

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。

- 質量に比例した結合をもちます。

唯一のスカラー粒子。

125 GeV の質量を持つ。

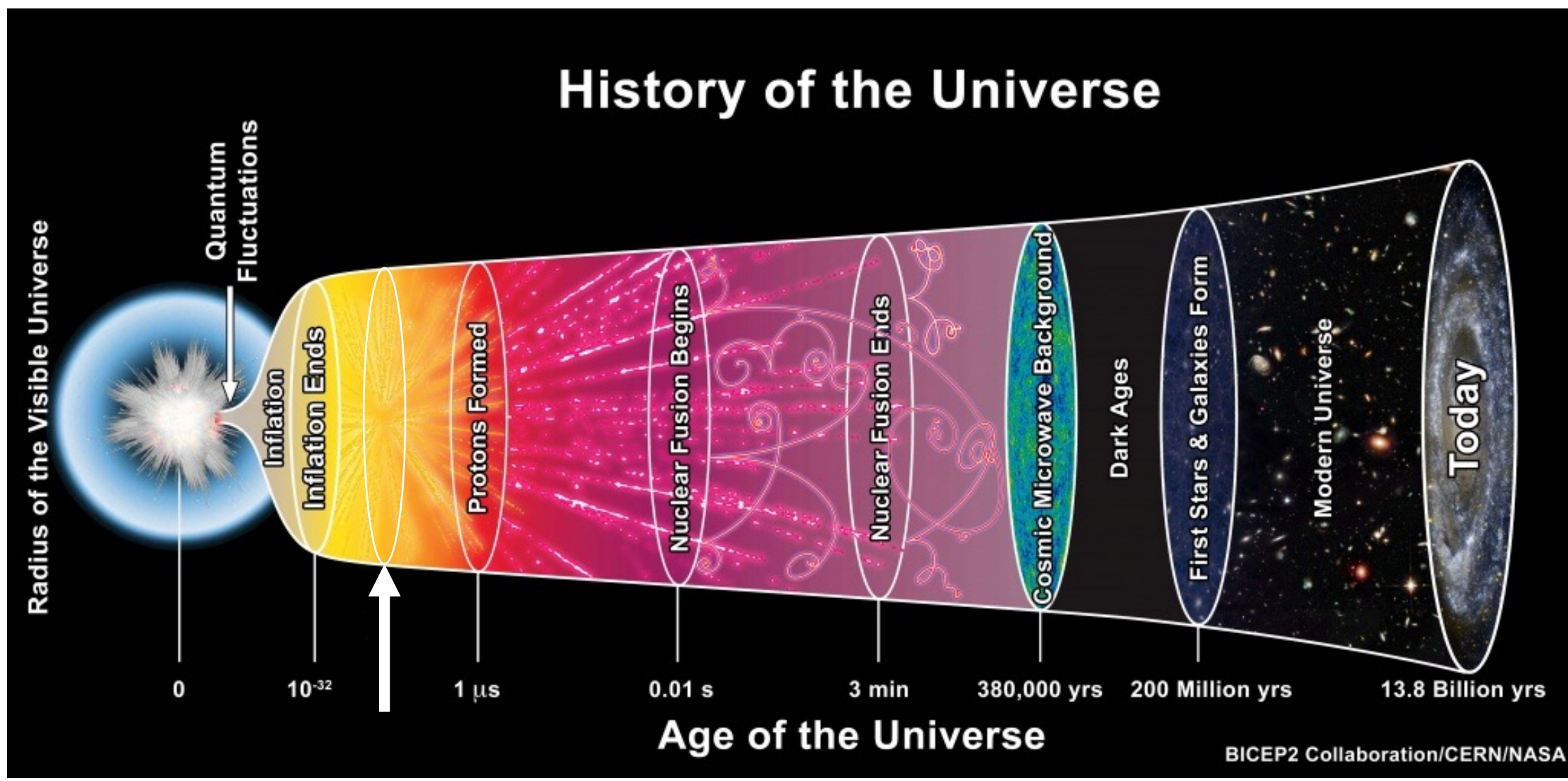
- 実験により確定（事前には予測できないパラメタ）

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

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
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

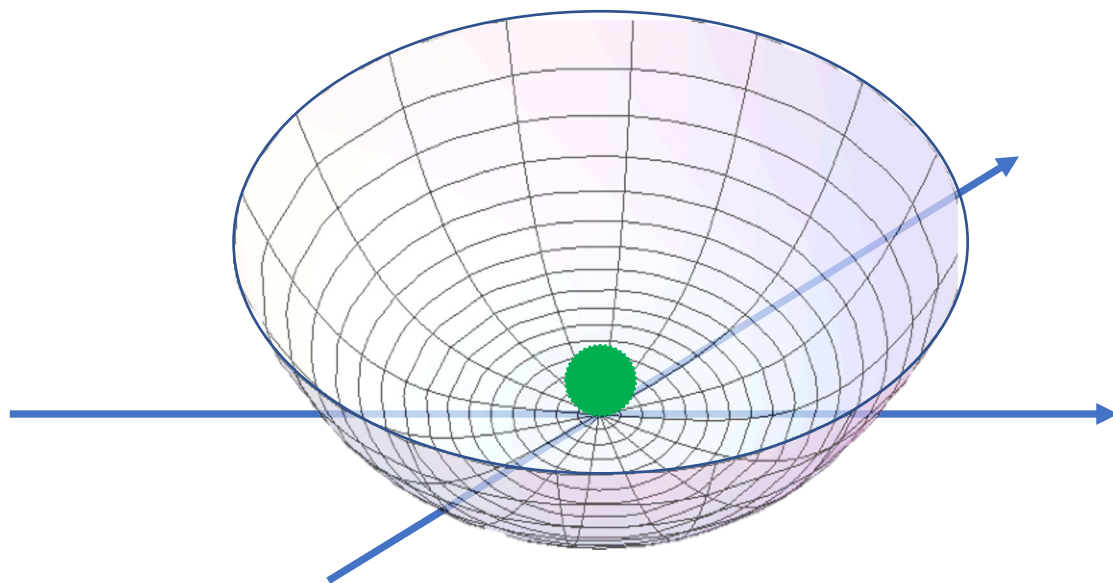
QUARKS (I, II, III)
 LEPTONS (e, μ , τ , ν_e , ν_μ , ν_τ)
 GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (g, γ , Z, W)
 SCALAR BOSONS (H)



• ヒッグス場の自由エネルギー

- 自己相互作用(ϕ^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: $V(\phi) \rightarrow V(v+h)$

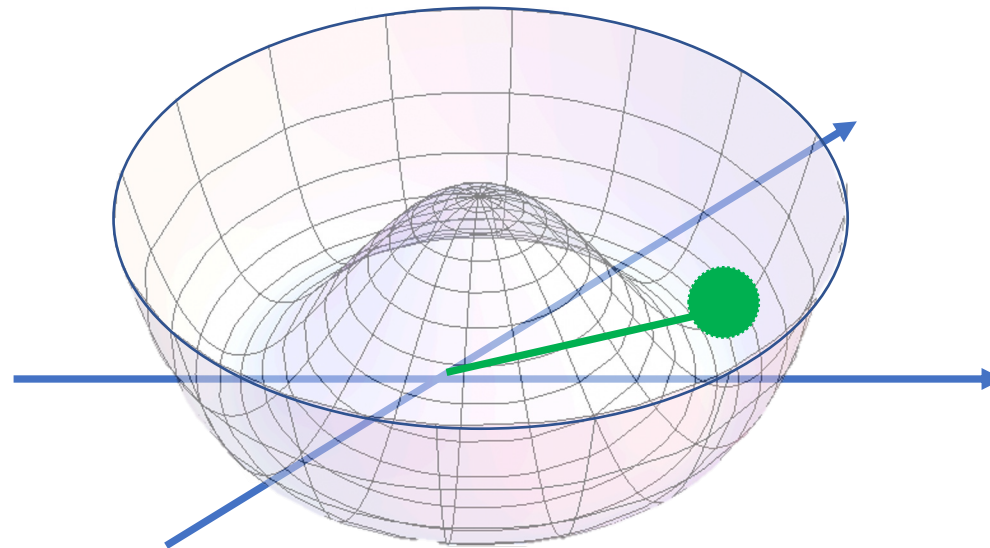
$$V = V_0 + \frac{1}{2}m_h^2 h^2 + \frac{m_h^2}{2v^2}vh^3 + \frac{1}{4}\frac{m_h^2}{2v^2}h^4$$

Higgs mass term

λ_{hhh} HH-production

λ_{4h} HHH-production

The Feynman diagrams show the expansion of the potential. The first diagram, labeled λ_{hhh} HH-production, shows a red dot with three dashed lines extending from it, representing a cubic interaction. The second diagram, labeled λ_{4h} HHH-production, shows a red dot with four dashed lines extending from it, representing a quartic interaction.



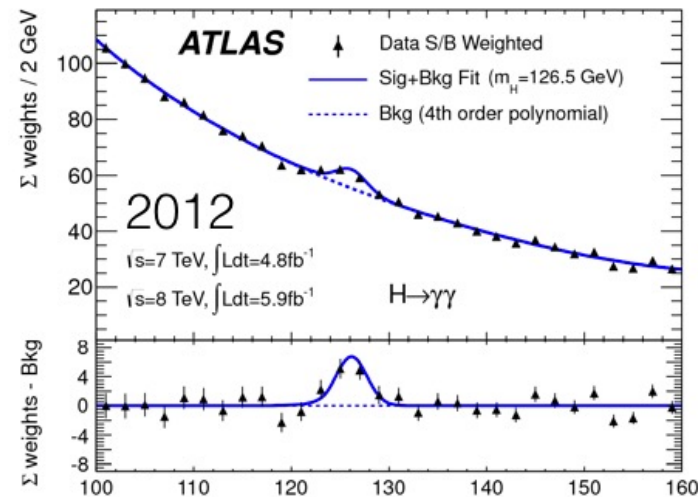
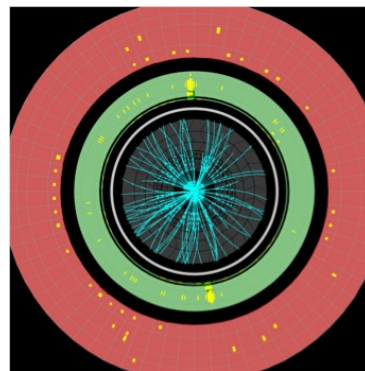
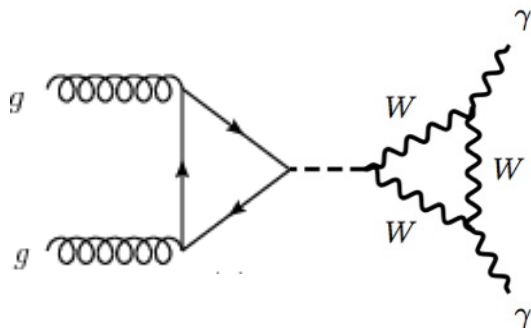
ヒッグス粒子の発見に学ぶ

• 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

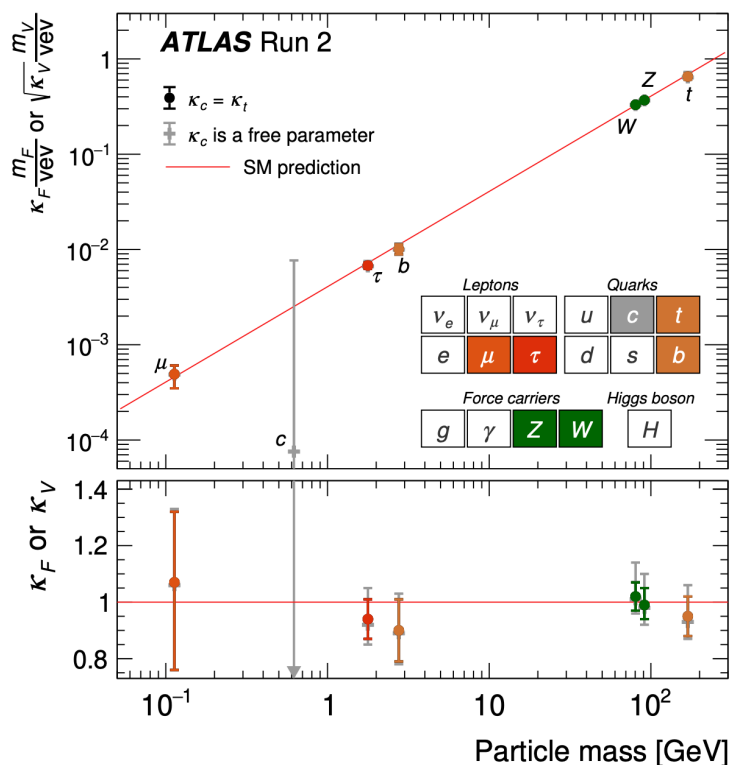


発見前から「ふるまい」
は予言できていた
「Higgs 質量」が、
唯一の unknown なパラメタ

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
 直接の証拠を示した。

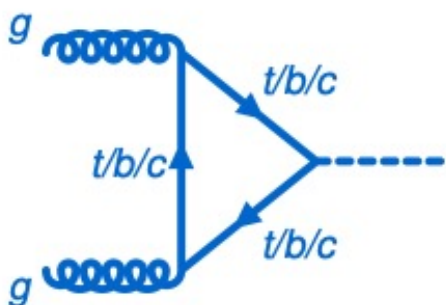
新粒子発見から物理観の確立までのスピード感！
 「エネルギーフロンティアコライダー実験の醍醐味！」
 と思います。

