

LHC実験による新粒子の探索、発見 ～素粒子物理学の革命が始まった～

2012年12月3日 物理学教室講演会

戸本 誠

高エネルギー物理学研究室 (N研)

2012年7月4日 新しい粒子を発見



Francois Englert

Peter Higgs

読者新聞 2012年(平成24年) 7月5日 木曜日

日設立	2	政治	4	解説	6	国際	7	
50勝	15	経済	8	9	気流	10		
徐塩	32	スポーツ			14	15	16	
業不足	33	家庭・教育			18	19	20	
名古屋上陸	8	文化	26	小説	19	30		
		商況	暮・将棋		12	13		

発行所 読売新聞中部支社 〒460-8470 名古屋市中区栄1-17-6

らしき新粒子

「ヒッグス粒子」発見

ヒッグス博士感激
英国の物理学者ピーター・ヒッグス博士(83)が、4日、研究発表の会場を去る。CERNのロルフ・ホイヤ所長(同左)と握手し、生きているうちに「結果を見られる」とは、信じられないと感激した様子で話した(シユネブ、石黒雄)

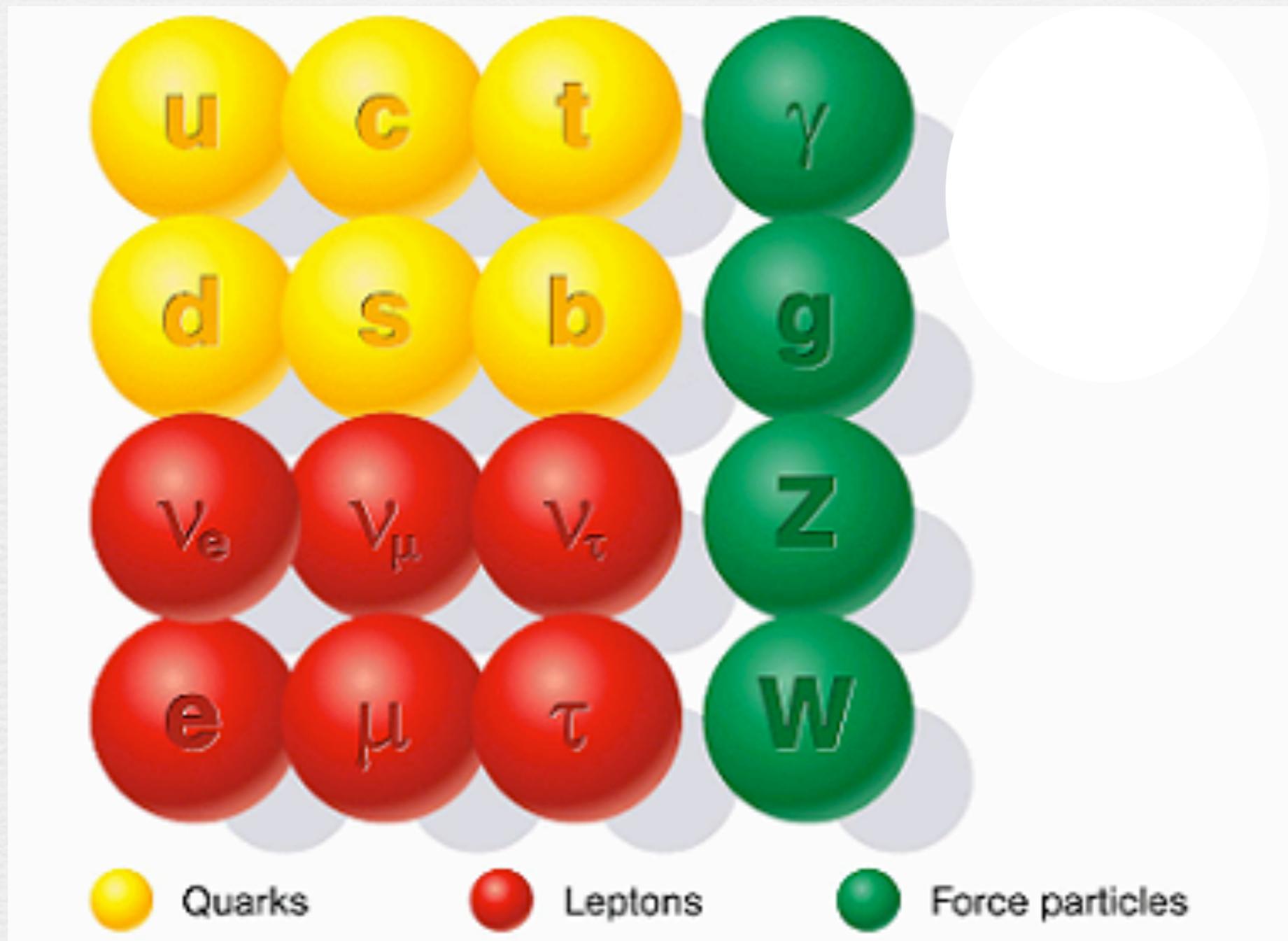


質量与える 現代物理の枠組 名大など参加チーム

欧州合同原子核研究機関(CERN、スイス・ジュネーブ)とみられる新粒子を発見したことは、物質に質量を与えたことになる。世界の研究者が、現代物理学の枠組みをなす「標準理論」で考のう、唯一見つかっていなかった。年内にはヒッグス粒子の存在を認められる見通し。標準理論の正しさが揺るぎない重要な成果となる。(関連記事2・3・32面)

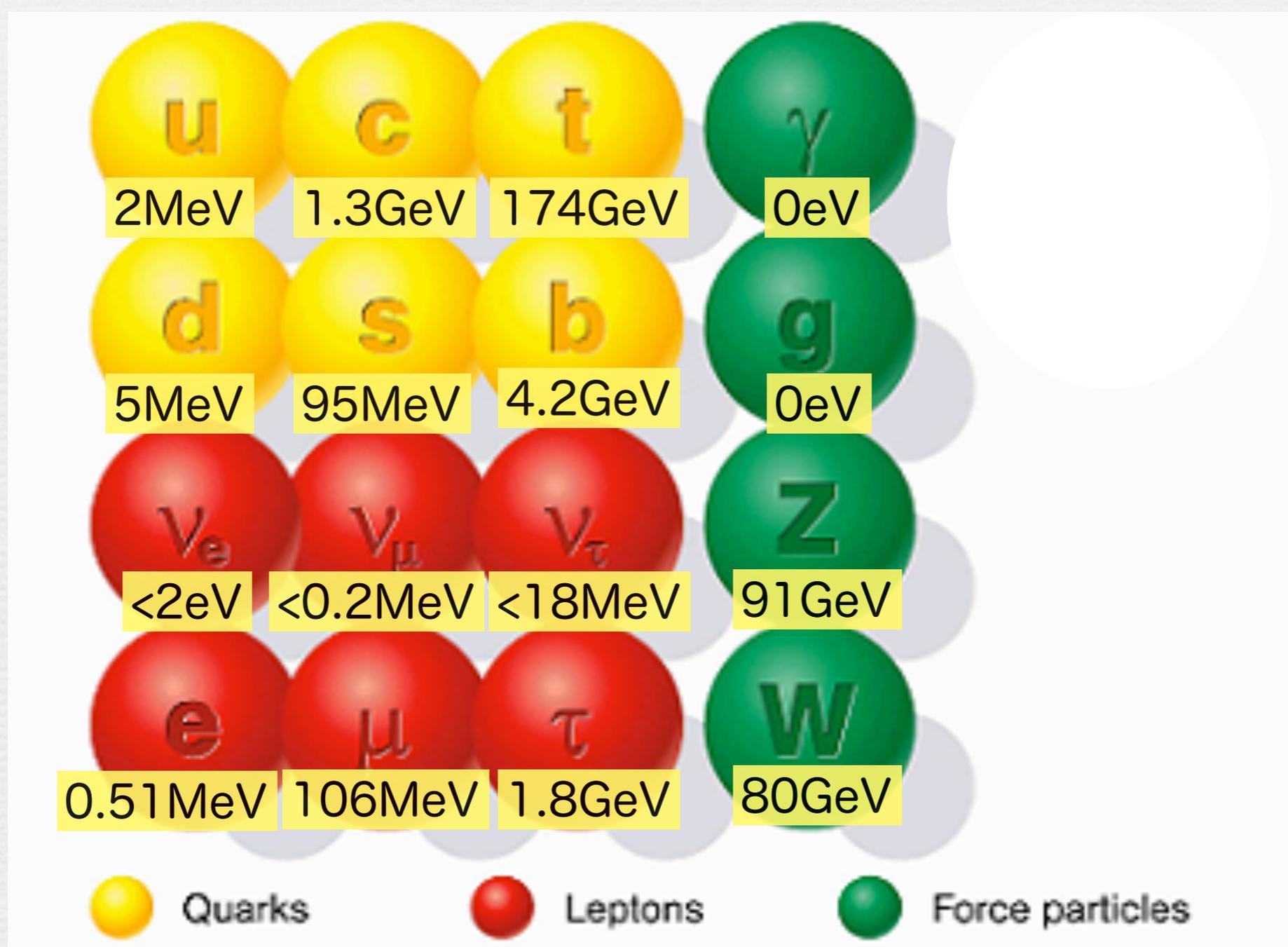
ヒッグス粒子

標準模型：量子力学＋特殊相対論＋ゲージ原理
→ 素粒子の質量は0でなければならない



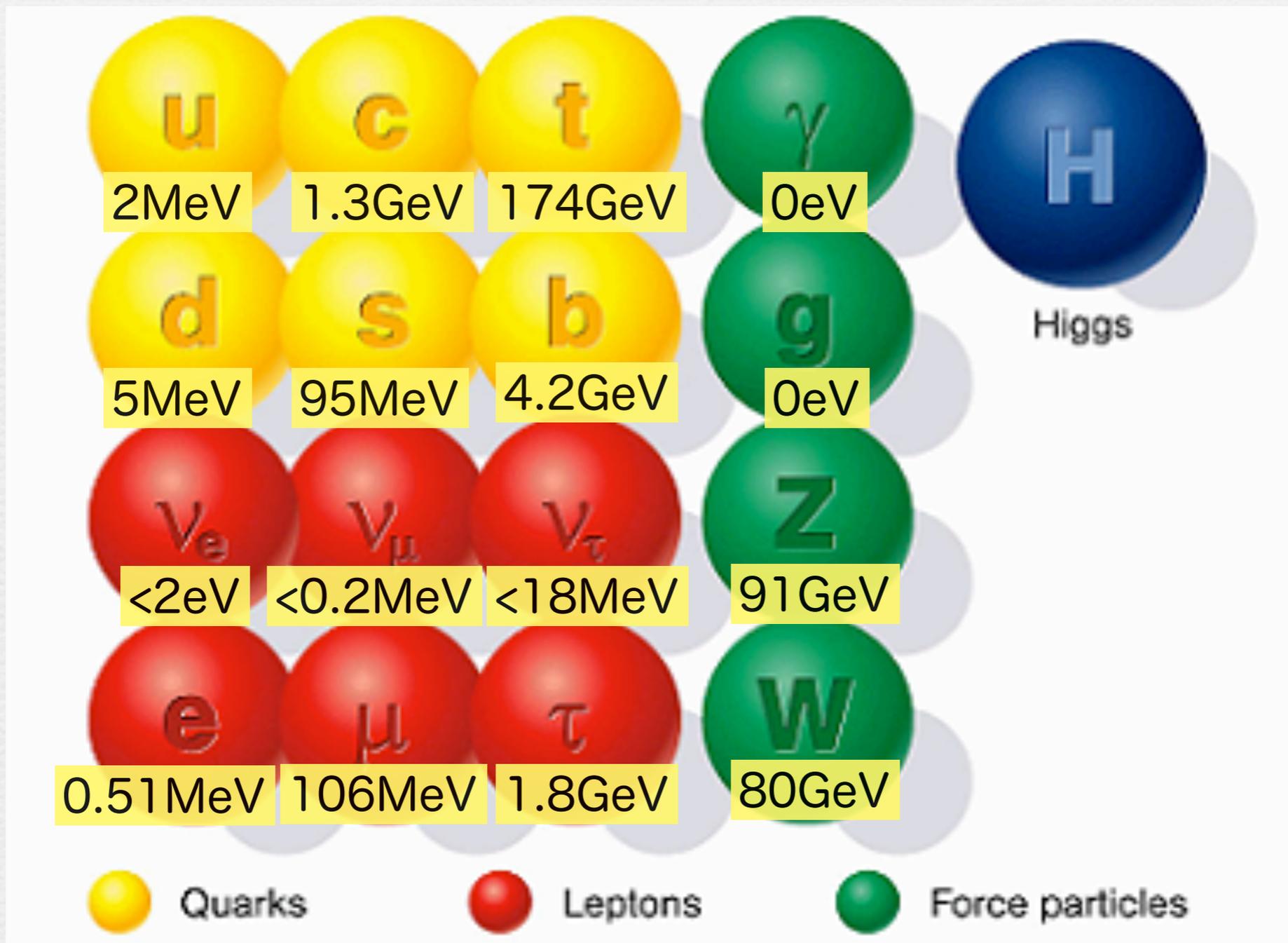
ヒッグス粒子

標準模型：量子力学＋特殊相対論＋ゲージ原理
 → 素粒子の質量は0でなければならない



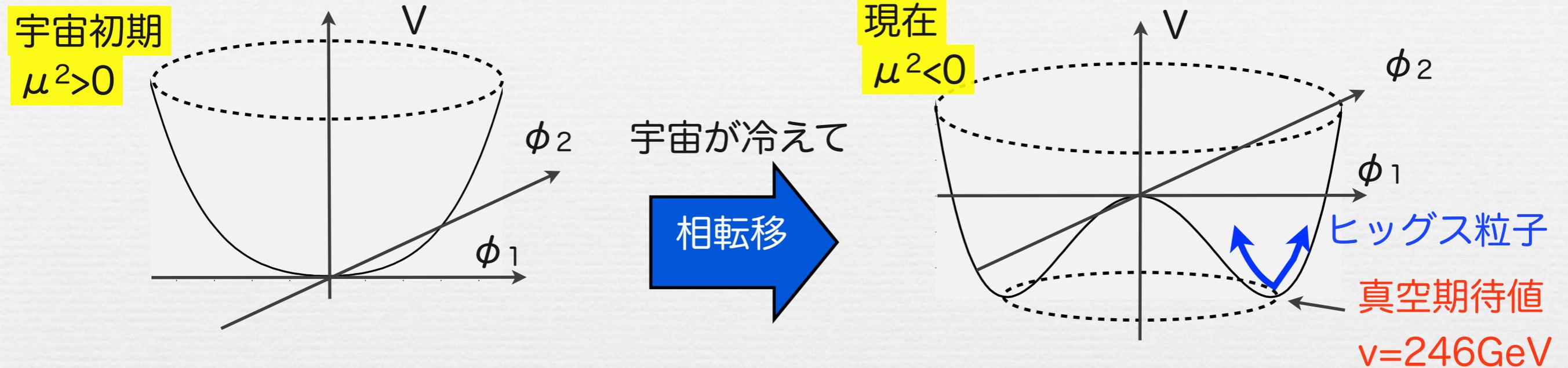
ヒッグス粒子

標準模型：量子力学＋特殊相対論＋ゲージ原理
 → 素粒子の質量は0でなければならない
 → ヒッグス機構によって解決



ヒッグス機構

ヒッグス(スカラー; spin=0) 場の導入 $V = \mu^2 \phi^* \phi + \lambda |\phi^* \phi|^2$



ゲージ粒子の質量(ゲージ結合) フェルミオンの質量(湯川結合)

$v=246\text{GeV}$

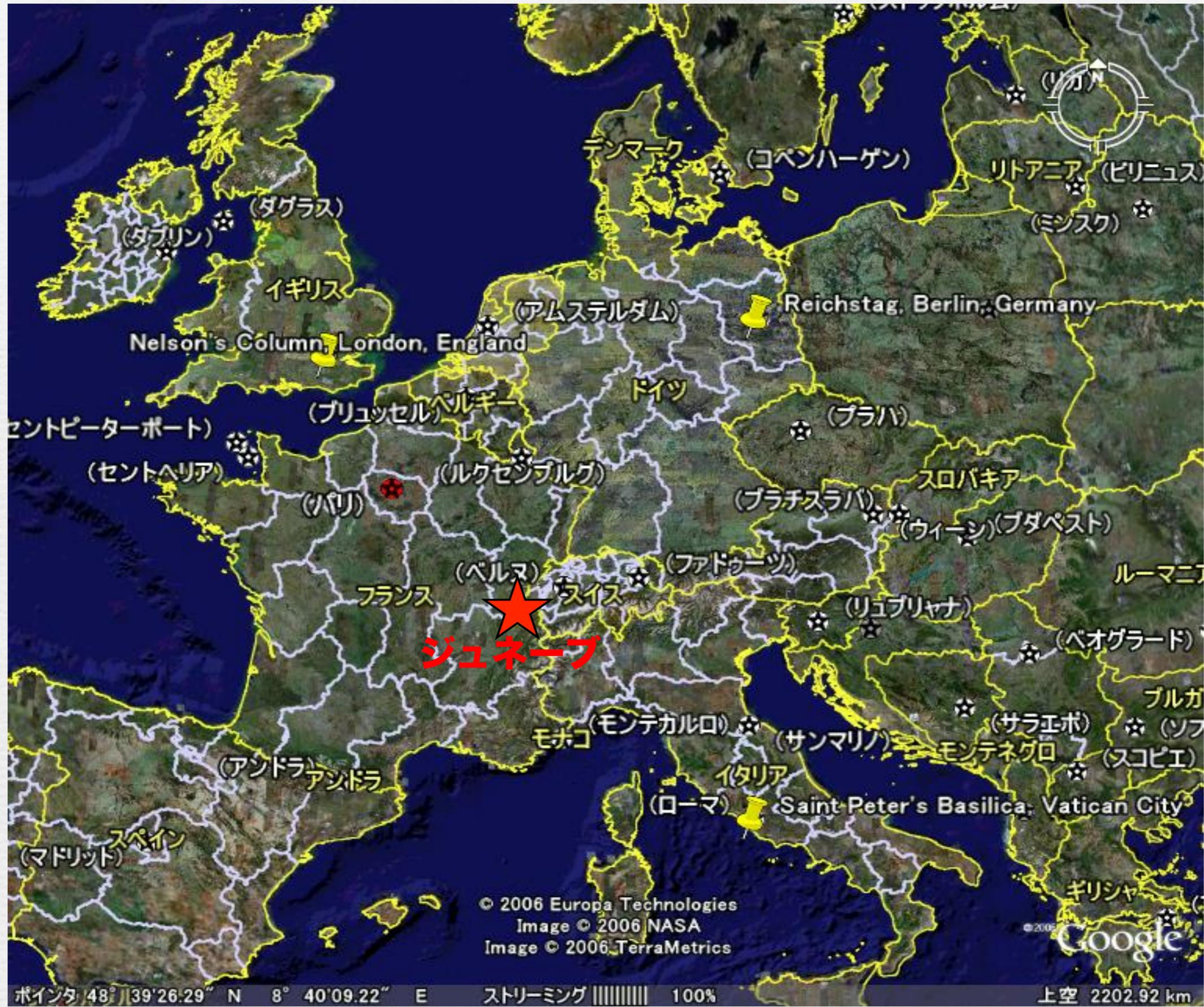
$$m_W^2 = \frac{1}{4} g^2 v^2$$

$v=246\text{GeV}$

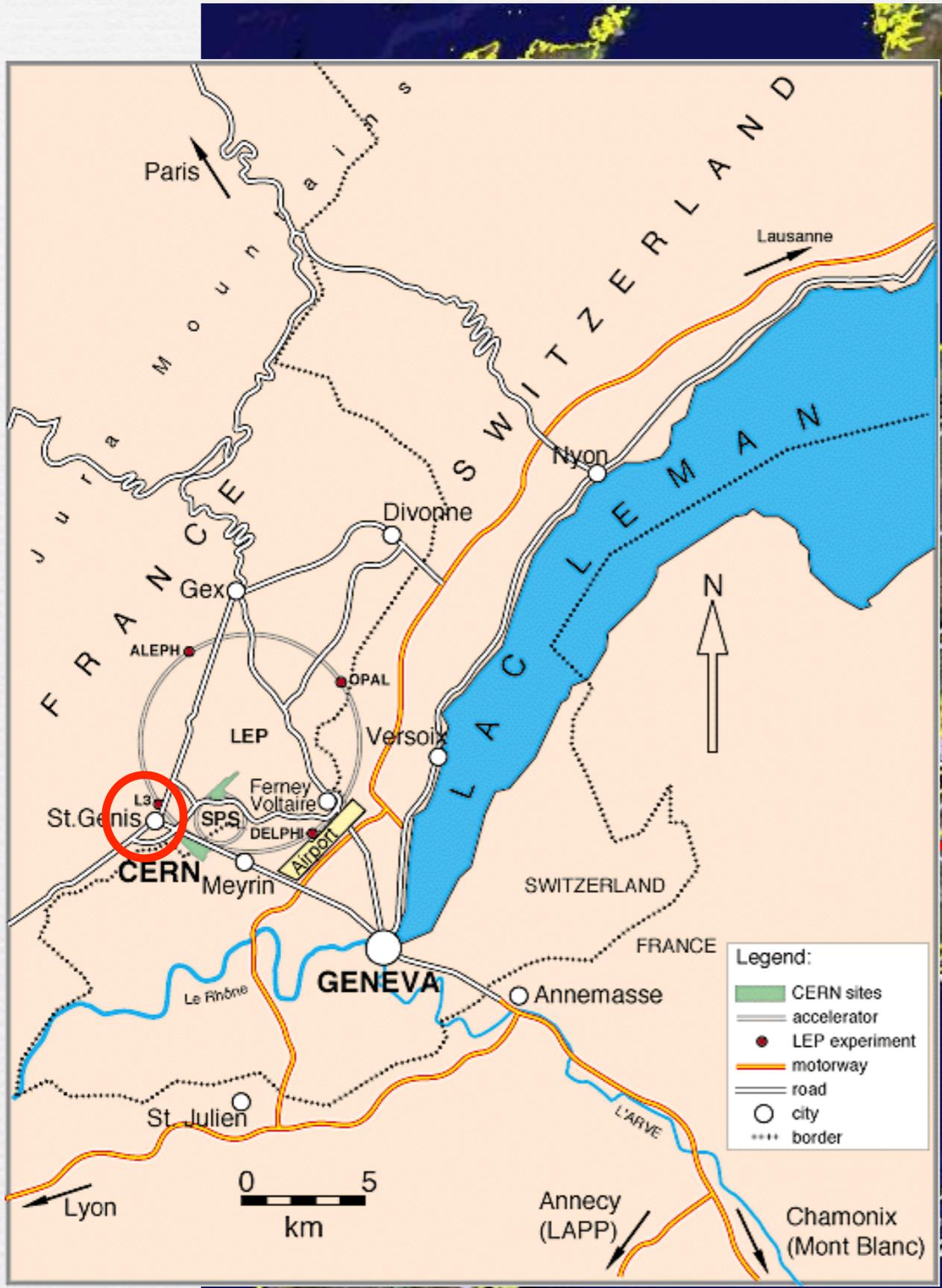
$$m_t = \frac{Y_t}{\sqrt{2}} v$$

質量は、ヒッグス場との結合定数に比例する

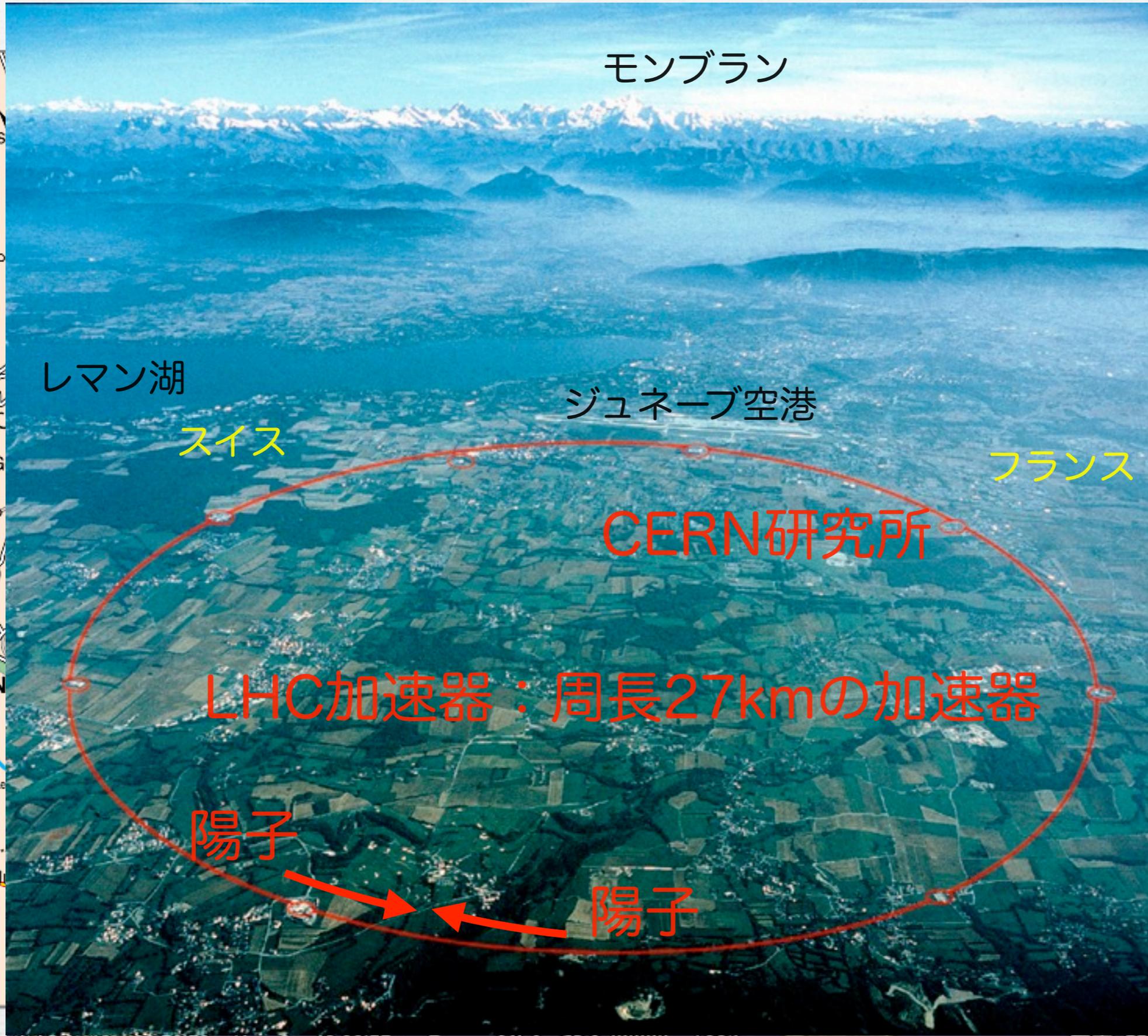
今日のお話：Large Hadron Collider



今日のお話：Large Hadron Collider



今日のお話：Large Hadron Collider



LHC加速器の大きさ



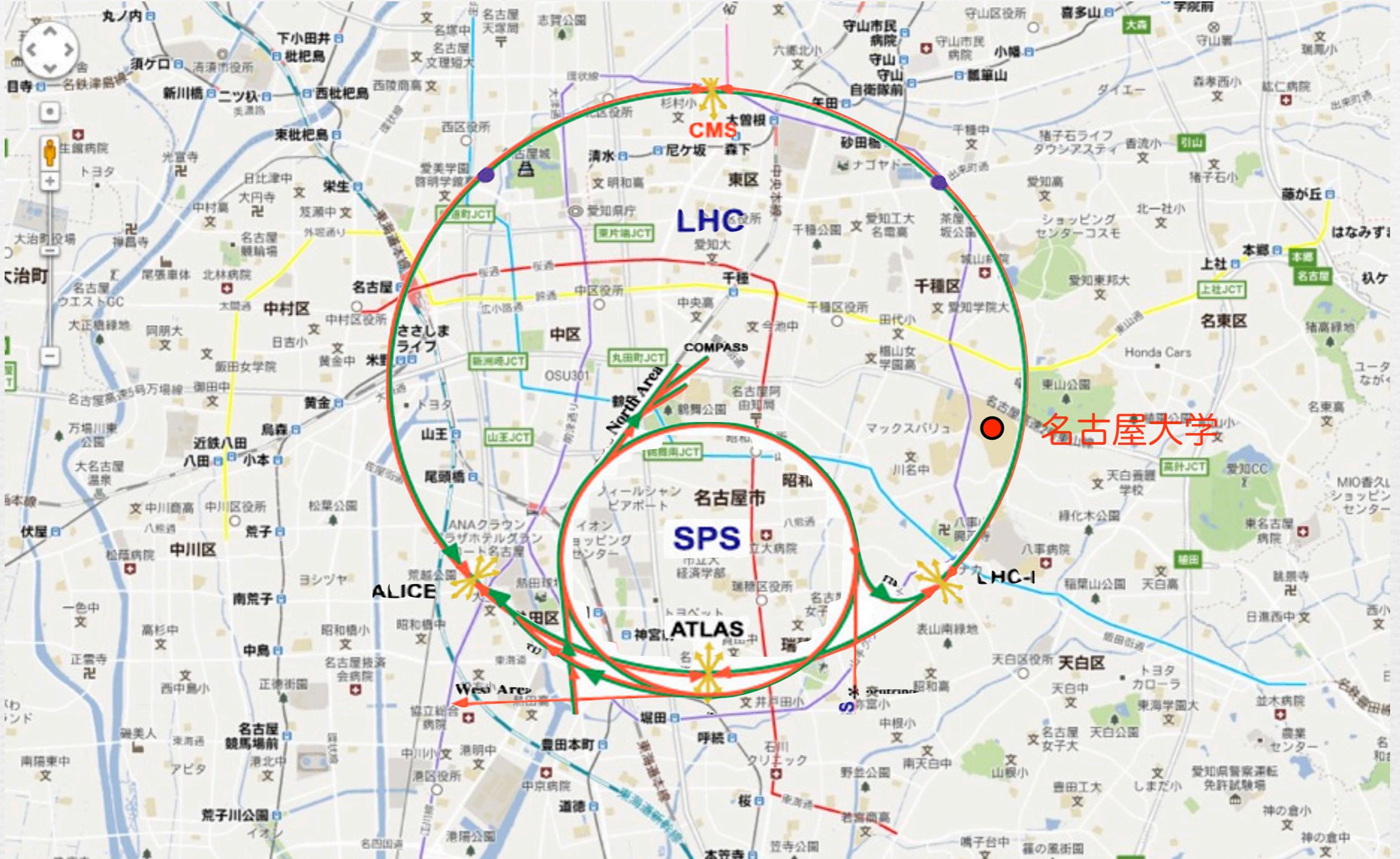
LHC加速器の大きさ



LHC加速器の大きさ



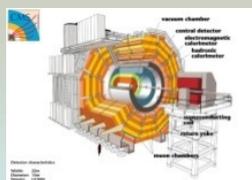
LHC加速器の大きさ



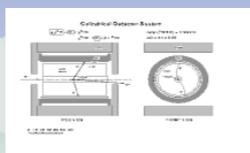
大阪環状線 < LHC~名古屋地下鉄名城線 < 東京山手線
 ~21km ~27km ~34.5km

