

# 周辰个人介绍



个人主页: [http://faculty.pku.edu.cn/zhouchen/zh\\_CN/](http://faculty.pku.edu.cn/zhouchen/zh_CN/)  
邮箱: [czhouphy@pku.edu.cn](mailto:czhouphy@pku.edu.cn)

- 2006年-2010年: 北京大学物理学院, 获学士学位
- 2010年-2016年: 杜克大学 (Duke University) 物理系, 获博士学位
- 2016年-2021年9月: 威斯康星大学麦迪逊分校 (University of Wisconsin-Madison) 物理系, 博士后、助理研究员
- 2021年10月至今: 北京大学物理学院, 助理教授
- 研究方向: 实验高能物理, 研究基本粒子及其相互作用
  - 参与大型强子对撞机 (LHC) 物理实验 (2011年-2021年9月: ATLAS实验; 2021年10月-: CMS实验)
  - 近年来在希格斯物理研究、新物理现象探索、探测器升级研发以及量子计算的应用等方面做出重要成果

# LHC实验希格斯物理研究 及量子机器学习应用

周辰

(北京大学高能物理实验组)

现代物理前沿讲座

北京大学物理学院

2022年2月24日

# 讲座内容

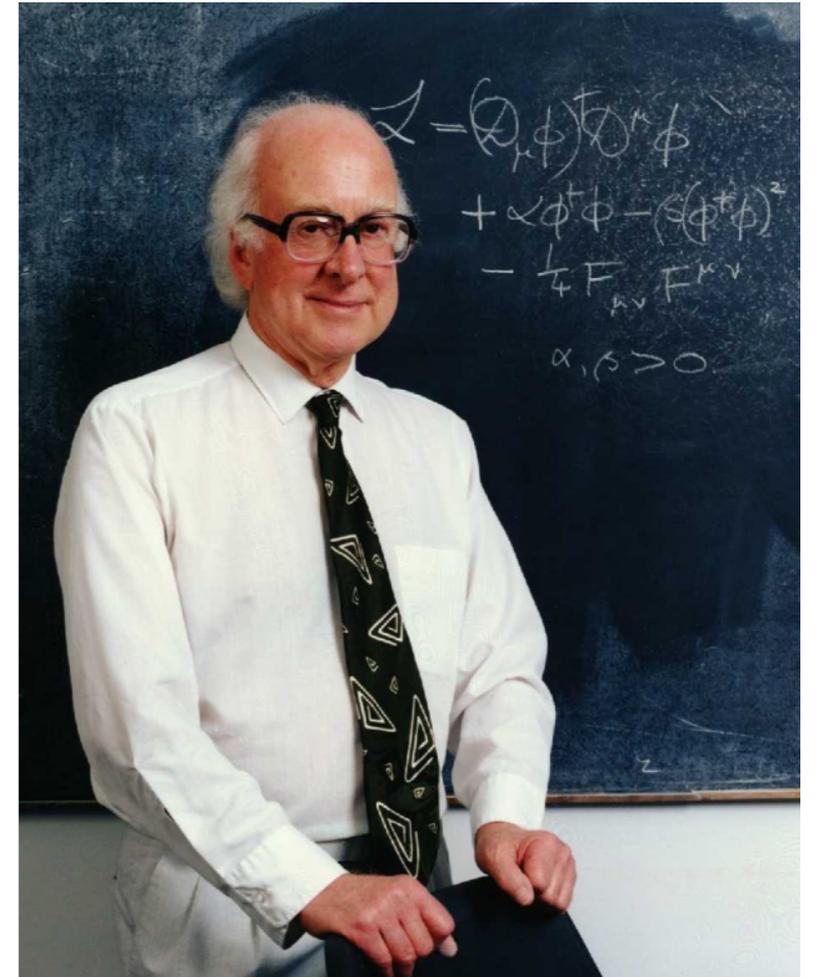
---

- 在本讲座中，我将介绍：
  - 希格斯玻色子的发现
  - 希格斯玻色子性质的研究
  - 量子机器学习在LHC物理分析中的应用

# 1. 希格斯玻色子的发现

# 希格斯玻色子 (Higgs boson)

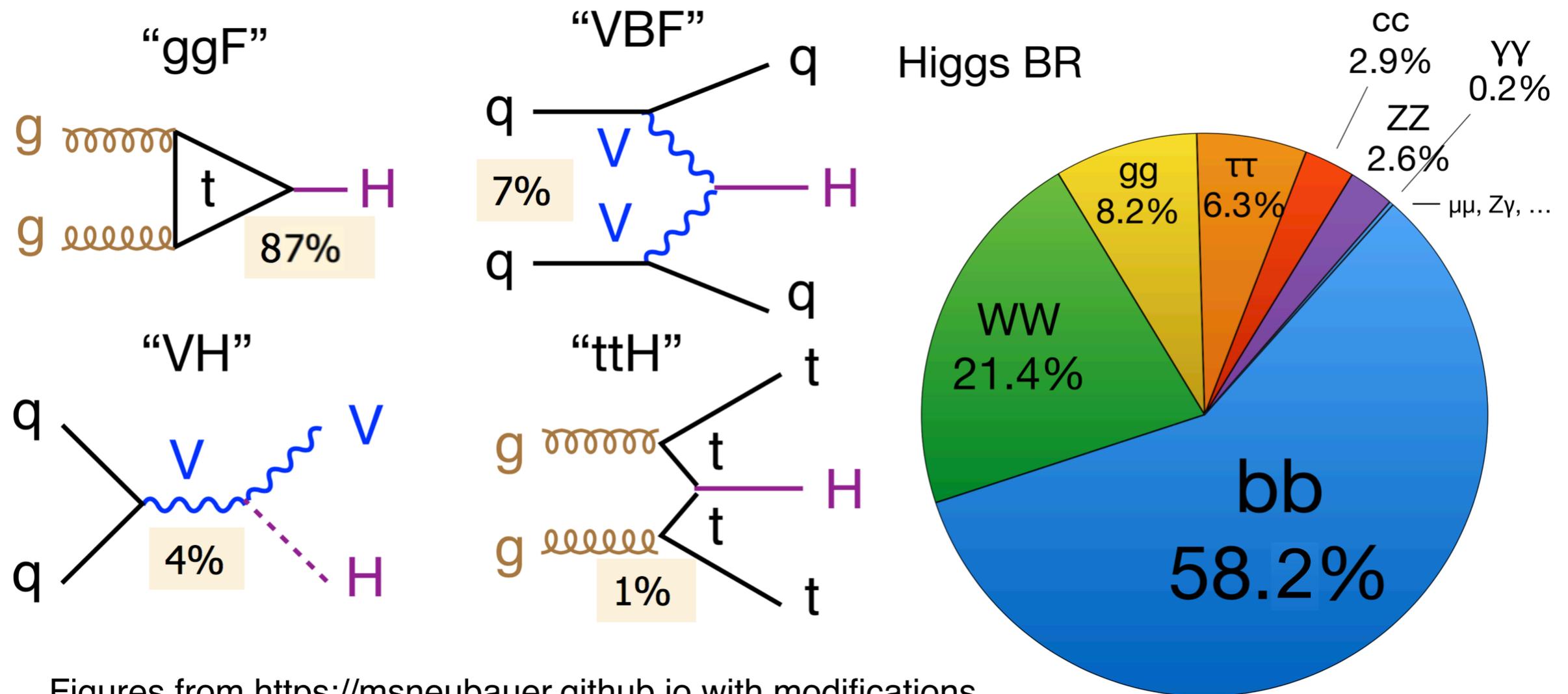
- 在他们著名的1964年论文里, *Robert Brout, François Englert* 和 *Peter Higgs* 提出一个新的、自旋为0的、有质量的玻色子来解释基本粒子怎样得到它们的质量
- 在宇宙中, 有一个遍布整个空间的希格斯“场”, 将穿过它的无质量的粒子变成有质量的粒子



**1964:** *Englert and Brout, Higgs  
Guralnik, Hagen and Kibble*

# 希格斯玻色子的产生和衰变方式

- 在标准模型(Standard Model)中, 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:



Figures from <https://msneubauer.github.io> with modifications

# • LHC ERA 怎样发现希格斯玻色子？

**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

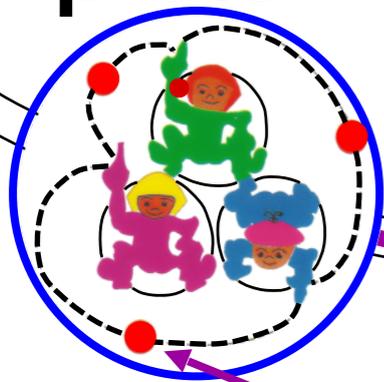
希格斯可以衰变到  
**双光子，**  
**或四轻子，**  
或别的“衰变道”

