

# 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

|       |    |       |      |    |    |    |    |
|-------|----|-------|------|----|----|----|----|
| 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

2012年(平成24年) 7月5日 木曜日

読者新聞

らしき新粒子

## 「ヒッグス粒子」発見

### 質量与える 現代物理の枠組

#### 名大など参加チーム

ヒッグス粒子を探る実験は、CERNの「大型ハドロン衝突型加速器(LHC)」で行われた。光速近くまで加速した陽子同士を正面衝突させ、宇宙の誕生直後の高温状態を再現。発生する様々な粒子の中にヒッグス粒子があるかどうかを、二つの国際チームが調べた。このうち「ATLAS」チームには、東京大学や名古屋大学など日本の16機関も参加している。

ヒッグス粒子の働き

|   |  |
|---|--|
| 宇宙誕生直後<br>ヒッグス粒子がなかった<br>光速(質量ゼロ)<br>あらゆる粒子は光速で動く | 現在の宇宙<br>ヒッグス粒子がある<br>動きにくい<br>ヒッグス粒子の海<br>ヒッグス粒子は動きにくさ(=質量)の源 |
|---|--|

ヒッグス博士感激

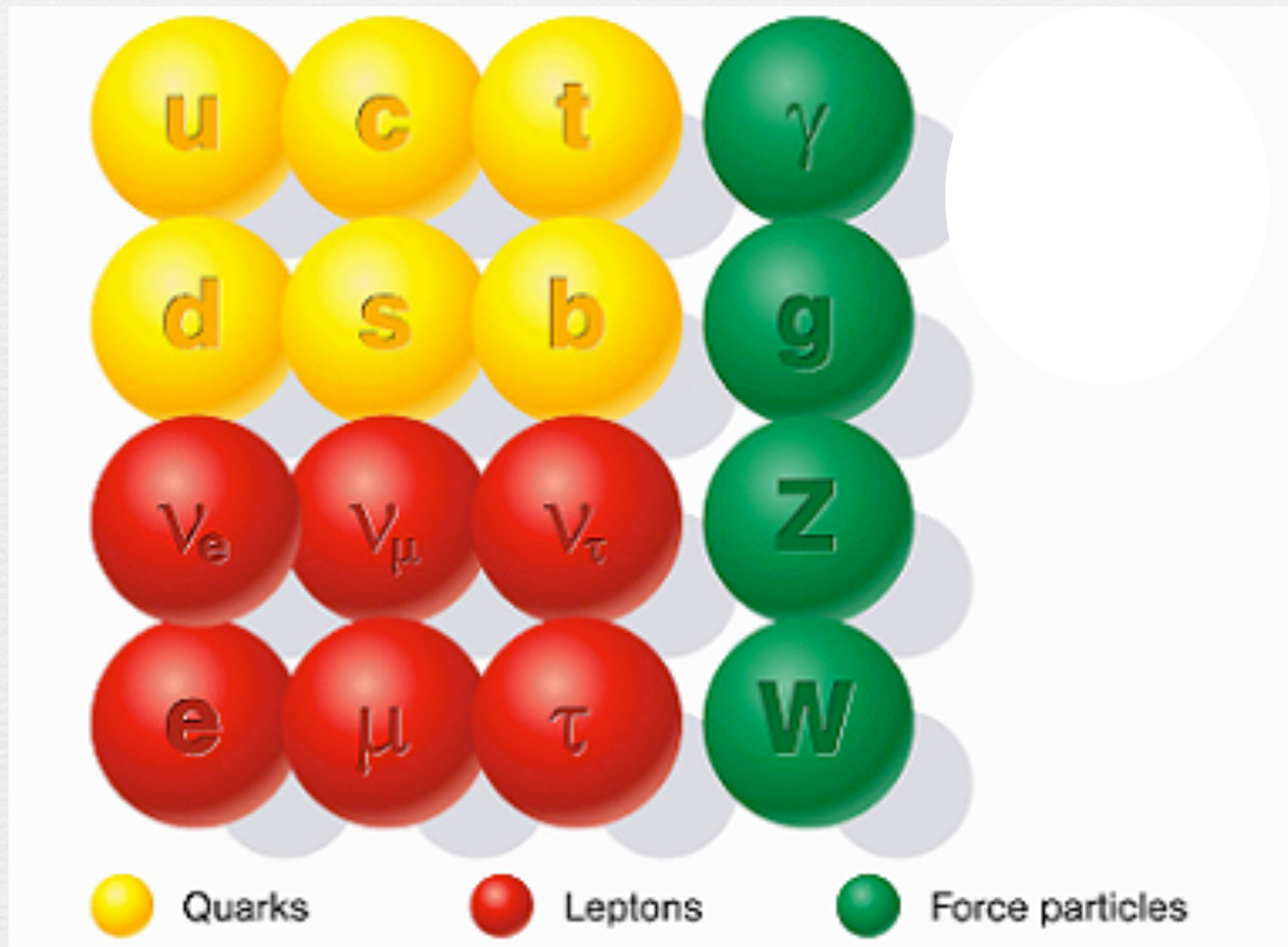
英国の物理学者ピーター・ヒッグス博士(83)は、4日、研究発表の会場を訪れ、CERNのロルフ・ホイヤ所長(同左)と握手し、生きているうちにこの結果を見られると、信じられないと感激した様子を語った(シユネブ、石黒輝)

