

# ヒッグス物理の最前線

奥村恭幸

素粒子物理国際研究センター

# ヒッグス粒子

- 宇宙の自発的対称性の破れの機構を担う。
  - ビッグバン後、 $10^{-12}$ 秒後に宇宙EWオーダーまで冷えたときに相転移を起こして凍った。
  - 対称で美しくもつまらない宇宙から、対称性は破れたが多彩な面白い宇宙になった（私感）。
  - （すごく面白い話なので、また入学後に。）

## 素粒子の質量の起源。

- ヒッグス場と素粒子の結合によって質量を獲得する。

## 唯一のスカラー粒子。

## 125 GeV の質量を持つ。

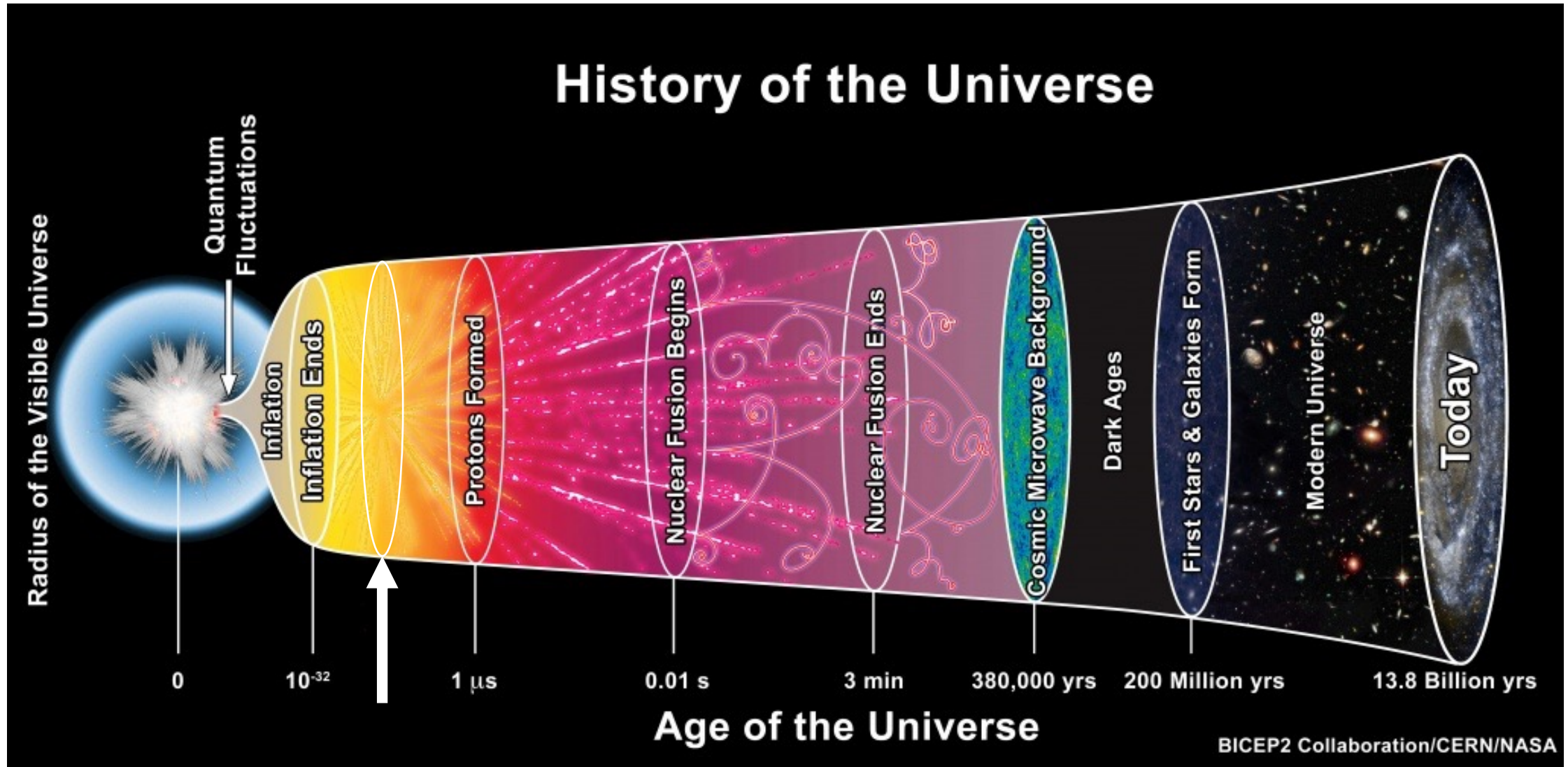
- 実験により確定（事前には予測できないパラメタ）

$$m_H = 125.11 \pm 0.09 \text{ (stat.)} \pm 0.06 \text{ (syst.)}$$

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

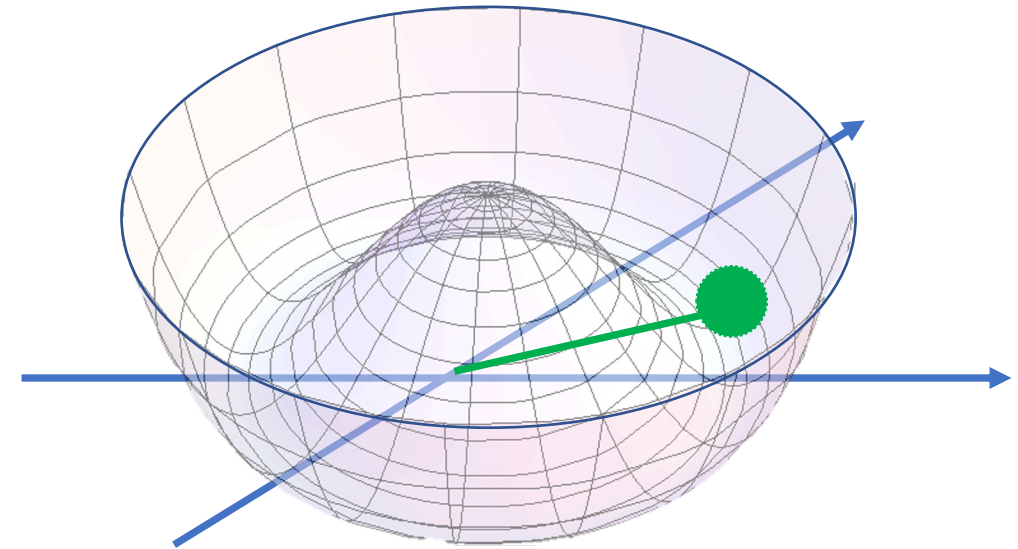
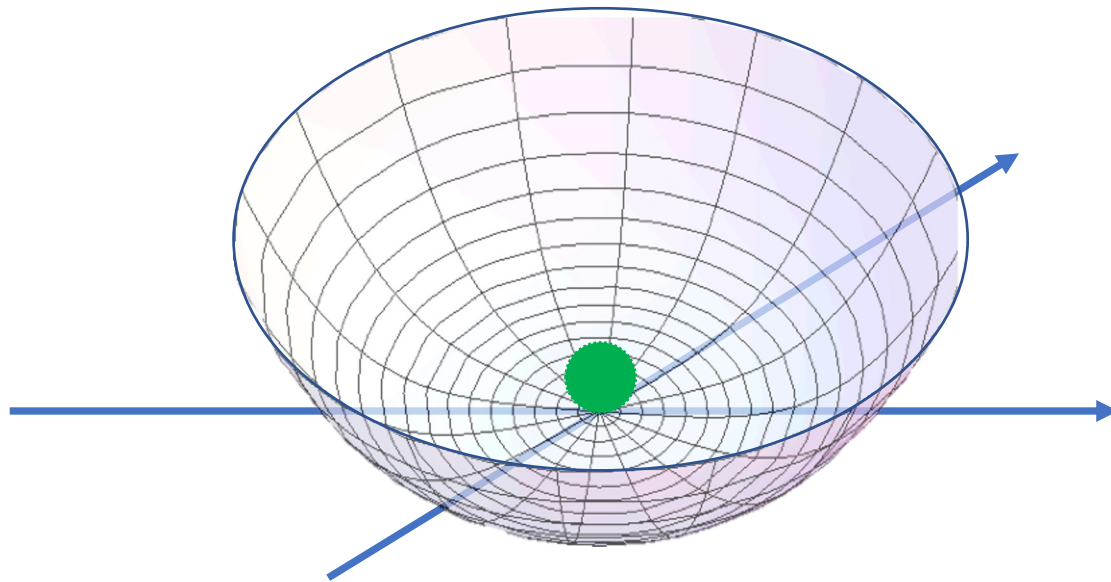
QUARKS (I, II, III)  
 LEPTONS (e,  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ )  
 GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (g,  $\gamma$ , Z, W)  
 SCALAR BOSONS (H)



## • ヒッグス場の自由エネルギー

- 自己相互作用( $\phi^4$ )を導入
- “ $-\mu^2$ ”が宇宙が冷えるに従って正から負になる
  - いわゆる“走る結合定数”

$$V(\phi) = -\frac{\mu^2}{2}\phi^2 + \frac{\lambda}{4}\phi^4$$



Expanding about minimum:  $V(\phi) \rightarrow V(v+h)$

$$V = V_0 + \frac{1}{2}m_h^2 h^2 + \frac{m_h^2}{2v^2} v h^3 + \frac{1}{4} \frac{m_h^2}{2v^2} h^4$$

Higgs mass term

$\lambda_{hhh}$

HH-production

$\lambda_{4h}$

HHH-production

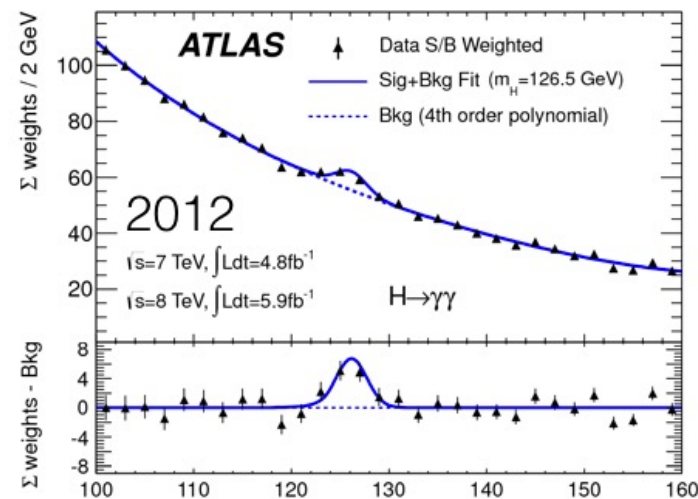
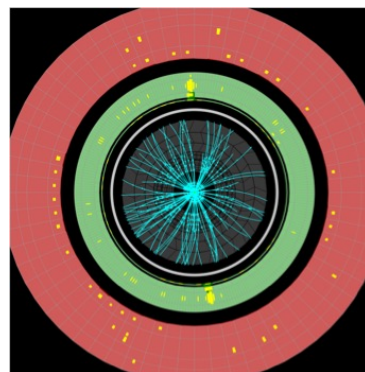
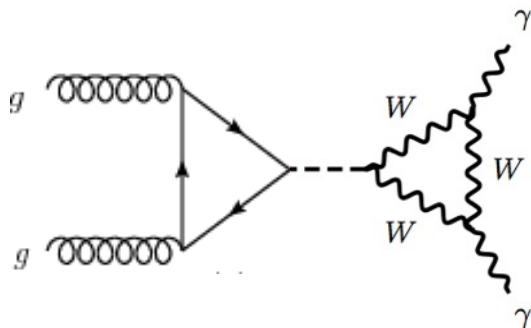
# ヒッグス粒子の発見に学ぶ

## • LHC 実験におけるヒッグス粒子の発見

標準模型を使った  
精密な理論予想

候補イベントの収集

ヒッグス粒子の発見



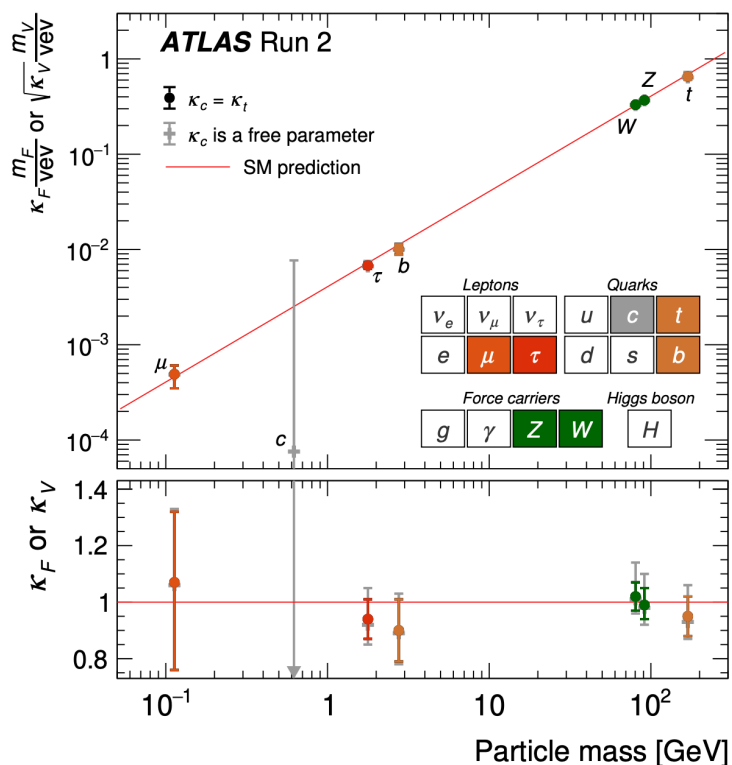
発見前から「ふるまい」  
は予言できていた  
「Higgs 質量」が、  
唯一の unknown なパラメタ

125 GeV のヒッグスを仮定と  
コンシステントな超過を観測

# 「宇宙の相転移シナリオ」の証明

- 発見に続き粒子の性質を次々に理解

- 質量の精密測定 (すでに  $\sim 0.1\%$  をきる精度)
- ボソン、フェルミオンへの質量に比例したカップリングの観測
- スピン0の粒子であることの確認