1600个先进技术超导磁铁

**LHC**

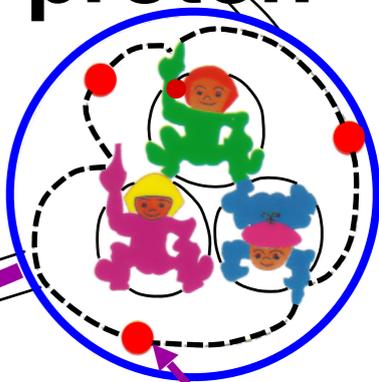


**proton**

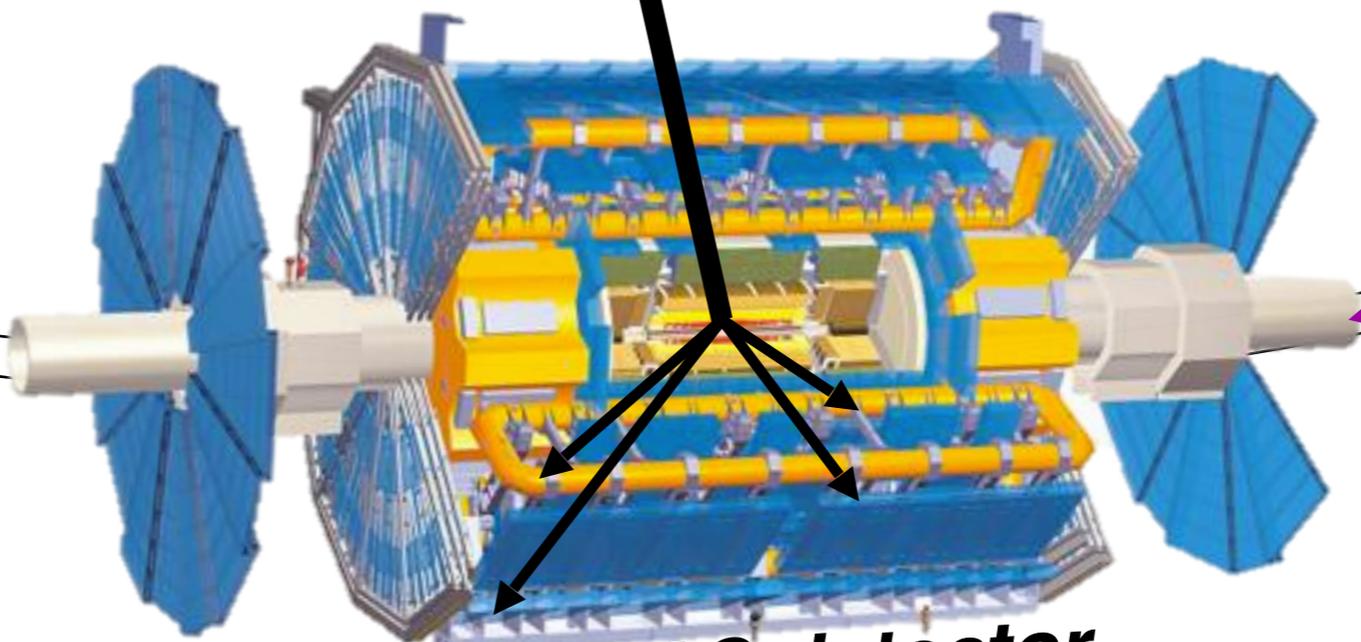


**gluon**

**proton**



**gluon**



**ATLAS detector**

每分钟大约产生一个希格斯粒子

# • LHC ERA 怎样发现希格斯玻色子？

大海捞针！

在ATLAS中，截至2012年7月4日：

10<sup>15</sup>次碰撞

分析42亿个事例

产生24万希格斯粒子

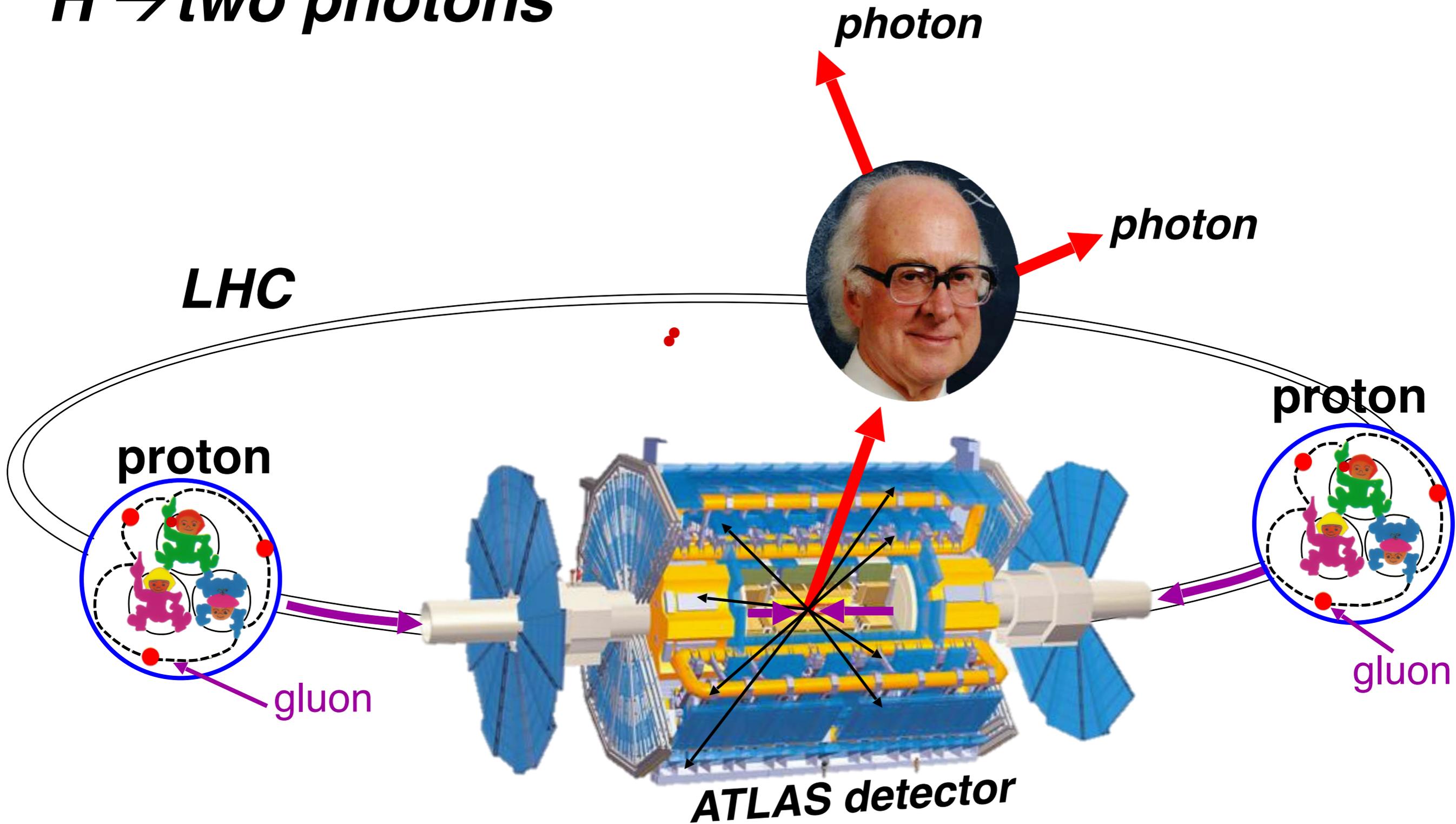
检测到约350个双光子希格斯粒子事例

检测到约8个四轻子希格斯粒子事例



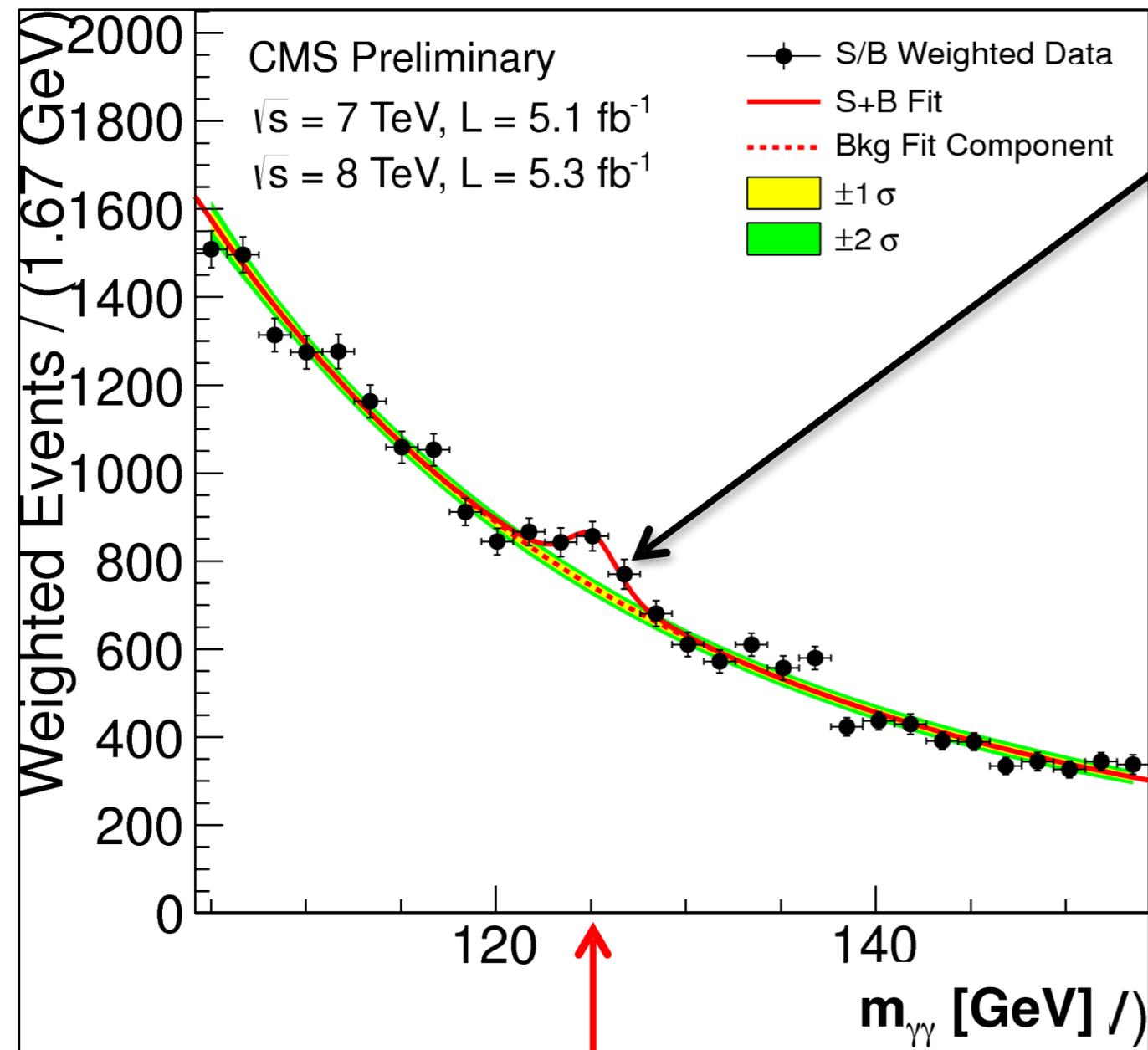
# Higgs 发现道 #1

$H \rightarrow two\ photons$

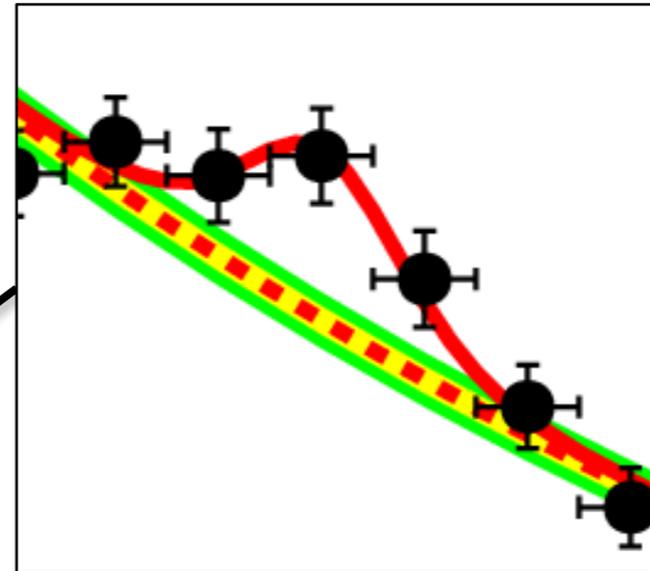


# Higgs 发现道 #1

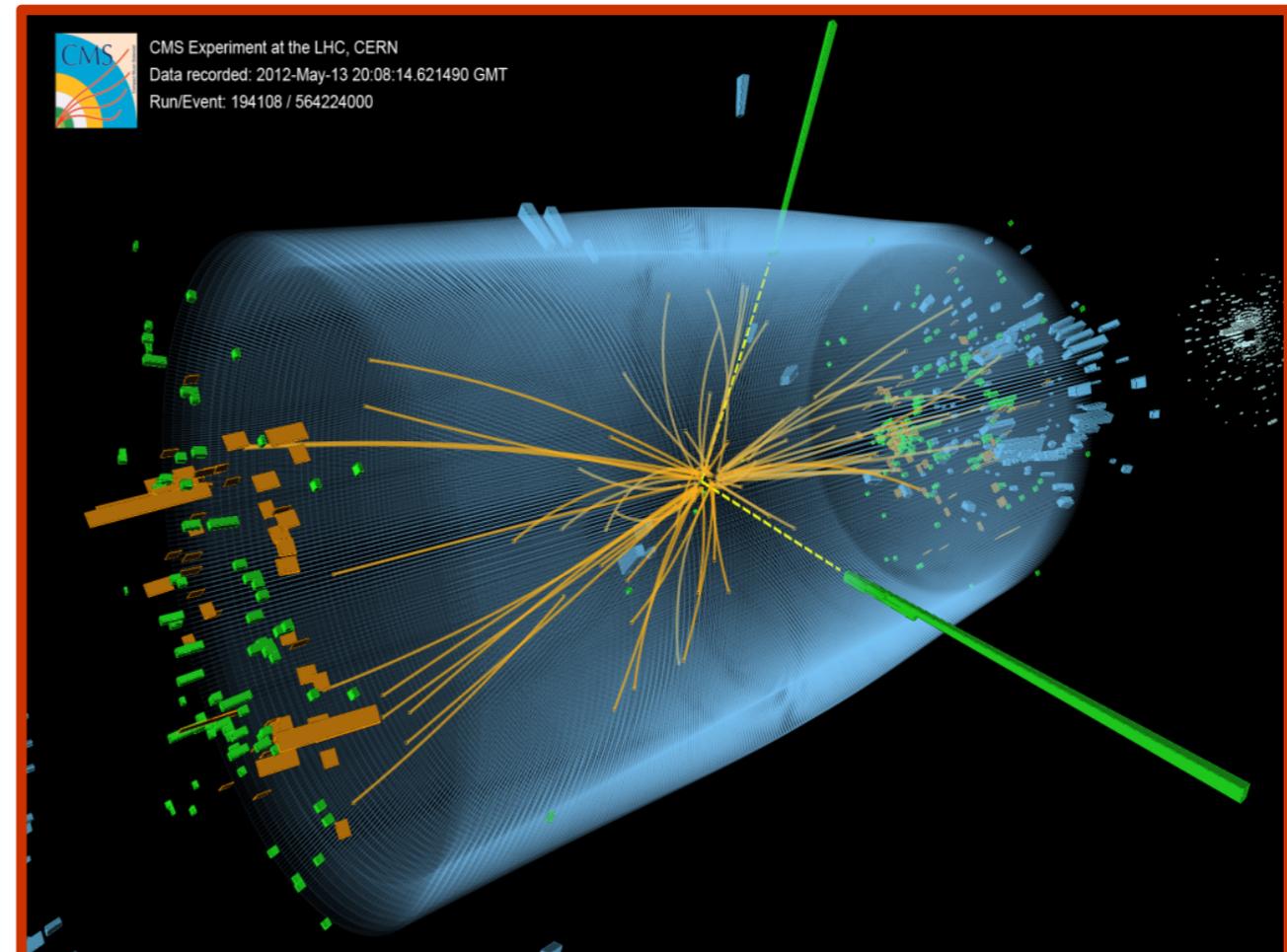
## $H \rightarrow two\ photons$



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

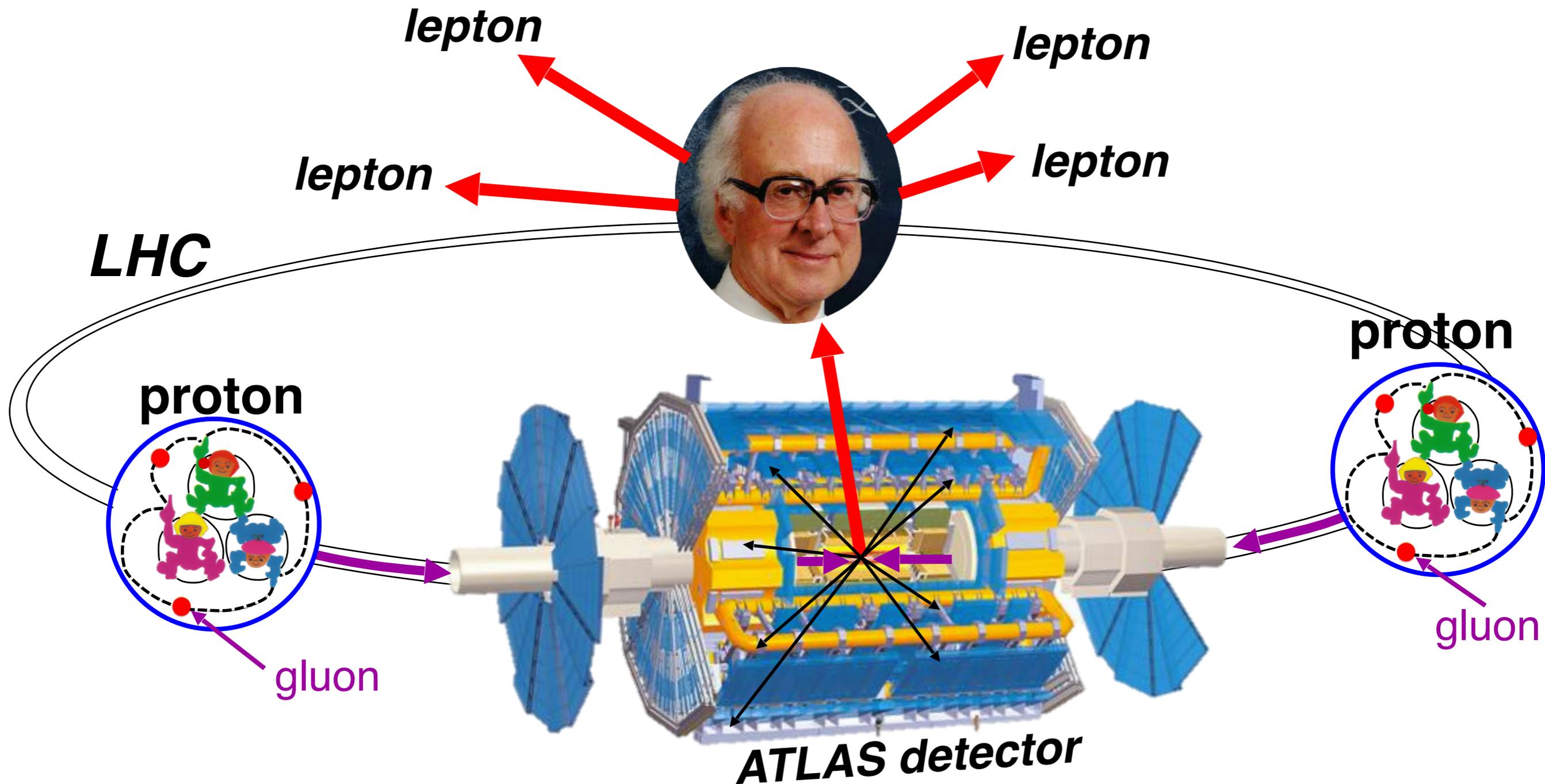


**CMS**



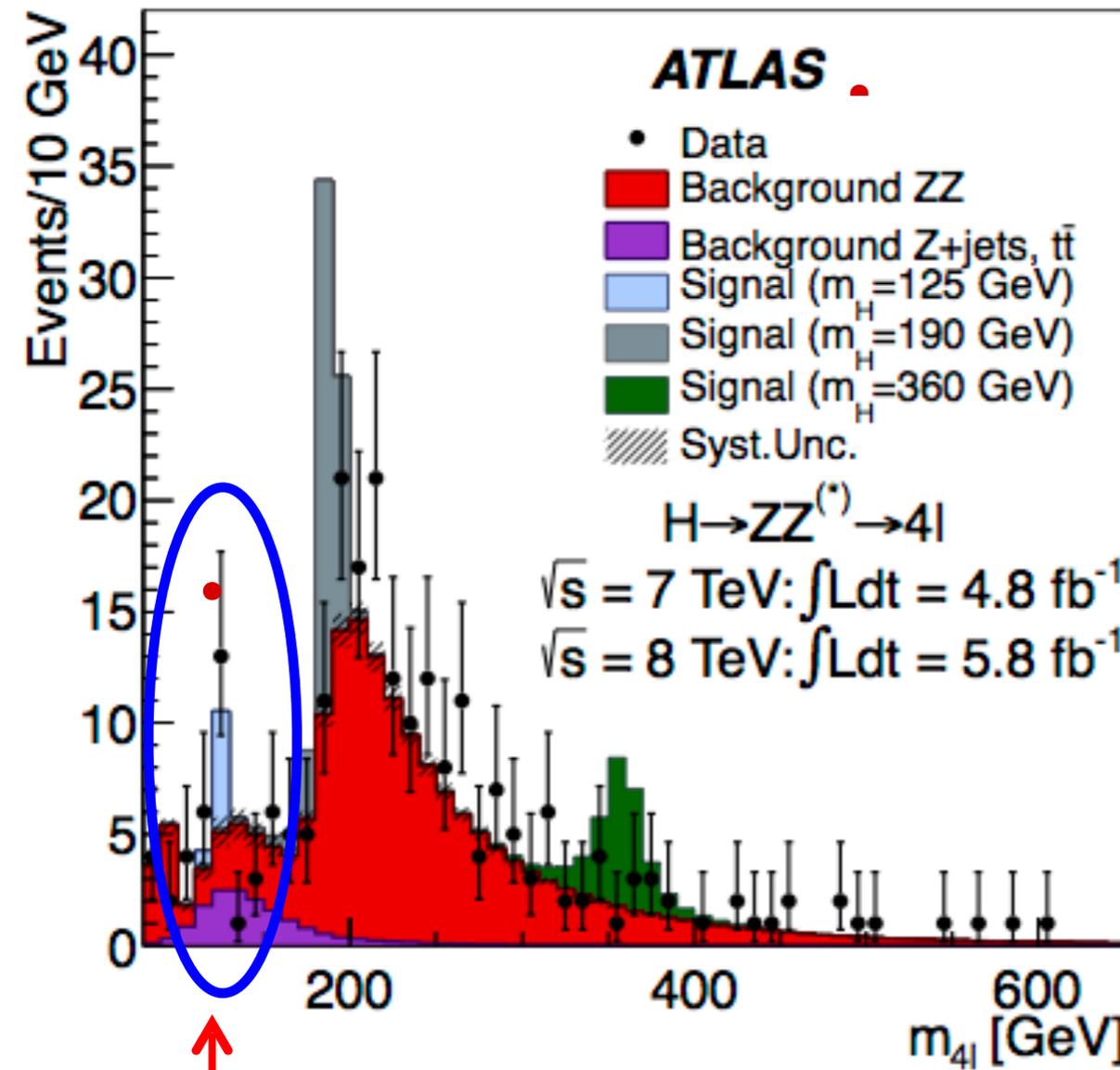
# Higgs 发现道 #2

$H \rightarrow \text{four leptons } (e^+e^-e^+e^-, e^+e^-\mu^+\mu^-, \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-)$

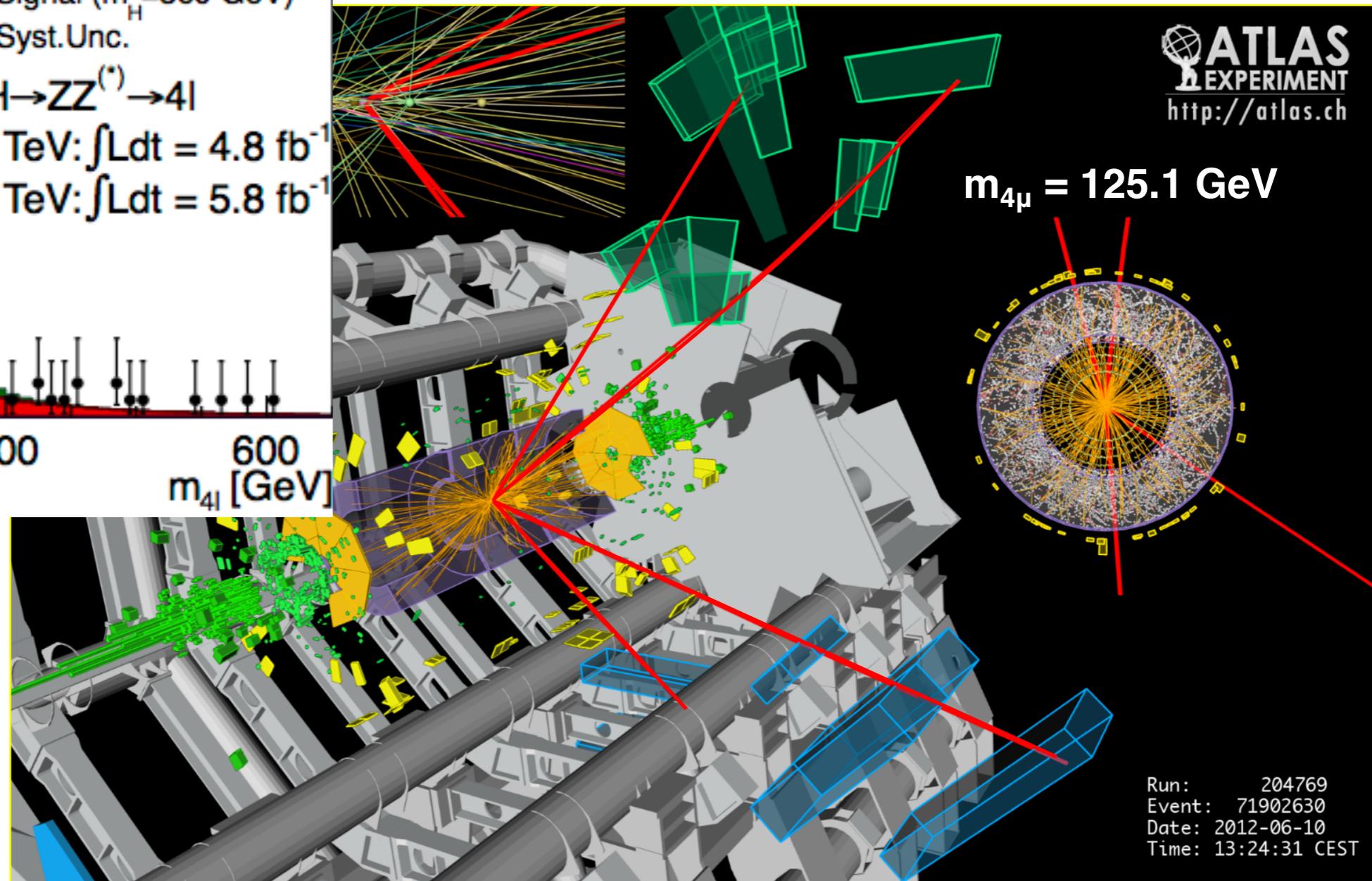


# Higgs 发现道 #2

•



**Higgs  $\rightarrow$  4 muons**



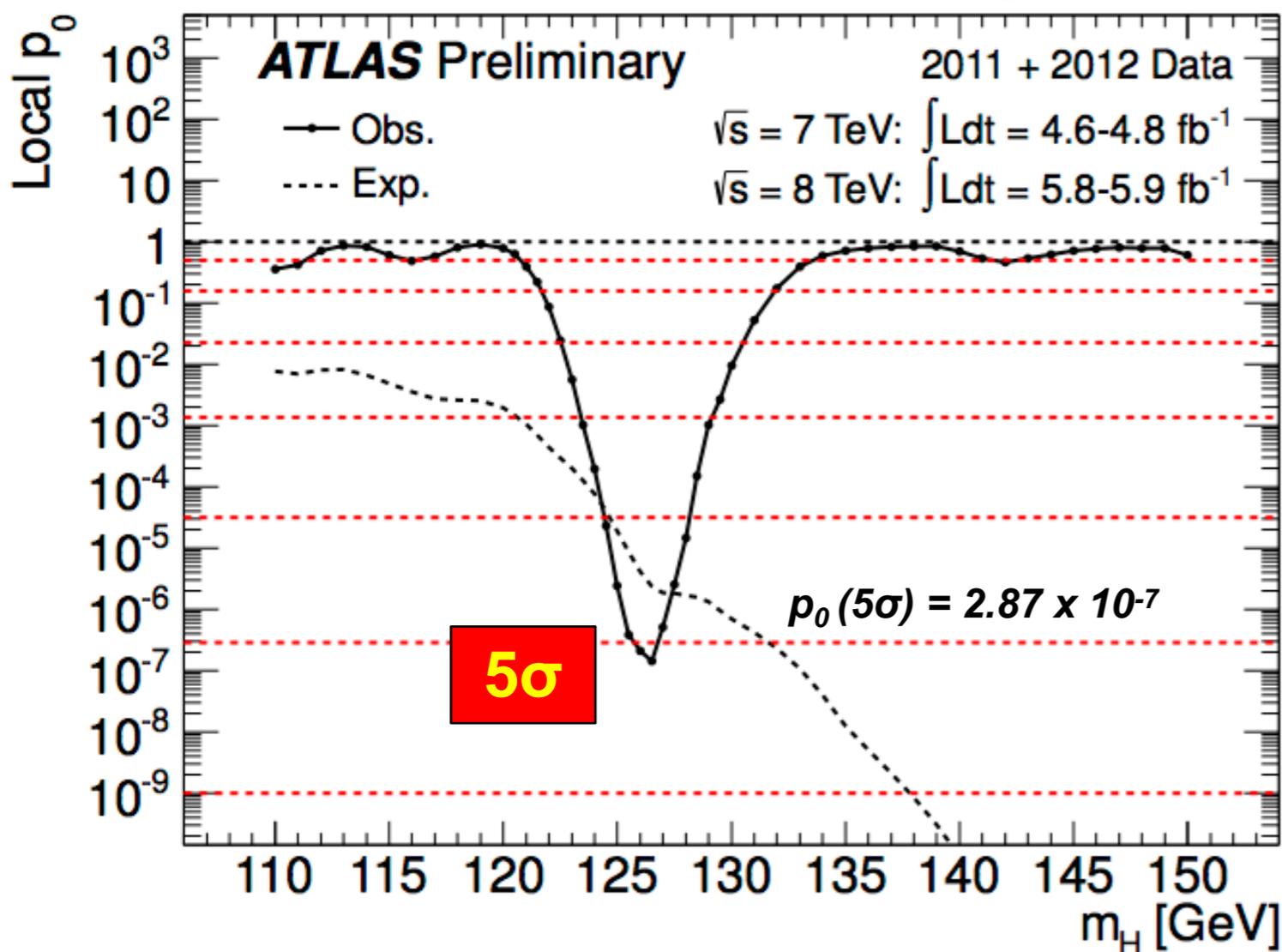
**Mass = 125 GeV**

## 合并两个“发现道”的结果

## $H \rightarrow 2 \text{ photons}$ 与 $H \rightarrow 4 \text{ leptons}$ (2011+2012 数据):

+ 灵敏度相对弱的道  $H \rightarrow WW$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$ ,  $H \rightarrow bb$  (2011 数据)

(July 4, 2012)

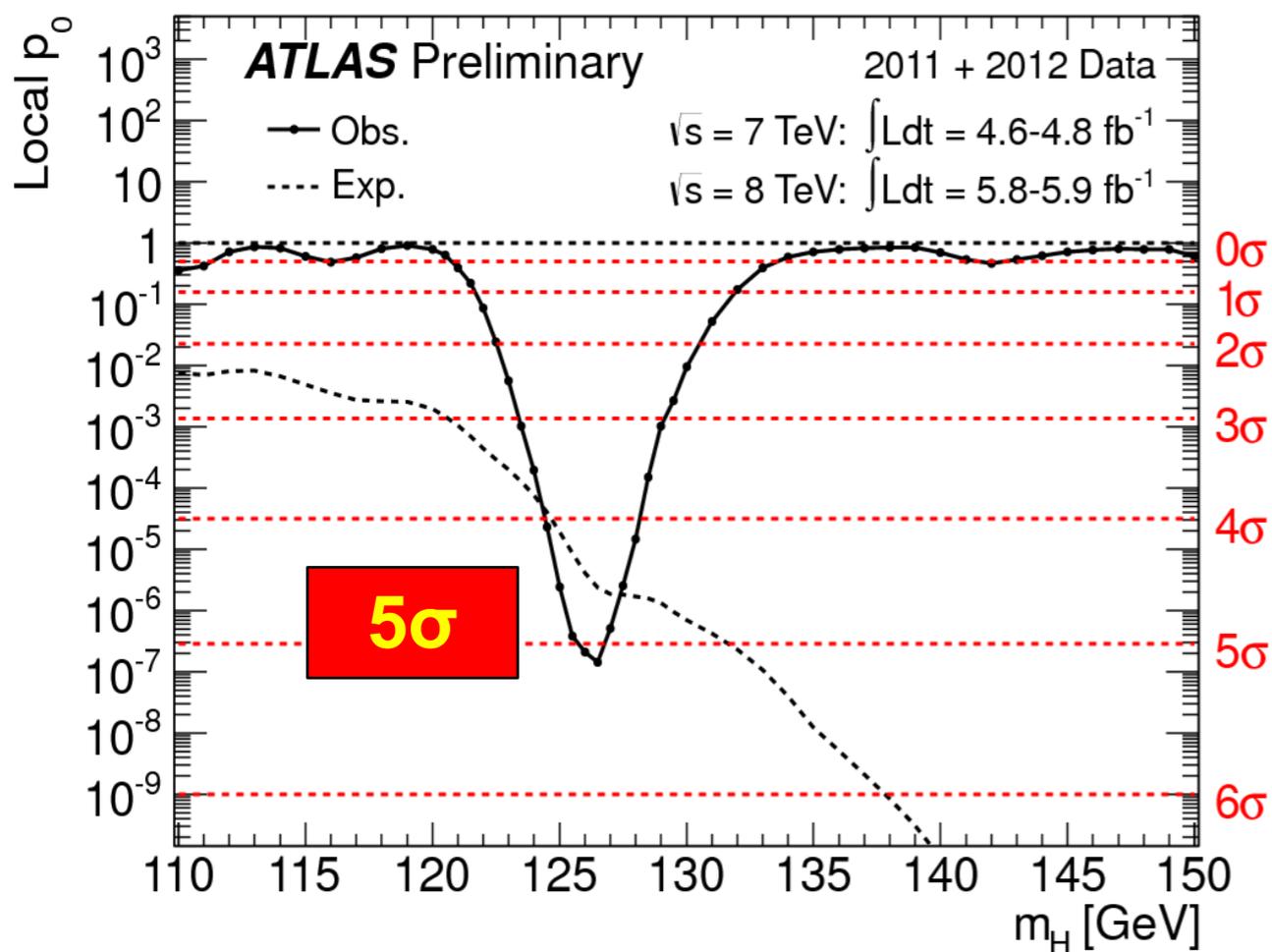


$p_0$ : 本底涨落到观测数据 (或更极端) 的概率

观测到的事例由随机涨落引起的  
几率不到300万分之一  
——这与严格的“五西格玛”黄金  
标准相符 (粒子物理学家坚持使  
用它作为宣布物理发现的要求)