LHCでのヒッグス粒子の作り方&捉え方

• 生成と崩壊

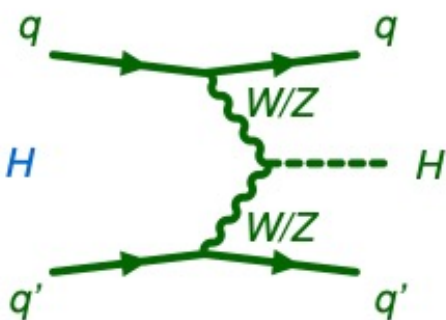
生成可能数は衝突の実験コンディションによるため、現在進行中のRun3のコンディションで計算 (2e34/cm²/s、13.6TeV)

a 1秒で平均1回



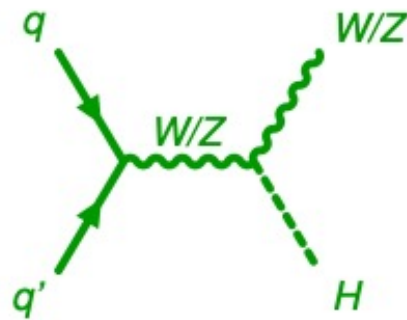
glue-gluon fusion過程

b 1秒で平均0.1回



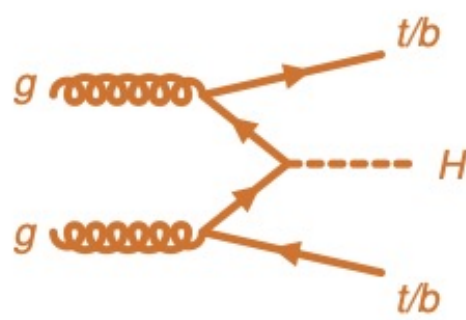
VBF過程

c 1秒で平均0.05回



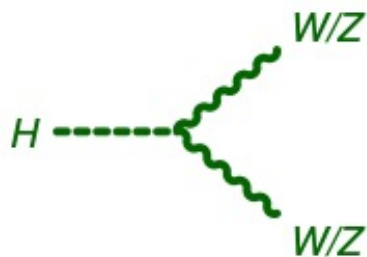
VH過程

d



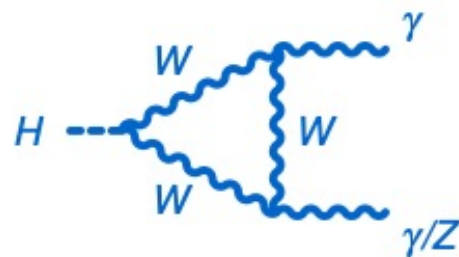
ttH過程

f



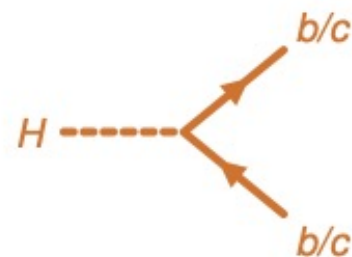
20%/2.5%

g



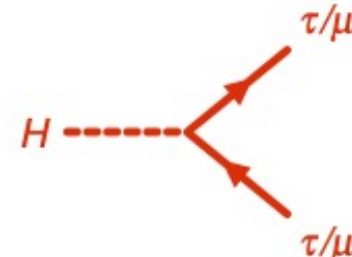
0.2%

h



60%

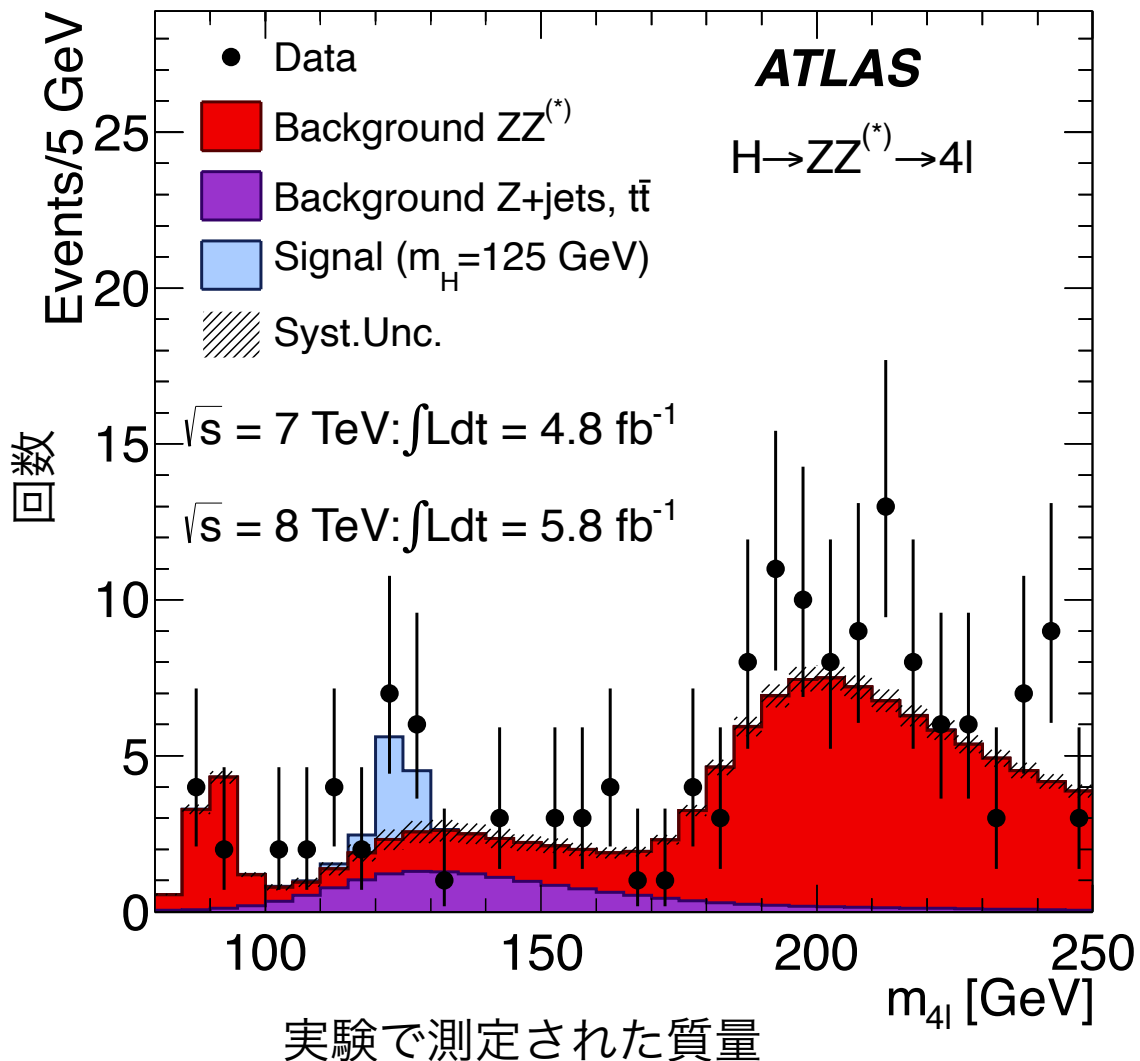
i



6%/0.02%

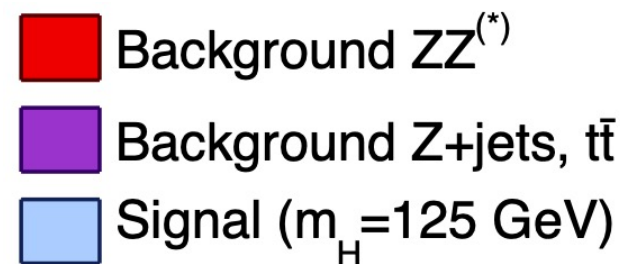
ヒッグス共鳴 @ 125 GeV with $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

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



プロットの見方

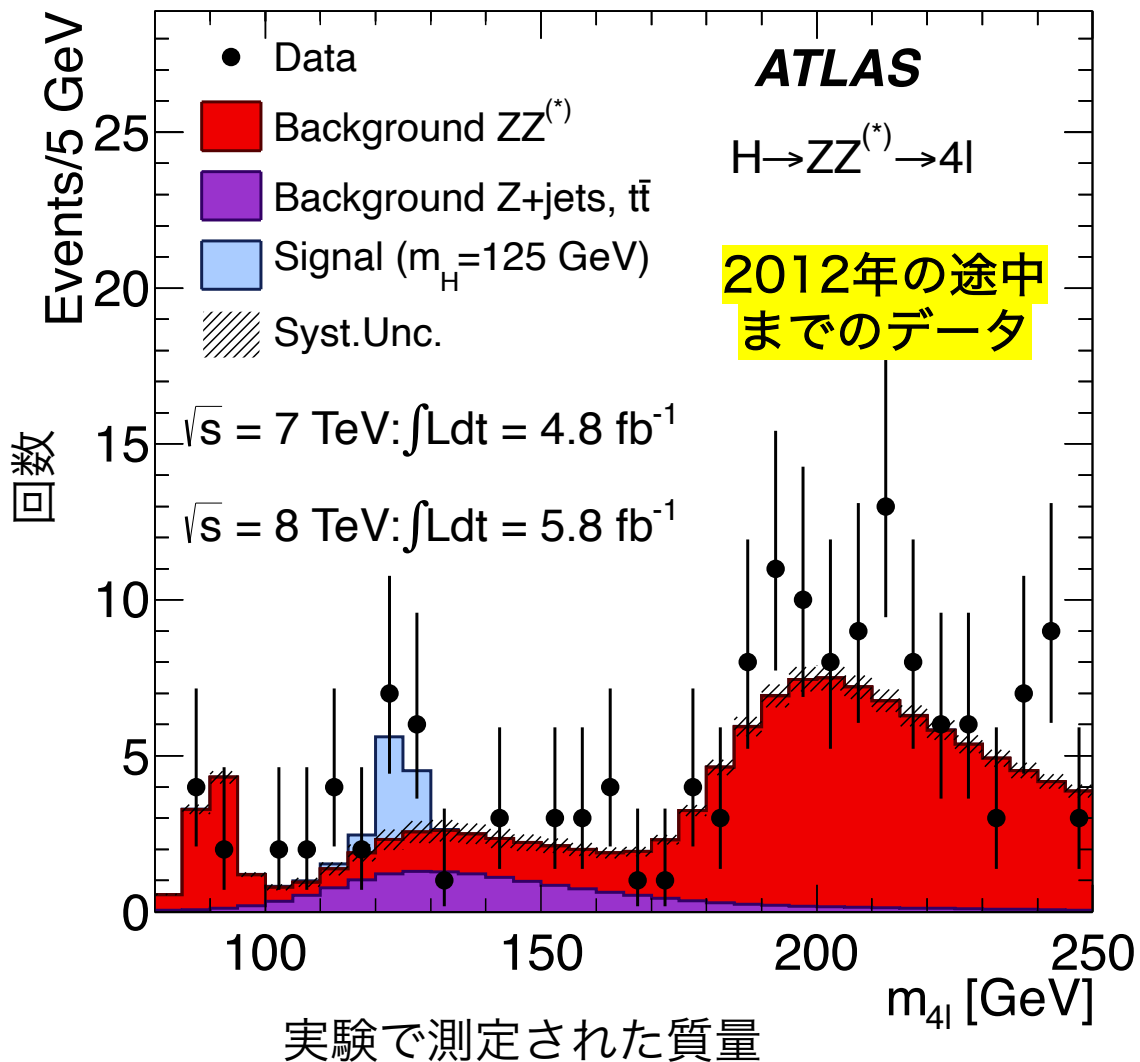
- 黒色の点「●」：実験データ
- 色付きのヒストグラム



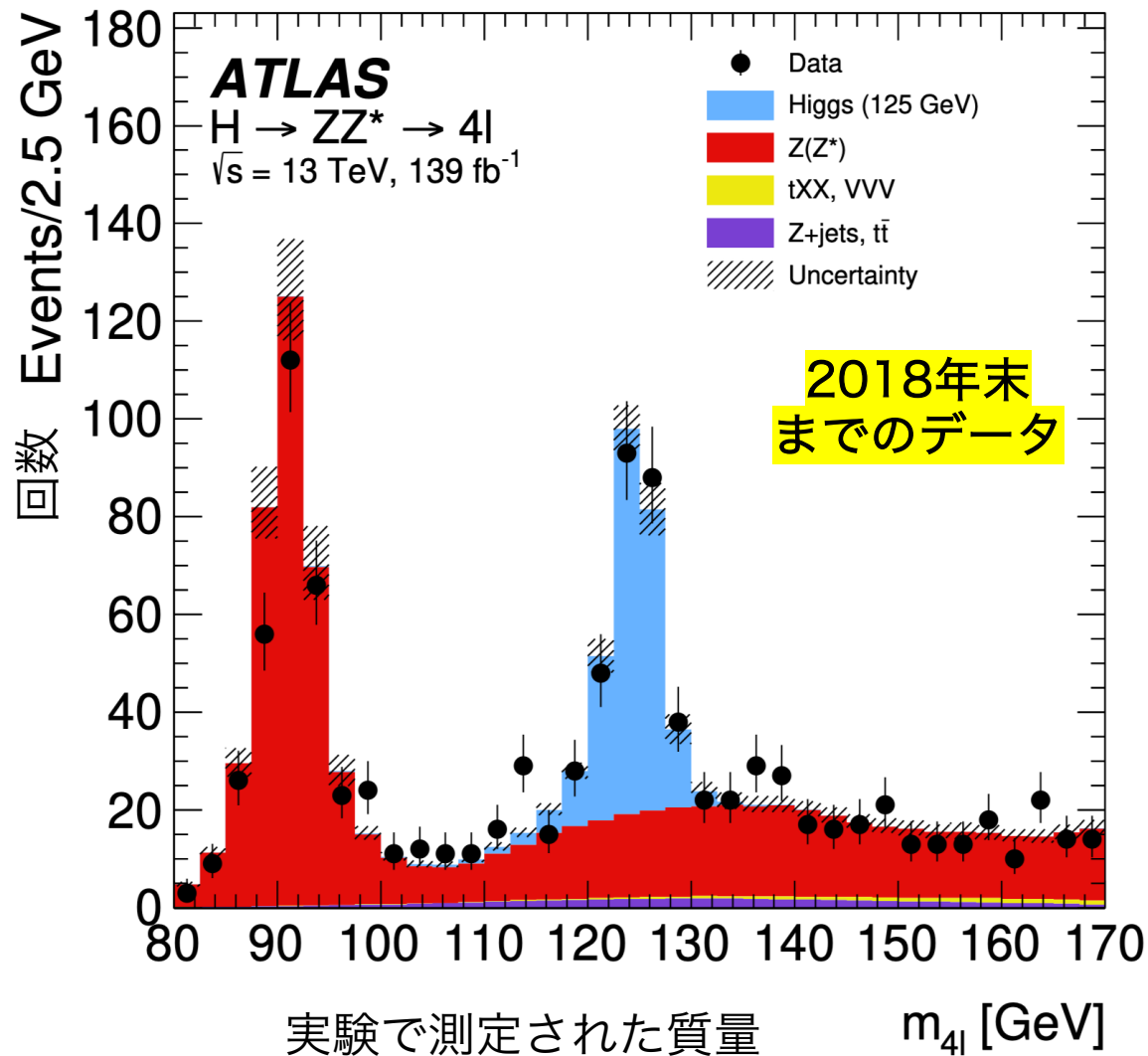
- シミュレーションによる予想値
- 物理プロセスに成分分解して表示
- 黒色の点と比較して考察
- この図の場合は「あきらかにヒッグスの寄与がある」というのが考察のメッセージ