LHC実験

LHCにおける実験プロジェクト



CMS
汎用実験



TOTEM
Total cross section
測定



LHCb
Bの物理



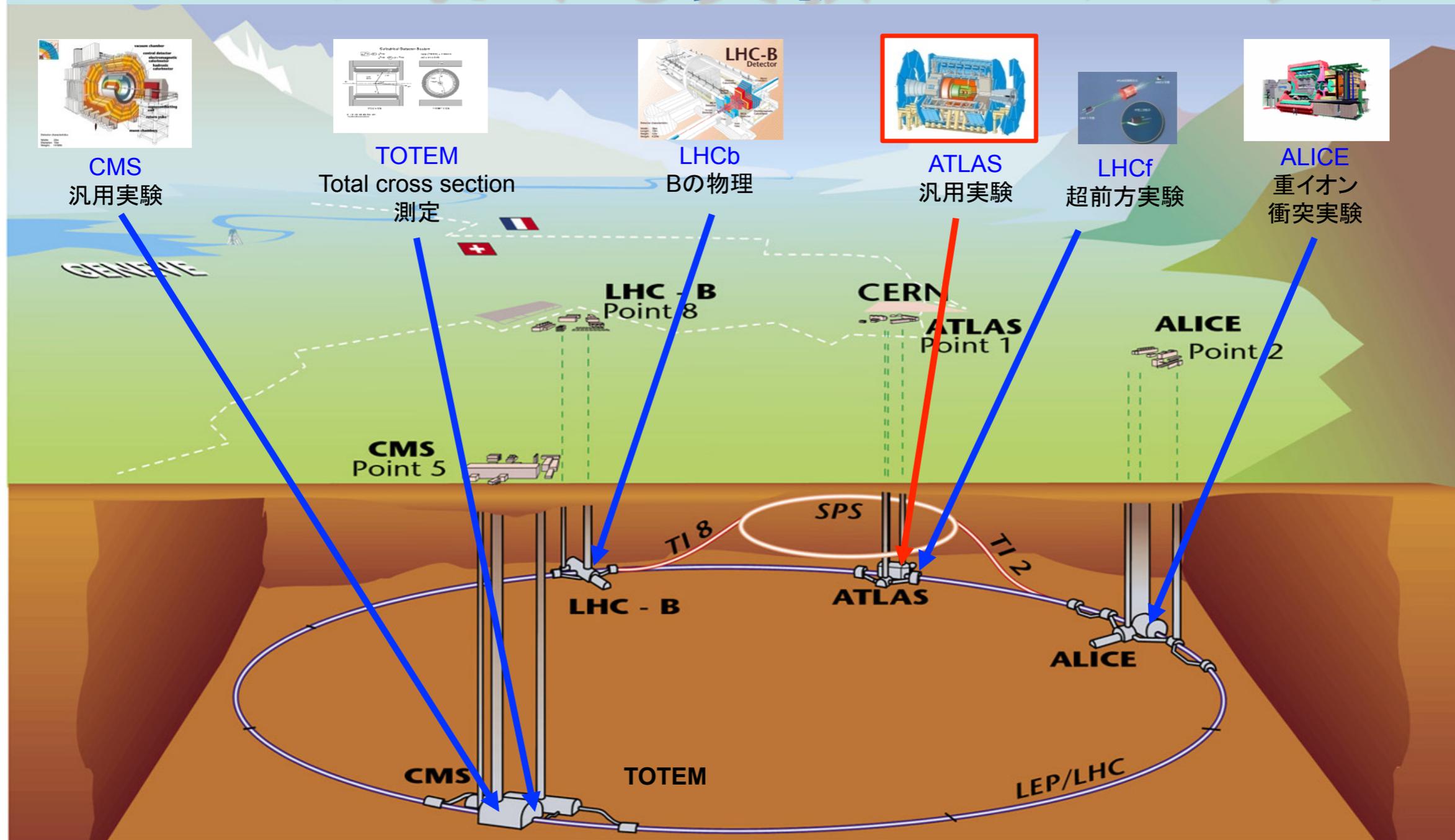
ATLAS
汎用実験



LHCf
超前方実験

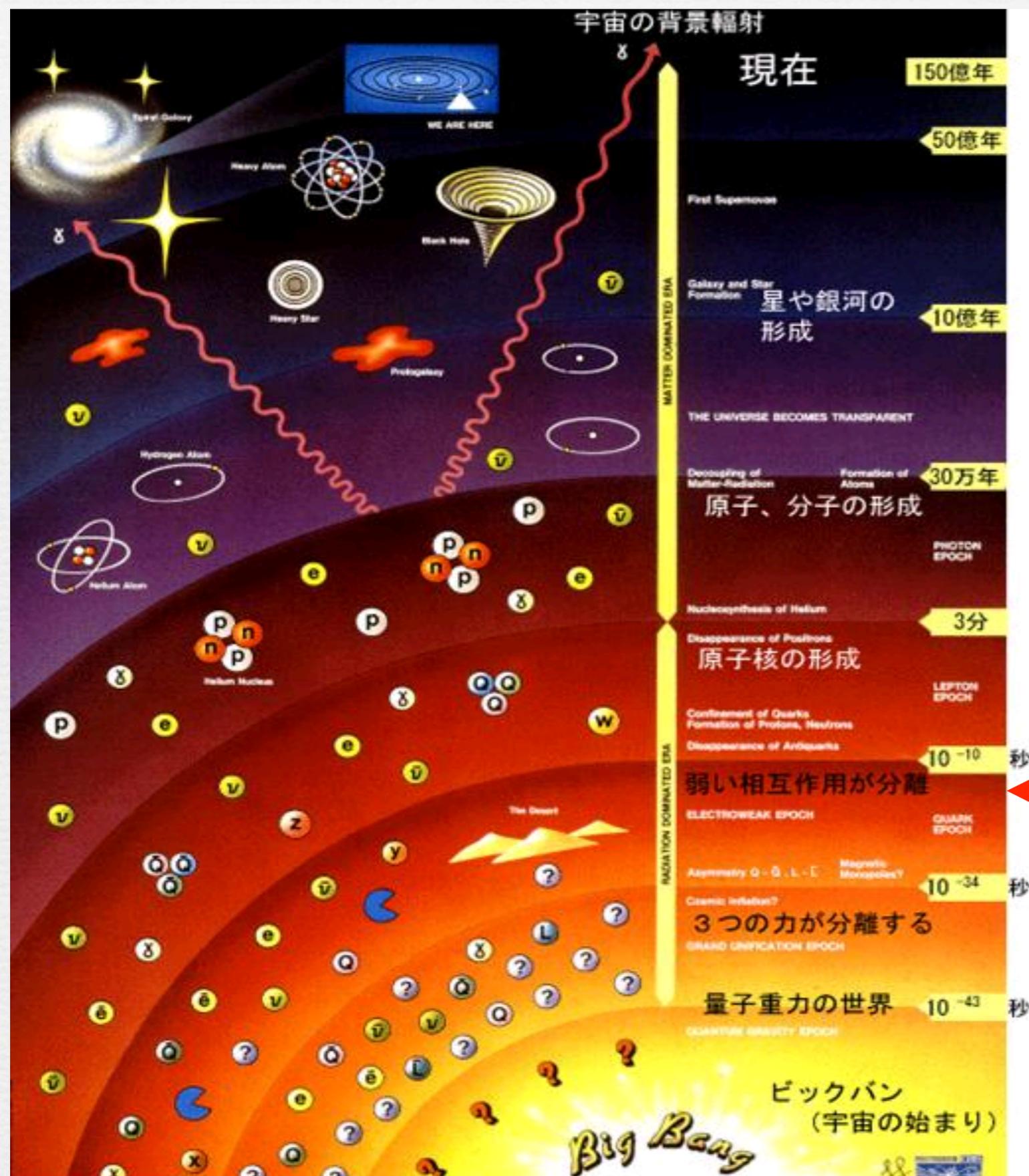


ALICE
重イオン
衝突実験



3.5~7TeVまで陽子を加速→ATLAS/CMSで衝突

LHC実験の研究対象



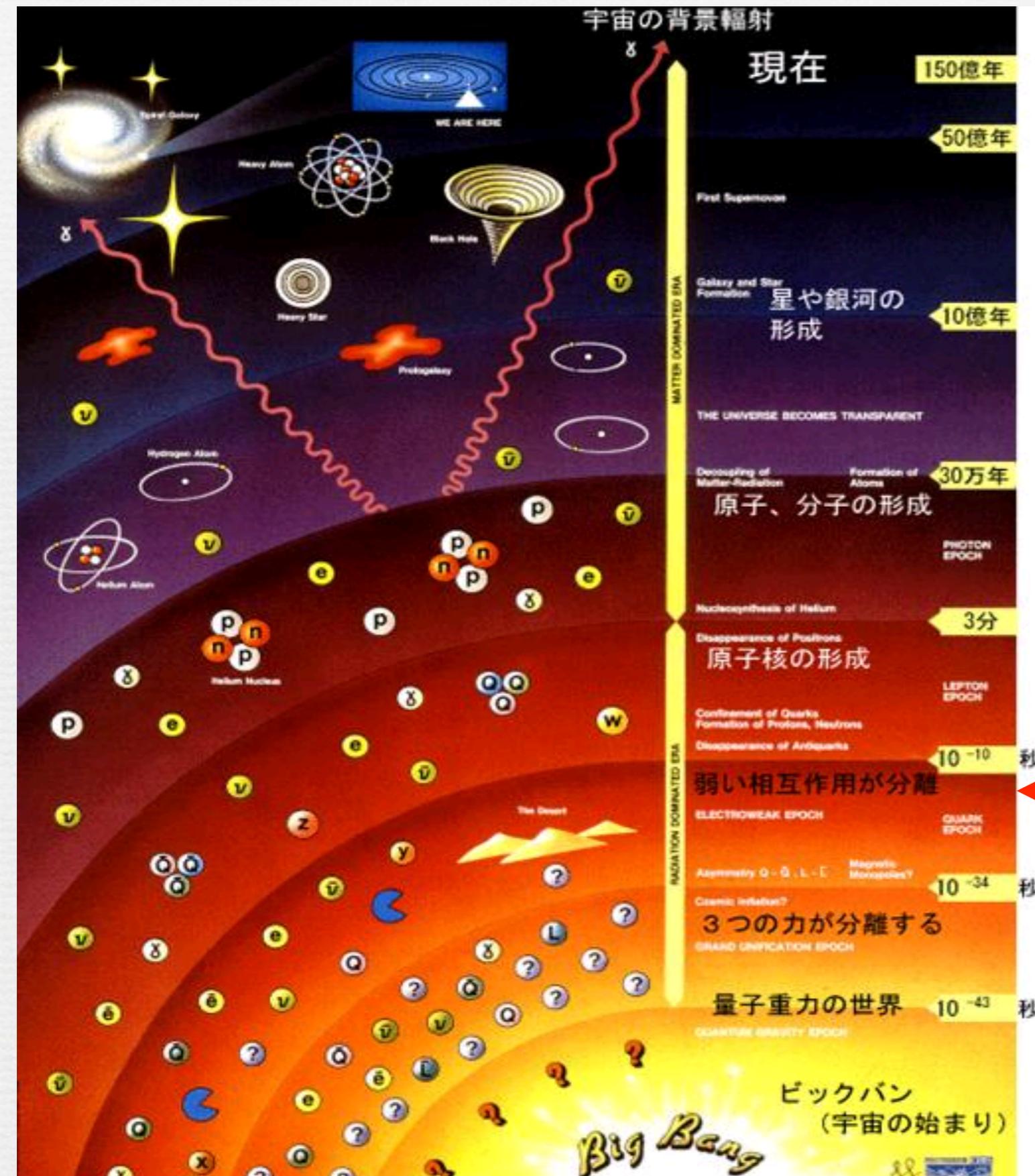
LHC実験の研究対象

素粒子研究の全体を網羅

- QCD
- Heavy Ion physics
- Electroweak
- B physics
- Top quark physics
- Higgs
- New phenomena

超対称性？余剰次元？

← この辺り

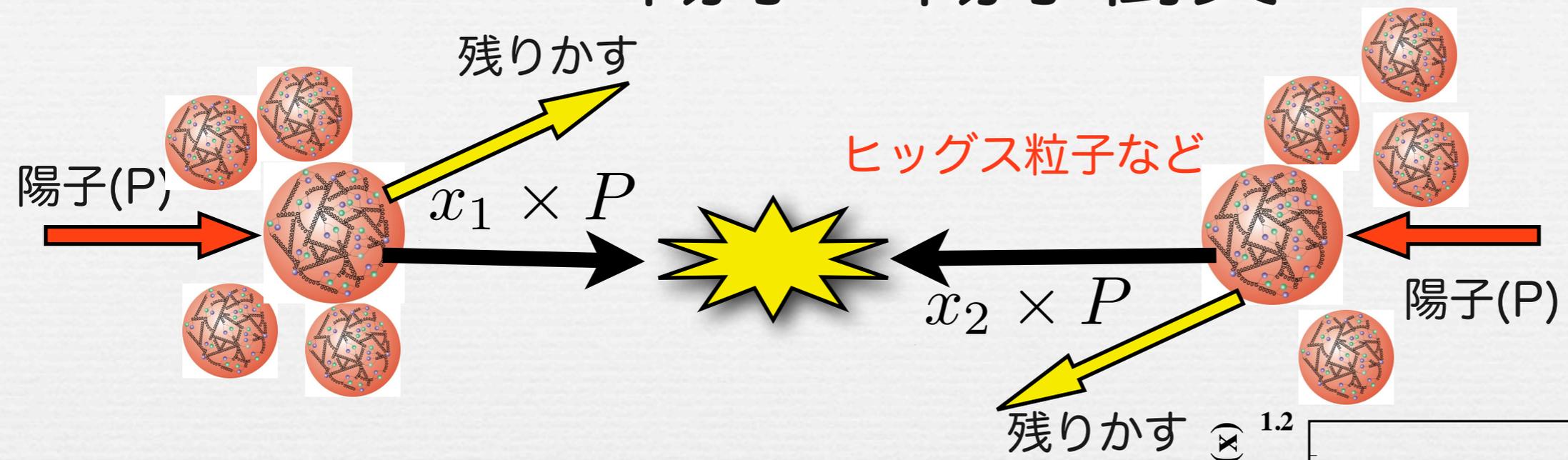


LHCの近況

- | | |
|-------------|---|
| 2008年9月10日 | LHCではじめて陽子ビーム周回に成功 |
| 2008年9月19日 | LHC加速器事故 |
| 2009年11月23日 | LHCで初めて陽子陽子衝突現象を観測 |
| 2010年3月30日 | 7TeVの物理データ収集をスタート |
| 2011年12月13日 | ヒッグス粒子が存在すれば、115GeVから130GeVにありそう？ |
| 2012年4月 | 8TeVの物理データ収集をスタート |
| 2012年7月4日 | ヒッグス粒子と思われる新粒子を発見 |
| 2012年12月11日 | 2012年の陽子・陽子衝突が終了
14TeVに向けた2年間のシャットダウンへ |

ヒッグス粒子の見つけ方

陽子・陽子衝突



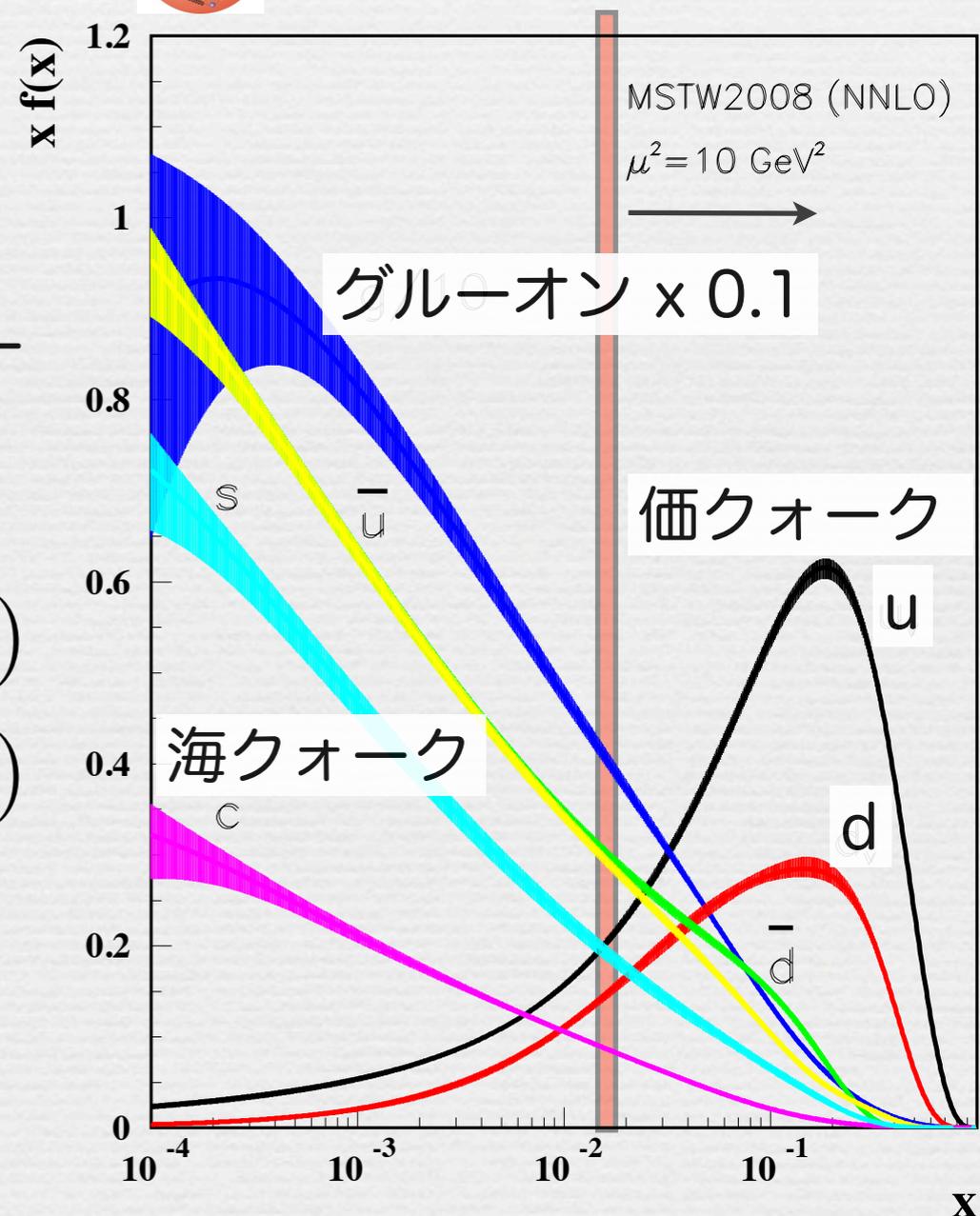
$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2} \sqrt{s_{pp}}$$

実効エネルギー

陽子陽子衝突エネルギー
7~8 TeV

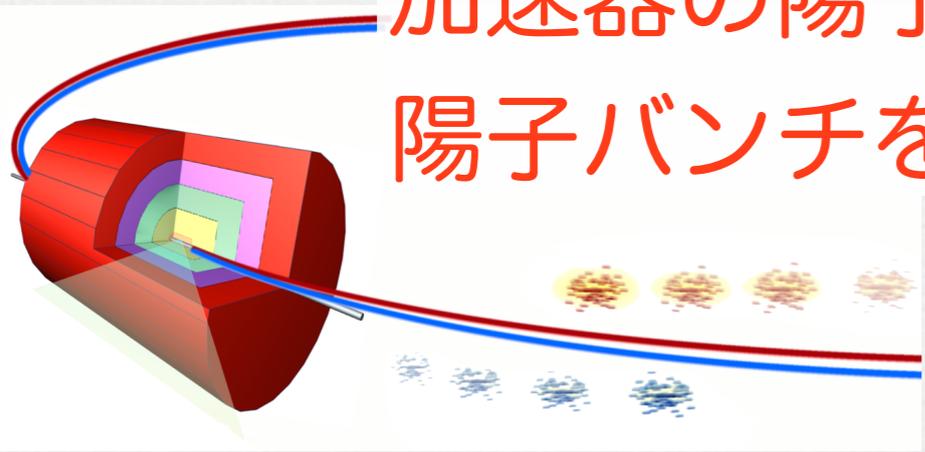
$M_{\text{Higgs}} \sim 125 \text{ GeV}$ $x > 0.018$ (at 7 TeV)
 に対して、 $x > 0.016$ (at 8 TeV)

$\sqrt{s_{pp}}$ 高い \rightarrow 沢山のヒッグス粒子



陽子・陽子衝突

バンチに陽子をつめる (n)
 加速器の陽子バンチを増やす (f)
 陽子バンチを絞って衝突 (σ)



$$7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$n \sim 1.4 \times 10^{11}$$

$$\sigma \sim 20 \mu\text{m}$$

$$f = 20 \text{ MHz}$$

$$(1380 \text{ バンチ})$$

$$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$$

瞬間ルミノシティ

$$L = \frac{n_1 n_2 f}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \quad \rightarrow \quad \text{反応率 } R = L \times \sigma$$

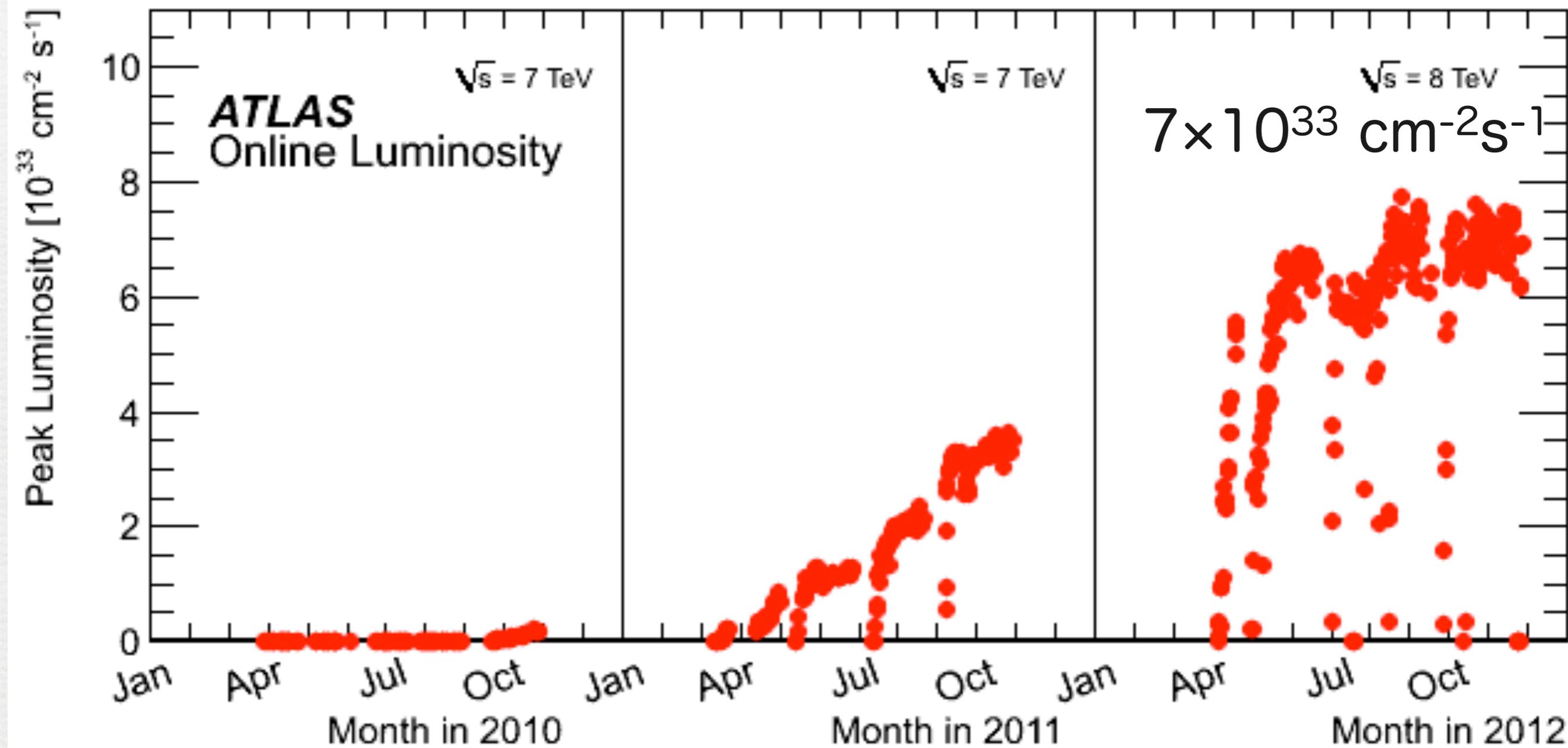
積分ルミノシティ

$$\int L dt \quad (\text{cm}^{-2}) \quad \rightarrow \quad \text{事象数 } N = \int L dt \times \sigma$$

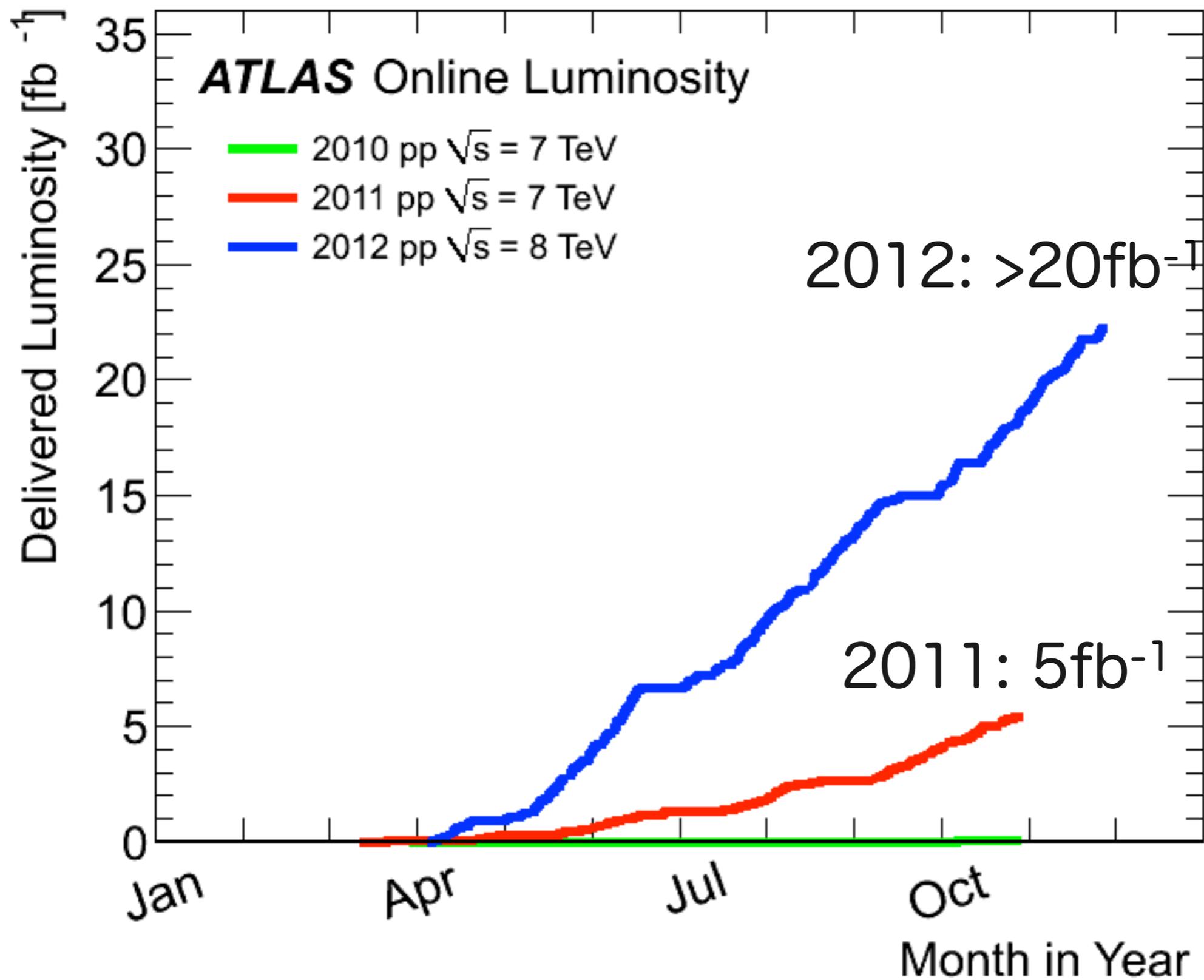
$$10^{24} \text{ cm}^{-2} = 1 \text{ b}^{-1}$$

高いルミノシティ \rightarrow 沢山のヒッグス粒子

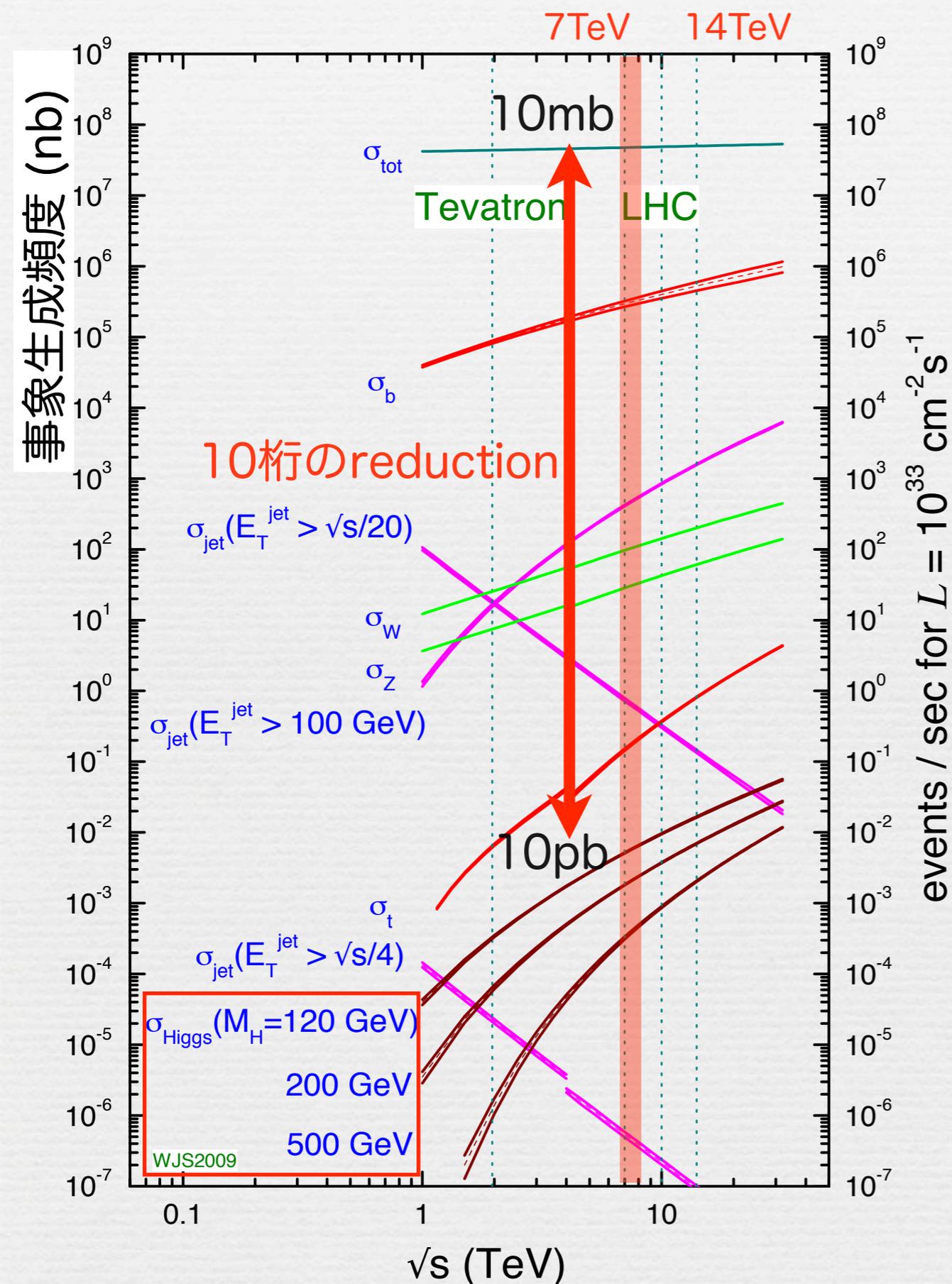
瞬間ルミノシティ



積分ルミノシティ



陽子・陽子衝突断面積



全断面積 $\sim 10\text{mb}$

殆どがQCDによる多ハドロン事象

V.S.