# LHC ERA 2012年7月4日 (ICHEP 2012会议)

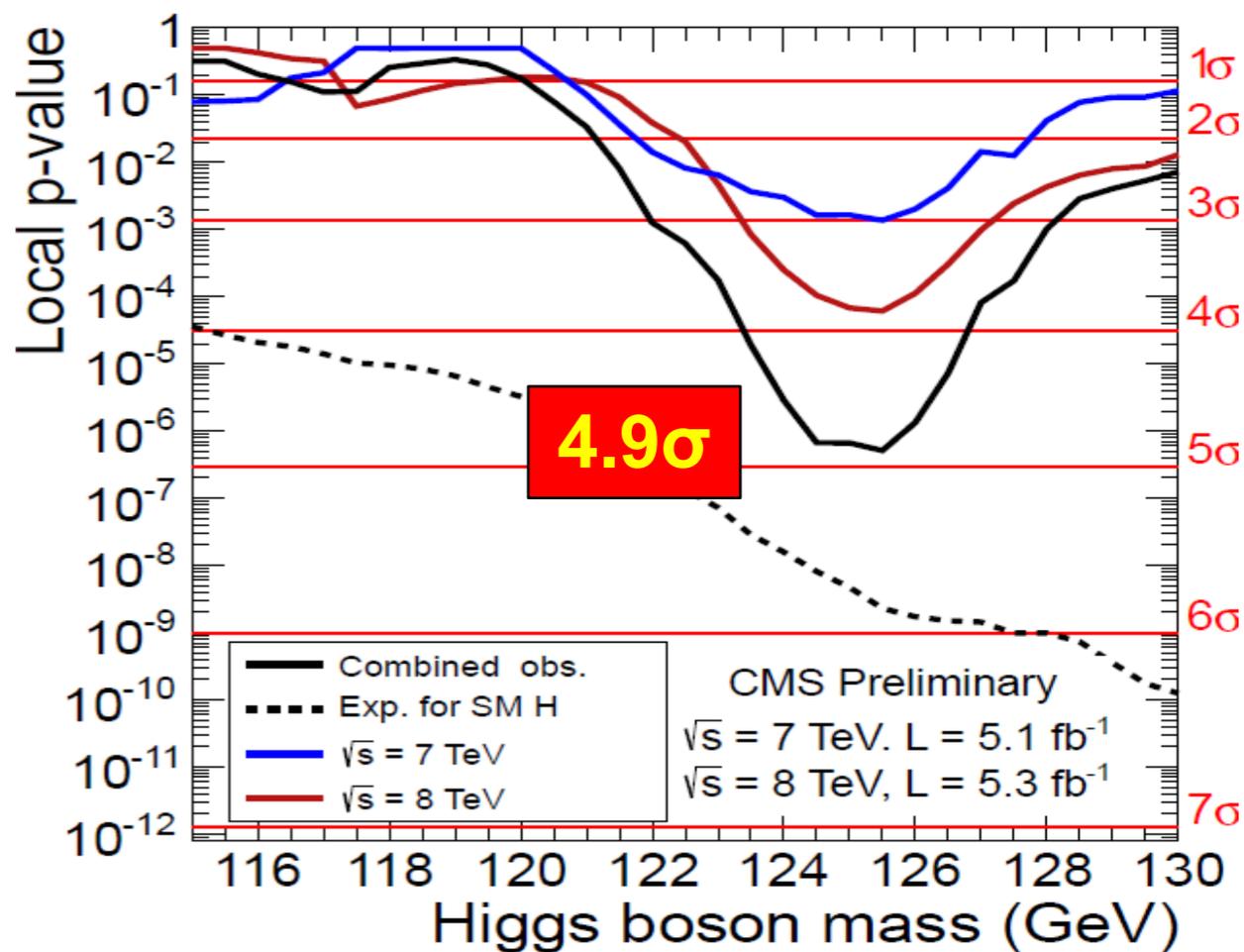
**ATLAS**  $\gamma\gamma, 4l$  道使用2011+2012年数据  
 $WW, \tau\tau, bb$  道使用2011年数据



最大的超出:

**5 $\sigma$  at  $m_H = 126.5$  GeV**

**CMS** 所有道使用 2011+2012年数据



最大的超出:

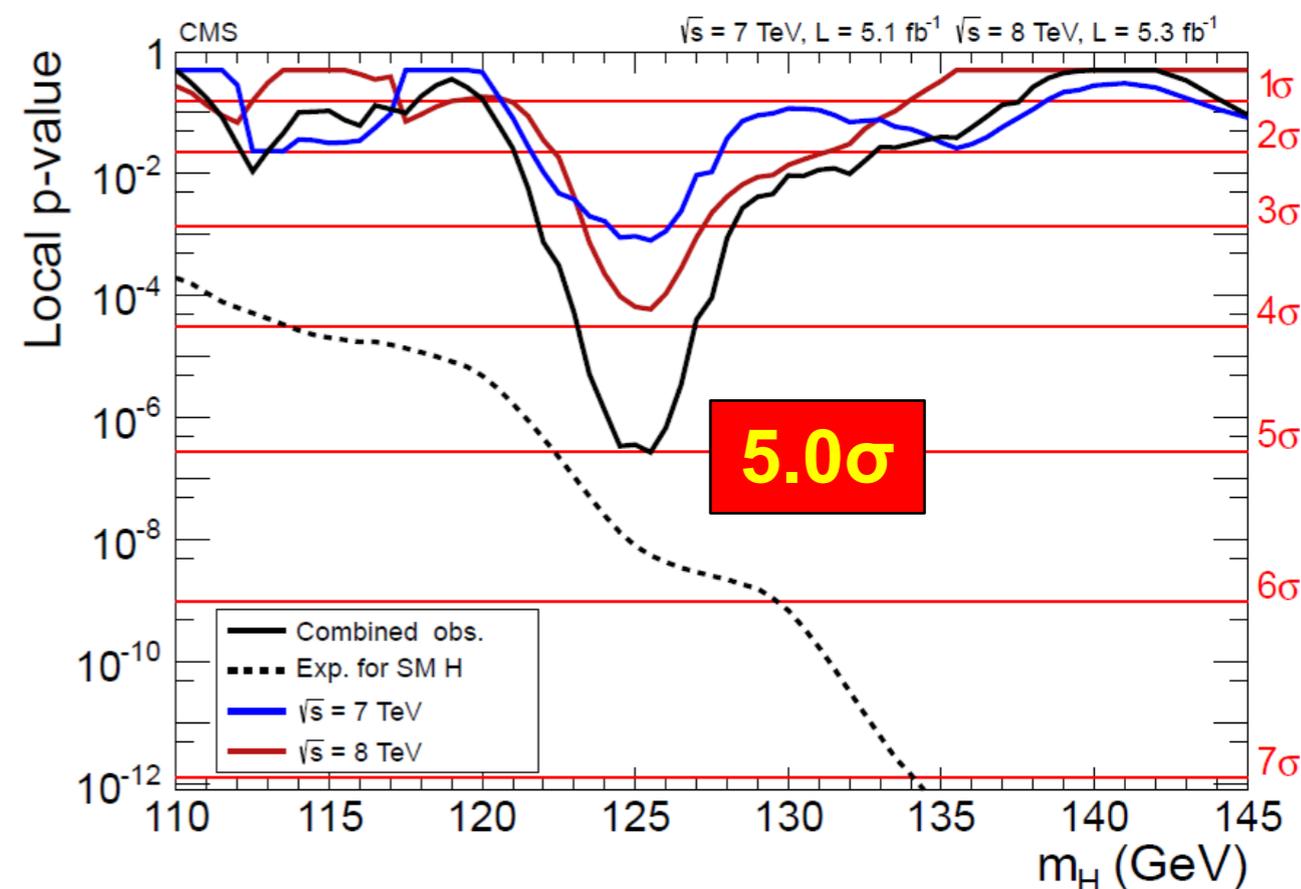
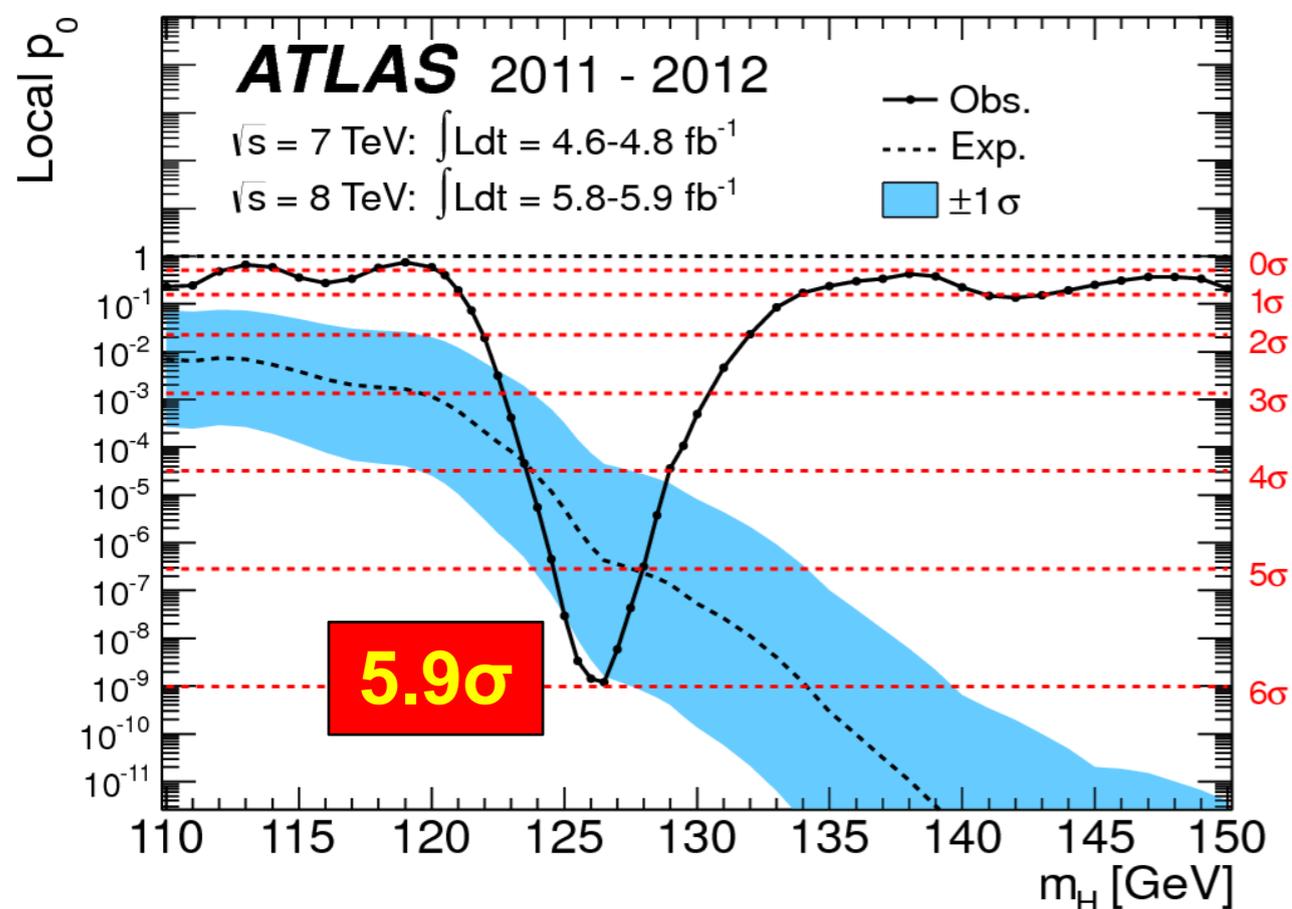
**4.9 $\sigma$  around  $m_H = 125$  GeV**

**(若仅使用  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow 4l$ : 5.0 $\sigma$ )**

2012年7月31日

ATLAS 与 CMS 向 *Physics Letters B* 提交论文.

ATLAS 在  $H \rightarrow WW$  道上增加了2012年数据  $\rightarrow$  **5.9 $\sigma$**  at  $m_H = 126.5$  GeV



**ATLAS** [PLB 716 \(2012\) 1-29](#), Sept 17 (2012)

最大的超出:

**5.9 $\sigma$  at  $m_H = 126.5$  GeV**

$H \rightarrow \gamma\gamma, bb, \tau\tau, WW(l\nu l\nu, l\nu q\bar{q}), ZZ(4l, ll\nu\nu, llq\bar{q})$

**CMS** [PLB 716 \(2012\) 30-61](#), Sept 17 (2012)

最大的超出:

**5.0 $\sigma$  at  $m_H = 125.5$  GeV**

$H \rightarrow \gamma\gamma, bb, \tau\tau, WW(l\nu l\nu), ZZ(4l, ll\tau\tau, ll\nu\nu, llq\bar{q})$

# 希格斯玻色子的发现

大型强子对撞机上的**ATLAS**和**CMS**实验各自独立地得到 **5 $\sigma$**  的希格斯玻色子的信号显著度后，**CERN**的总干事**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**

# 希格斯玻色子的发现

2012年7月4日宣布的大型强子对撞机上的希格斯玻色子的发现，是LHC加速器物理学家和数千ATLAS和CMS实验物理学家历经20年努力的结果。实验物理学家建造、操作探测器，建立、管理一个在世界各地处理数据的计算机系统，创建新颖的硬件和软件来识别最有趣的碰撞，并编写算法从被记录的大量数据中挖掘出最相关的事例。他们都热情地工作，期待着这样一个发现。

**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)*

# LHC ERA 希格斯玻色子的发现

- 2012年7月4日, “Discovery!”





Professor Higgs

Professor Englert

Professor Wu

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。”

NEWS | FOR BREAKING NEWS heraldsun.com.au  
**Higgs has world in a spin**

**The New York Times**  
**Physicists Find Elusive Particle Seen as Key to Universe**

JULY 4, 2012



**In Newsweek Magazine**  
**How the Higgs Boson Posits a New Story of our Creation**  
Jul 9, 2012 1:00 AM EDT  
JULY 9, 2012

**The Economist**  
**The Higgs boson Gotcha!**  
**The hunt for physics's most elusive quarry is over**  
Jul 7th 2012 | from the print edition  
JULY 7, 2012

## ScienceTimes



***New York Times,  
March 5, 2013***

## Chasing the Higgs

Struggle, and finally triumph, in the search for physics' most elusive particle.

By DENNIS OVERBYE

*Peter Higgs, center, of the University of Edinburgh, was one of the first to propose the particle's existence. From left, physicists at CERN who helped lead the hunt for it: Sau Lan Wu (University of Wisconsin), Joe Incandela (University of California-Santa Barbara), Guido Tonelli (University of Pisa) and Fabiola Gianotti (CERN).*

Peter Higgs, center, of the University of Edinburgh, was one of the first to propose the particle's existence. From left, physicists at CERN who helped lead the hunt for it: Sau Lan Wu, Joe Incandela, Guido Tonelli and Fabiola Gianotti.

# 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. 希格斯玻色子性质的研究

发现了希格斯玻色子，我们的工作就结束了吗？

没有！

# 希格斯玻色子性质的研究

- 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
- 希格斯玻色子与费米子的耦合和希格斯玻色子的自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

# 希格斯玻色子性质的研究

- 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
  - 希格斯性质的研究是粒子物理最重要的研究方向之一

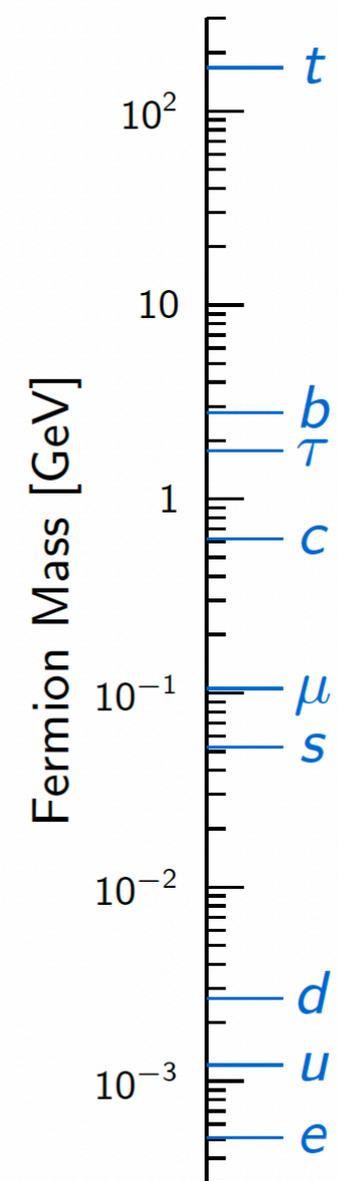
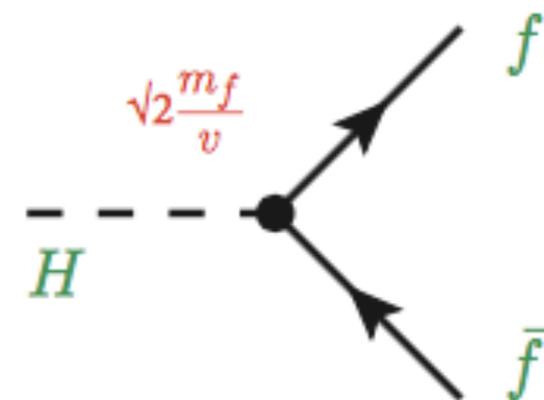
粒子物理从未像今天这样令人兴奋

这正是因为新发现的希格斯玻色子

# 2.1 希格斯玻色子与 费米子的耦合

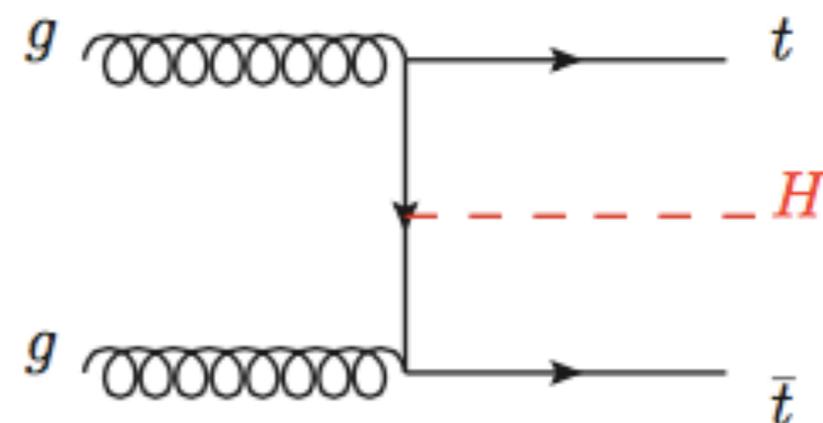
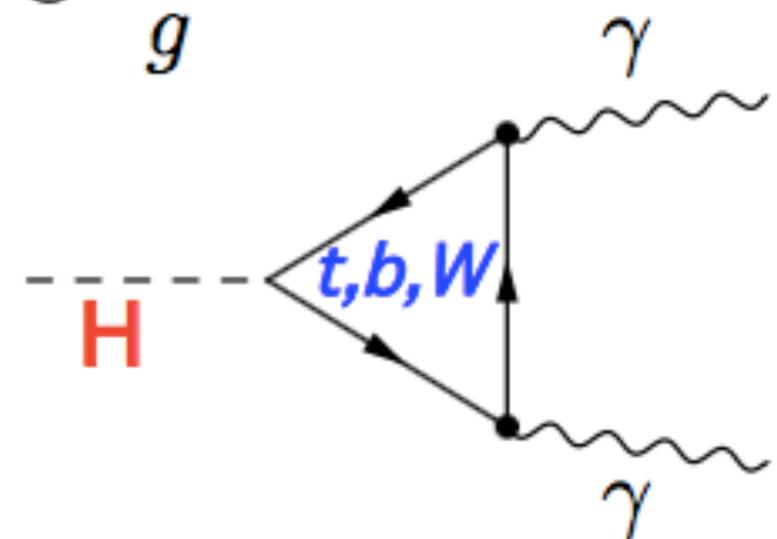
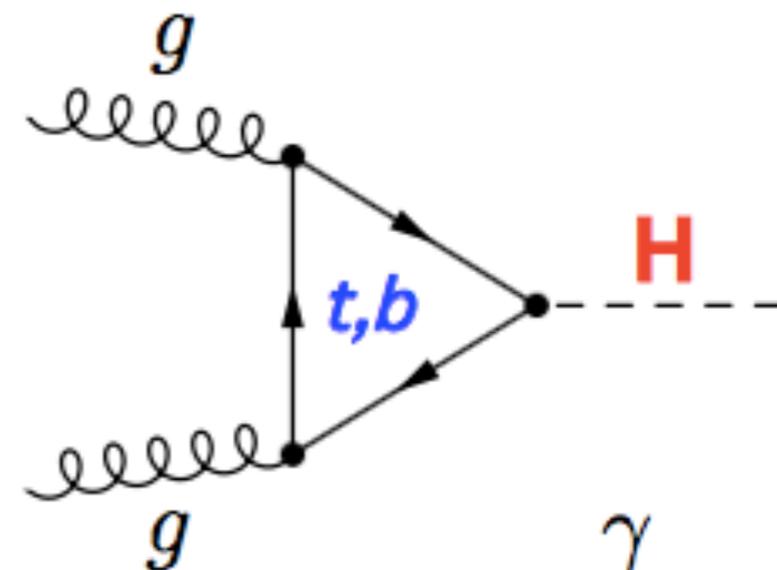
# 希格斯玻色子与费米子的耦合