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もきな成果となる。(関連記事2・3・32面)



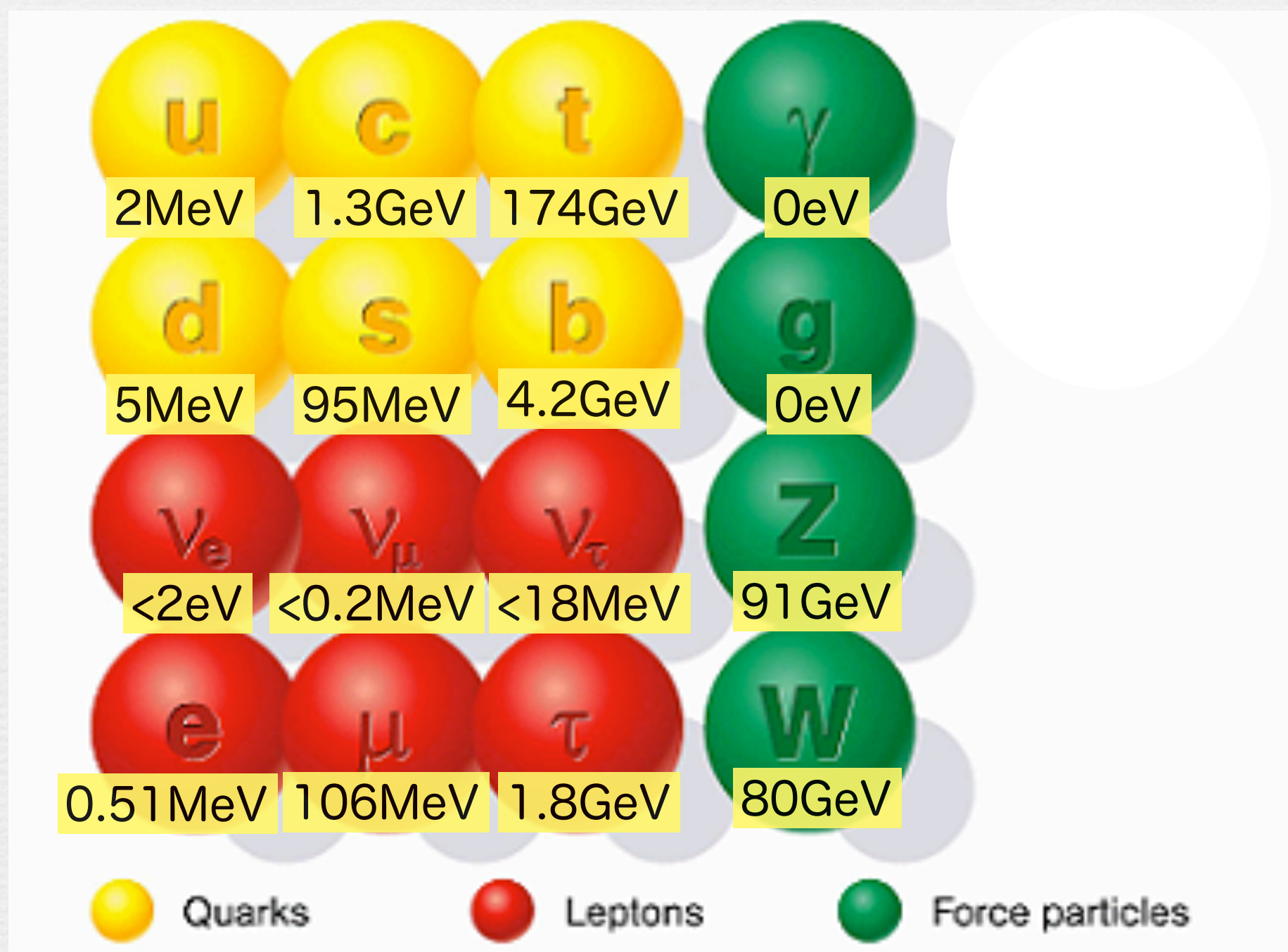
# ヒッグス粒子

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



