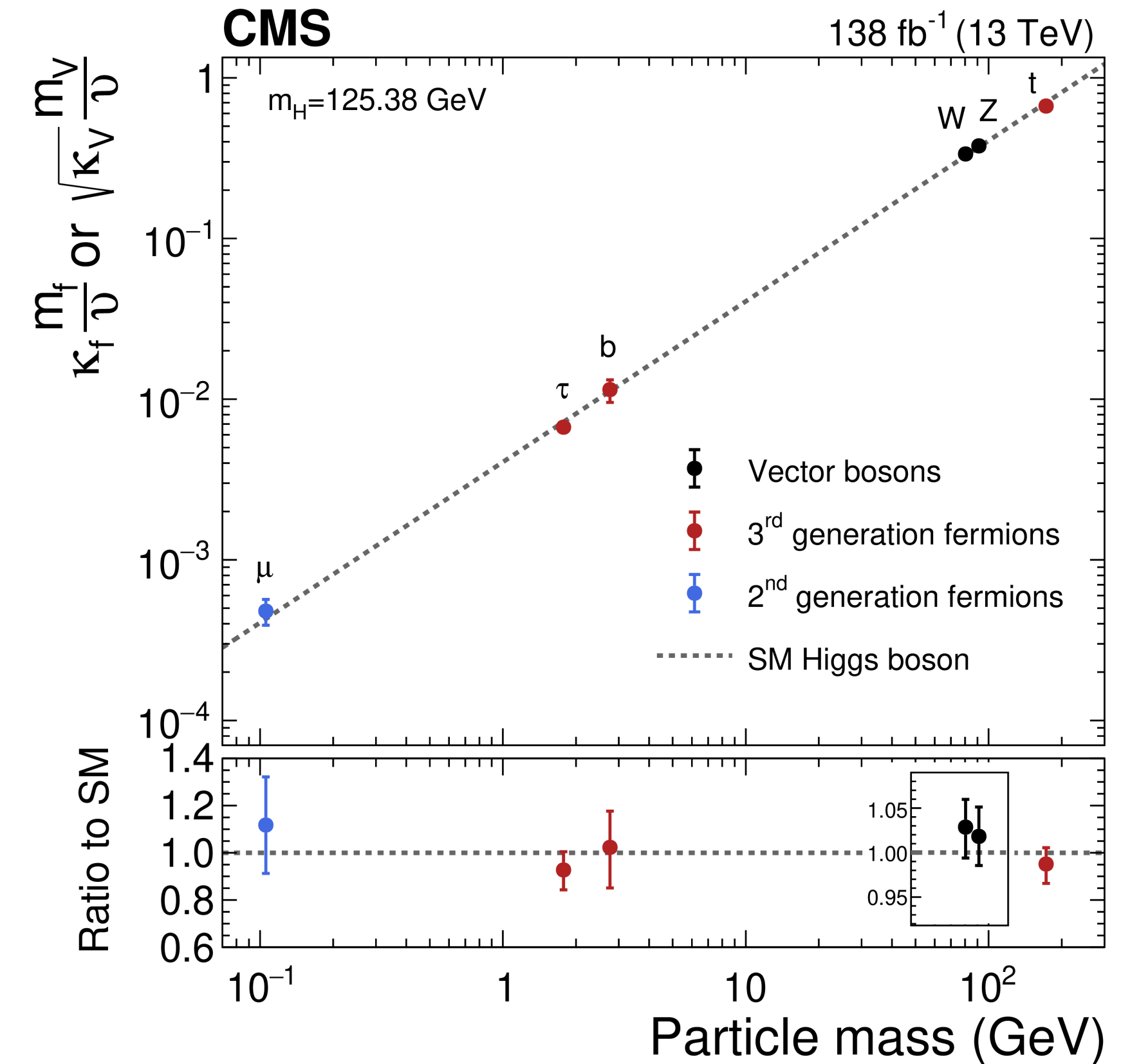
[Nature 607 \(2022\) 60-68](#)

- 所有主要的希格斯产生模式 (ggF, VBF, WH, ZH, ttH) 和衰变模式 ($H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow WW$, $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$) 都已经被发现!
- 目前趋势: 微分测量 & 稀有产生/衰变

希格斯玻色子耦合强度



[Nature 607 \(2022\) 52-59](#)



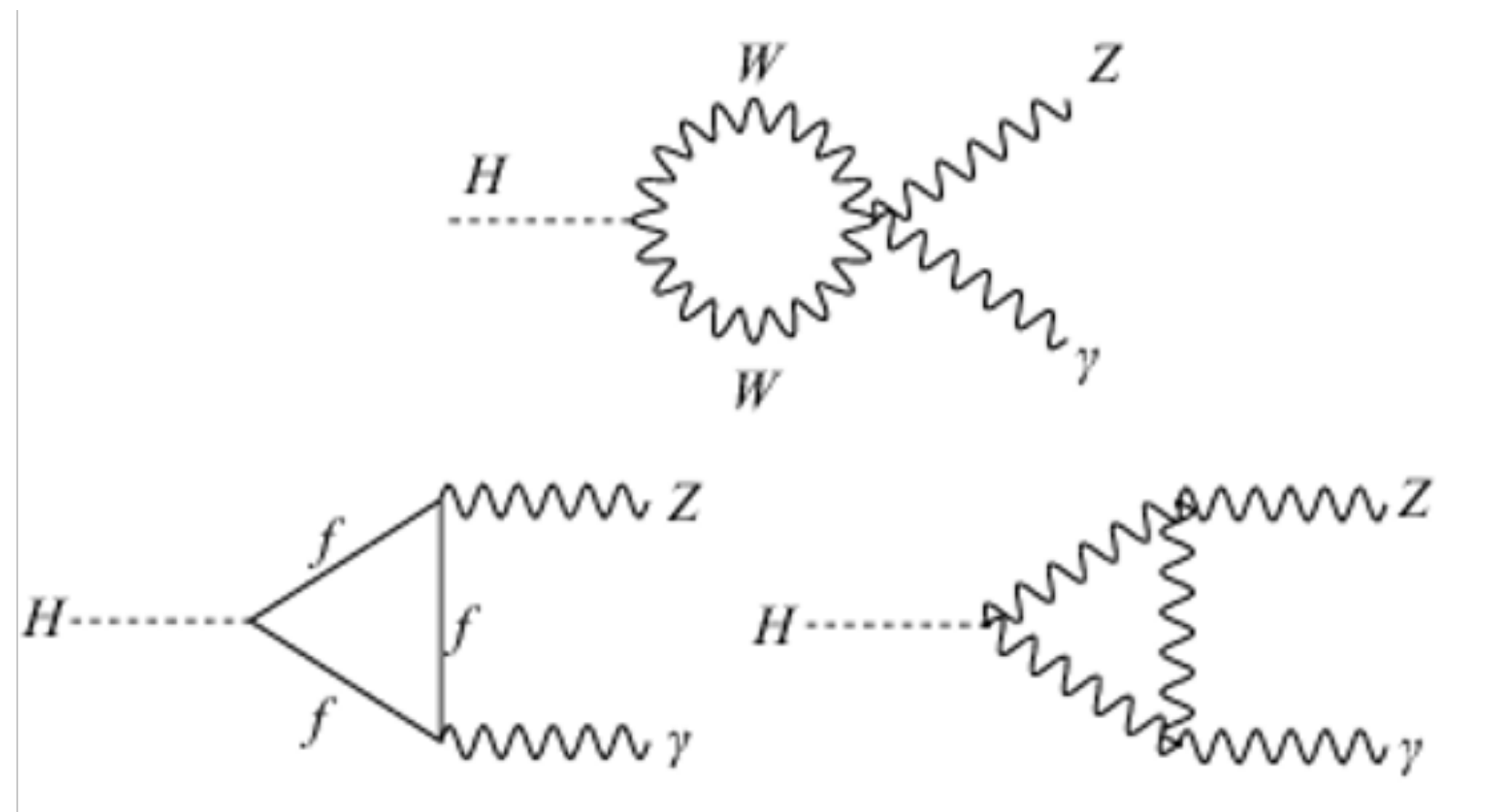
[Nature 607 \(2022\) 60-68](#)

- 对Higgs与各基本粒子的耦合强度乘上kappa modifier (如 κ_{top}), 并进行测量
- 在三个数量级的粒子质量上, 与标准模型预言吻合

对Higgs耦合强度的测量是LHC最重要的成就之一

$H \rightarrow Z\gamma$ 衰变

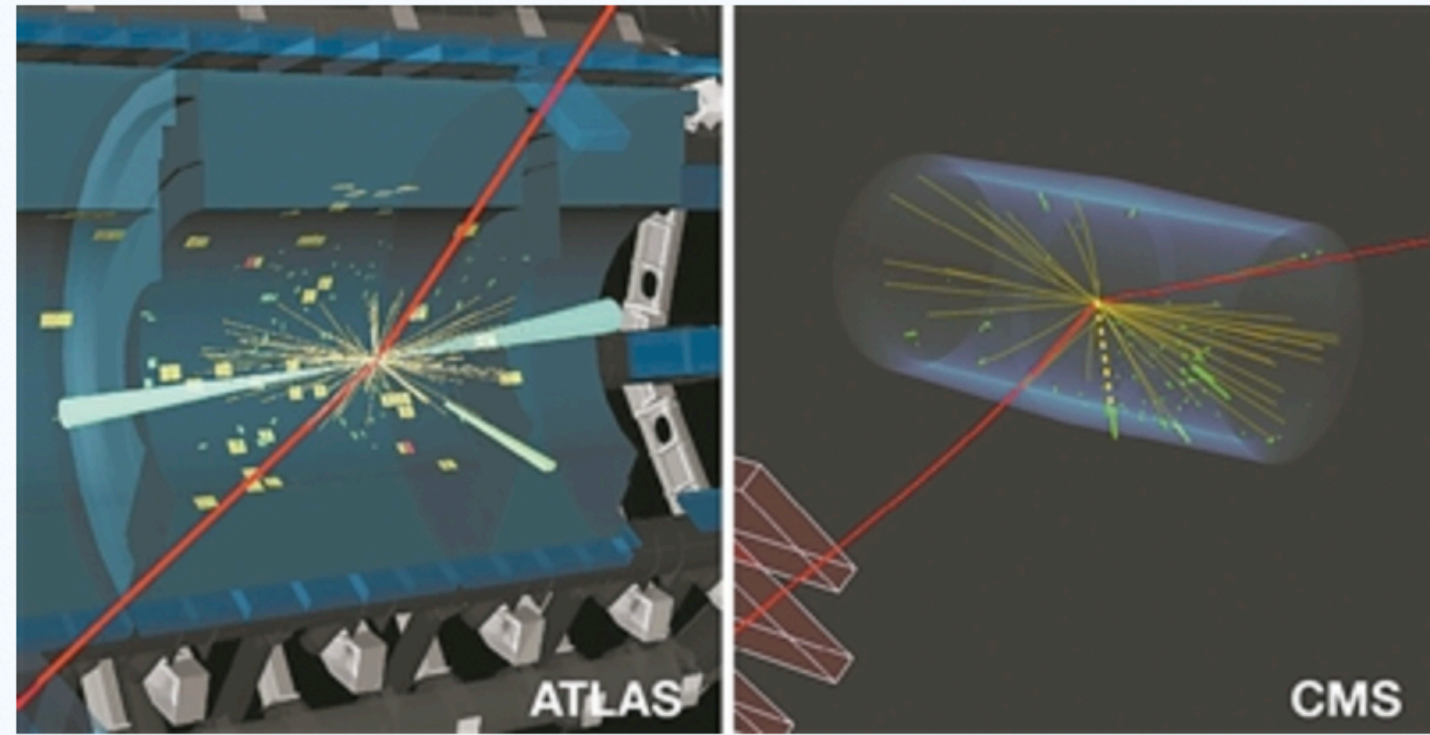
$H \rightarrow Z\gamma$
衰变



- 希格斯玻色子到Z玻色子+光子的衰变：
 - 量子圈中可能存在新粒子，有望提供新物理的线索
 - 相关理论文章：Qing-Hong Cao et al. *Phys. Lett. B* 789 (2019) 233 等
- 基于LHC数据，ATLAS和CMS实验用相似的分析策略对 $H \rightarrow Z\gamma$ 衰变进行了寻找

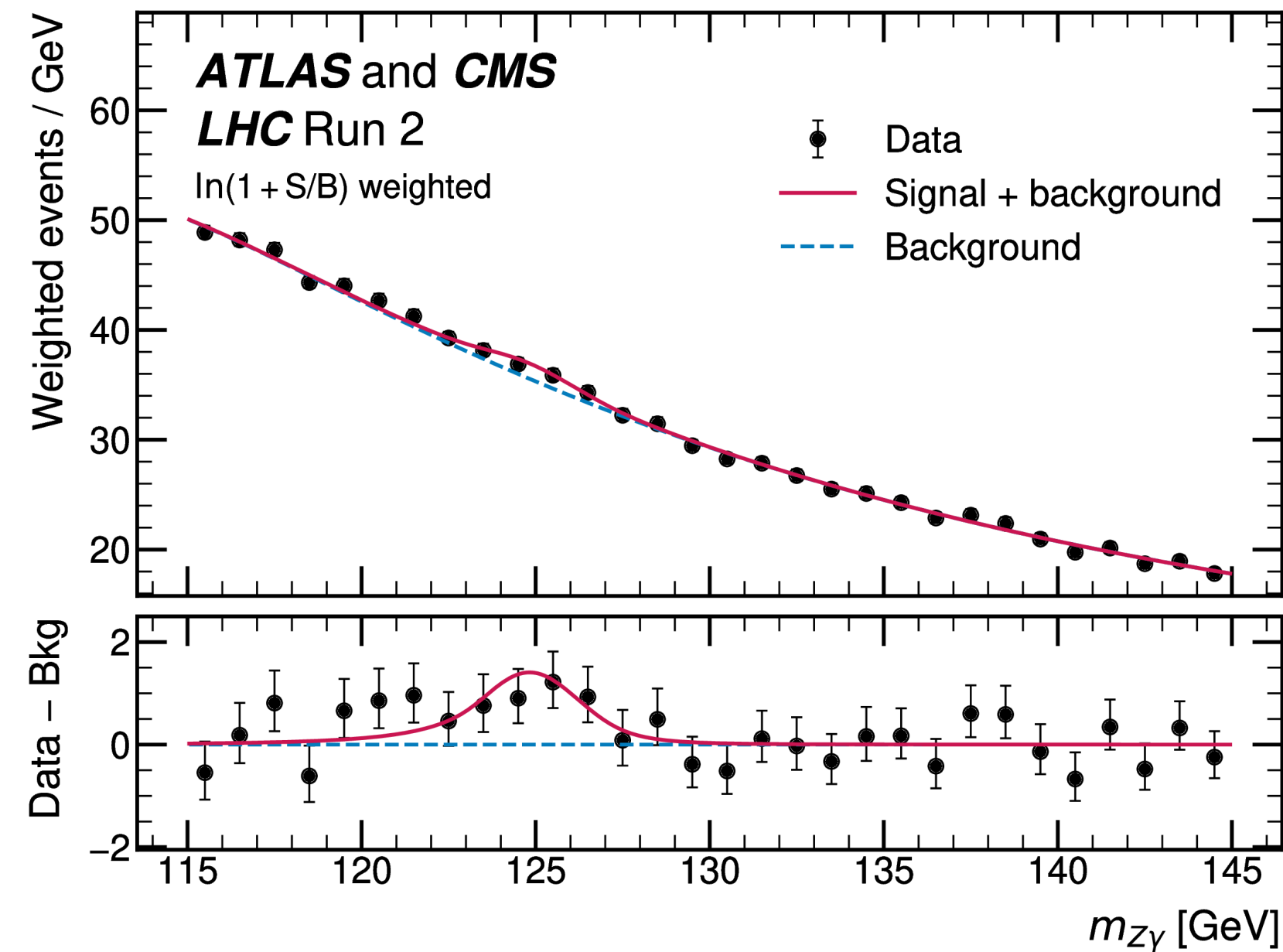
$H \rightarrow Z\gamma$ 衰变

罕见希格斯玻色子衰变证据初现



ATLAS（左图）和CMS（右图）携手探测到的希格斯玻色子衰变为Z玻色子和光子的候选事件，其中Z玻色子衰变成一对缪子。

图片来源：CERN官网



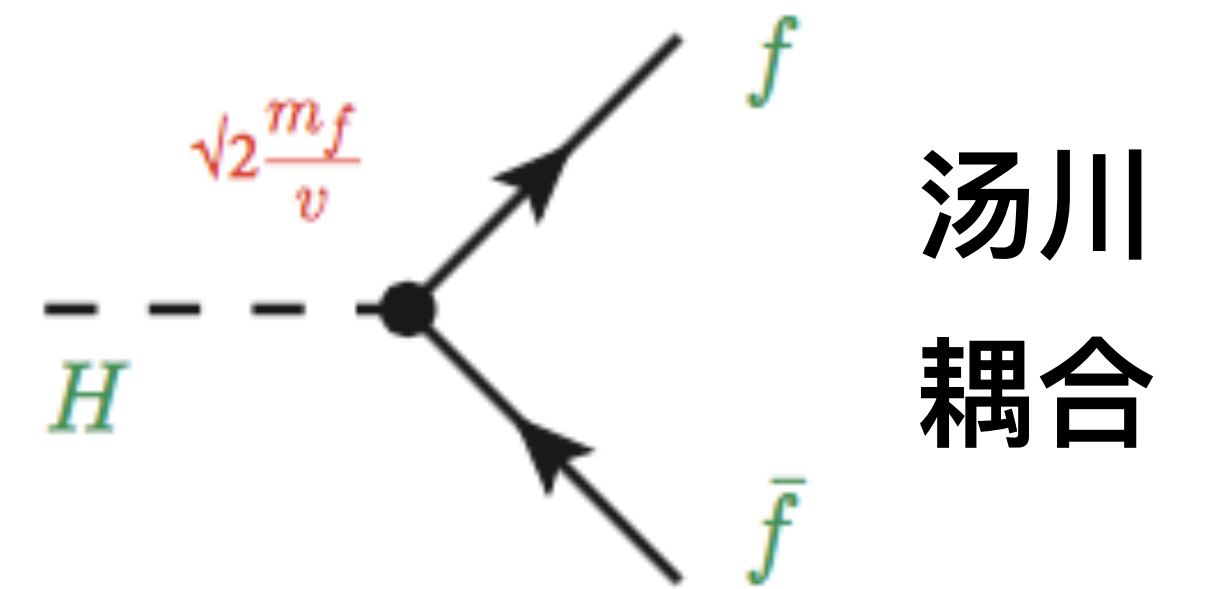
[Phys. Rev. Lett. 132 \(2024\) 021803, Editor's Suggestion, Featured in Physics, Collection of the Year](#)

- 统计合并ATLAS和CMS实验的 $H \rightarrow Z\gamma$ 衰变的寻找结果
 - 预期信号显著度为 1.6σ ，而观测信号显著度达到 3.4σ
 - 这是希格斯玻色子到Z玻色子和光子衰变的首个实验证据
 - 《科技日报》和欧洲核子研究中心官方网站等对此进行了新闻报道
- 下一步，将使用更大统计量的数据对 $H \rightarrow Z\gamma$ 衰变进行测量