- 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
- Yukawa interactions are “a new kind of fundamental interaction” -Gavin Salam at LHCP theory summary talk
- 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,  $H \rightarrow \tau\tau$  衰变等等
- 标准模型中，汤川相互作用强度与费米子质量成正比；超越标准模型的物理可以改变这些相互作用强度

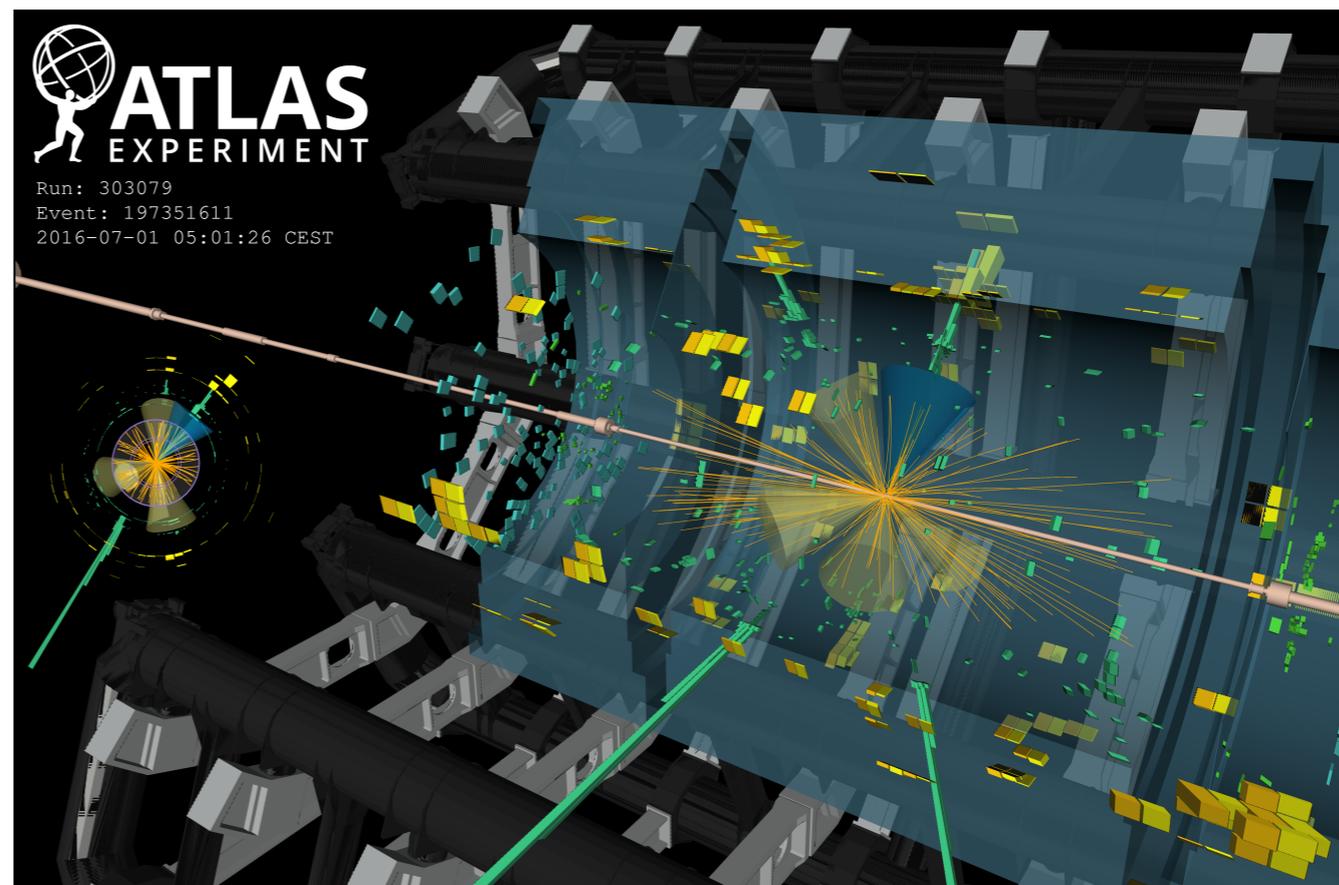
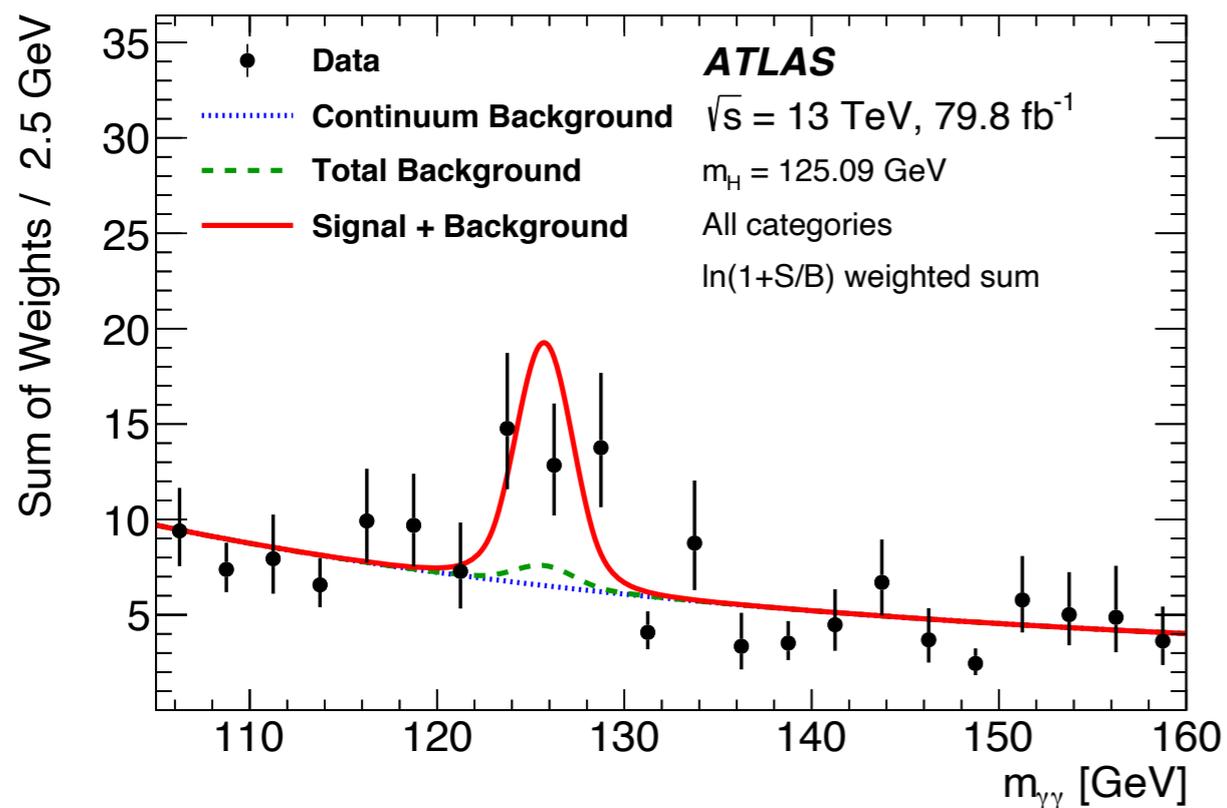


# 希格斯玻色子与top夸克的耦合

- Higgs boson和top quark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Higgs boson与一对top quark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



# 希格斯玻色子与top夸克的耦合



- $t\bar{t}H$ 分析需要考虑不同的希格斯衰变道 ( $\gamma\gamma$ ,  $WW^*$ ,  $ZZ^*$ ,  $\tau\tau$ ,  $b\bar{b}$ )
- 在ATLAS实验的 $t\bar{t}H$ 合并分析中, 观测信号显著度是 **$6.3\sigma$**
- 在CMS实验的 $t\bar{t}H$ 合并分析中, 观测信号显著度是 **$5.2\sigma$**
- 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top夸克的耦合

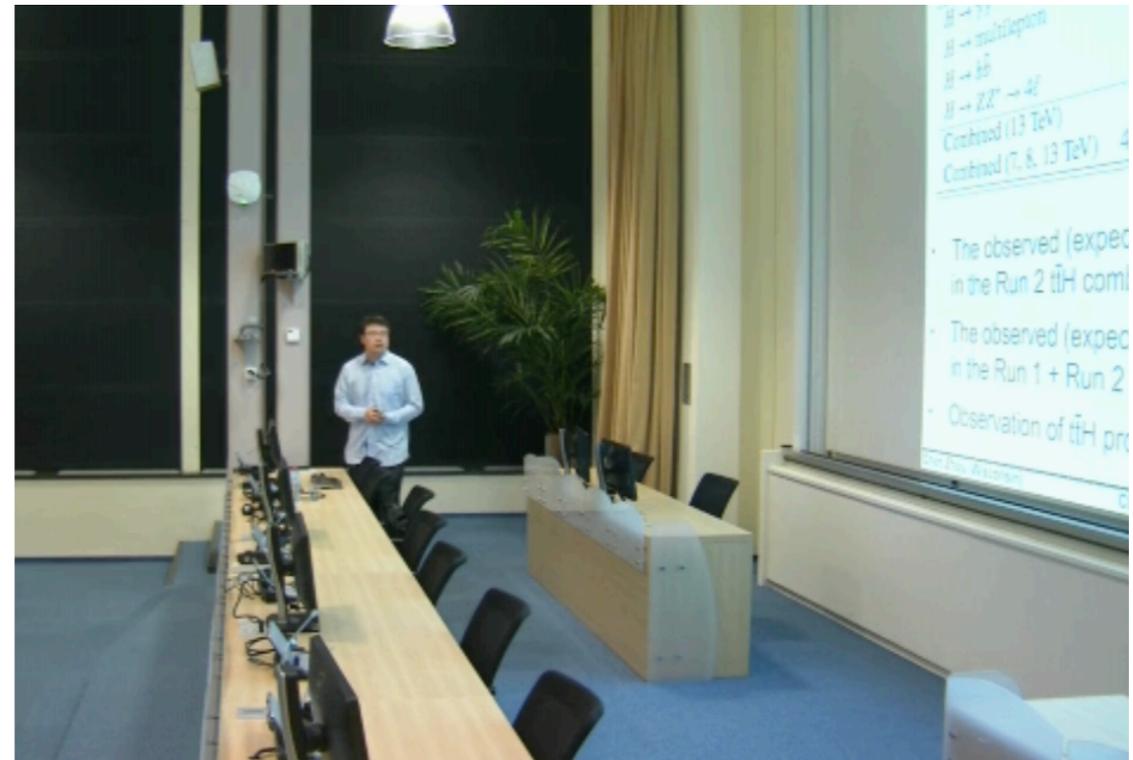
CERN媒体发布新闻稿 (2018年6月)

## 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.

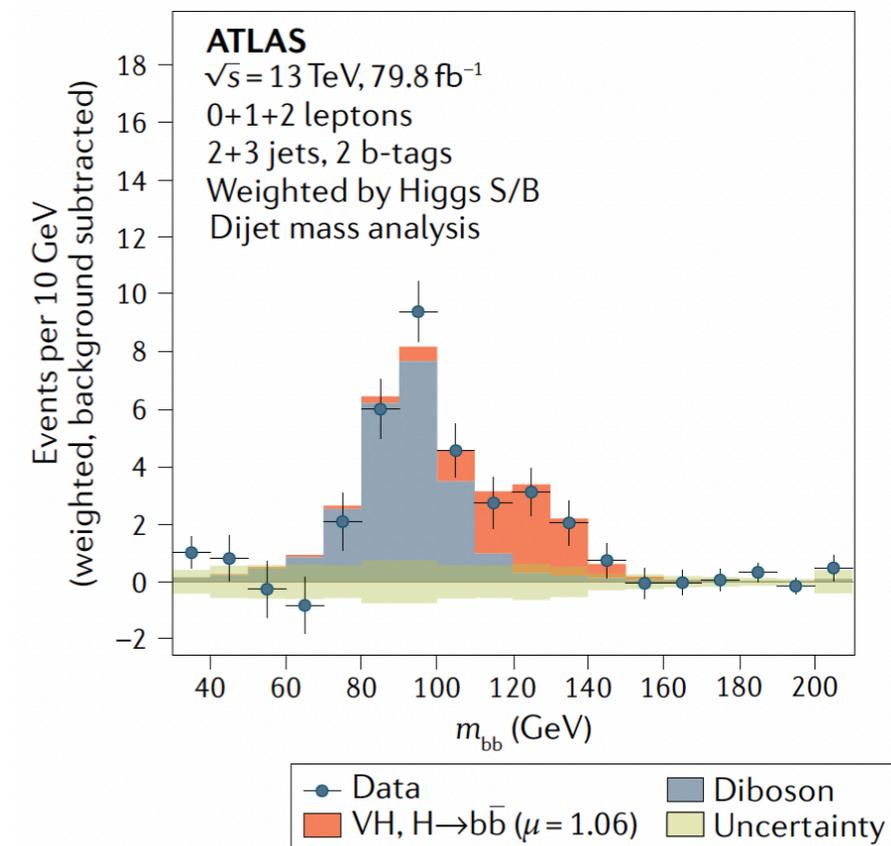
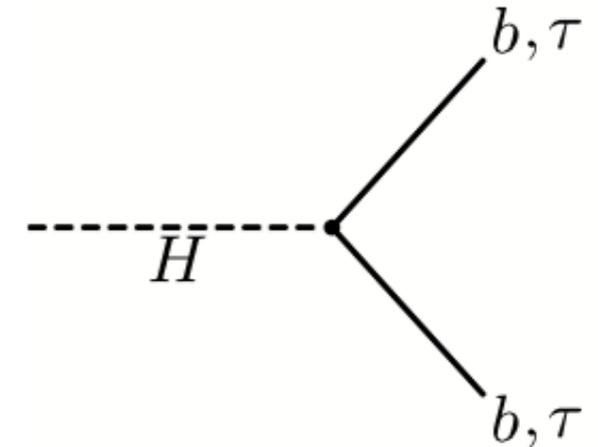
4 JUNE, 2018

- 我获选代表ATLAS合作组做**CERN 研讨会**报告ttH发现:



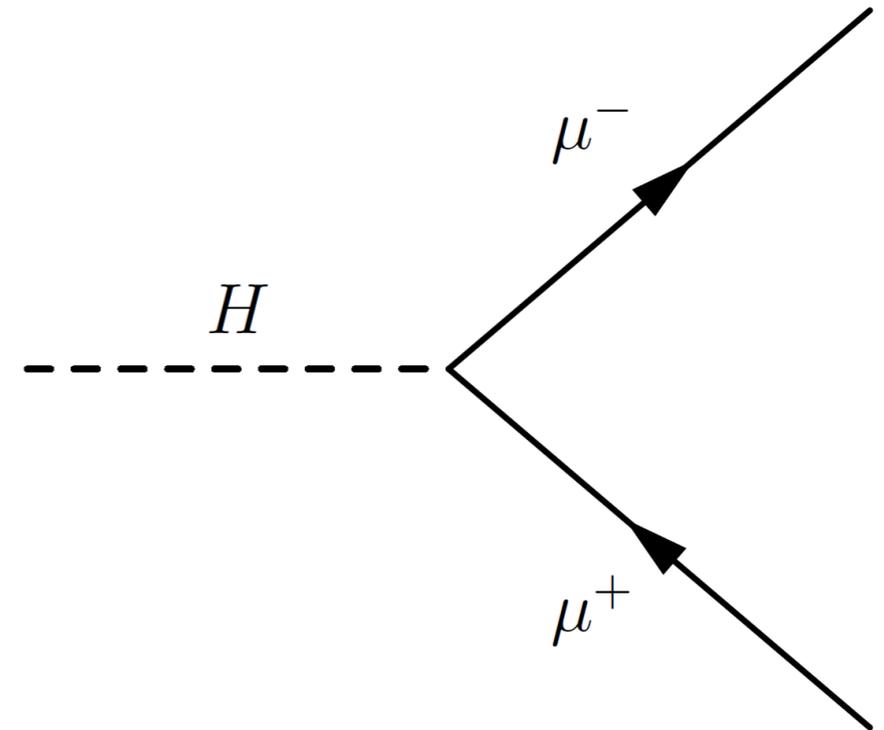
# 希格斯玻色子与 $\tau$ 轻子、bottom夸克的耦合

- $H \rightarrow \tau\tau$  衰变是现在唯一被发现的希格斯玻色子的轻子衰变模式
  - $H \rightarrow \tau\tau$  的首次发现来自ATLAS 和CMS 的Run 1结果合并，信号显著度达到  **$5.5\sigma$**
- $H \rightarrow b\bar{b}$  衰变有最大的衰变分支比 (58%)，在2018年使用Run 1+Run 2数据被发现：
  - ATLAS的 $H \rightarrow b\bar{b}$  显著度达到了  **$5.4\sigma$**
  - CMS的 $H \rightarrow b\bar{b}$  显著度达到了  **$5.6\sigma$**

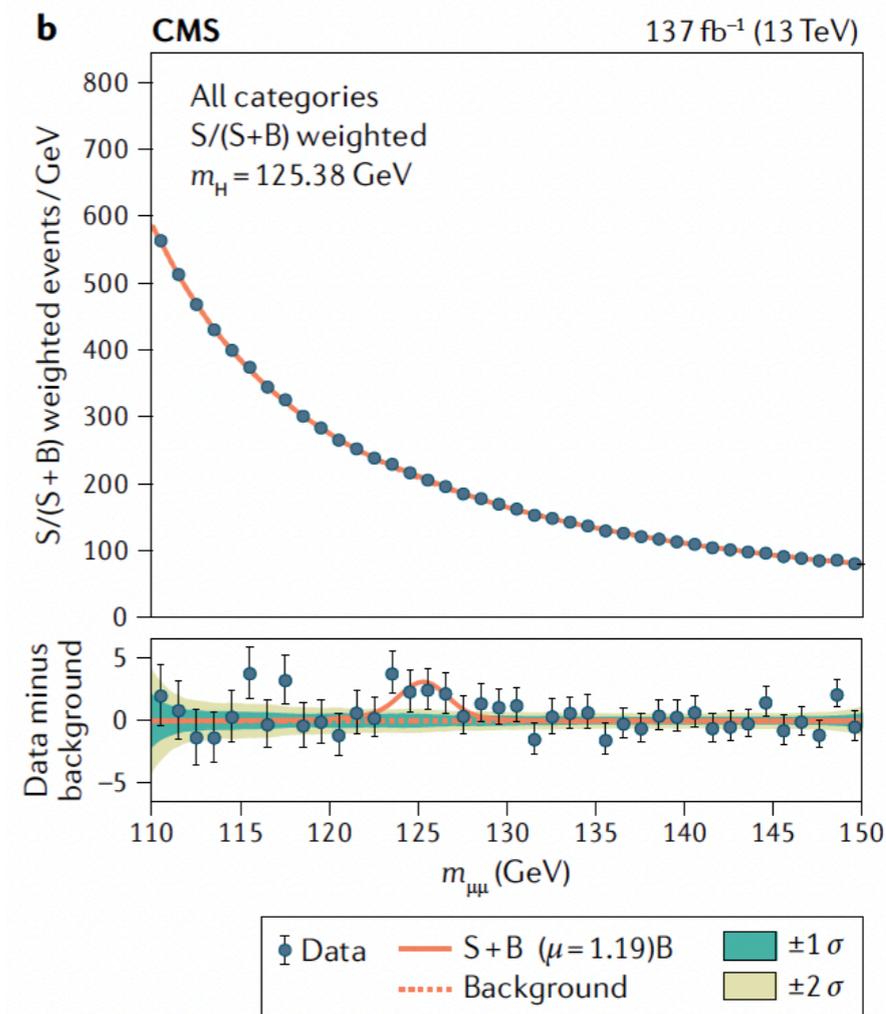
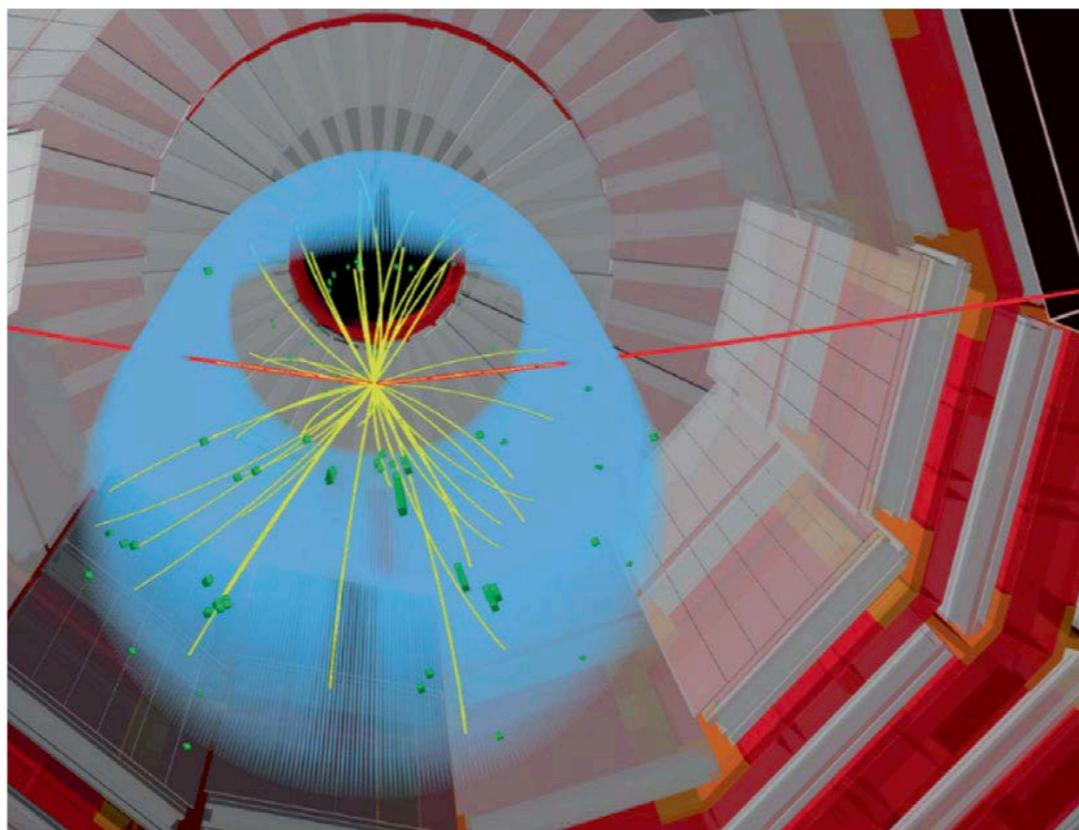