ヒッグス事象断面積 $\sim 10\text{pb}$

① 10桁のreductionが必要
レプトン、光子を利用

② 1回の陽子バンチ交差で複数の陽子事象 (pileup事象)

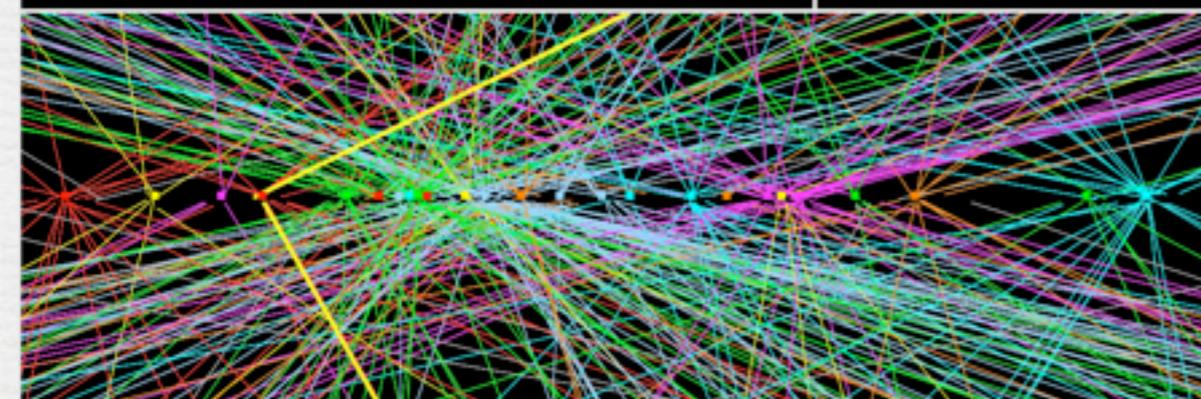
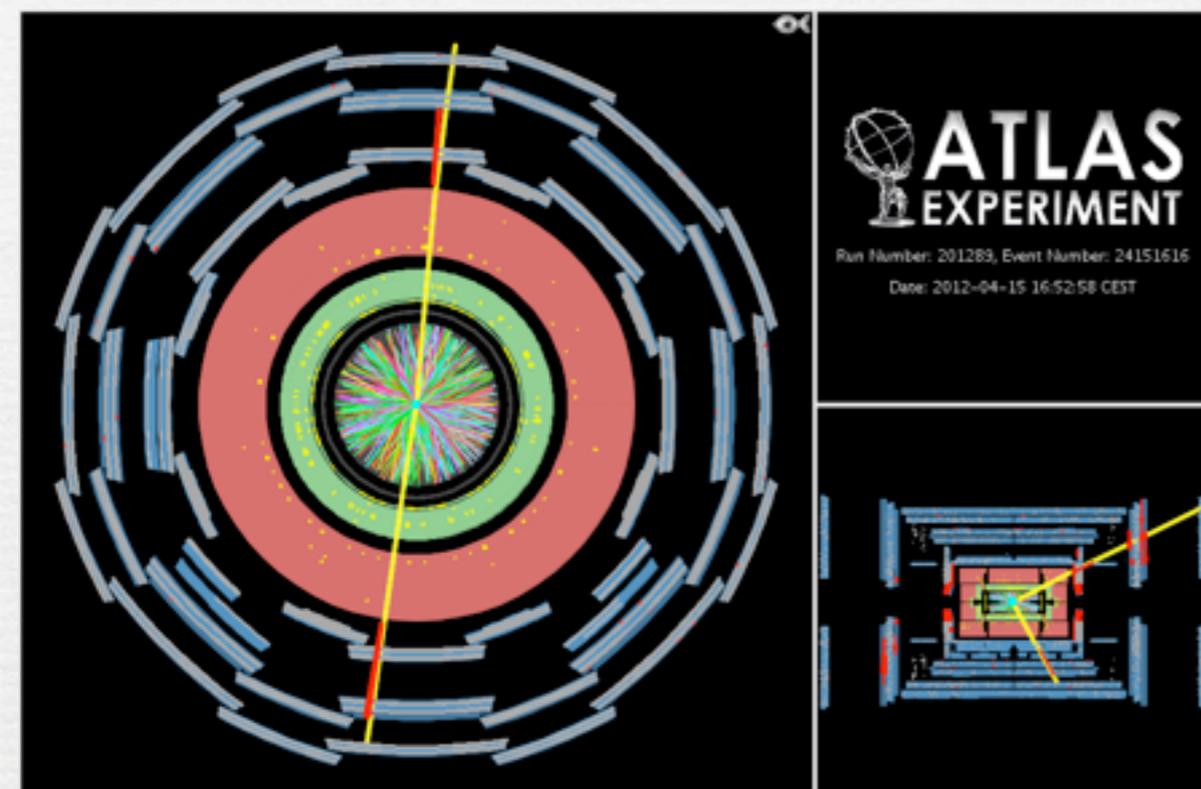
$L \times \sigma \sim 700\text{MHz}$

陽子交差頻度は20MHz

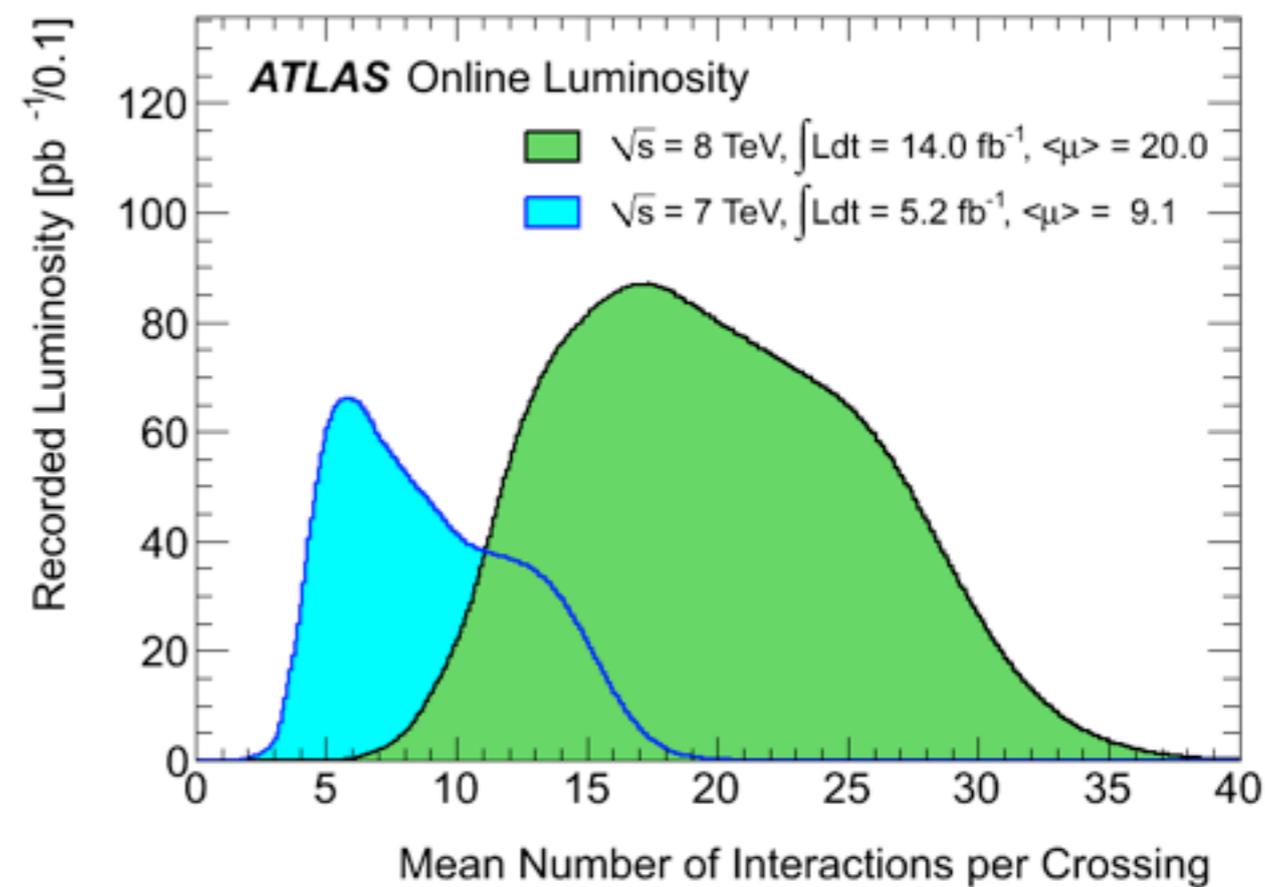
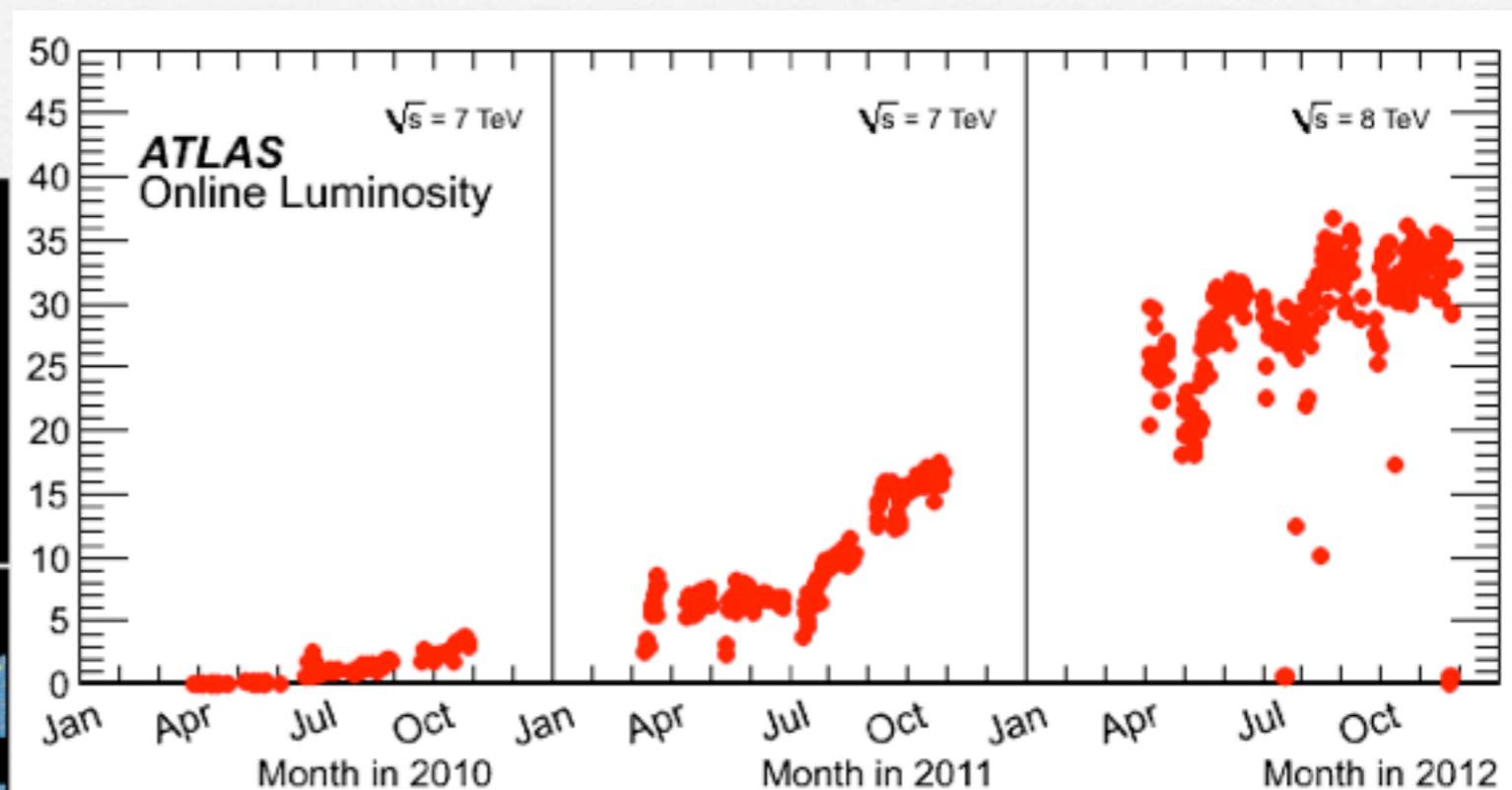
平均で数十のpileup事象

pileup事象

$Z \rightarrow \mu\mu$ with 25 reconstructed vertex

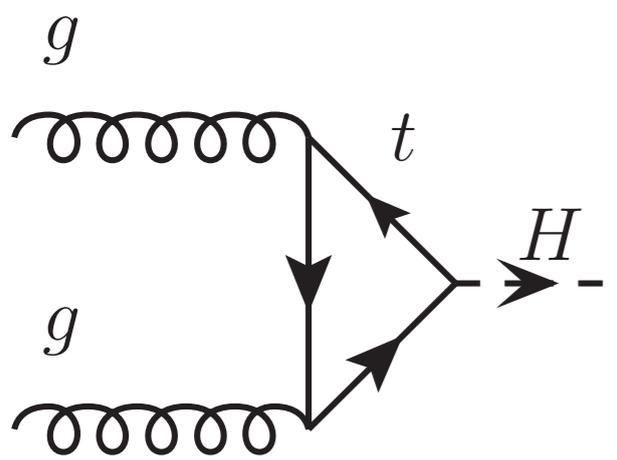


$$\sigma_z = 5 \sim 6 \text{ cm}$$



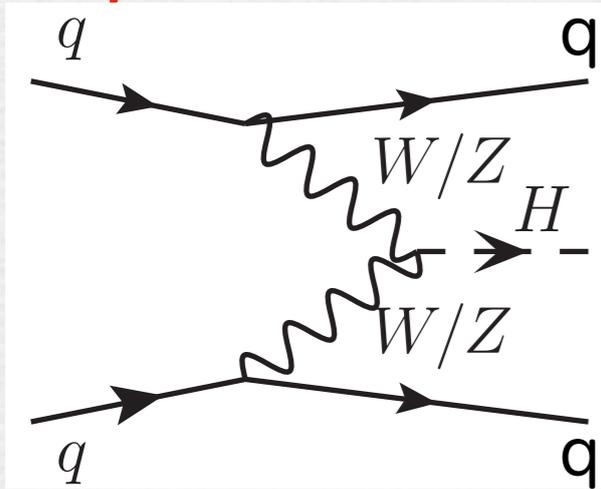
ヒッグス粒子生成

gluon fusion



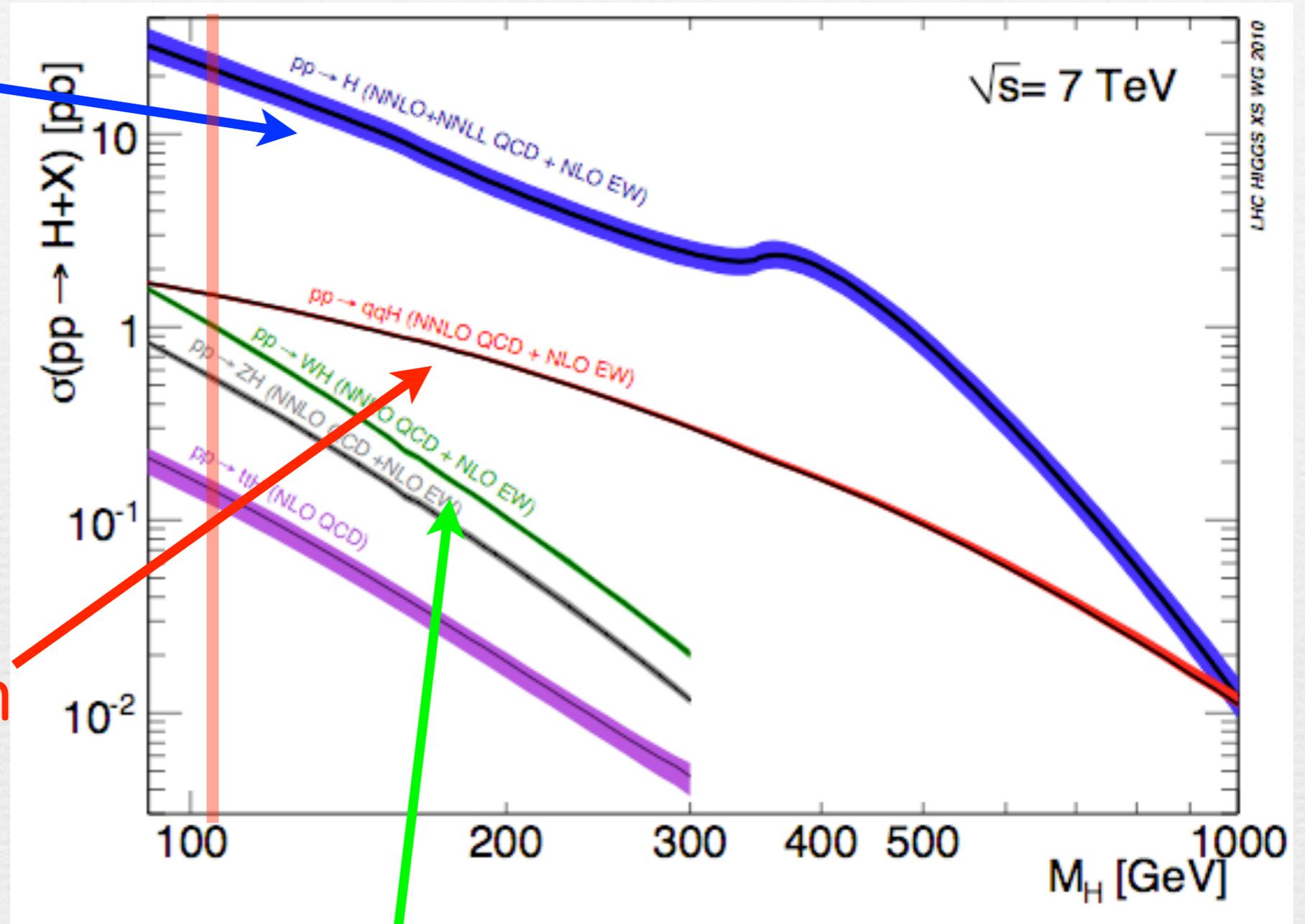
トップクォークとの湯川結合
断面積最大
QCDによる事象の排除困難

W/Z boson fusion

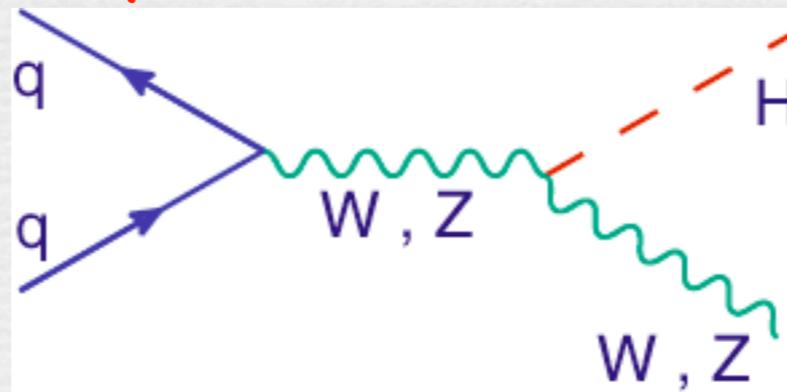


ゲージ結合
Higgs + 2 forward jets

QCDによる事象を排除



W/Zとの随伴生成



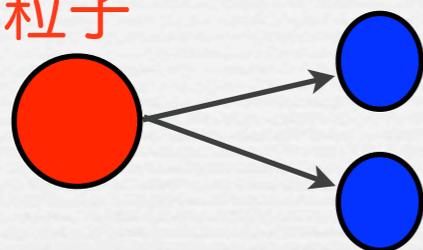
ゲージ結合
Higgs + W or Z

QCDによる事象を排除

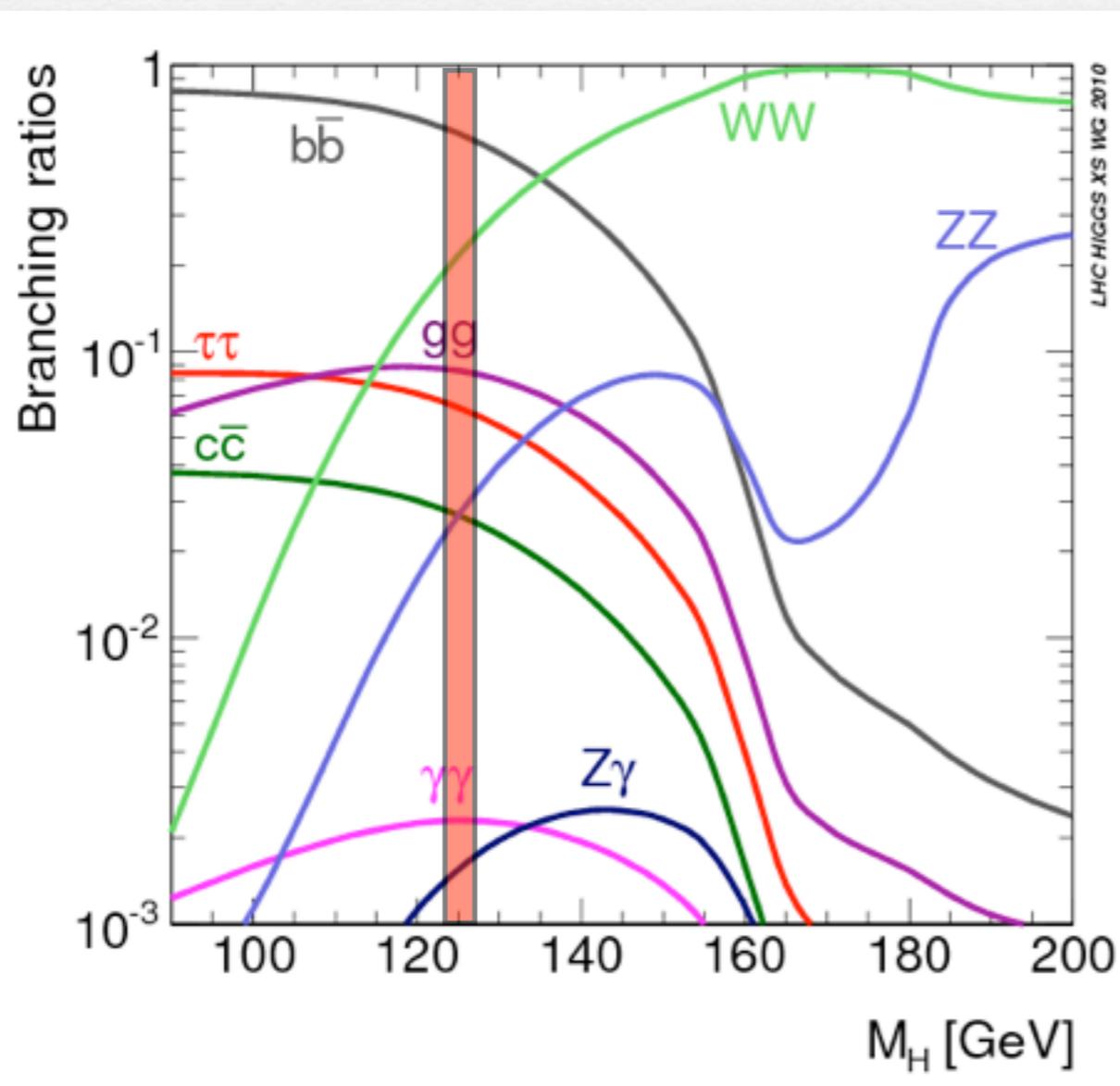
ヒッグス粒子崩壊

ヒッグス粒子は重い素粒子と結合しやすい

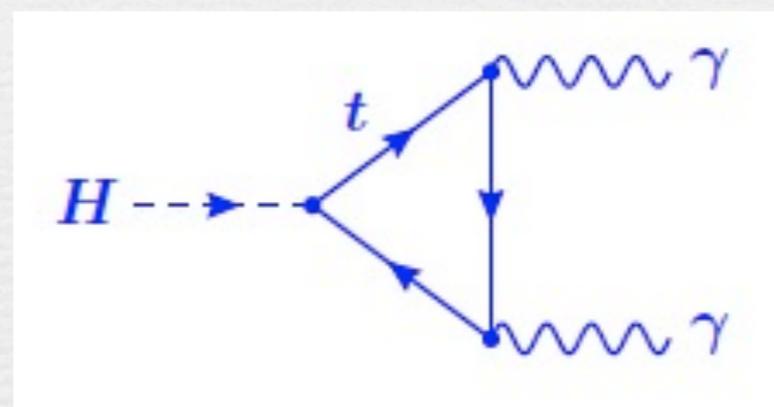
ヒッグス粒子



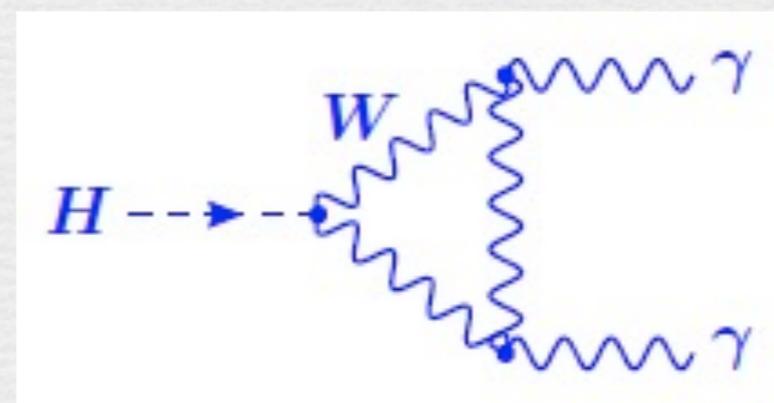
W^+W^- , ZZ , $t\bar{t}$, $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, $c\bar{c}$...



$\gamma\gamma$ 、 gg への崩壊



重い粒子を仮想状態として経由



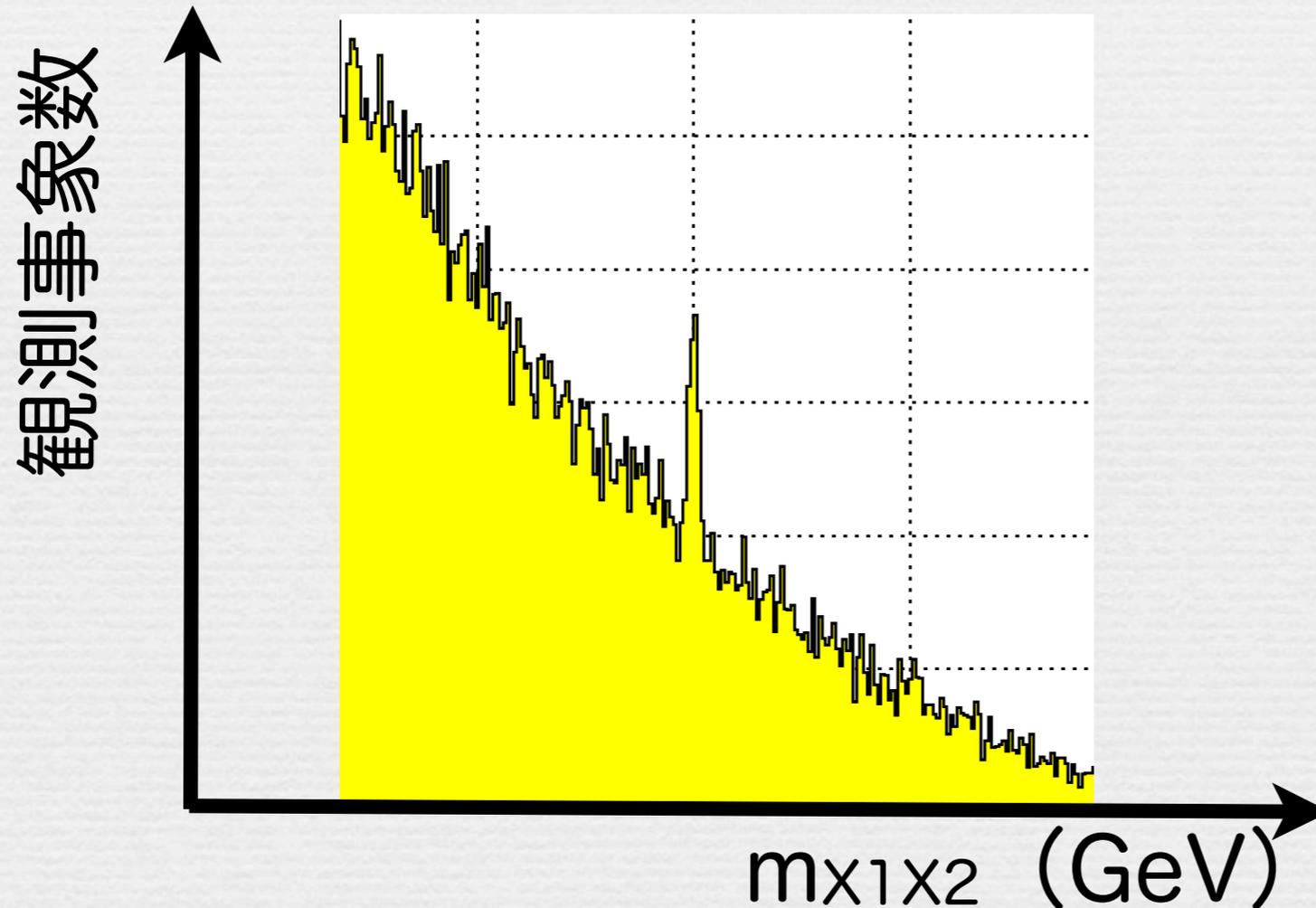
ゲージ、湯川結合測定のため全崩壊過程の精査が重要

ヒッグスの探索手法

ヒッグス粒子 $\rightarrow X_1 + X_2$

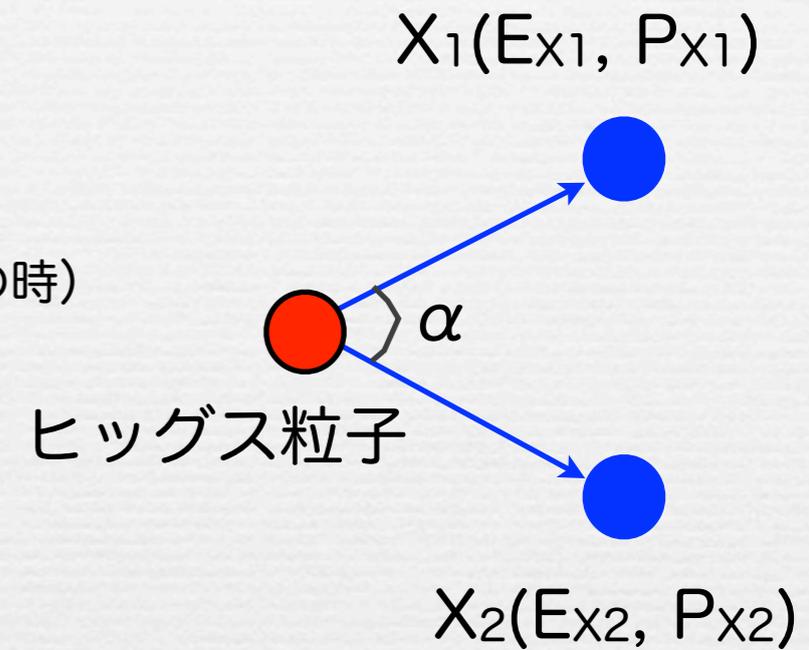
$$m_{X_1 X_2}^2 = (E_{X_1} + E_{X_2})^2 - (P_{X_1} + P_{X_2})^2$$

$$= 2E_{X_1} E_{X_2} (1 - \cos \alpha) \quad (X_1, X_2 \text{の質量} \sim 0 \text{の時})$$



背景事象が少ない

運動量/エネルギー分解能が良い

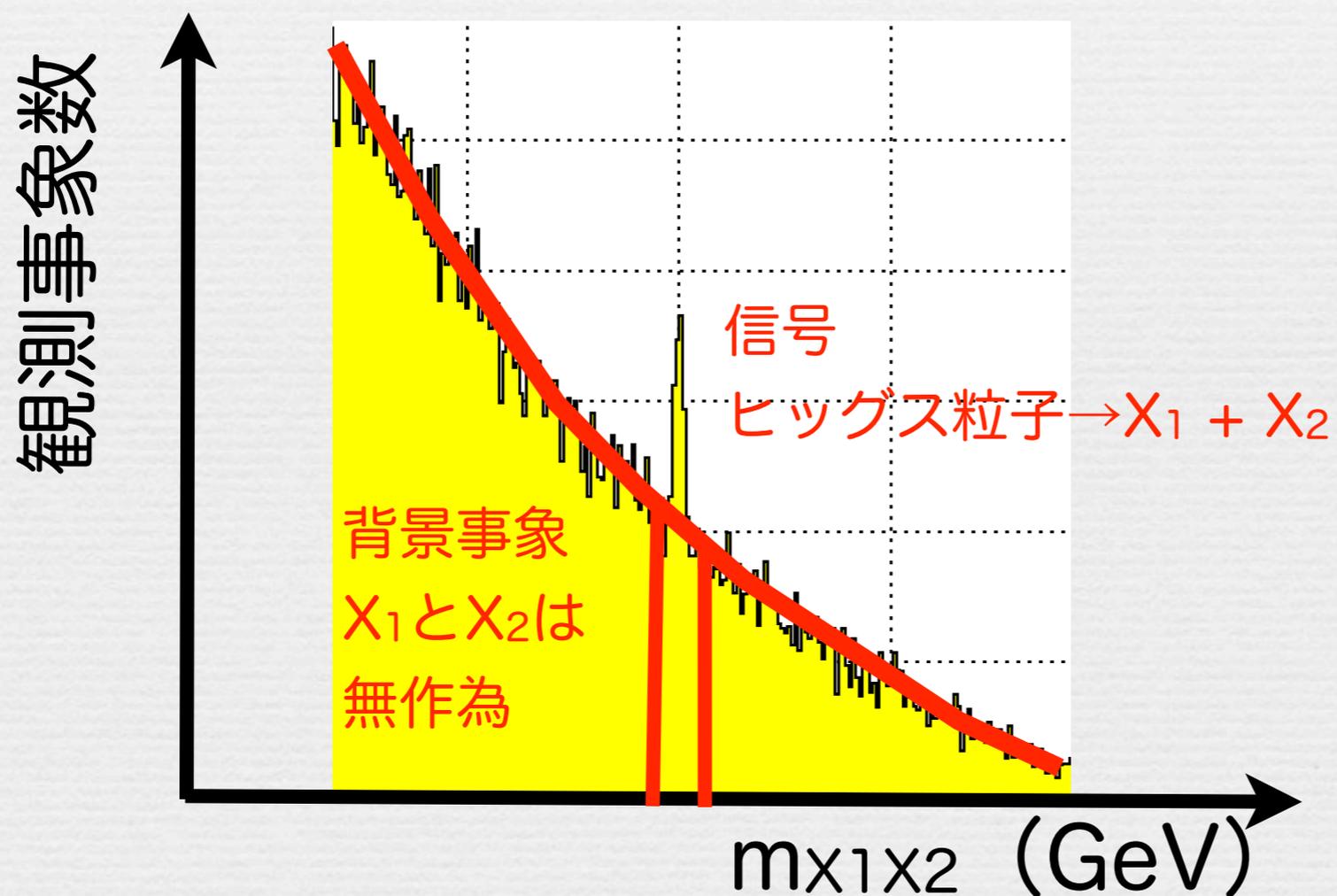
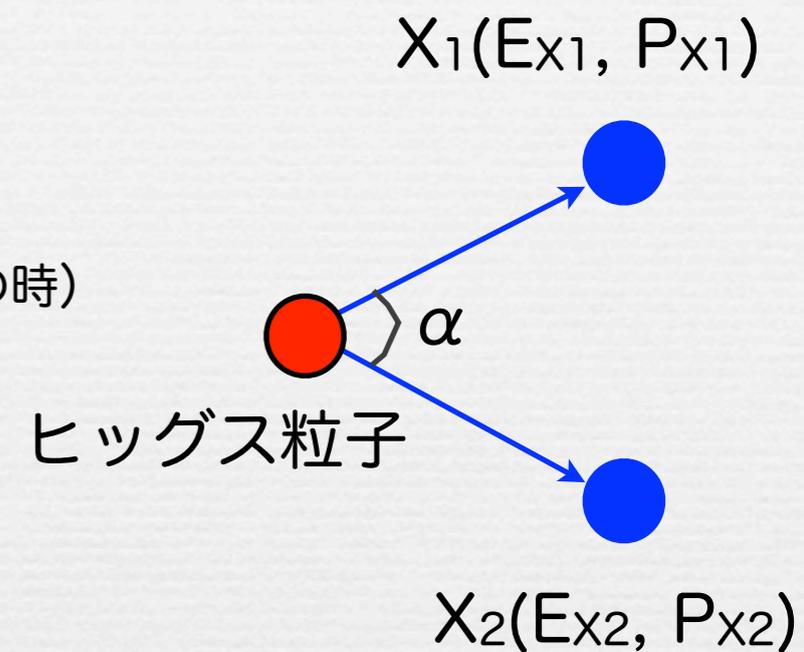