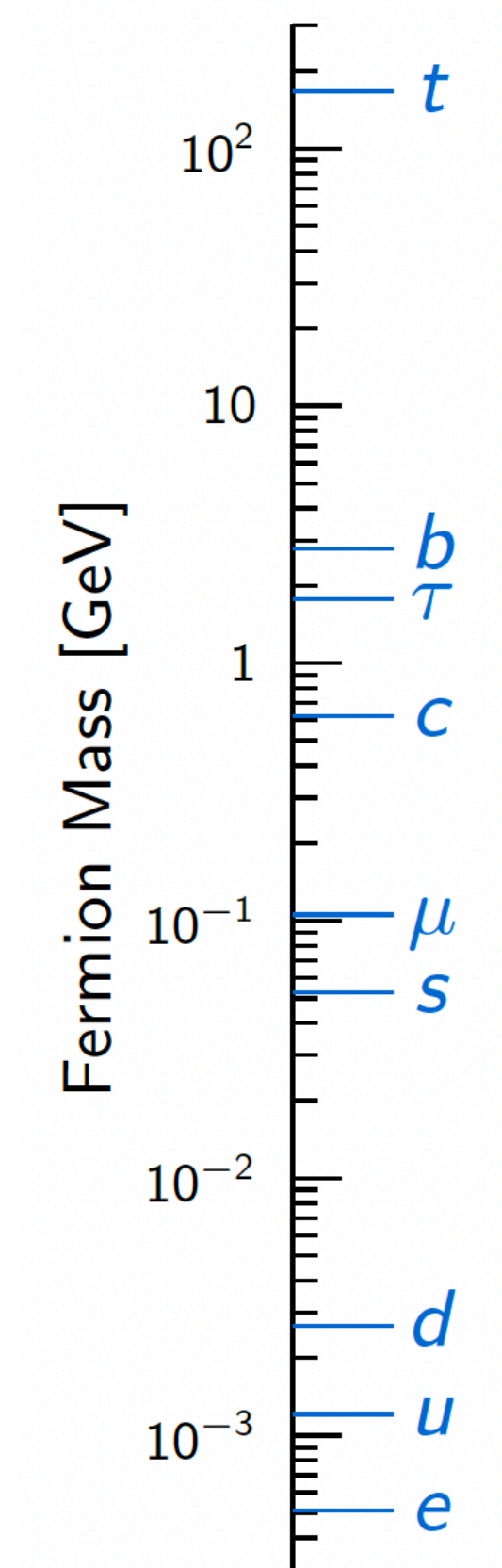
2.2 希格斯玻色子与费米子的耦合

希格斯玻色子与费米子的耦合

- 标准模型中，**希格斯玻色子与费米子（夸克和轻子）通过汤川相互作用进行耦合**
 - 为夸克和轻子产生质量
- 汤川相互作用是一种新的基本相互作用
 - **汤川相互作用的研究非常重要，可能对寻找费米子质量谱形式背后的基本物理机制提供重要启示**
- 实验渠道： **$t\bar{t}H$ 产生、 $H \rightarrow \tau\tau$ 衰变等**
 - 标准模型中，汤川相互作用强度与费米子质量成正比；超出标准模型的物理可以改变这些相互作用强度



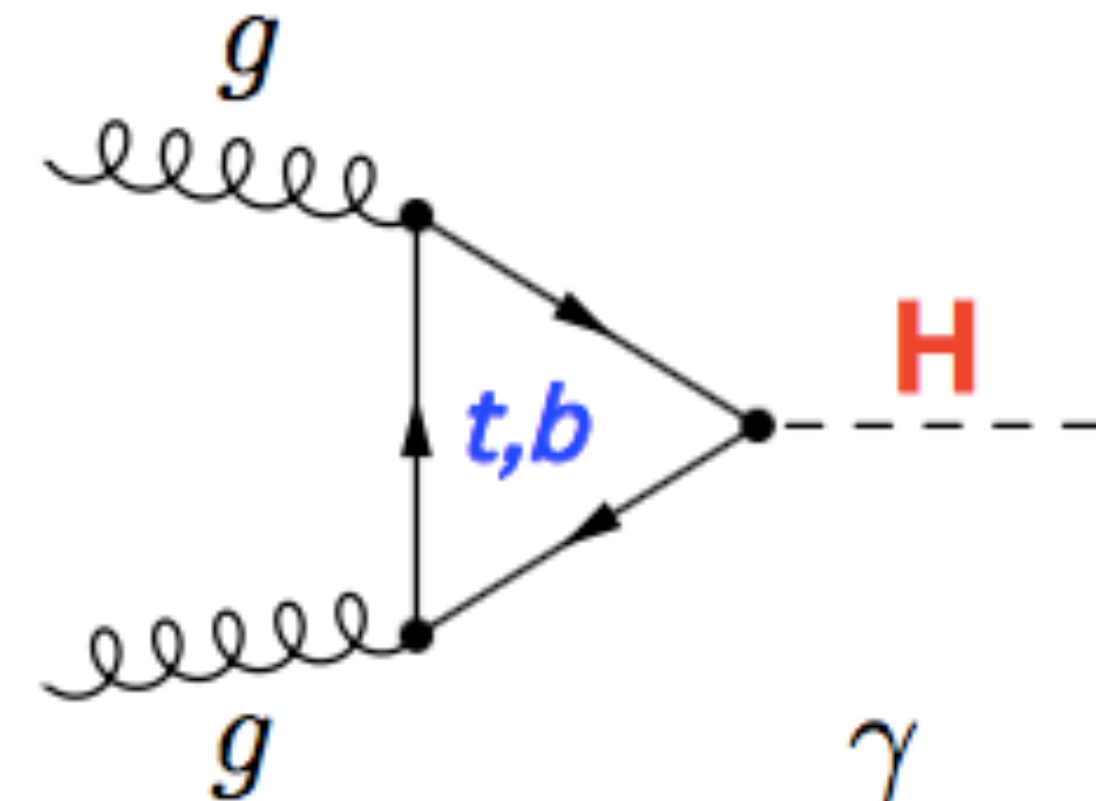
汤川
耦合



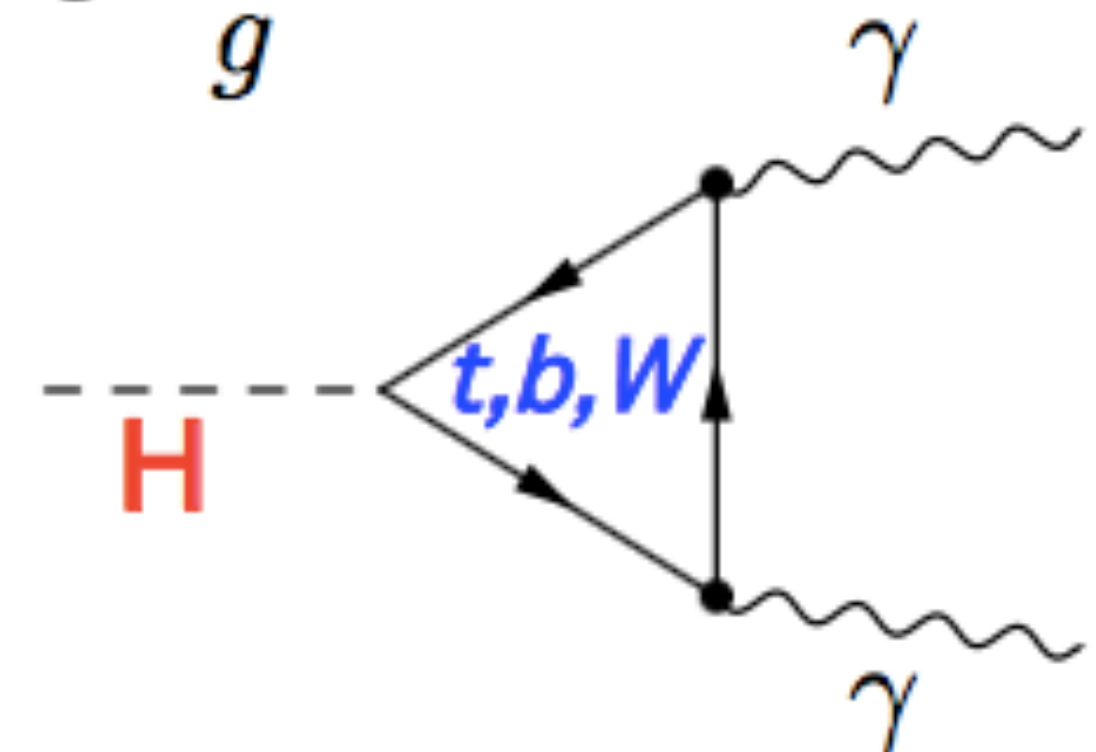
费米子
质量谱

希格斯玻色子与顶夸克的耦合

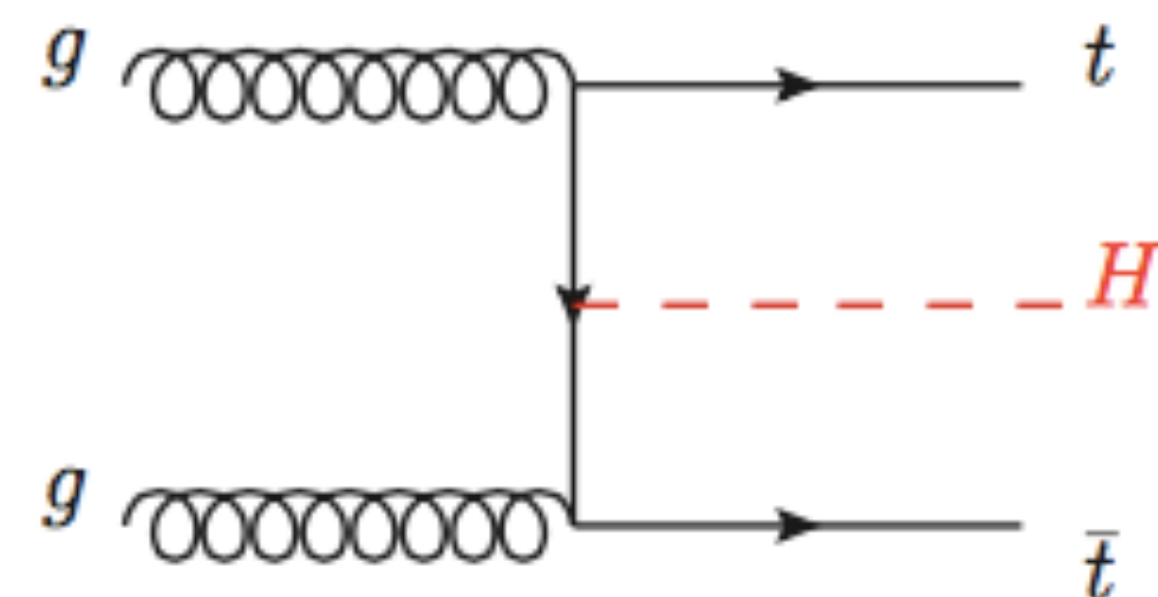
- 希格斯玻色子和顶夸克的耦合可以通过 ggF 产生和 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变间接探测
 - 两种 **loop-level** 过程，新粒子可能出现在 loop 里
- 对 Higgs-top 耦合的一种更直接的测试是研究希格斯玻色子与一对顶夸克的联合产生 ($t\bar{t}H$)
 - 一种 **tree-level** 过程，罕见的 Higgs 产生方式 ($\sim 1\%$)
- 通过比较 loop-level 过程和直接的 $t\bar{t}H$ 产生过程，我们可能发现新物理



**ggF
产生**

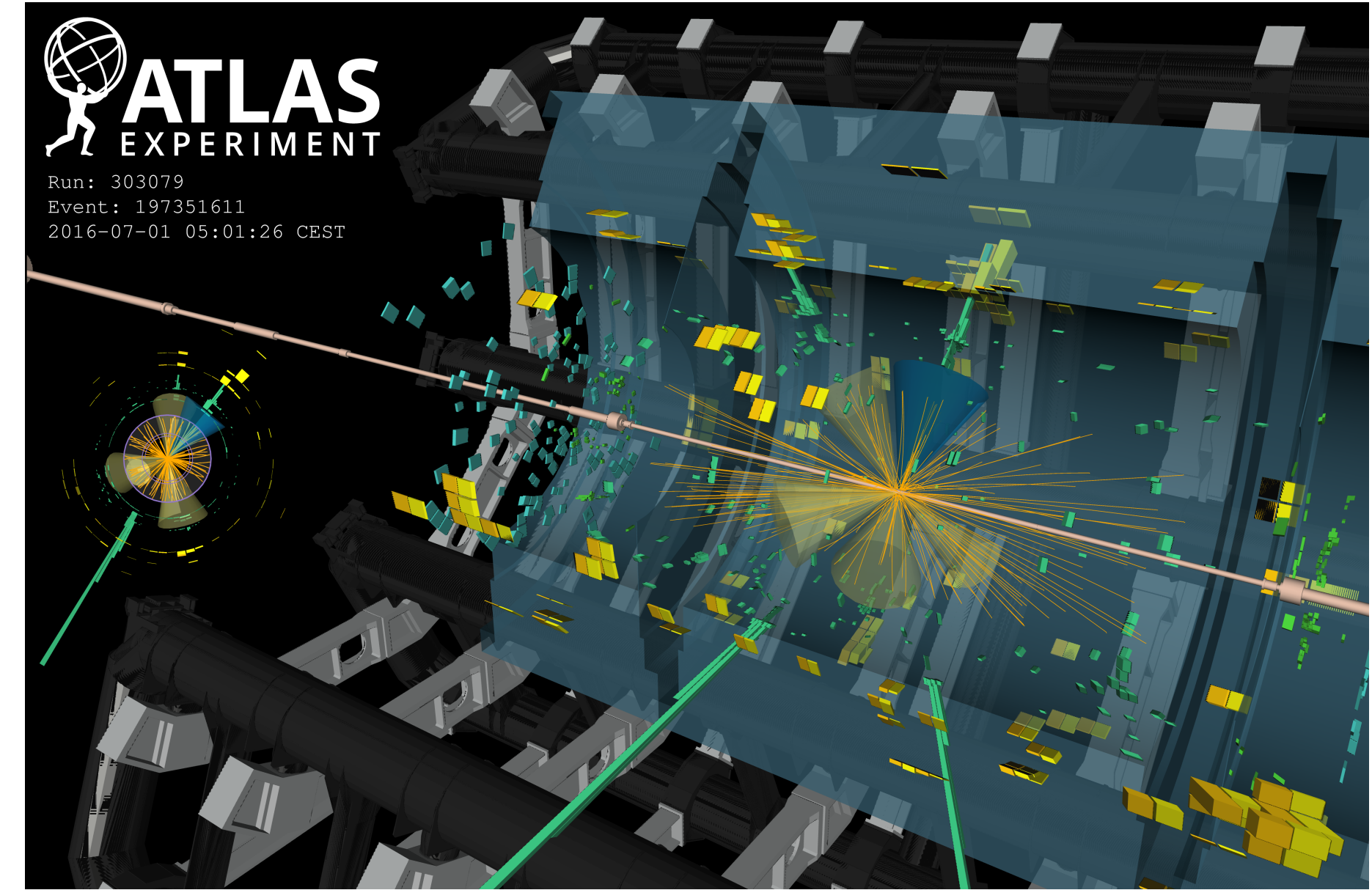
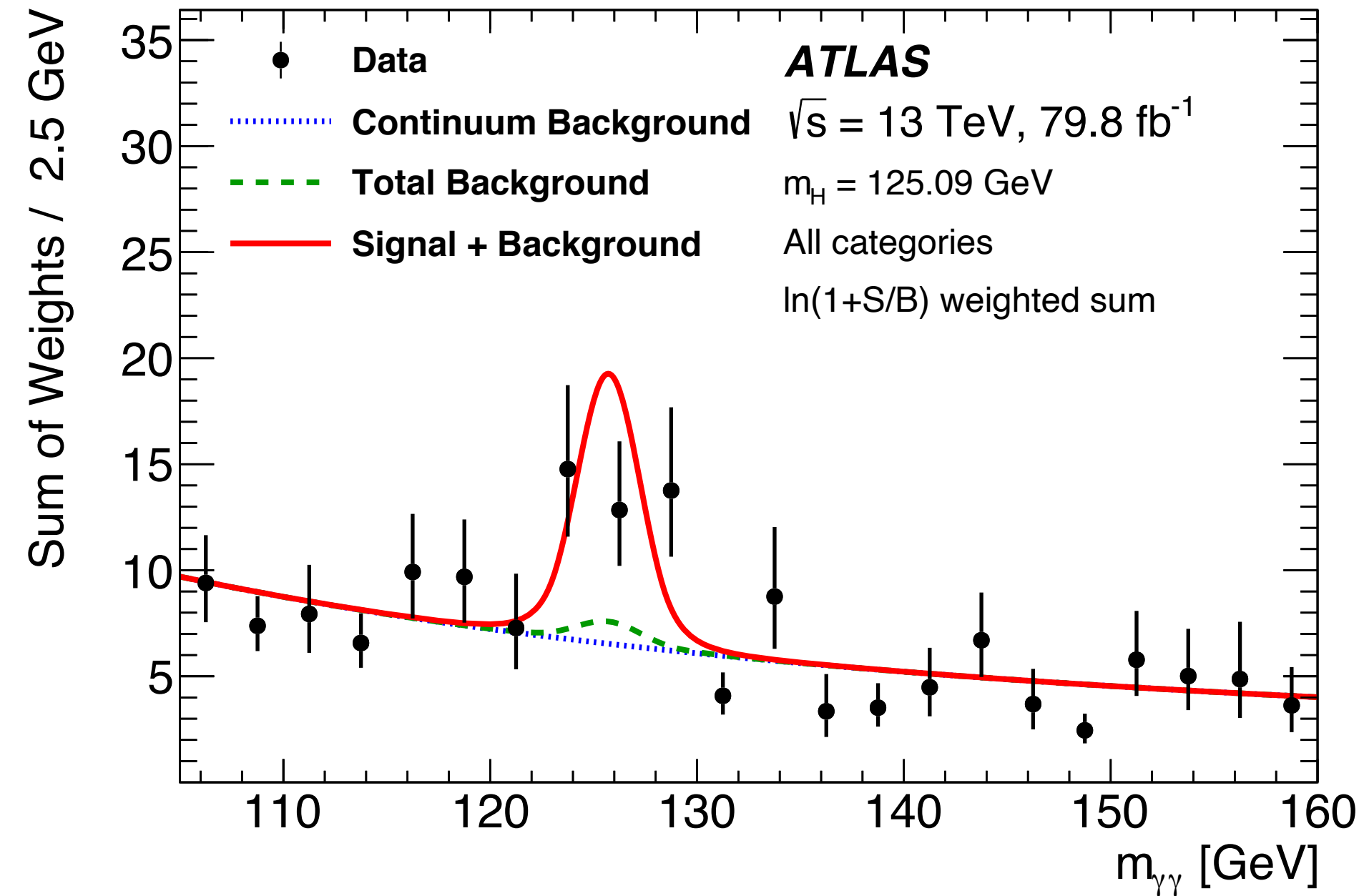


**$H \rightarrow \gamma\gamma$
衰变**



**$t\bar{t}H$
产生**

希格斯玻色子与顶夸克的耦合



- $t\bar{t}H$ 分析需要考虑不同的希格斯衰变道 ($\gamma\gamma$, WW^* , ZZ^* , $\tau\tau$, $b\bar{b}$)
 - 使用机器学习算法 (如XGB BDT) 区分信号和本底
- ATLAS的 $t\bar{t}H$ 联合分析 ([Phys. Lett. B 784 \(2018\) 173-191](#)) 中, 观测信号显著度是 **6.3σ**
- CMS的 $t\bar{t}H$ 联合分析 ([Phys. Rev. Lett. 120 \(2018\) 231801](#)) 中, 观测信号显著度是 **5.2σ**

这些结果发现 $t\bar{t}H$ 过程: 构成了Higgs-top耦合的直接观测!