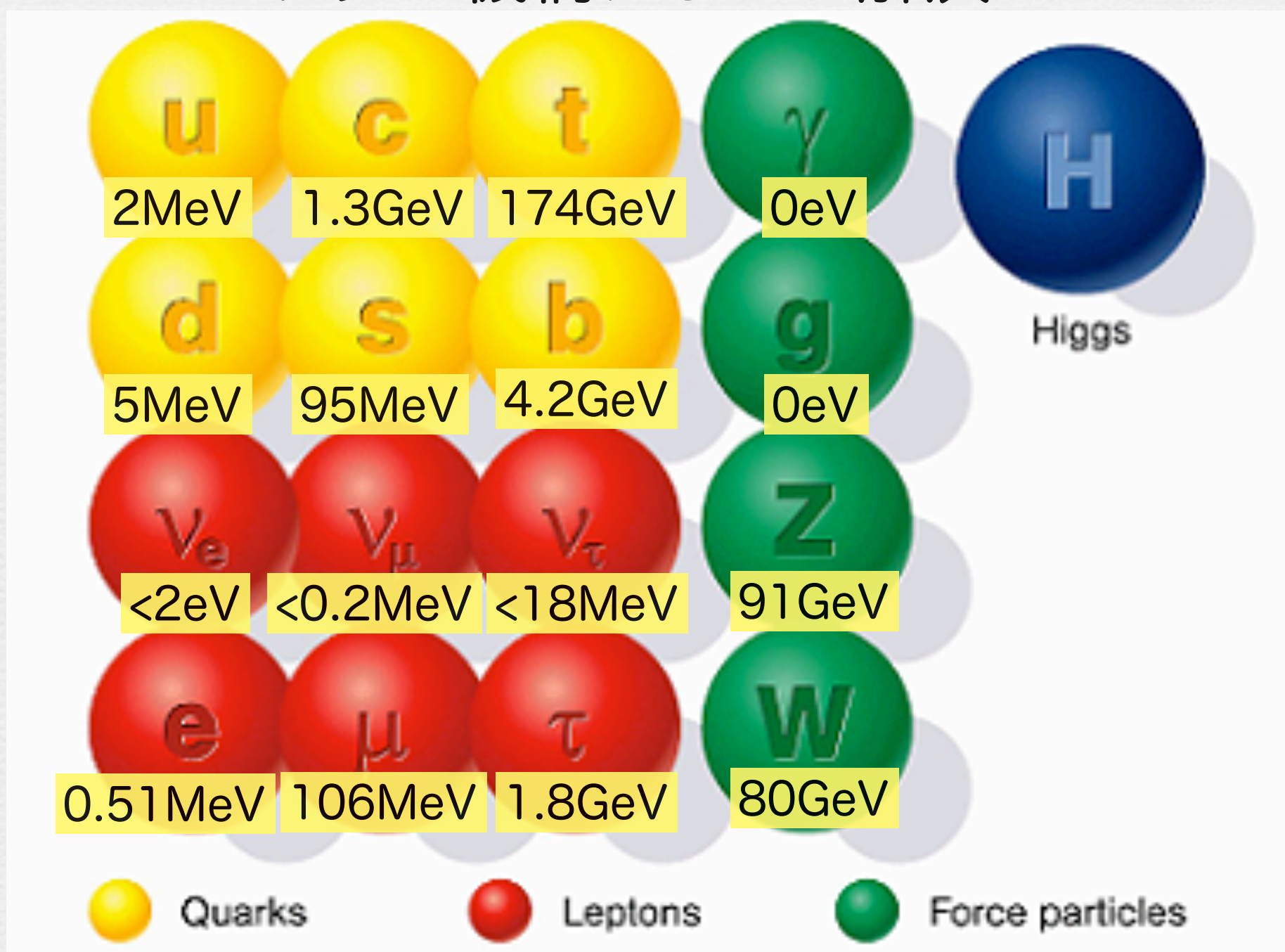


# ヒッグス粒子

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

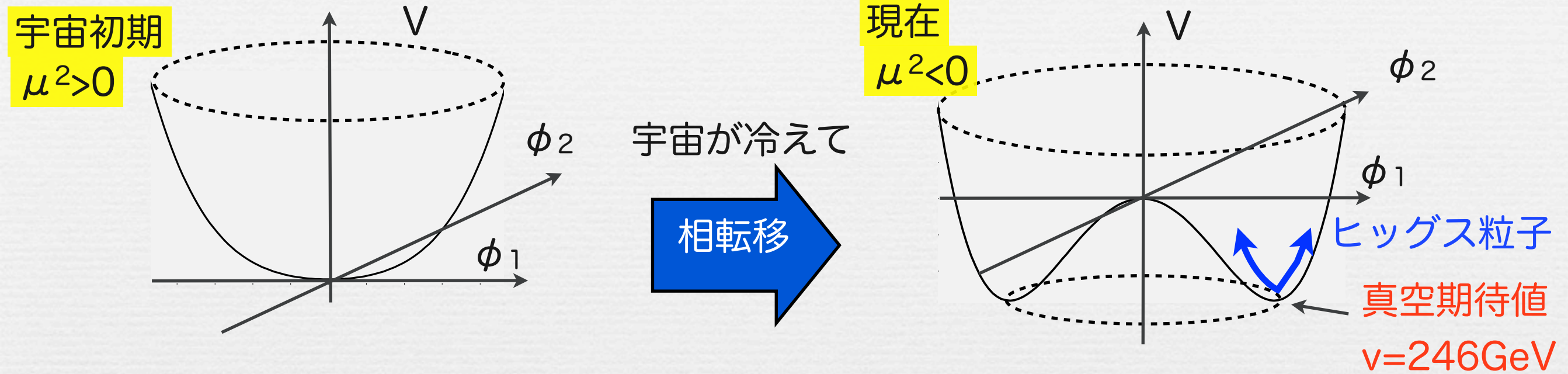