# 希格斯玻色子与 $\mu$ 子的耦合

- Higgs boson和第三代费米子(如 top quark)的耦合均已被发现
  - Higgs boson与其他代的费米子的耦合尚未被证实
- Higgs到两个 $\mu$ 子的衰变提供了在LHC上发现Higgs boson与第二代费米子的耦合的最好机会!
  - Standard Model预言很小的分支比( $2 \times 10^{-4}$ ), beyond the Standard Model物理可能修改这个分支比



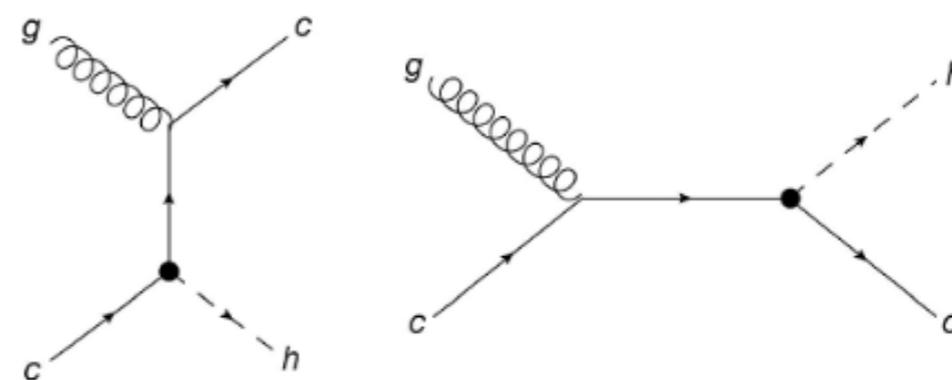
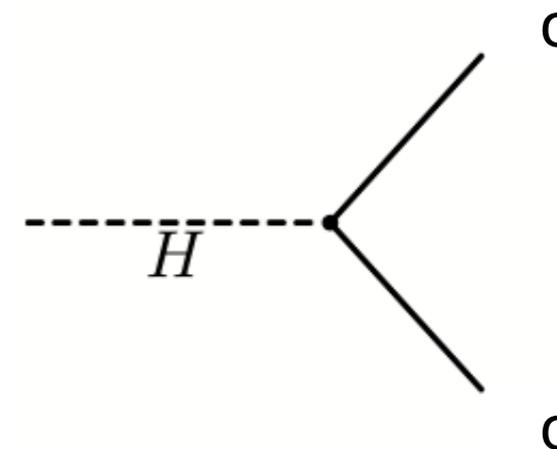
# 希格斯玻色子与 $\mu$ 子的耦合



- 使用ATLAS Run 2的全部数据,  $H \rightarrow \mu\mu$ 的观测显著度是 **$2.0\sigma$**
- 使用CMS Run 2的全部数据,  $H \rightarrow \mu\mu$ 的观测显著度是 **$3.0\sigma$**
- 这些关于 $H \rightarrow \mu\mu$ 衰变的结果首次提供了Higgs与第二代费米子耦合的证据!
- 有望在Run 3以超过 **$5\sigma$** 的显著度发现 $H \rightarrow \mu\mu$ 过程

# 希格斯玻色子与charm夸克的耦合

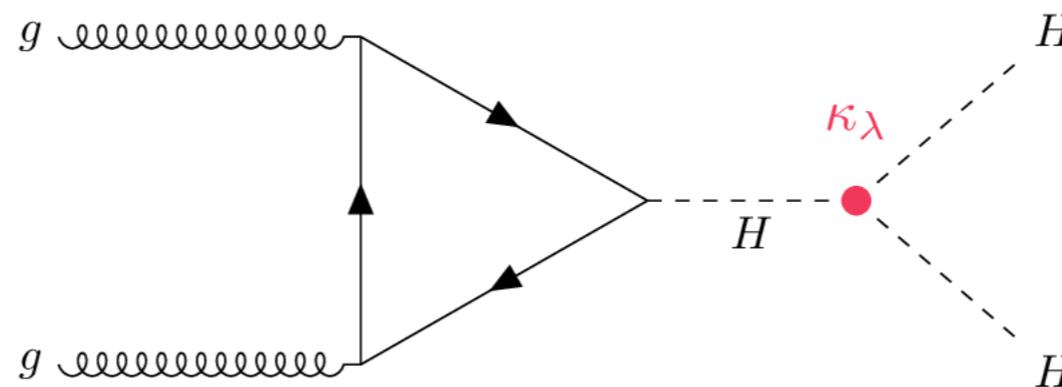
- 研究希格斯玻色子与粲夸克之间的相互作用目前主要是通过寻找  **$H \rightarrow c\bar{c}$**  衰变
- 利用LHC Run 2的数据， $H \rightarrow c\bar{c}$  信号量的上限分别为26 (ATLAS) 和70 (CMS) 倍的标准模型预言值
- 实验上亟需提高灵敏度，一个新方法是寻找 **Higgs+charm联合产生**



# 2.2 希格斯玻色子的 自耦合

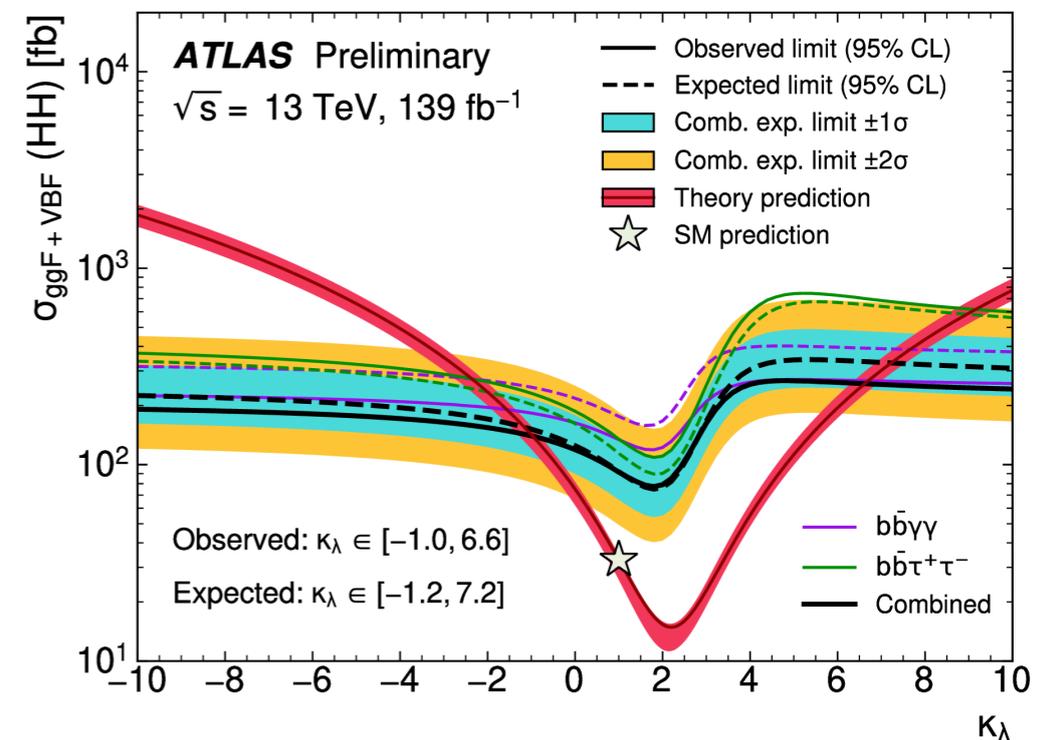
# 希格斯玻色子的自耦合

- **希格斯玻色子的自耦合是标准模型的一个最深刻的问题**，可能为发现超越模型新物理提供一个通道
- 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方法**
- 标准模型的双希格斯产生有极小的截面
- (单希格斯事例数: 双希格斯事例数=1000:1)
- 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



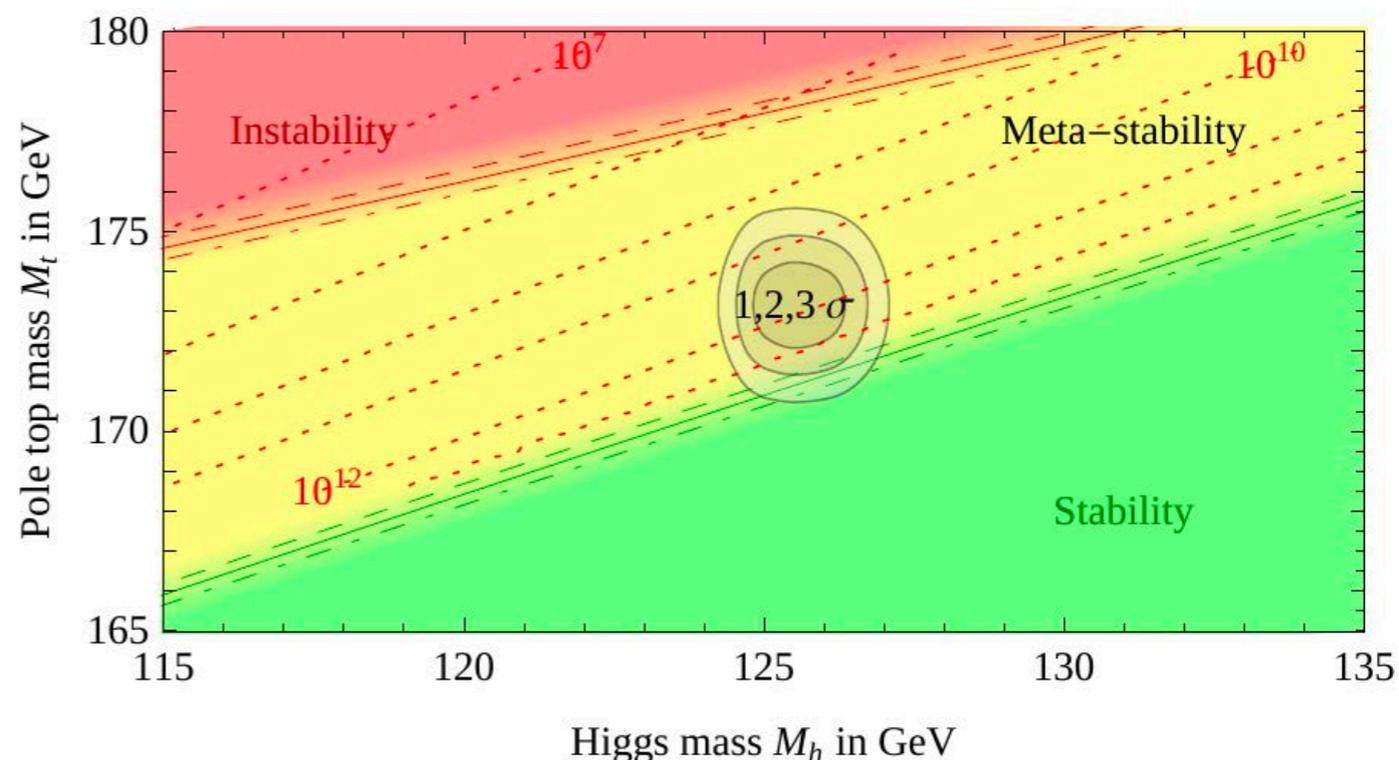
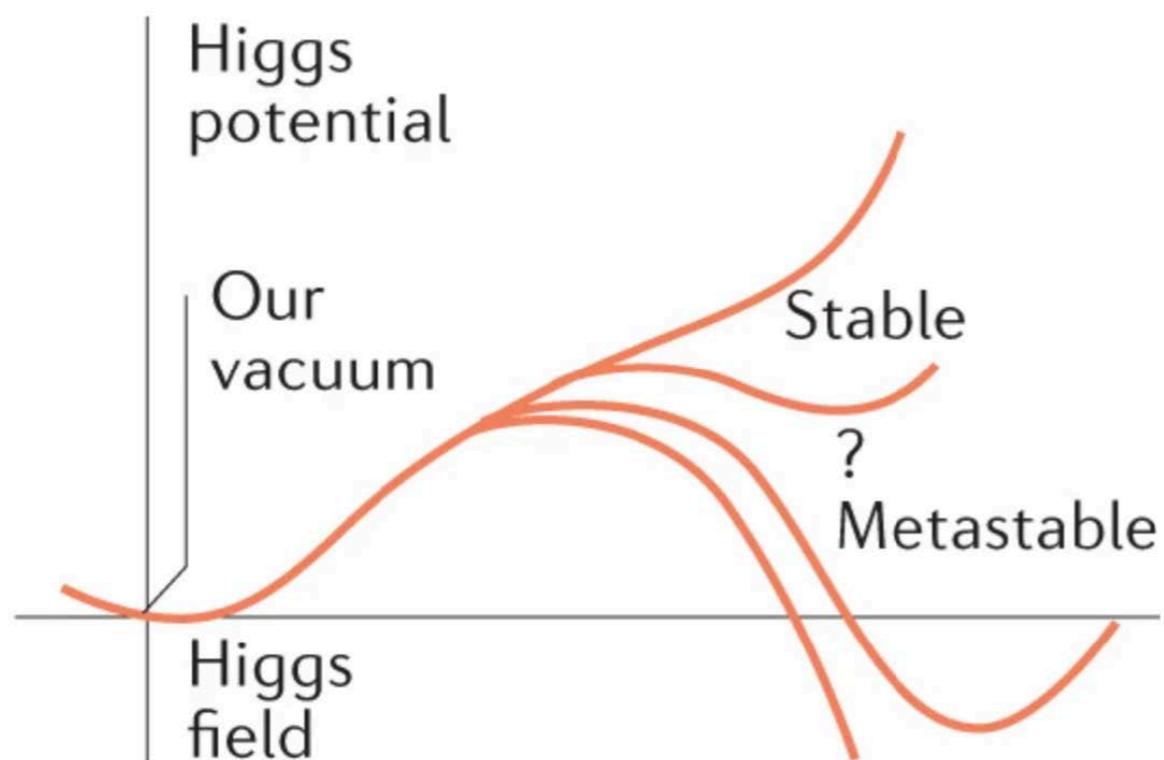
# 希格斯玻色子的自耦合

- 寻找双希格斯产生需要使用各种衰变渠道： $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ,  $HH \rightarrow bb\tau\tau$ ,  $HH \rightarrow bbbb$ , ...
- 合并分析给出希格斯玻色子自耦合强度的限制： $-1.0 < \kappa_\lambda < 6.6$
- 目前世界上最强的限制
- 向发现希格斯自耦合前进 (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 $5\sigma$ )



# Vacuum stability 真空稳定性

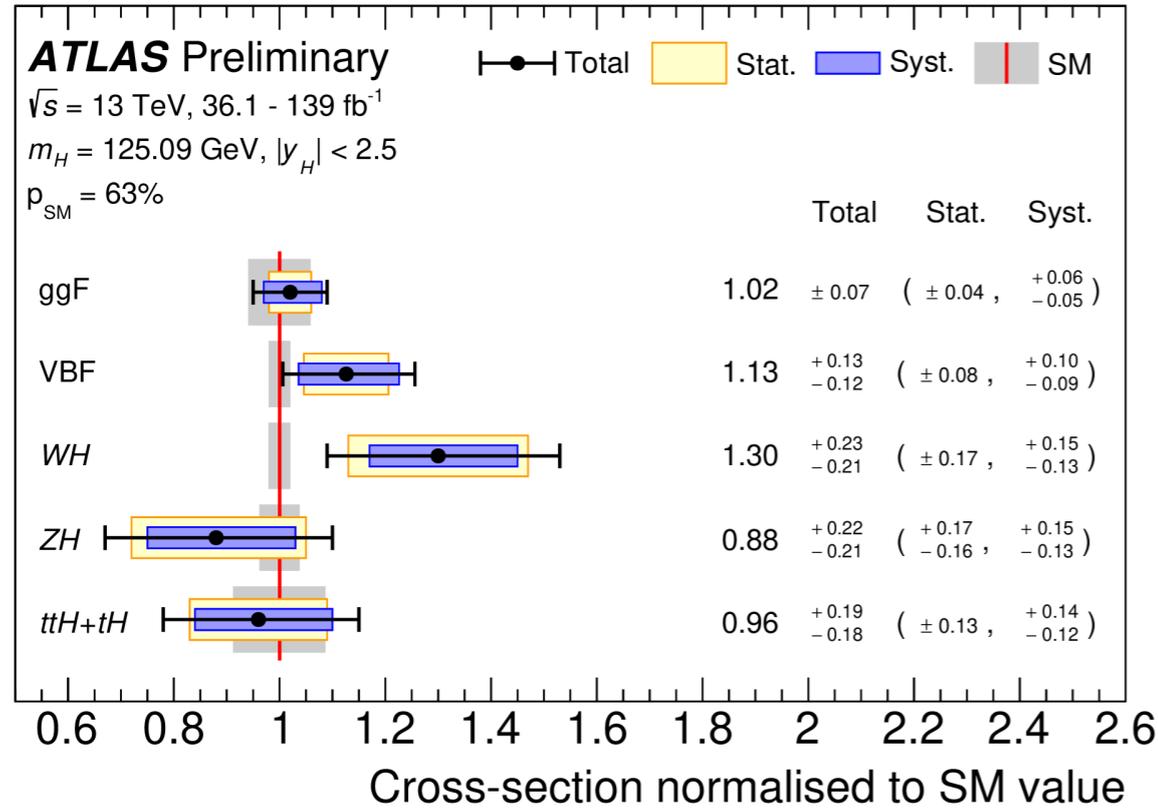
- 量子修正可以改变希格斯势能的形状，真空可能有第二个最小值
- 真空的稳定性取决于希格斯质量和顶夸克质量，标准模型的希格斯真空非常靠近“stable”和“metastable”的边界
- 这些可能暗示有关标准模型来源的一些深刻物理