希格斯玻色子与顶夸克的耦合

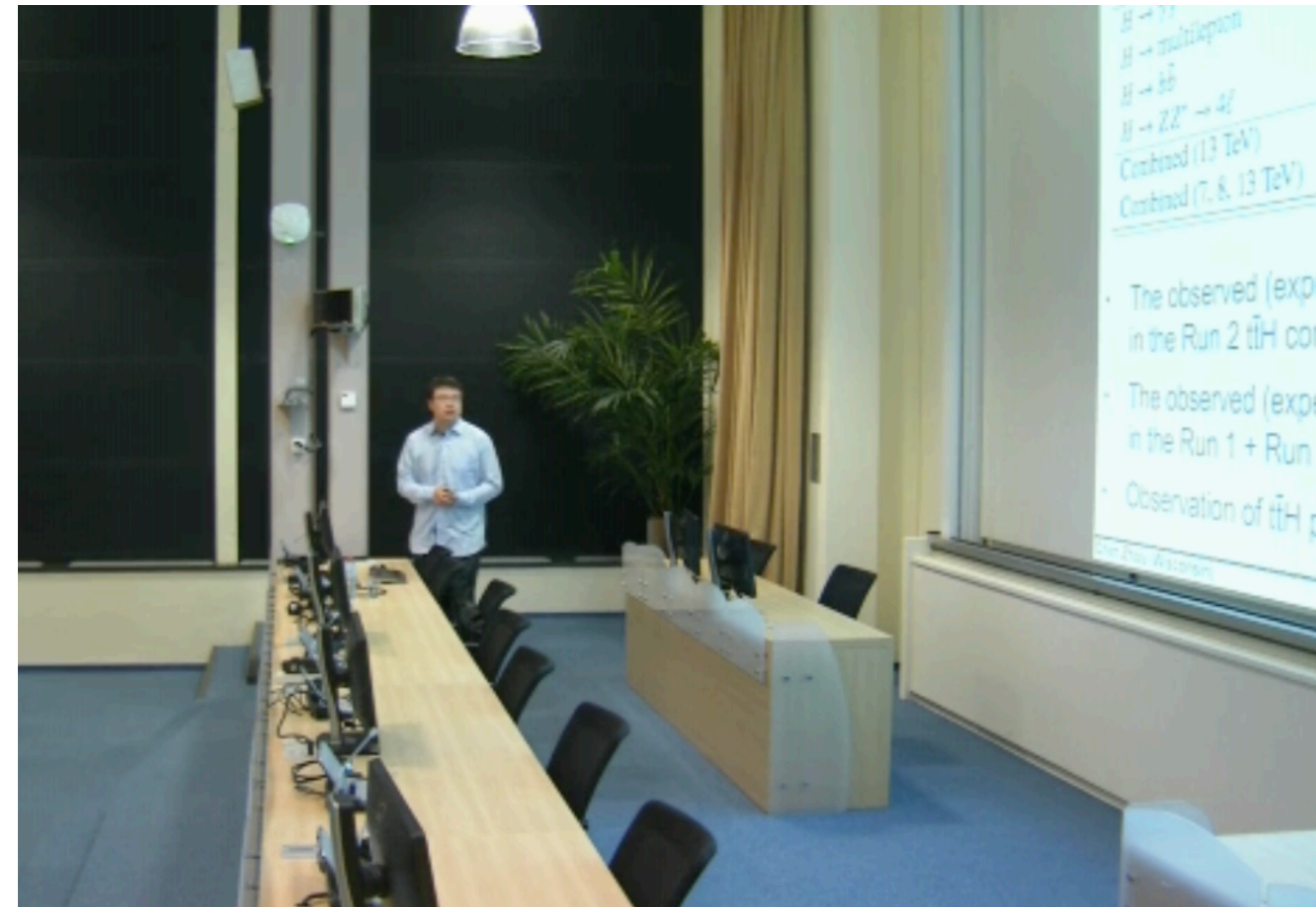
CERN向媒体发布新闻稿

The Higgs boson reveals its affinity for the top quark

New results from the ATLAS and CMS experiments at the LHC reveal how strongly the Higgs boson interacts with the heaviest known elementary particle, the top quark, corroborating our understanding of the Higgs and setting constraints on new physics.

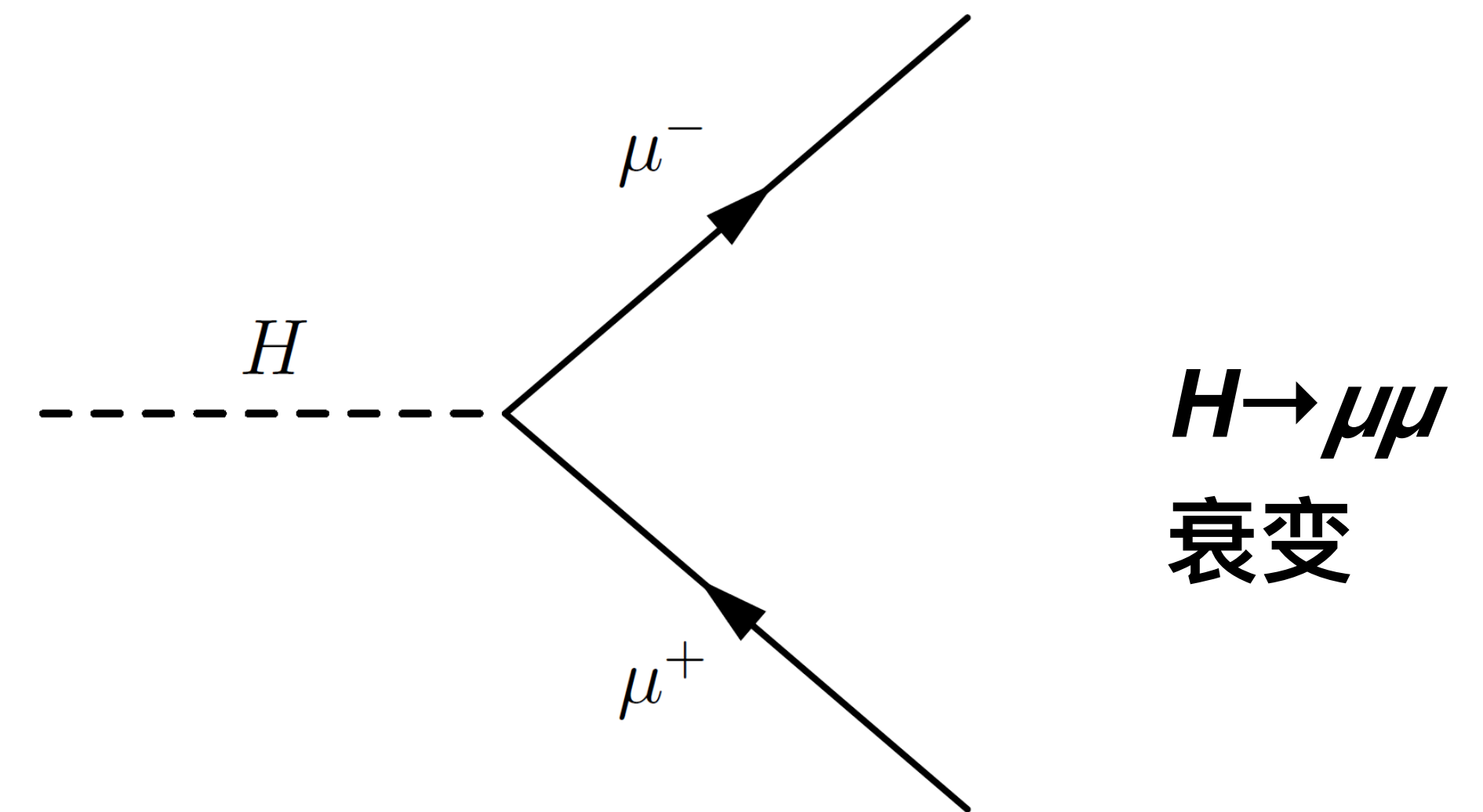
4 JUNE, 2018

本人获选代表ATLAS合作组
做**CERN 研讨会**报告 $t\bar{t}H$ 发现:

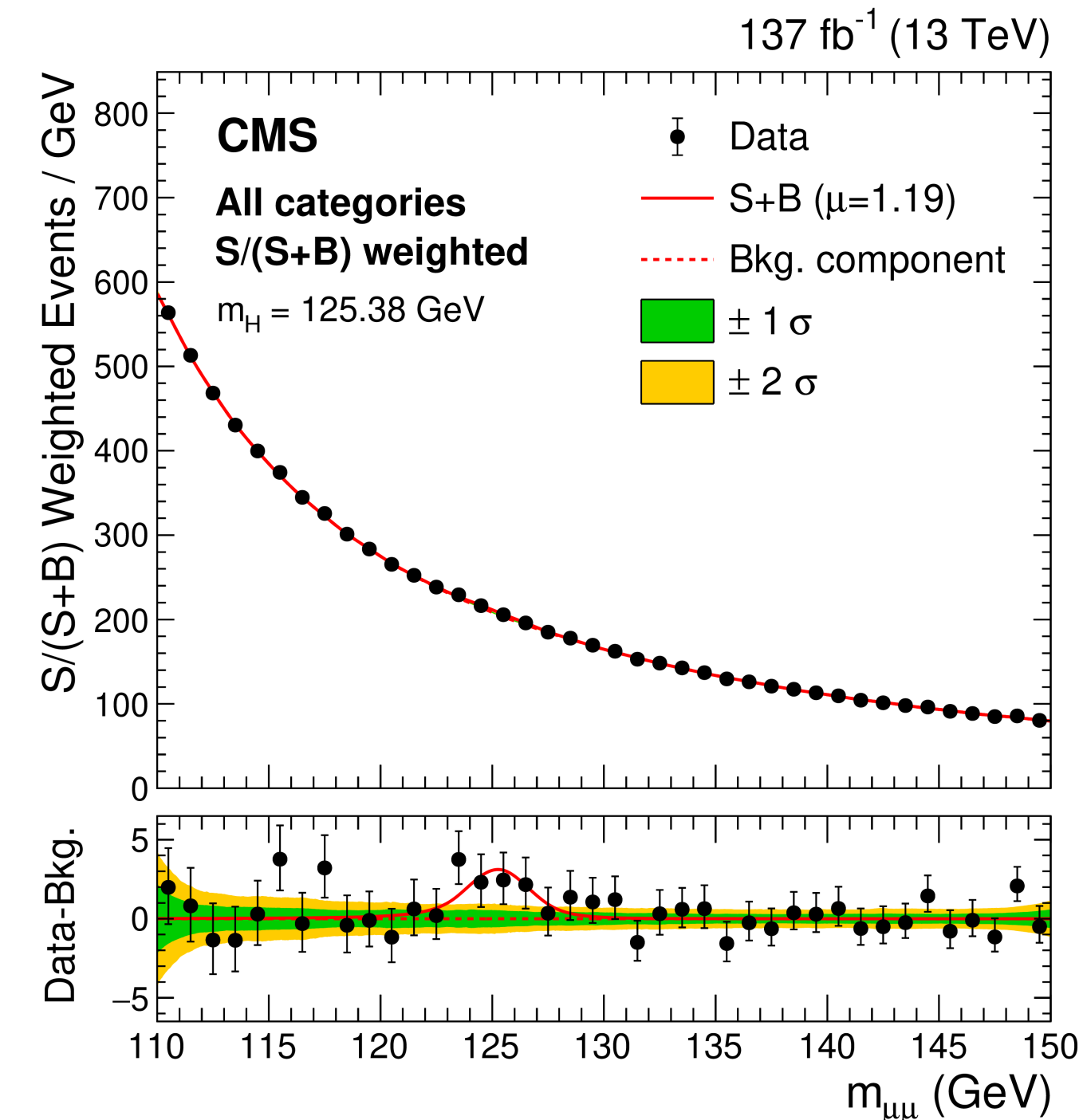
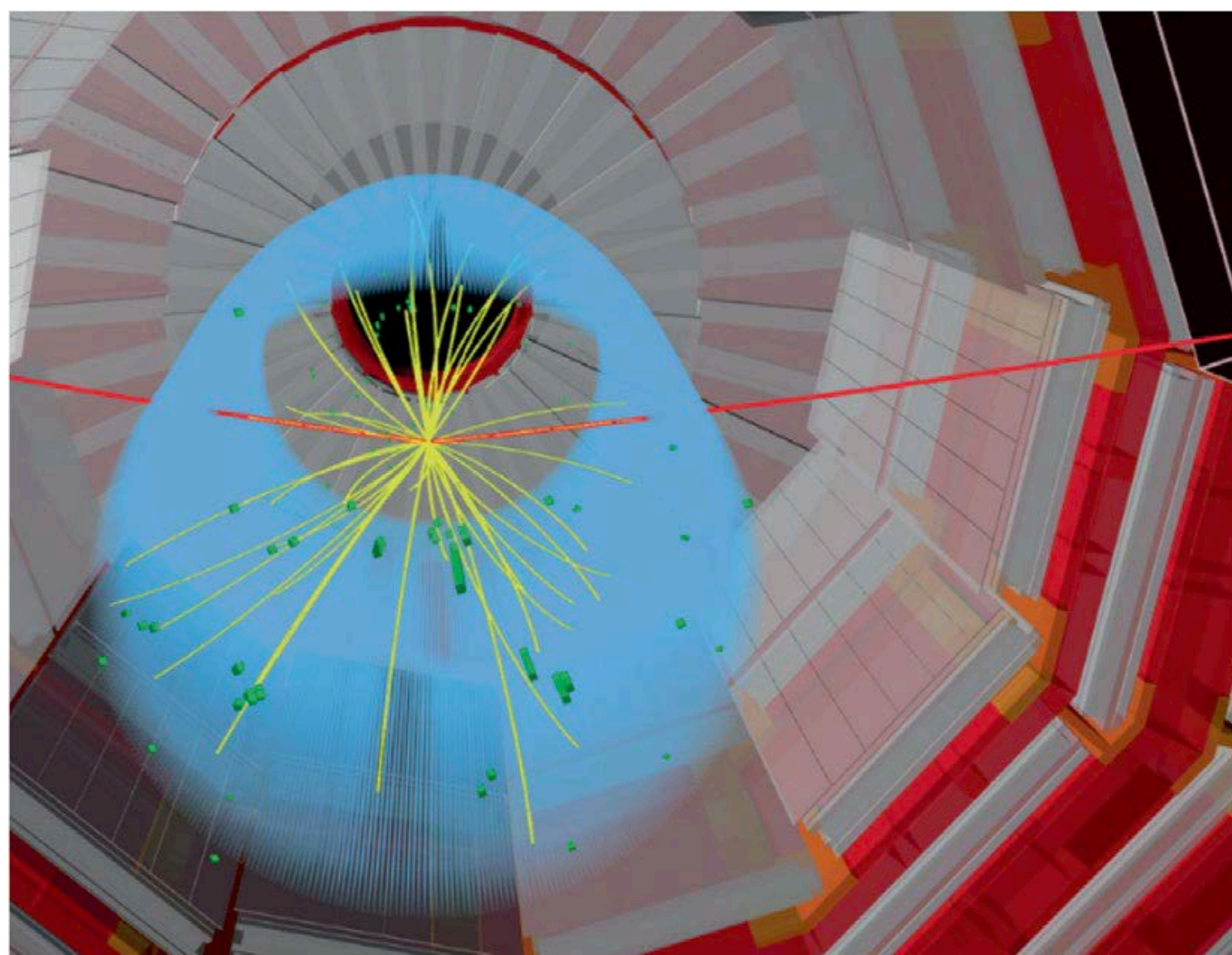


希格斯玻色子与缪子的耦合

- 希格斯玻色子和第三代费米子（如顶夸克、底夸克、陶子）的耦合均已被发现
 - 希格斯玻色子与其他代的费米子的耦合尚未被证实
- Higgs到两个缪子的衰变提供了在LHC上发现希格斯玻色子与第二代费米子的耦合的最好机会！
 - 标准模型预言很小的分支比(2×10^{-4}), 超出标准模型的物理可能修改这个分支比



希格斯玻色子与缪子的耦合



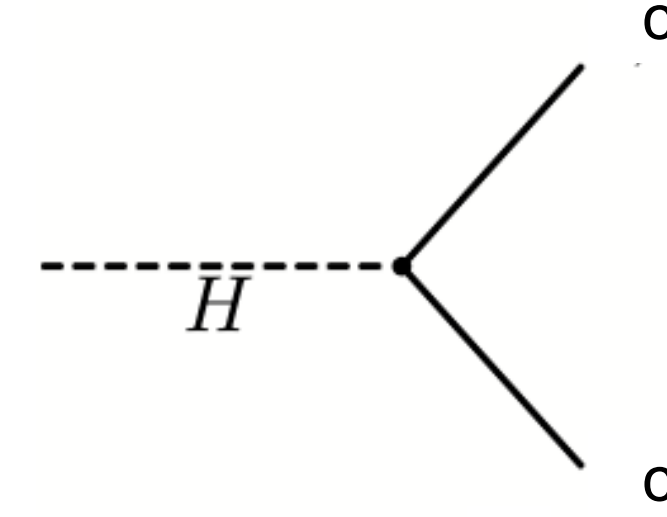
- 使用ATLAS数据, $H \rightarrow \mu\mu$ 的观测显著度是 **2.0σ** ([Phys. Lett. B 812 \(2021\) 135980](#))
- 使用CMS数据, $H \rightarrow \mu\mu$ 的观测显著度是 **3.0σ** ([JHEP 01 \(2021\) 148](#))

这些关于 $H \rightarrow \mu\mu$ 衰变的结果首次提供了希格斯玻色子与第二代费米子耦合的证据!

有望在未来以超过 **5σ** 的显著度发现 $H \rightarrow \mu\mu$ 过程

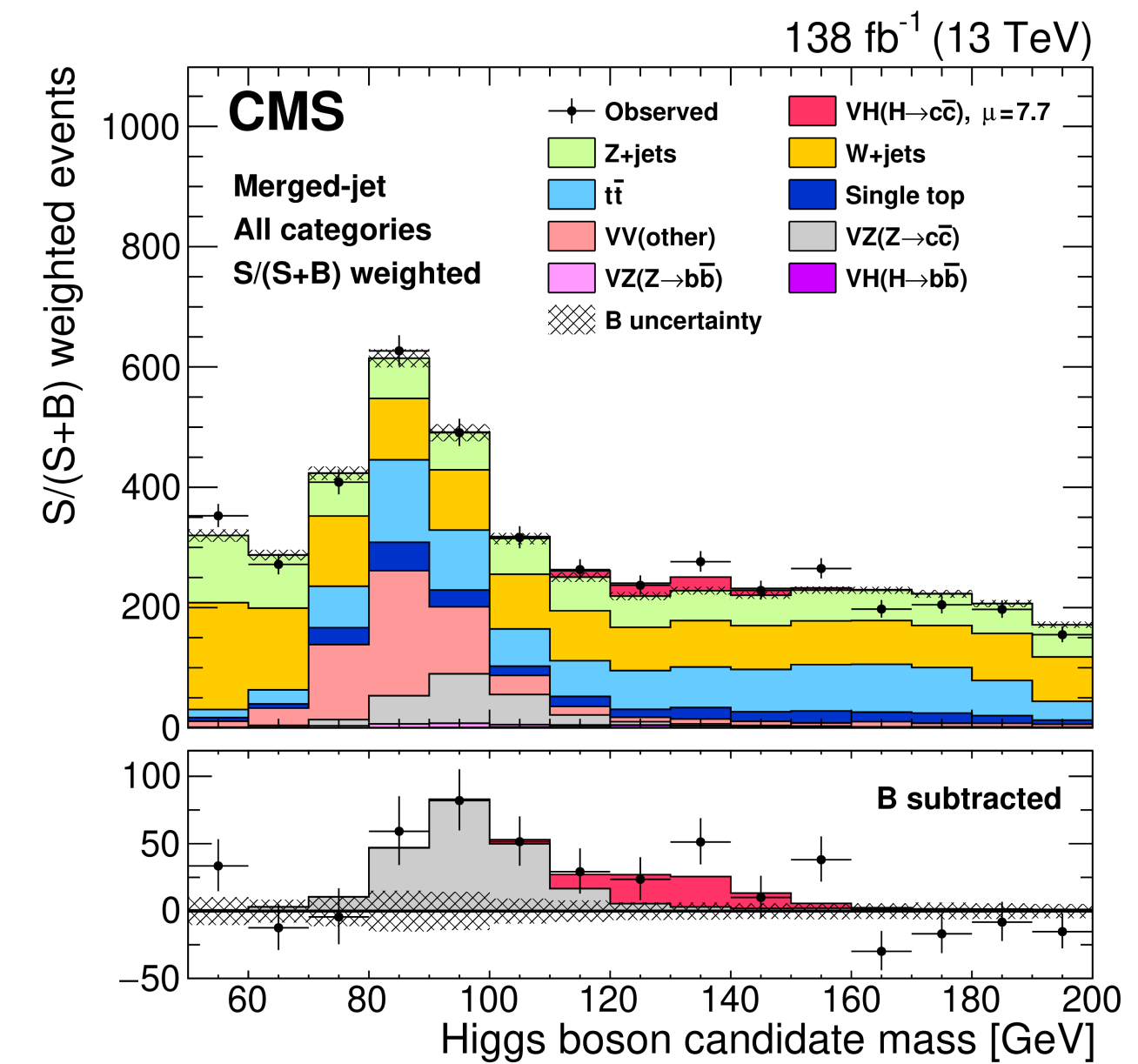
希格斯玻色子与粲夸克的耦合

- 研究希格斯玻色子与粲夸克之间的相互作用目前主要是通过寻找 **$H \rightarrow c\bar{c}$** 衰变



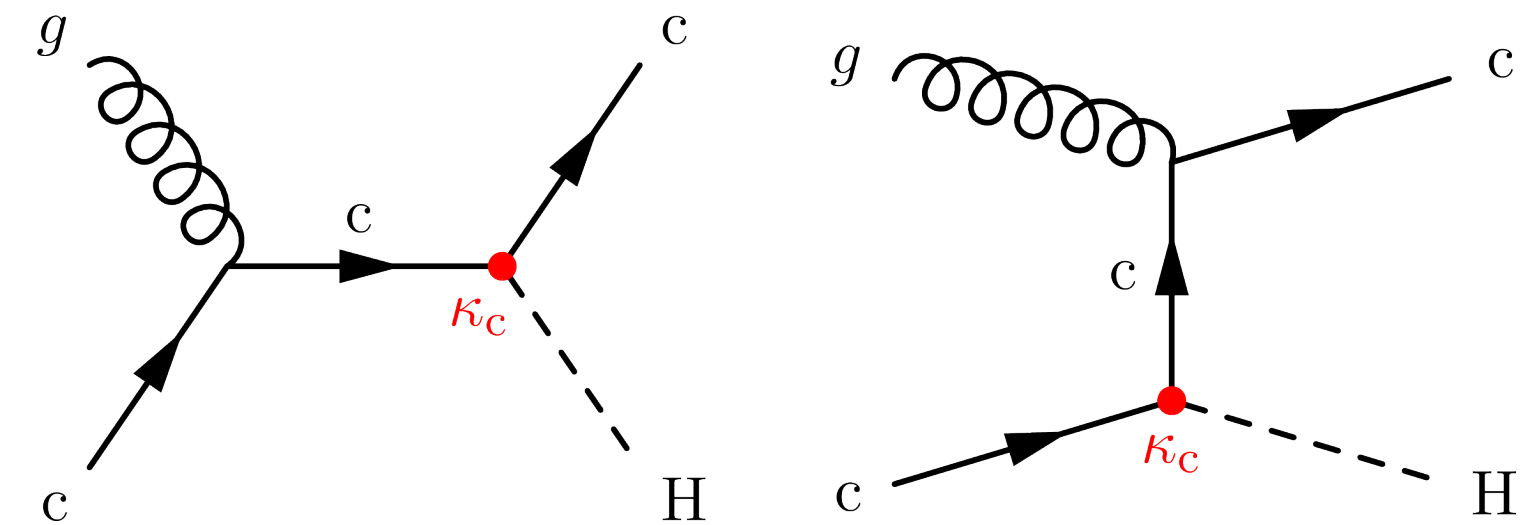
$H \rightarrow c\bar{c}$
衰变

- 使用VH ($H \rightarrow c\bar{c}$)分析数据, 耦合强度 κ_c 的上限为
 - $1.1 < |\kappa_c| < 5.5$ (CMS, Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 061801)
 - $|\kappa_c| < 8.5$ (ATLAS, Eur. Phys. J. C 82 (2022) 717)