発見したヒッグス粒子を精密に調べ上げて  
 知っている素粒子との相互作用が期待通りであることを示し  
宇宙初期におけるゲージ対称性の自発的対称性の破れの  
 ストーリーが正しいことの直接的な証拠を示した。

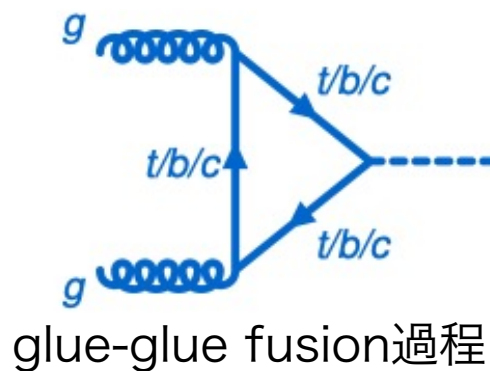
新粒子発見から物理観の確立までのスピード感！  
 「エネルギーフロンティアコライダー実験の醍醐味！」  
 と思います。

# LHCでのヒッグス粒子の作り方&捉え方

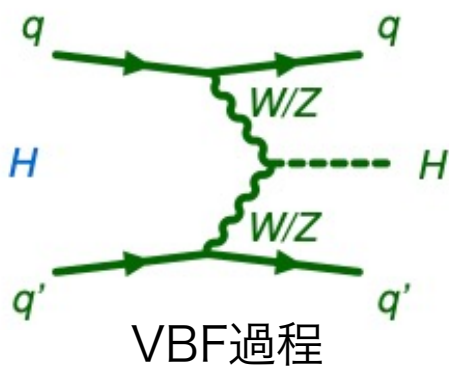
## • 生成と崩壊

生成可能数は衝突の実験コンディションによるため、現在進行中のRun3のコンディションで計算 (2e34/cm<sup>2</sup>/s、13.6TeV)

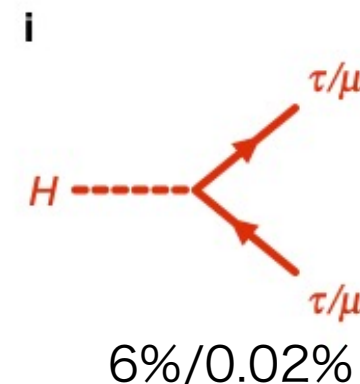
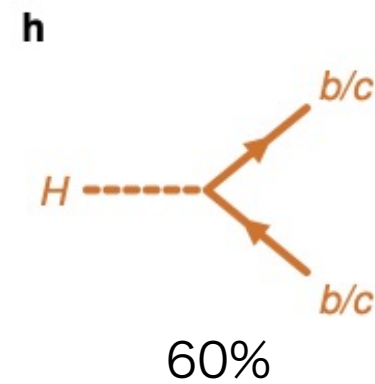
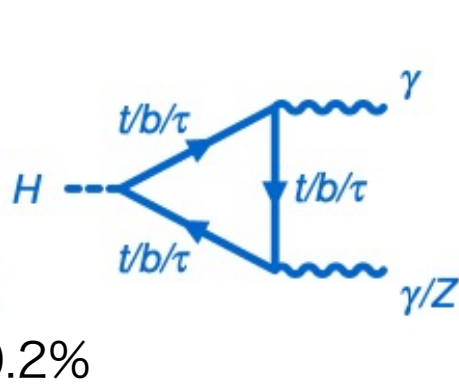
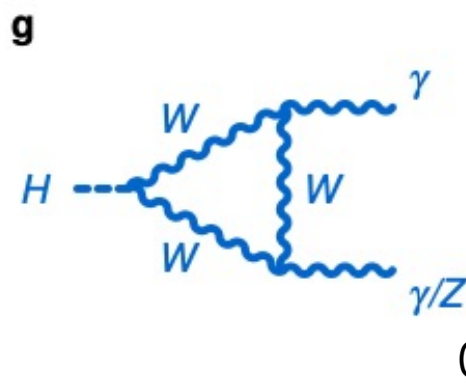
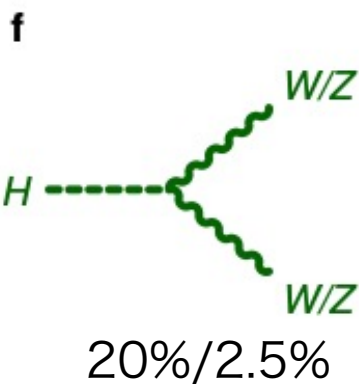
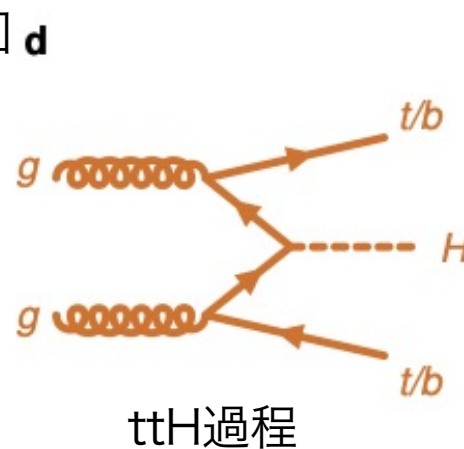
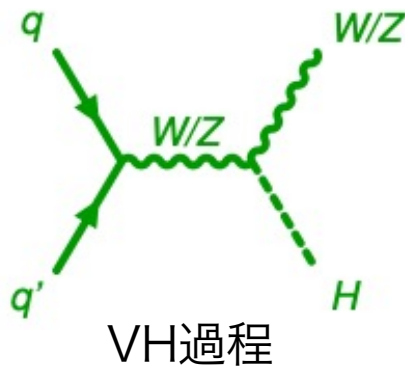
a 1秒で平均1回



b 1秒で平均0.1回

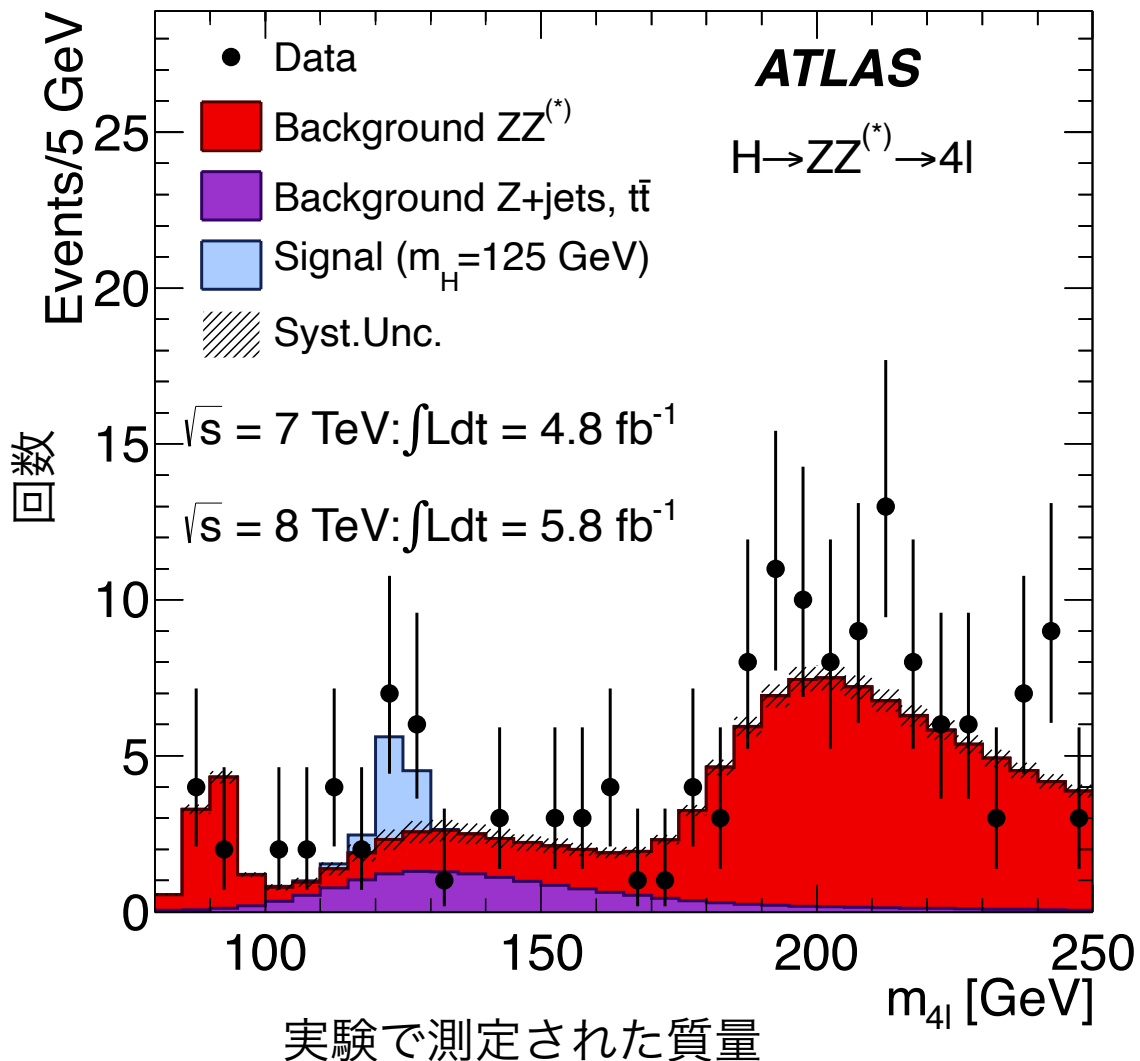


c 1秒で平均0.05回



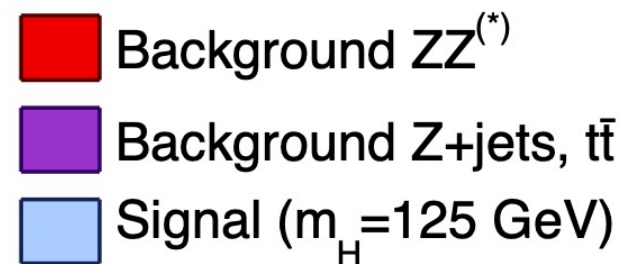
# ヒッグス共鳴 @ 125 GeV with $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)