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

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



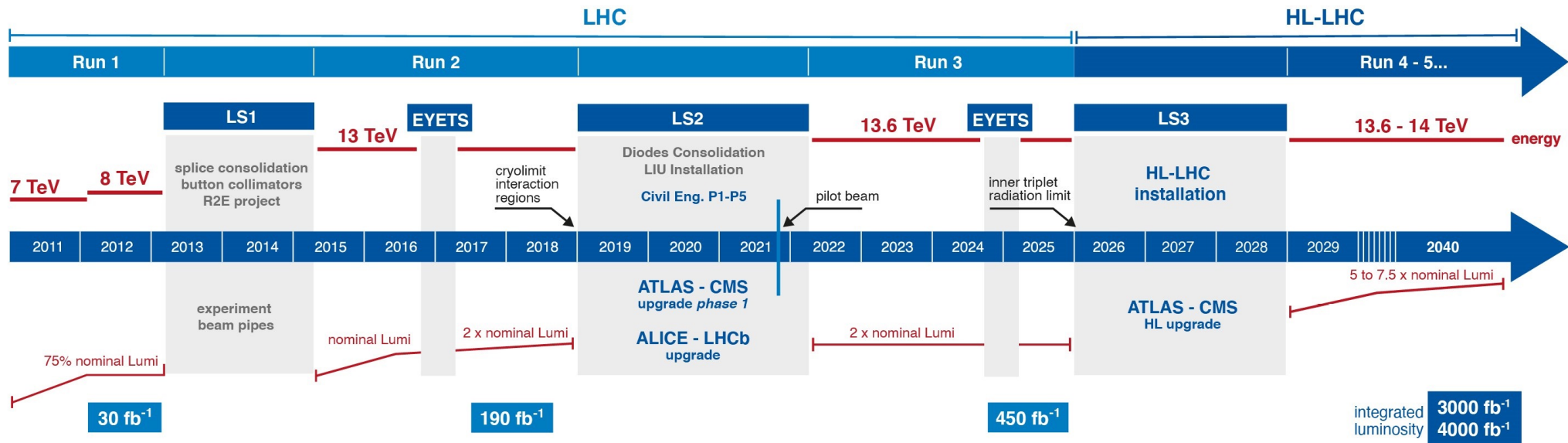
[Eur. Phys. J. C 80 \(2020\) 942](#)



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 fb^{-1} 400,000 個のヒッグス粒子
- Run 2 13 TeV (2015-2018) 150 fb^{-1} 7,000,000 個のヒッグス粒子
- Run 3 13.6 TeV (2022-2025) $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$ (予想) 14,000,000 個のヒッグス粒子(予定)
- HL-LHC 14 TeV (2029-2041) 3000 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

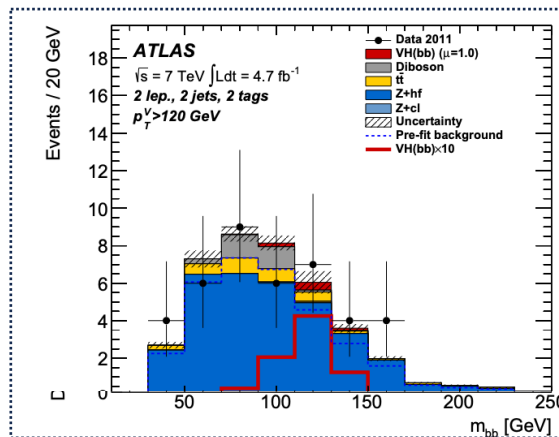


ヒッグス粒子でわかったこと (Run1)

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

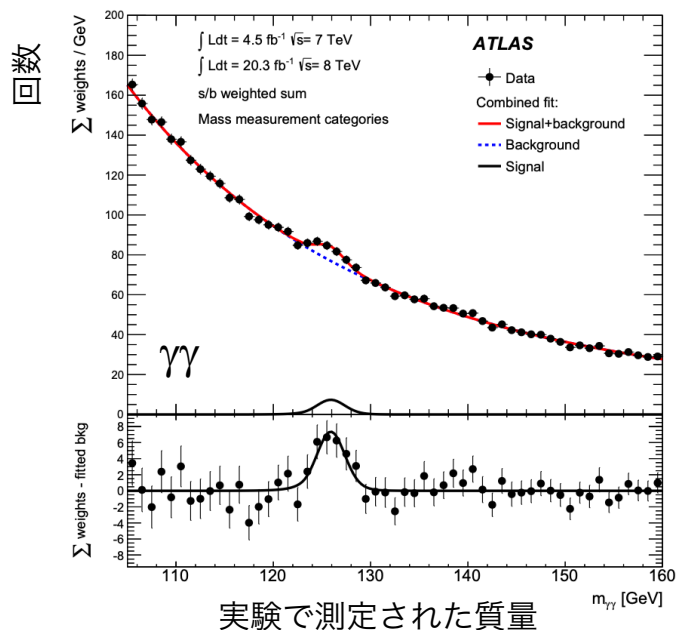


参考: H \rightarrow bb (崩壊分岐比=60%)
は当時 未確定 (Run2で確定)

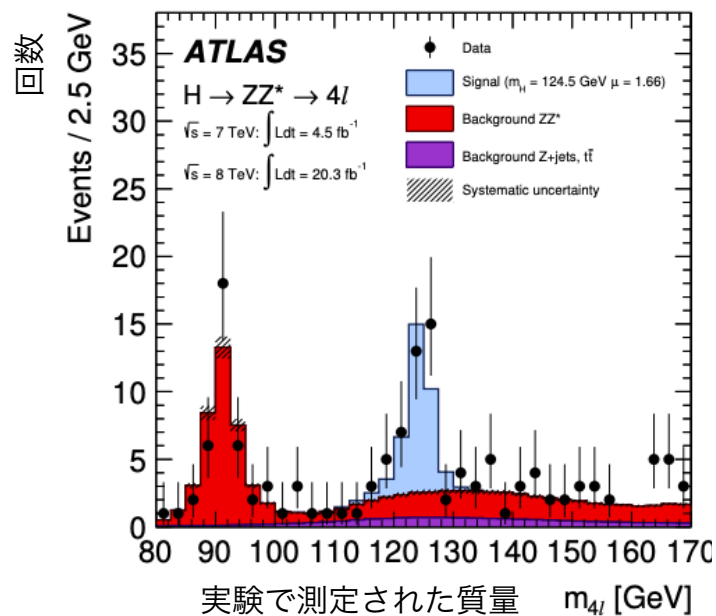
信号崩壊分岐比◎
質量再構成△、バックグラウンド△

メモ: 信号数だけじゃ語れない!

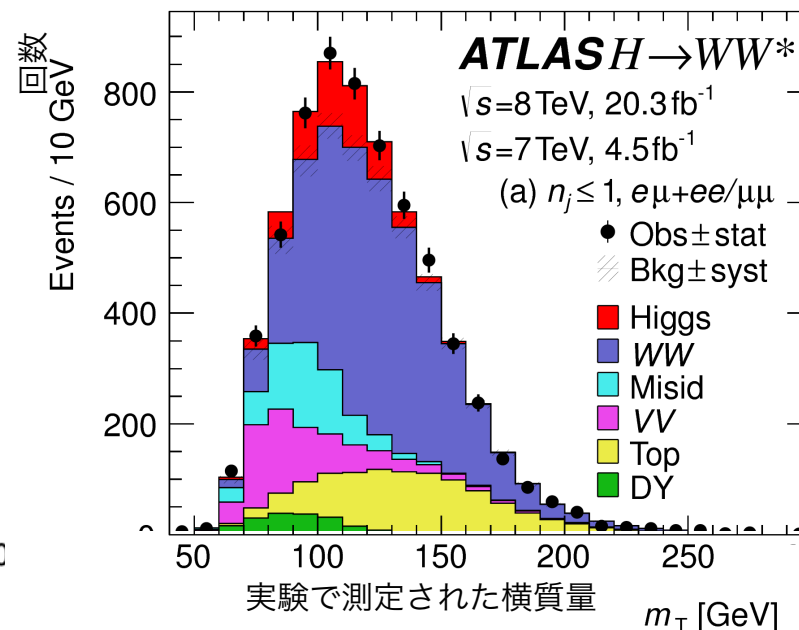
信号崩壊分岐比△
質量再構成◎、バックグラウンド○



信号崩壊分岐比 X
質量再構成◎、バックグラウンド◎



信号崩壊分岐比◎
質量再構成△、バックグラウンド○



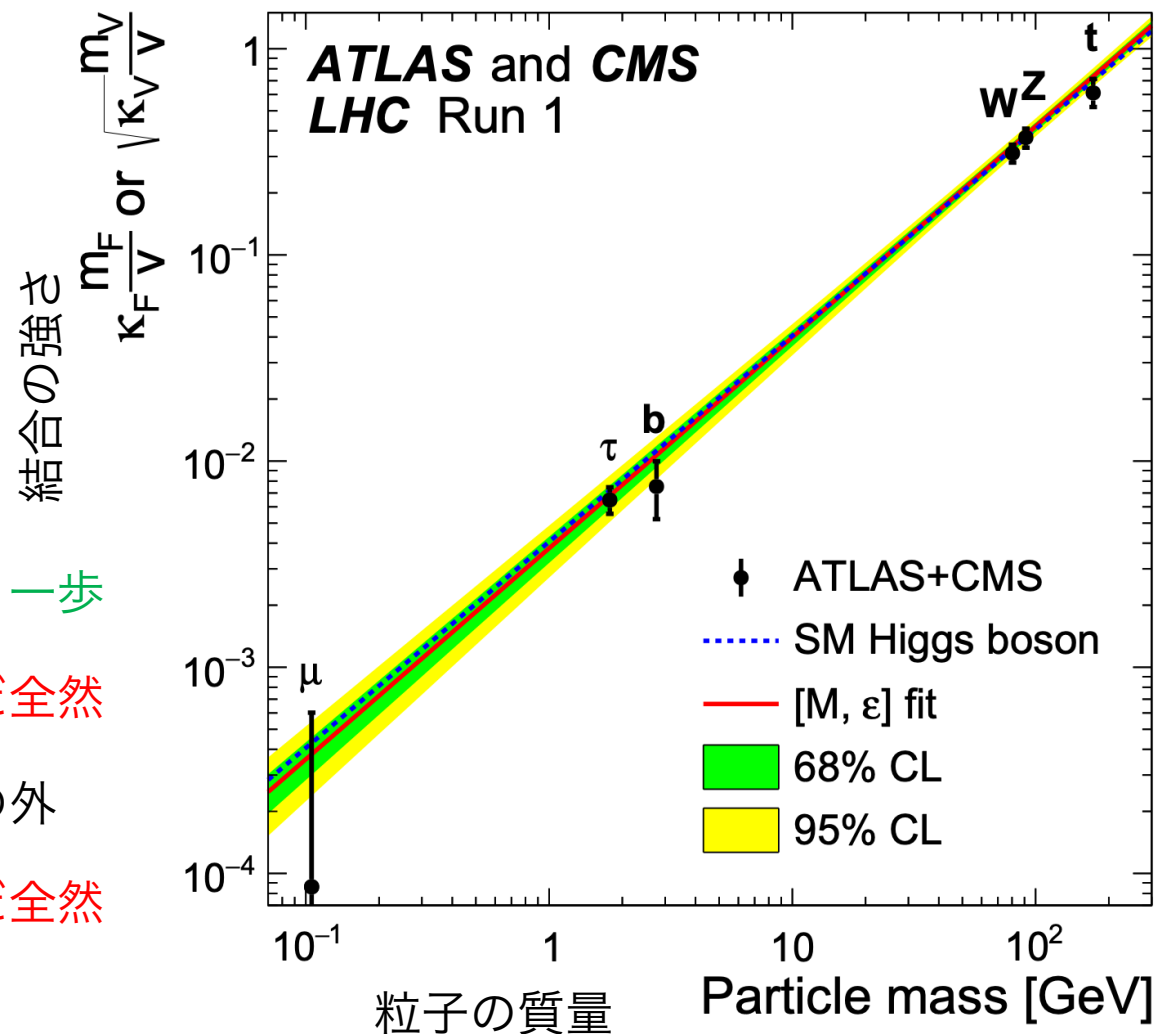
ヒッグス粒子でわかったこと (Run1)