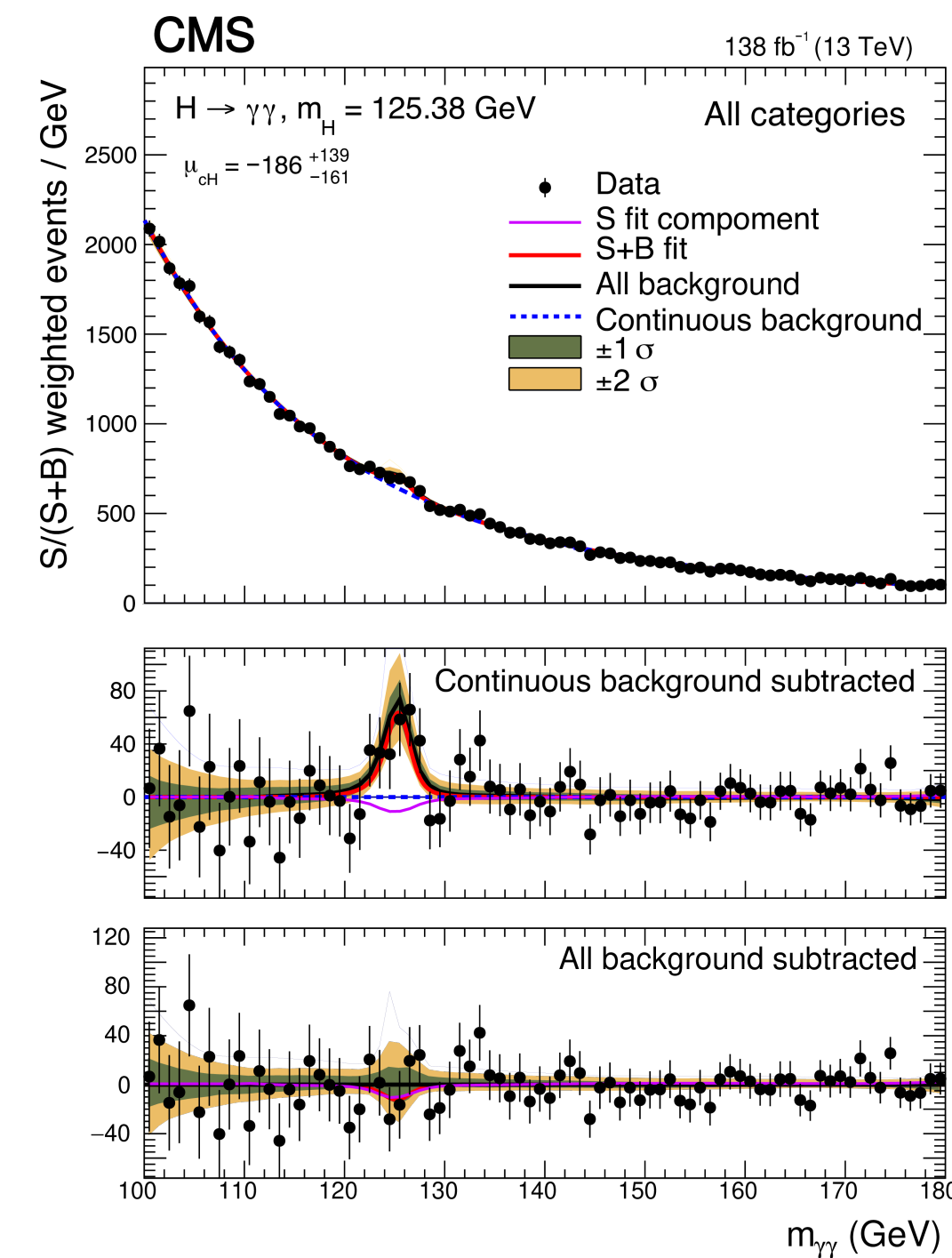


希格斯玻色子与粲夸克的耦合

- 实验上需要额外的灵敏度，一个新方法是寻找**H+c联合产生**
- 使用H+c ($H \rightarrow \gamma\gamma$)分析数据，耦合强度 κ_c 的上限为
 - $|\kappa_c| < 38$ (CMS, [arxiv:2503.08797](#))
- 此外，ATLAS对H+c 末态 (ggF为主) 进行了截面测量 ([JHEP 02 \(2025\) 045](#))



**H+c
产生**

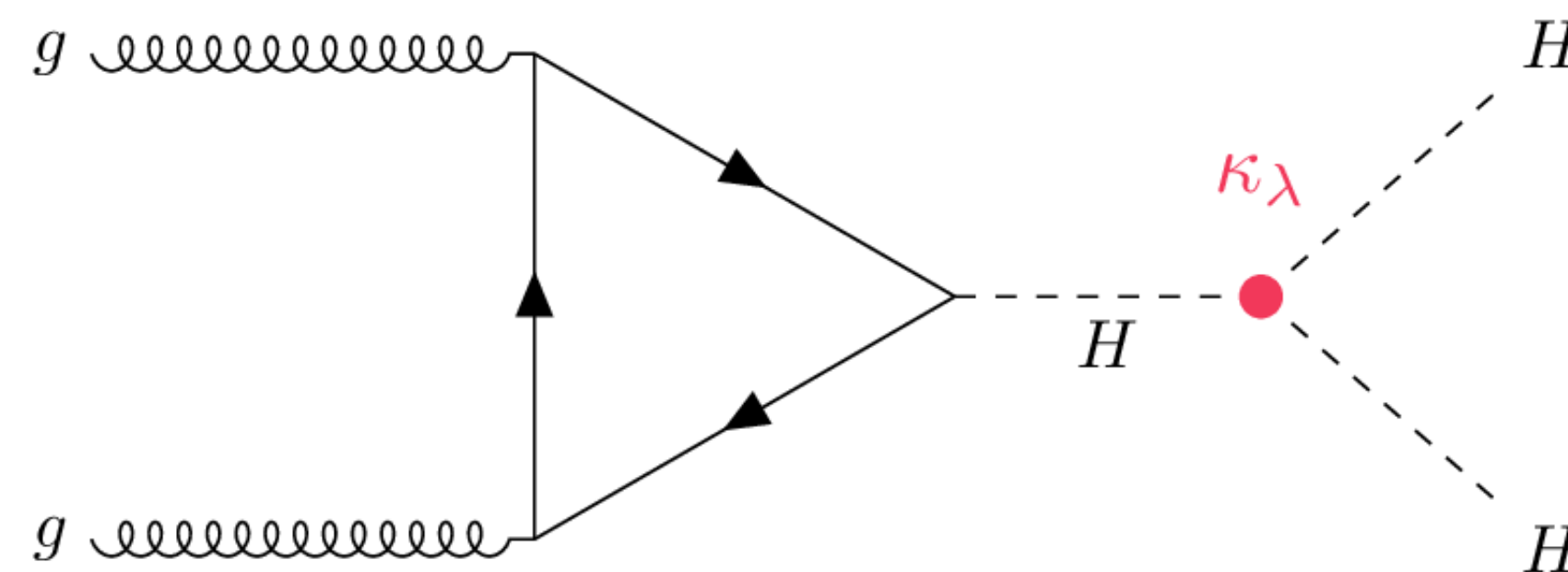
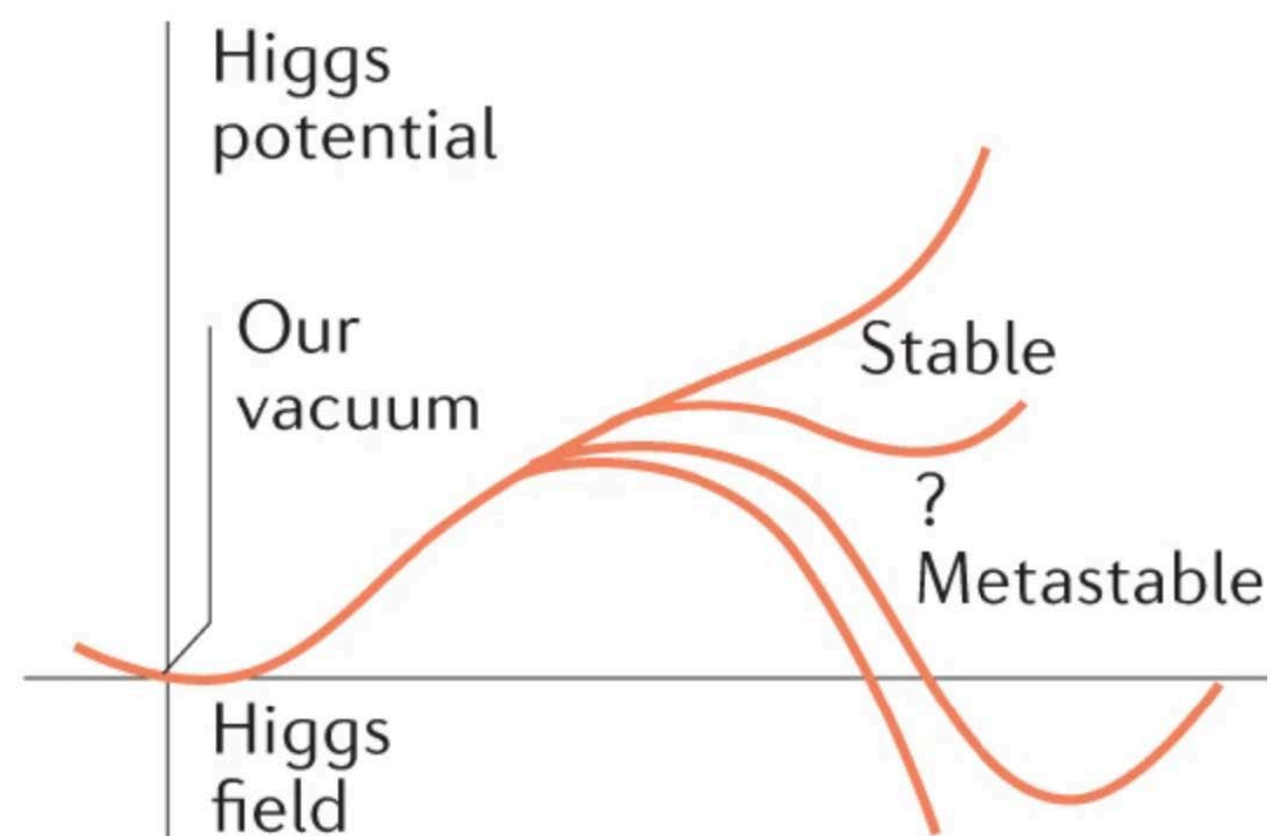


2.3 希格斯玻色子的自耦合

希格斯玻色子的自耦合

- **希格斯玻色子的自耦合是标准模型的一个最深刻的问题**，可能为发现超出标准模型新物理提供一个通道
 - 希格斯势能, 真空稳定性, 早期宇宙演化, ...
- **双希格斯产生是在LHC上直接探测希格斯自耦合的渠道**
 - 标准模型的双希格斯产生有极小的反应截面
 - 非标准模型的希格斯自耦合强度可以修改双希格斯产生的截面和运动学特征

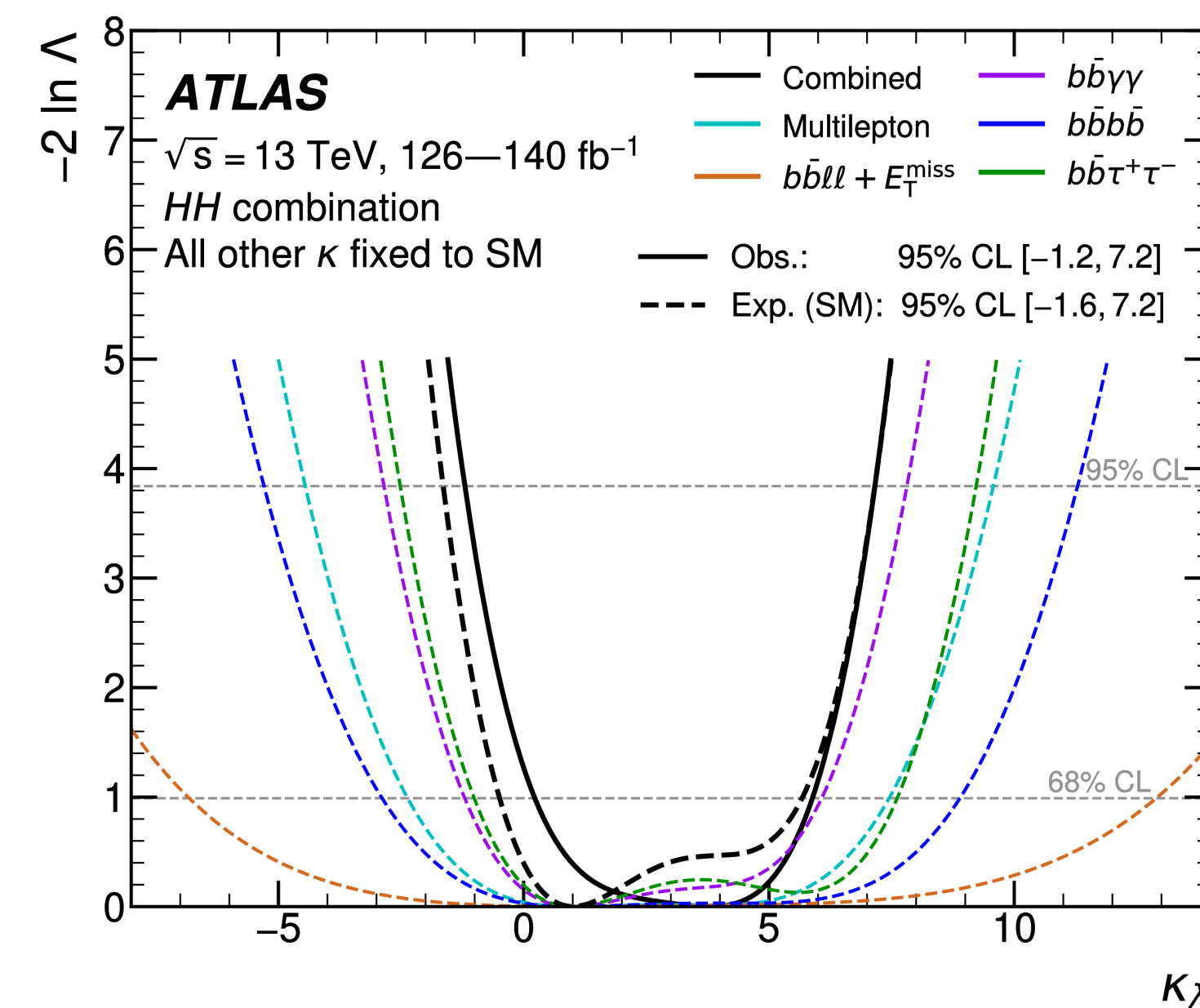
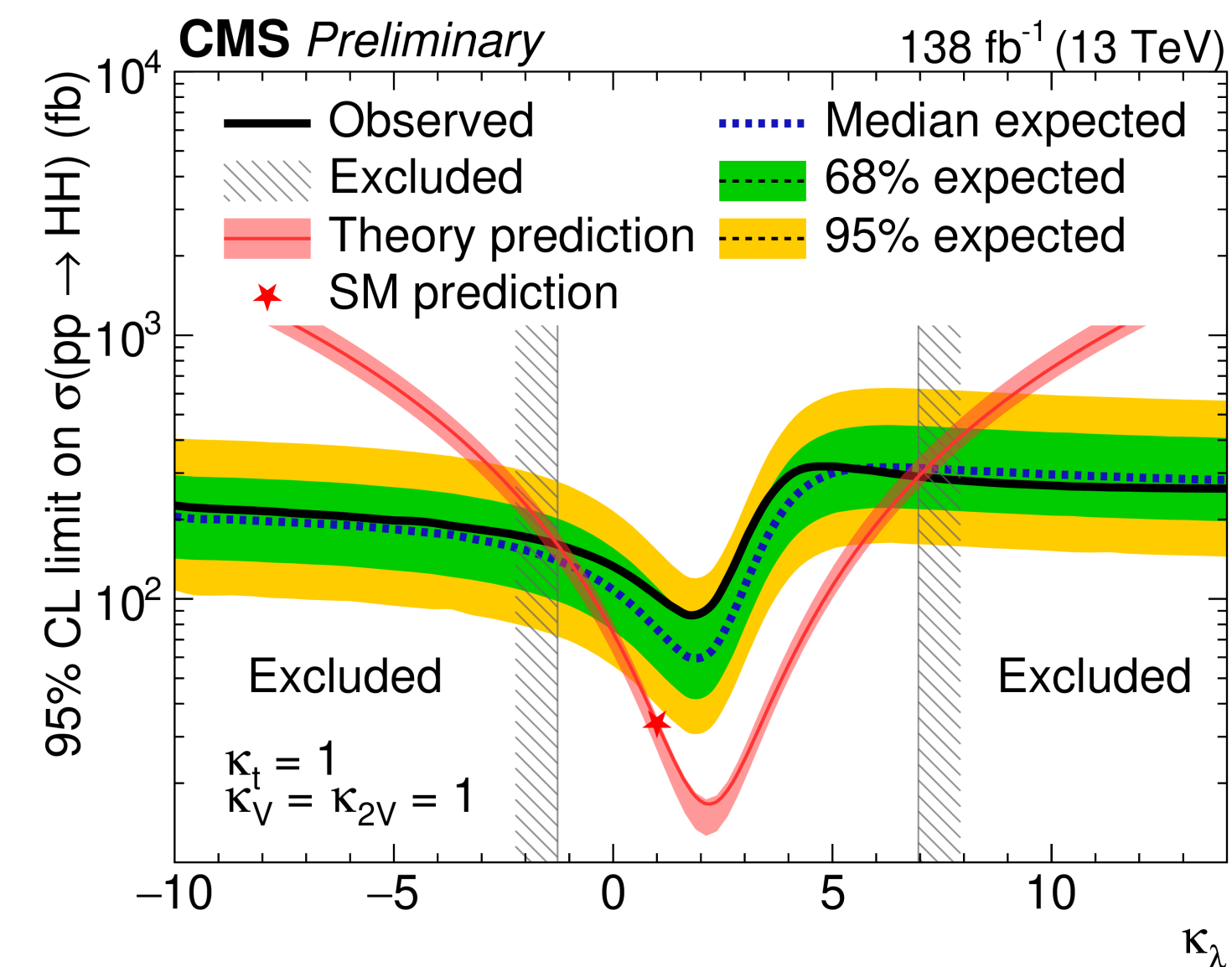
希格斯
势能