→ ヒッグス機構によって解決





# 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

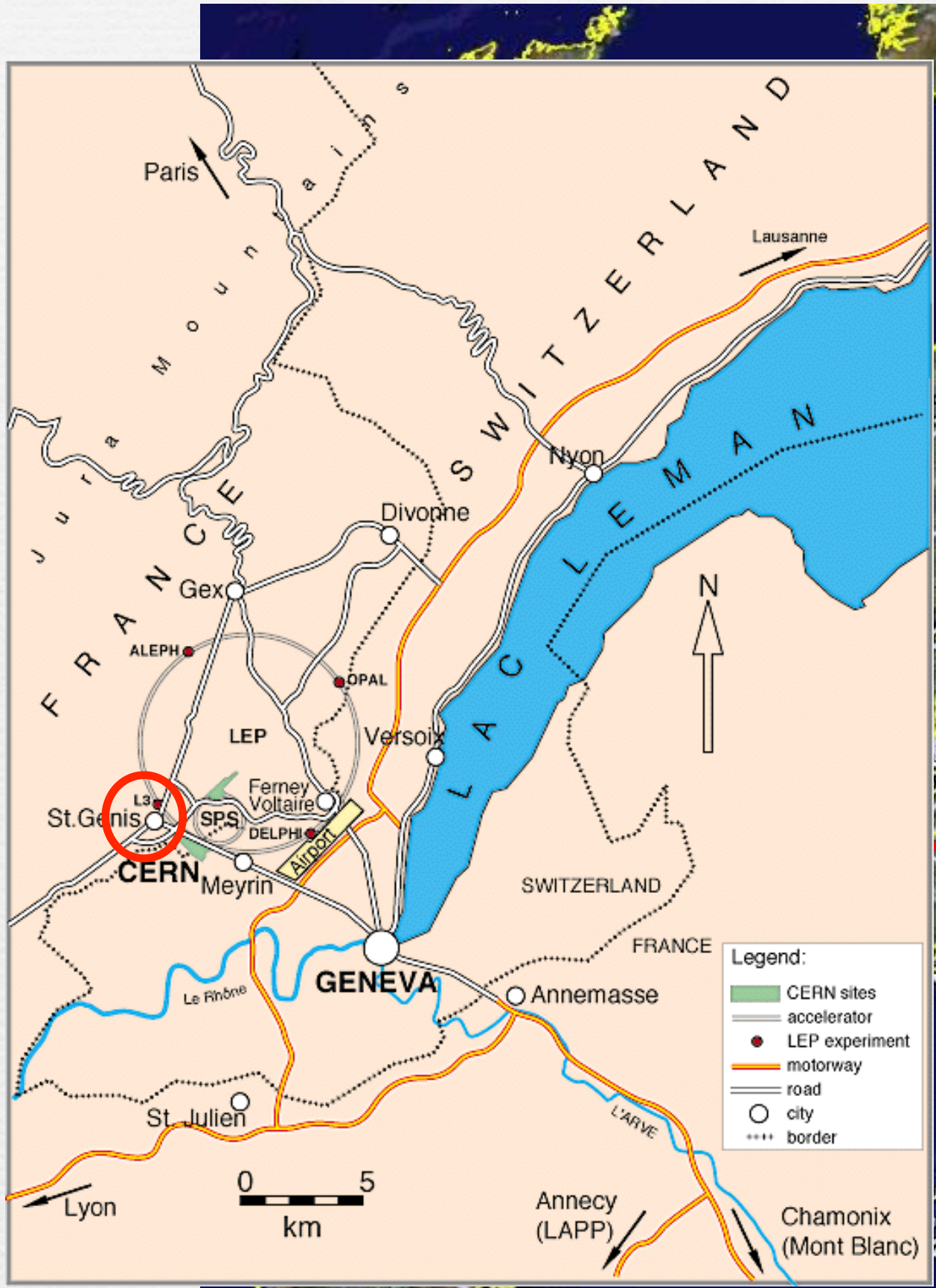


# 今日のお話：Large Hadron Collider