• 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

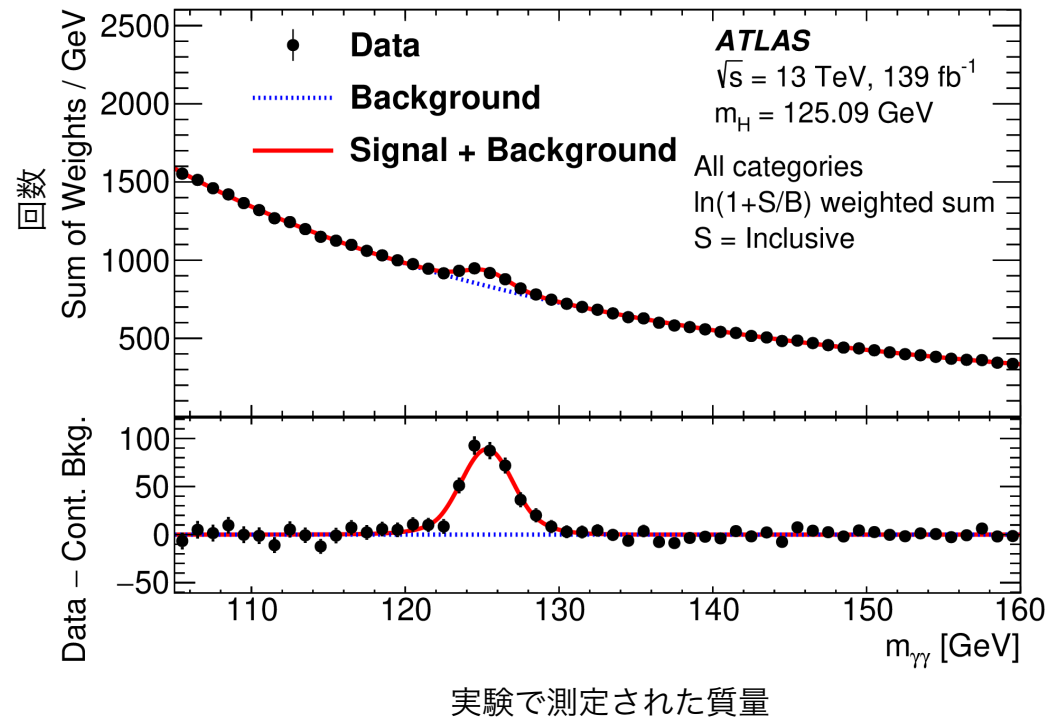
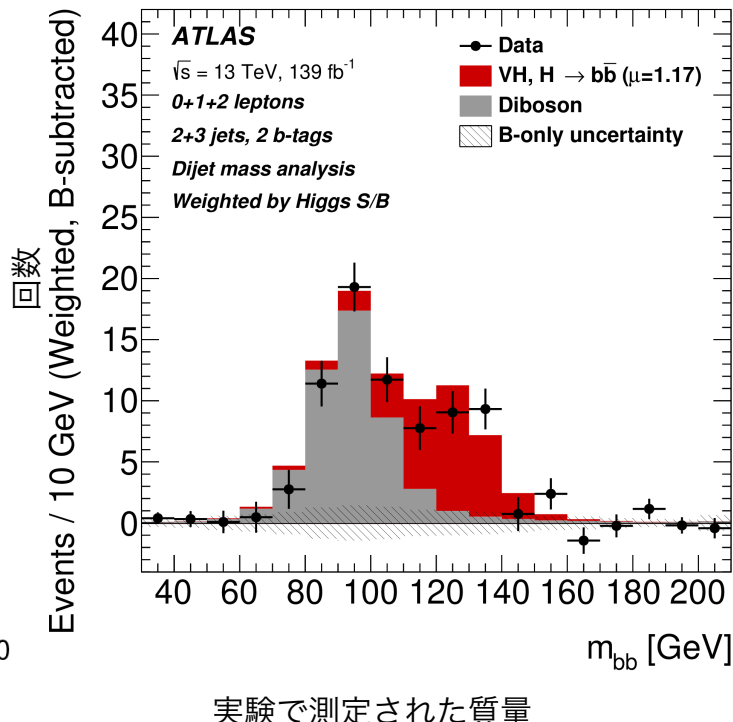
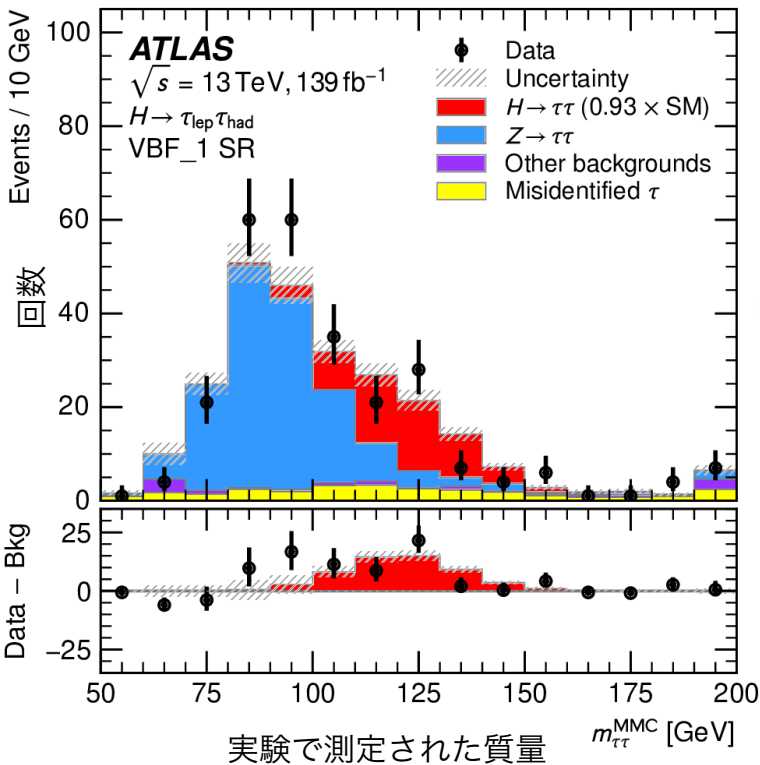
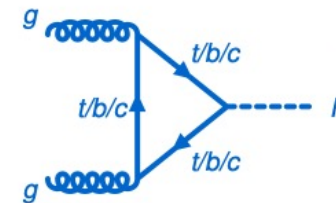
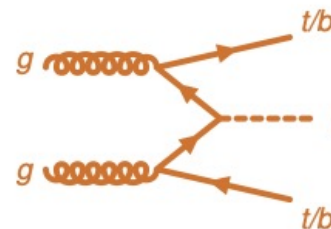
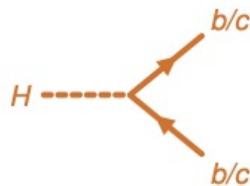
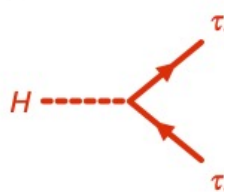
話の外

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

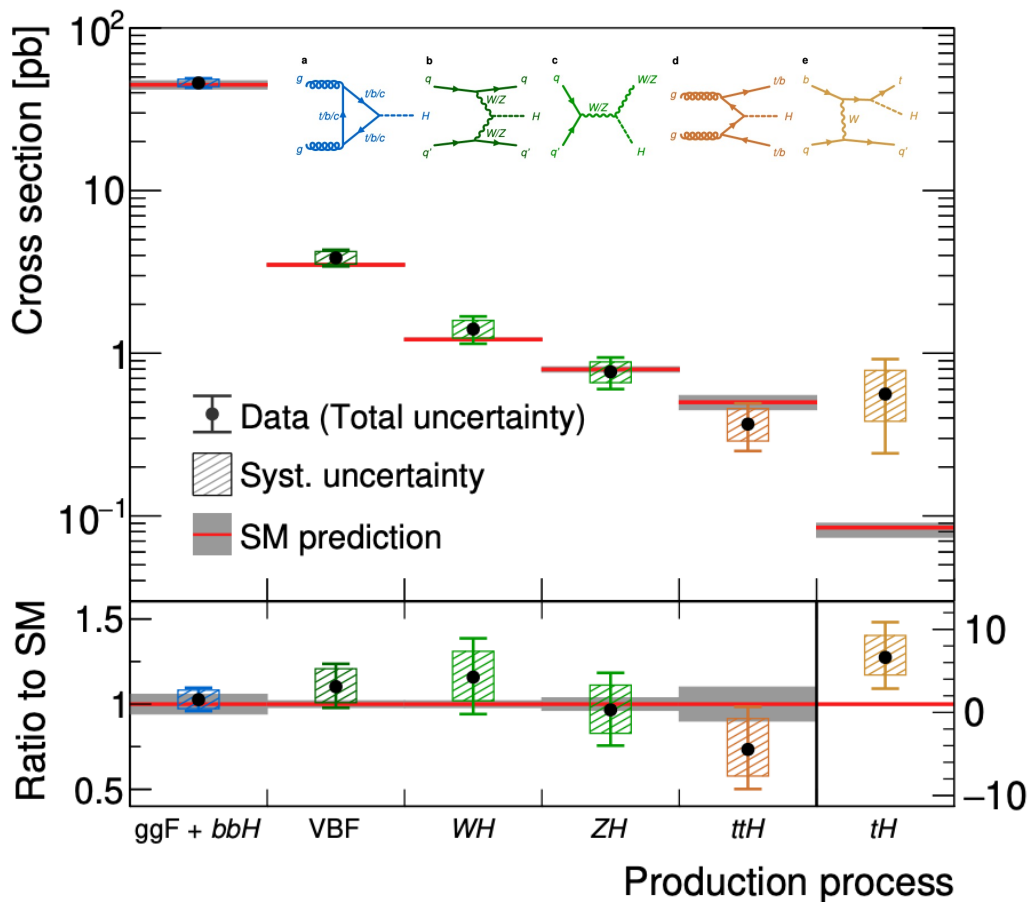


ヒッグス粒子でわかったこと (Run2)

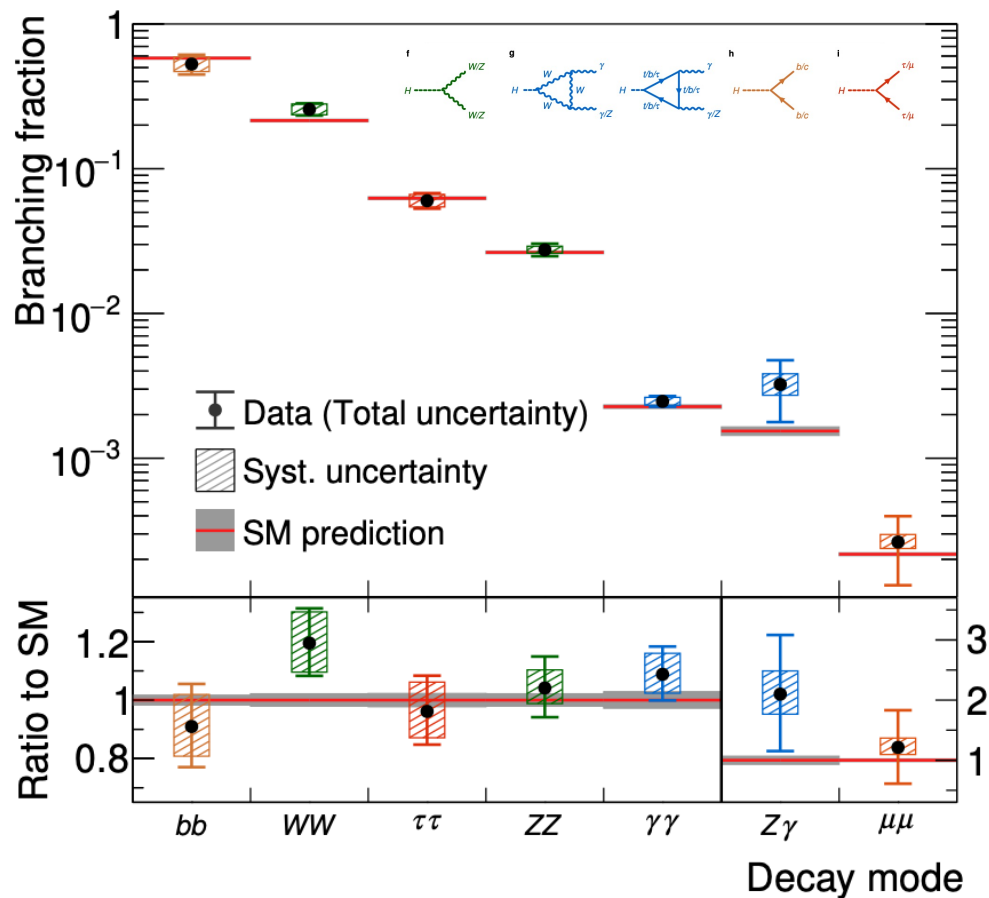
Run 2 (7,000,000ヒッグス)

- 「メイジャー」な全生成過程・全崩壊過程を観測

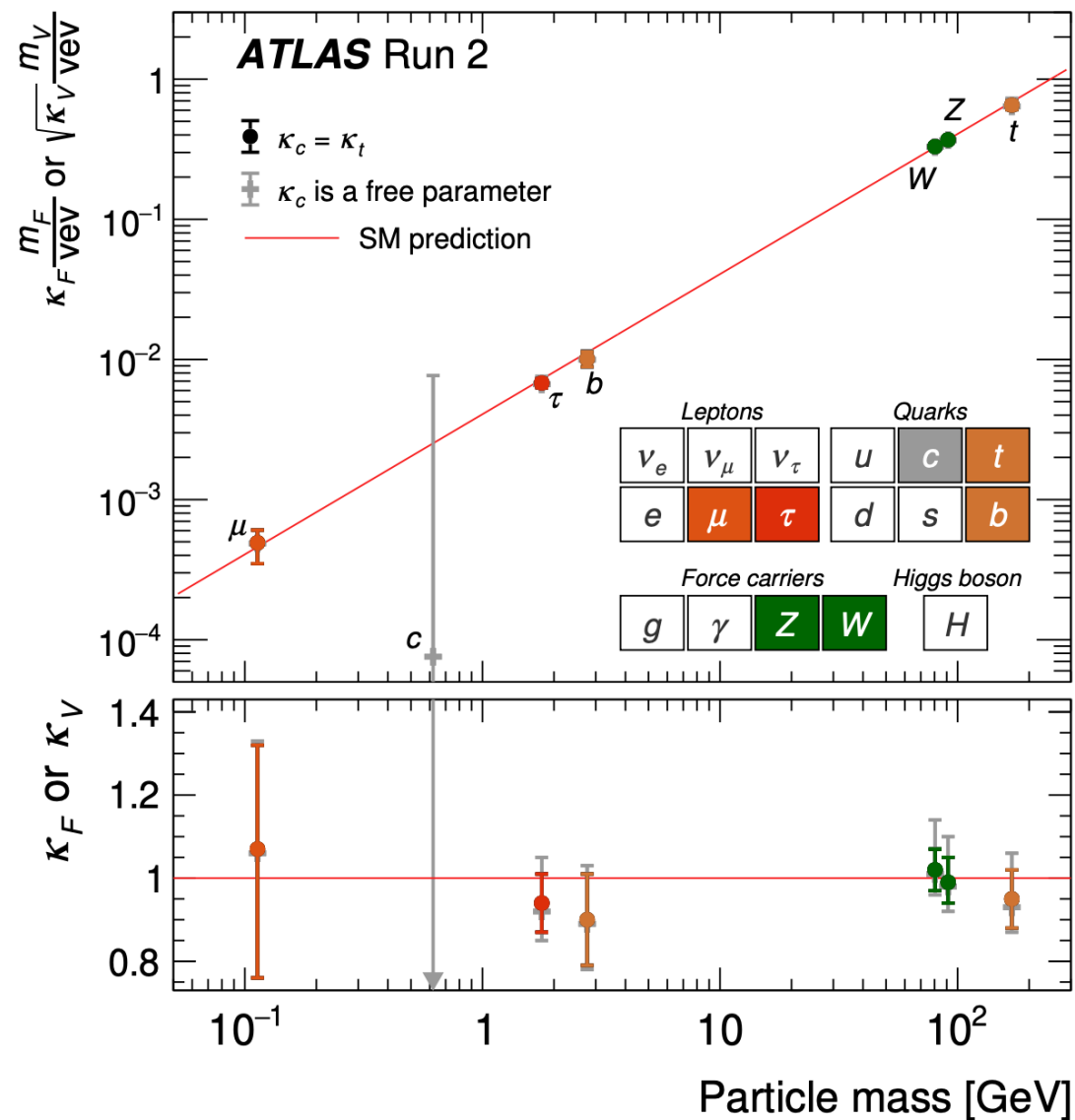
それぞれの生成過程の生成断面積 (レポート)



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)