## • プロットの見方

- 黒色の点「●」：実験データ
- 色付きのヒストグラム

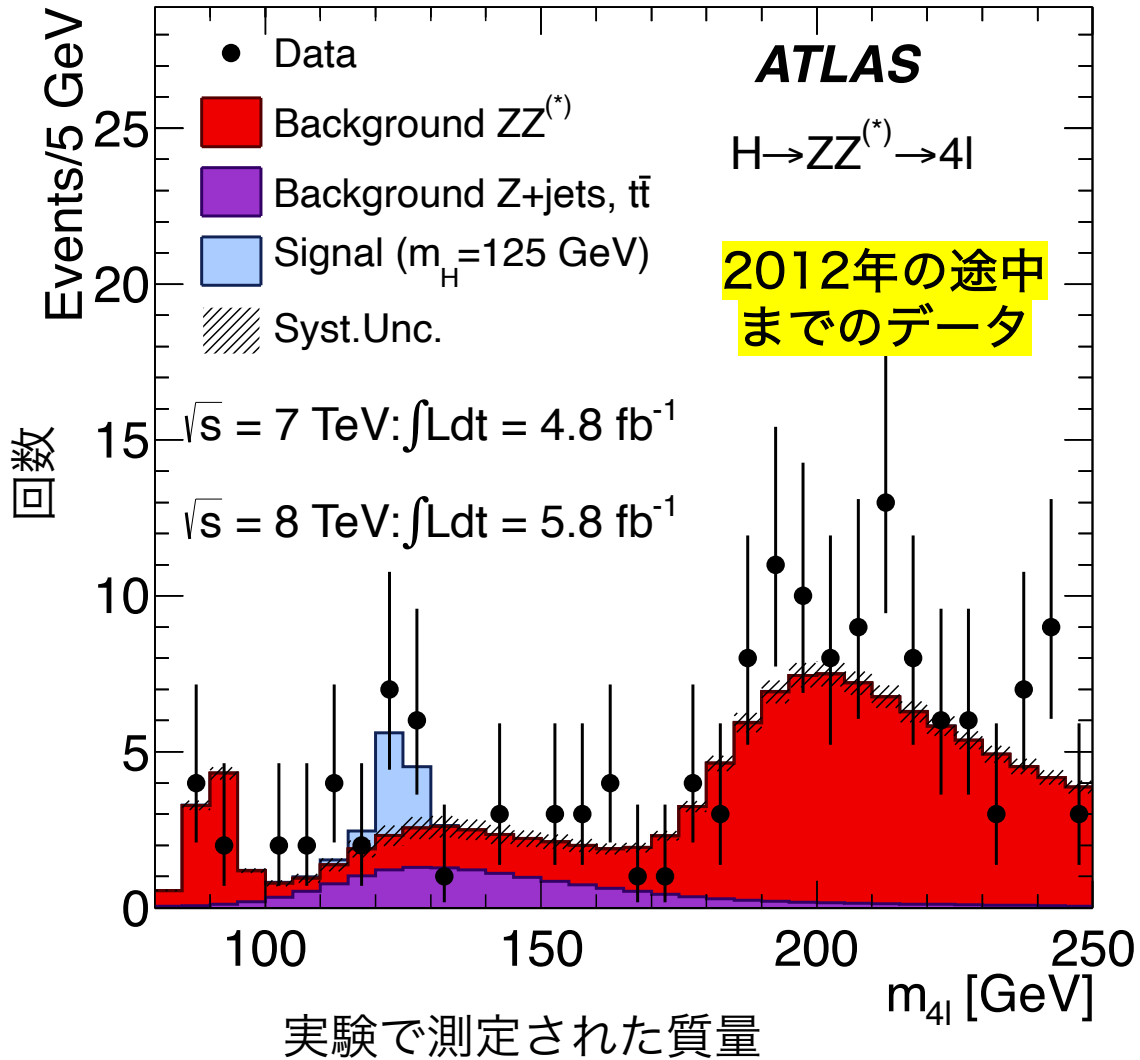


- シミュレーションによる予想値
- 物理プロセスに成分分解して表示
- 黒色の点と比較して考察

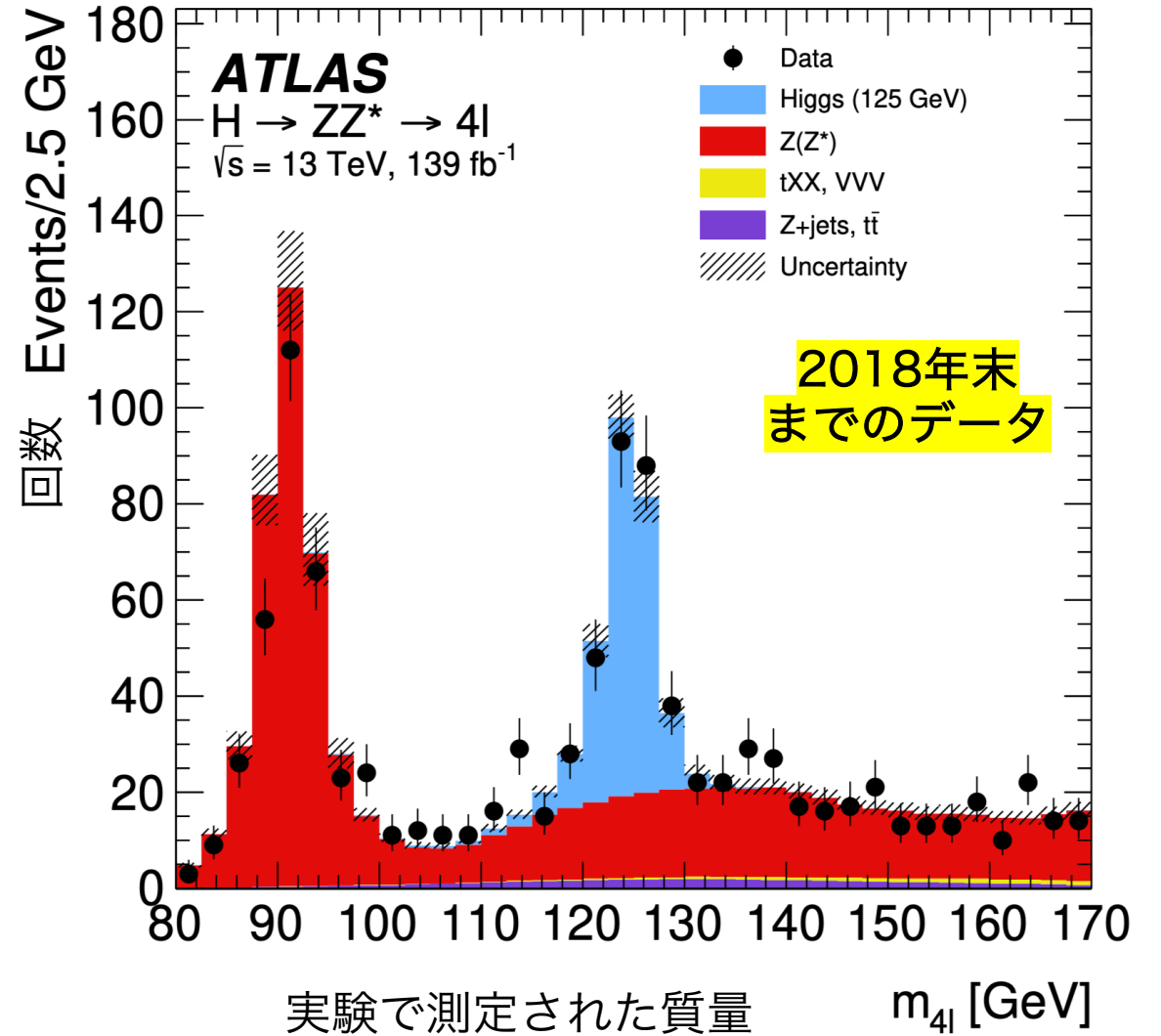
- この図の場合は「あきらかにヒッグスの寄与がある」というのが考察のメッセージ

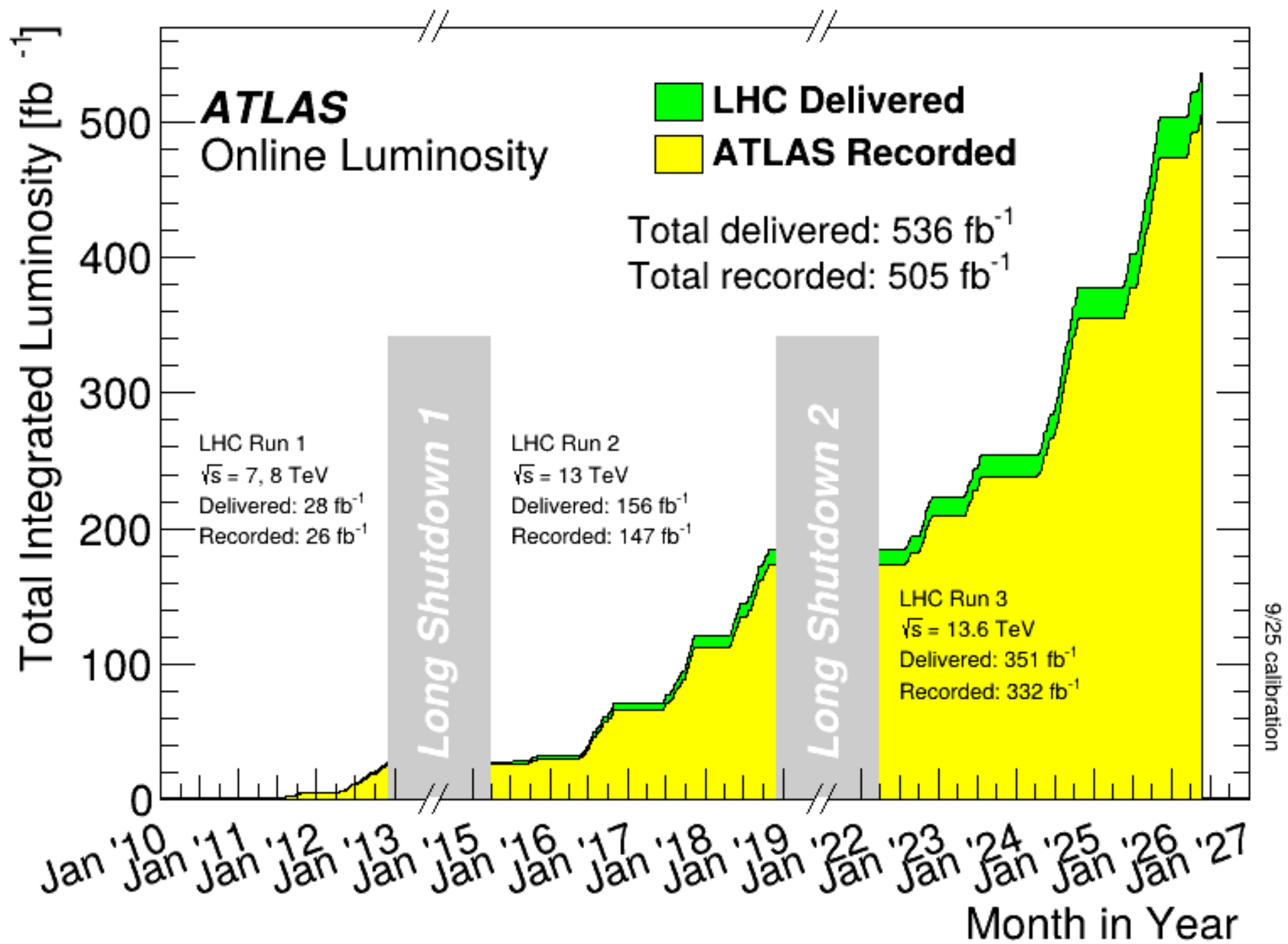
# ヒッグス共鳴 @ 125 GeV with $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)



[Eur. Phys. J. C 80 \(2020\) 942](#)

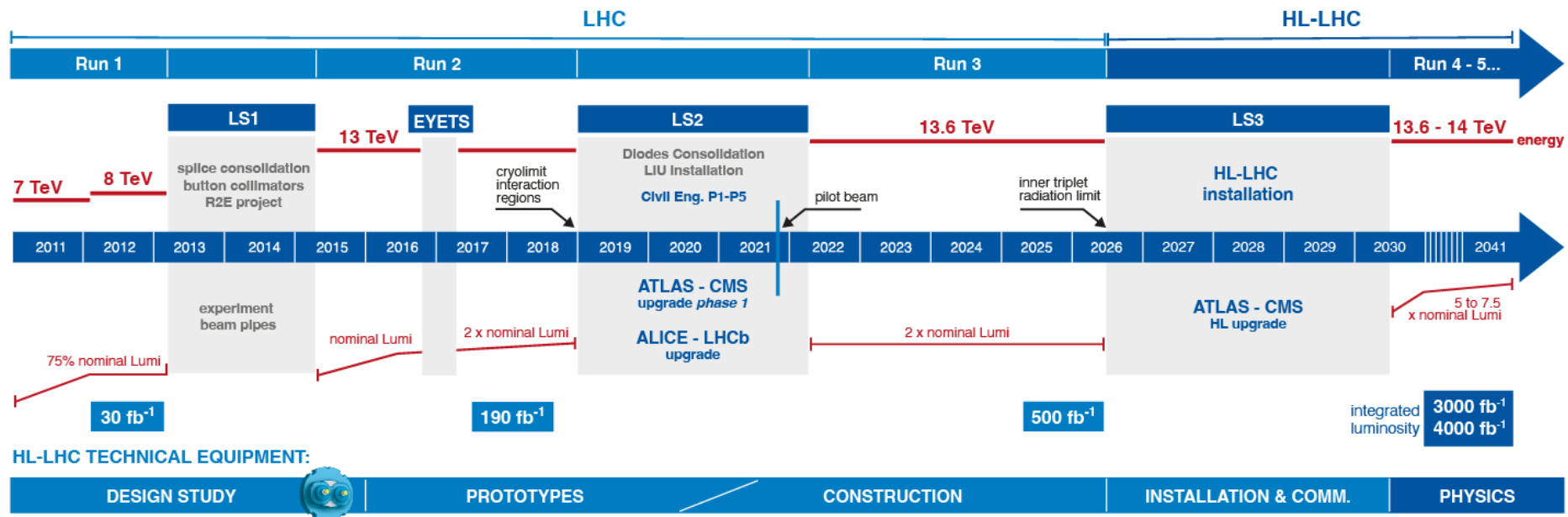




# ヒッグス粒子の研究の歴史

## • LHC加速器の運転状況

- Run 1 7-8 TeV (2010-2013)  $30 \text{ fb}^{-1}$  400,000 個のヒッグス粒子
- Run 2 13 TeV (2015-2018)  $150 \text{ fb}^{-1}$  7,000,000 個のヒッグス粒子
- Run 3 13.6 TeV (2022-2026)  $330 \text{ fb}^{-1}$  19,000,000 個のヒッグス粒子
- HL-LHC 14 TeV (2029-2041)  $3000 \text{ fb}^{-1}$  140,000,000 個のヒッグス粒子
  - 今の実験では、1ヒッグス生成/1秒間

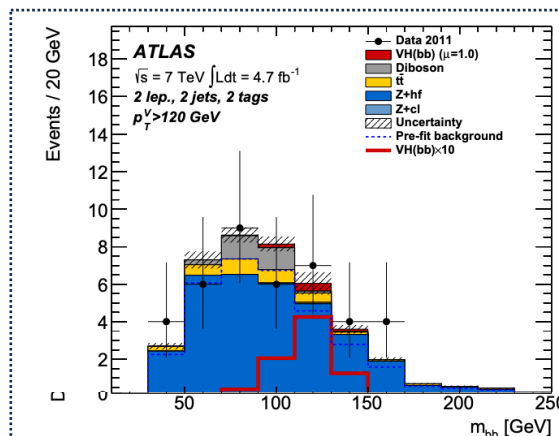


# ヒッグス粒子でわかったこと (Run1)

## Run 1 (400,000ヒッグス)

ボソンへの崩壊モードで発見  
(ピークを作る && 低バックグラウンド)

- H $\rightarrow\gamma\gamma$  (崩壊分岐比=0.2%) : 発見
- H $\rightarrow ZZ\rightarrow 4l$  (崩壊分岐比= 2.5% $\times$ 0.4%) : 発見
- H $\rightarrow WW\rightarrow 2l2\nu$  (崩壊分岐比= 20%) : 発見

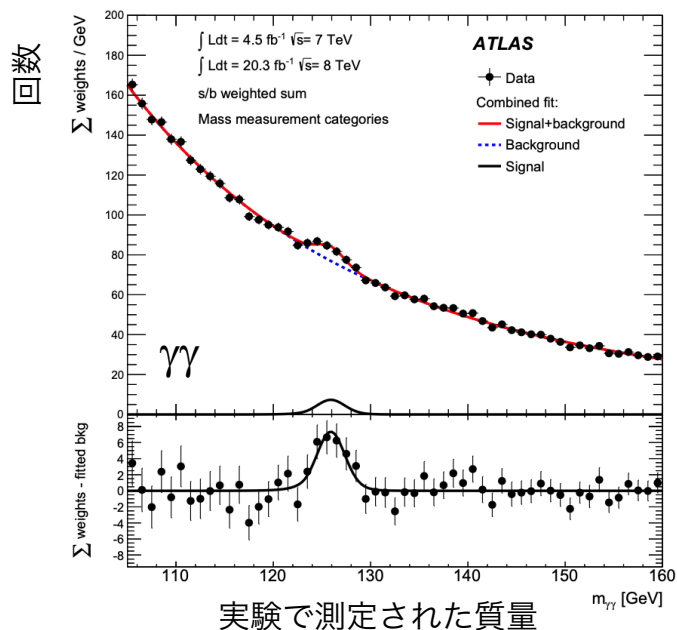


参考: H $\rightarrow$ bb (崩壊分岐比=60%)  
は当時 未確定 (Run2で確定)

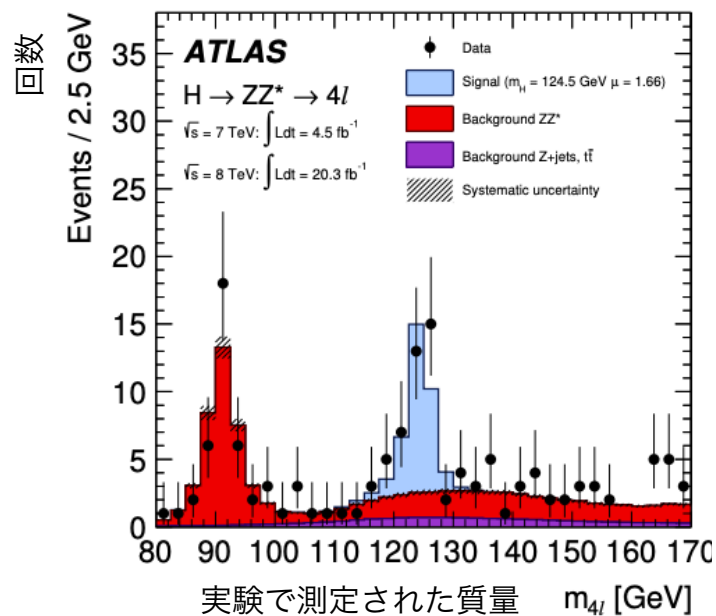
信号崩壊分岐比 $\odot$   
質量再構成 $\triangle$ 、バックグラウンド $\triangle$

メモ: 信号数だけじゃ語れない!