ヒッグスの探索手法

ヒッグス粒子 $\rightarrow X_1 + X_2$

$$m_{X_1 X_2}^2 = (E_{X_1} + E_{X_2})^2 - (P_{X_1} + P_{X_2})^2$$

$$= 2E_{X_1} E_{X_2} (1 - \cos \alpha) \quad (X_1, X_2 \text{の質量} \sim 0 \text{の時})$$



背景事象が少ない

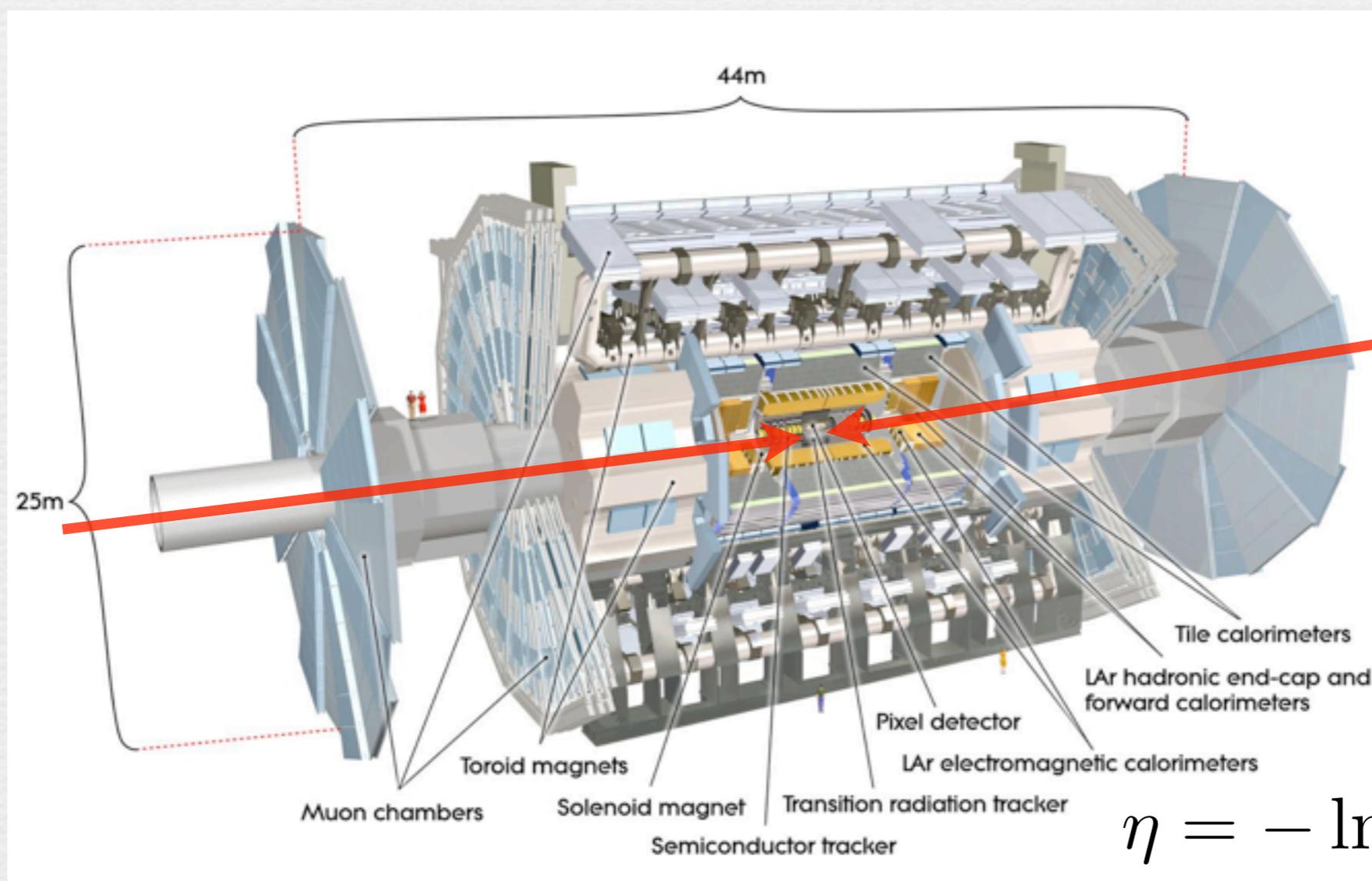
運動量/エネルギー分解能が良い

LHC-ATLAS detector

重量：7000トン、

読み出し数：1億6千万channels

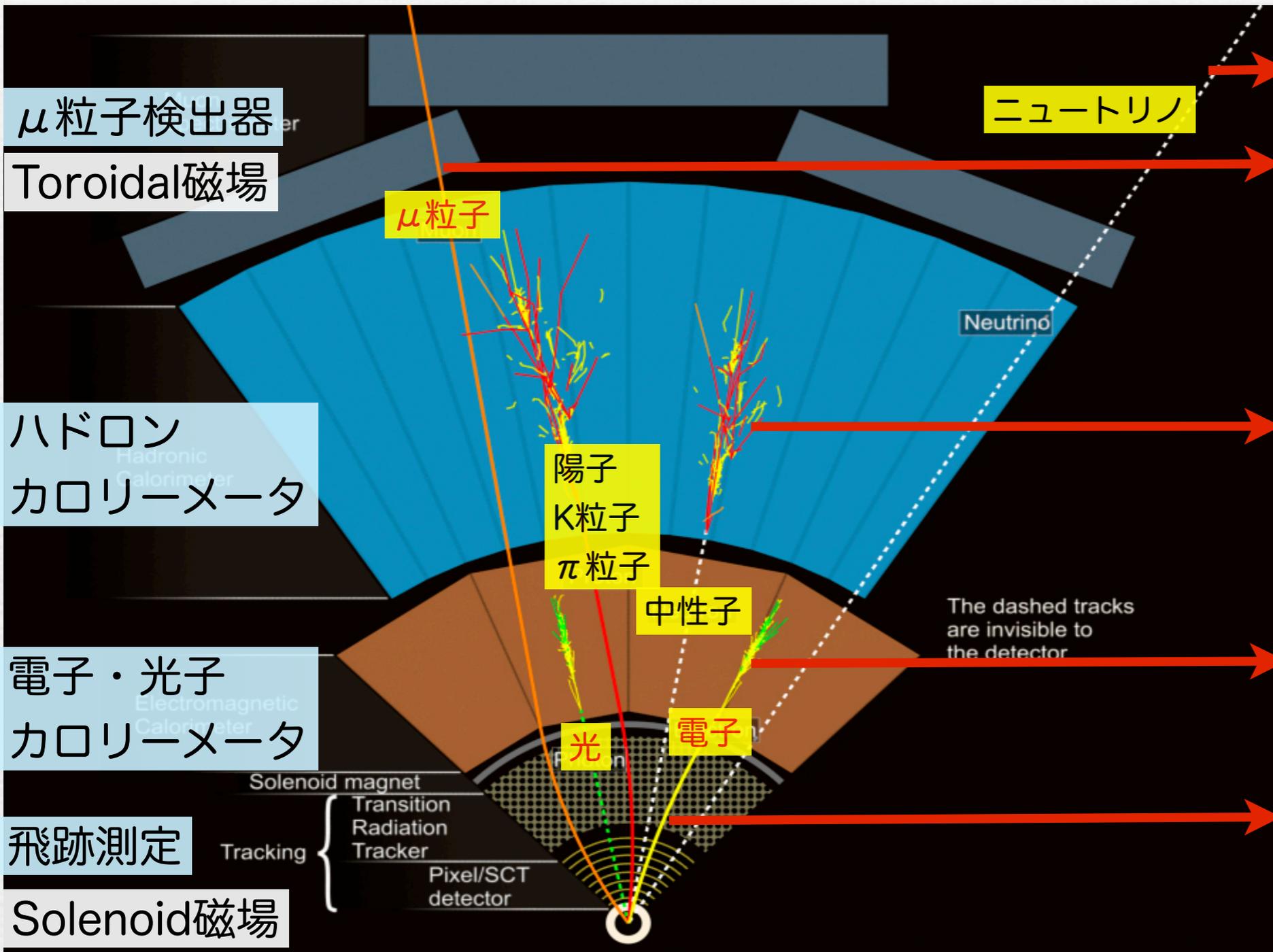
ヒッグス粒子の崩壊による粒子の種類、運動量、エネルギー等を測定



$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する



ニュートリノはすり抜ける
欠損エネルギー

反応しにくい粒子
μ粒子の運動量測

陽子、中性子、π粒子、K
粒子を止める
→エネルギー測定

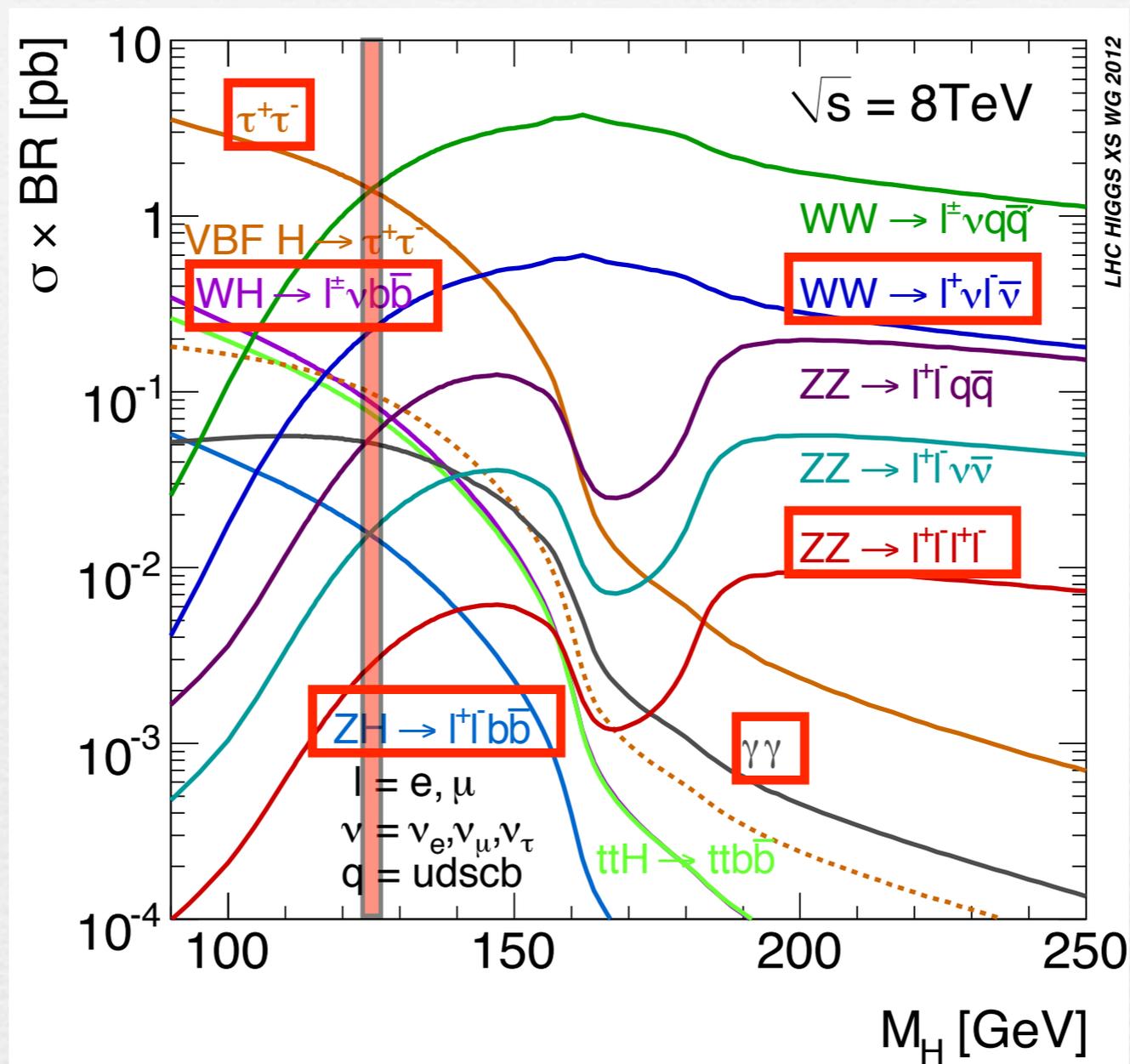
制動放射で電子と光子を
止める
→エネルギー測定

荷電粒子が残す微弱信号
磁場で荷電粒子を曲げる
→ 運動量測定

粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

ハドロンに比べ、電子、光、μ粒子の分解能が良い

ヒッグス粒子探索に適した事象

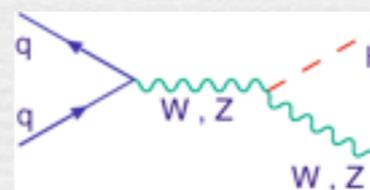
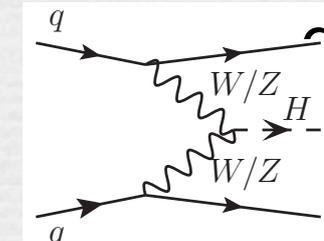
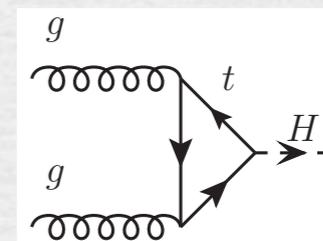


- gluon fusionとW/Z boson fusionを用いて

$H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$ 、 $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 、 $H \rightarrow \tau\tau$

- W/Zとの随伴生成を用いて

$VH \rightarrow Vbb$ ($V=W, Z$)

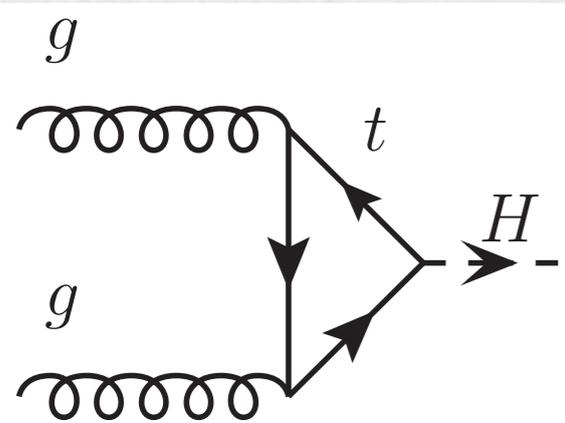
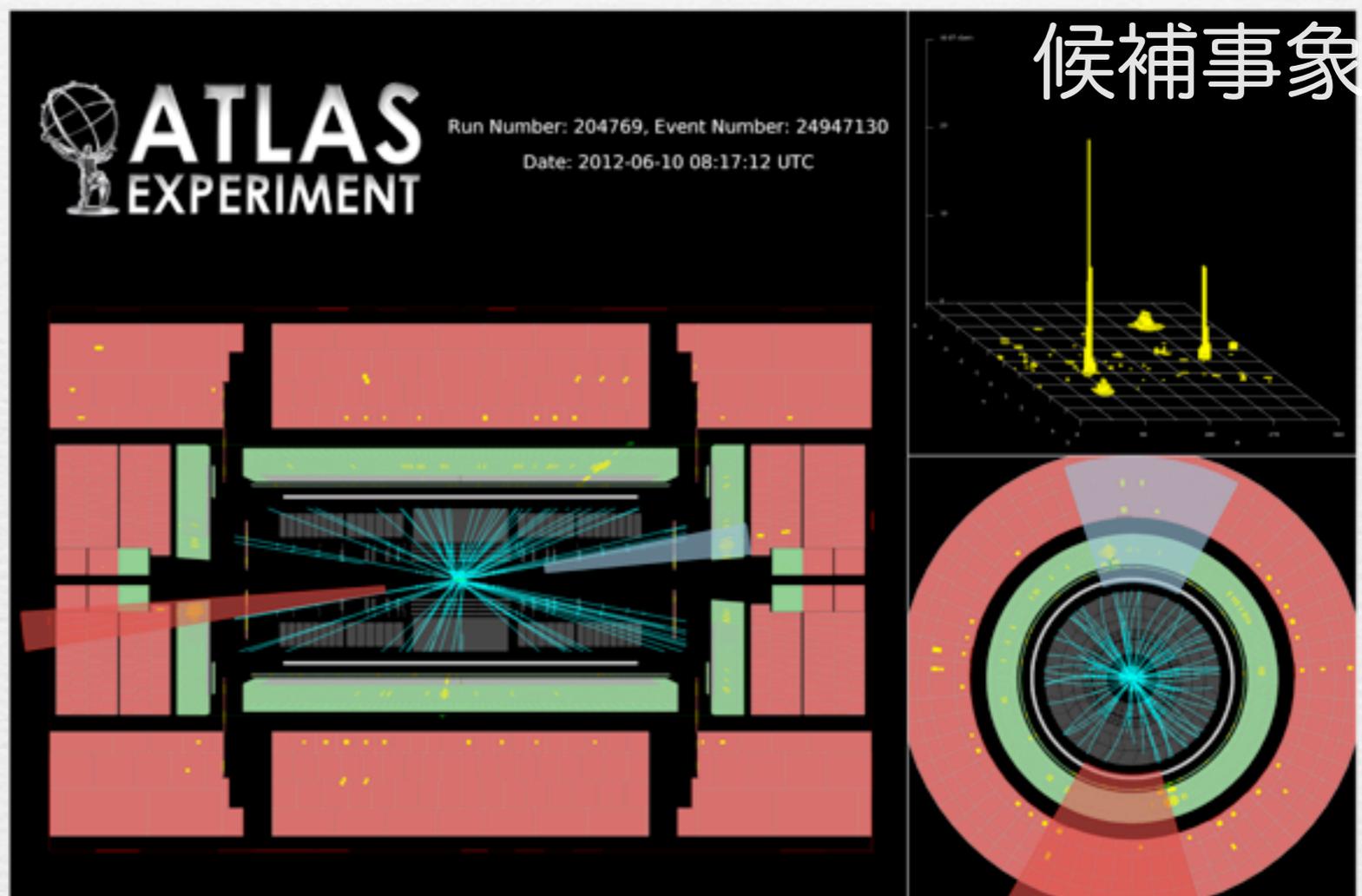
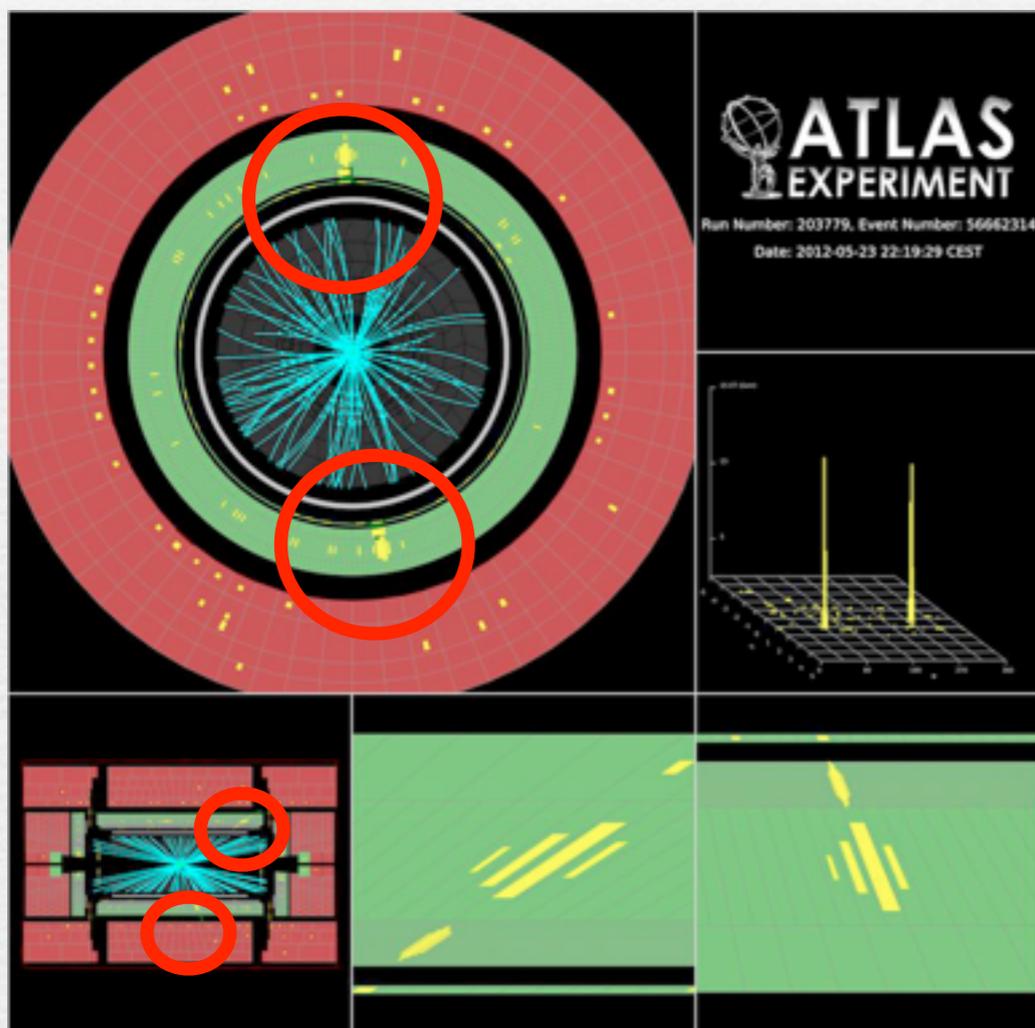


陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow 光子 光子

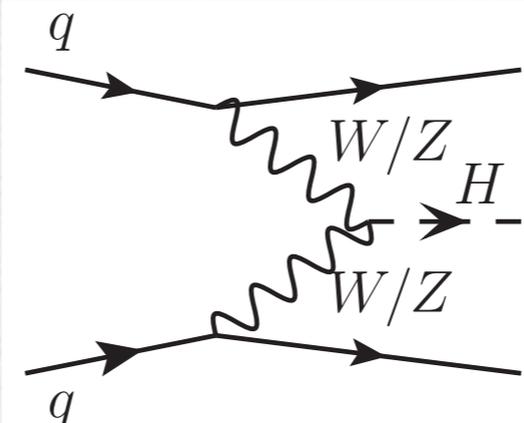
高い運動量の光子が2本(カロリメータにて)