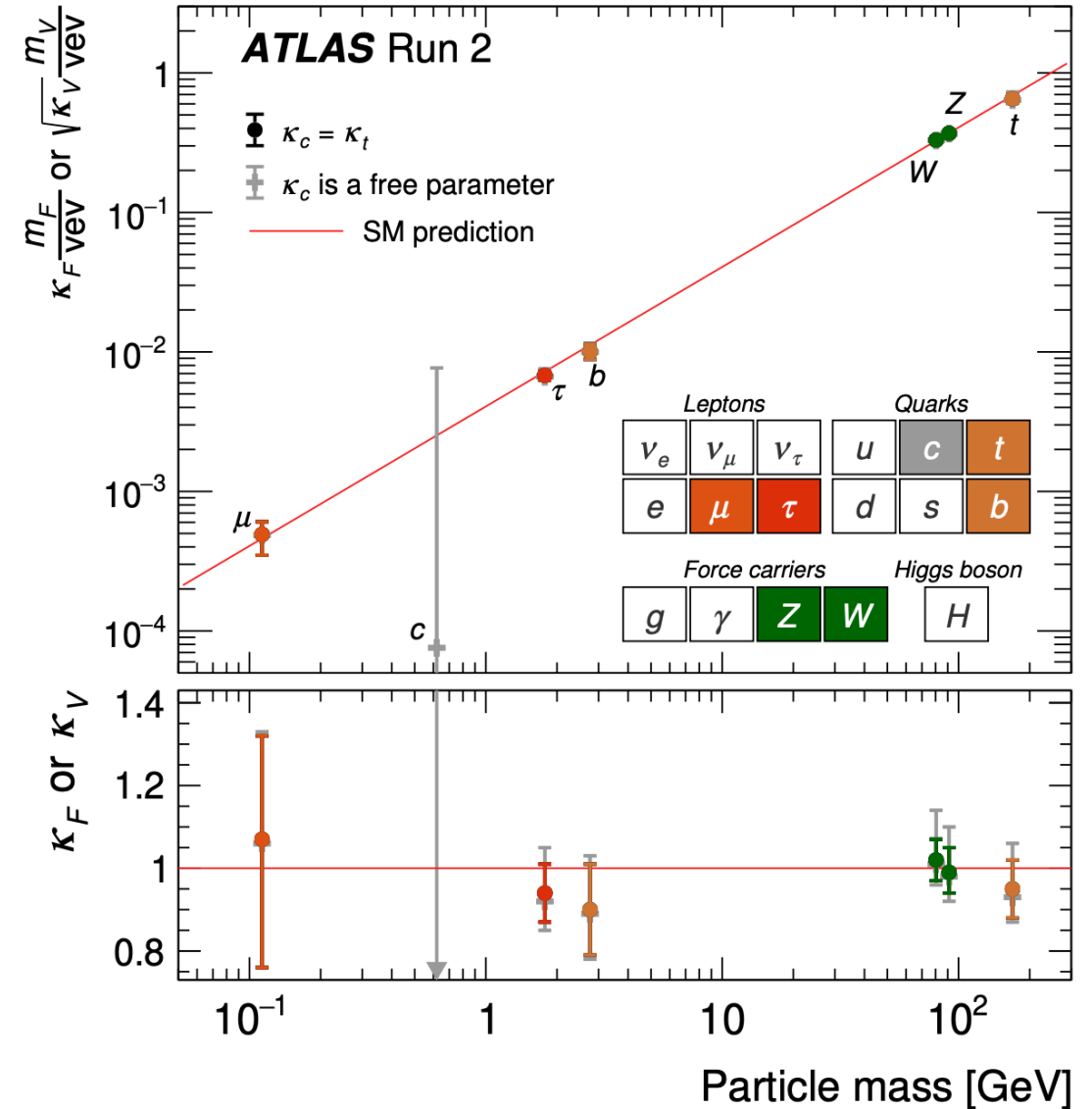
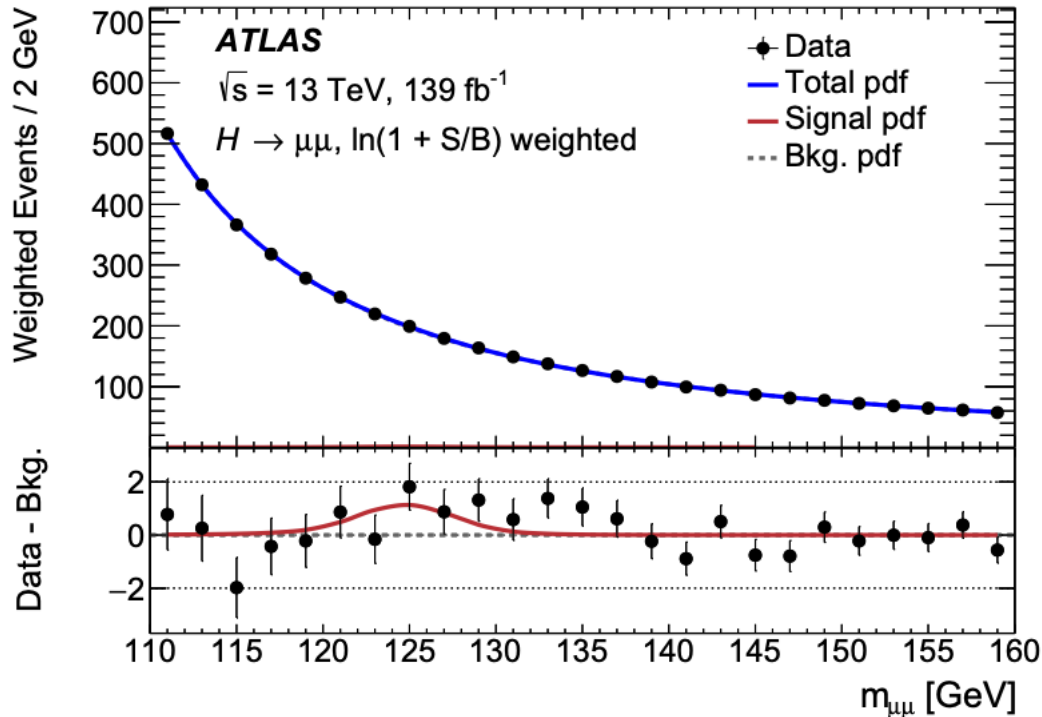
ヒッグス粒子でこれからわかること

- 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 (21,000,000ヒッグス)

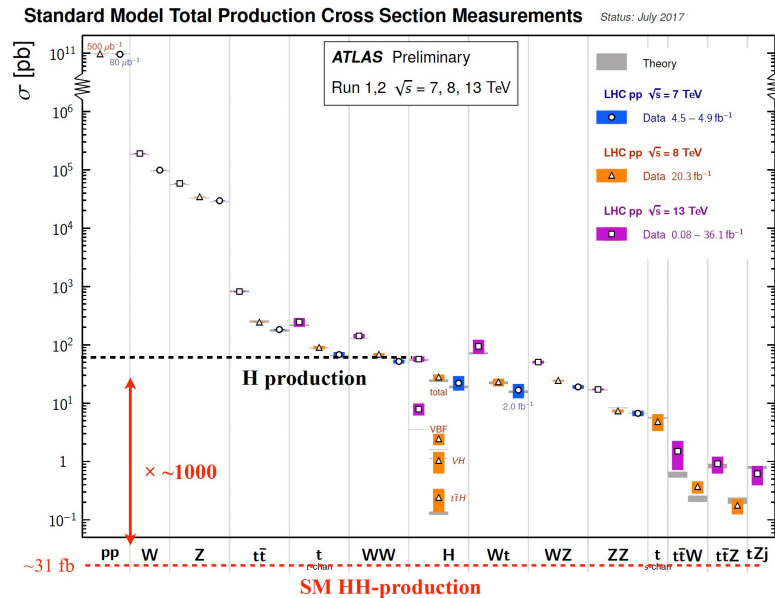
で観測を目指す



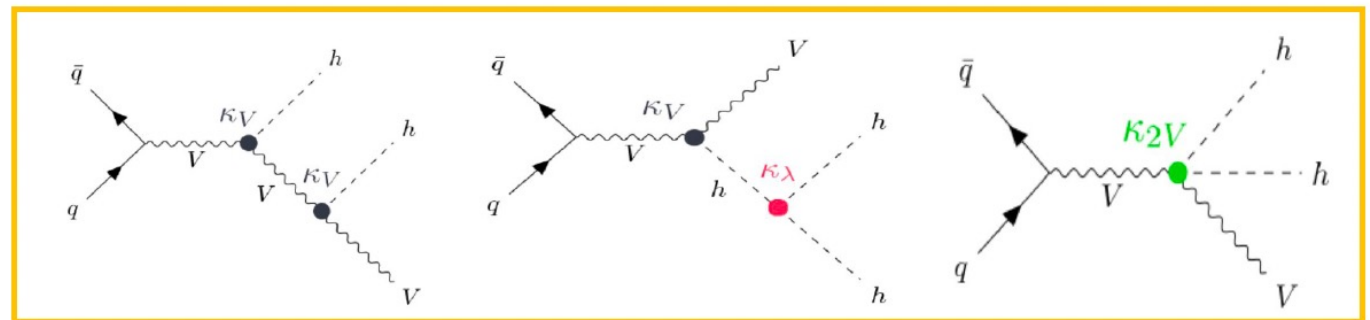
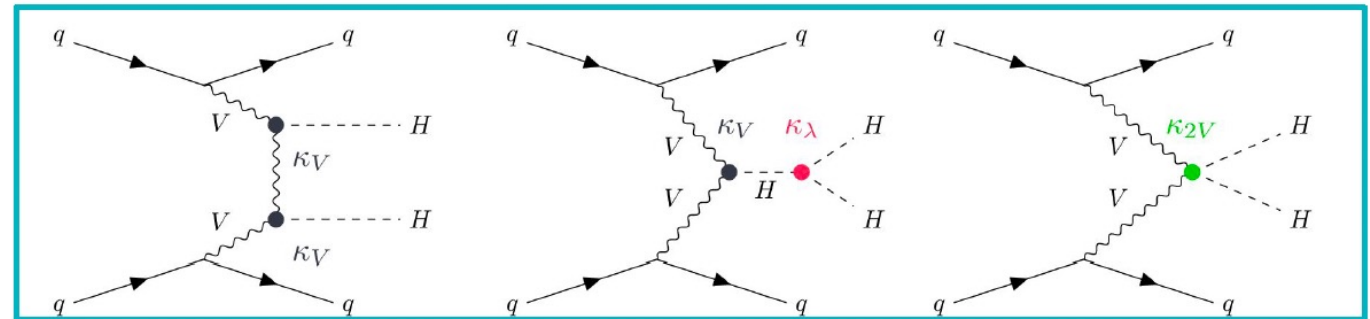
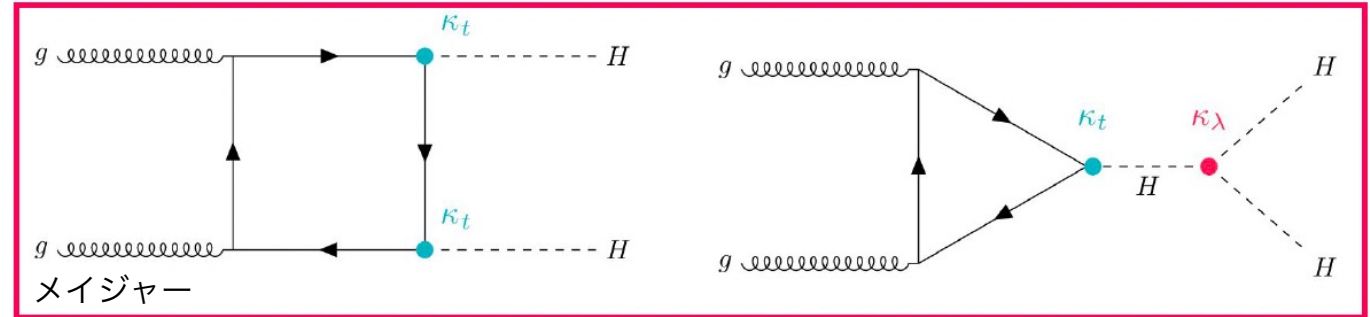
ヒッグス粒子でこれからわかること

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！

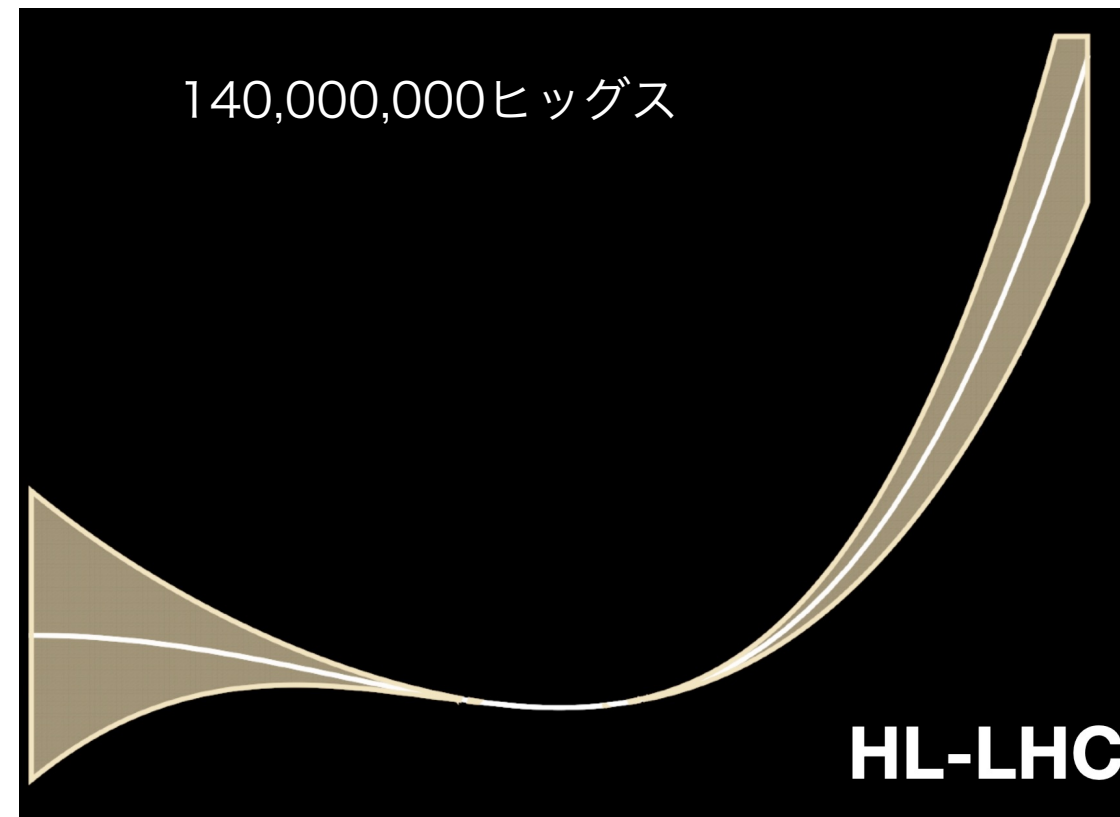
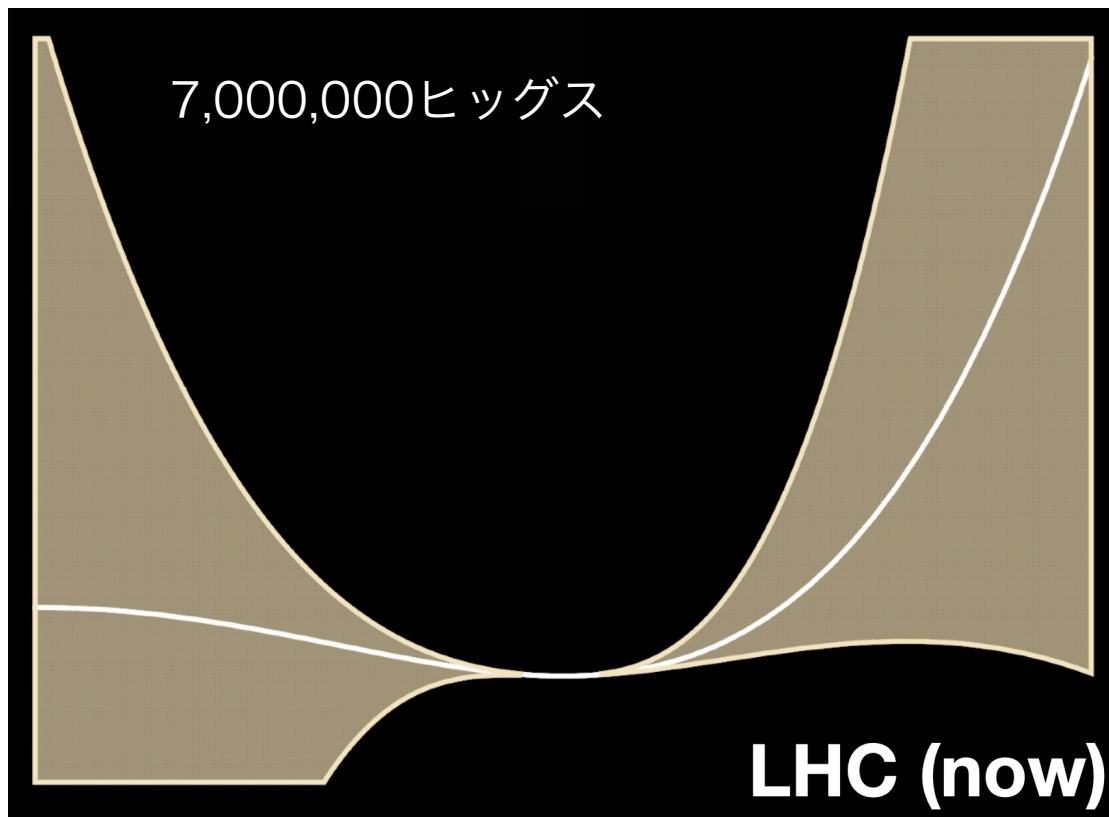