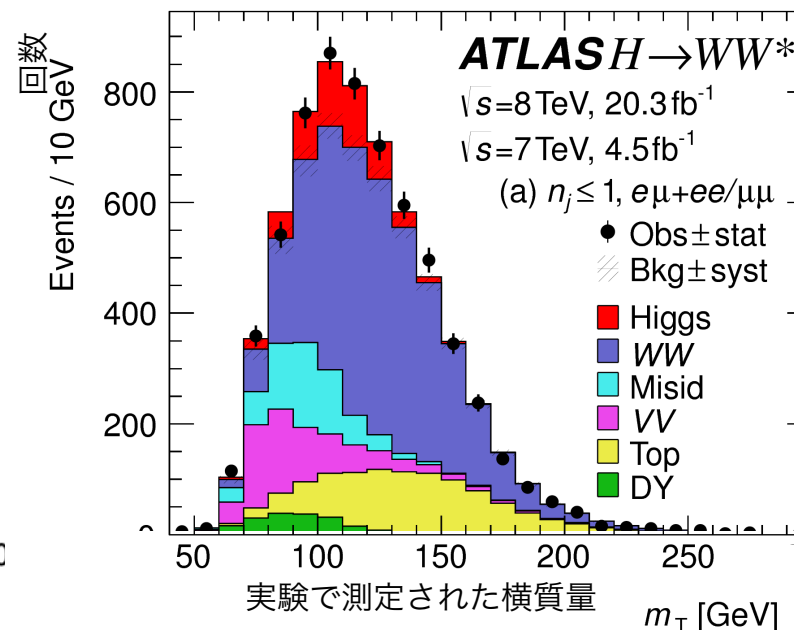
信号崩壊分岐比 $\triangle$   
質量再構成 $\odot$ 、バックグラウンド $\circ$



信号崩壊分岐比 $\times$   
質量再構成 $\odot$ 、バックグラウンド $\circ$



信号崩壊分岐比 $\odot$   
質量再構成 $\triangle$ 、バックグラウンド $\circ$



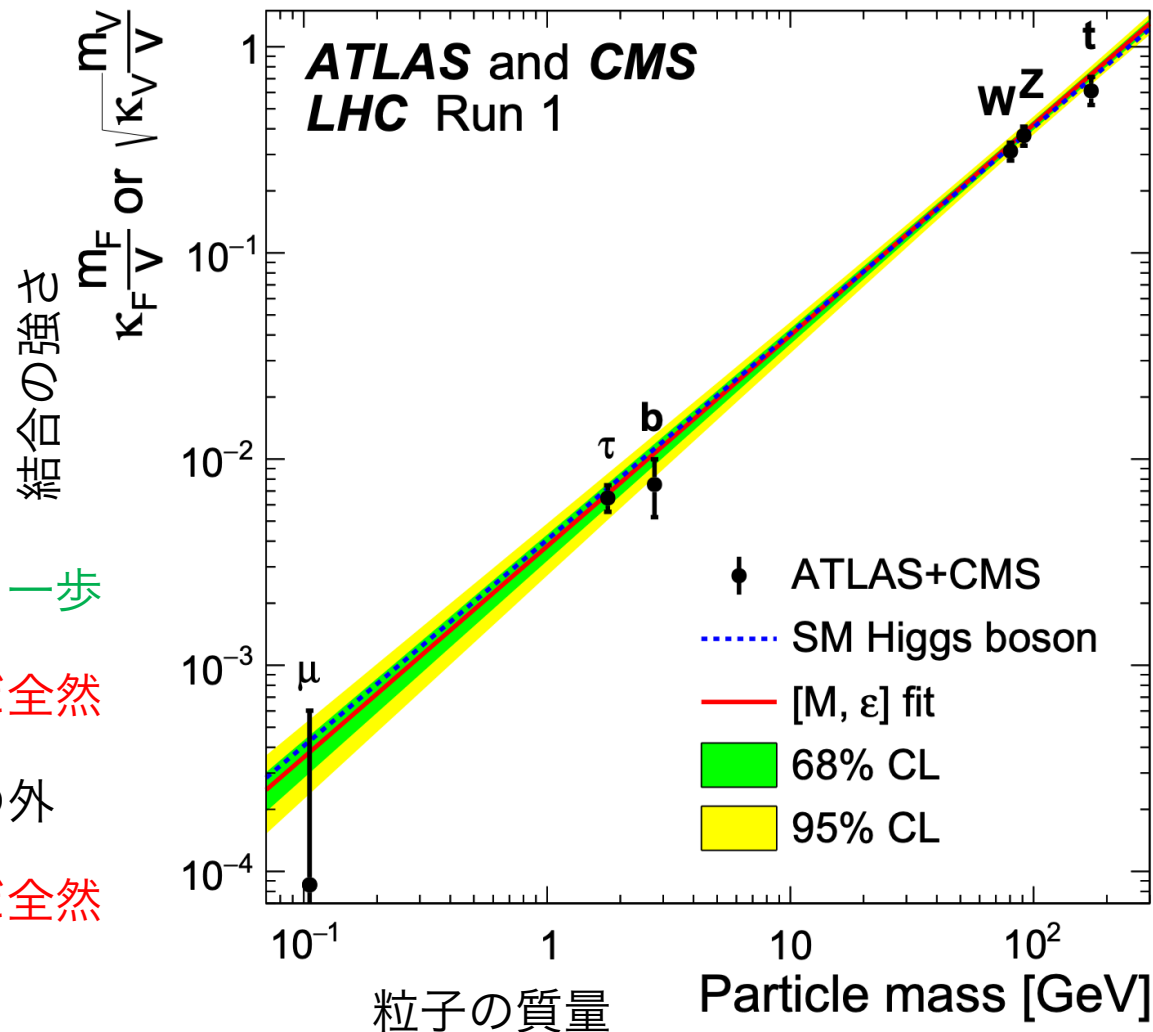
# ヒッグス粒子でわかったこと (Run1)

## • Run1 (400,000ヒッグス)

ヒッグス粒子の性質を語る最重要プロット  
「結合の強さが質量に比例する」

Run1 CMS + ATLAS の探索結果

Channel	References for individual publications		Signal strength $[\mu]$ from results in this paper (Section 5.2)		Signal significance $[\sigma]$	
	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS
$H \rightarrow \gamma\gamma$	[92]	[93]	$1.14^{+0.27}_{-0.25}$ (+0.26, -0.24)	$1.11^{+0.25}_{-0.23}$ (+0.23, -0.21)	5.0 (4.6)	5.6 (5.1)
$H \rightarrow ZZ$	[94]	[95]	$1.52^{+0.40}_{-0.34}$ (+0.32, -0.27)	$1.04^{+0.32}_{-0.26}$ (+0.30, -0.25)	7.6 (5.6)	7.0 (6.8)
$H \rightarrow WW$	[96,97]	[98]	$1.22^{+0.23}_{-0.21}$ (+0.21, -0.20)	$0.90^{+0.23}_{-0.21}$ (+0.23, -0.20)	6.8 (5.8)	4.8 (5.6)
$H \rightarrow \tau\tau$	[99]	[100]	$1.41^{+0.40}_{-0.36}$ (+0.37, -0.33)	$0.88^{+0.30}_{-0.28}$ (+0.31, -0.29)	4.4 (3.3)	3.4 (3.7)
$H \rightarrow bb$	[101]	[102]	$0.62^{+0.37}_{-0.37}$ (+0.39, -0.37)	$0.81^{+0.45}_{-0.43}$ (+0.45, -0.43)	1.7 (2.7)	2.0 (2.5)
$H \rightarrow \mu\mu$	[103]	[104]	$-0.6^{+3.6}_{-3.6}$ (+3.6, -3.6)	$0.9^{+3.6}_{-3.5}$ (+3.3, -3.2)		
$ttH$ production	[78, 105, 106]	[108]	$1.9^{+0.8}_{-0.7}$ (+0.7, -0.7)	$2.9^{+1.0}_{-0.9}$ (+0.9, -0.8)	2.7 (1.6)	3.6 (1.3)

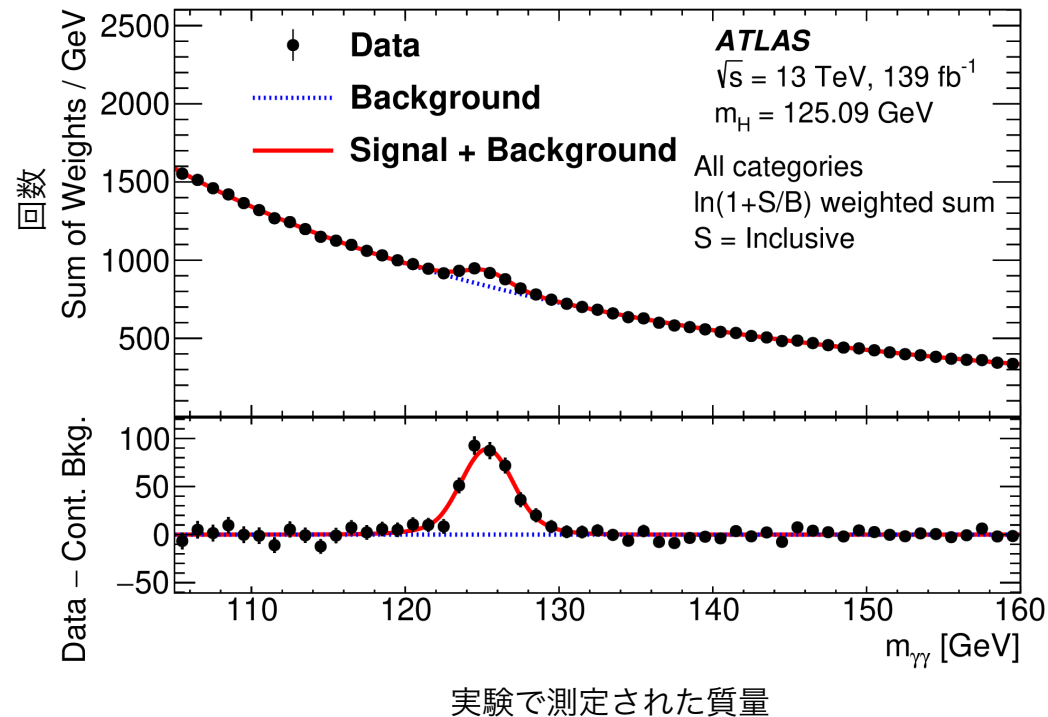
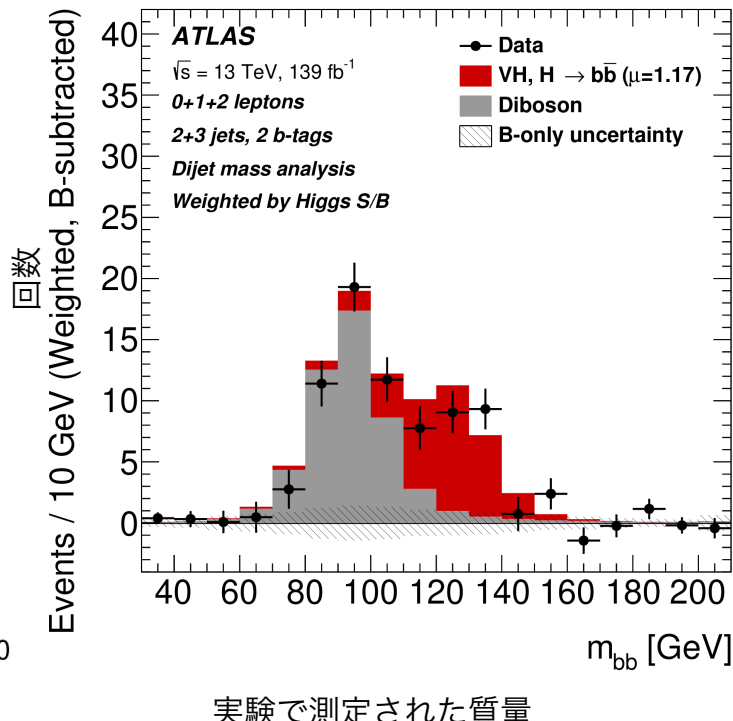
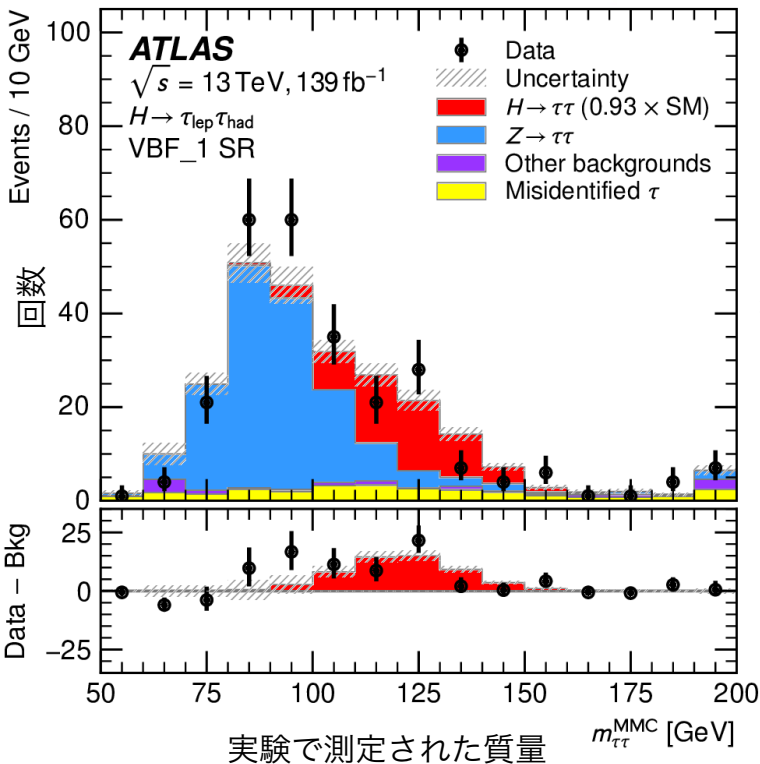
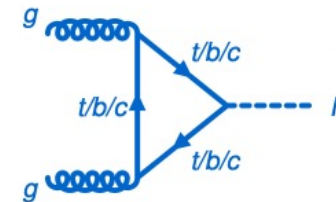
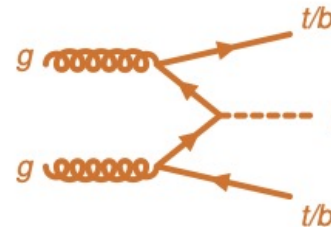
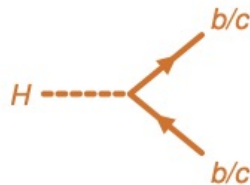
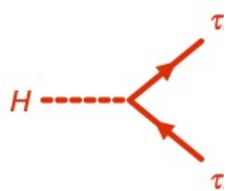