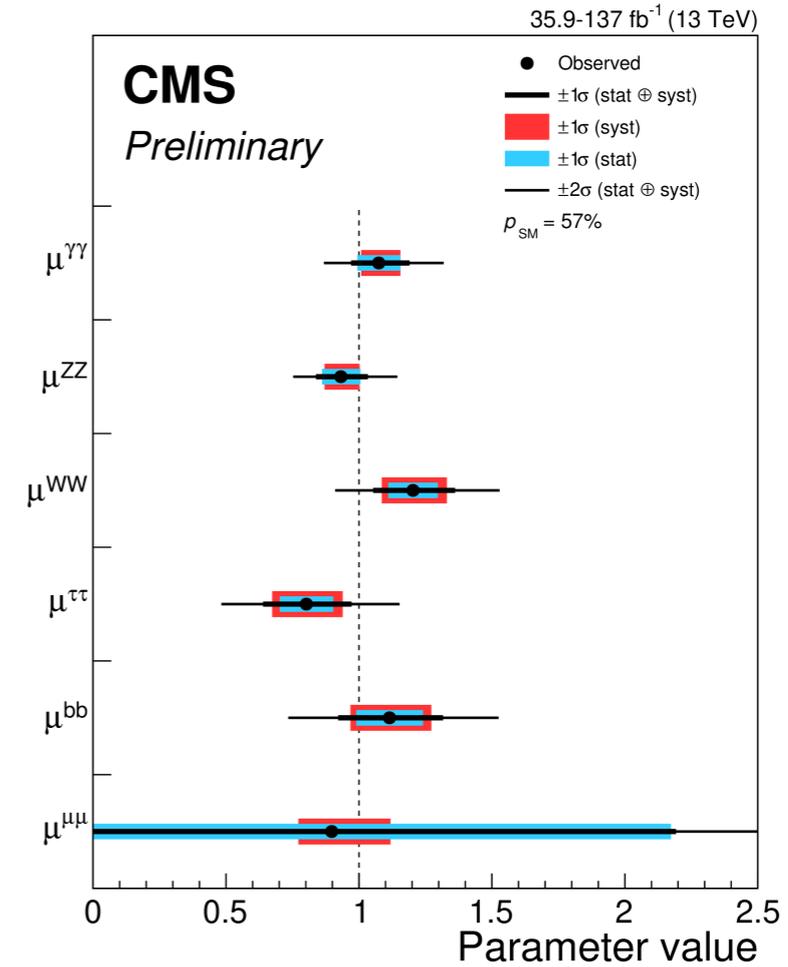
# 2.3 希格斯玻色子性质的其他测量结果

# 希格斯玻色子的产生和衰变率

## 产生截面



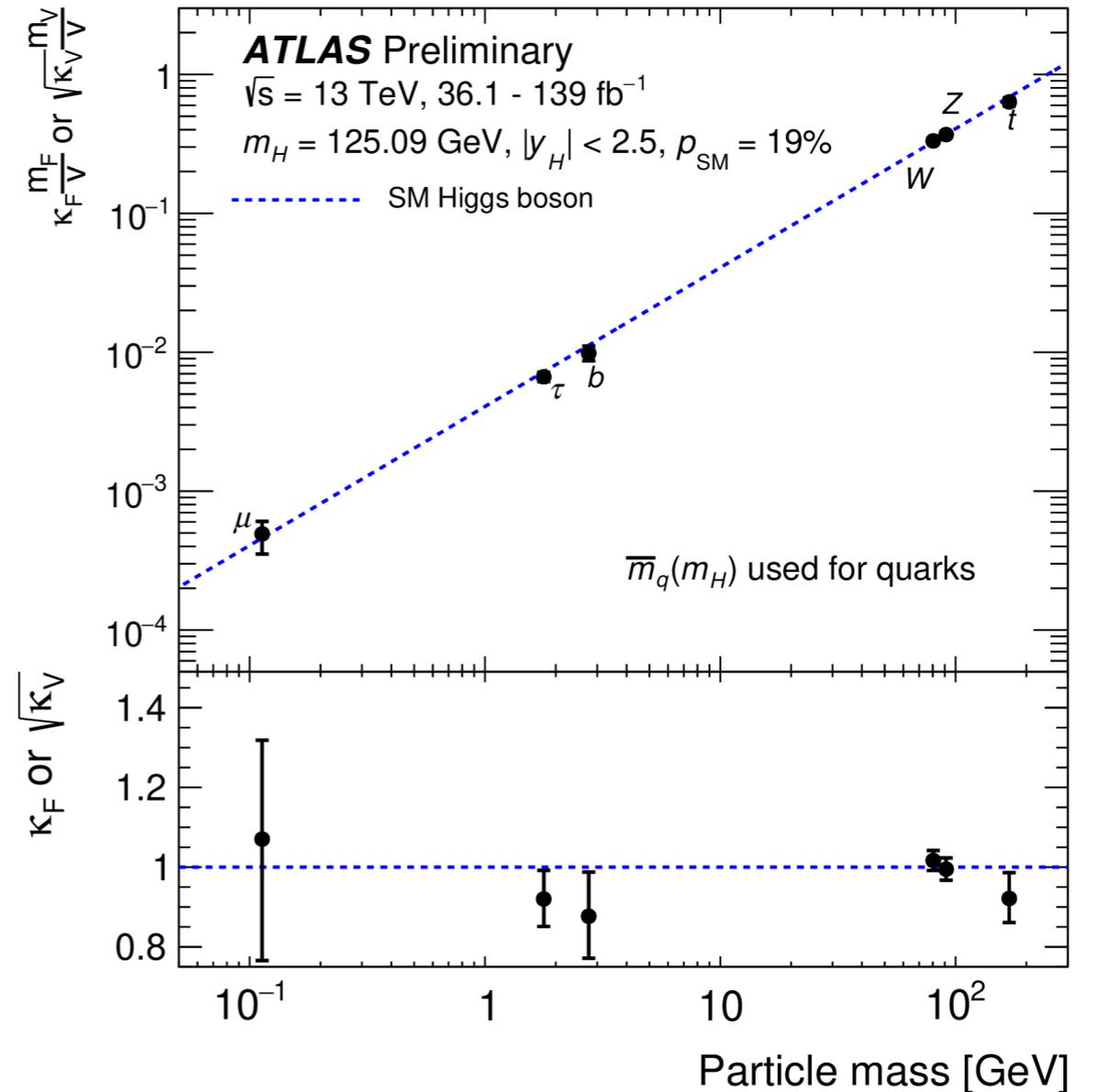
## 衰变分支比



- 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

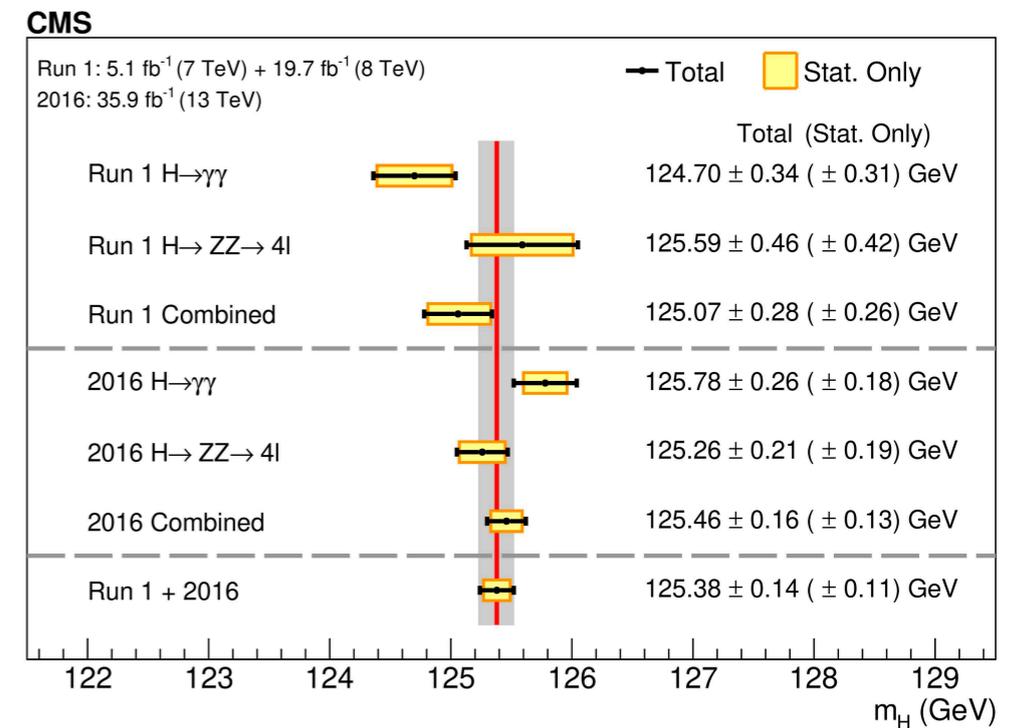
# 希格斯玻色子耦合强度

- 对Higgs与各基本粒子的耦合强度乘上kappa modifier (如  $\kappa_{\text{top}}$ ), 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



# 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:  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$
- **ATLAS+CMS Run 1:**  
 $125.09 \pm 0.24 \text{ GeV}$ 
  - 0.19% uncertainty
- **CMS Run 1+partial Run 2:**  
 $125.38 \pm 0.14 \text{ GeV}$ 
  - 0.11% uncertainty
- **ATLAS Run 1+partial Run 2:**  
 $124.97 \pm 0.24 \text{ GeV}$ 
  - 0.19% uncertainty



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

# 希格斯玻色子宽度与离壳产生

- **标准模型的希格斯玻色子宽度 4.1 MeV**

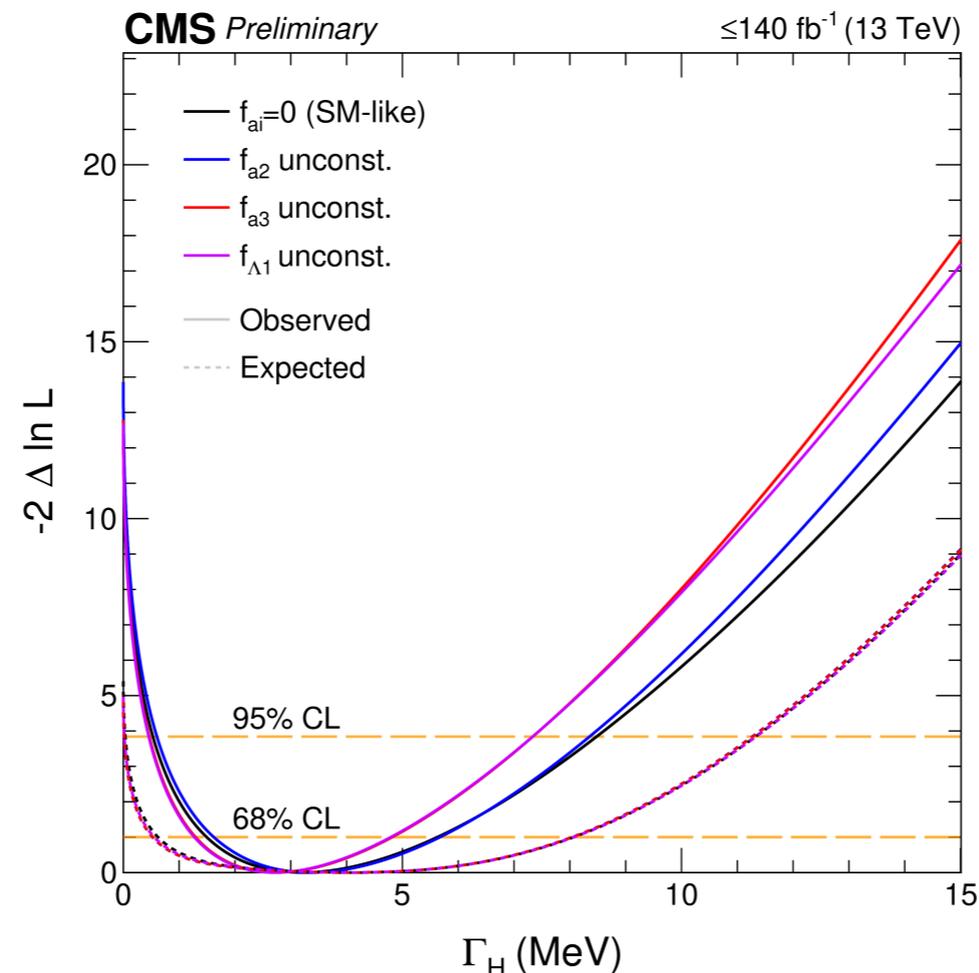
- 直接测量受限于探测器分辨率

- 可以通过在  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$  and  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2l2\nu$  分析道比较在壳与离壳的希格斯产生率来间接测量希格斯玻色子宽度

$$\Gamma_H = \frac{\mu_{off\ shell}}{\mu_{on\ shell}} \times \Gamma_H^{SM} \quad (\kappa_t^2 \kappa_V^2)_{on\ shell} = (\kappa_t^2 \kappa_V^2)_{off\ shell}$$

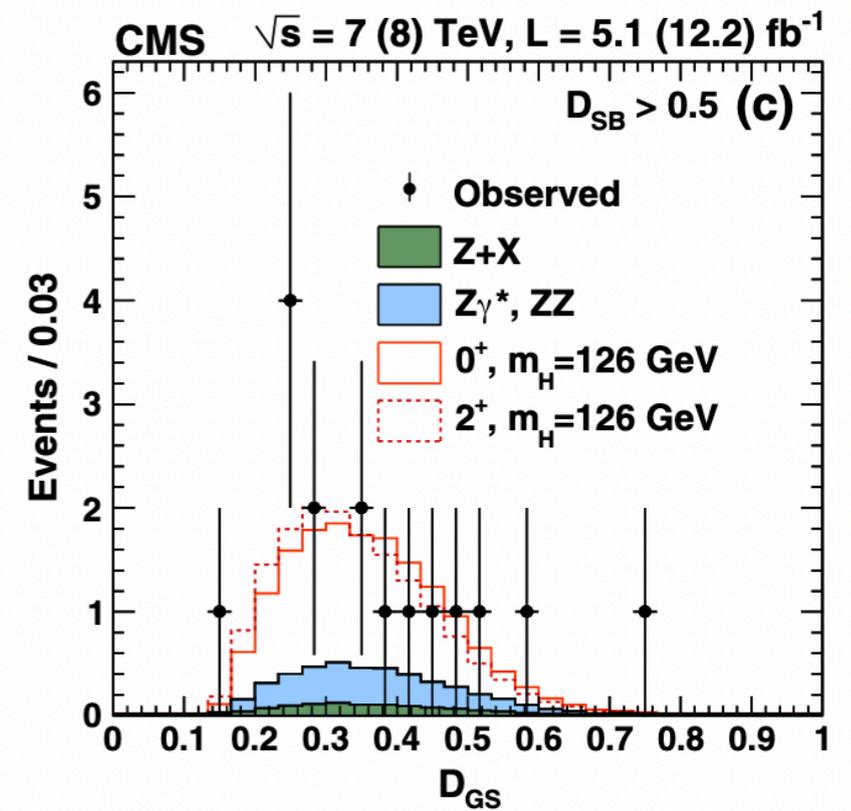
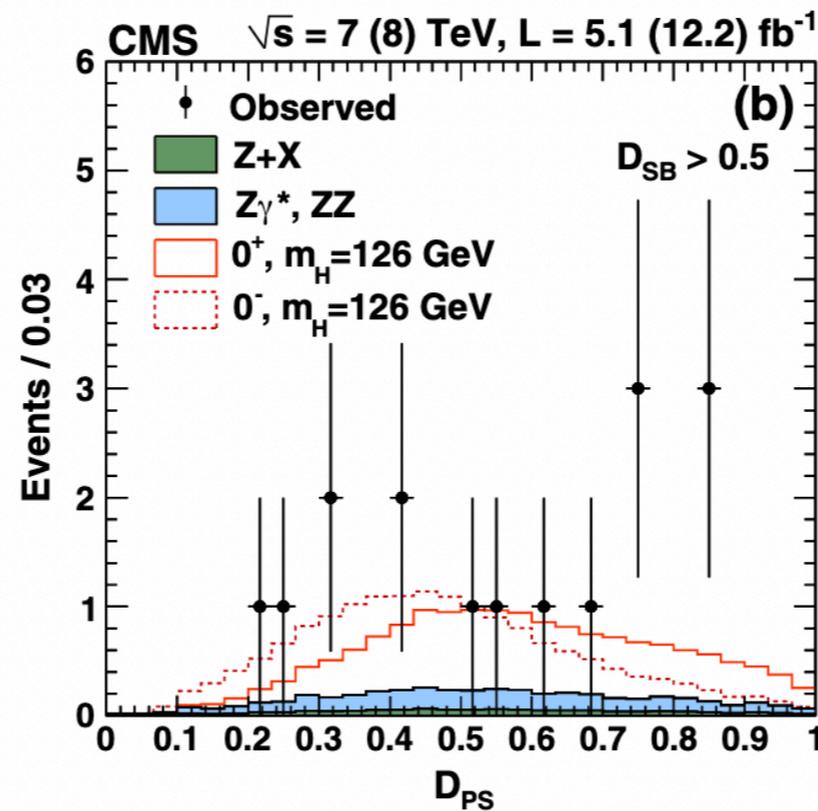
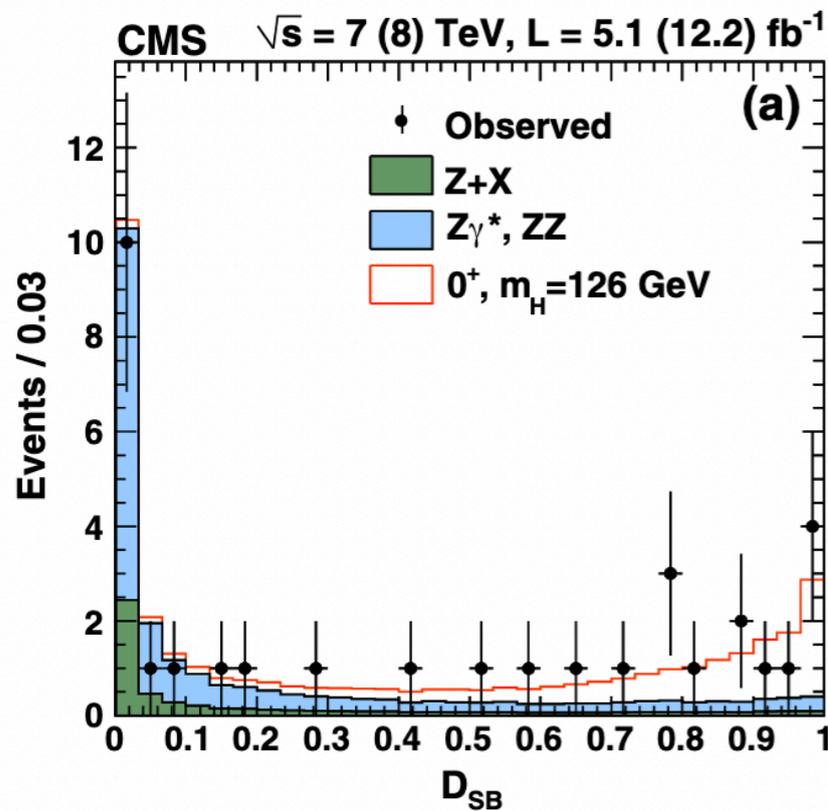
- **得到希格斯玻色子宽度:  $3.2^{+2.4}_{-1.7}$  MeV**

- **无离壳产生的情况以  $3.6\sigma$  被排除**



# 希格斯玻色子自旋与CP

- 标准模型的希格斯玻色子是矢量粒子: 自旋为0, CP为偶
  - C变换是电荷共轭变换 (将粒子变成反粒子), P变换是空间反演变换
- “The observed boson”在Run 1 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



# 2.4 希格斯玻色子与宇宙学

# 希格斯玻色子与宇宙学

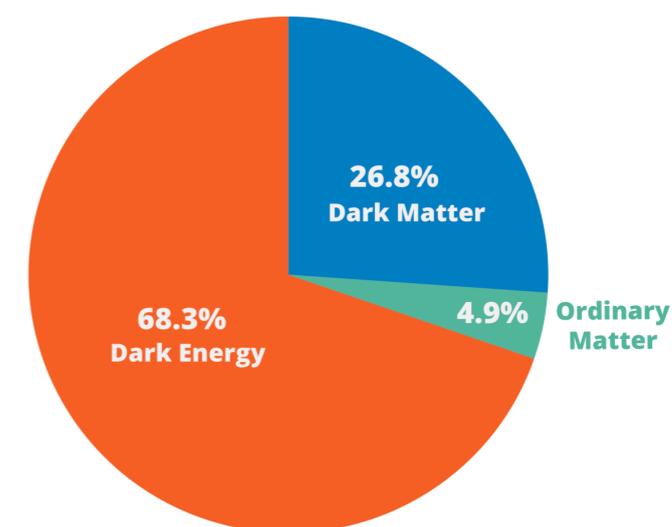


- 希格斯玻色子与我们对宇宙的理解有重要关系，包括：
  - 宇宙中物质-反物质不对称的起源
  - 原始膨胀
  - 暗能量的性质
  - 暗物质的性质

# 暗物质 @ LHC

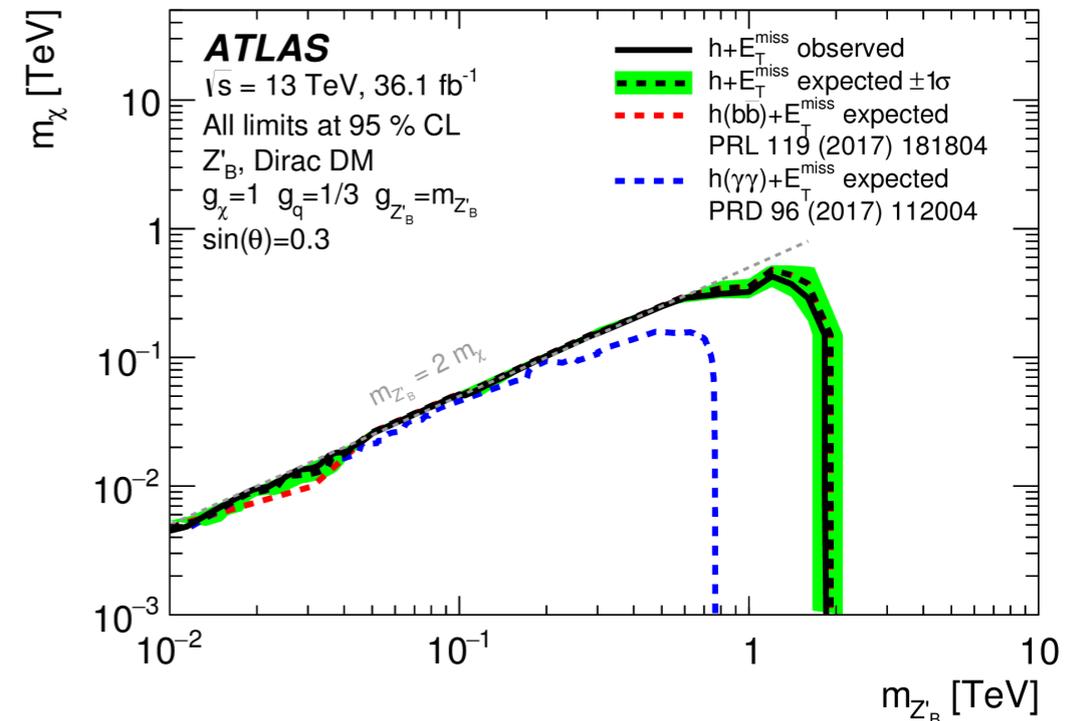
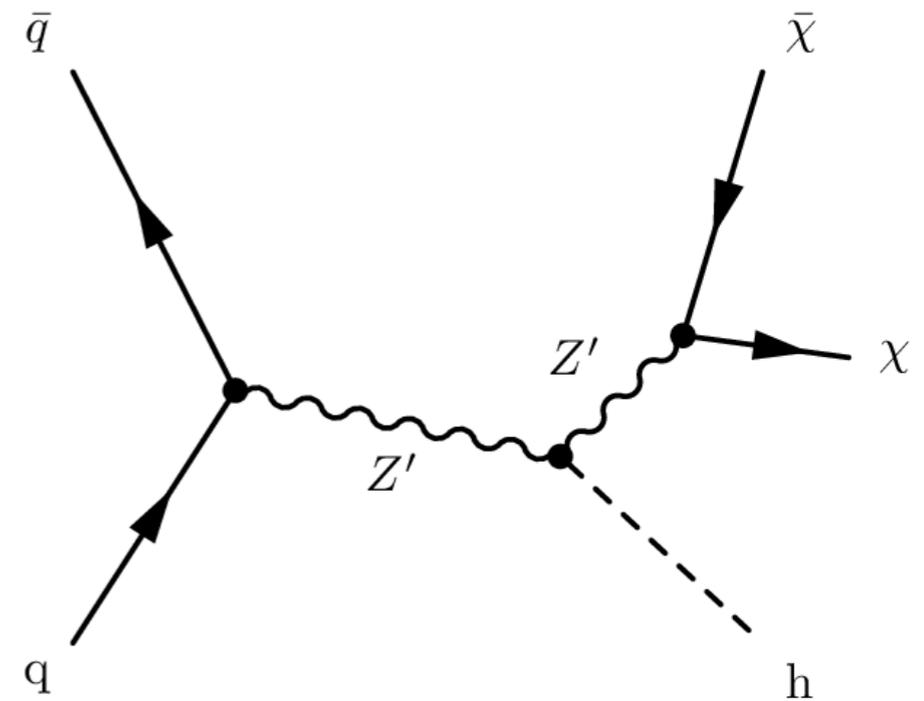
- 根据天体物理学测量，暗物质 (Dark Matter) 占了宇宙质量的大部分
  - 但暗物质的大部分性质仍然是未知的
- 如果暗物质与已知粒子有弱相互作用，则可能在LHC中产生
  - 暗物质对LHC的探测器不可见