いろいろな生成ダイアグラム



ヒッグス粒子でこれからわかること

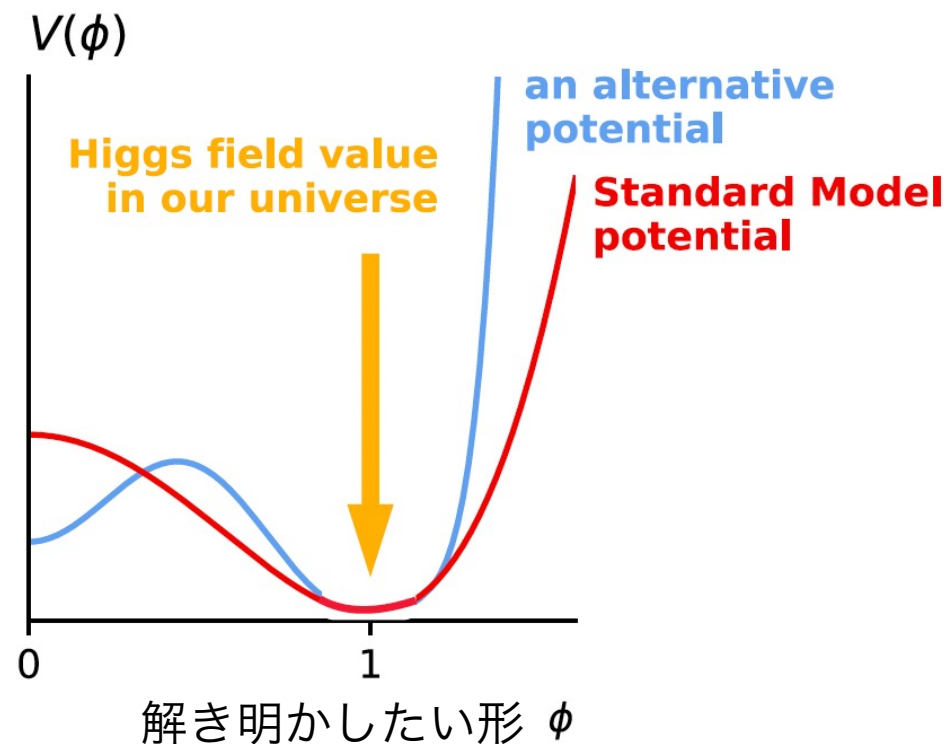
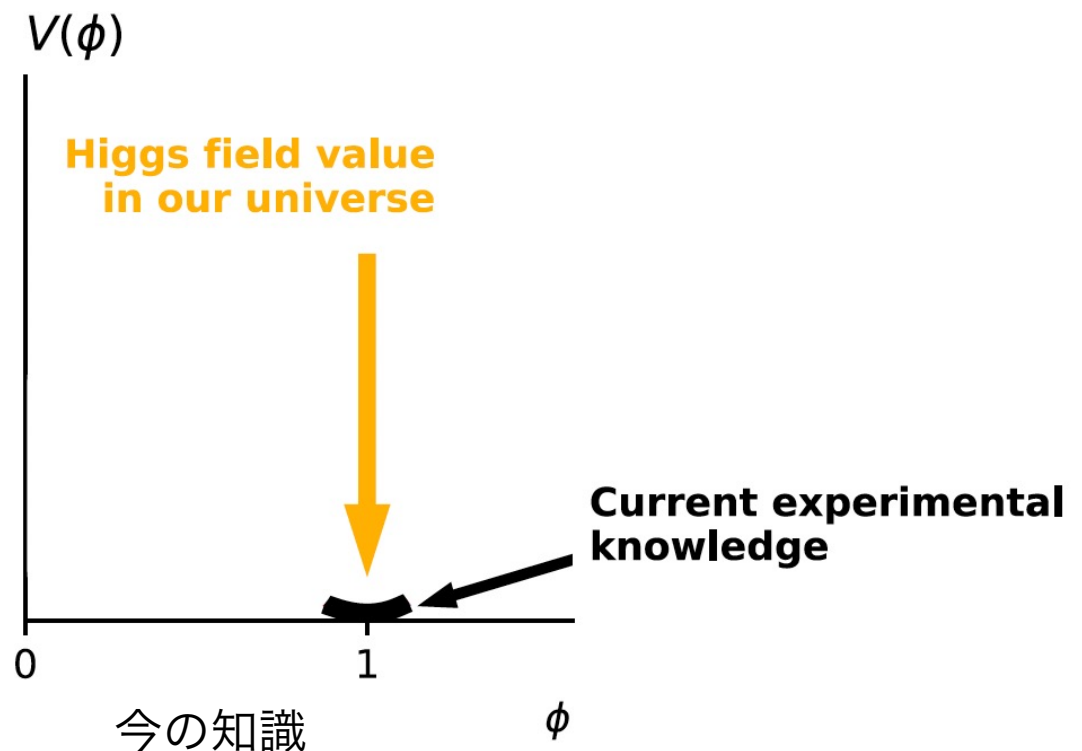
- ヒッグスのポテンシャルをより詳細に知ることができる
 - 今はまだ「底」のあたりが詳細にわかっただけ



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

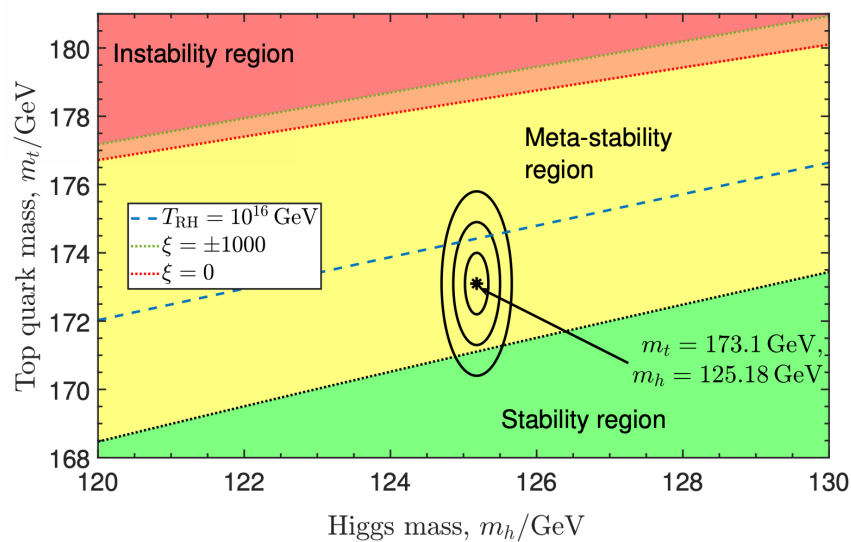
- 相転移にトンネル効果が必要な場合（1次相転移）、
宇宙の物質反物質の非対称性の謎が、ヒッグス相転移で説明できる可能性あり