もう一步  
まだ全然  
話の外  
まだ全然

# ヒッグス粒子でわかったこと (Run2)

## Run 2 (7,000,000ヒッグス)

- 第三世代フェルミオンへの結合をすべてツリーレベルで観測

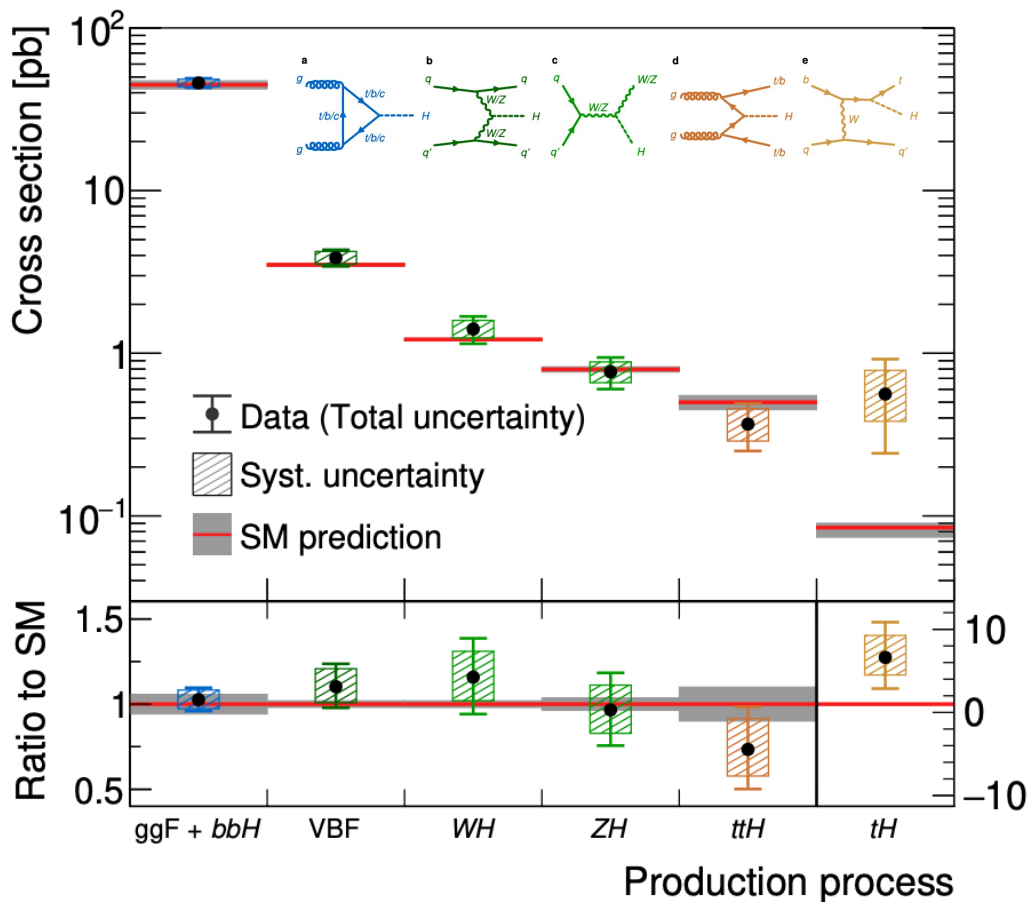


# ヒッグス粒子でわかったこと (Run2)

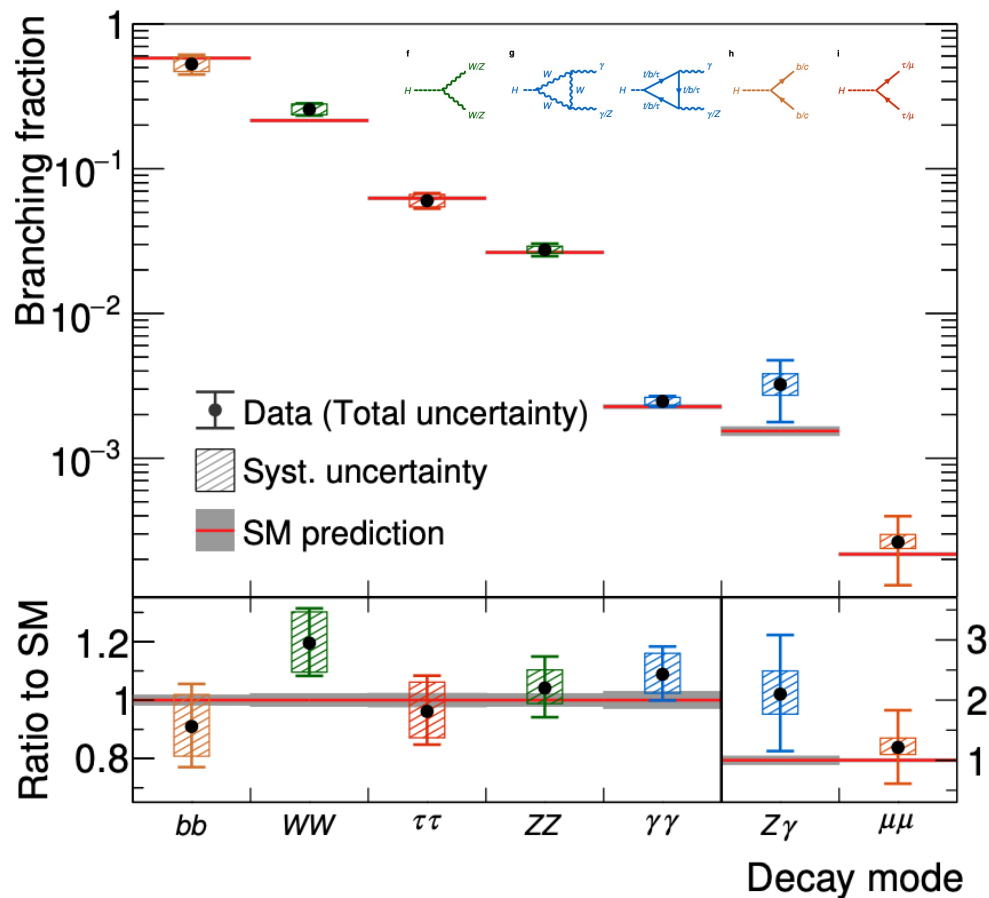
## Run 2 (7,000,000ヒッグス)

- 「メイジャー」な全生成過程・全崩壊過程を観測

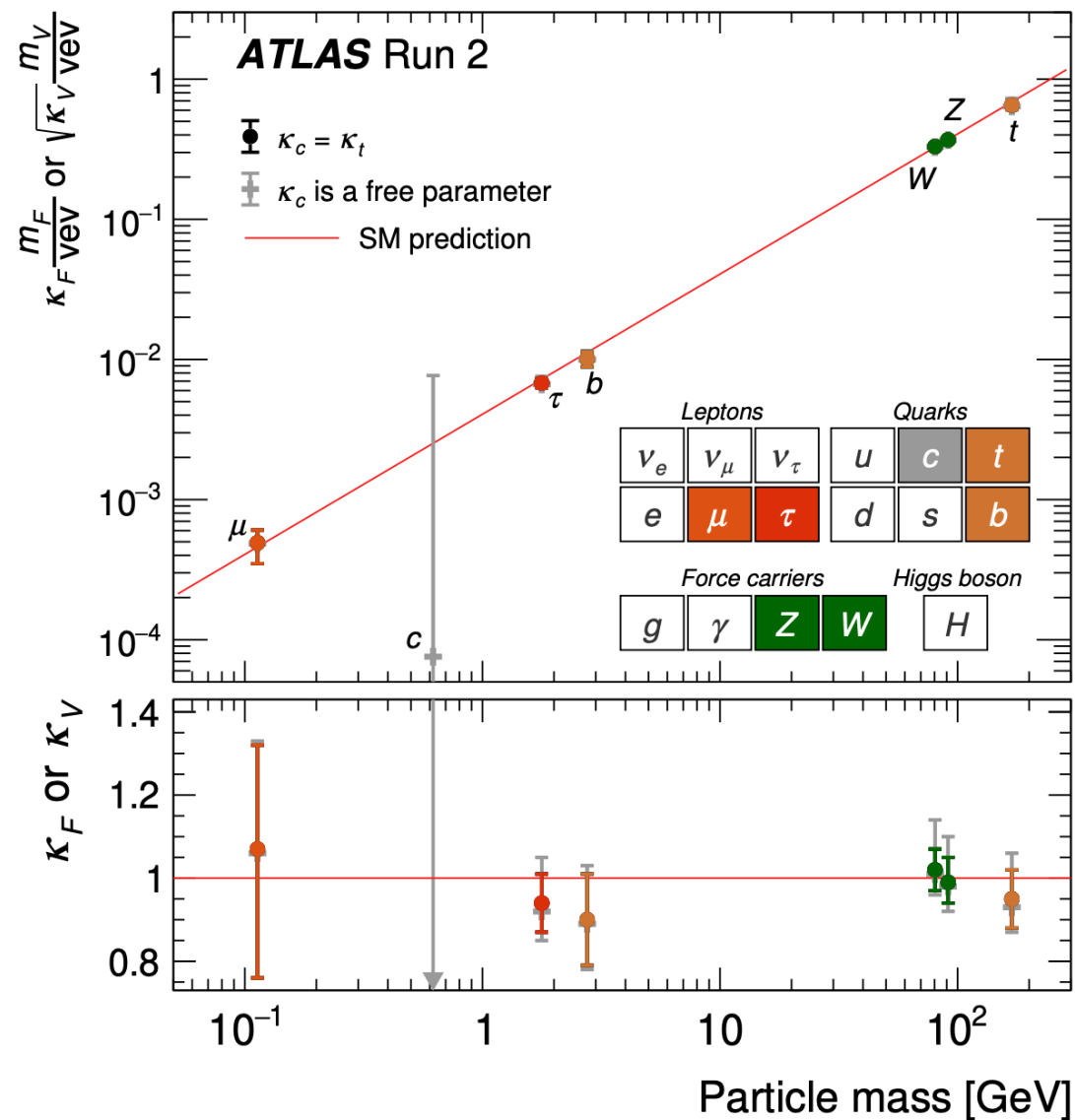
それぞれの生成過程の生成断面積 (レポート)