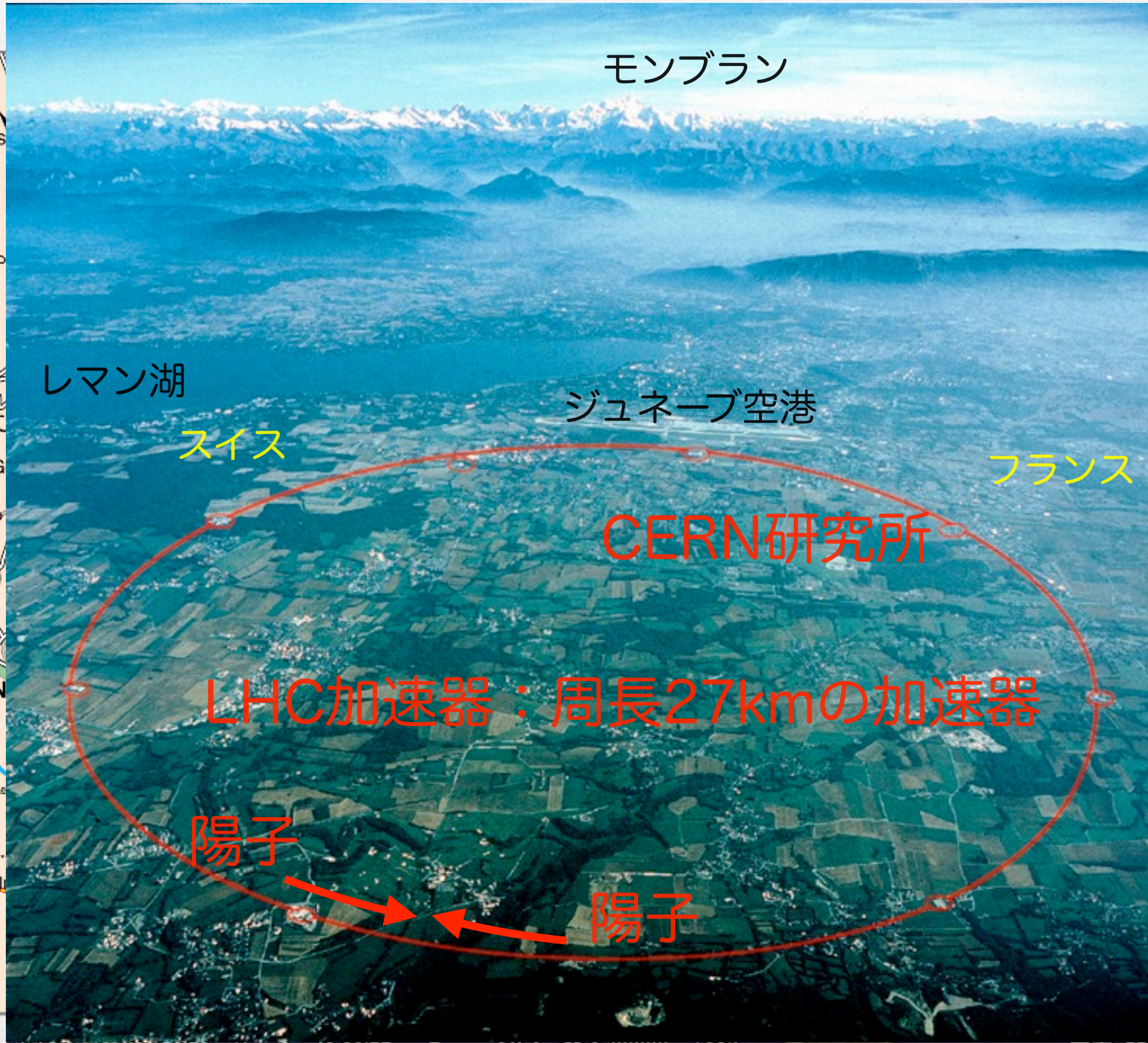


# 今日のお話：Large Hadron Collider





# 今日のお話：Large Hadron Collider





# LHC加速器の大きさ



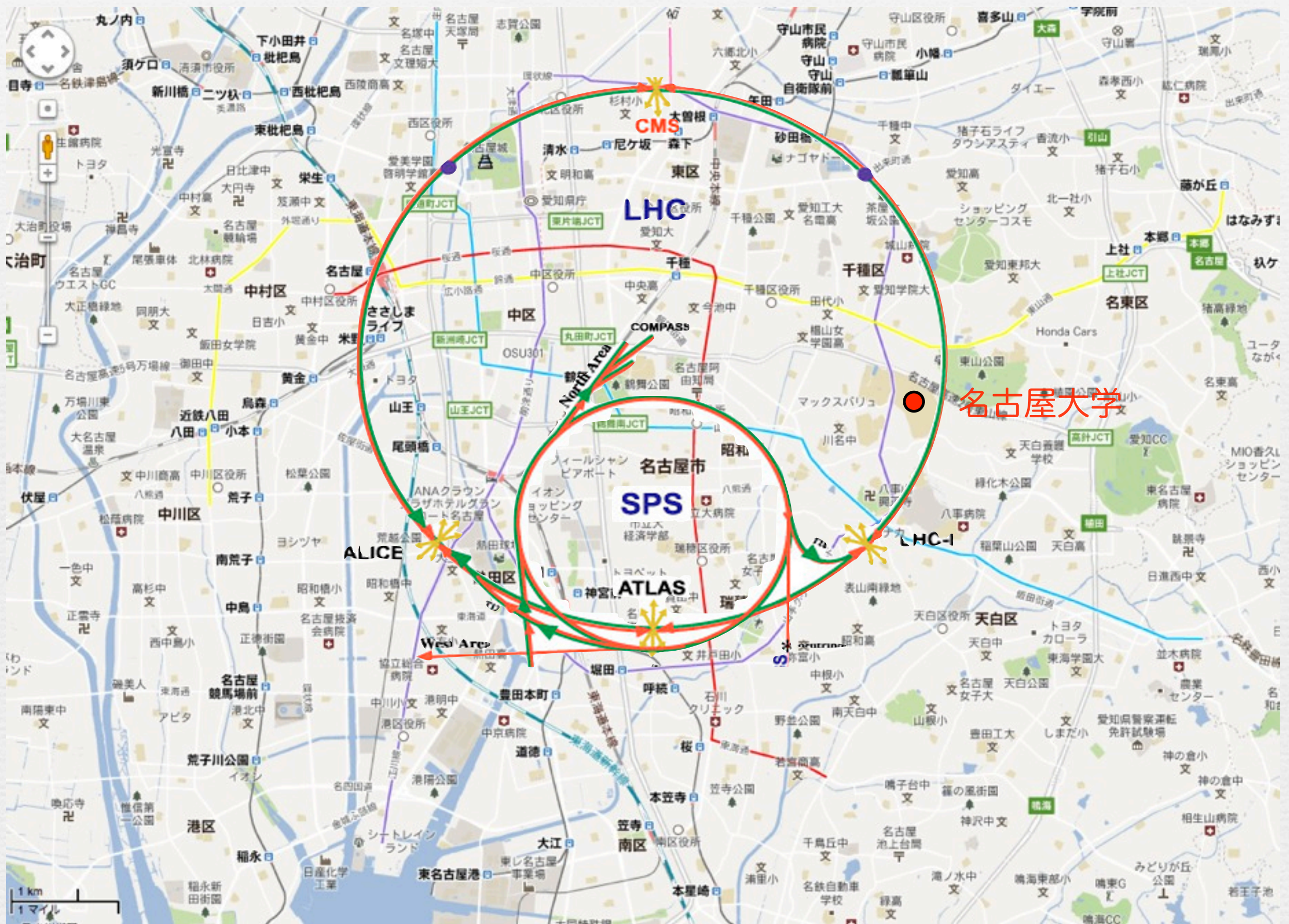