双希格斯
产生

希格斯玻色子的自耦合

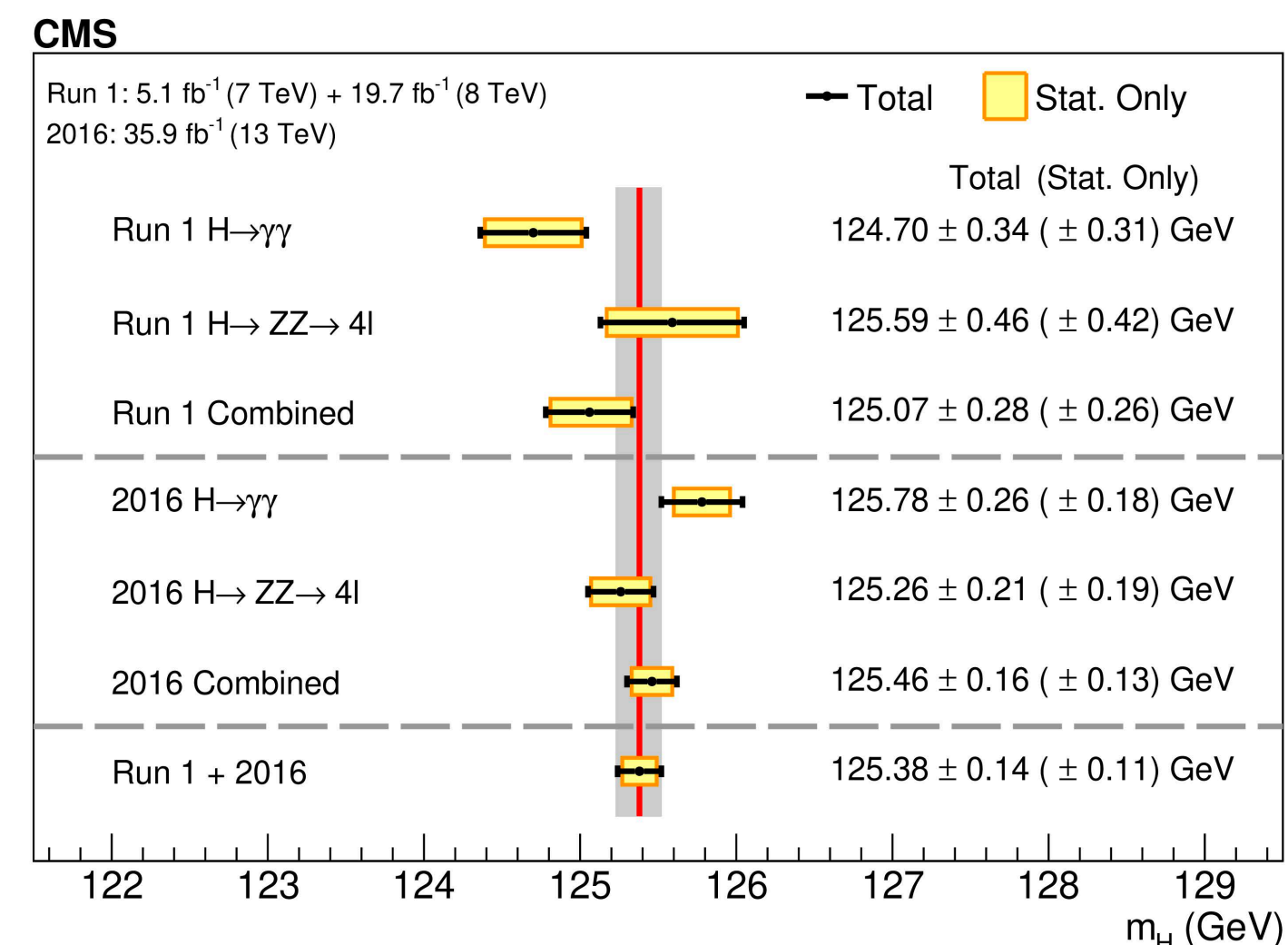
- 寻找双希格斯产生需要使用各种衰变渠道：
 - $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$, $HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$, $HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$, ...
- 联合分析给出希格斯玻色子自耦合强度的最强限制：
 - $-1.4 < \kappa_\lambda < 7.0$ (CMS, [CMS-PAS-HIG-20-011](#));
 - $-1.2 < \kappa_\lambda < 7.2$ (ATLAS, [Phys. Rev. Lett. 133 \(2024\) 101801](#))
- 未来：发现并测量希格斯自耦合
 - 标准模型的双希格斯产生的预计信号显著度可能于HL-LHC期间达到 5σ



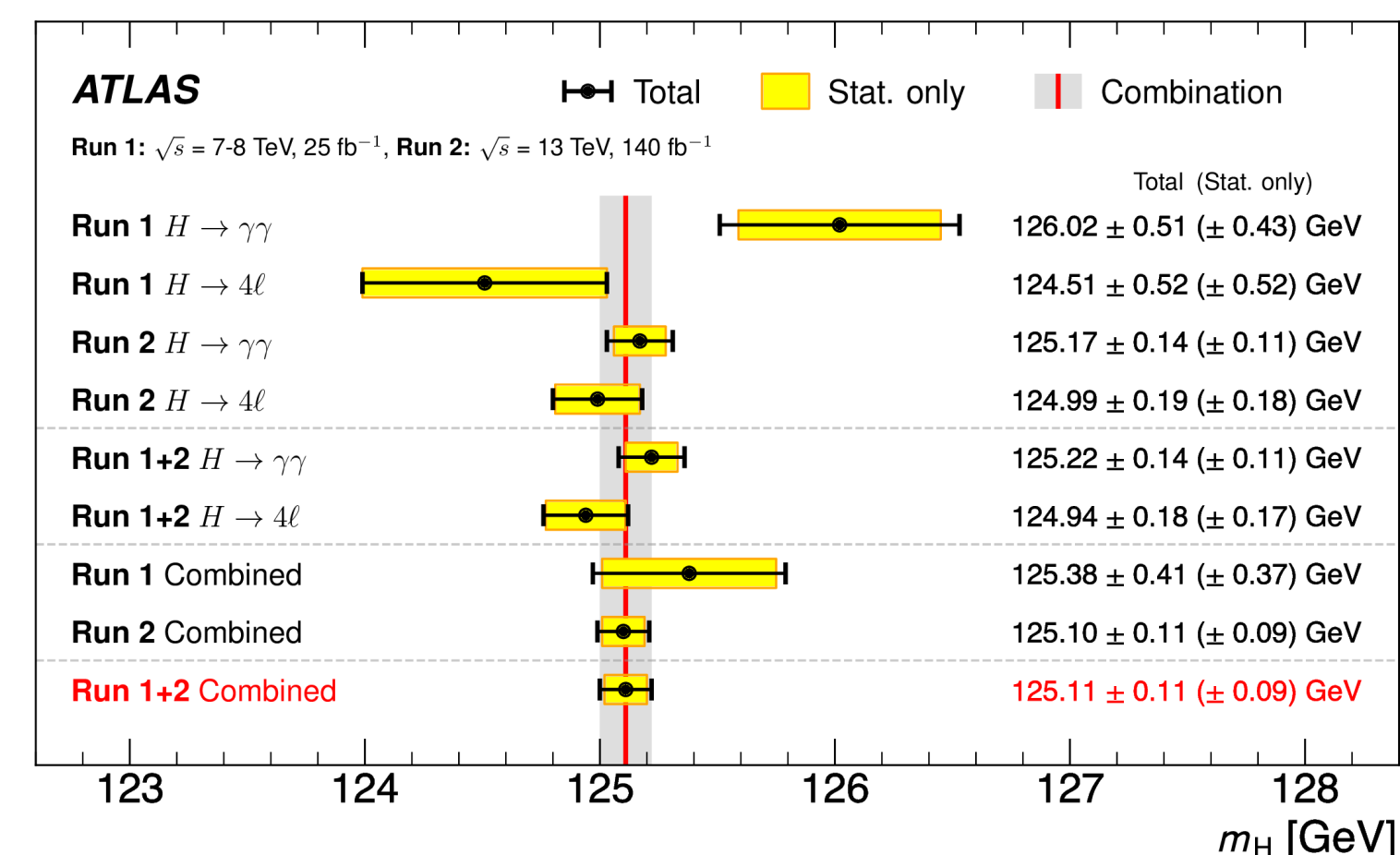
2.4 希格斯玻色子的质量、自旋/CP

希格斯玻色子质量

- 希格斯玻色子质量是标准模型 Higgs sector 里的唯一自由参数
- 使用有最好质量分辨率的分析道进行测量: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ & $H \rightarrow \gamma\gamma$
- CMS**: 125.38 ± 0.14 GeV (精确度 0.11%)
- ATLAS**: 125.11 ± 0.11 GeV (精确度 0.09%)



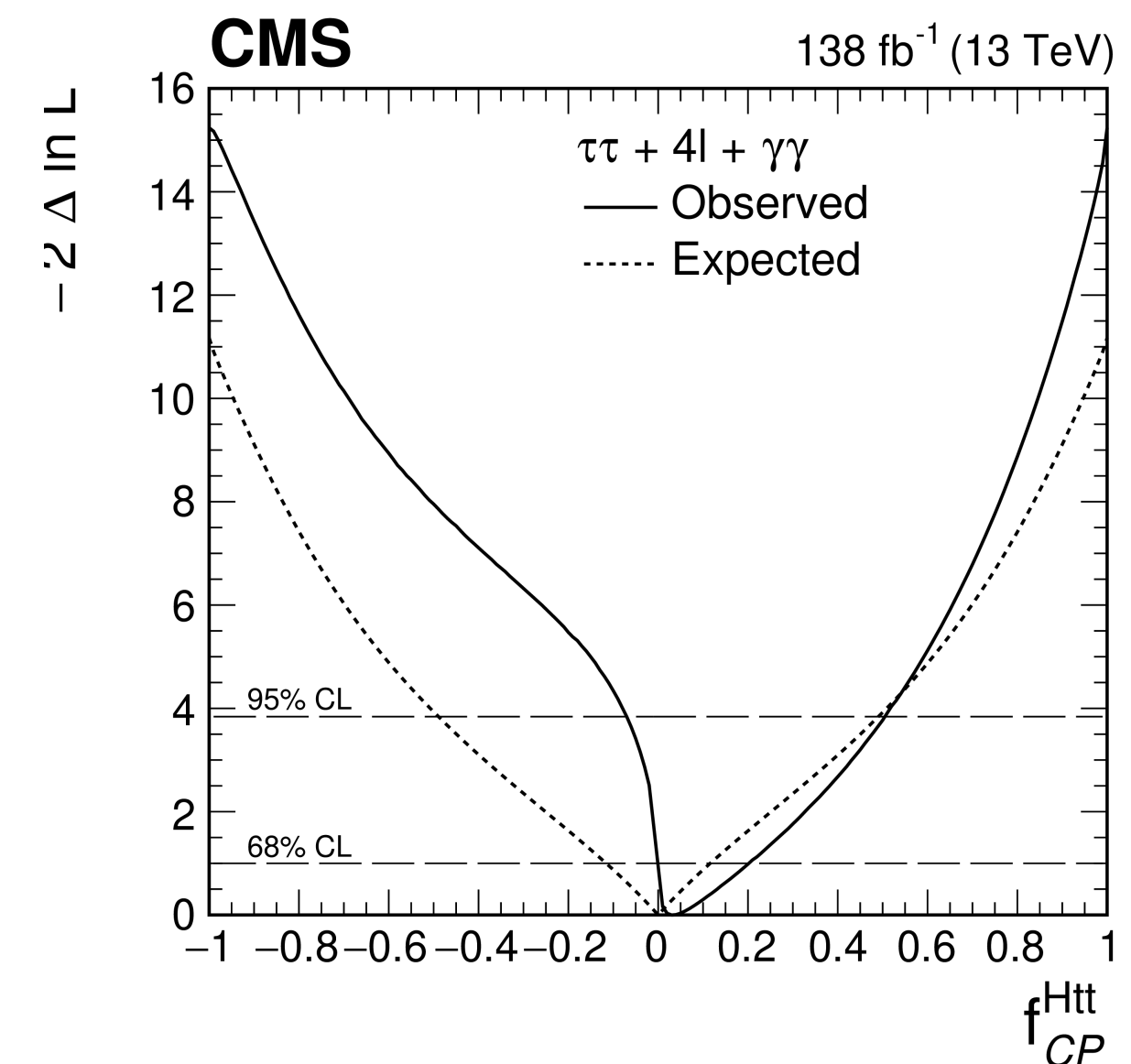
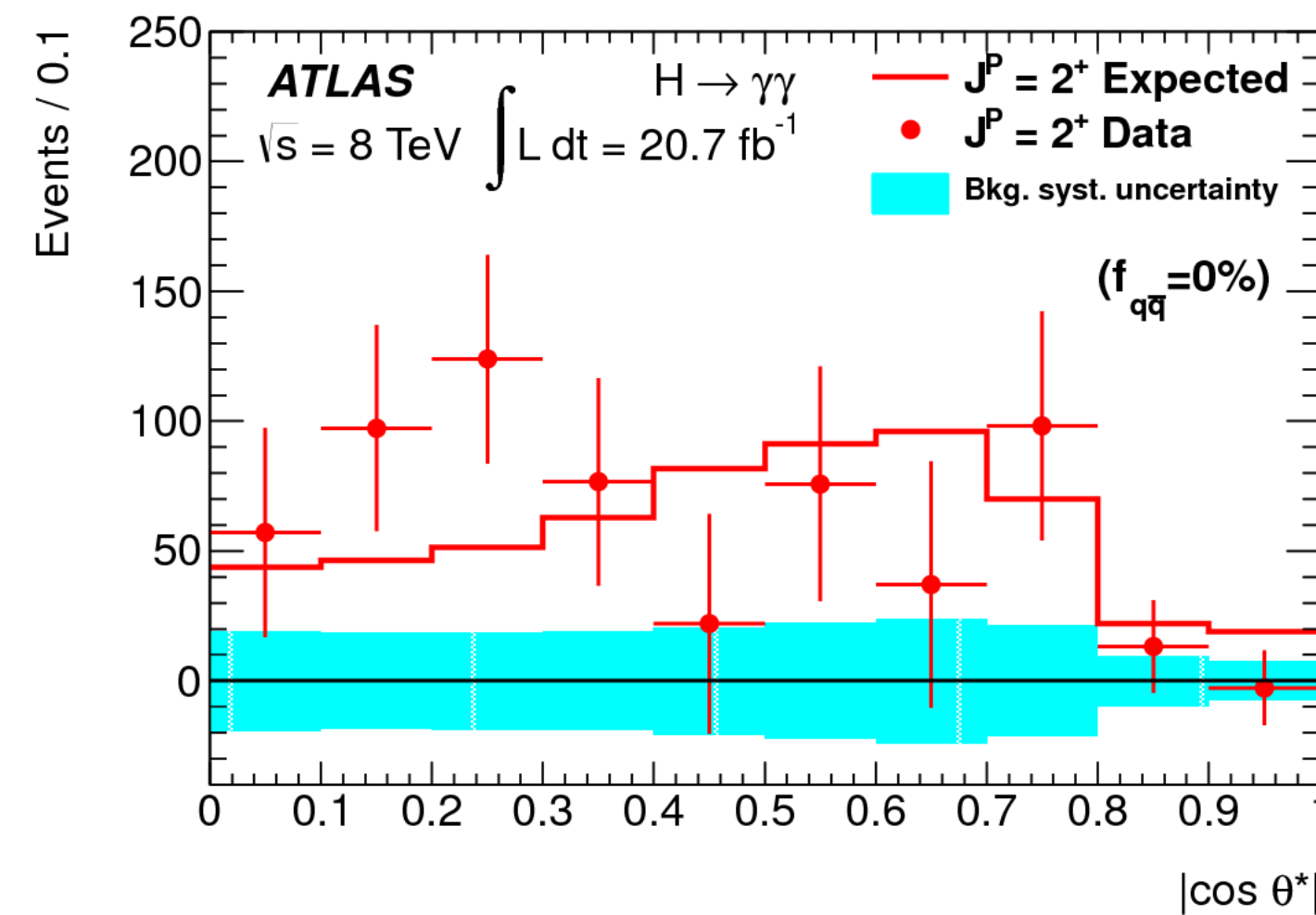
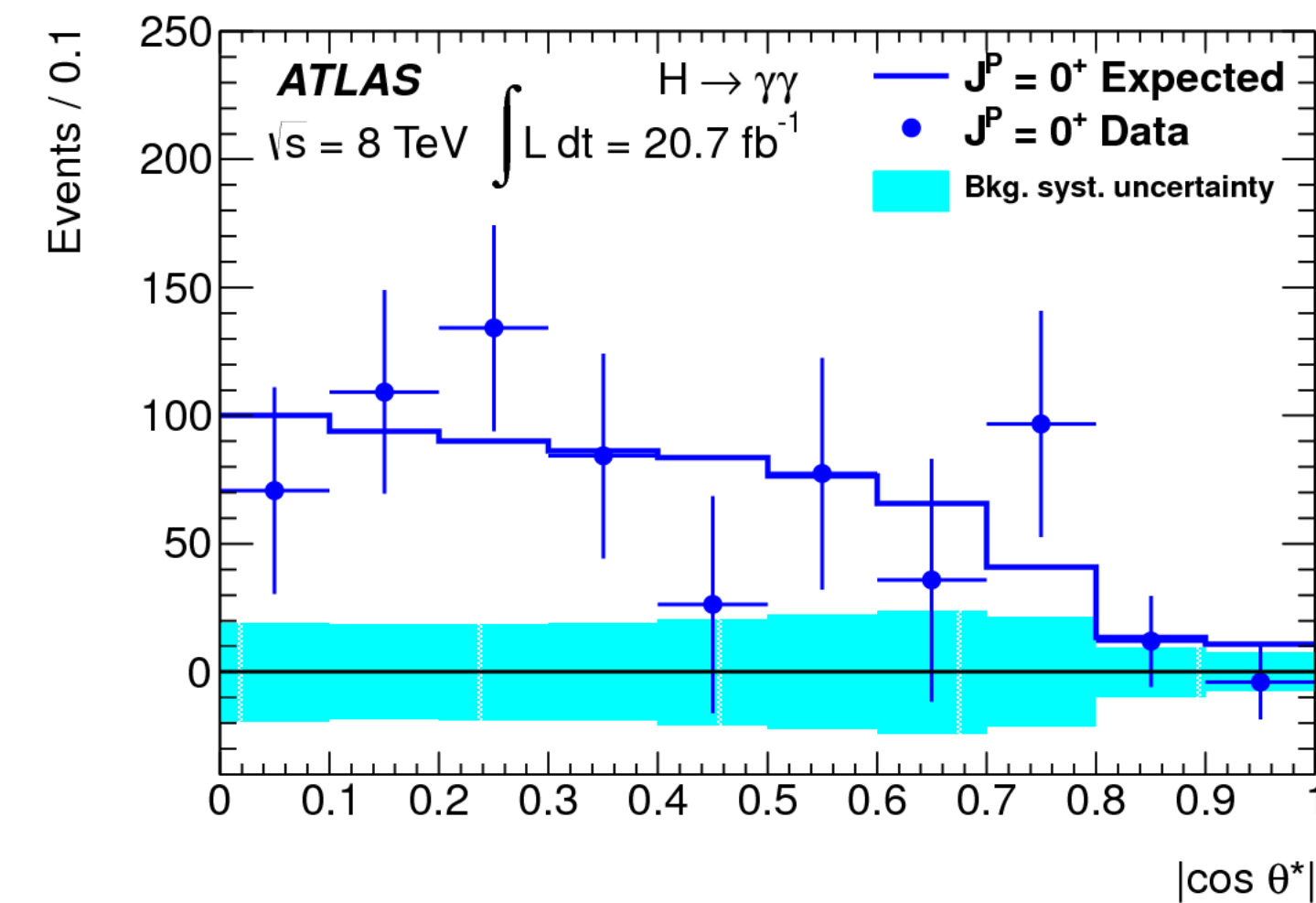
[Phys. Lett. B 805 \(2020\) 135425](#)