それぞれの生成過程の崩壊分岐比



# ヒッグス粒子でわかったこと (Run2)



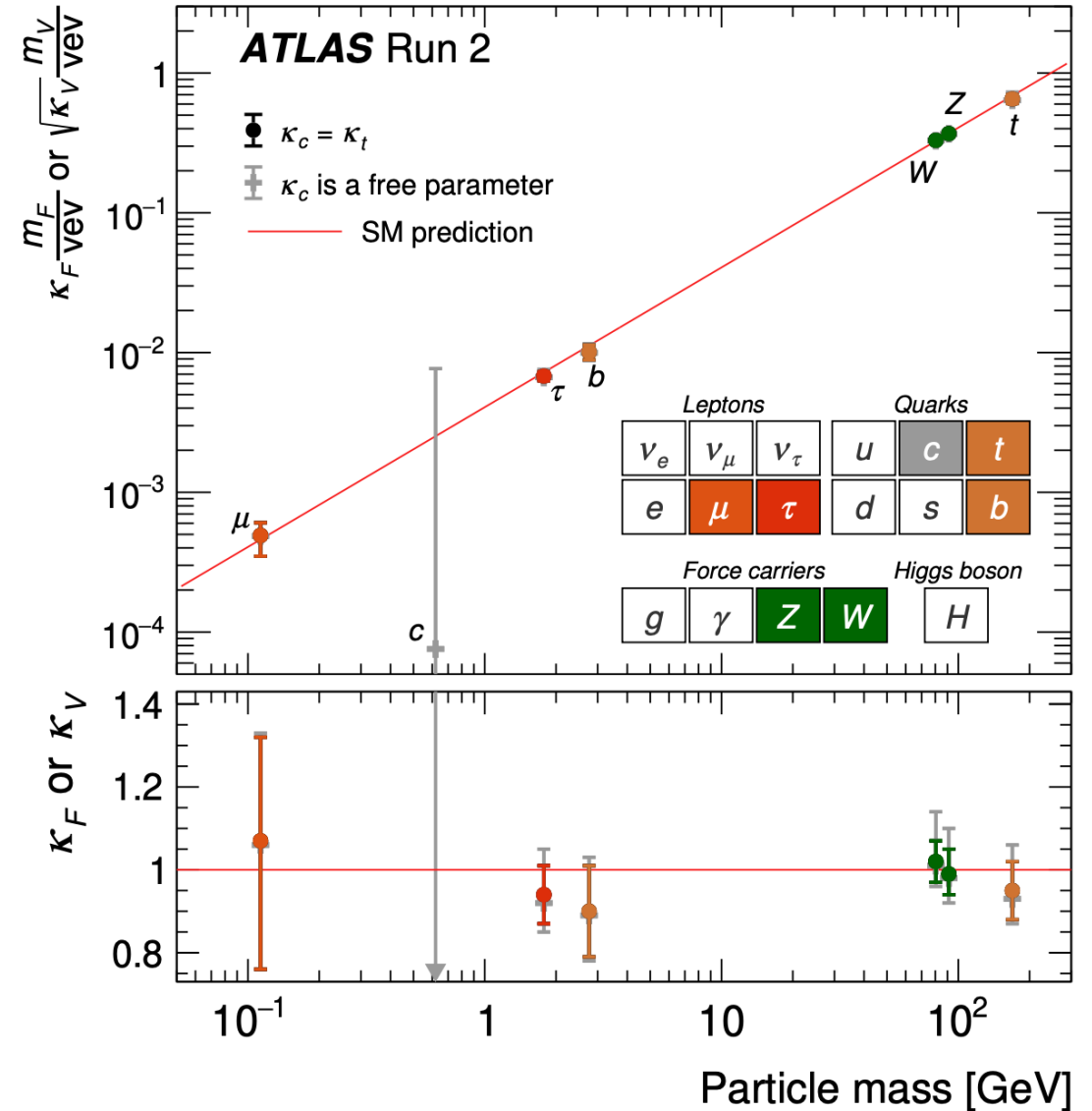
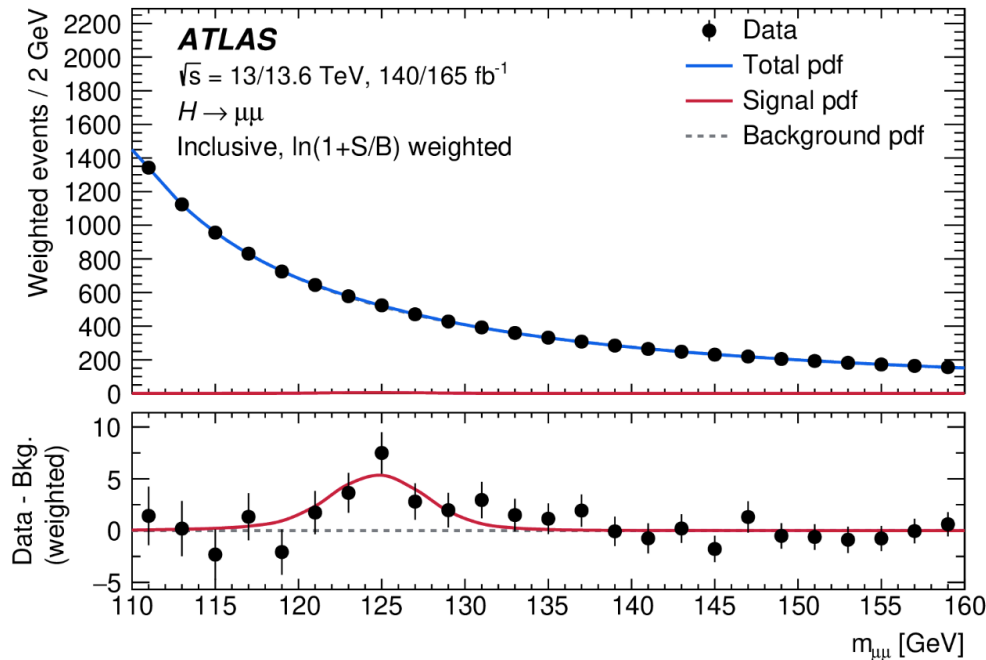
# ヒッグス粒子でこれからわかること

- Run 2 (7,000,000ヒッグス)

- 第2世代も視野にはいつてきた  
(崩壊分岐比 = 0.02%  $H \rightarrow \gamma\gamma$ の一桁下)

- Run 3 + Run 2 (24,000,000ヒッグス)

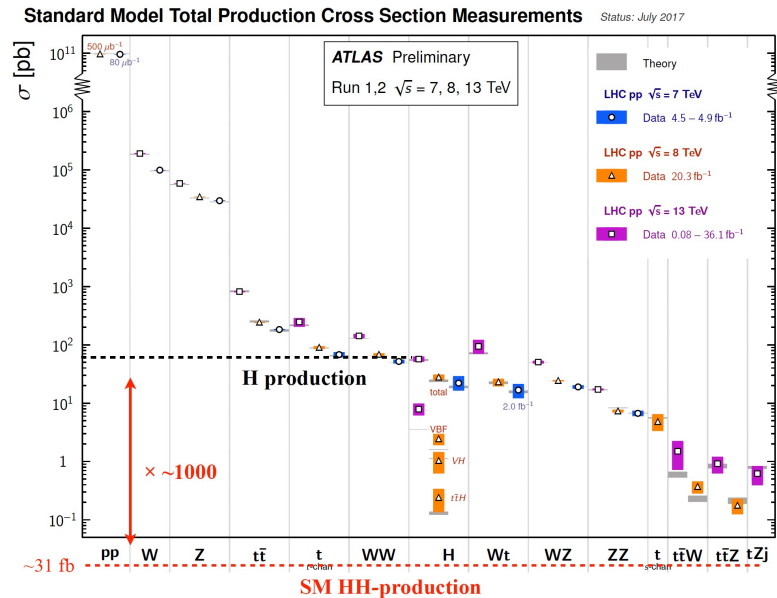
で観測を目指す



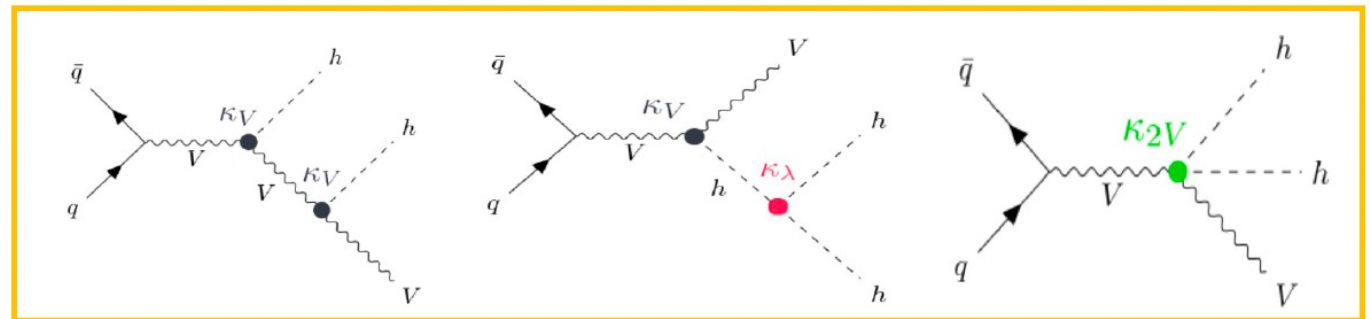
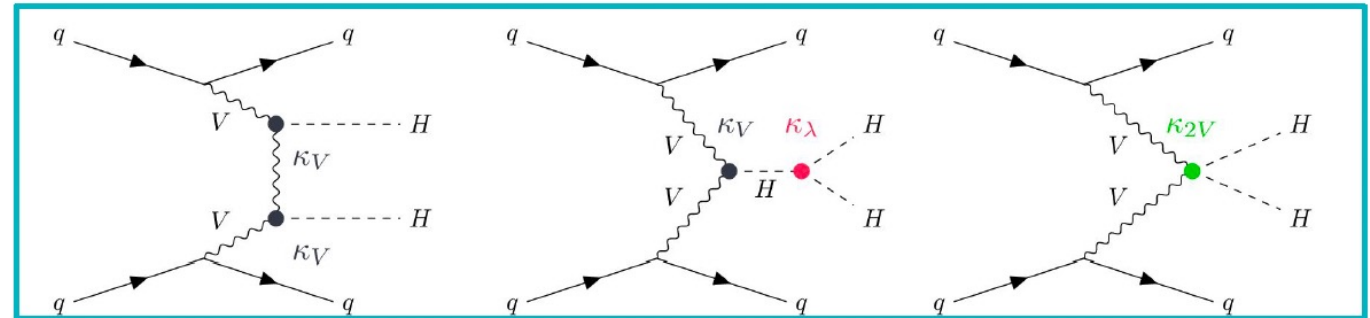
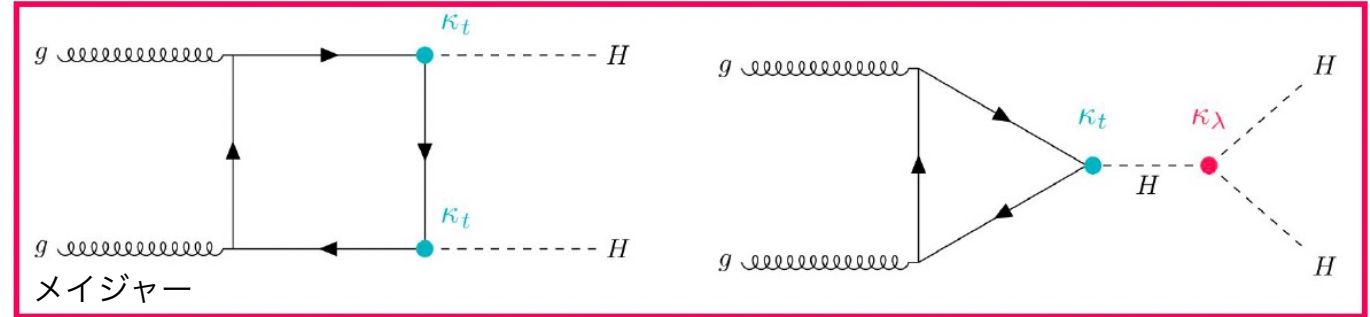
# ヒッグス粒子でこれからわかること

## ヒッグス対生成現象

- ヒッグス粒子単生成レートの1/1000
- “big three” チャンネル
  - bbbb, bb $\tau\tau$ , bb $\gamma\gamma$
- HL-LHCで発見予定だけどアイデア次第で早期の発見の可能性あり！