$m_{\gamma\gamma}$ でヒッグスのピークを探索

低背景事象、質量分解能が良い



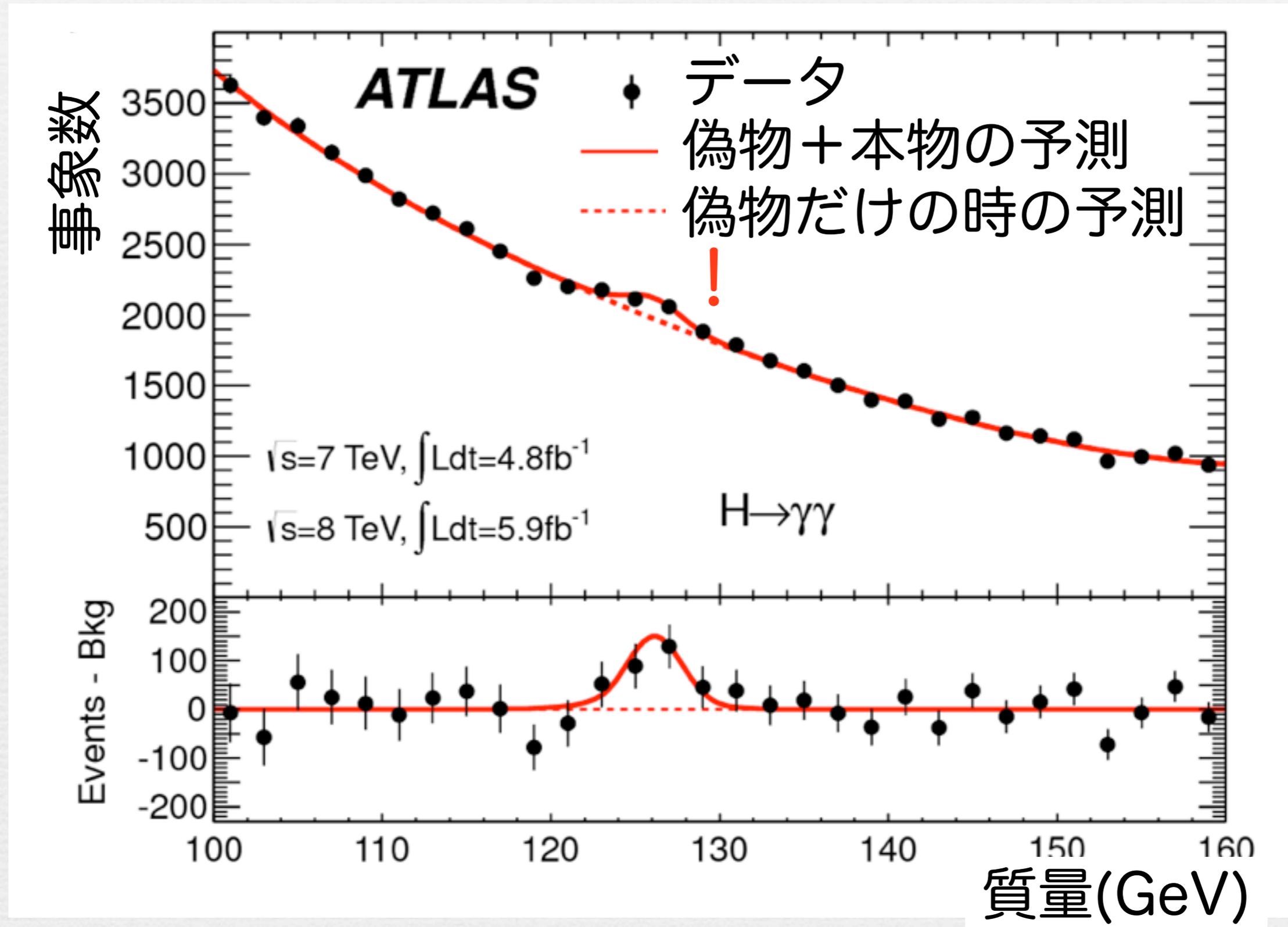
候補
 $2\gamma + 0\text{jet}$



候補
 $2\gamma + 2\text{jets}$

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow 光子 光子

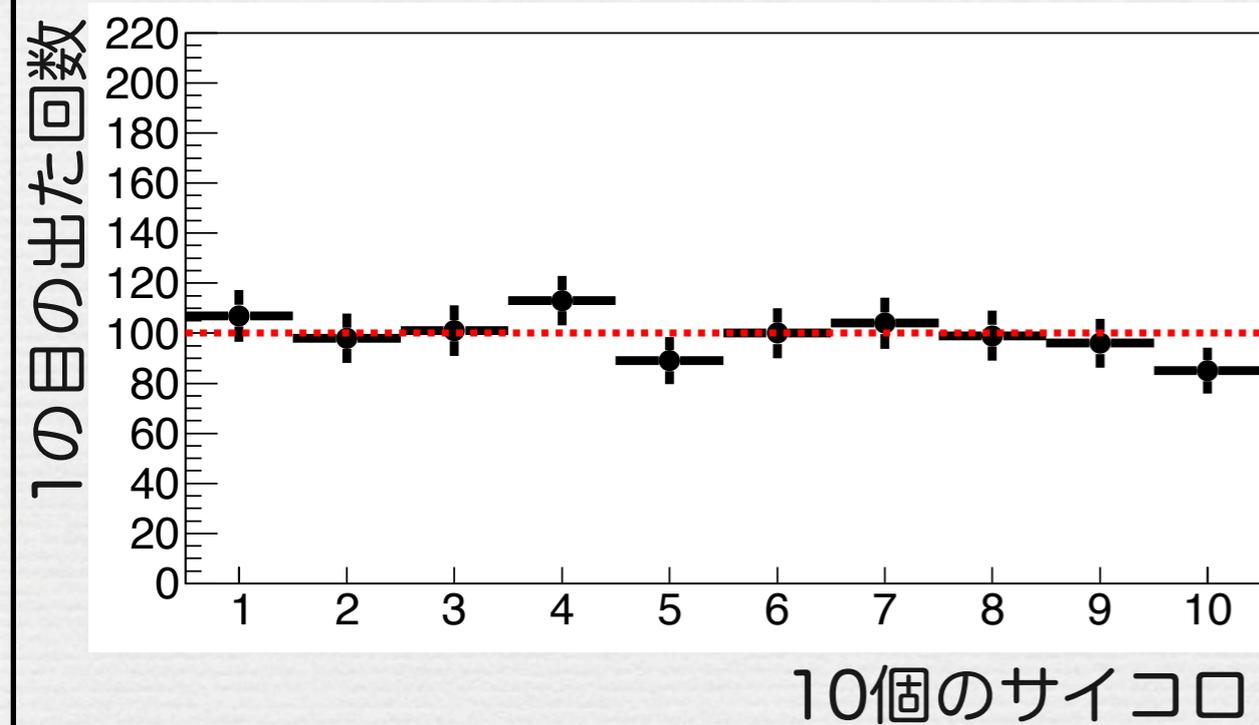
主な背景事象は、 $pp \rightarrow$ 光子 光子



発見の指標

1の目の出る確率が1/5のサイコロを探せ

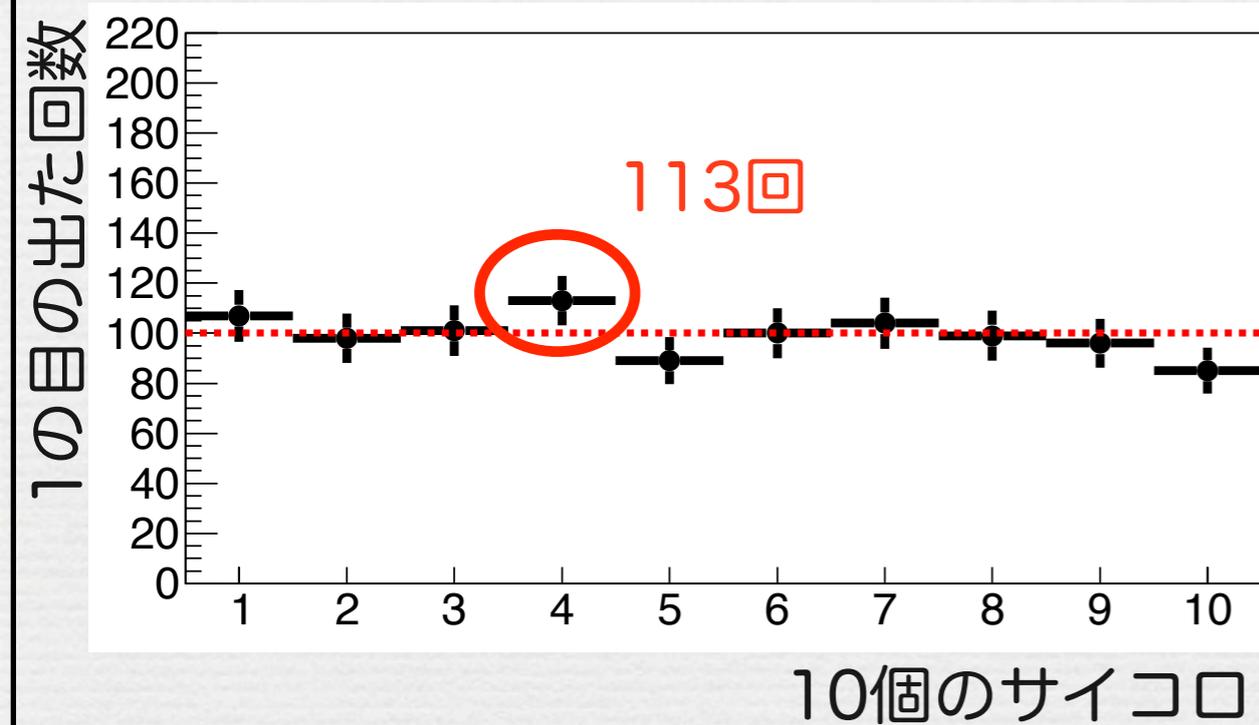
サイコロを600回振った時の1の目が出る回数



発見の指標

1の目の出る確率が1/5のサイコロを探せ

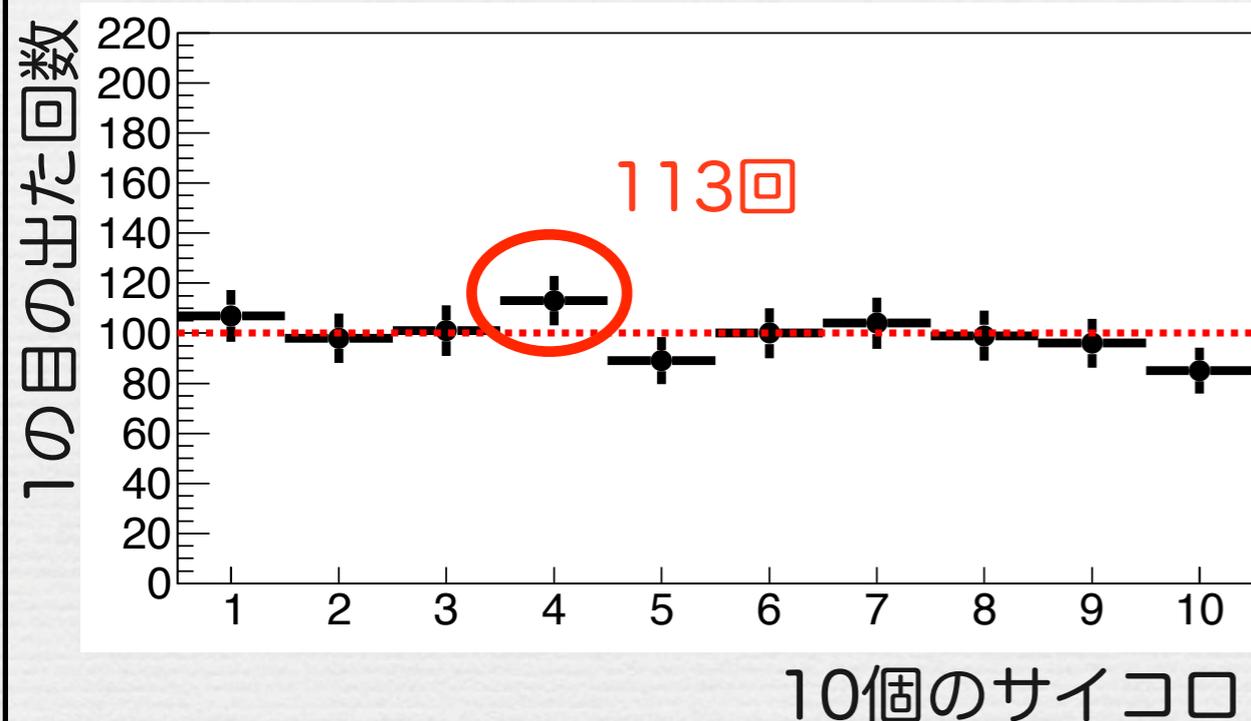
サイコロを600回振った時の1の目が出る回数



発見の指標

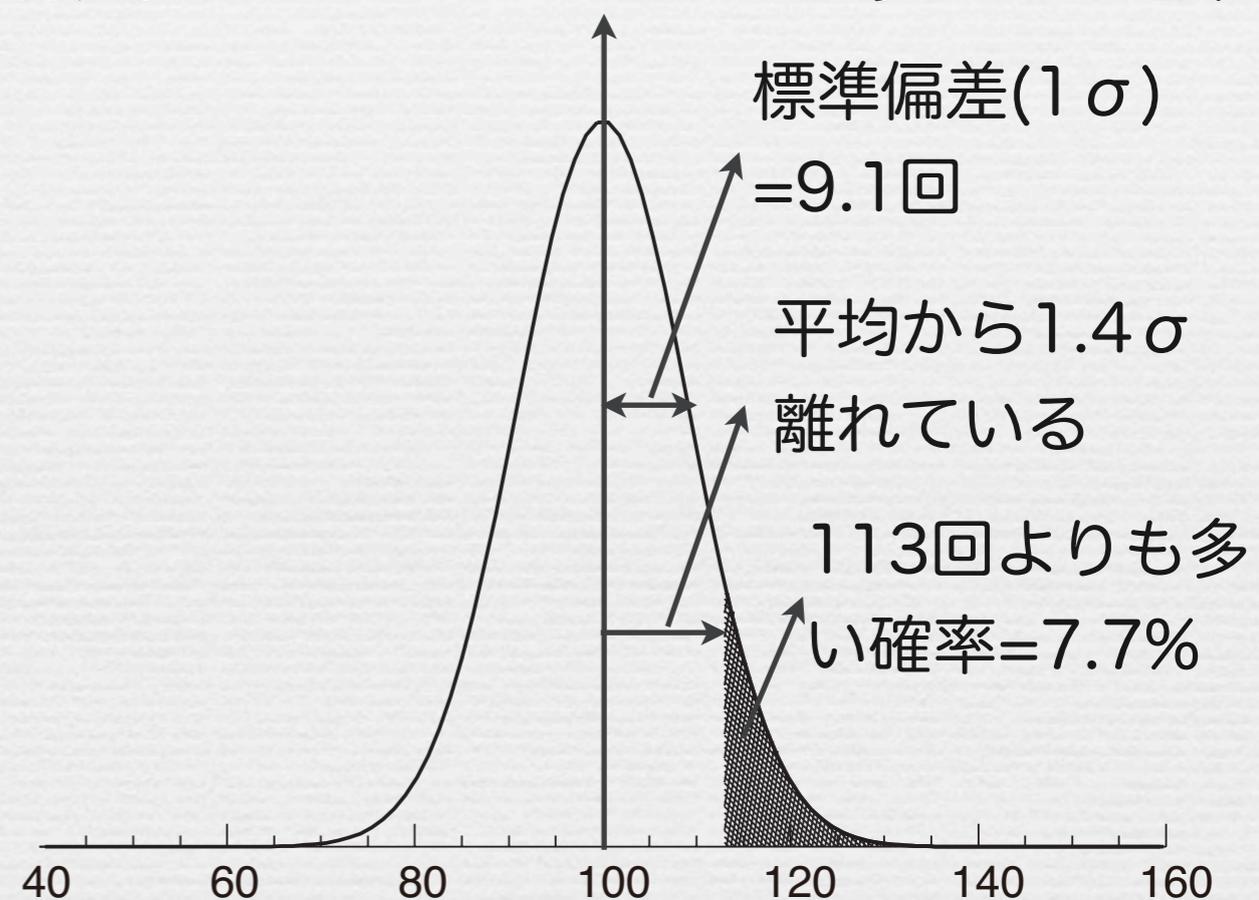
1の目の出る確率が1/5のサイコロを探せ

サイコロを600回振った時の1の目が出る回数



p-value :

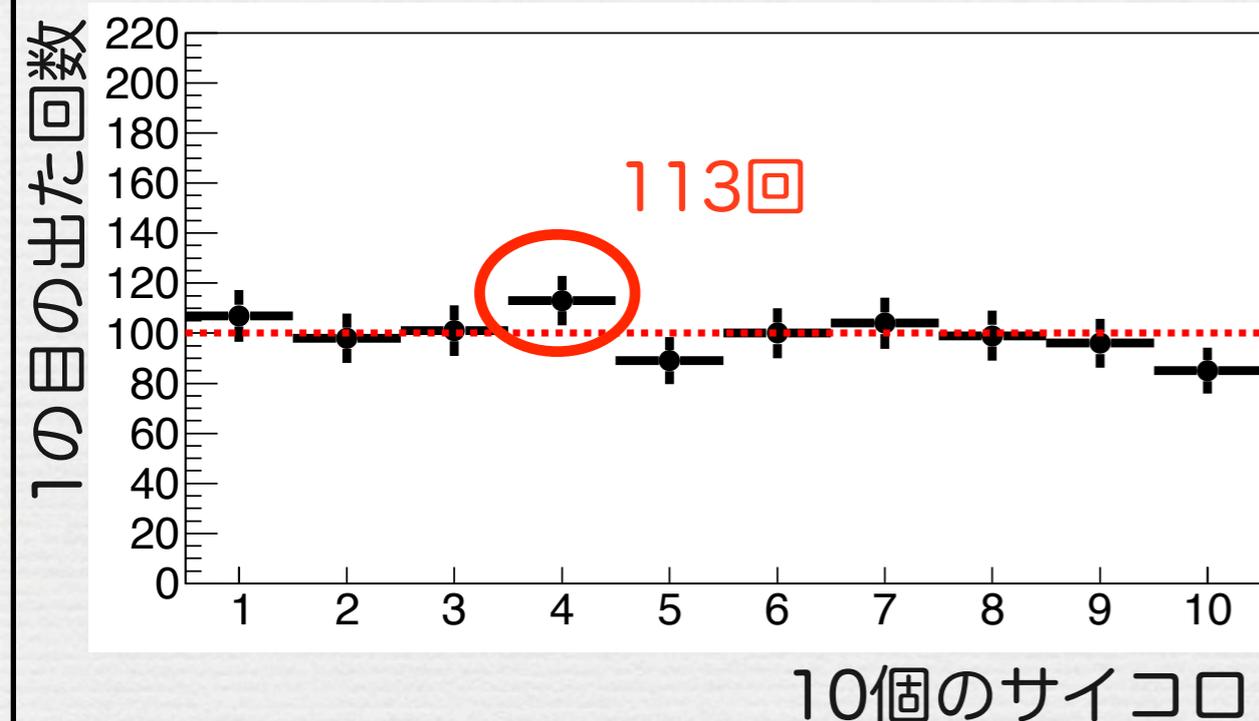
統計的ふらつきで113回よりも多くなる確率



発見の指標

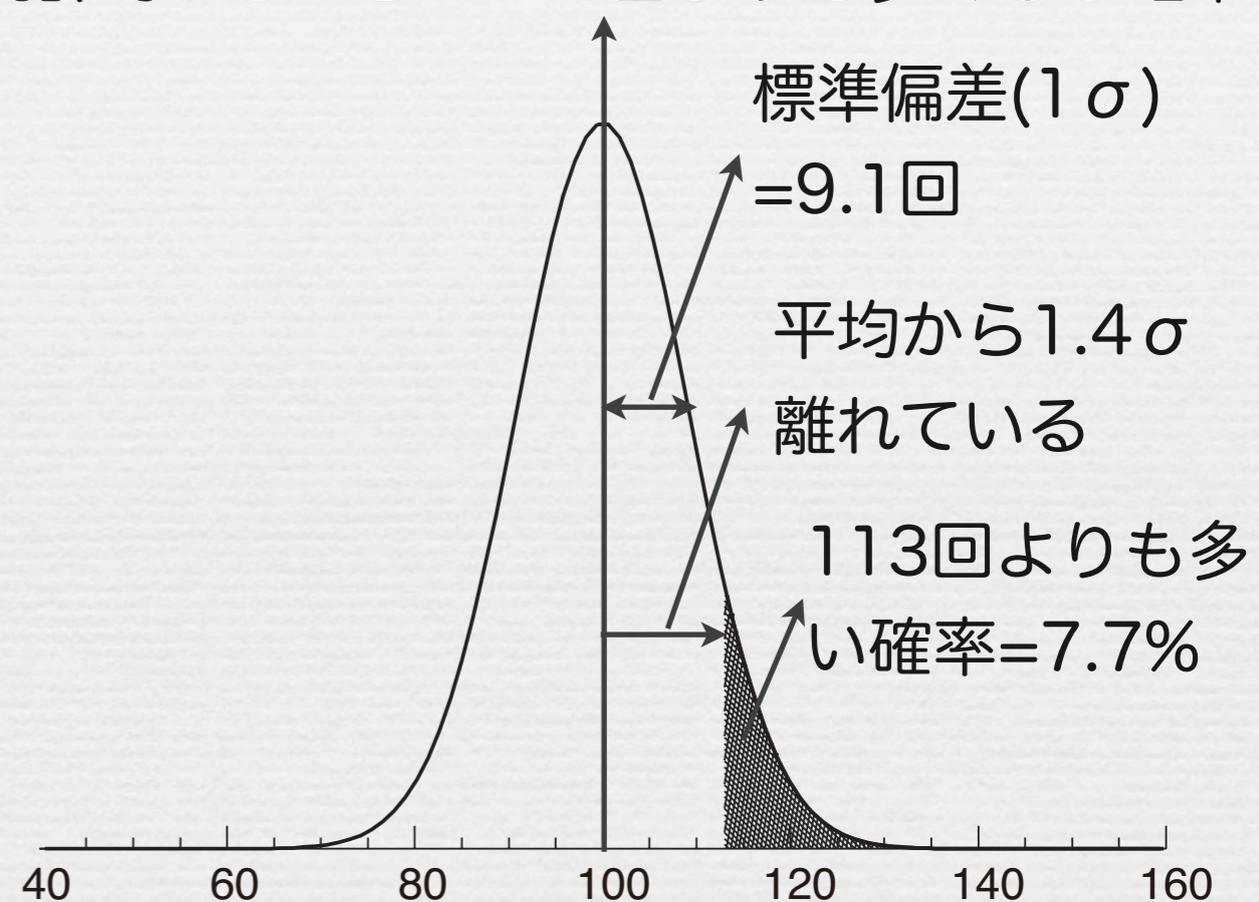
1の目の出る確率が1/5のサイコロを探せ

サイコロを600回振った時の1の目が出る回数



p-value :

統計的ふらつきで113回よりも多くなる確率



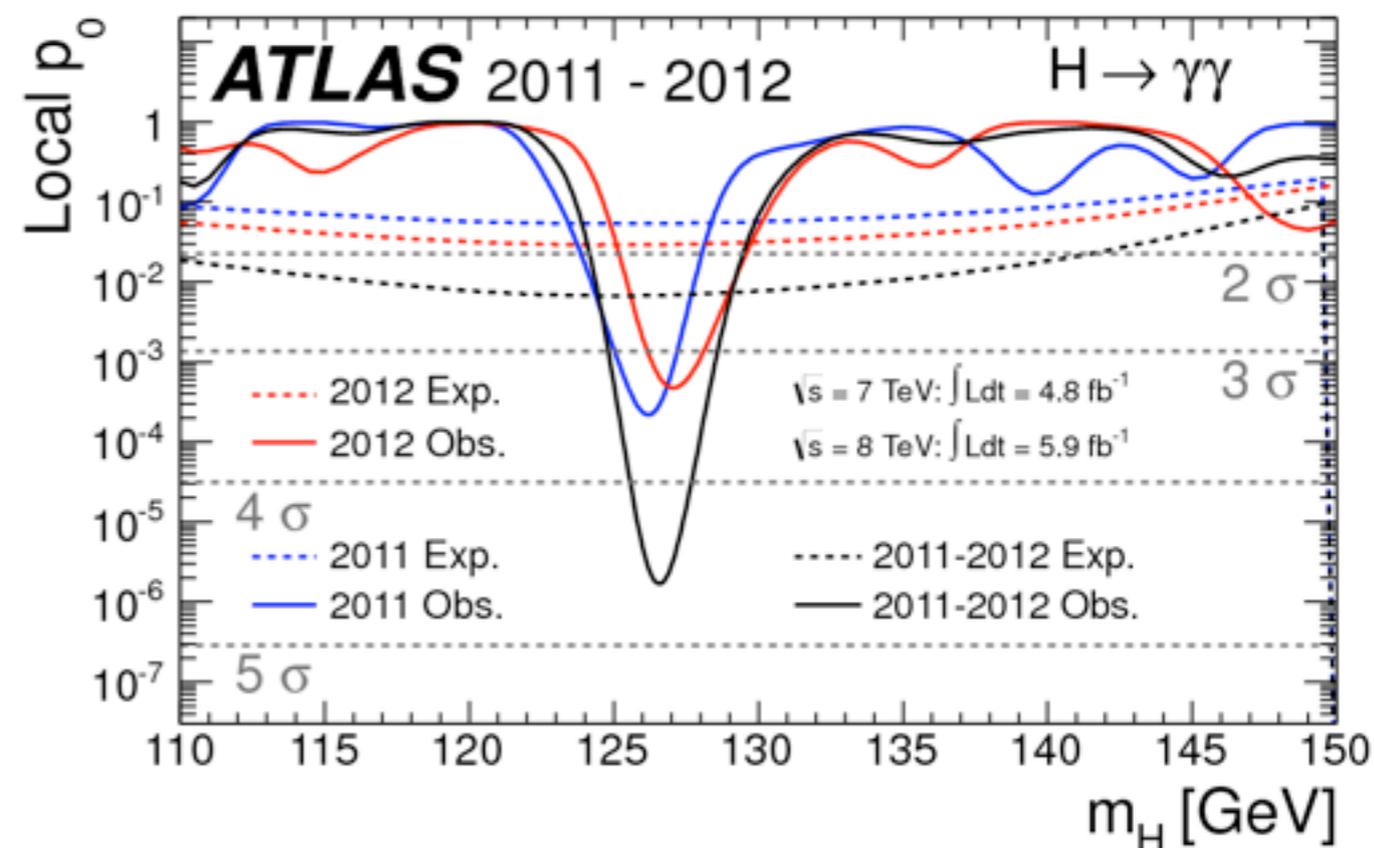
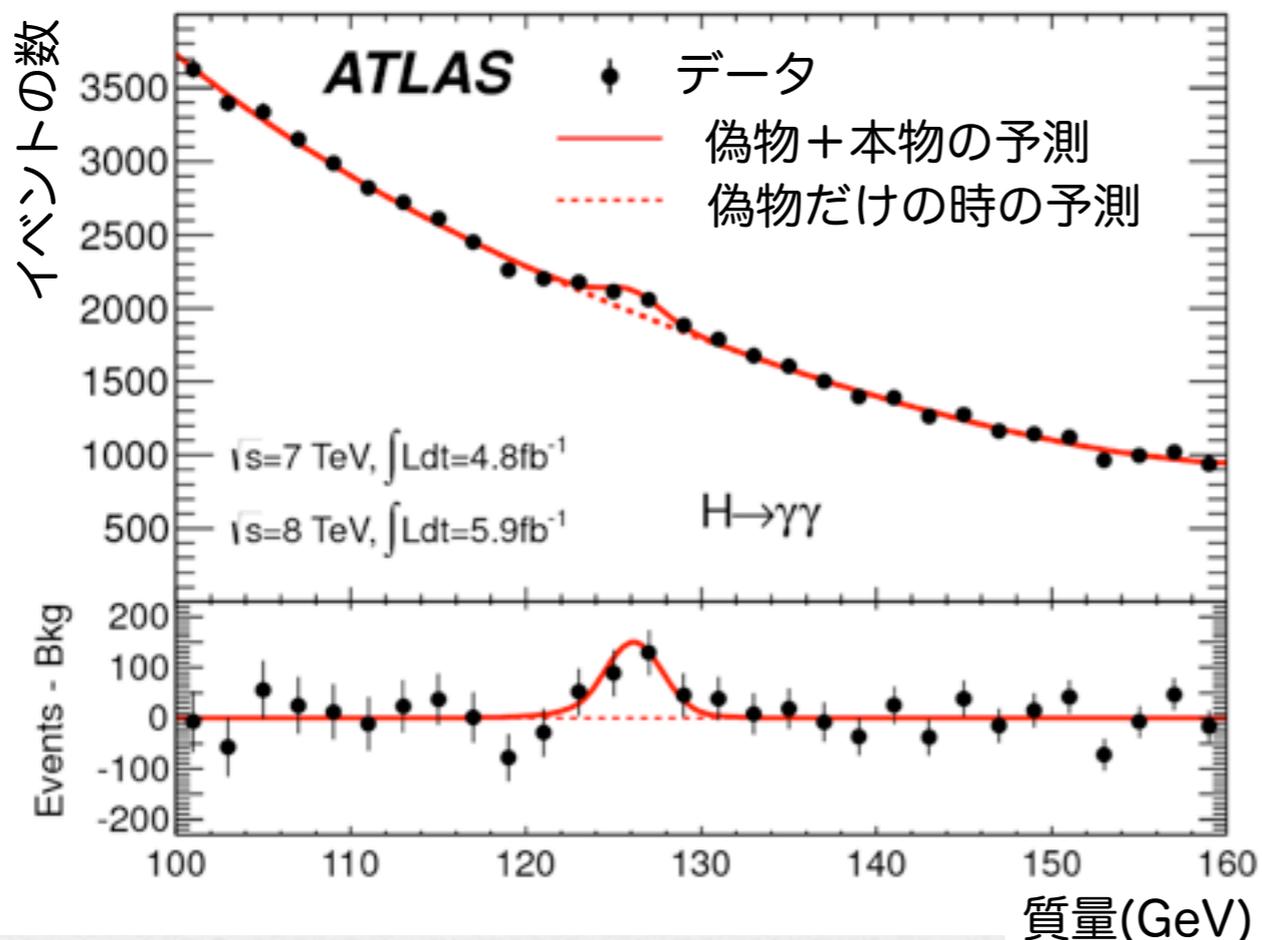
p-value $< 3 \times 10^{-7}$ (超過 $> 5\sigma$)

発見

p-value $< 1.3 \times 10^{-3}$ (超過 $> 3\sigma$)

兆候

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow 光子 光子



p-value : 3.4×10^{-6} (4.5σ) ... Observed

6.2×10^{-3} (2.5σ) ... Expected @ $m_H=126.5\text{GeV}$

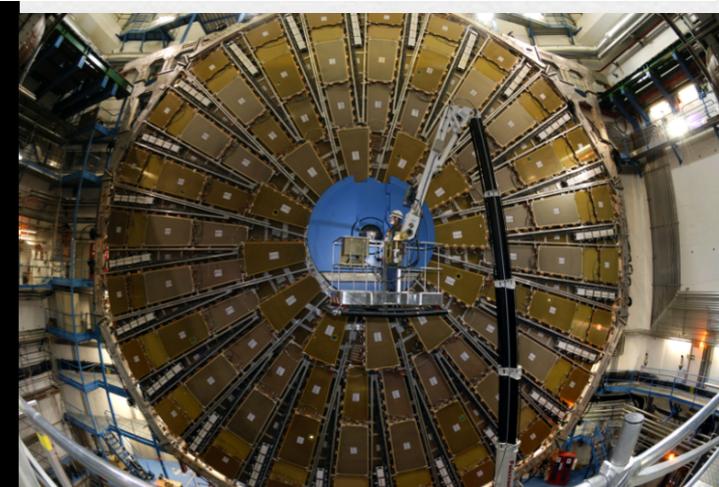
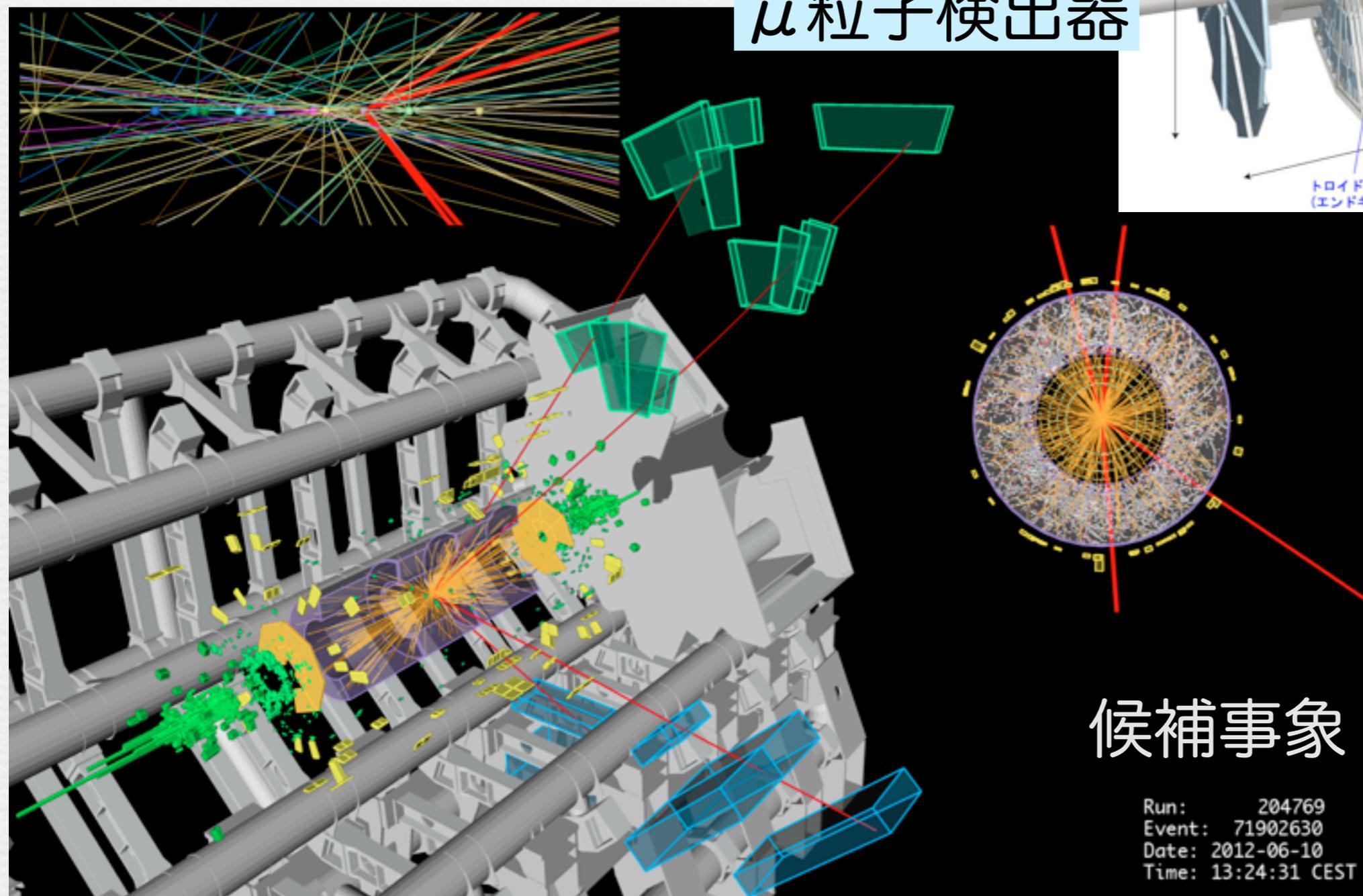
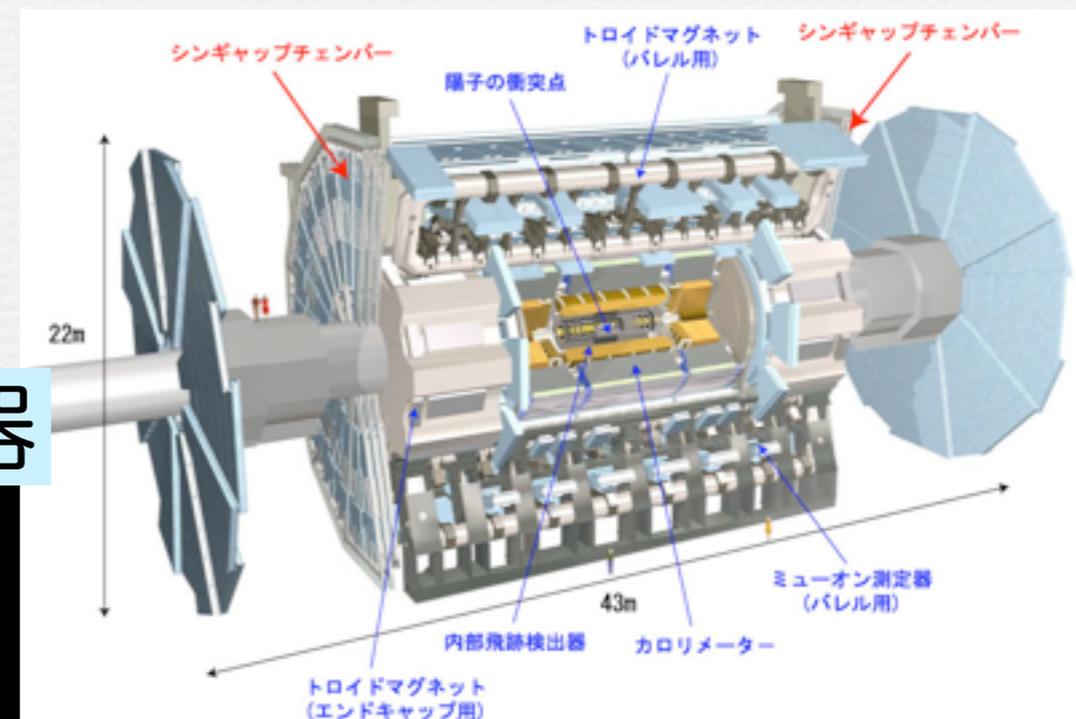
ヒッグス粒子のスピン = 0 or 2

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 レプトン

高い運動量の電子または μ 粒子
m_{4l}でヒッグスのピークを探索

低背景事象、質量分解能が良い

μ 粒子検出器

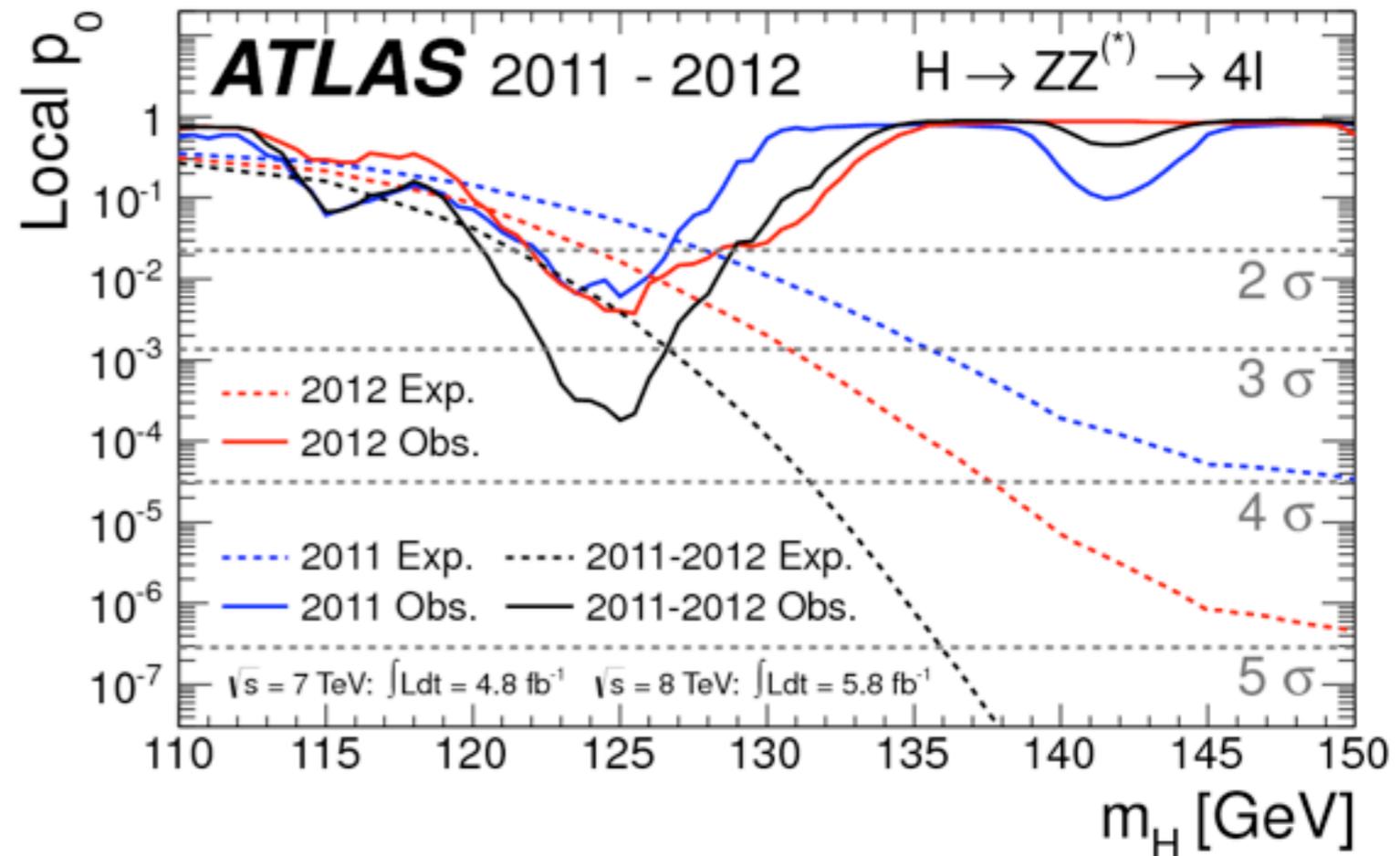
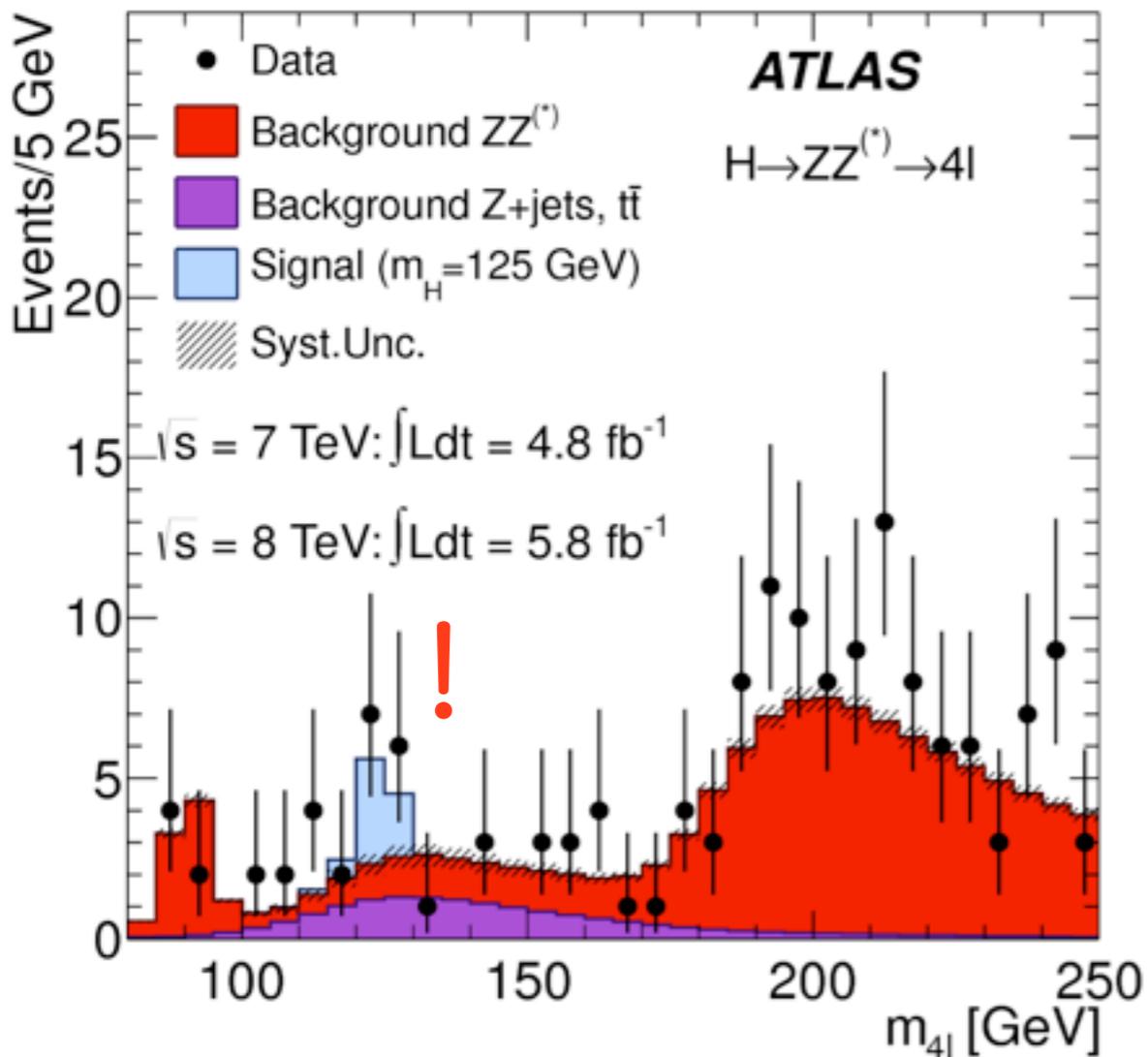