# LHC加速器の大きさ



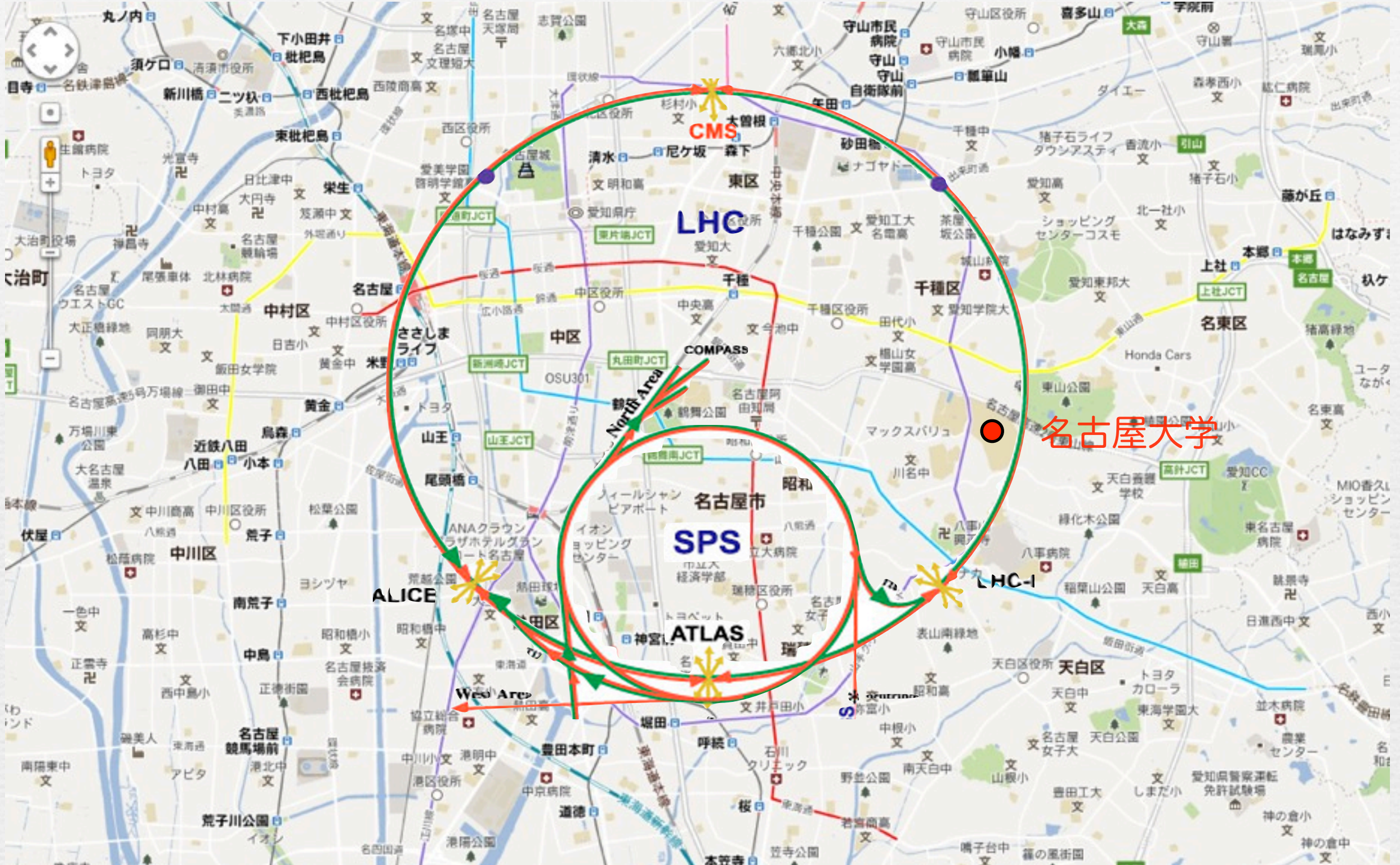


# LHC加速器の大きさ





# LHC加速器の大きさ

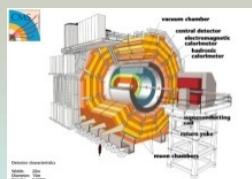


大阪環状線 < LHC~名古屋地下鉄名城線 < 東京山手線  