いろいろな生成ダイアグラム



# ヒッグスの精密測定から三点結合もわかる

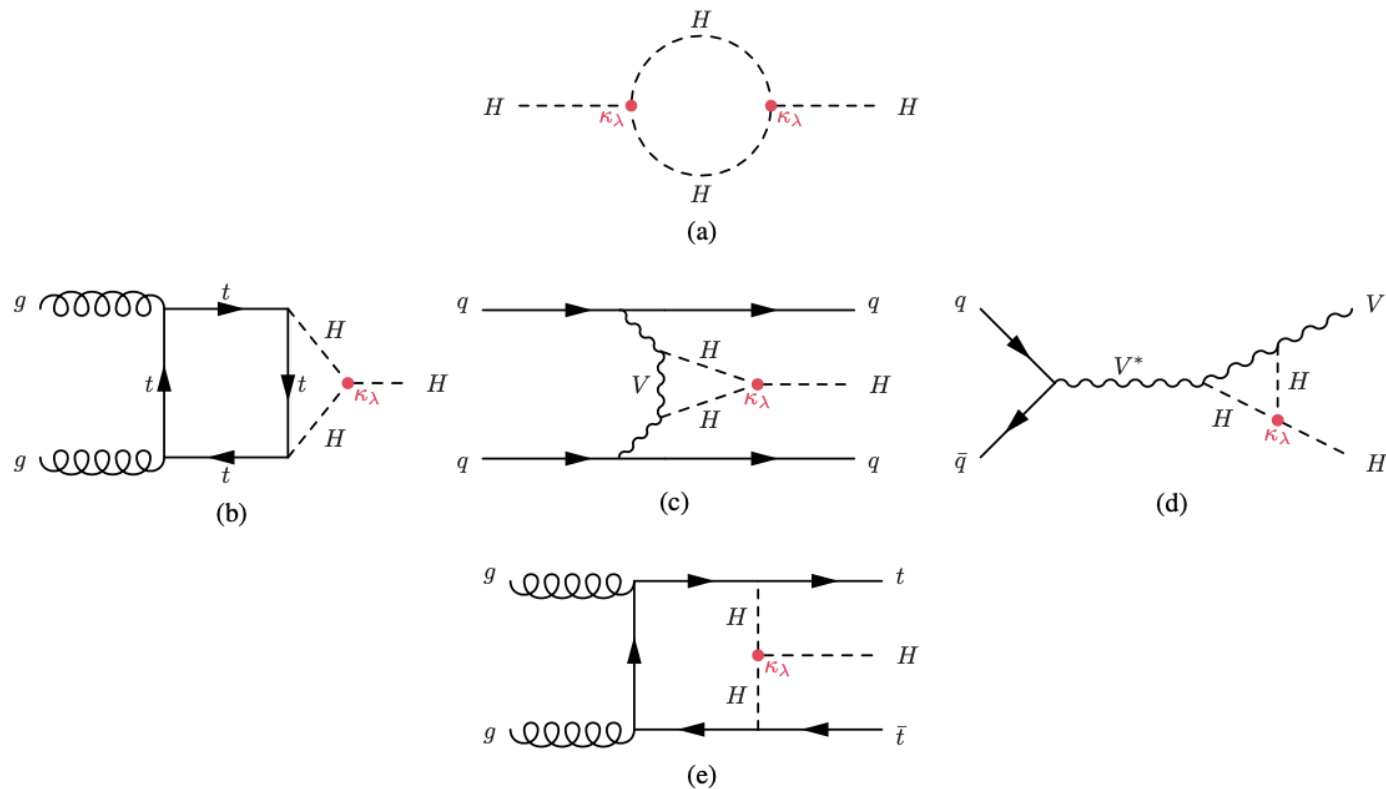
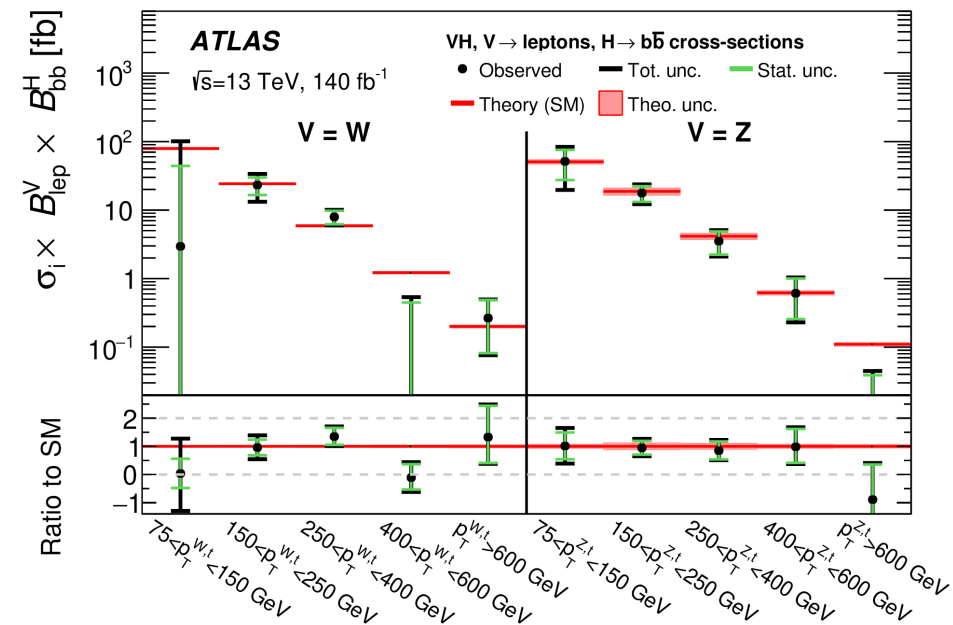
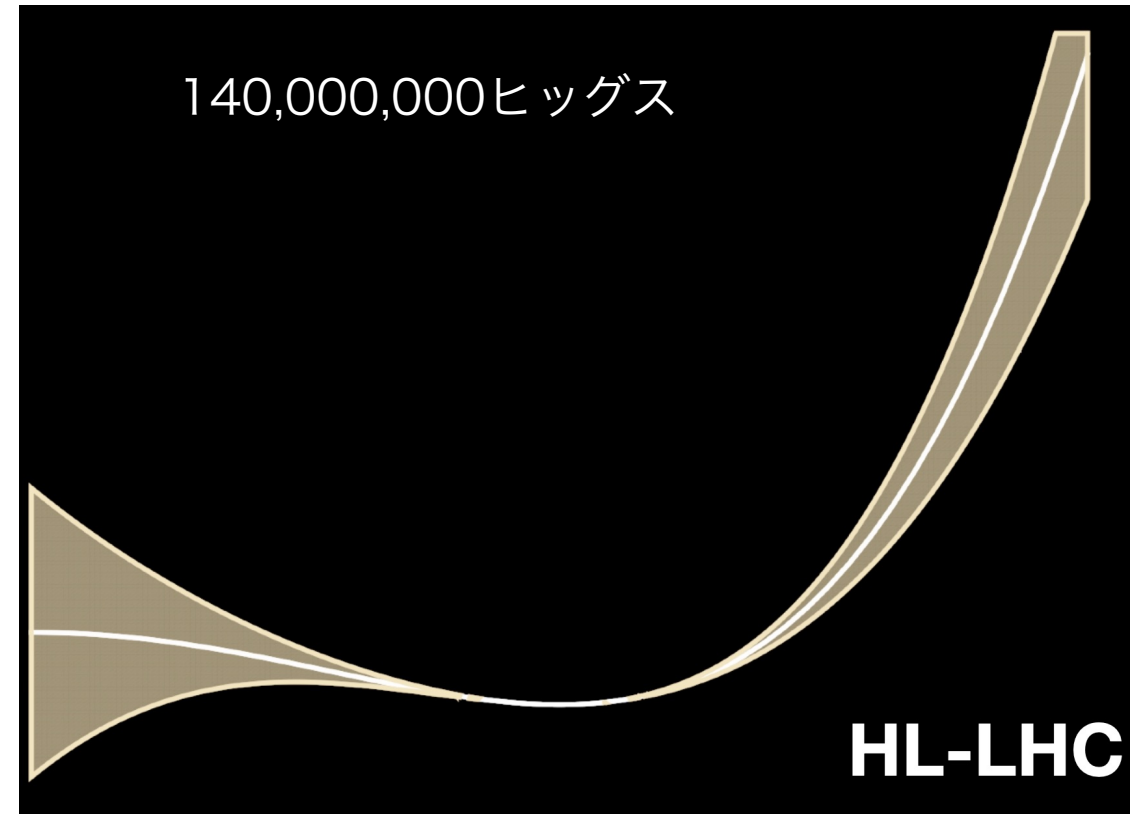
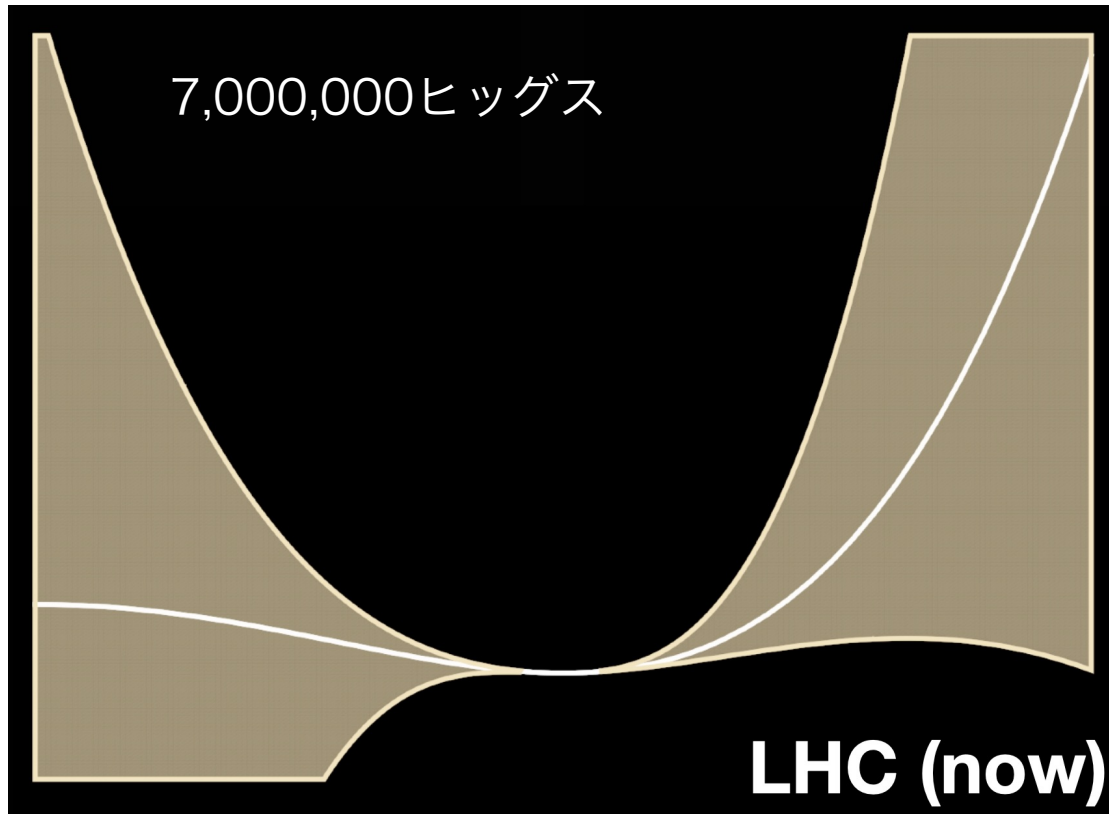


Figure 2: Examples of one-loop  $\lambda_{HHH}$ -dependent diagrams for (a) the Higgs boson self-energy, and for single-Higgs production in the (b) ggF, (c) VBF, (d) VH, and (e)  $t\bar{t}H$  modes. The self-coupling vertex is indicated by the filled circle.



# ヒッグス粒子でこれからわかること

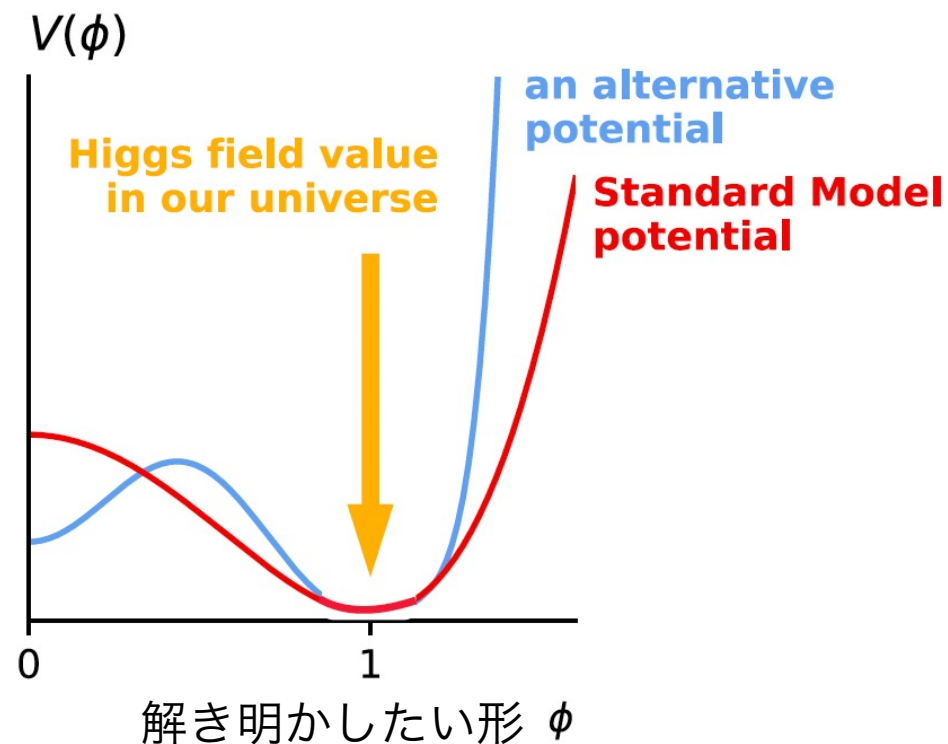
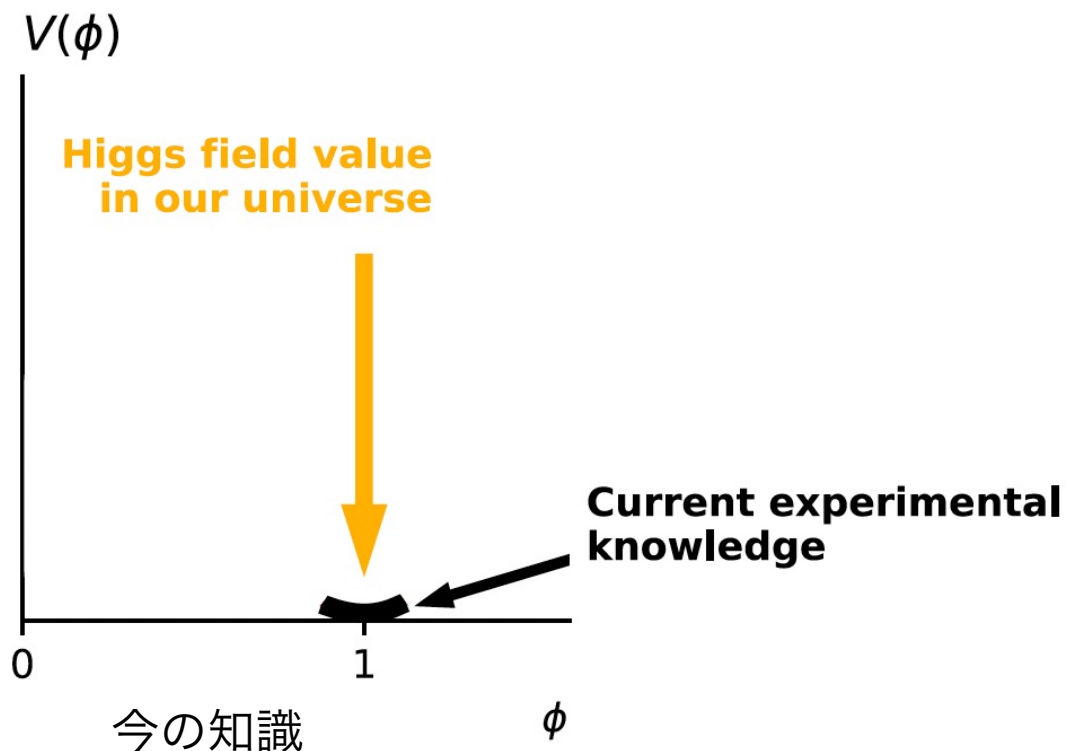
- ヒッグスのポテンシャルをより詳細に知ることができる
  - 今はまだ「底」のあたりが詳細にわかっただけ