[Phys. Rev. Lett. 131 \(2023\) 251802](#)

希格斯玻色子自旋与CP

- 标准模型的希格斯玻色子是标量粒子：自旋为0, CP为偶
- “The observed boson”在2013年被证实自旋为0 => “The Higgs boson”
- LHC数据否定了纯粹的CP为奇的情况，并对CP混合给出了限制
- 目前趋势：测量各个耦合（如Higgs-Top耦合）中的CP破坏成分



2.5 希格斯玻色子与宇宙学

希格斯玻色子与宇宙学

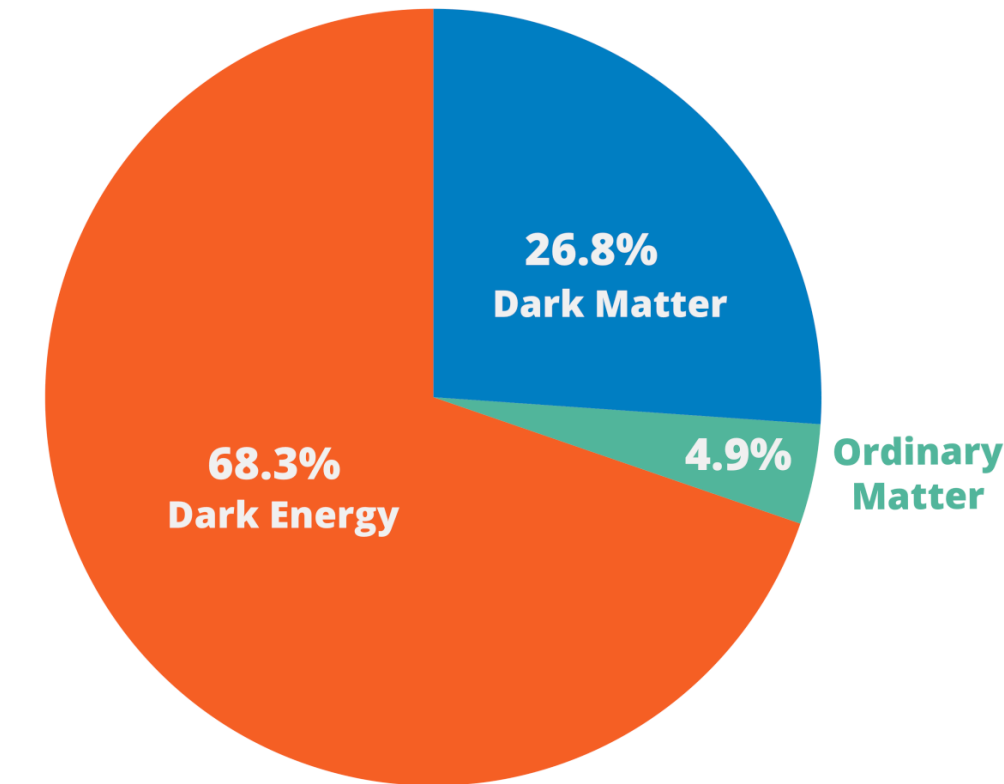


- 希格斯玻色子与我们对宇宙的理解有重要关系，包括：
 - 宇宙中物质-反物质不对称的起源
 - 原始膨胀
 - 暗能量的性质
 - 暗物质的性质

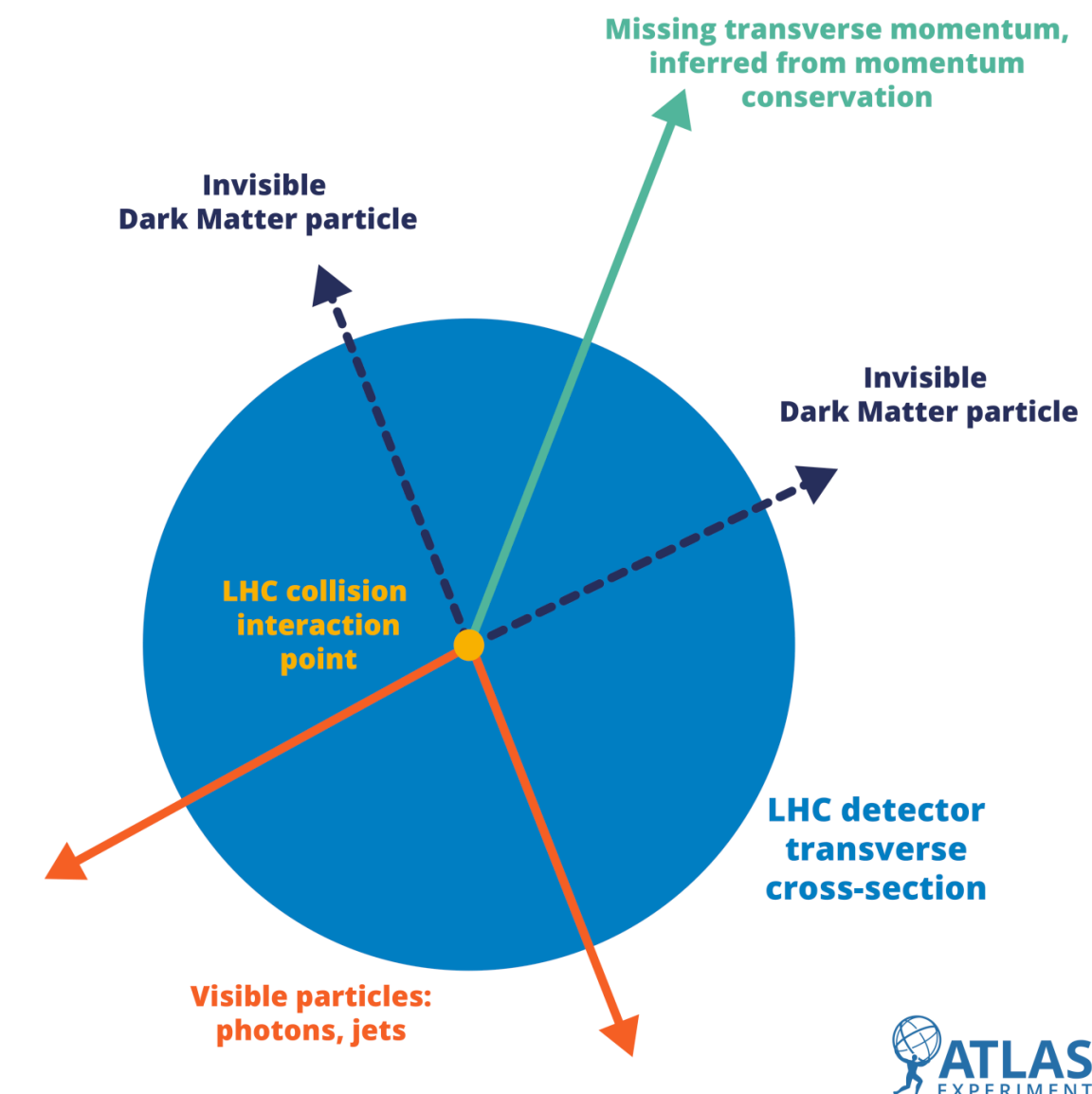
暗物质 @ LHC

- 根据天体物理学测量，暗物质 (Dark Matter) 占了宇宙质量的大部分
 - 但暗物质的大部分性质仍然是未知的
- 如果暗物质与已知粒子有相互作用，则可能在LHC中产生
 - 暗物质对LHC的探测器不可见
 - 导致大量丢失横向动量

Estimated matter-energy content of the Universe



宇宙的
物质-能量
组成

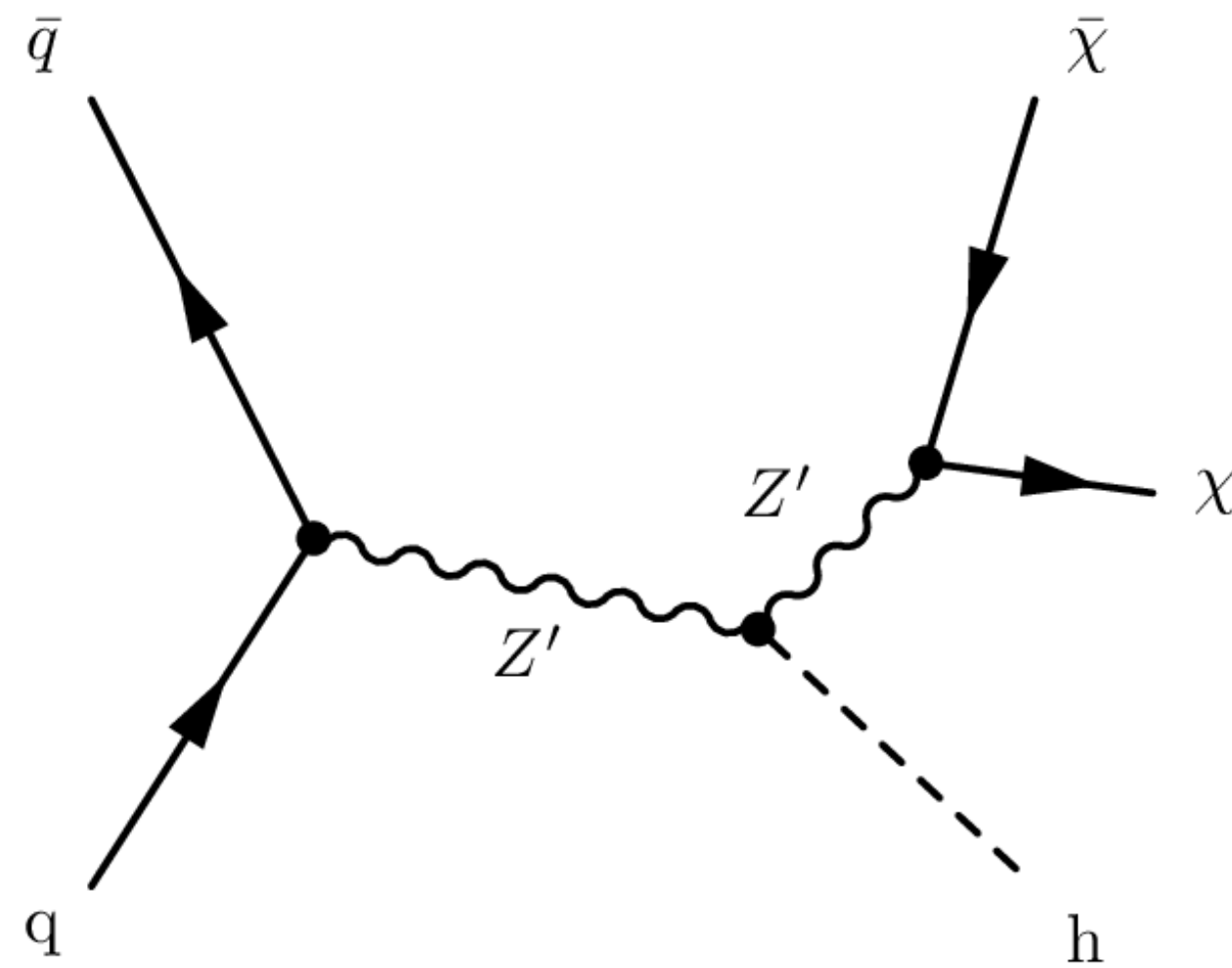


暗物质
导致丢失
横向动量

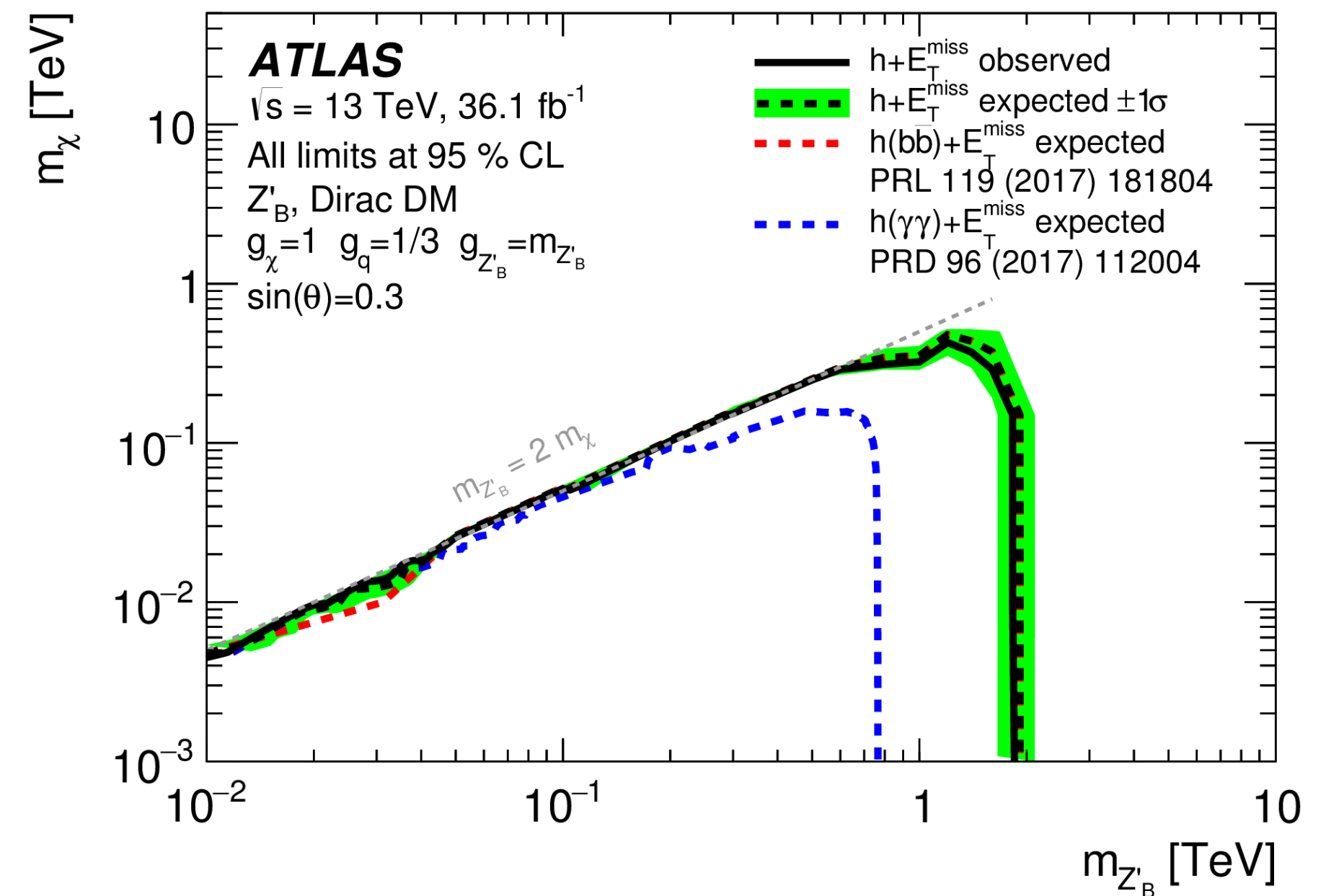


用mono-Higgs产生寻找暗物质

- 在Higgs发现之后，**mono-Higgs产生为发现暗物质开辟了一条新途径**
- Mono-Higgs寻找目前的结果里没有看到明显的暗物质信号，对baryonic Z' 模型和其他暗物质模型给出了很强的约束