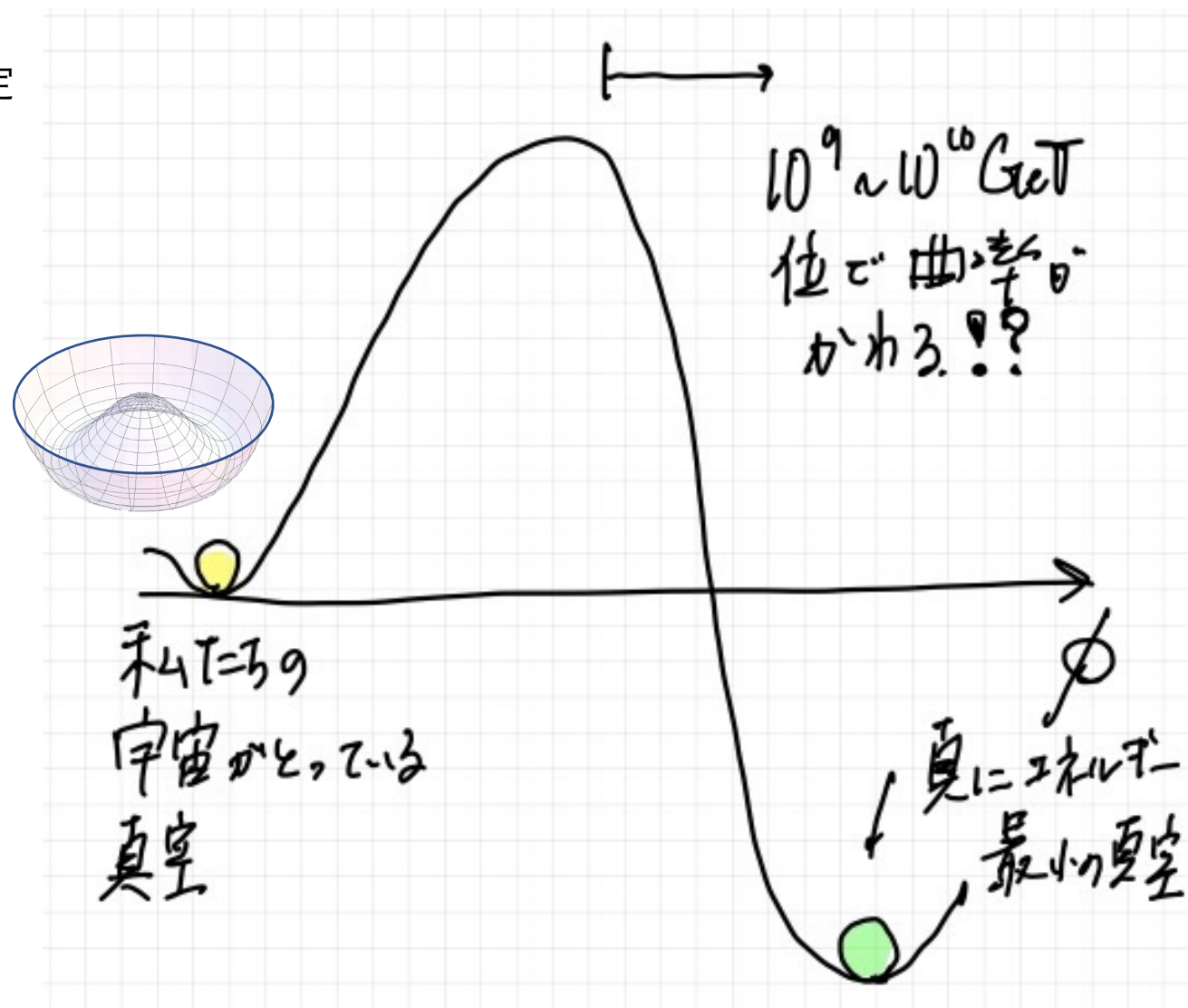
ヒッグス粒子でこれからわかること

• 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

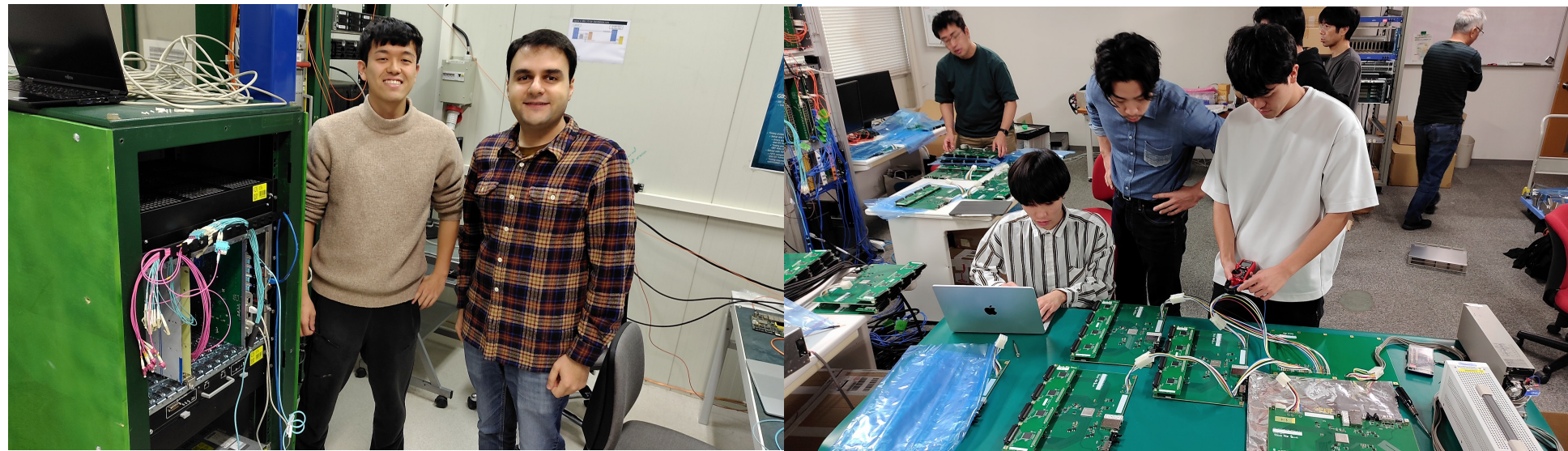


ミュオントリガーの研究について

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、やっぱり面白いと思います。月曜日の石野さんの授業で

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



もう少し理論的な話

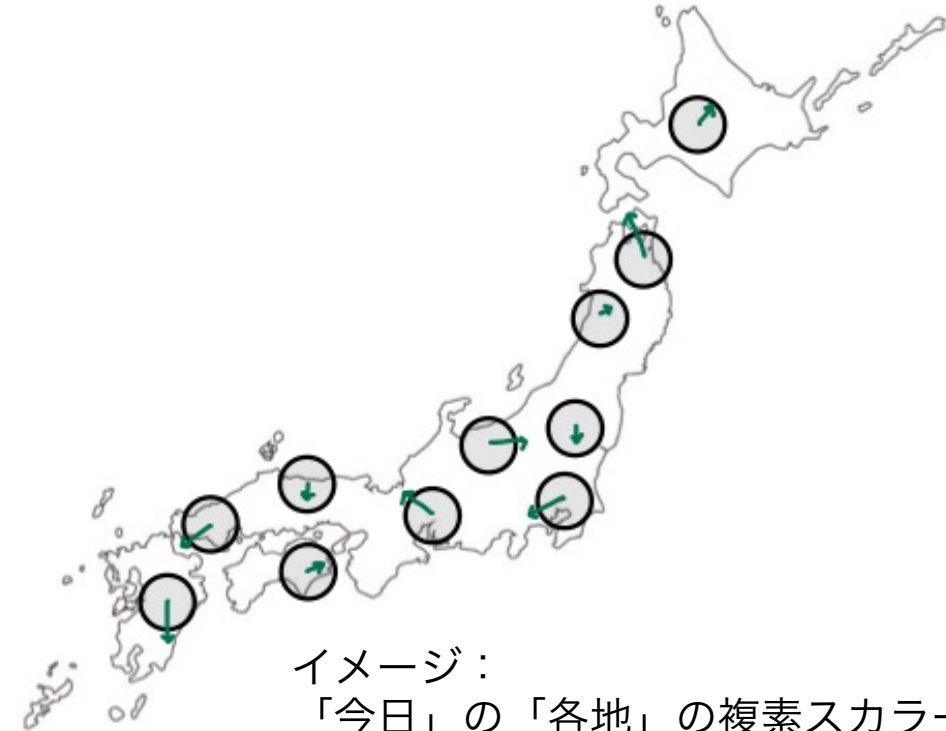
自発的対称性の破れ

• 場と波の定性的な説明

- 場所と時間を決めたら一つの値がきまるもの
 - 「温度（スカラー場）」 「風速（2次元ベクトル場）」 「水面の高さ（スカラー場）」
- 波（場の励起）、時間変化、位置変化
 - 「温度時間変化」 = 「温度場の波」

• ヒッグス場は「複素数の場」

- 場所と時間を決めたら一つ複素数が決まる。
 - 2つの自由度
 - 大きさ $(f(x,t))$ と位相 $(a(x,t))$
- 正しくは複素スカラー二重項
 - $SU(2) \times U(1)$



矢印の方向は実際の空間の東西南北とは無関係の空間

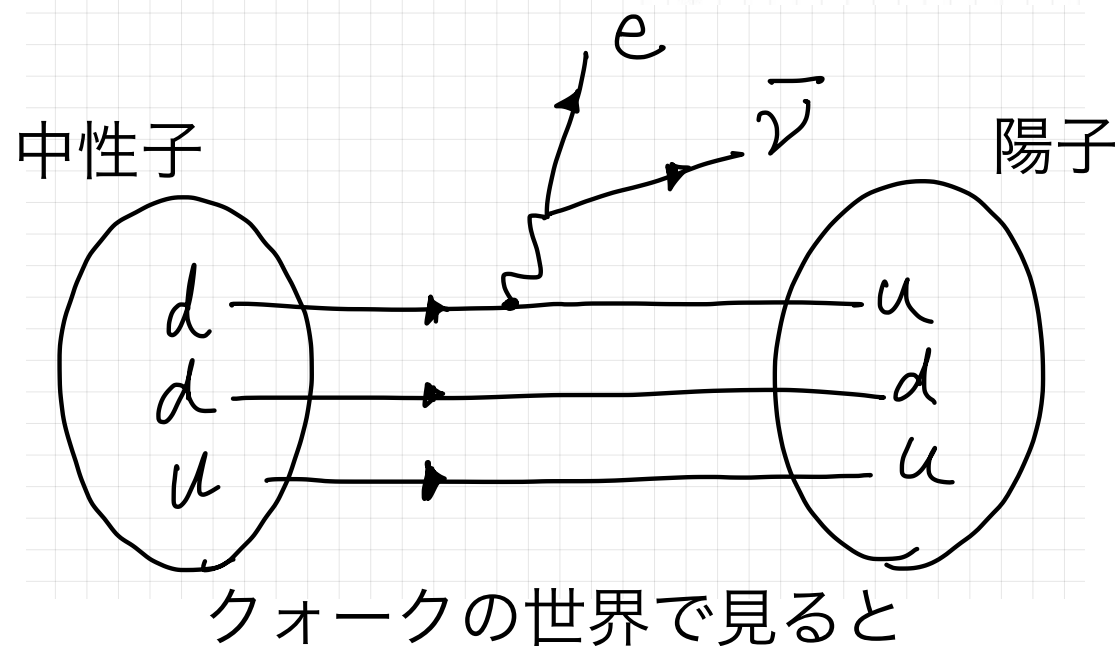
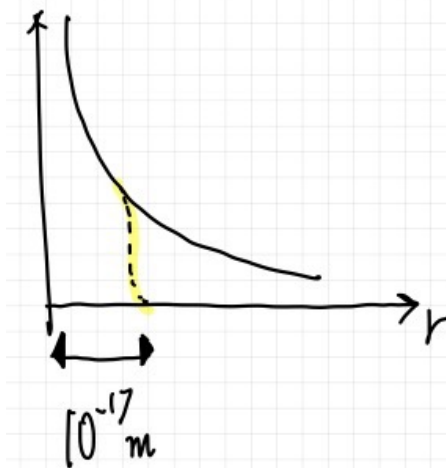
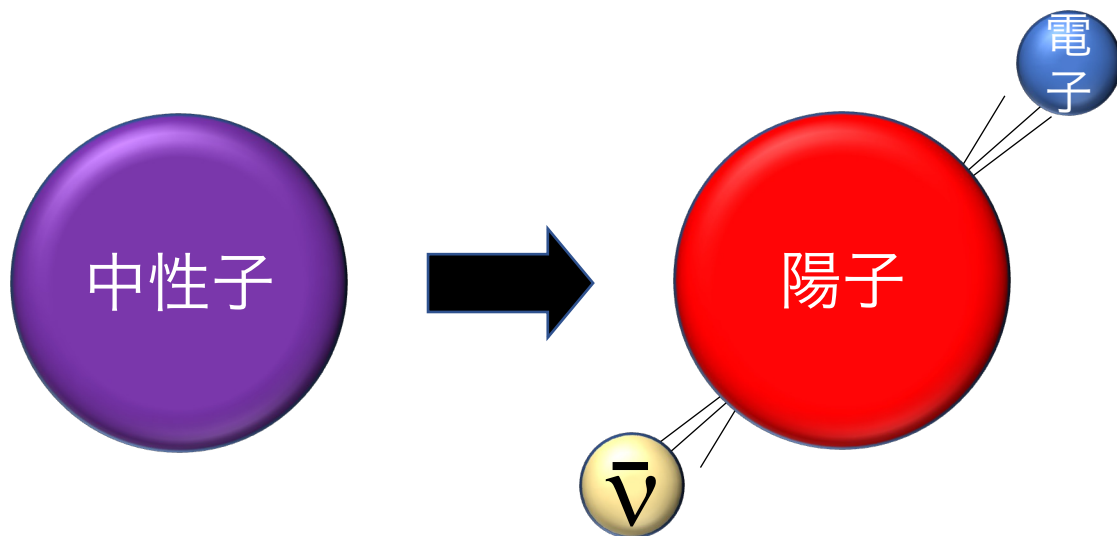
自発的対称性の破れ

素粒子物理学にはとっても変な相互作用

- 短距離力で、遠くに離れた相手には伝わらない。
 - 「重たい」Wボソンの交換による相互作用。
- 電荷の異なるダウンクォークとアップクォークを変える。
 - 一見対称でない粒子の入れ替え（電荷がことなる粒子）。

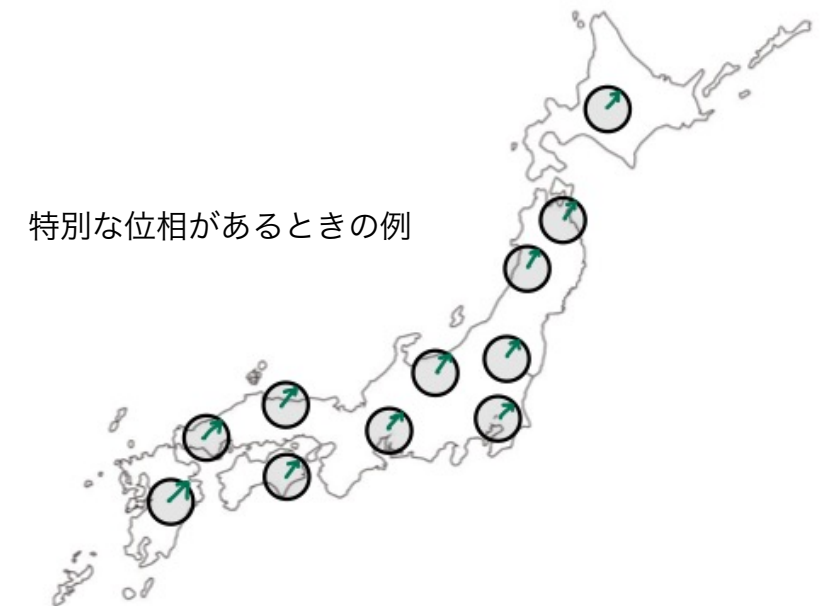
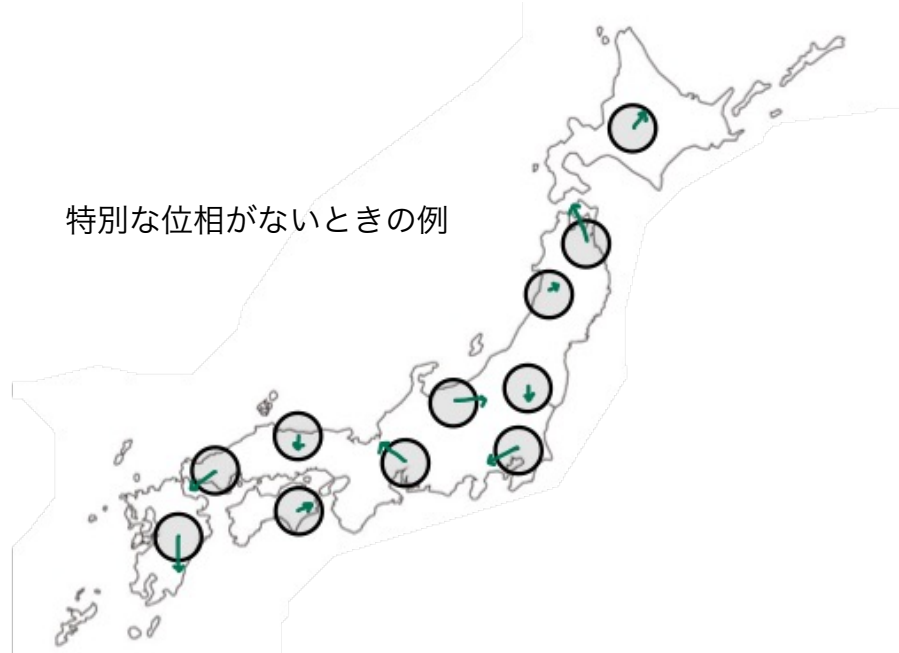
位相の対称性が破れているとして説明

- いわゆる「U(1)ゲージ対称性」を満たさない状態。



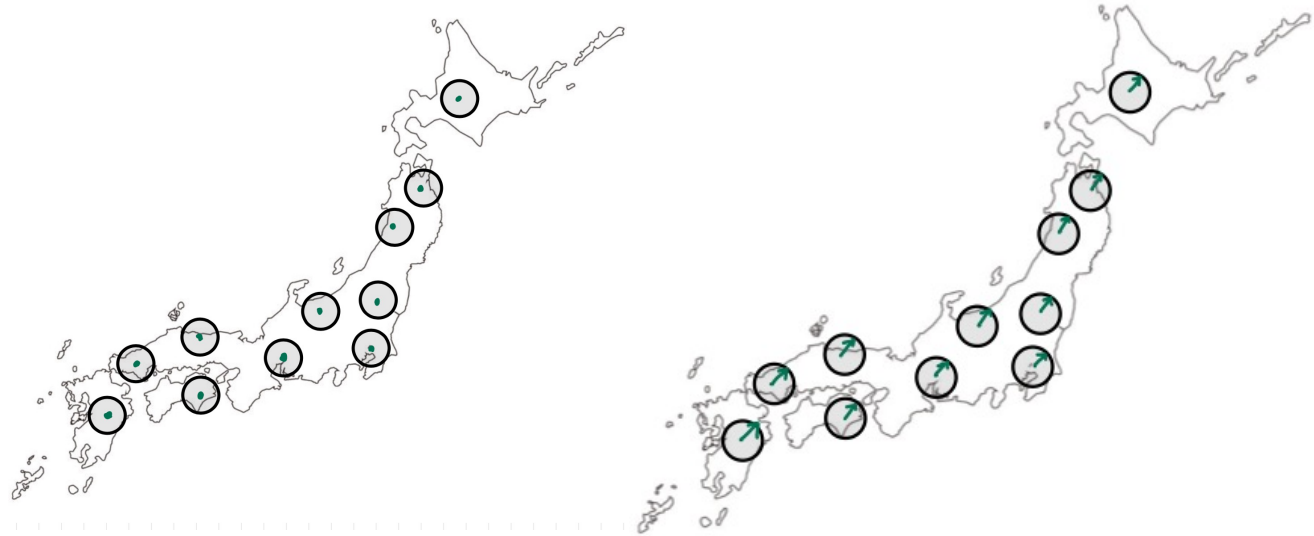
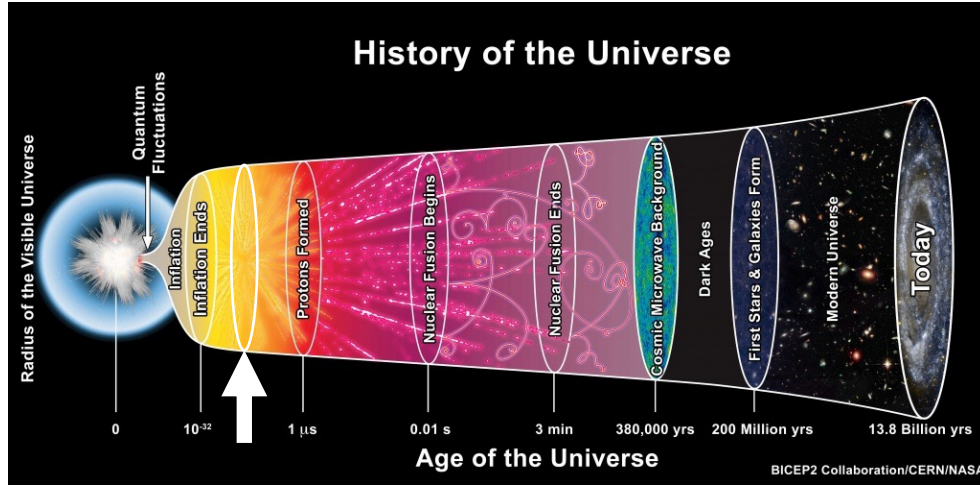
自発的対称性の破れ