候補事象

Run: 204769
Event: 71902630
Date: 2012-06-10
Time: 13:24:31 CEST

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 レプトン

主な背景事象は、 $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ レプトン



p-value : 1.6×10^{-4} (3.6σ) ... Observed

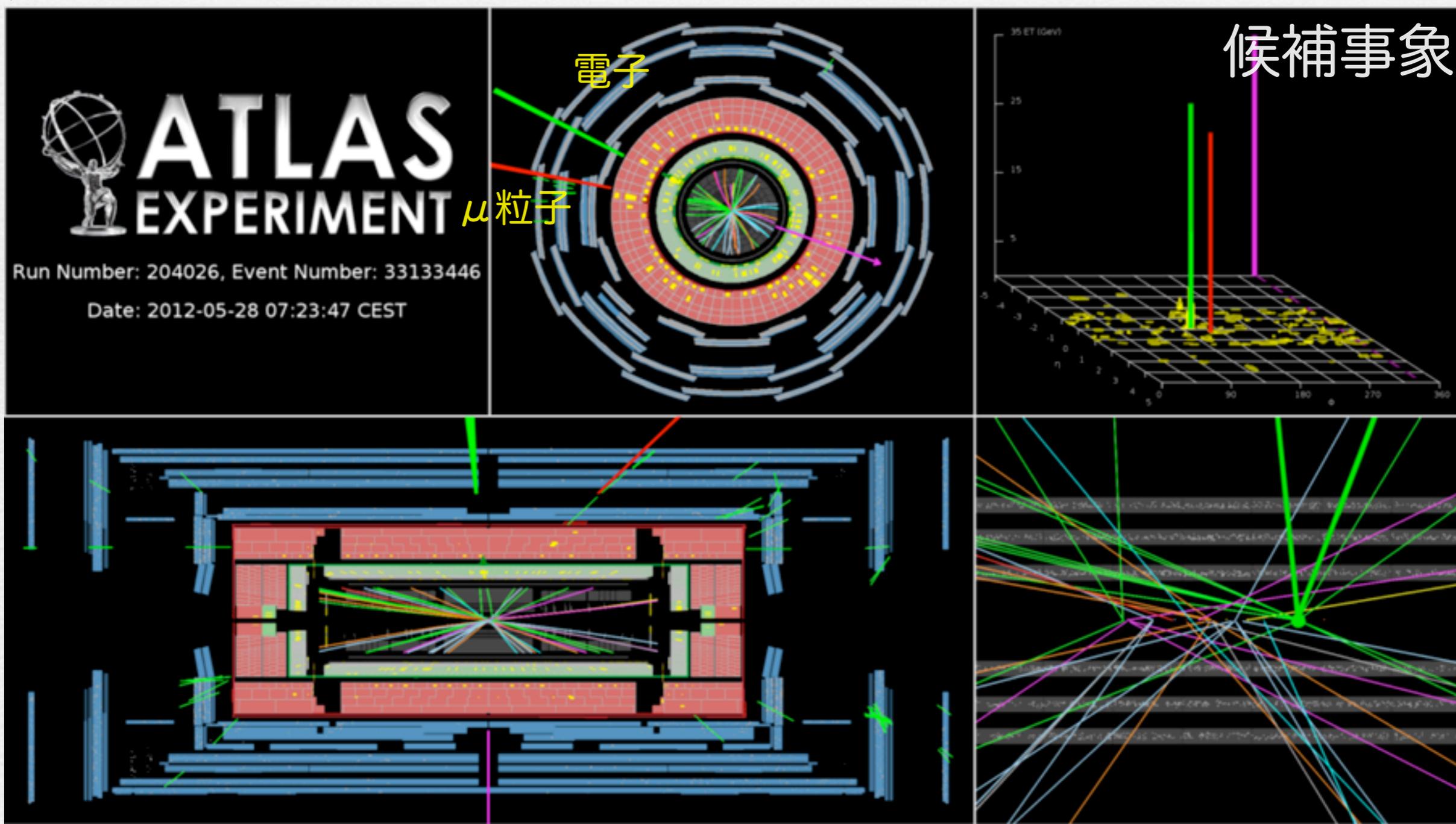
3.5×10^{-3} (2.7σ) ... Expected @ $m_H = 125$ GeV

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow WW \rightarrow $l \nu l \nu$

2本の電子または μ 粒子、大きな欠損エネルギー (ν)

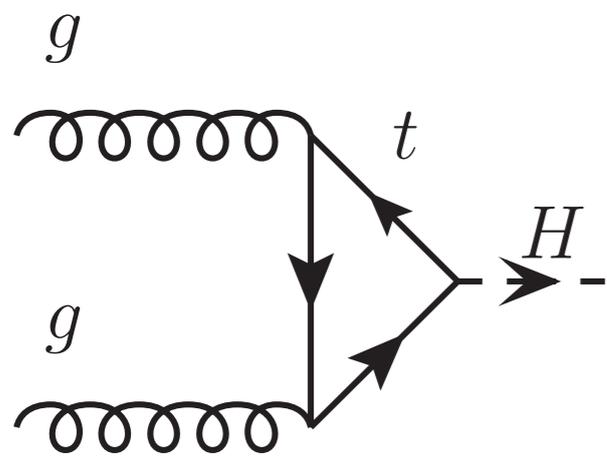
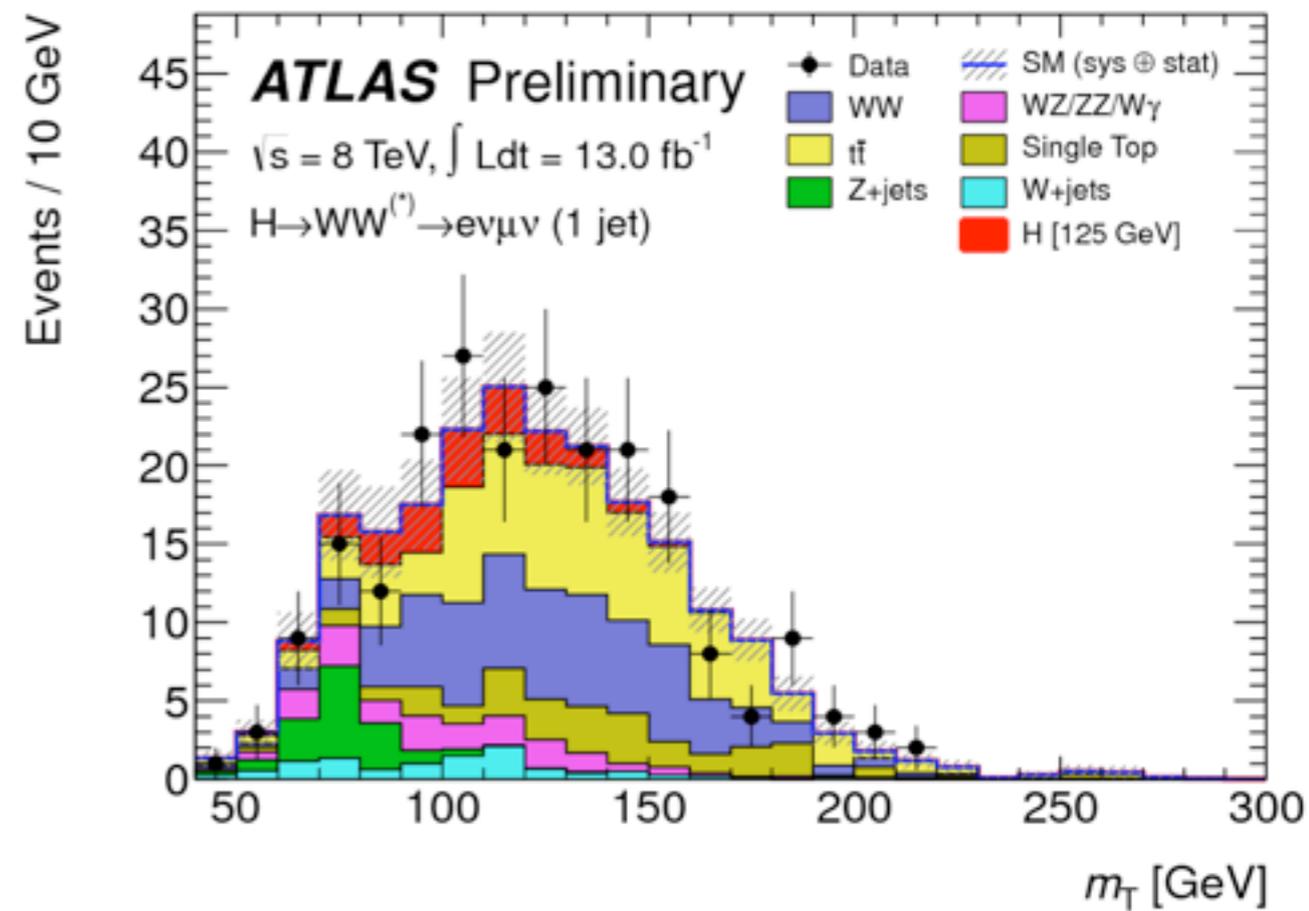
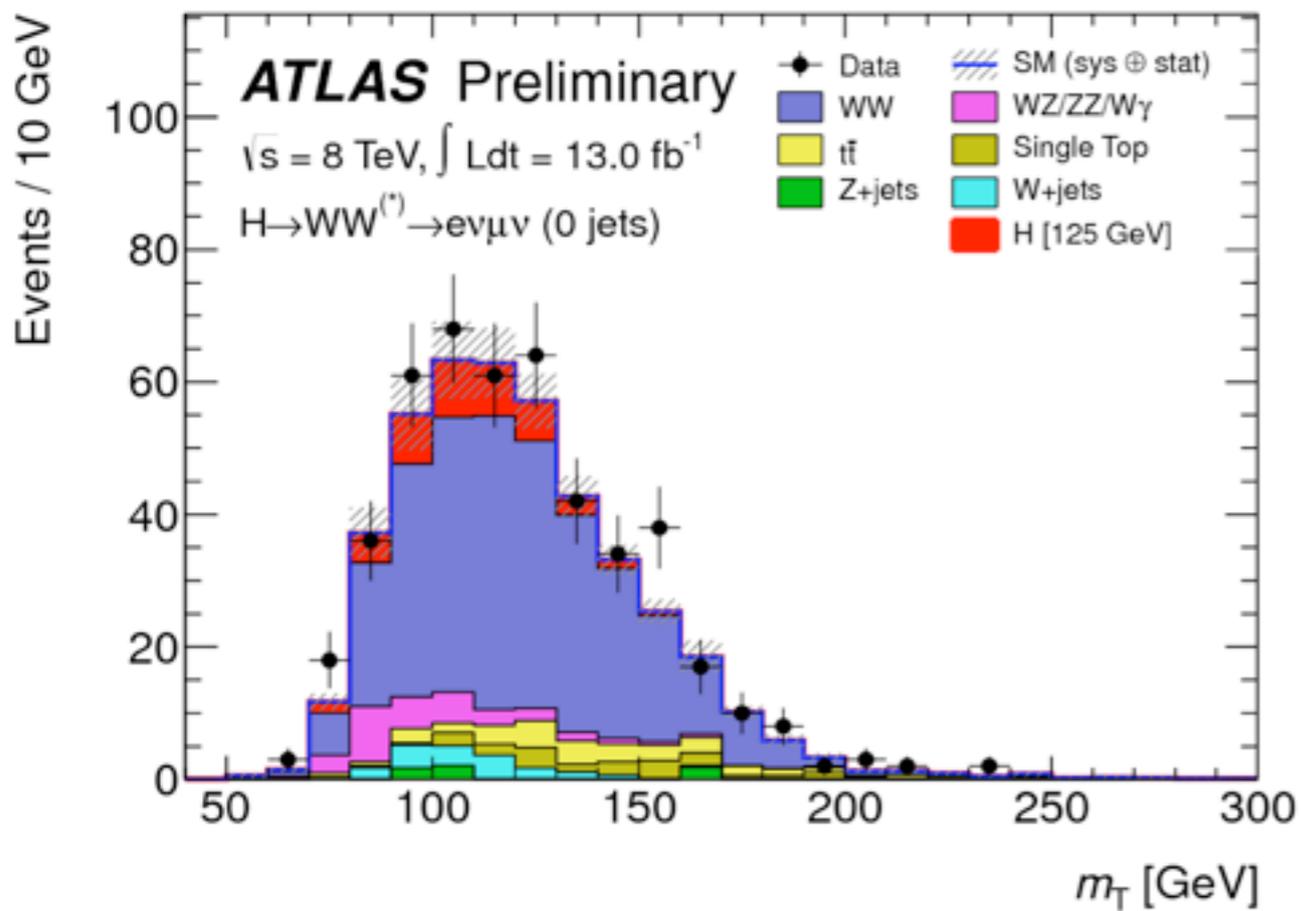
ν のため不変質量の再構成が不可能

$$m_T = \sqrt{(E_T^{ll} + E_T^{miss})^2 - |\mathbf{p}_T^{ll} + \mathbf{E}_T^{miss}|^2}$$

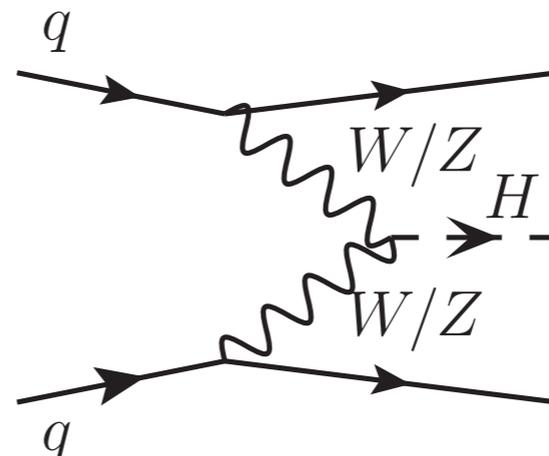


陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow WW \rightarrow $l\nu l\nu$

主な背景事象は、 $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4$ レプトン、 $t\bar{t} \rightarrow WbWb \rightarrow l\nu b l\nu \bar{b}$

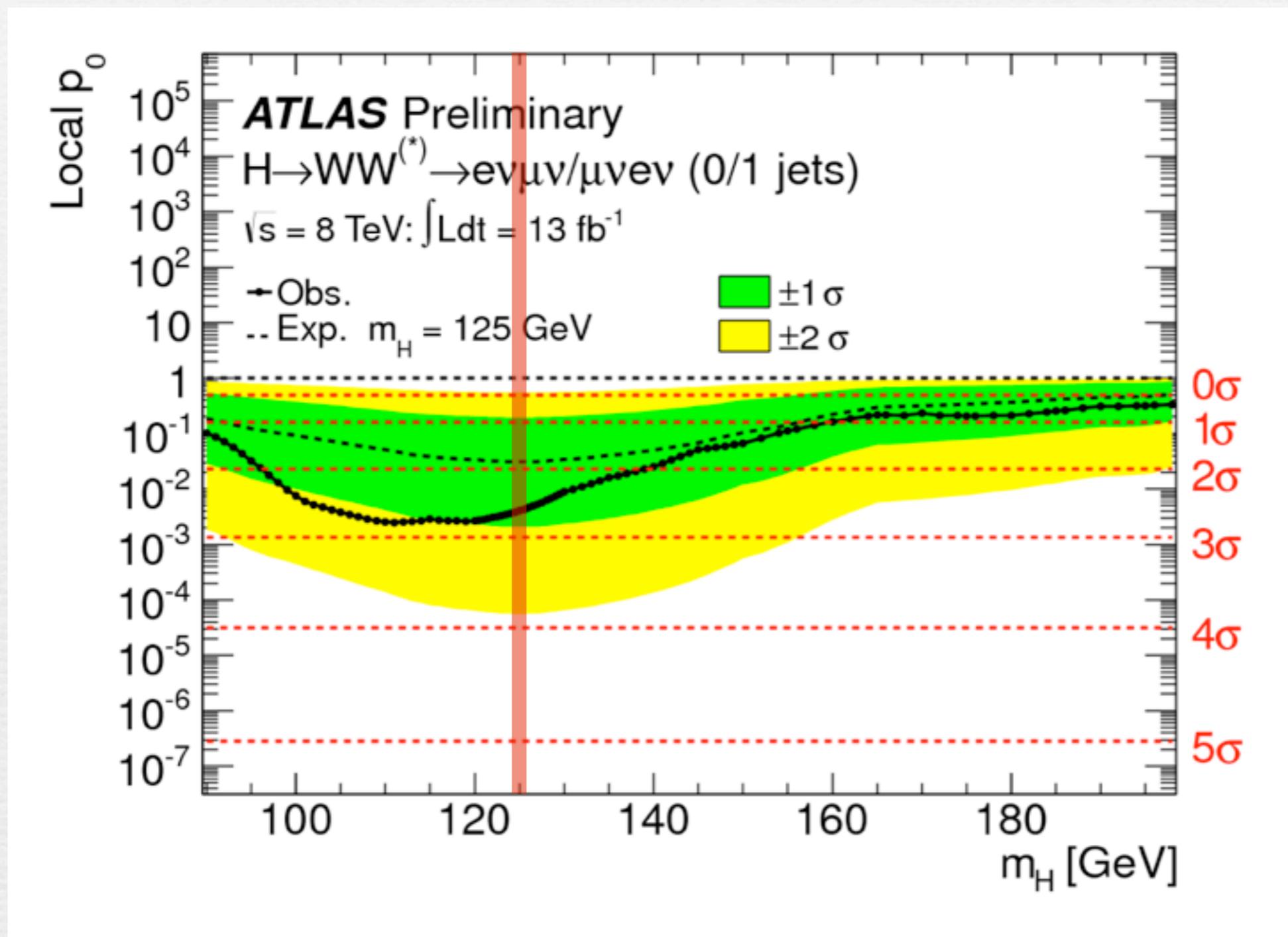


候補
2W+0jet



候補
2W+jet

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow WW \rightarrow $\ell \nu \ell \nu$



p-value : 4×10^{-3} (2.6σ) ... Observed

0.03 (1.9σ) ... Expected @ $m_H = 125 \text{ GeV}$

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow $\tau\tau$

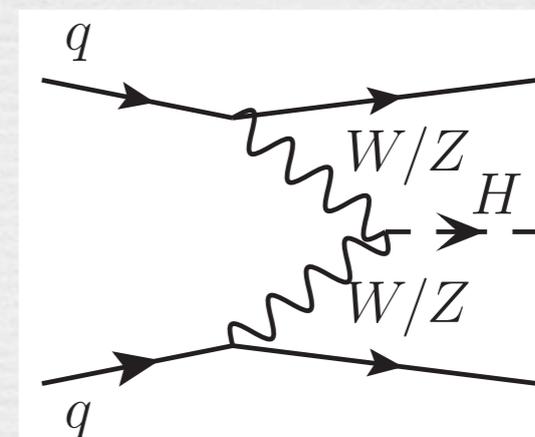
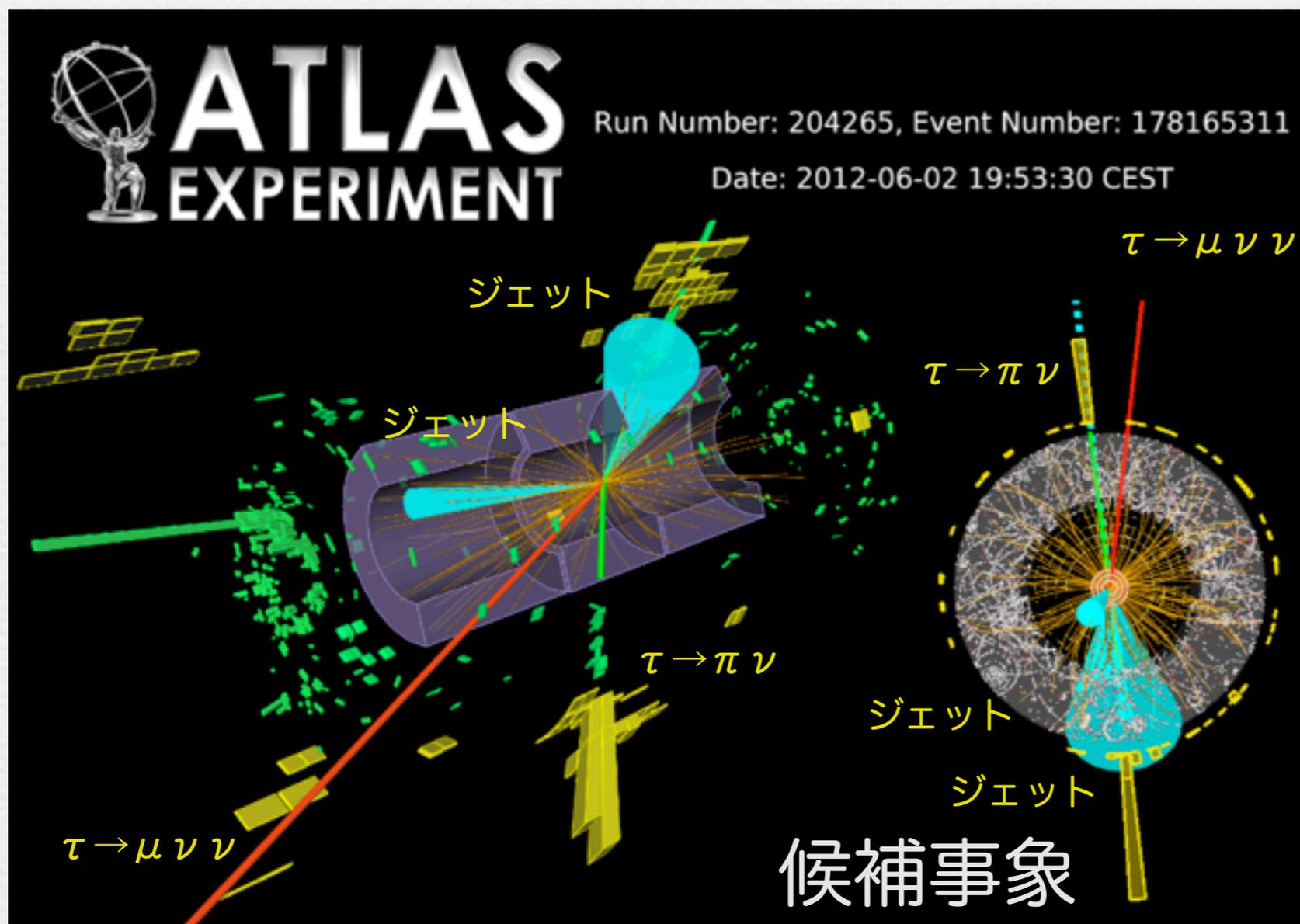
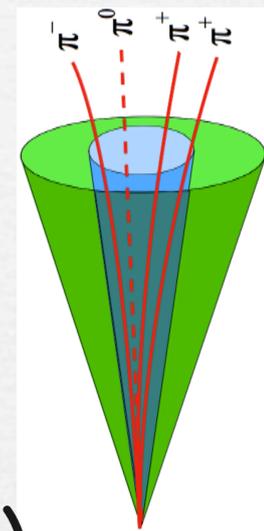
ヒッグスと τ レプトンの湯川結合の測定で重要
 τ のレプトン崩壊、ハドロン崩壊を用いる

$$\tau^- \rightarrow \ell^- \nu_\ell \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau + n\pi^0$$

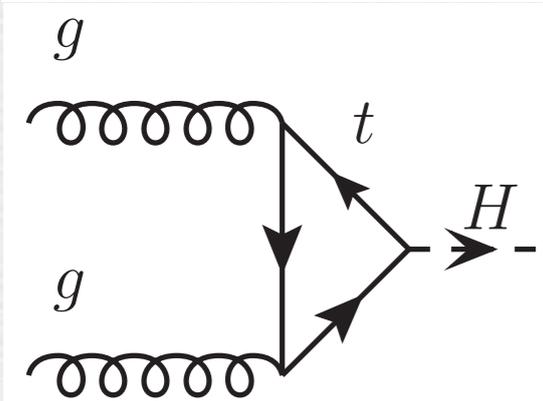
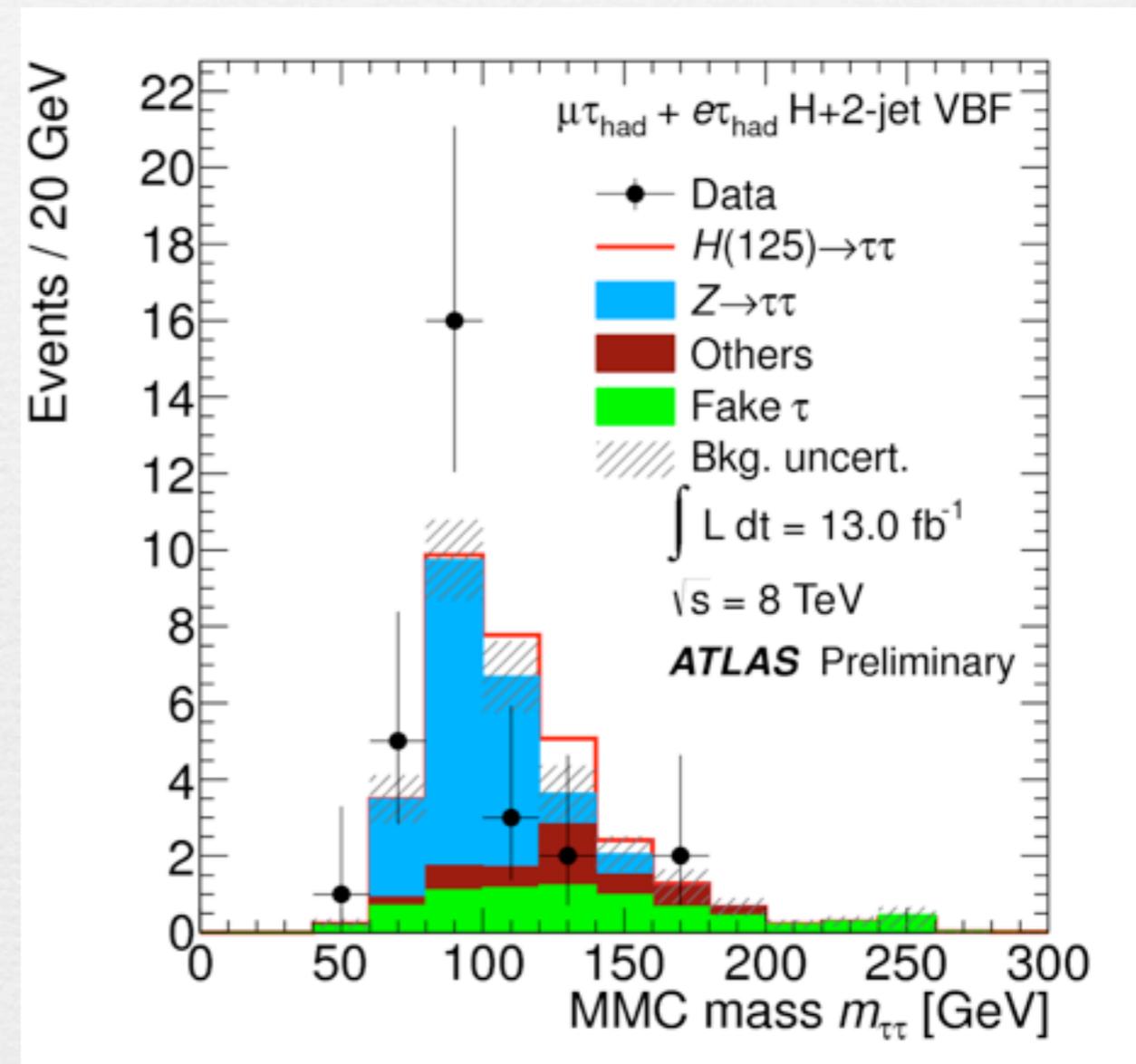
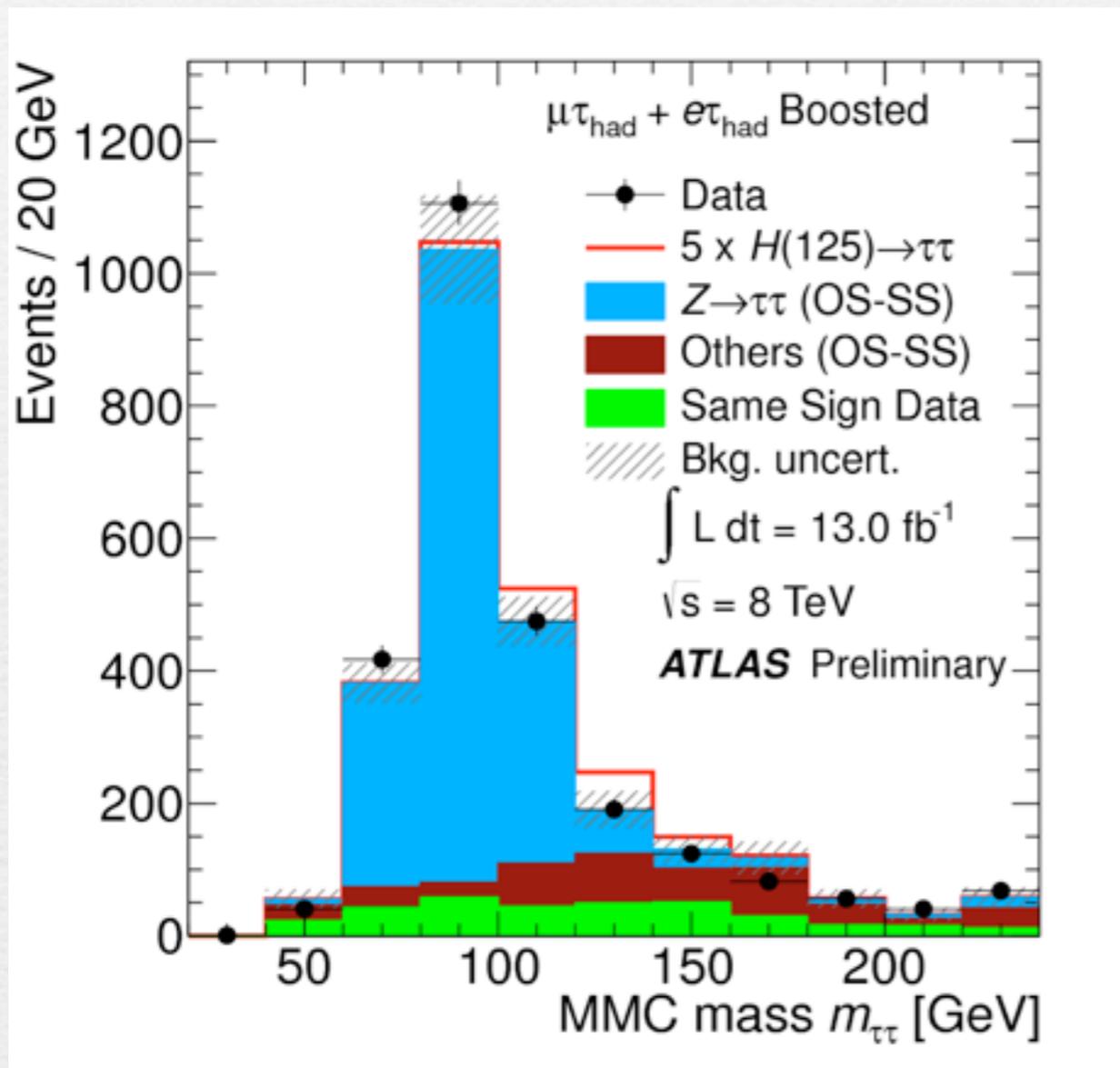
$$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau + n\pi^0$$