mono-Higgs 产生



Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 181804

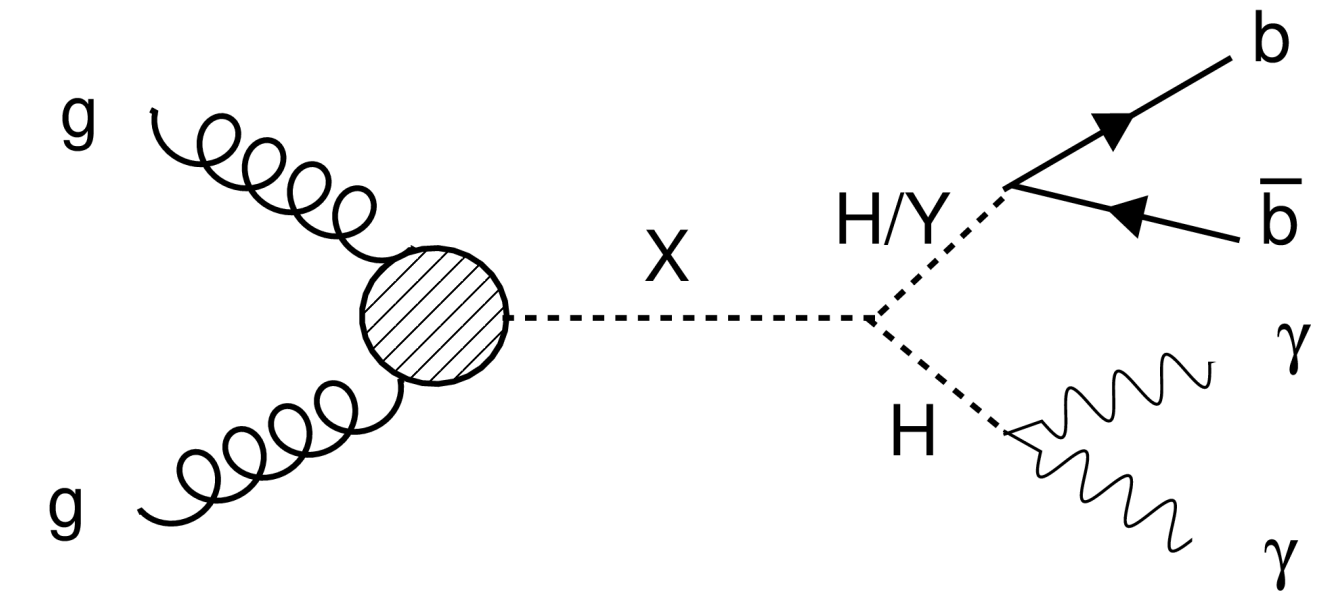
Phys. Rev. D 96 (2017) 112004

JHEP 05 (2019) 142

2.6 希格斯玻色子的共振产生

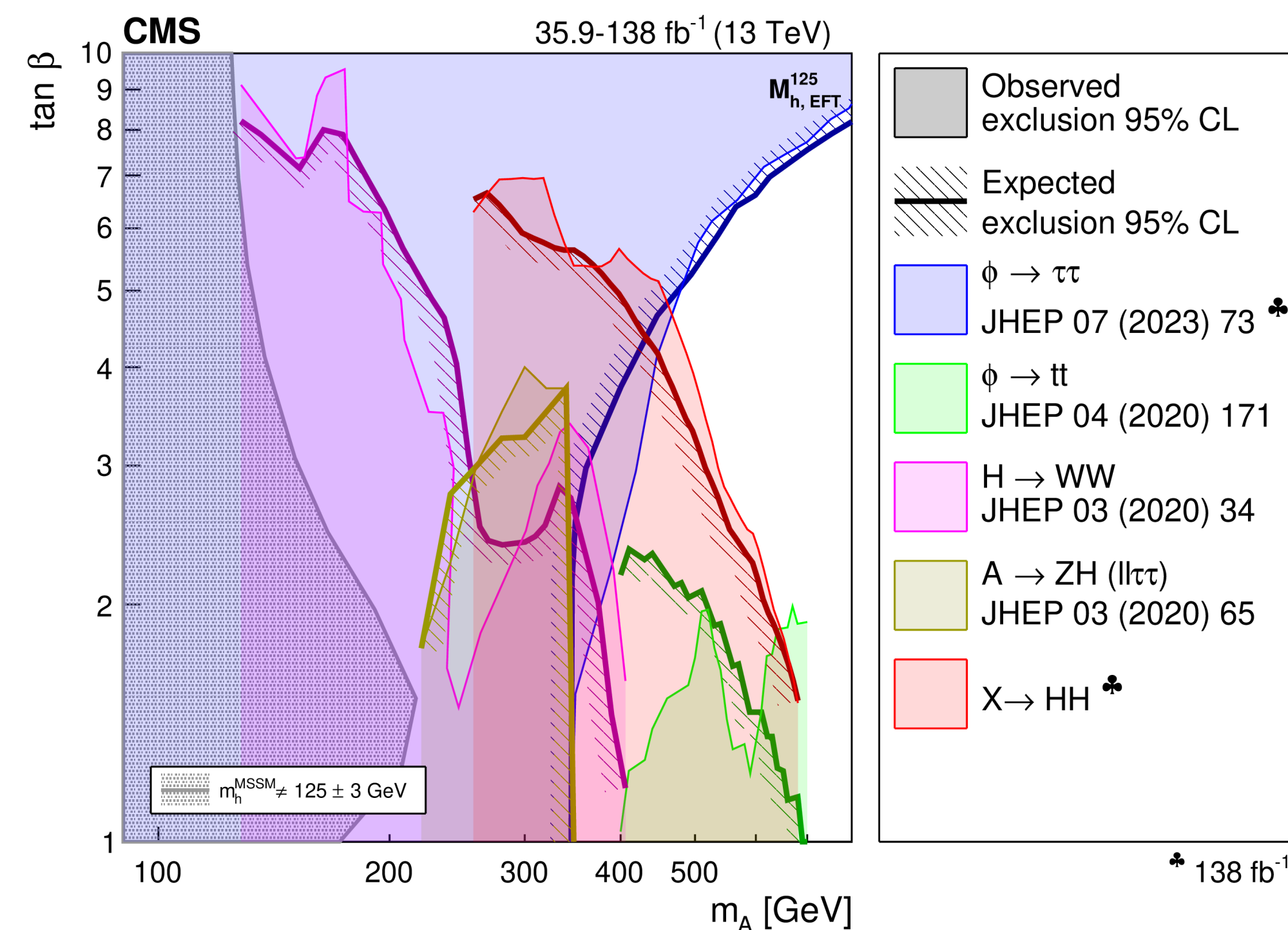
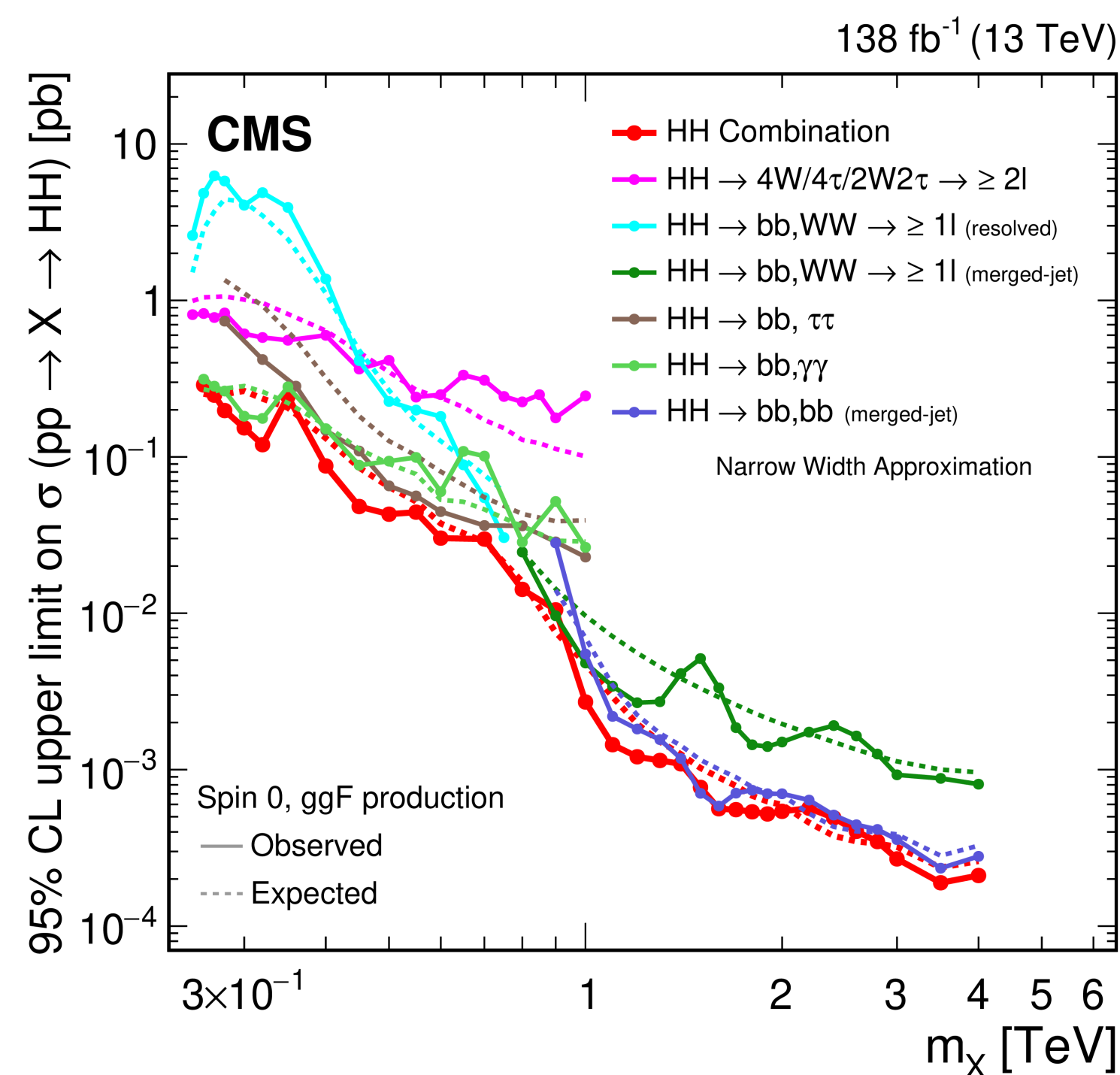
希格斯玻色子的共振产生

- 寻找高质量的共振态新粒子衰变到1个希格斯玻色子+另1个粒子（如2个希格斯玻色子、1个希格斯玻色子+1个较低质量的共振态新粒子）已经成为LHC新物理寻找项目的一个重要部分
- 这些寻找对许多重要新物理模型敏感，包括扩展希格斯模型、额外维模型等



希格斯玻色子的共振产生

- 总结、合并CMS实验的若干分析道，得到希格斯玻色子共振产生的截面上限和相关新物理模型的限制



希格斯玻色子：我快13岁了

2012: 出生

2013: 被确认为标量粒子

2018: 与第三代费米子成为好友

2020: 初遇第二代费米子

2023: 第一次同时见到Z、 γ 两姐妹

2012-2024: 家里的体重秤越来越精确

2030-2040: 结识另一个自己？



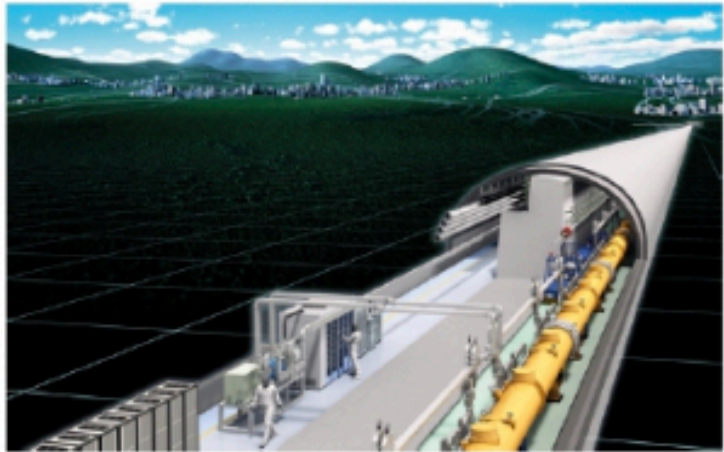
3. 希格斯工厂物理预研

希格斯工厂



- 中国、欧洲、美国的粒子物理学家经过严谨的讨论，都得出这样的结论：
- 在接下来一段时间，对希格斯粒子展开深入研究，是高能物理最前沿的一个方向
- 需要建造高能量正负电子对撞机，产生大量希格斯粒子，研究粒子物理的深层结构

计划中的希格斯工厂



ILC



FCC



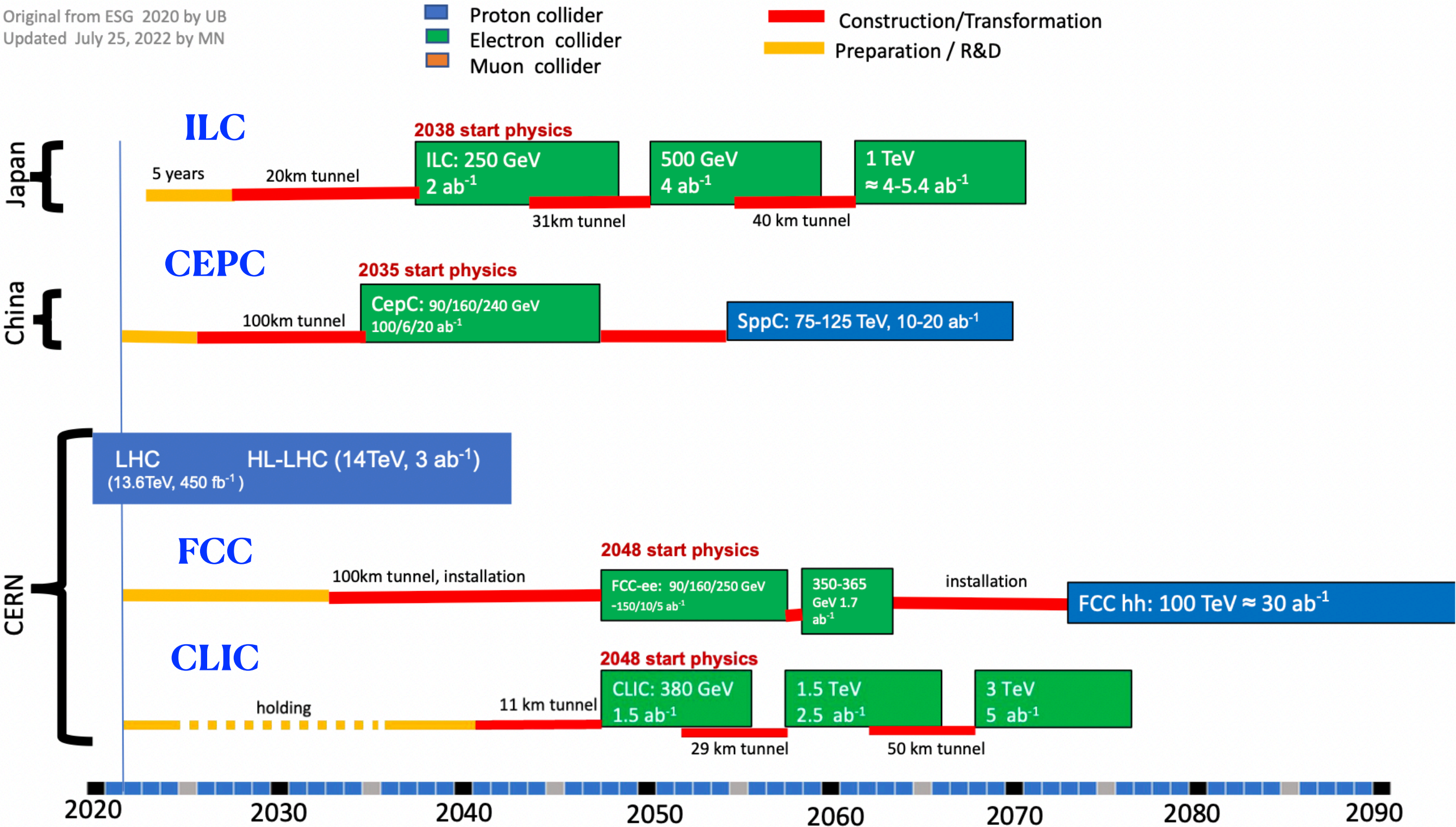
CLIC

CEPC

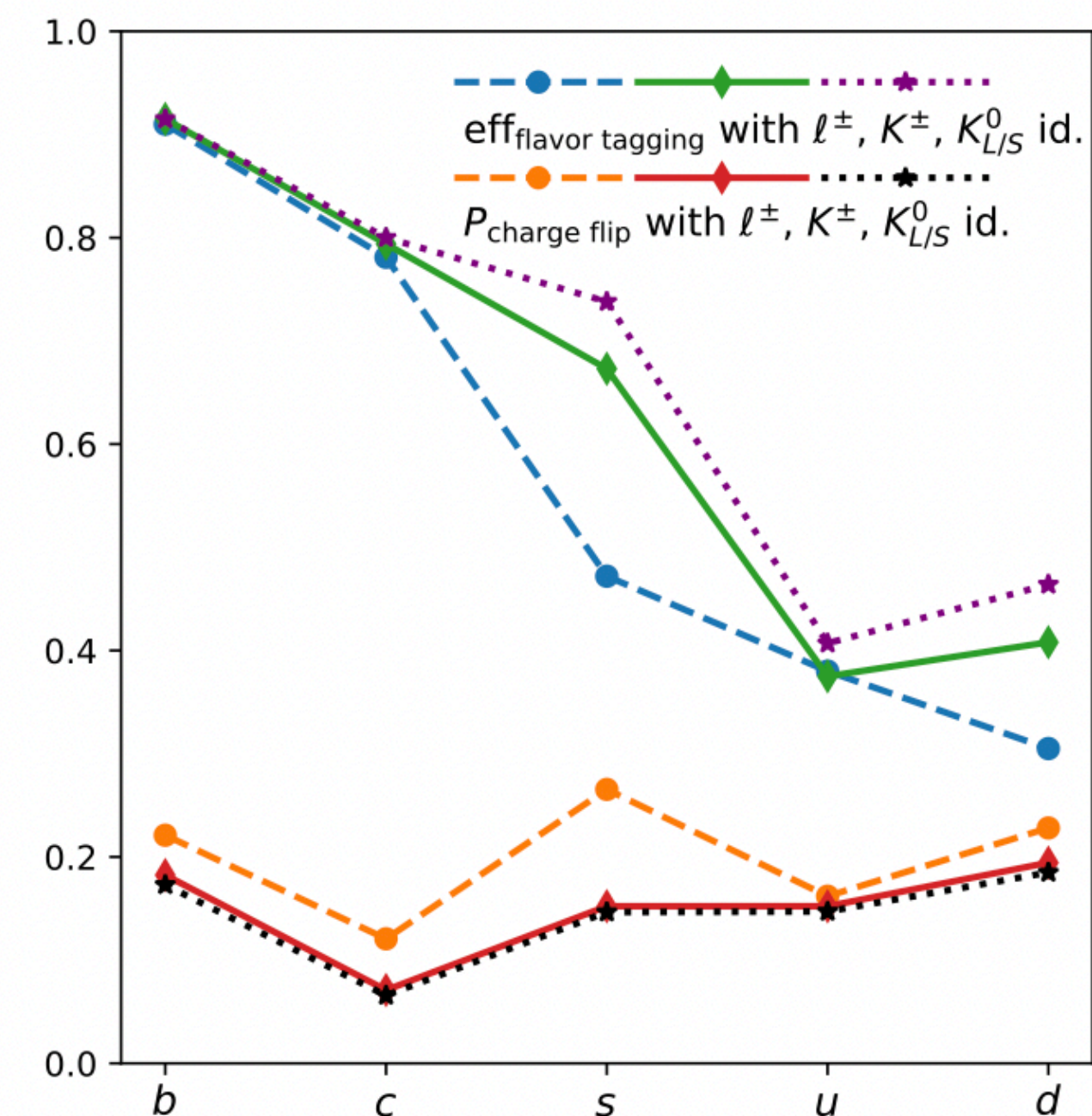
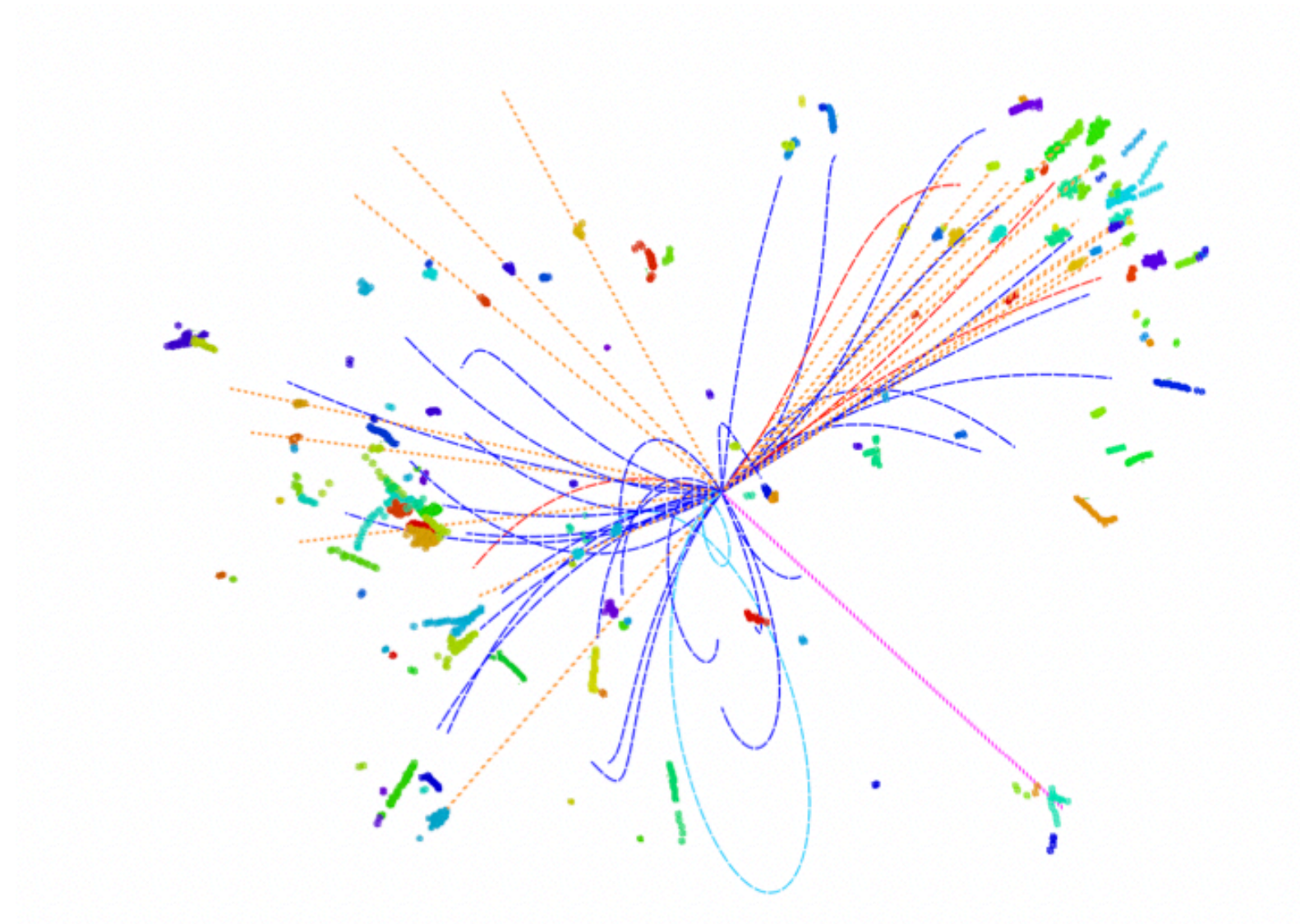