Estimated matter-energy content of the Universe



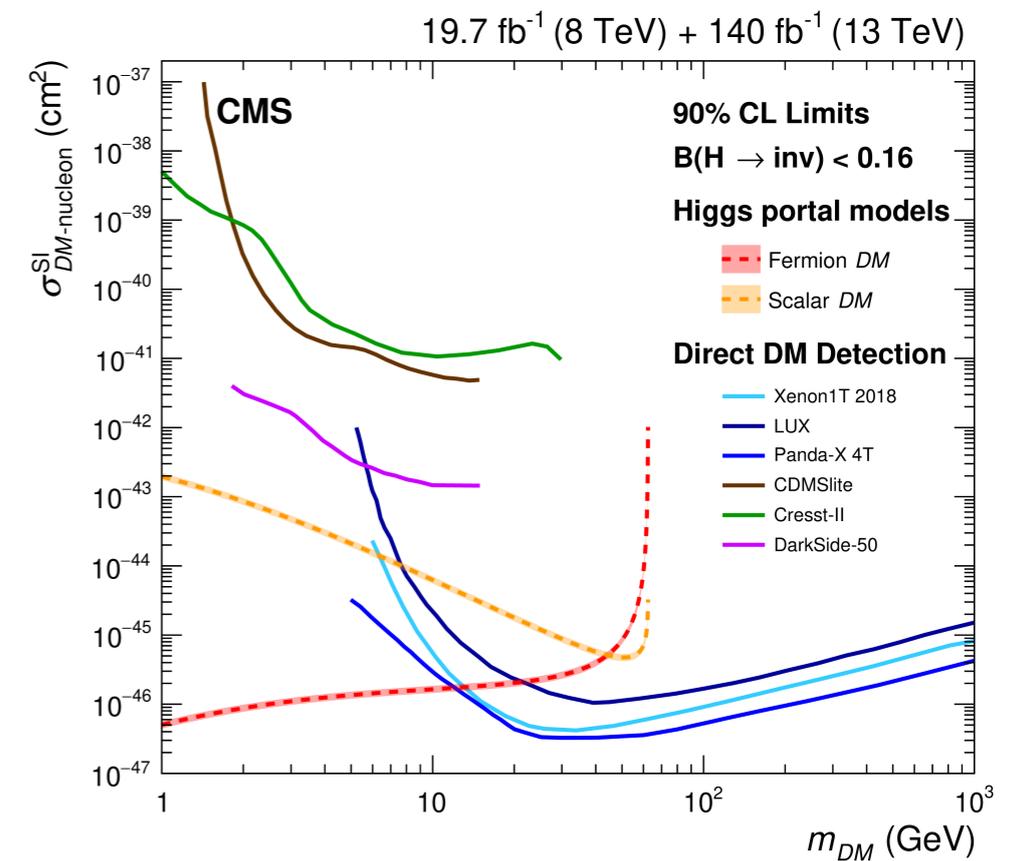
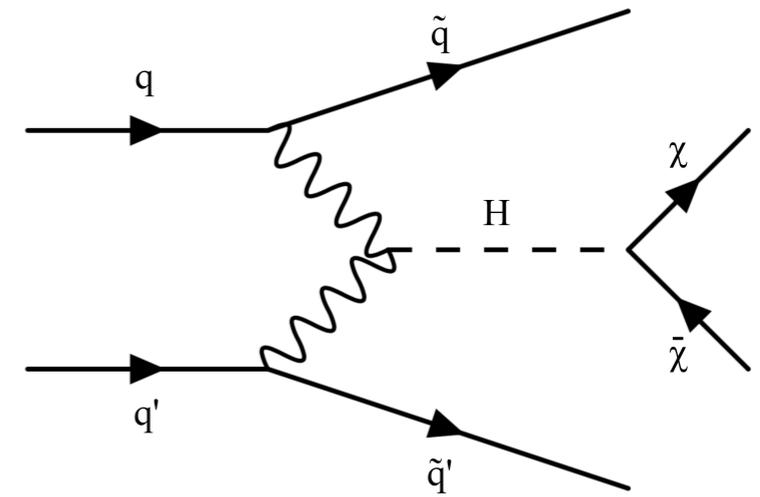
# 用mono-Higgs产生寻找暗物质

- 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



# 用Higgs→invisible衰变寻找暗物质

- Higgs→invisible 衰变被希格斯门户模型所预言，其中暗物质通过希格斯与已知粒子相互作用
- Higgs→invisible 衰变分支比结果
  - BR<0.11 (ATLAS)
  - BR<0.17 (CMS)
- 结果可以被转化为希格斯门户模型中暗物质粒子-核子的散射截面上限



# 3. 量子机器学习在LHC 物理分析中的应用

# 机器学习 (machine learning)

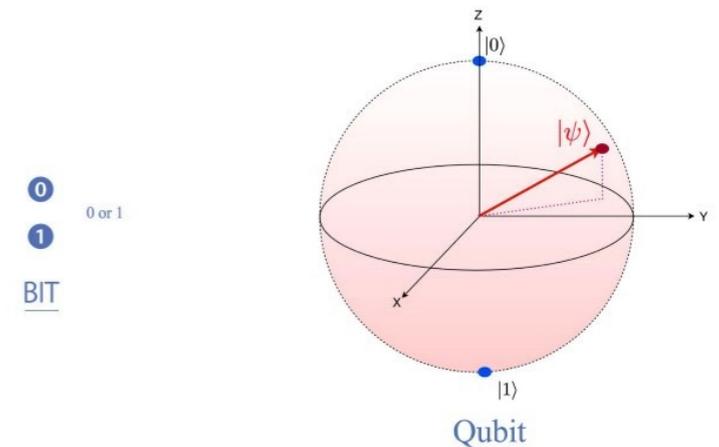
---

- **机器学习 (machine learning)**
  - “能通过经验自动改进的计算机算法”
  - 已经在LHC的事例模拟、粒子重建和数据分析（包括希格斯物理研究）中获得了广泛成功，显著提高了LHC实验发现新物理的能力。
  - 然而，HL-LHC将产生前所未有的大量数据，而使用机器学习处理这些数据将需要大量计算资源。

# 量子机器学习 (quantum machine learning)

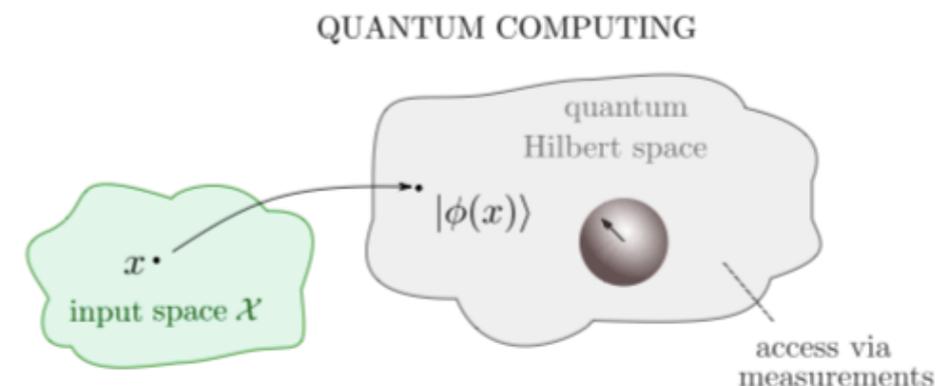
- 量子计算(quantum computing):

- 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



- 量子机器学习 (quantum machine learning)

- 机器学习与量子计算的交叉点
- 把经典数据映射到高维度的量子态空间，再进行处理与测量
- 量子机器学习可能成为传统机器学习的一种有价值的替代

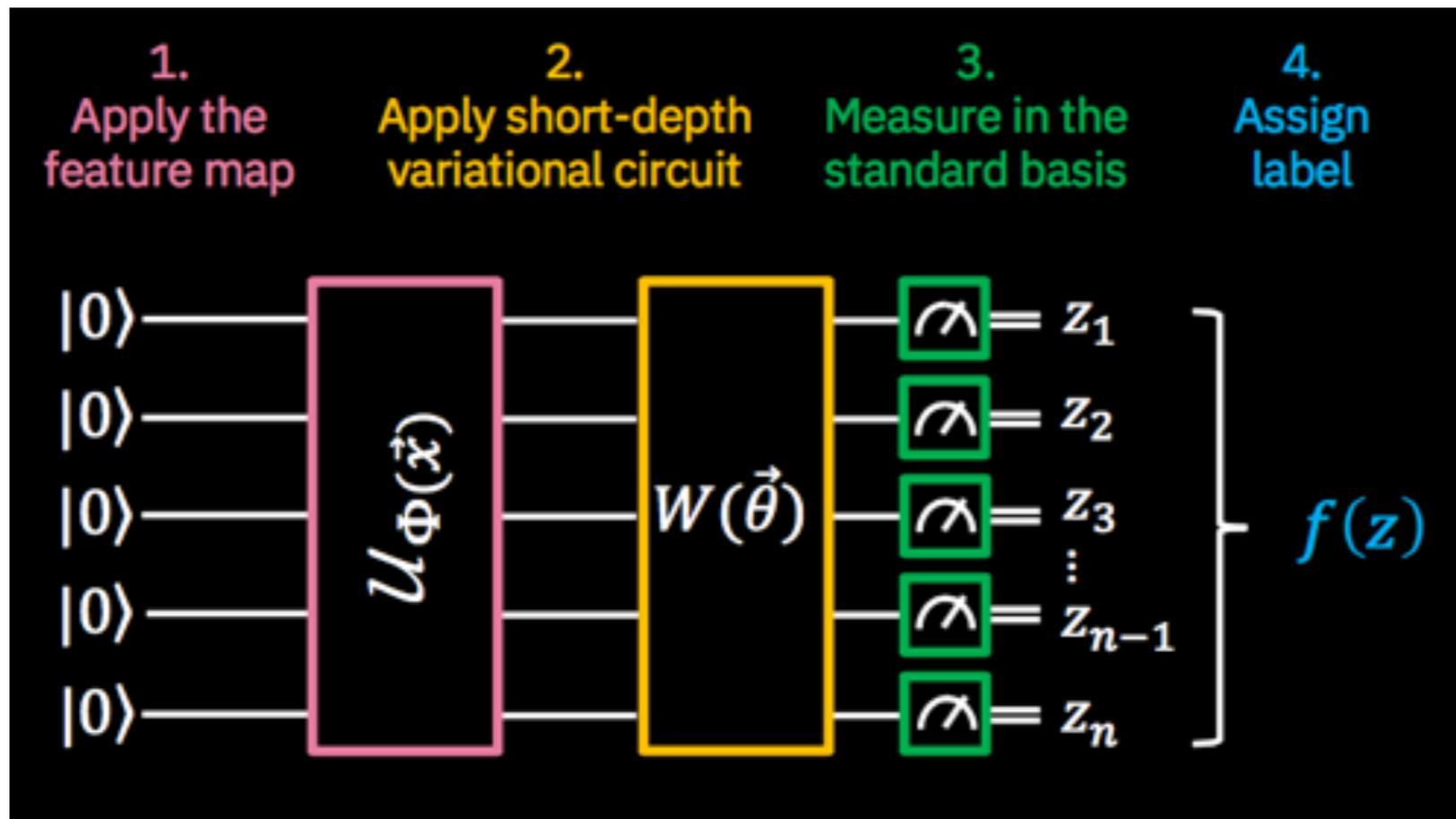


# 在高能物理分析中应用量子机器学习

- 我参与跨学科合作组织，在高能物理分析中应用量子机器学习算法  
(Variational Quantum Classifier, Quantum SVM Kernel, Quantum Neural Network)
  - 使用门模型(gate-model)量子计算机 (IBM, Google, 本源)
- 目标: 研究量子计算是否可能成为未来高能物理研究的大数据处理的重要计算工具

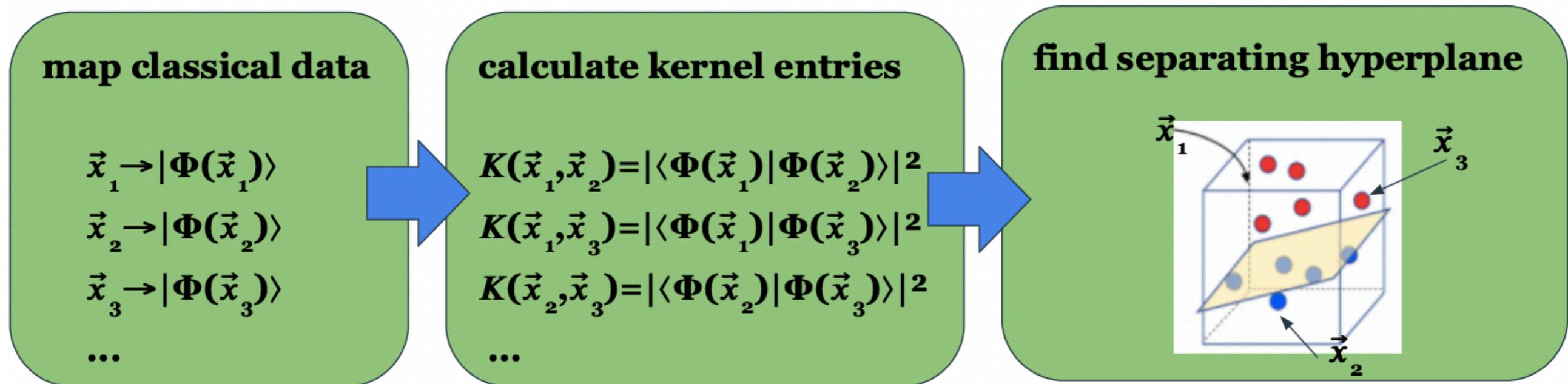


# Variational Quantum Classifier算法



- 在训练 (training) 阶段, 使用训练事例样本优化量子线路 $W(\theta)$ 来重现正确的事例分类
- 在测试 (test) 阶段, 使用优化后的 $W(\theta)$ 对测试事例样本进行事例分类

# Quantum SVM Kernel 算法

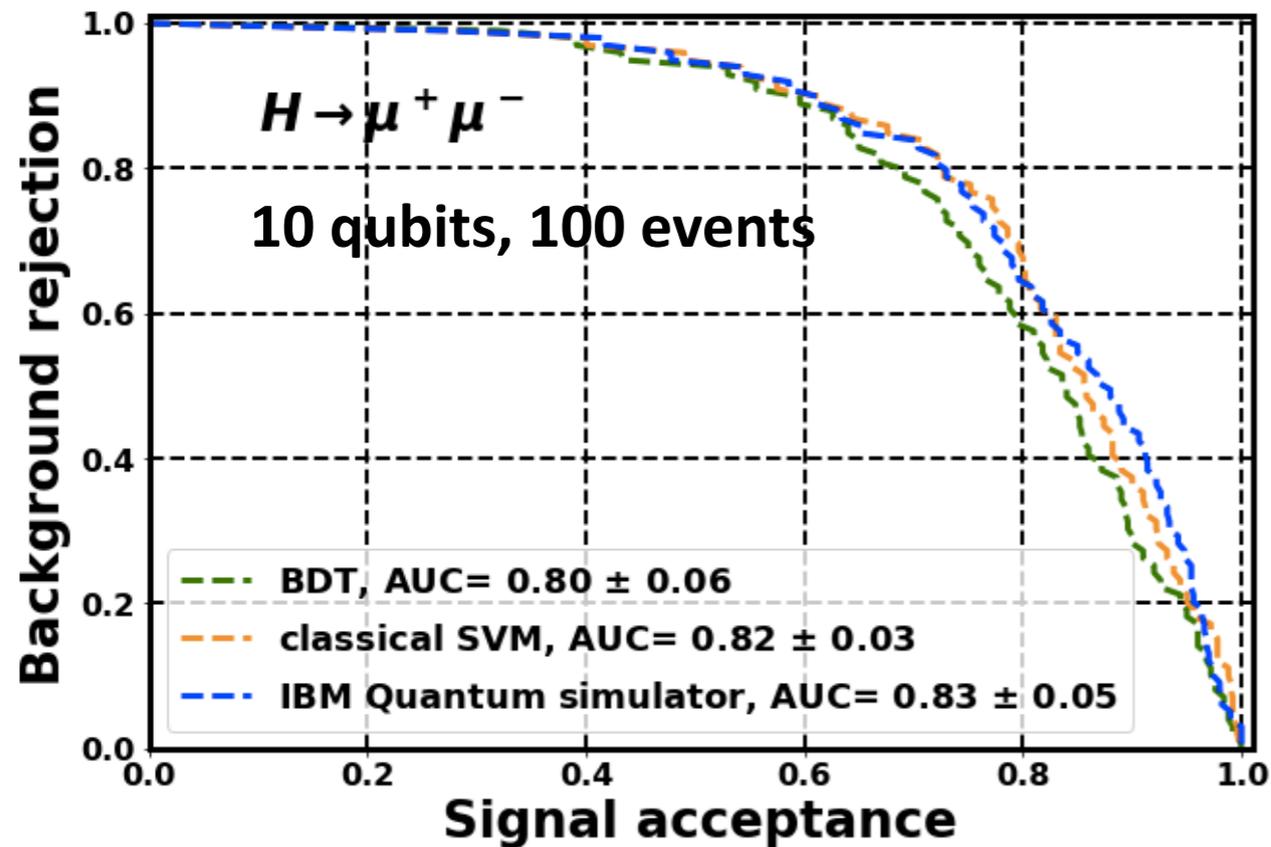


- 在训练 (training) 阶段, 计算两个训练事例间的kernel entry, 优化区分信号和本底的hyperplane
- 在测试 (test) 阶段, 计算测试事例和每个训练事例间的kernel entry, 使用优化后的hyperplane进行事例分类