$m_{\tau\tau}$: ν の存在のため、質量分解能はあまり良くない

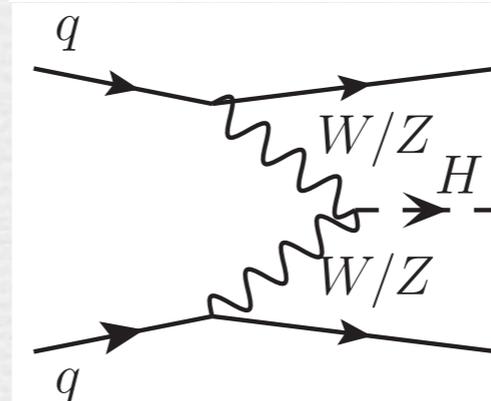


候補
 $2\tau + 2\text{jets}$

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow $\tau\tau$

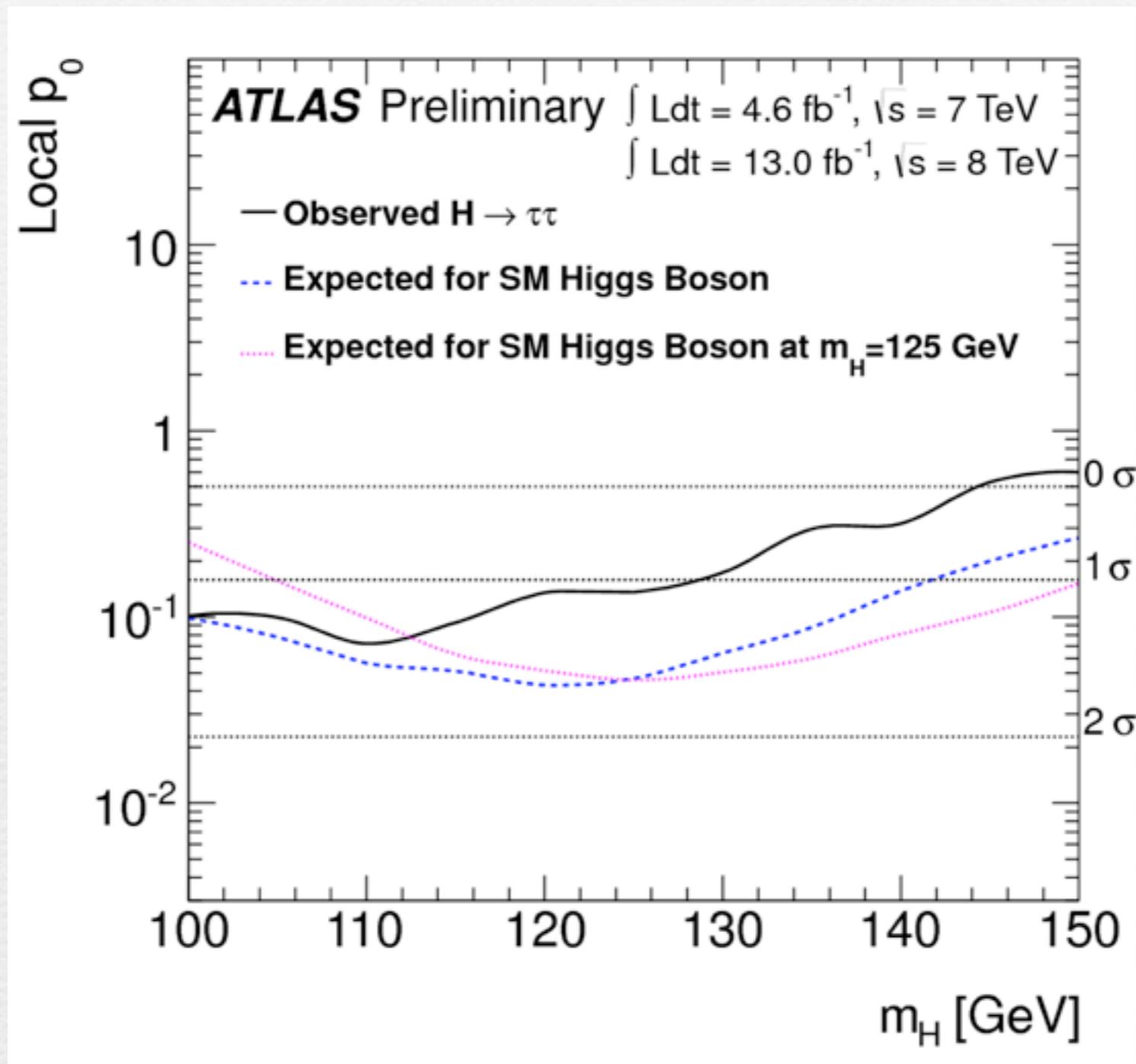


$2\tau + 0\text{jet}$



$2\tau + 2\text{jets}$

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow $\tau \tau$

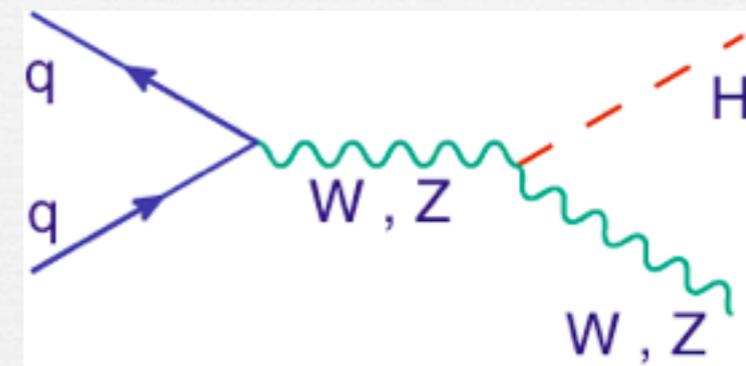


p-value : 0.13 (1.1 σ) ... Observed

0.04 (1.7 σ) ... Expected @ $m_H = 125 \text{ GeV}$

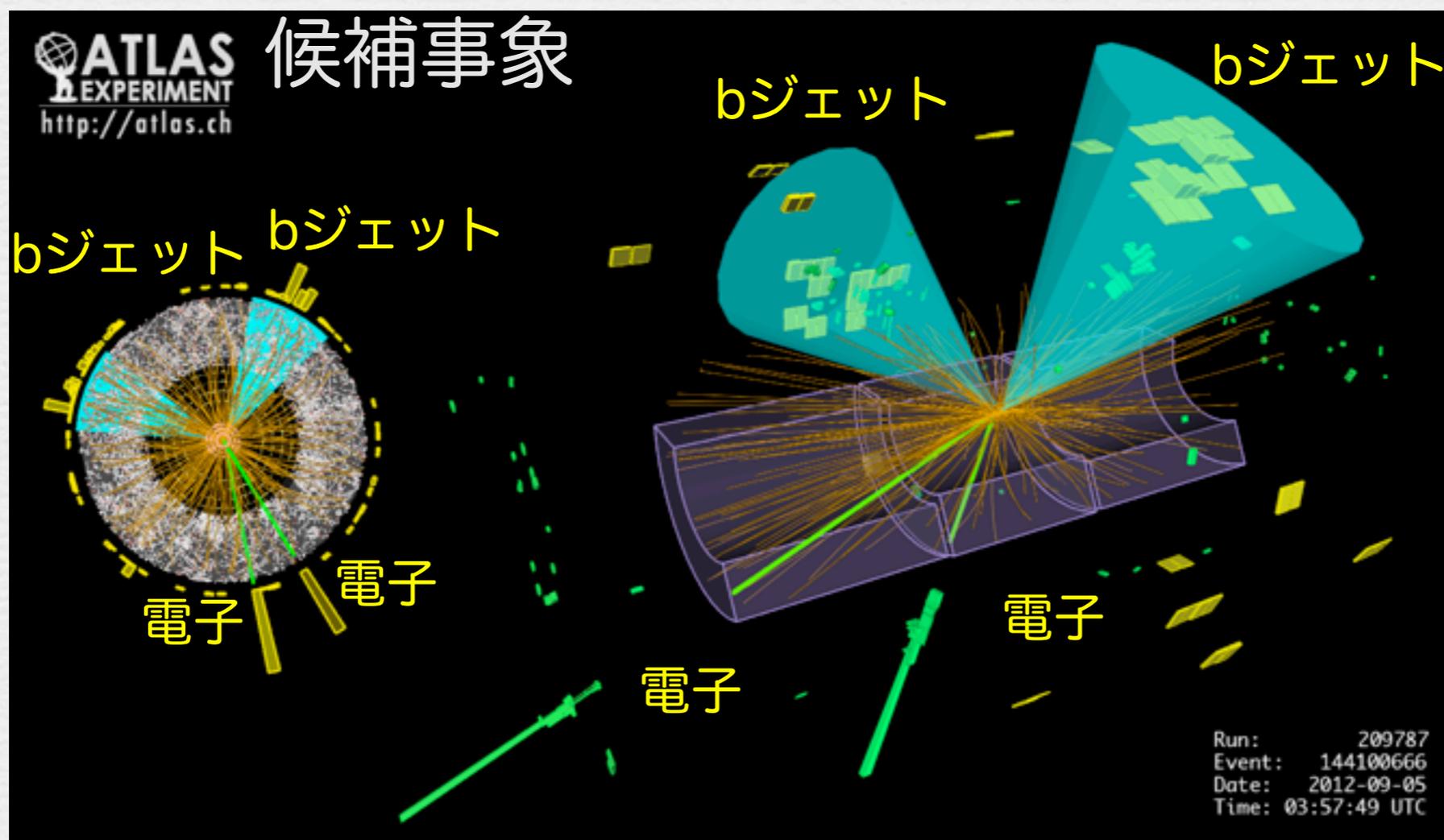
陽子 + 陽子 \rightarrow W/Z + H

ヒッグスとb-quarkの湯川結合の測定で重要
大量のハドロン背景事象をW/Zで抑制



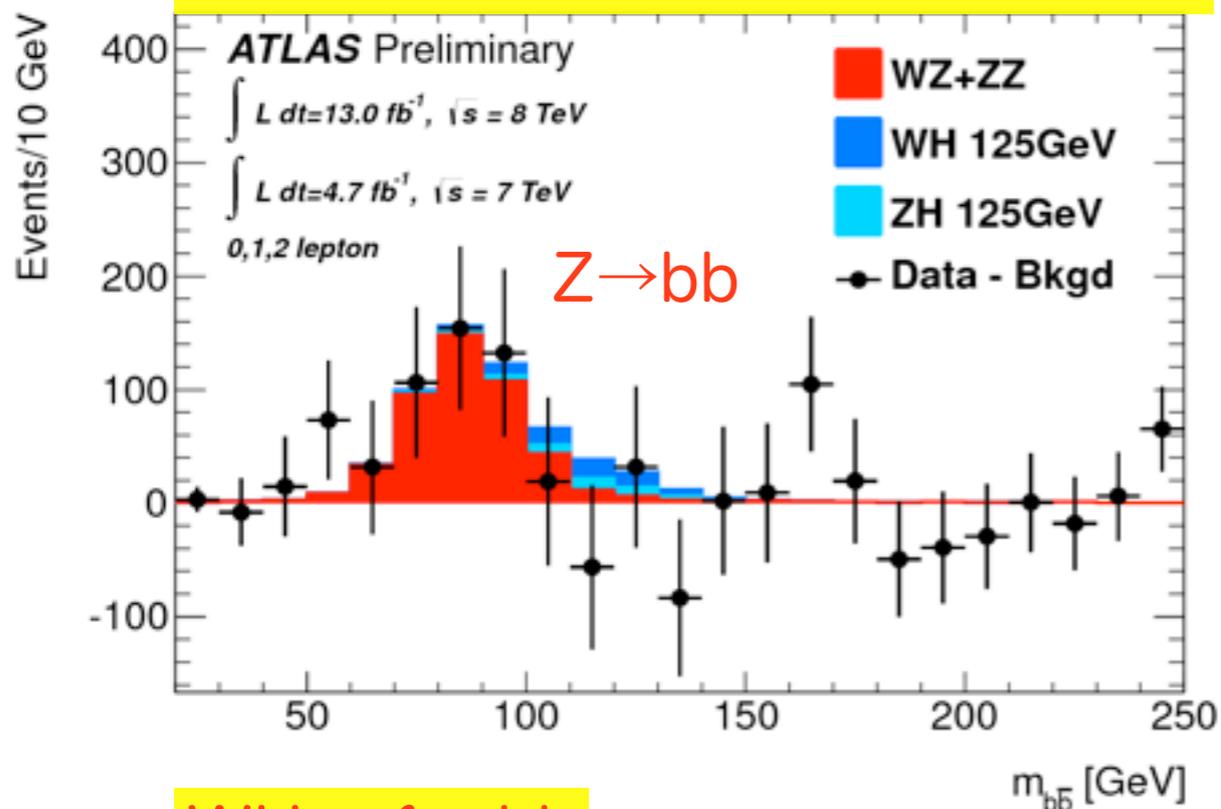
$Z \rightarrow \nu \nu$ 、 $W \rightarrow \ell \nu$ 、または、 $Z \rightarrow \ell \ell$

2つのb-jetの不変質量 m_{bb} でヒッグス粒子のピーク探索
→質量分解能はあまり良くない

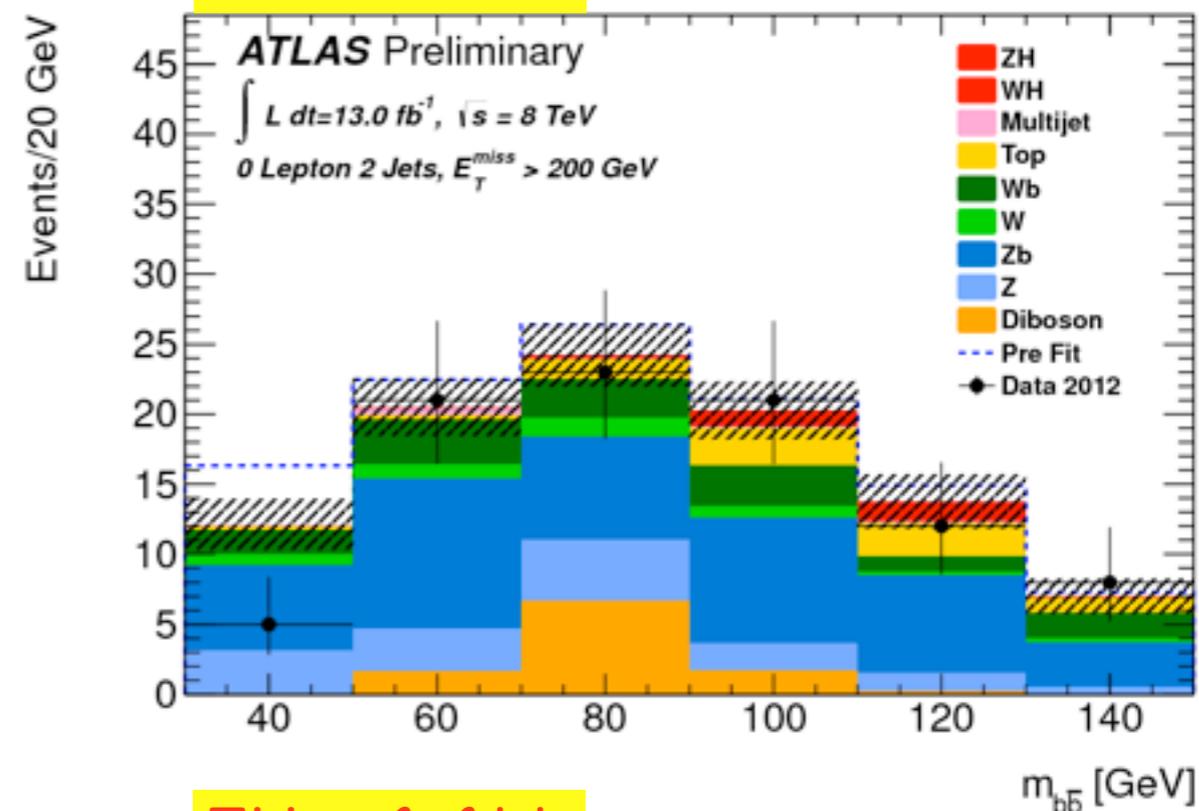


陽子 + 陽子 \rightarrow VH \rightarrow Vbb

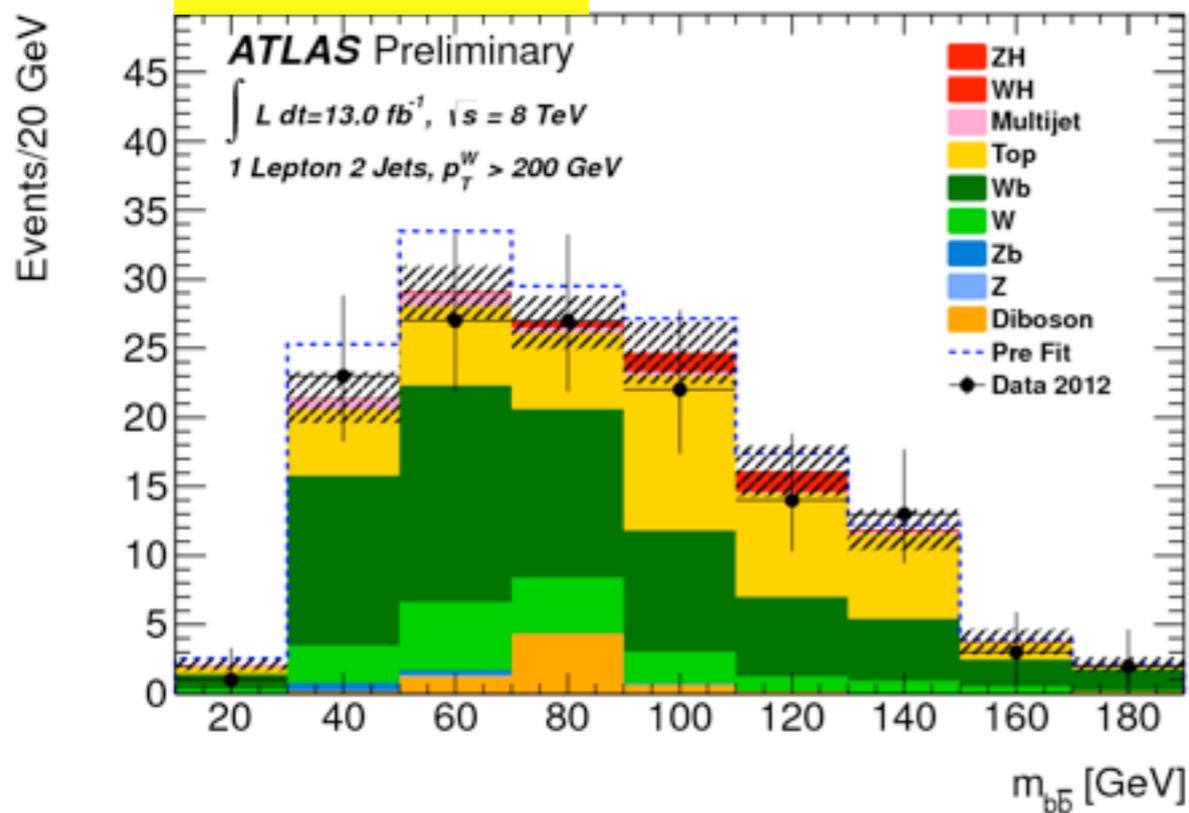
$WZ+ZZ \rightarrow \ell \nu bb + \nu \nu bb + \ell \ell bb$



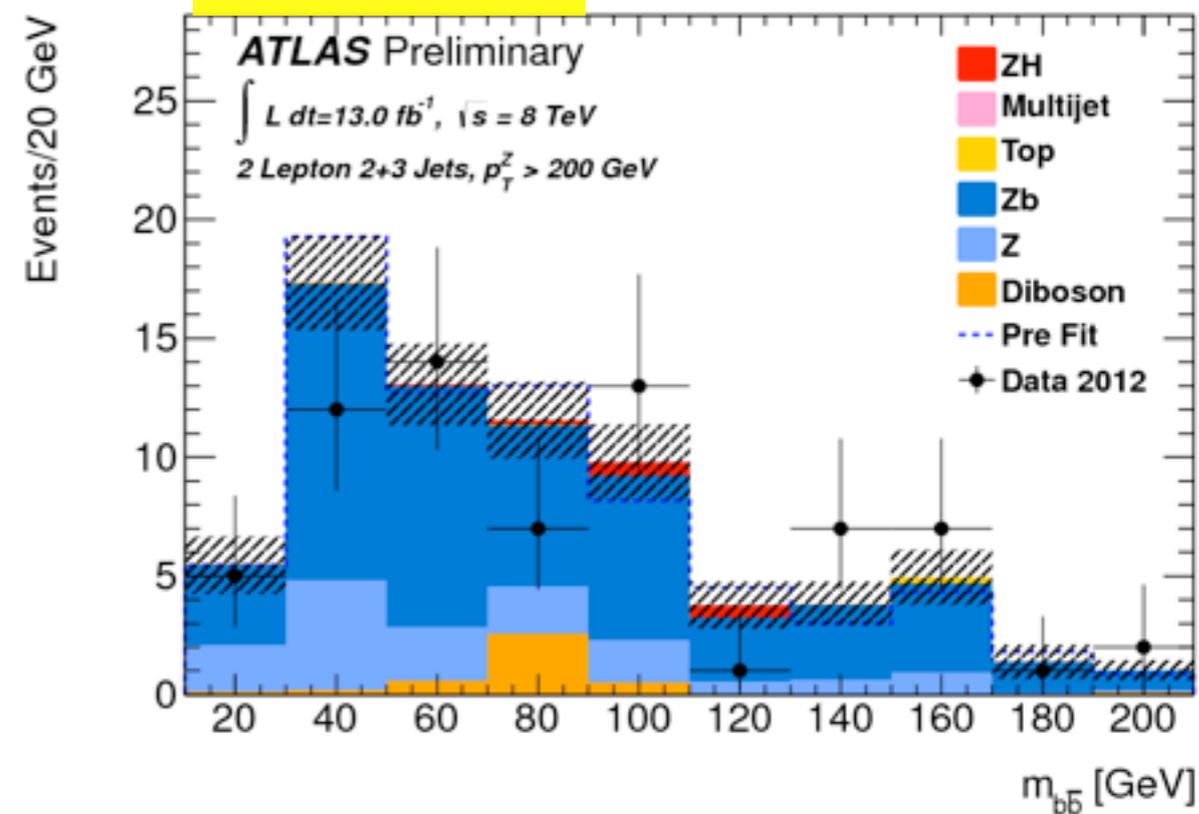
$ZH \rightarrow \nu \nu bb$



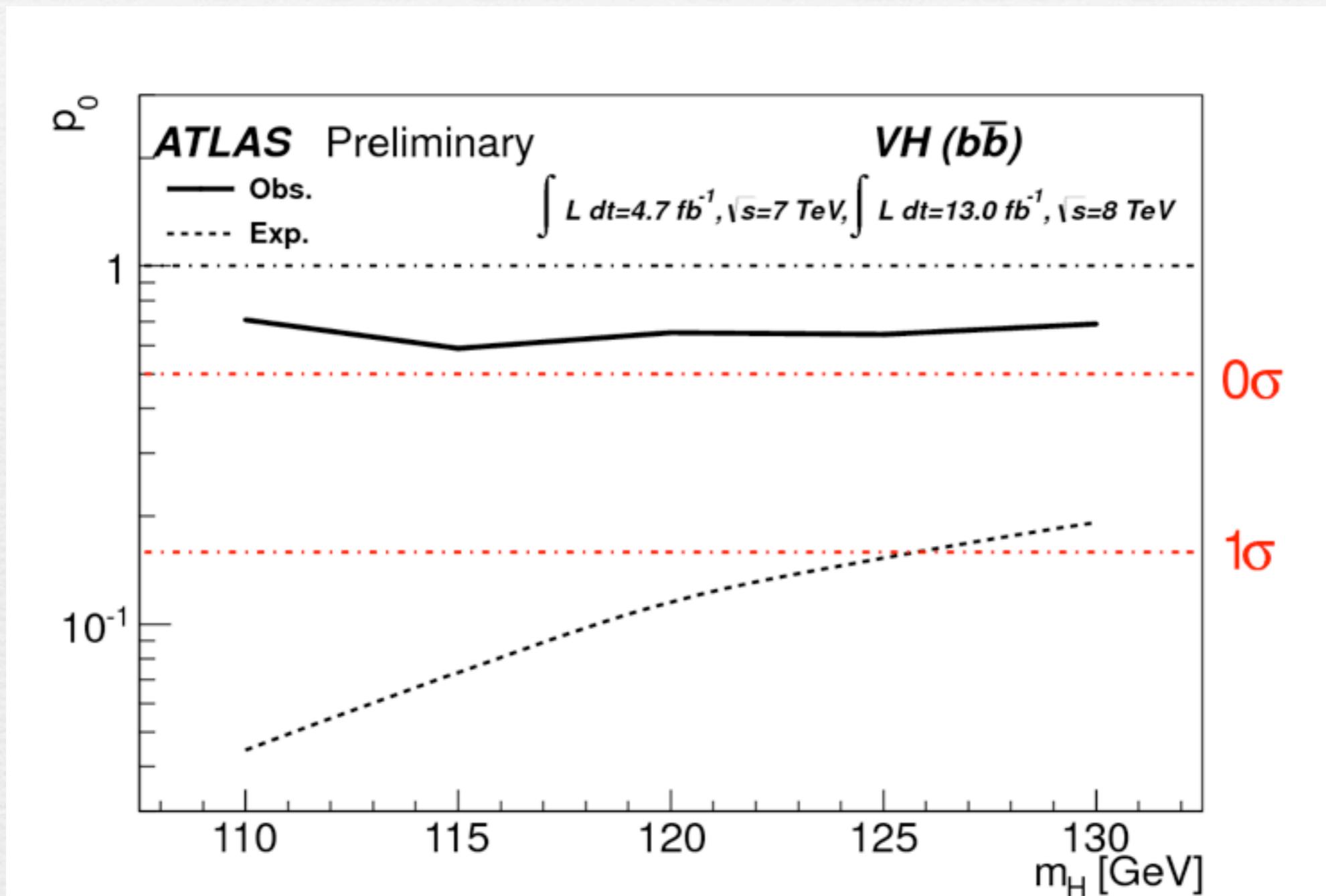
$WH \rightarrow \ell \nu bb$



$ZH \rightarrow \ell \ell bb$



陽子 + 陽子 \rightarrow VH \rightarrow Vbb

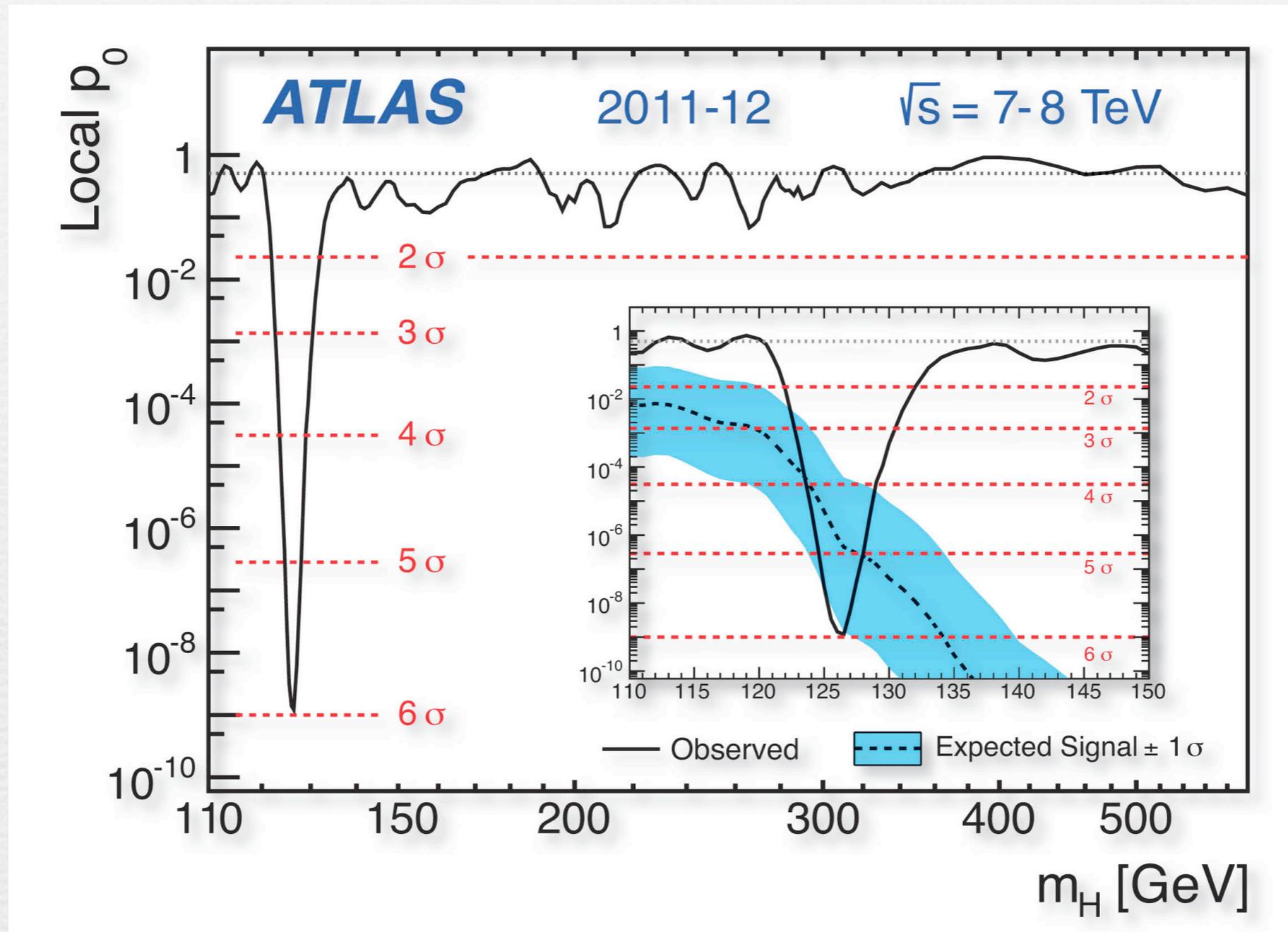


p-value : 0.64 ... Observed

0.15 ... Expected

@ $m_H = 125 \text{ GeV}$

combination



p-value : 9.9×10^{-10} (6σ) ... Observed

発見！！

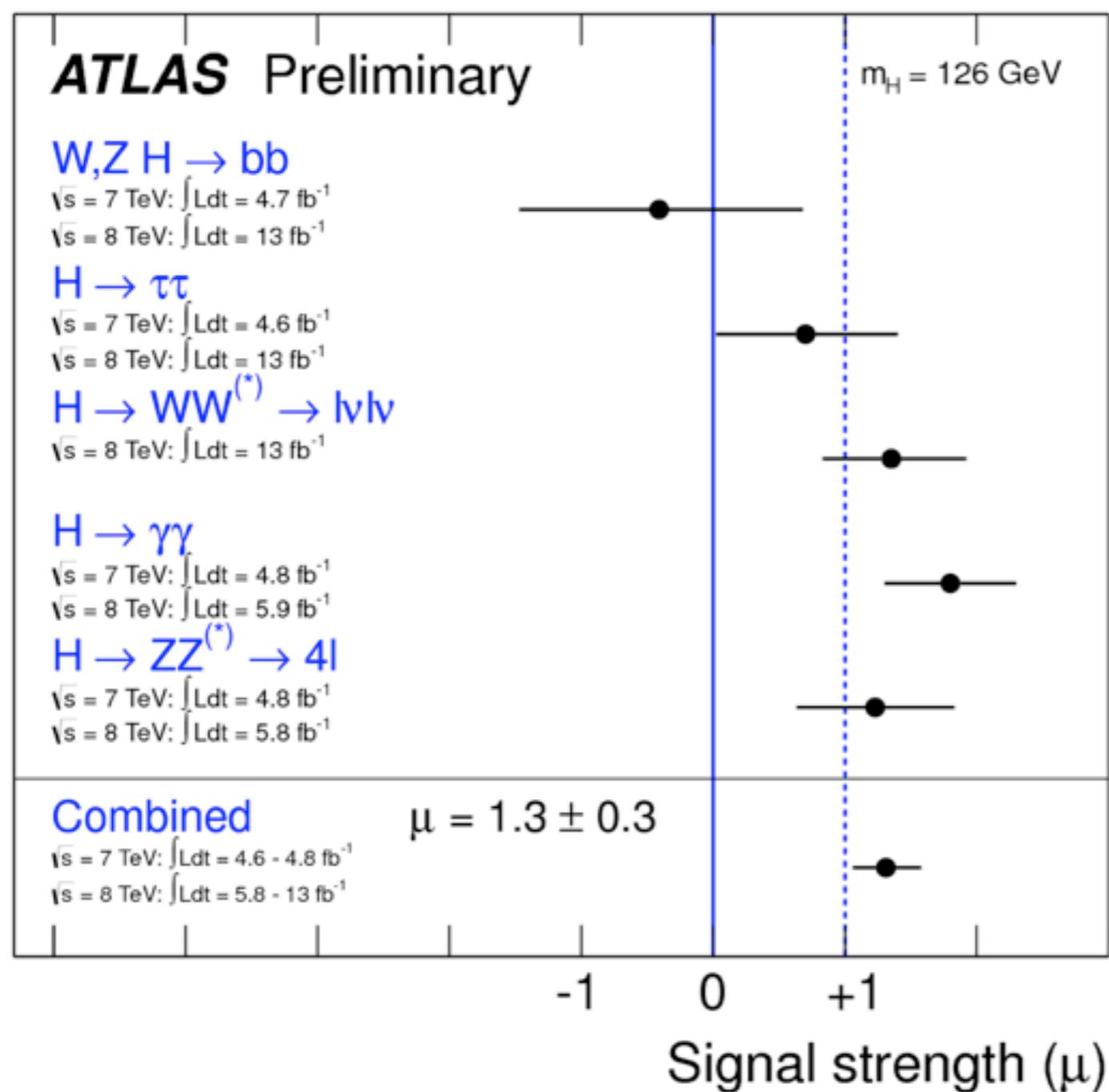
4.8×10^{-7} (4.9σ) ... Expected

@ $m_H = 126$ GeV

Best-fit Higgs mass $m_H = 126.0 \pm 0.4 \pm 0.4$ GeV

ヒッグス粒子信号の強さ (μ)