预计时间线

Original from ESG 2020 by UB
Updated July 25, 2022 by MN



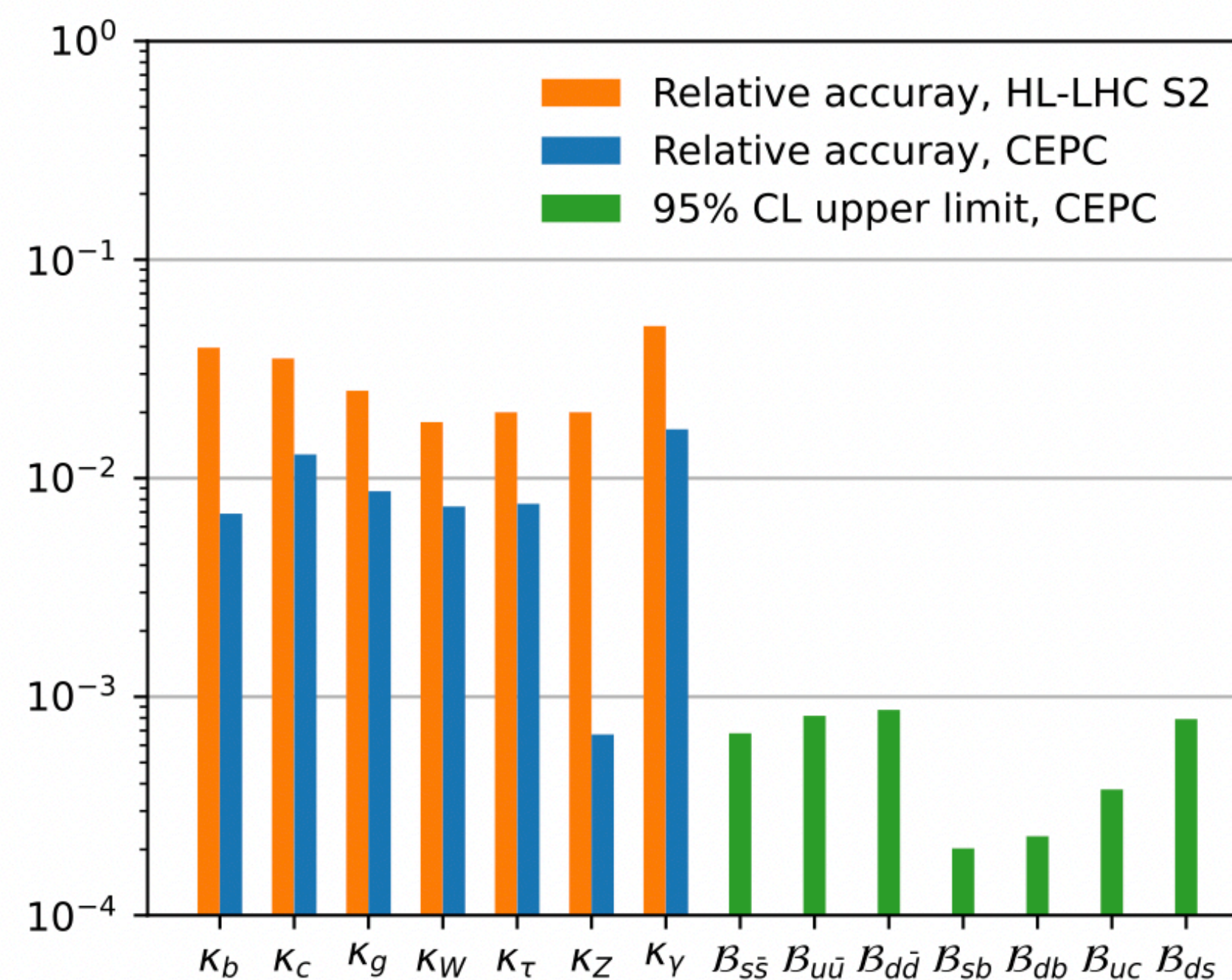
基于深度机器学习的喷注起源识别



- 使用ParticleNet等深度学习工具，研究未来正负电子对撞机实验上的喷注起源识别
- 将喷注起源分为11类（5种夸克、5种反夸克、胶子），成功实现了较高的标记效率和较低的误鉴别率

希格斯玻色子稀有和奇异衰变

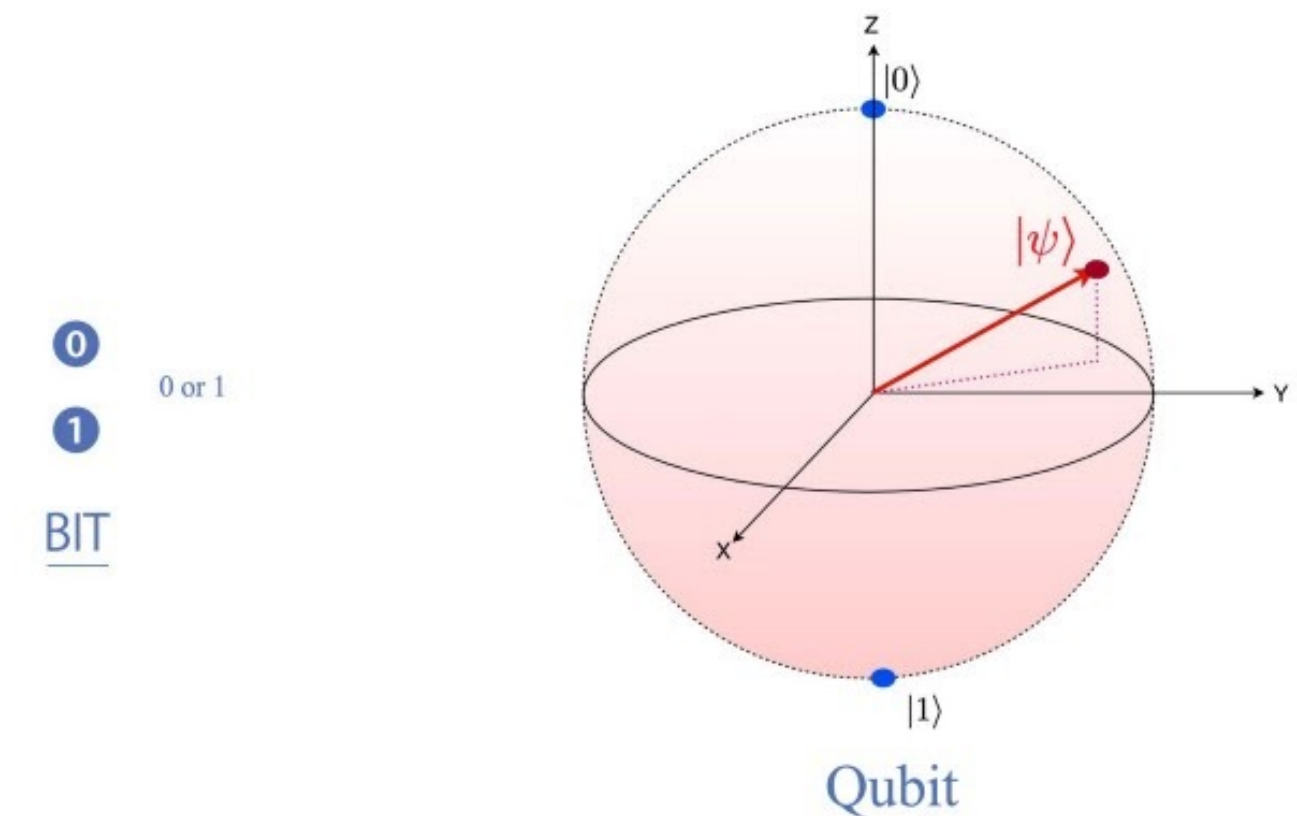
- 使用喷注起源识别方法，我们显著地改善了CEPC上希格斯稀有衰变（如 $\text{Higgs} \rightarrow ss$ 等）和希格斯奇异衰变（如 $\text{Higgs} \rightarrow sb$ 等）的预期灵敏度
- 未来正负电子对撞机实验有很强的物理前景



[Phys. Rev. Lett. 132 \(2024\) 221802](#)

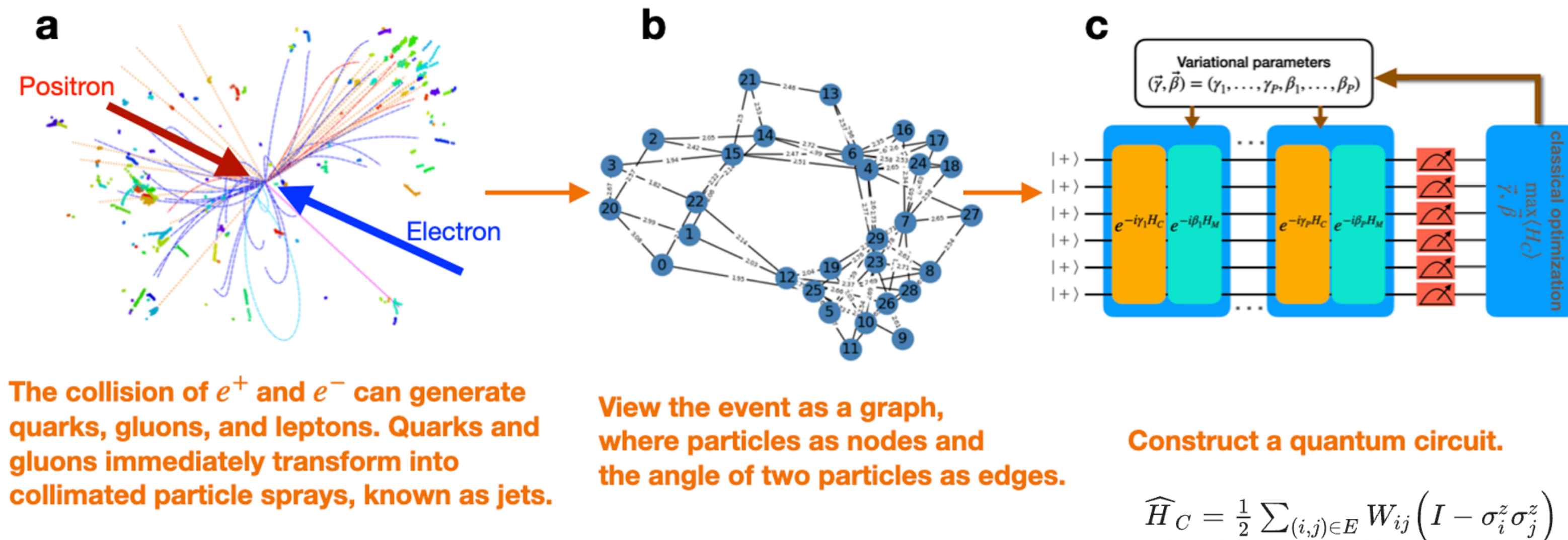
量子计算

- 量子计算(quantum computing):
 - 一种使用qubit的量子态的并行处理方法
 - 通过叠加、纠缠等活动利用高维度量子态空间，可以在某些类型的计算问题有速度上的优势
 - 为了在将来**利用量子优势迎接科研中计算资源方面的挑战**，高能物理学界应当做好充分的准备
 - 另一方面，高能物理学界对量子计算的应用又可能**反哺量子技术的发展**

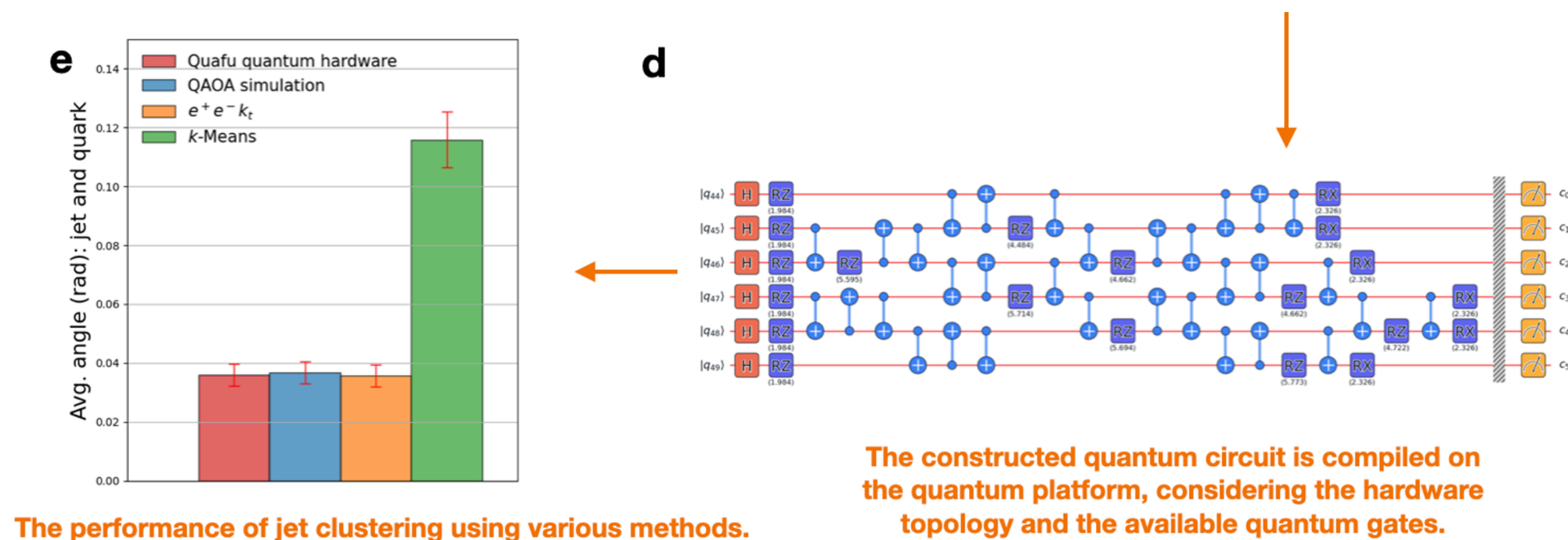


高能物理喷注重建的量子计算实现

- 精确的喷注重建对于夸克和胶子的研究以及希格斯玻色子性质的测量至关重要
- 量子近似优化算法（QAOA）是在中等规模带噪量子硬件（NISQ）中有望展示量子优越性的量子经典混合算法
- 通过将碰撞事例表示为图（粒子表示为图的节点，粒子之间的距离表示为图的边），我们首次得到了量子近似优化算法在喷注重建问题上的实验结果



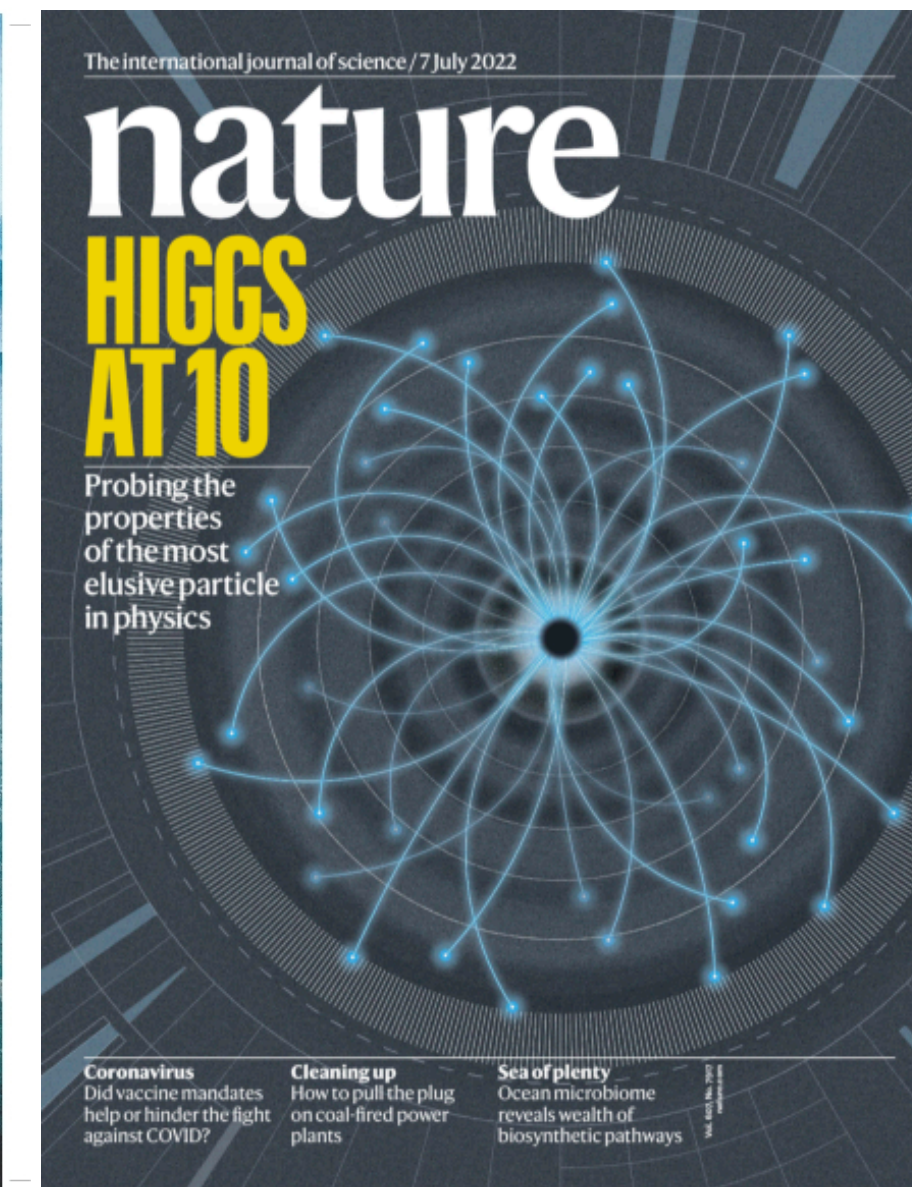
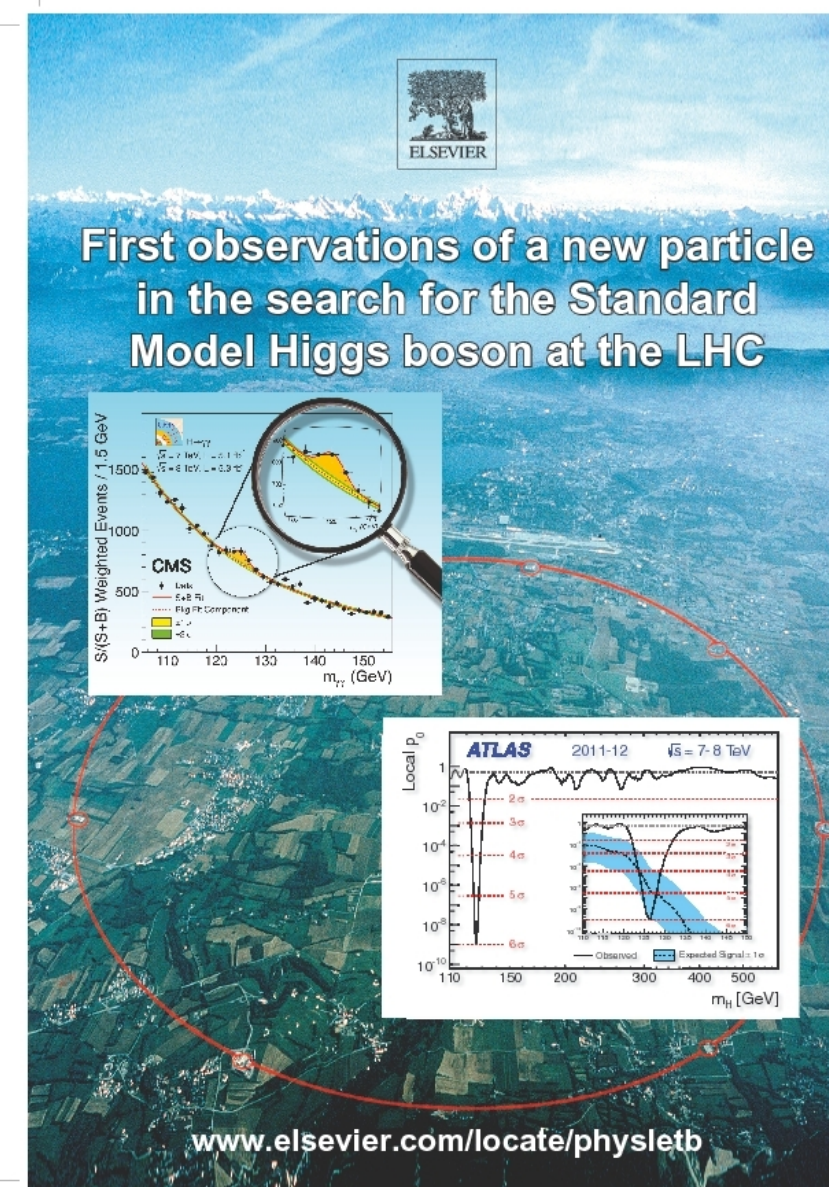
高能物理喷注重建的量子计算实现



- 在量子模拟器以及量子硬件上的结果表明：在小规模喷注重建问题上，量子近似优化算法的性能达到了经典的喷注重建算法的性能
- 展示了量子计算在喷注重建问题中的潜力，是量子计算在高能物理实验中应用的重要一步

总结

- 希格斯物理是高能物理最重要的研究方向之一
- LHC实验发现了希格斯玻色子，并研究希格斯玻色子的性质
- 希格斯工厂：充满机遇的未来
- 机器学习以及量子计算正在成为高能物理研究的重要工具



谢谢！

特色缪子项目