# 在量子计算机模拟器上使用量子机器学习算法

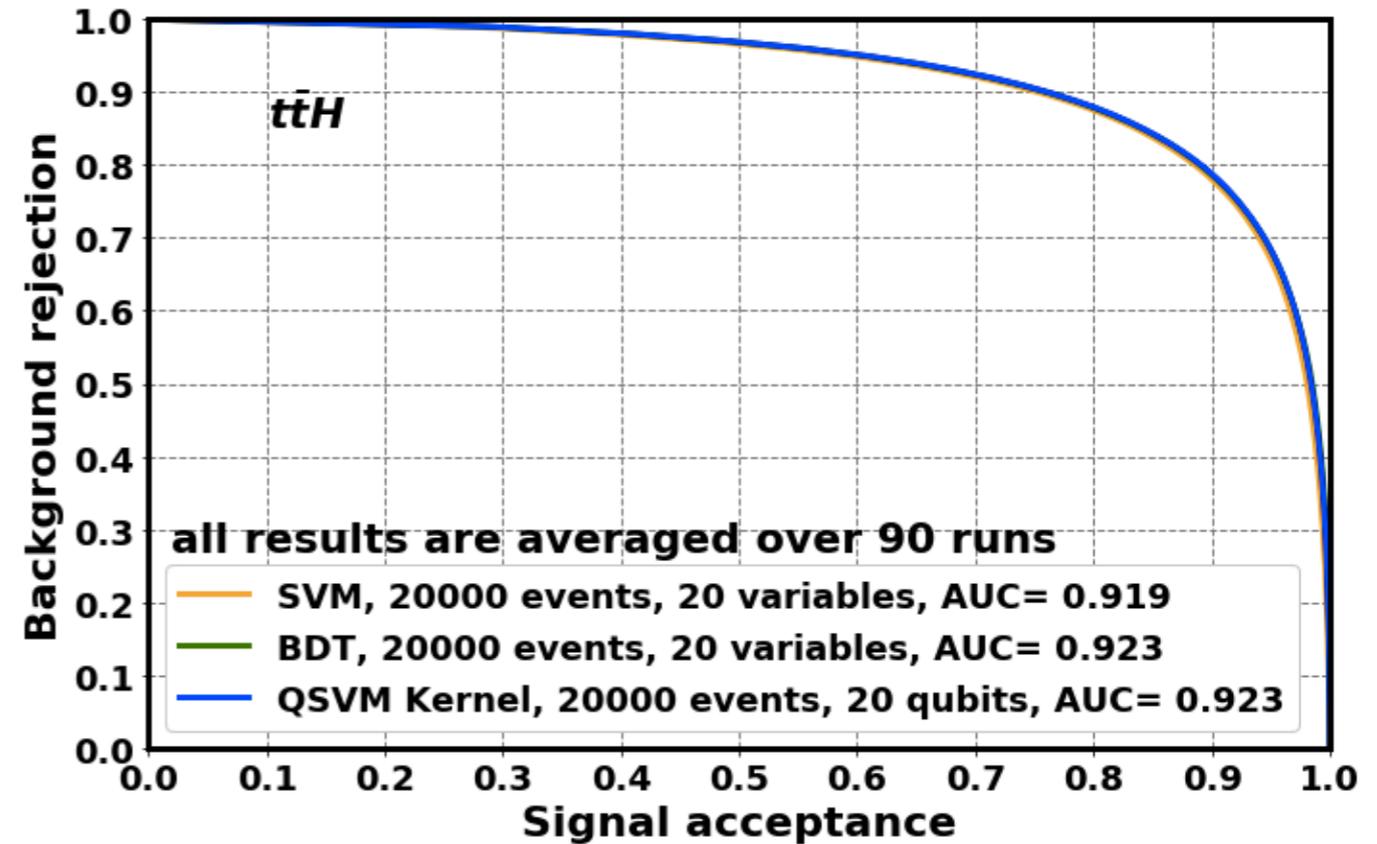
$H \rightarrow \mu\mu$ 分析

Variational Quantum Classifier 算法



$t\bar{t}H$ 分析

Quantum SVM Kernel 算法

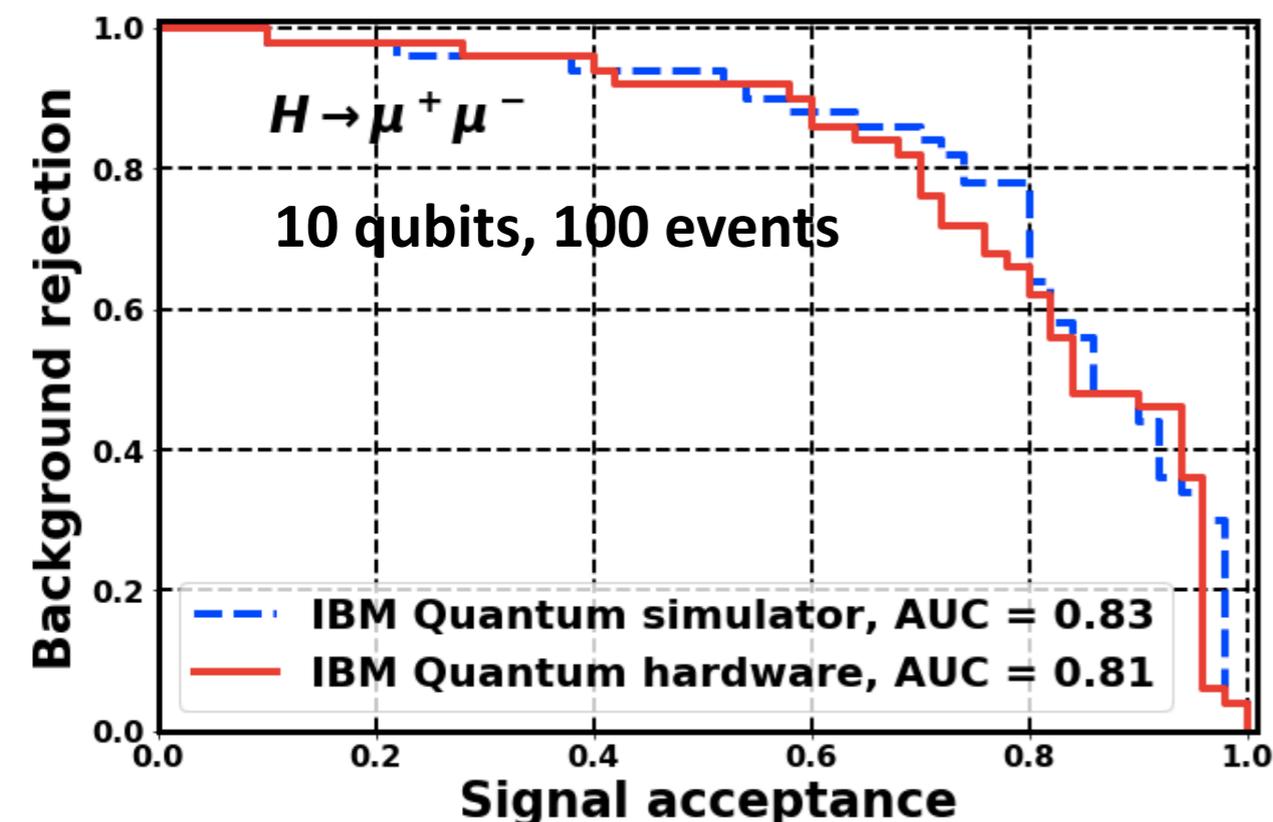


- 在量子计算机模拟器上，量子机器学习算法目前得到与传统机器学习算法相似的识别能力
- 模拟器使用传统计算机模拟量子计算，使用较多的qubit比较困难

# 在量子计算机硬件上使用量子机器学习算法

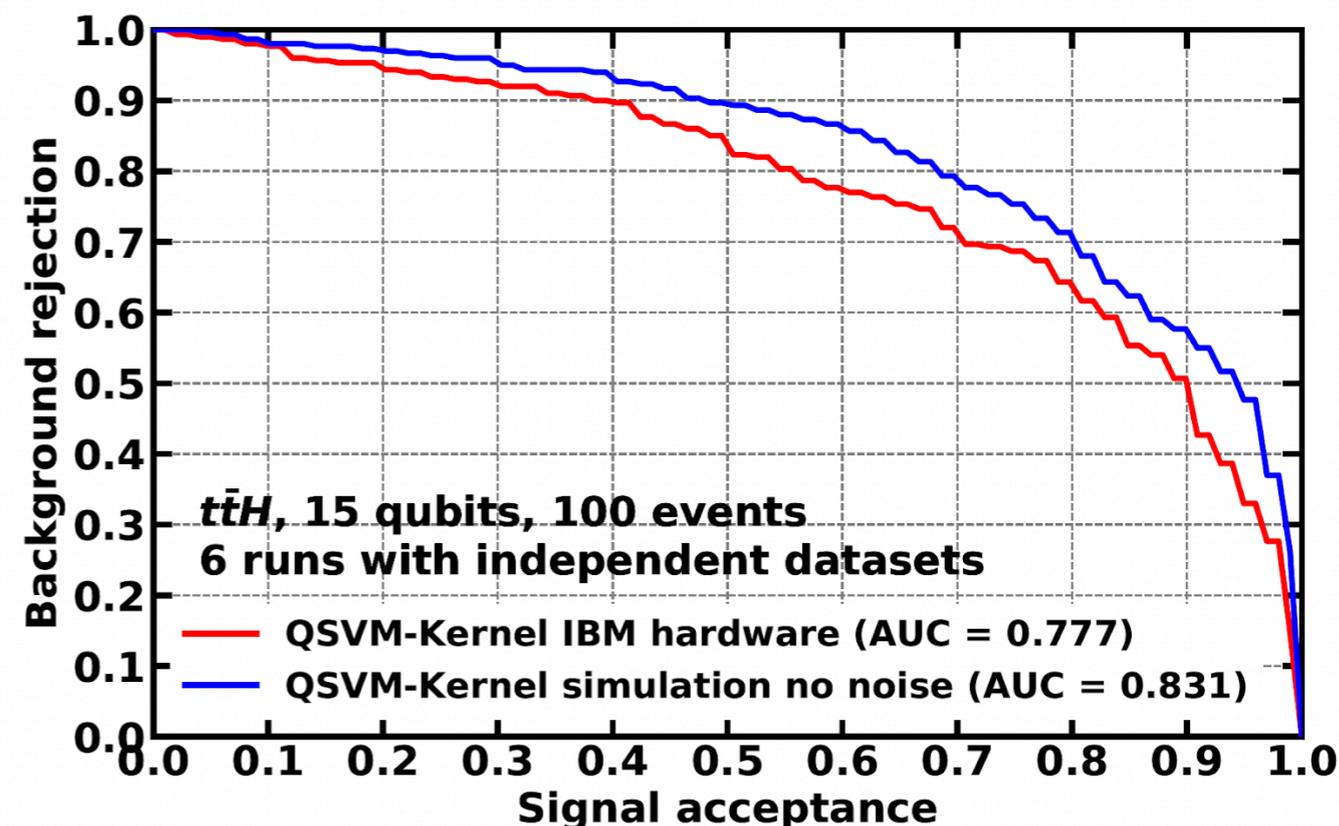
$H \rightarrow \mu\mu$ 分析

Variational Quantum Classifier 算法



$t\bar{t}H$ 分析

Quantum SVM Kernel 算法



- 在量子计算机硬件上，量子机器学习算法显示出的识别能力接近量子计算机模拟器（存在的差别可能是由于仪器的噪音）
- 目前的硬件上，使用较大的数据量还比较困难

# 在LHC物理分析中应用量子机器学习

- 我们的结果表明，门模型量子计算机上的量子机器学习具有区分实际物理数据中的信号和本底的能力
- 未来发展:
  - 未来10-20年，基于巨大的投资和激烈的竞争，量子计算机很可能进一步增大量子比特数、改善运算时间、并降低仪器噪音
  - 希望会看到量子机器学习提供优于传统机器学习的表现，特别是当使用更多的qubit和更大的数据量时。此外，未来的量子计算机可能会给予量子机器学习速度上的优势，这种优势对高能物理会非常重要
  - 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

# 总结

---

- LHC上的ATLAS和CMS实验发现了希格斯玻色子，并研究希格斯玻色子的性质
- 量子机器学习可能成为高能物理研究的重要工具
- 希格斯物理研究和量子计算应用：拥有充满机遇的未来

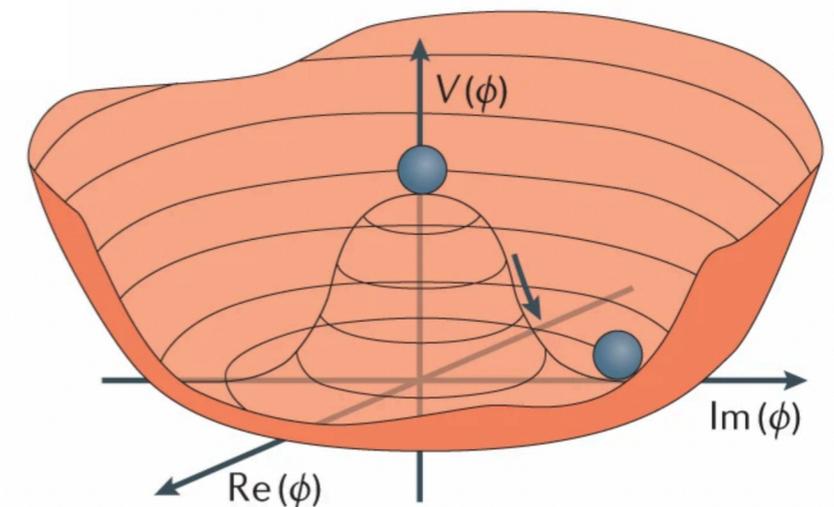
谢谢!

# SM Higgs Sector

$$\mathcal{L}_\phi = (D^\mu \phi)^\dagger (D_\mu \phi) - \sum_f g_f (\bar{\psi}_L \phi \psi_R + \text{h.c.}) - V(\phi)$$

- **W and Z masses** determined from gauge couplings and Higgs vev
- **Fermion masses** from Yukawa couplings
  - ★ Not needed for EWSB, but convenient
  - ★ Only interaction in the SM that distinguishes between generations

$$V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$$

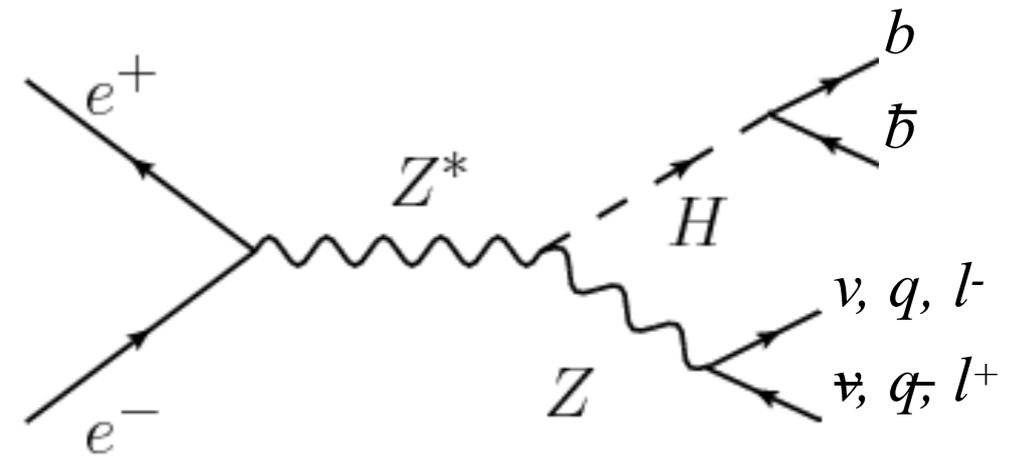


## 希格斯寻找的首批实验结果 (80年代末-90年代初)

- ① **Cornell Electron Storage Ring**上的**CUSB**实验使用 $\Upsilon \rightarrow H + \gamma$ 寻找希格斯粒子，在90%置信水平下排除希格斯质量区间  $211 \text{ MeV} < m_H < 5 \text{ GeV}$  (1989)  
*Proceedings of ICHEP 1988*
- ② **Paul Scherrer Inst. proton cyclotron**上的**SINDRUM**实验使用 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + H$ ,  $H \rightarrow e^+ e^-$ 寻找希格斯粒子，在90%置信水平下排除希格斯质量区间  $10 \text{ MeV} < m_H < 110 \text{ MeV}$  (1989)  
*Measurement of the decay  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e e^+ e^-$  and search for a light Higgs boson, [Phys. Lett. B 222, 533](#)*
- ③ **Cornell Electron Storage Ring**上的**CLEO**实验使用 $B \rightarrow K + H^0$ ,  $H^0 \rightarrow \text{pair of muons, pions or kaons}$ 寻找希格斯粒子，在90%置信水平下排除希格斯质量区间  $0.2 \text{ GeV} < m_H < 3.6 \text{ GeV}$  (1990)  
*Search for a neutral Higgs boson in B-meson decay [Phys. Rev. D. 40, 712](#)*

# LEP (1989-2000) 希格斯寻找

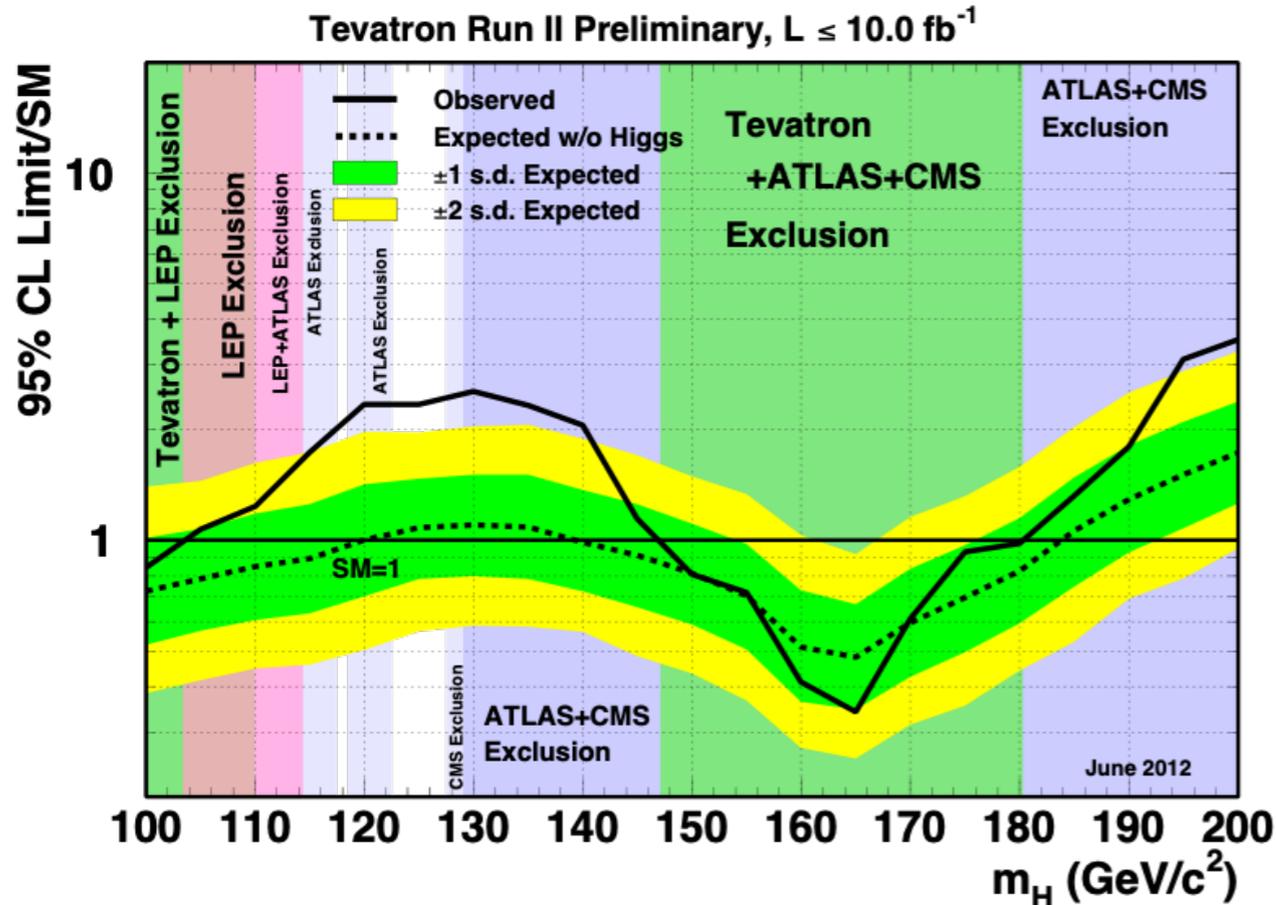
- **LEP-2** 进行正负电子对撞，质心系质量最高达到 **209 GeV**
- 寻找标准模型希格斯粒子：  
 $e^+e^- \rightarrow ZH$ , with  $Z \rightarrow qq/\ell\ell/\nu\nu$ ,  $H \rightarrow bb$



- 结合 **ALEPH**、**DELPHI**、**L3**和**OPAL**四个**LEP**实验的最终结果，在95%置信水平下，得到标准模型希格斯玻色子的质量下限为 **114.4 GeV/c<sup>2</sup>**
- Search for the Standard Model Higgs boson at LEP, [Phys. Lett. B 565 \(2003\) 61-75](#)

# Tevatron (1983-2011) 希格斯寻找

- Tevatron Run-2 进行1.96 TeV的质子-反质子对撞



- 排除 $m_H$ 区间: 100-103, 147-180 GeV
- $115 < m_H < 140$  GeV 有超出;  
@120 GeV:  $p = 1.5 \times 10^{-3}$  ( $3.0\sigma$ )
- [FERMILAB-CONF-12-318-E](#) (2012年7月)

- 寻找标准模型希格斯粒子:

Production:  $q\bar{q} \rightarrow W/Z H$ ,  $gg \rightarrow H$ ,  $q\bar{q} \rightarrow q'q'H$  (VBF)

Decay:  $H \rightarrow b\bar{b}$ ,  $H \rightarrow W^+W^-$ ,  $H \rightarrow ZZ$ ,  $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$

# 希格斯耦合性质的联合测量

	ggF	VBF	VH	ttH+tH
H→γγ	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )
H→ZZ	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (137 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (137 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (137 fb <sup>-1</sup> )	
H→WW	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (36 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (36 fb <sup>-1</sup> )	✓ (36 fb <sup>-1</sup> )	✓ (36-139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77-139 fb <sup>-1</sup> )
H→ττ	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	
H→bb	✓ (36 fb <sup>-1</sup> )	✓ (126 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (77 fb <sup>-1</sup> )
H→μμ	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (36 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> ) ✓ (36 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> )	✓ (139 fb <sup>-1</sup> )
H→Zγ	✓ (139 fb <sup>-1</sup> )			
H→invisible		✓ (139 fb <sup>-1</sup> )		

✓: channel included in the ATLAS combination  
 ✓: channel included in the CMS combination