126GeVの標準模型ヒッグス粒子を仮定し、それぞれの生成崩壊過程が標準模型の予言の何倍か？



今の所、
標準模型のヒッグス粒子

- 測定の精度をあげる
 - 質量、 μ など
- 新たに測定する
 - スピン 0 or 2?
 - ゲージ結合 (W, Z)
 - 湯川結合 (t, b, τ)

まとめ

- スピンが0または2の新ボーズ粒子が発見された
ヒッグス粒子らしき粒子であり、
質量： 126.0 ± 0.4 (統計誤差) ± 0.4 (系統誤差) GeV
信号の強さ： $\mu = 1.3 \pm 0.3$

革命が始まった！！！！

- $H \rightarrow \gamma \gamma$ 、 ZZ 、 WW (ゲージ結合)は良く測定されている
 $H \rightarrow b\bar{b}$ 、 $\tau\tau$ (湯川結合)の測定には統計が必要
- 探索から測定フェーズへ
スピンやパリティ、結合定数の測定を実施中
→ 標準模型ヒッグス粒子？ 超対称性ヒッグス粒子？
サプライズ？

新粒子発見の先

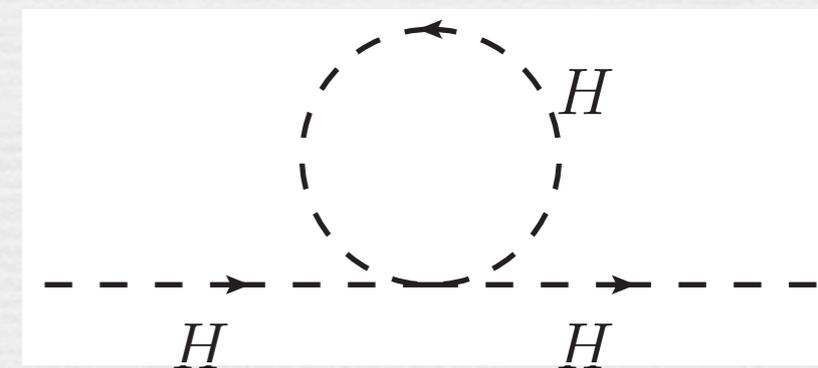
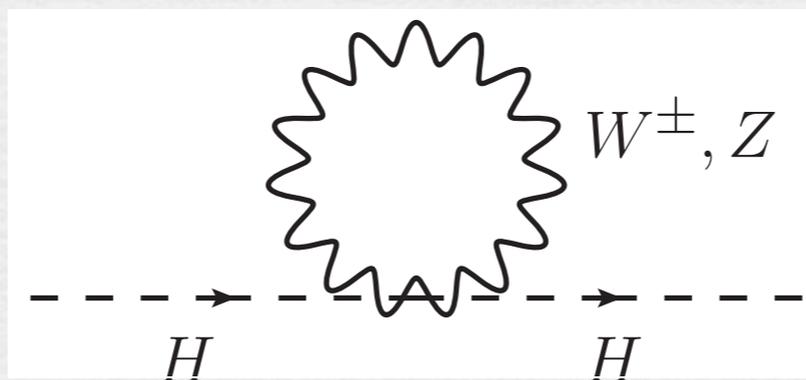
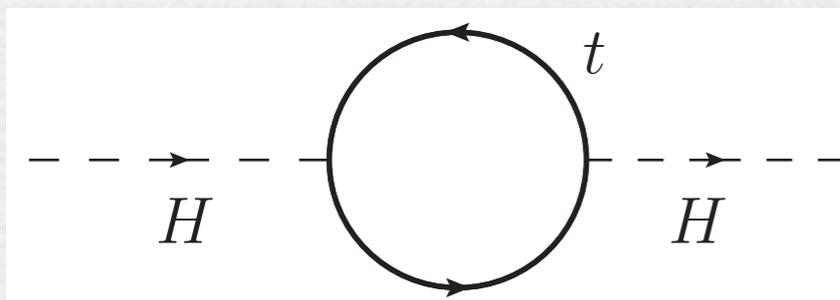
新粒子発見の先

標準模型の中で、ヒッグスに関する部分は何もわかっていない
 質量起源、世代構造の謎の解明に向けて大きな前進

ヒッグス粒子が存在するからこそ、新物理が必要??

例:

$$m_H^2 = (m_H^0)^2 + \delta m_H^2$$



$$\begin{aligned} \delta m_H^2 &\sim -y_t^2 \Lambda^2 \\ &\sim -m_t^2 \Lambda^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta m_H^2 &\sim g^2 \Lambda^2 \\ &\sim m_{W/Z}^2 \Lambda^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta m_H^2 &\sim \lambda \Lambda^2 \\ &\sim m_H^2 \Lambda^2 \end{aligned}$$

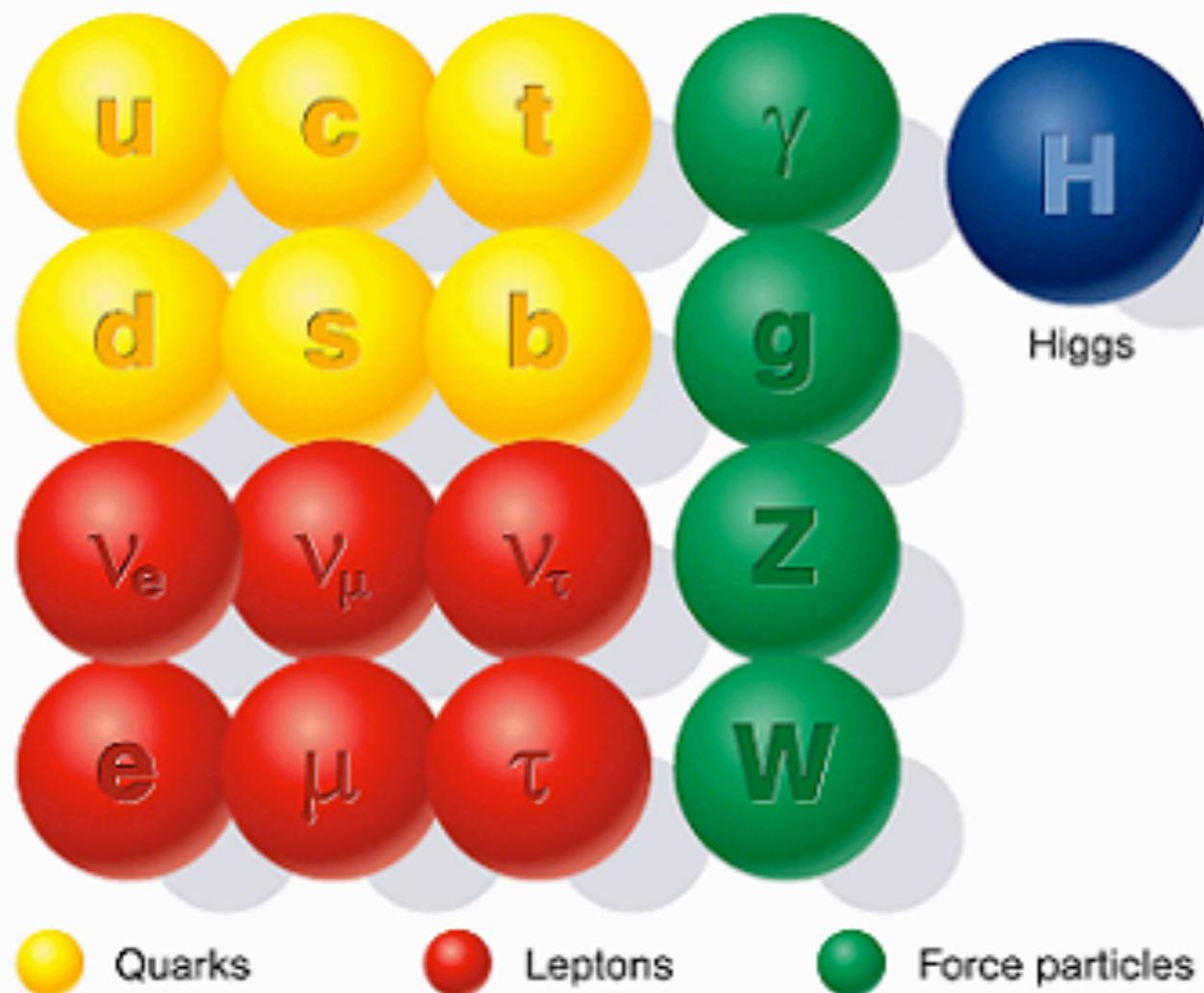
2次発散をキャンセルする新しい素粒子が 0(1TeV) に存在?

直接探索 & ヒッグス粒子をプローブにして

ばっくあっぷ

素粒子の標準模型

Standard particles



1897年：電子

1900年： γ 線

1932年：陽電子

1937年： μ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： ν_e と ν_μ 別物

1969年：u,d,sクォーク (パートン模型)

1974年：cクォーク

1975年： τ 粒子

1977年：bクォーク

1979年：グルーオン

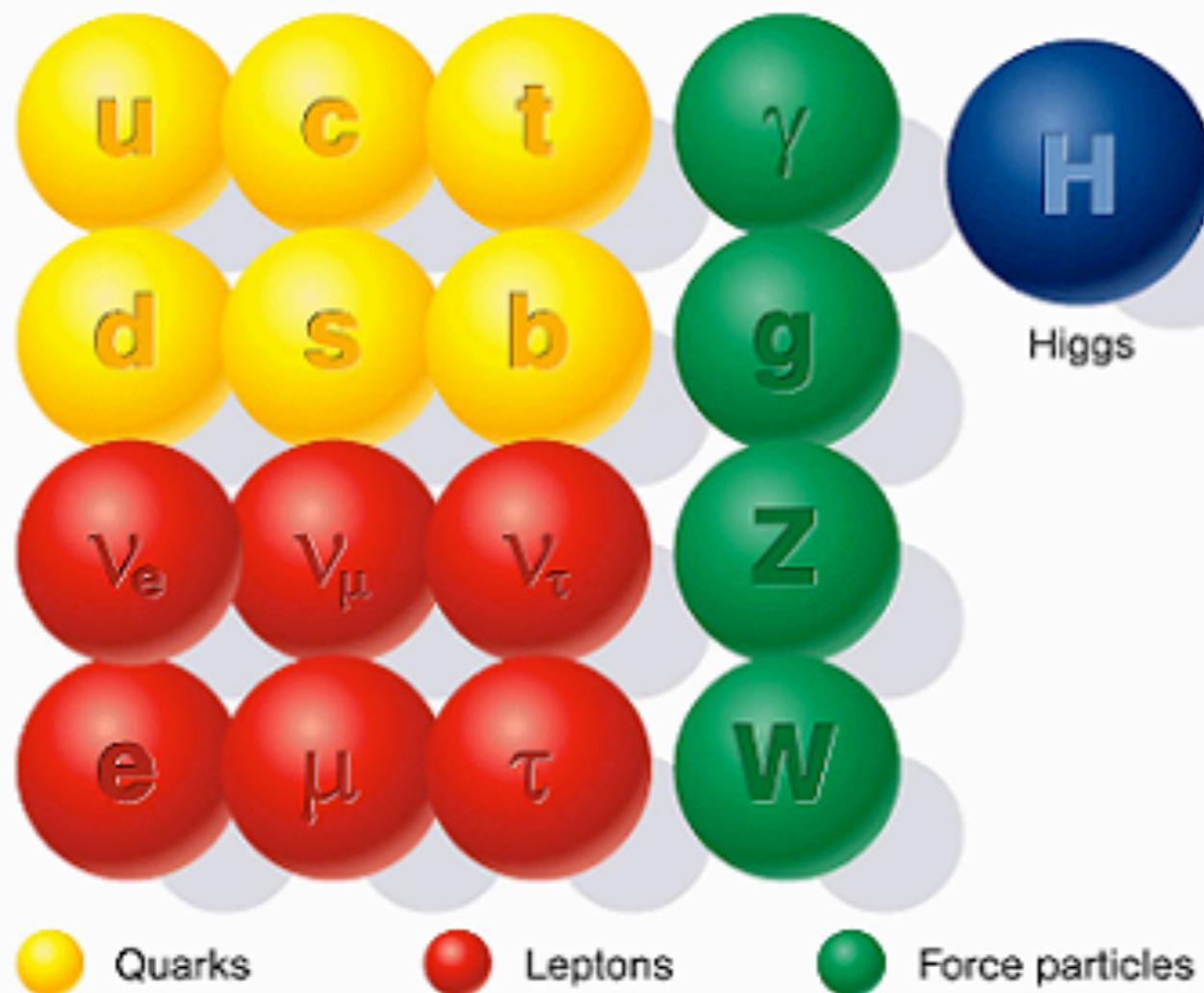
1983年：W/Zボゾン

1995年：tクォーク

2000年： τ ニュートリノ

素粒子の標準模型

Standard particles



1897年：電子

1900年： γ 線

1932年：陽電子

1937年： μ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： ν_e と ν_μ 別物

1969年：u,d,sクォーク（パートン模型）

1974年：cクォーク

1975年： τ 粒子

1977年：bクォーク

1979年：グルーオン

1983年：W/Zボゾン

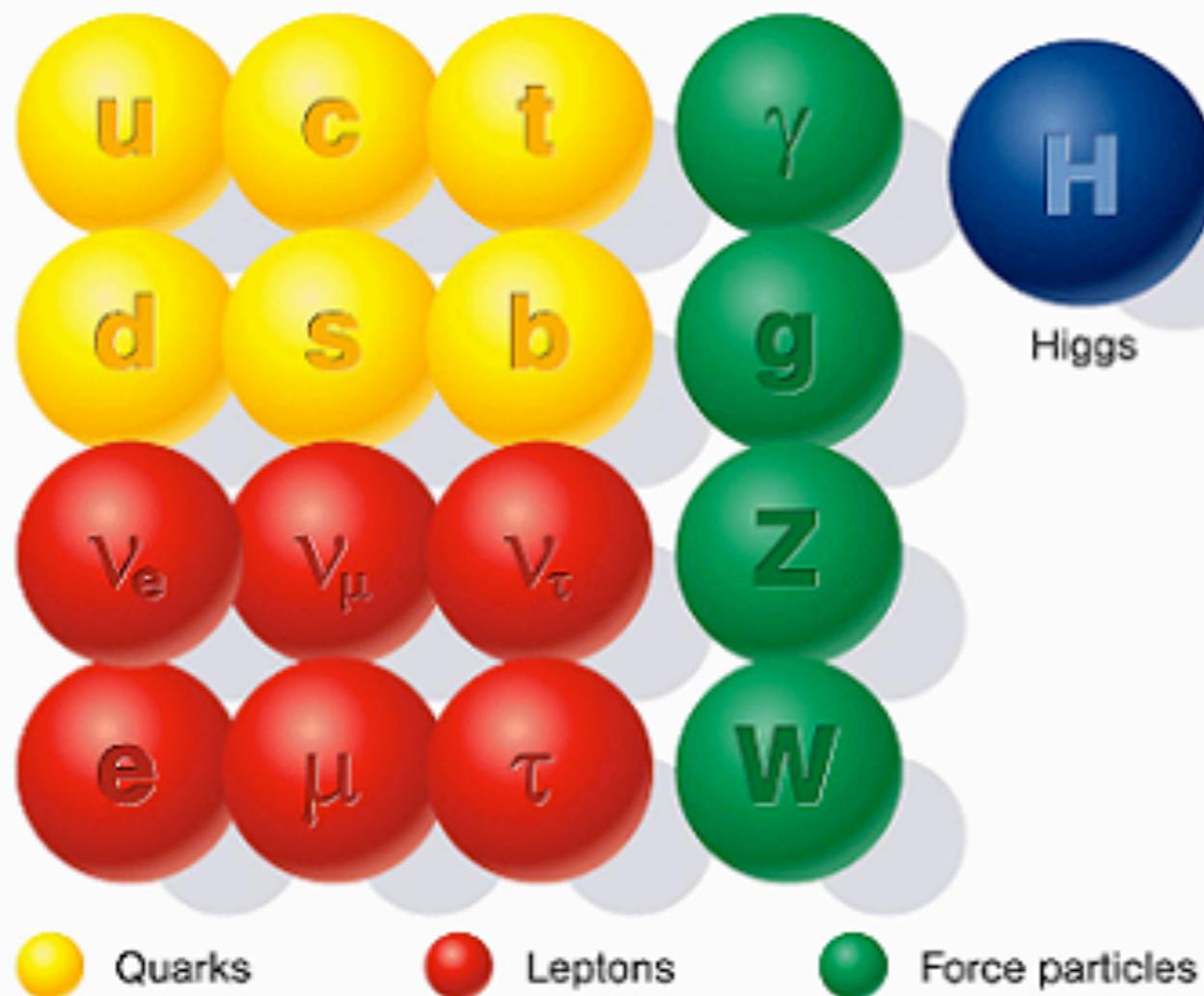
1995年：tクォーク

2000年： τ ニュートリノ

2012年：ヒッグス粒子

素粒子の標準模型

Standard particles



1897年：電子

1900年： γ 線

1932年：陽電子

1937年： μ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： ν_e と ν_μ 別物

1969年：u,d,sクォーク（パートン模型）

1974年：cクォーク

1975年： τ 粒子

1977年：bクォーク

1979年：グルーオン

1983年：W/Zボゾン

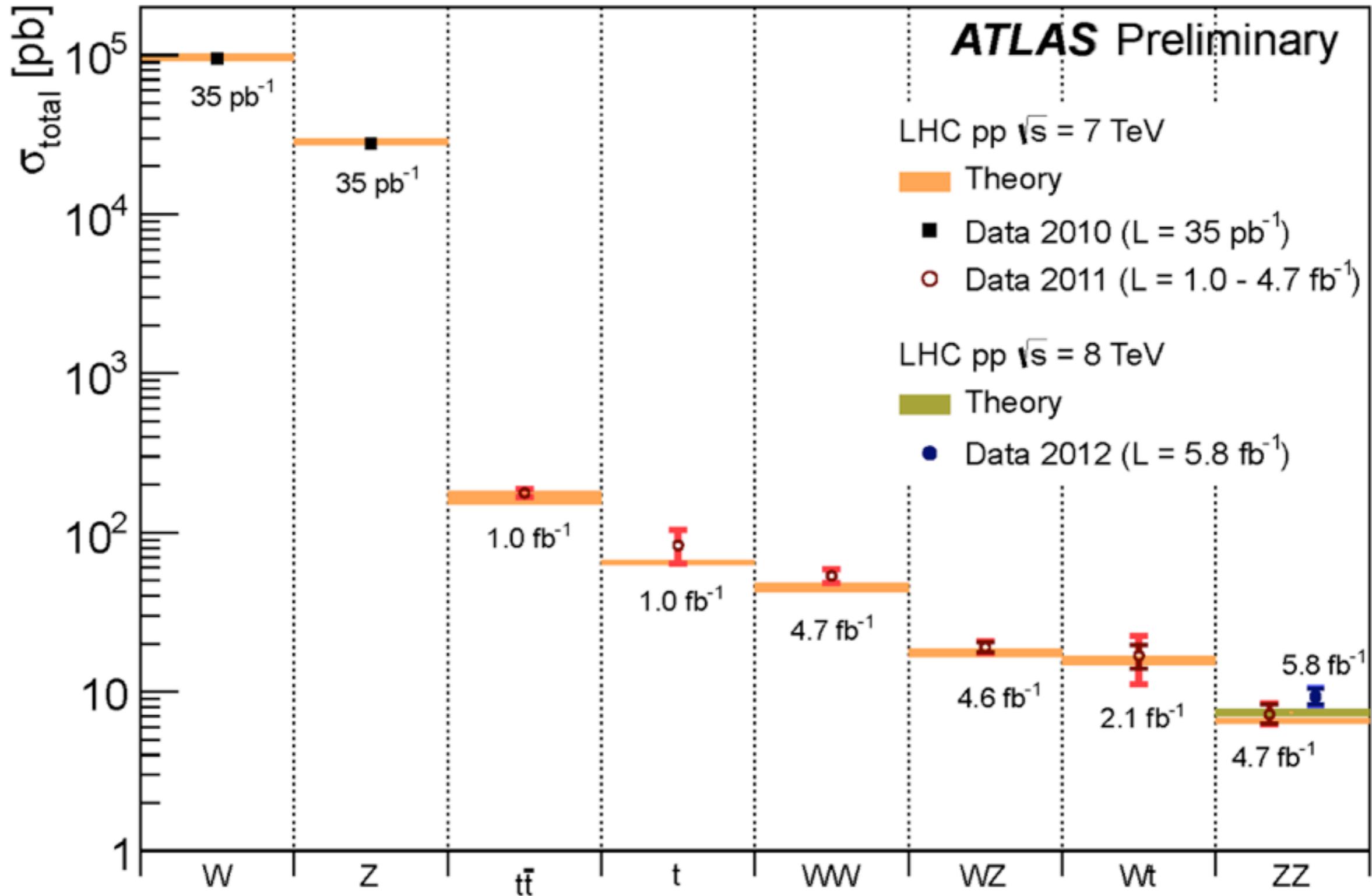
1995年：tクォーク

2000年： τ ニュートリノ

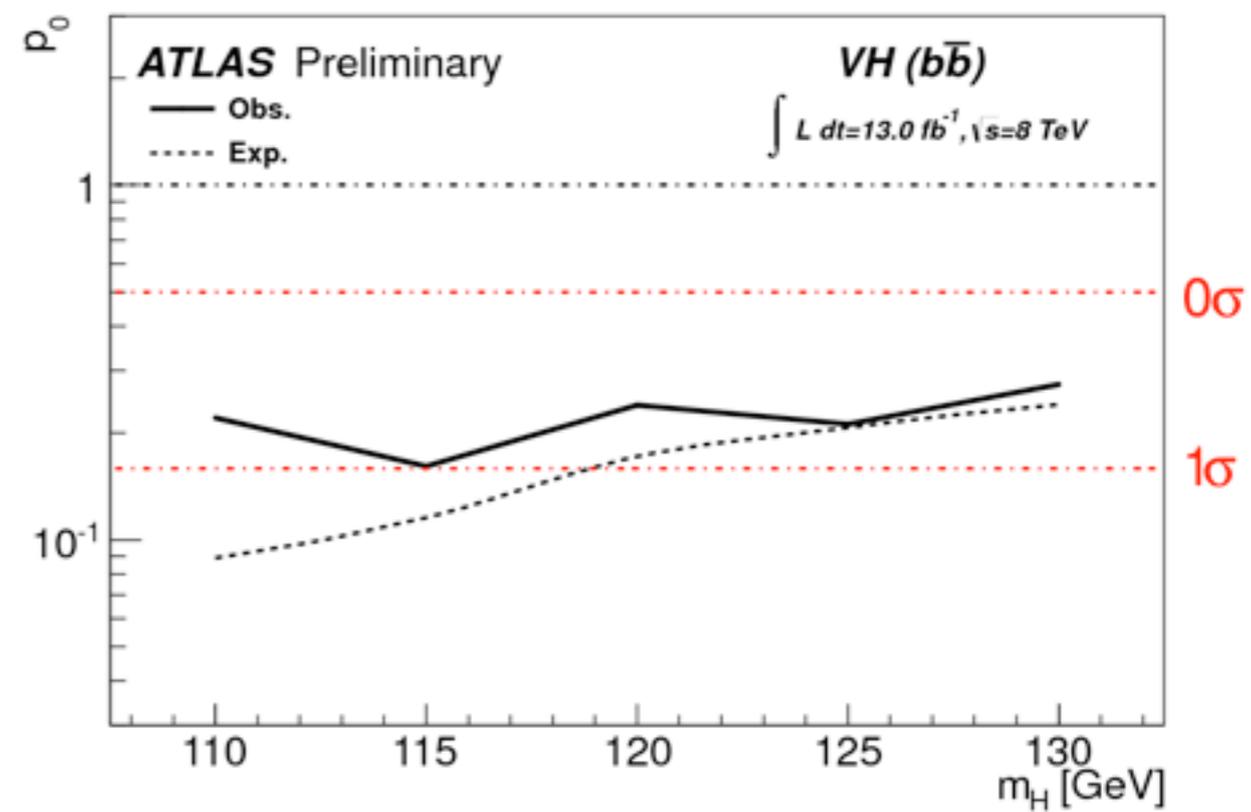
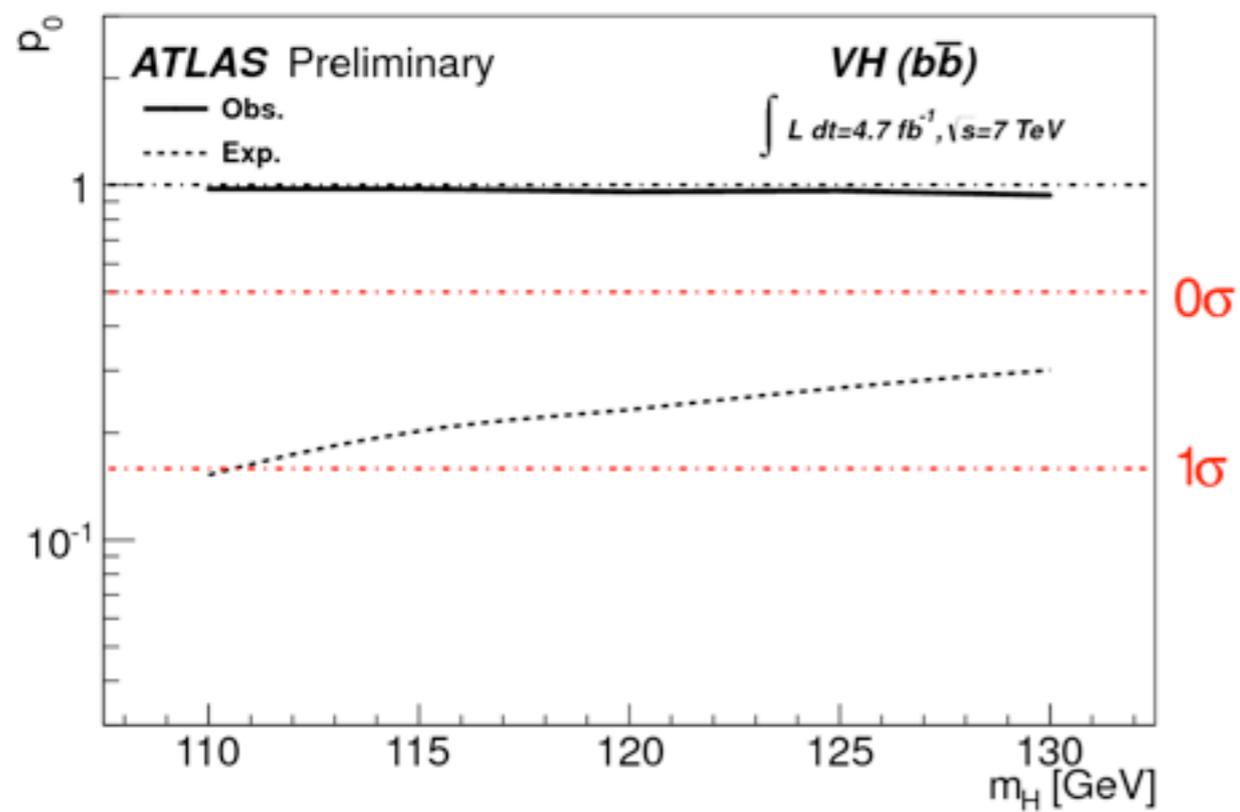
2012年：ヒッグス粒子

”らしき”新粒子

標準模型事象の測定

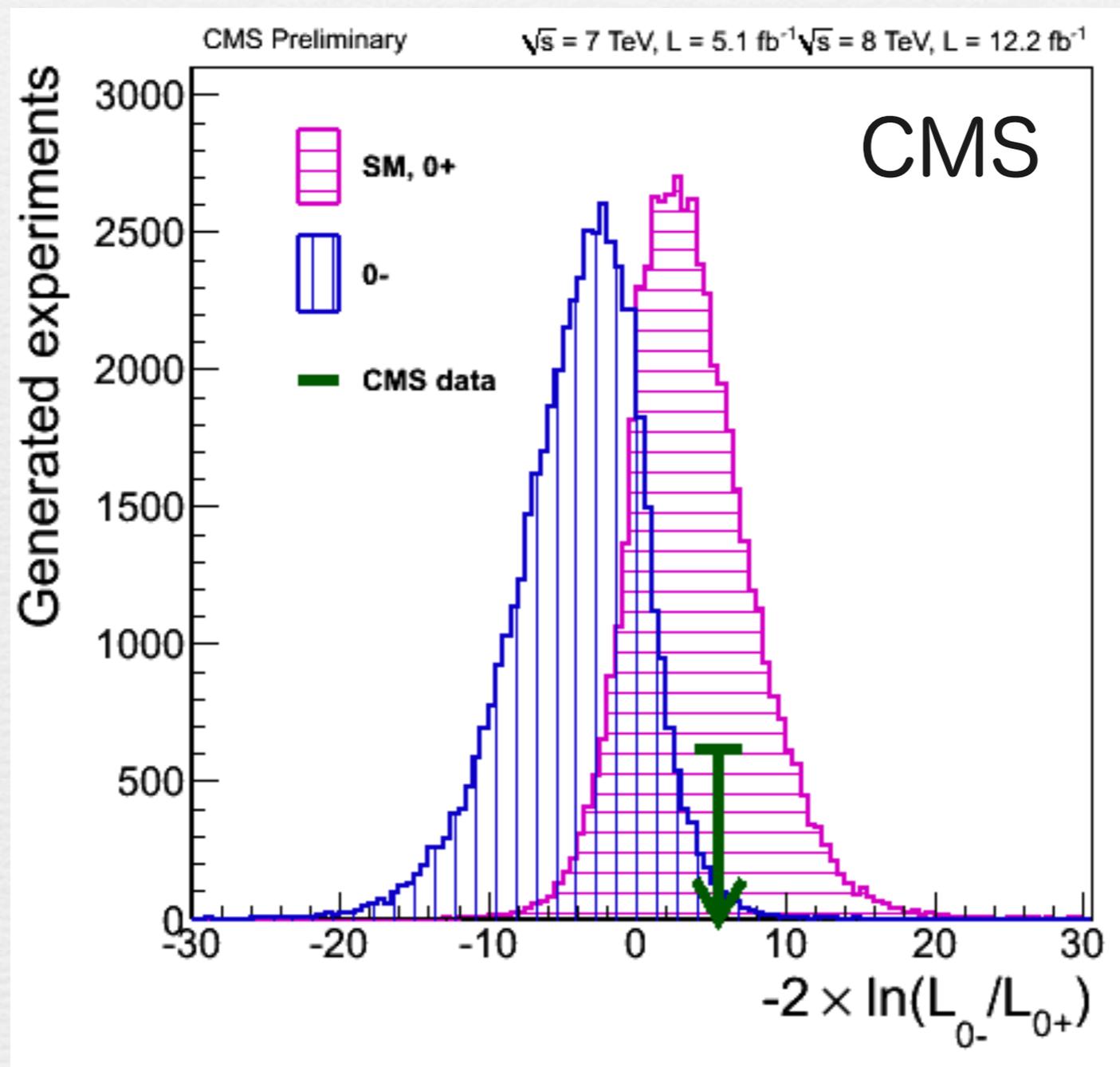


陽子 + 陽子 \rightarrow VH \rightarrow Vbb



新粒子のCP

$Z \rightarrow 4$ leptonのkinematic distributionから
 $J^{PC} = 0^-, 2^+, 0^+$ を決定



2.5 σ のレベルで 0^- を排除？

coupling