- 「自発的対称性のやぶれ」というメカニズムを応用して考えます。
 - 本当はどの向きも対称で、エネルギー的にどの方向がお得とかはない (対称性)
 - **ただし位相は周りの人と同じ方向を向きたがる性質をもっている。**
 - 時間的・空間的に位相が変わるためには余計なエネルギーが必要、という場の特徴。
 - まわりの人達と、同じ向きを持ちたがる。
 - 位相方向の首振りも伝わる。変位が顕なエネルギーの違いを持たないことを質量ゼロの波といいます (南部・ゴールドストーン波)。
 - 質量がある波は、変位の違い自身が顕なエネルギーの違いを持つ波。



宇宙誕生 10⁻¹² 秒後にヒッグス場が凍った 26

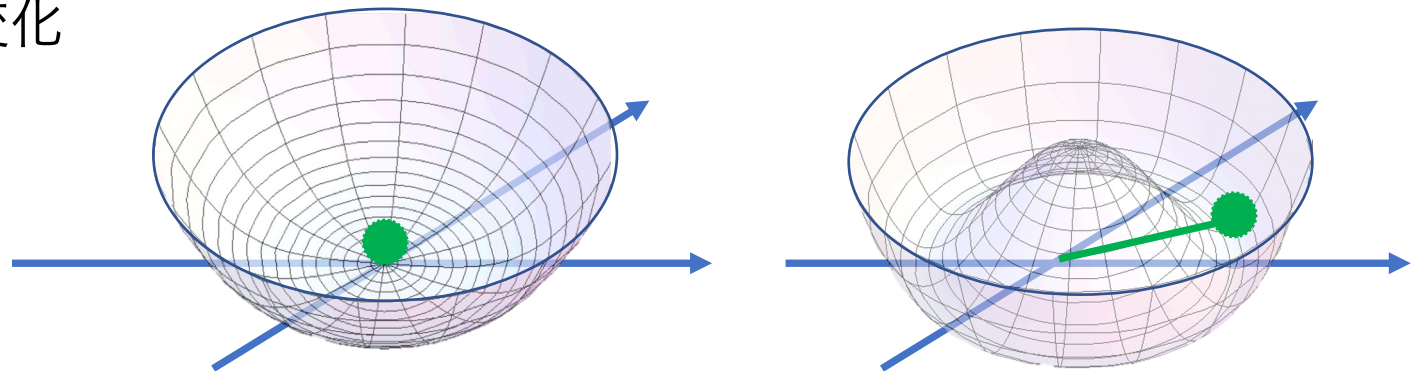
- 宇宙誕生直後にヒッグス場が対称性を破るしくみ



複素数の値に対する位置エネルギーの形が変化

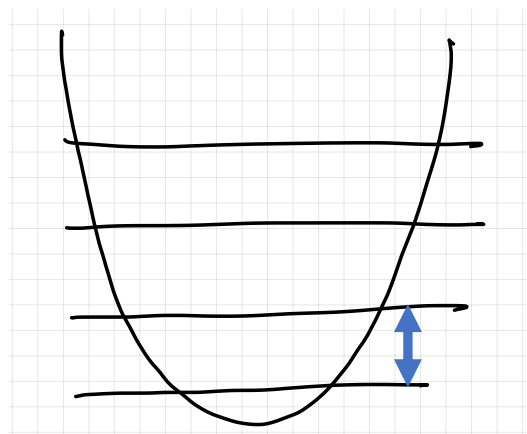
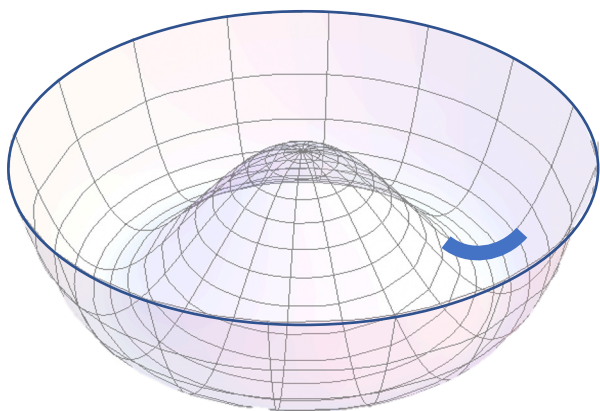
キーポイント：

- 自然はエネルギーが最小の点をとる
- ヒッグス場には、隣の人と同じ方向を向きたがる性質をもたせてある。



ヒッグス “粒子”

- ヒッグス場の大きさの自由度（場） $f(x,t)=v+h(x,t)$
 - 水面がノンゼロの値で宇宙中にある（必ずしも波が立っているというわけではない）
 - v を「真空期待値」といいます
 - 真空自由度の周りの波は質量のある波＝変位が直接エネルギーをかえる。
- ポテンシャルの底の形状に応じた質量をもった粒子
 - “調和振動子（振り子）の量子化”（大学で勉強しましょう）の計算。
 - 125 GeV のエネルギーが第一励起状態。これが、“ヒッグス粒子”。

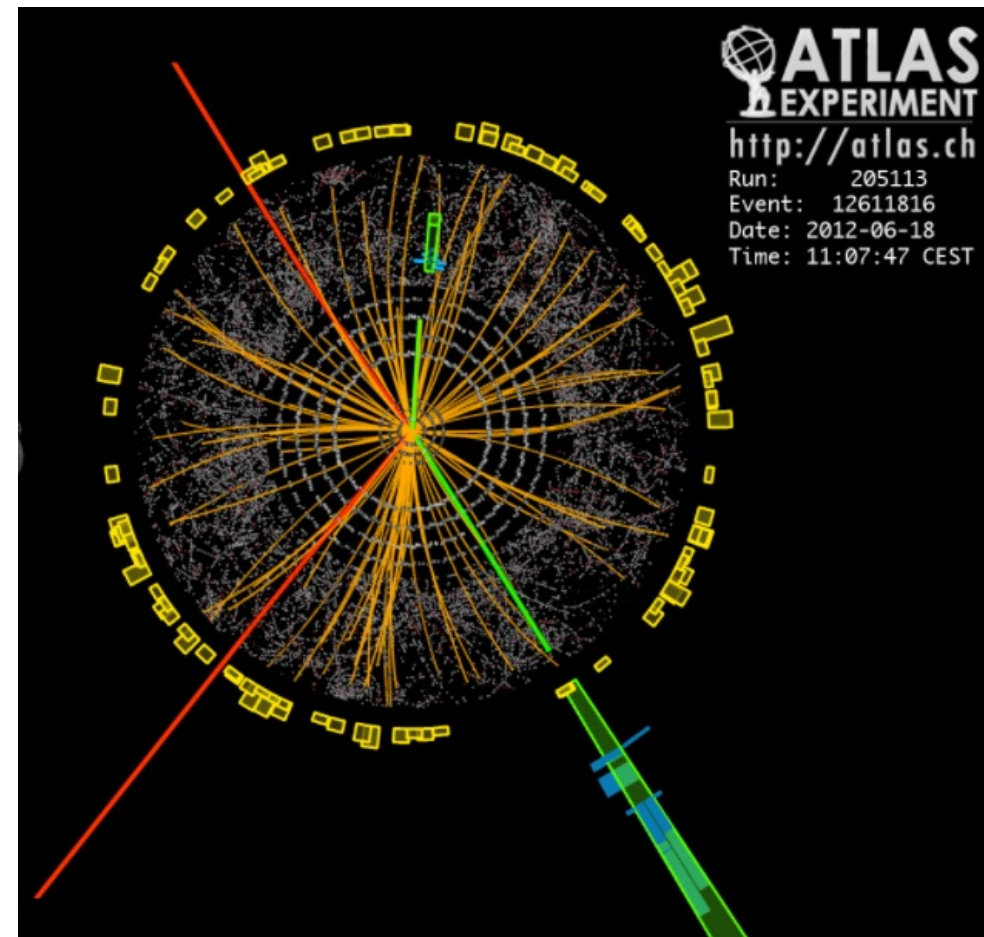
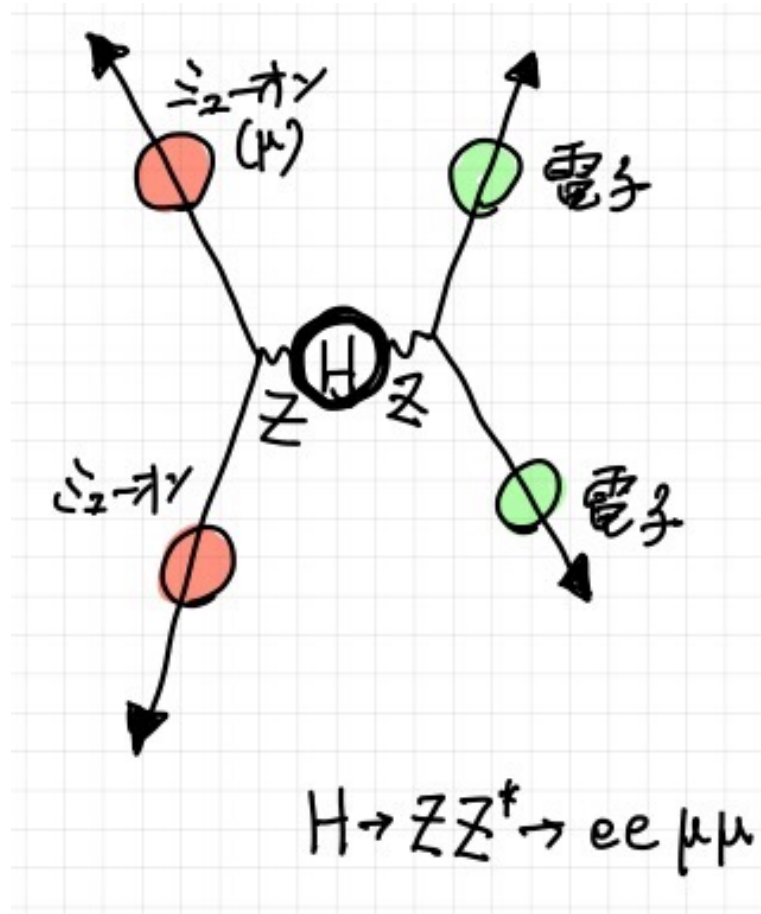
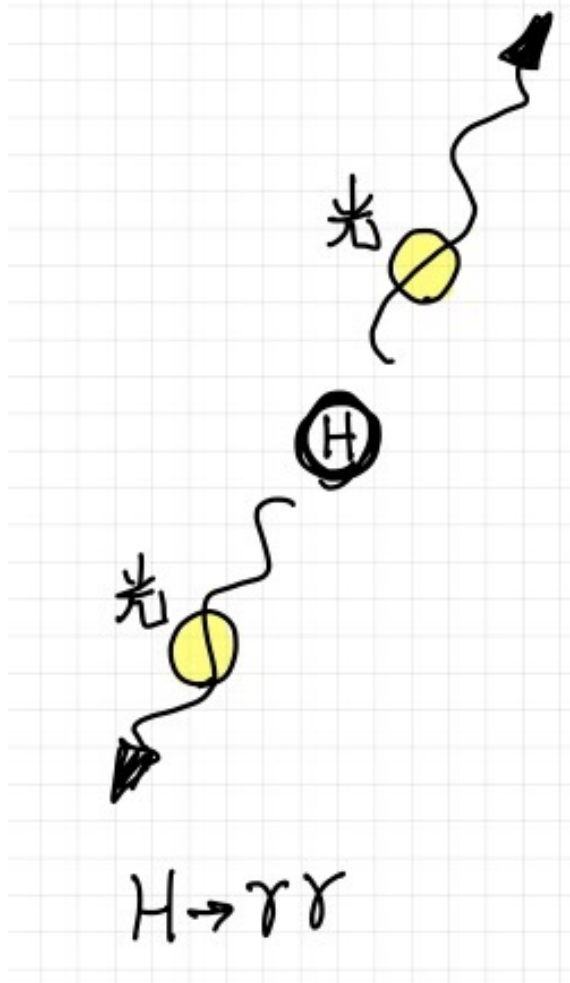


ちょうどいいエネルギーで真空を刺激すると、ヒッグス場が励起する。これがヒッグス粒子の生成。

ちょうどいいエネルギー = 125 GeV

ヒッグス粒子の代表的な崩壊

- 丁度 125 GeV で真空を刺激すると反応起こる (共鳴)



データ量も肝心！

- 発見の主張は慎重に、データ量をためて確実性を担保
 - 新発見を科学的に正しいと認めてもらうためには
「偶然そう見えた可能性」 < 0.000057% が必要（いわゆる“5シグマ”で「偶然仮説を棄却」することが「発見」）
- データ量が肝心！
 - 左：2011年10月末時点 500兆回の陽子陽子衝突実験データ
 - 右：2012年12月末時点 2,500兆回の陽子陽子衝突実験データ

ちなみに、今や 125 GeV とわかっていますが、発見以前は 125 GeV で真空を刺激すればよいという事実もわかっていなかったもので、いろいろなエネルギー領域での共鳴を網羅的に調べました。