# ヒッグス粒子でこれからわかること

- ヒッグスのポテンシャルをより詳細に知るとわかること

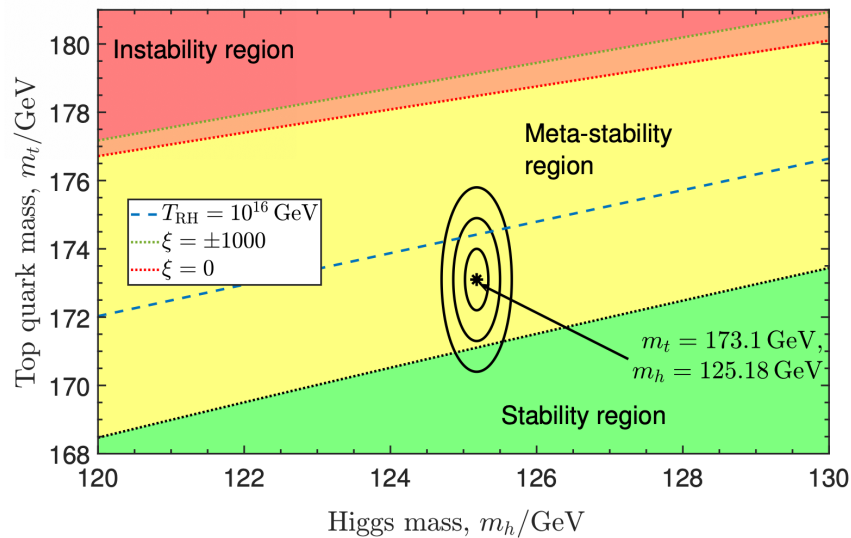
- 相転移にトンネル効果が必要な場合（1次相転移）、  
宇宙の物質反物質の非対称性の謎が、ヒッグス相転移で説明できる可能性あり



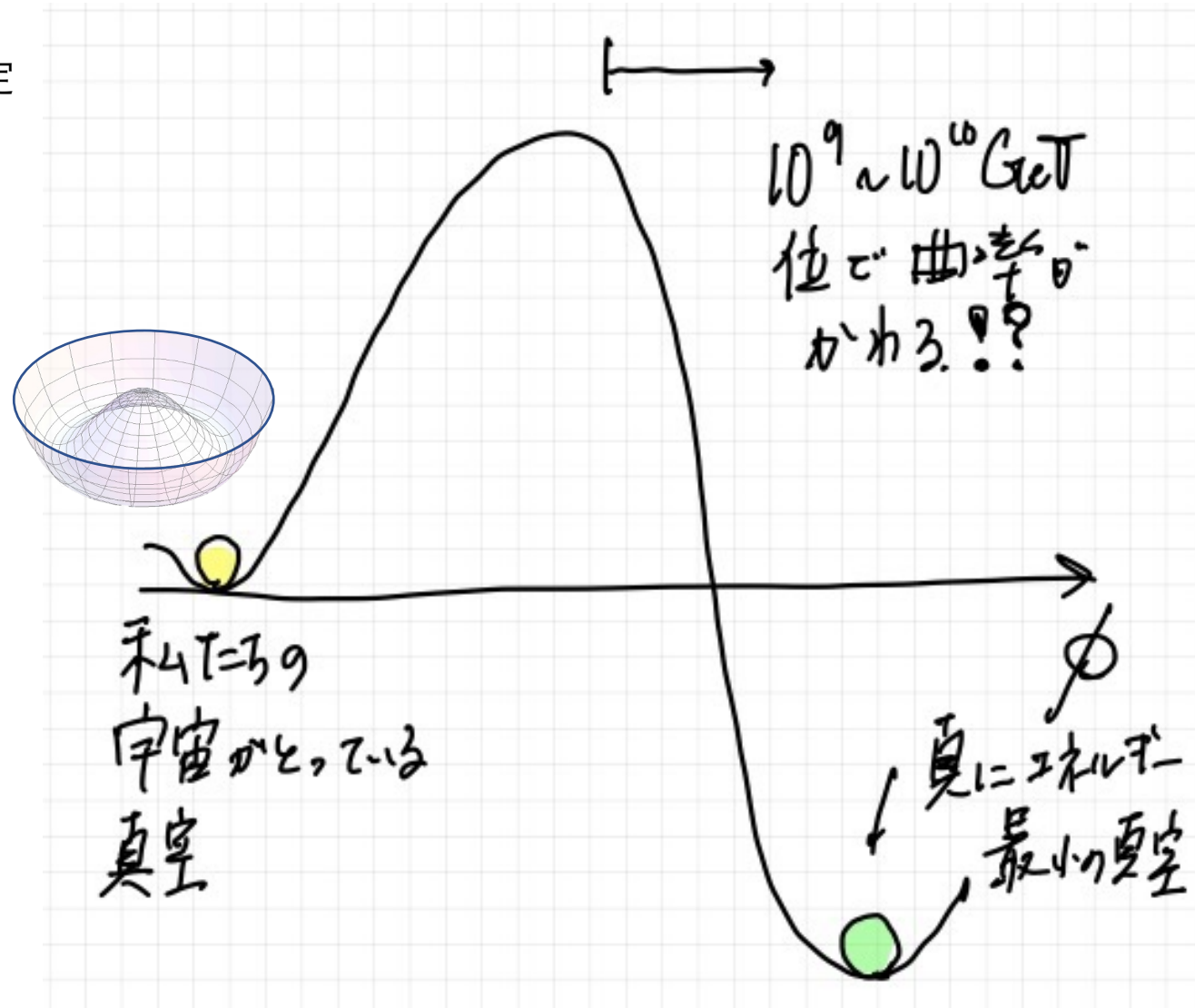
# ヒッグス粒子でこれからわかること

## • 真空の安定性

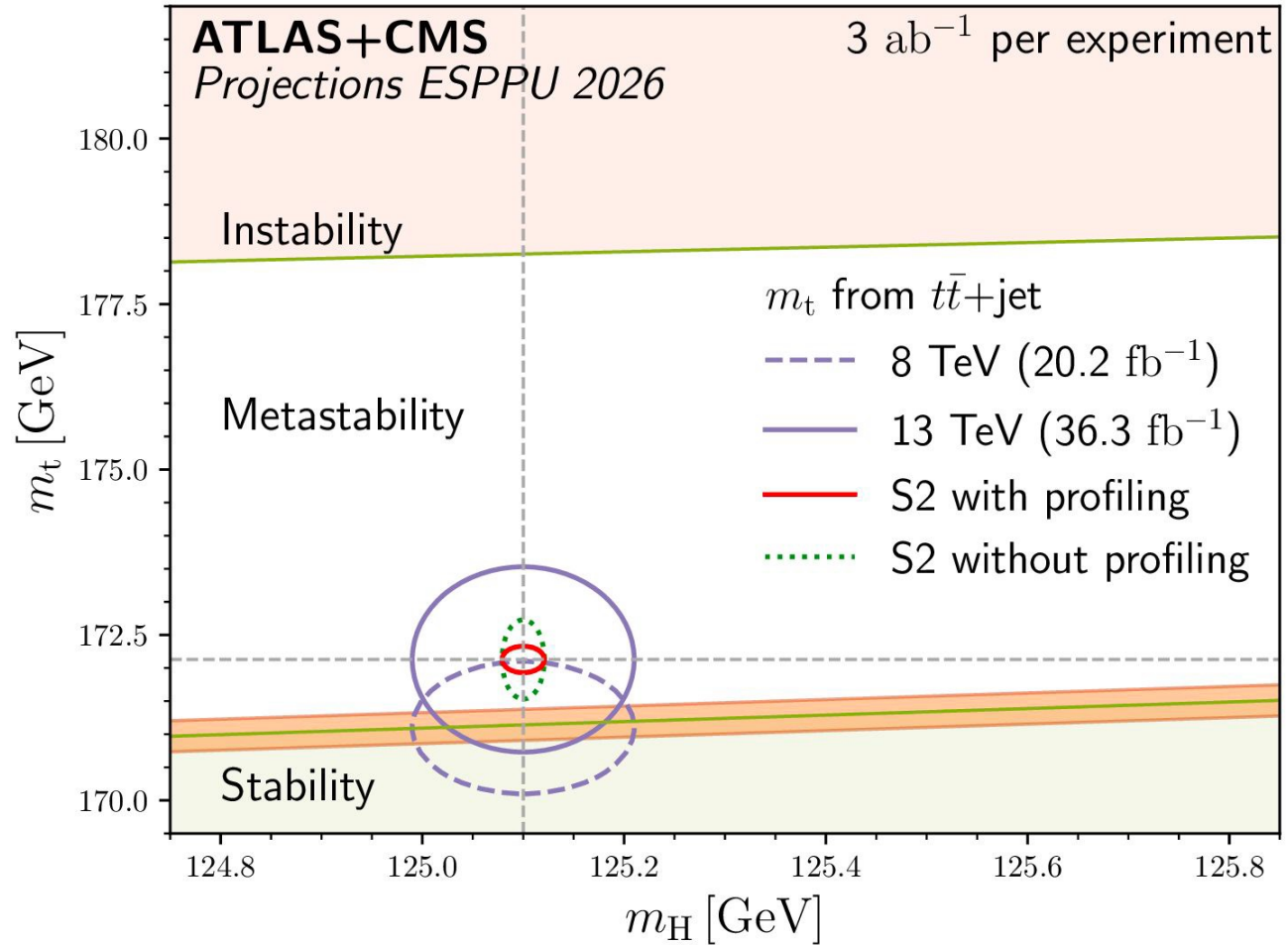
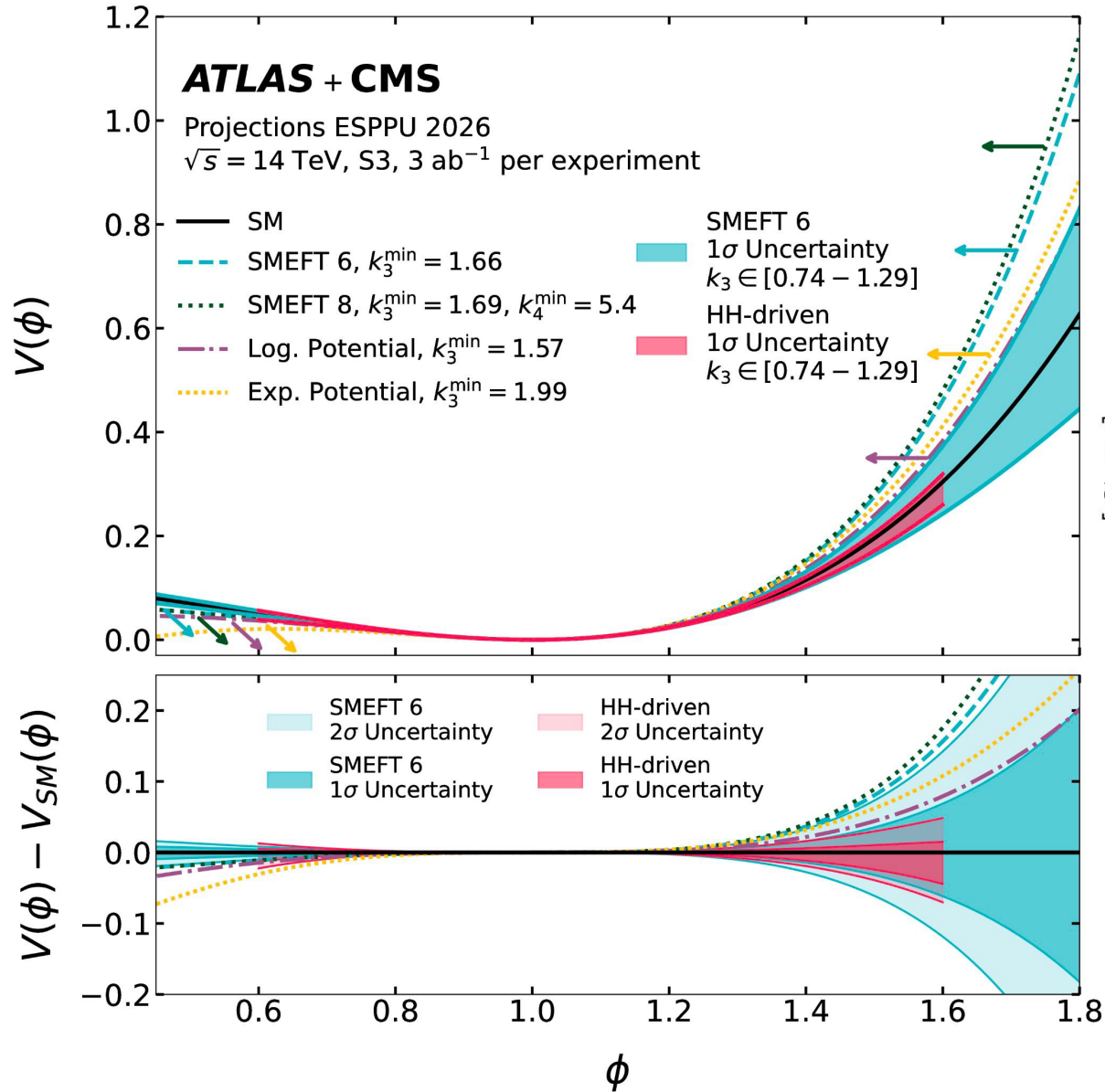
- ヒッグス場が明らかになって、宇宙の、真空の安定性が議論の対象になった。
  - ヒッグスの質量と、トップクォークの質量
  - ポテンシャルの形のそのものの情報
- 今の宇宙は準安定な真空の可能性が高い。
  - 準安定な真空を選んだ理由？
  - $10^{10}$  GeV までに新物理？



Front. Astron. Space Sci. 5 (2018) 40



# ヒッグス粒子でこれからわかること



# ミュオントリガーの研究について

## トリガーが大事！

大きな装置をみんなで協力して作って動かしてワクワクする物理実験ができるのは、やっぱり面白いなと思います。2040年代初頭までの実験であるHL-LHC時代のATLAS検出器と一緒に作りましょう