 ~21km ~27km ~34.5km

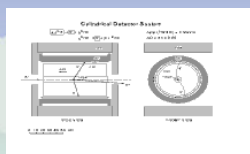


# LHC実験

## LHCにおける実験プロジェクト



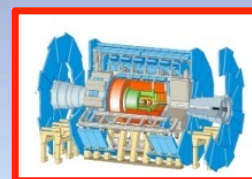
CMS  
汎用実験



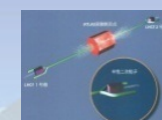
TOTEM  
Total cross section  
測定



LHCb  
Bの物理



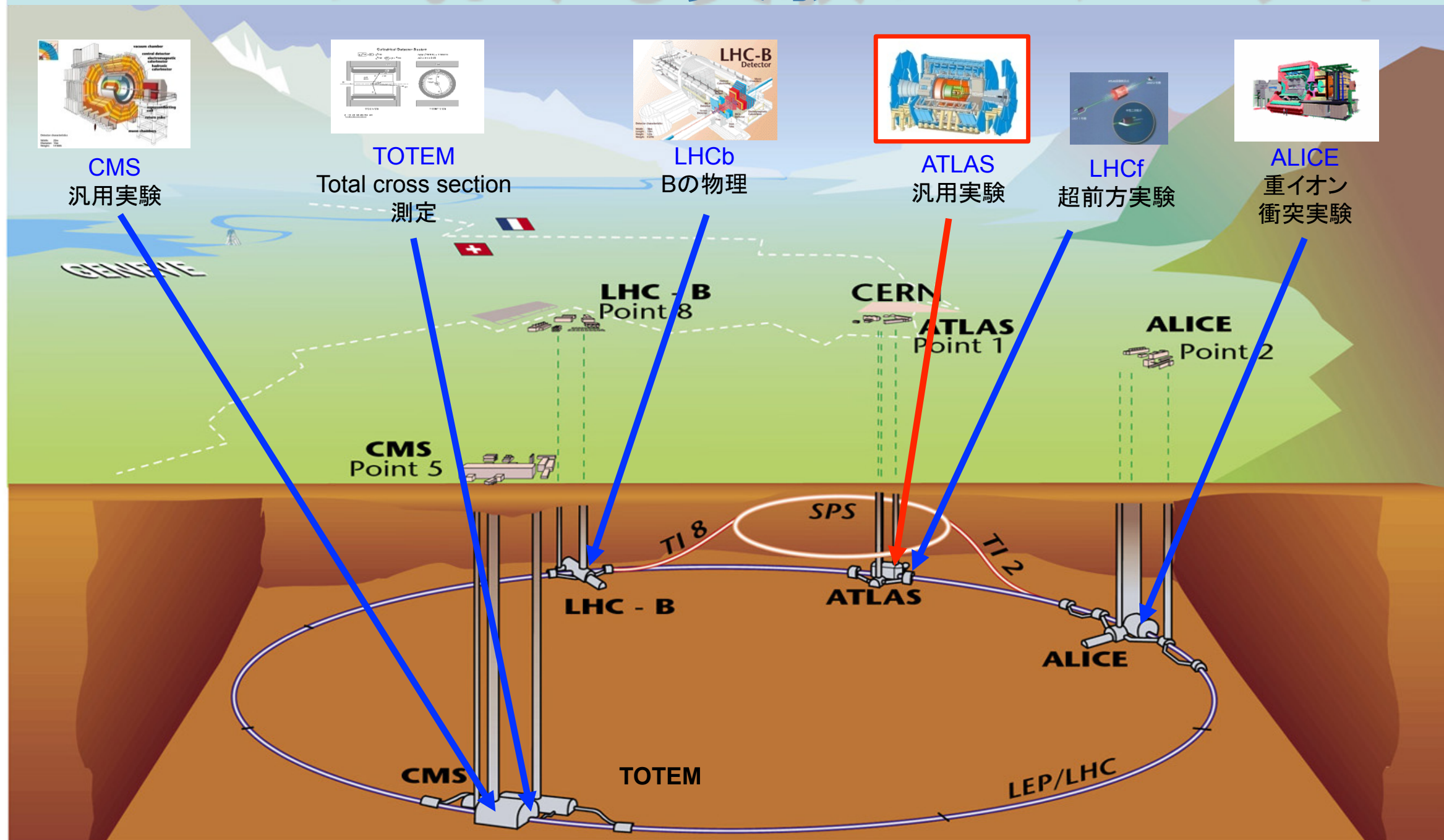
ATLAS  
汎用実験



LHCf  
超前方実験



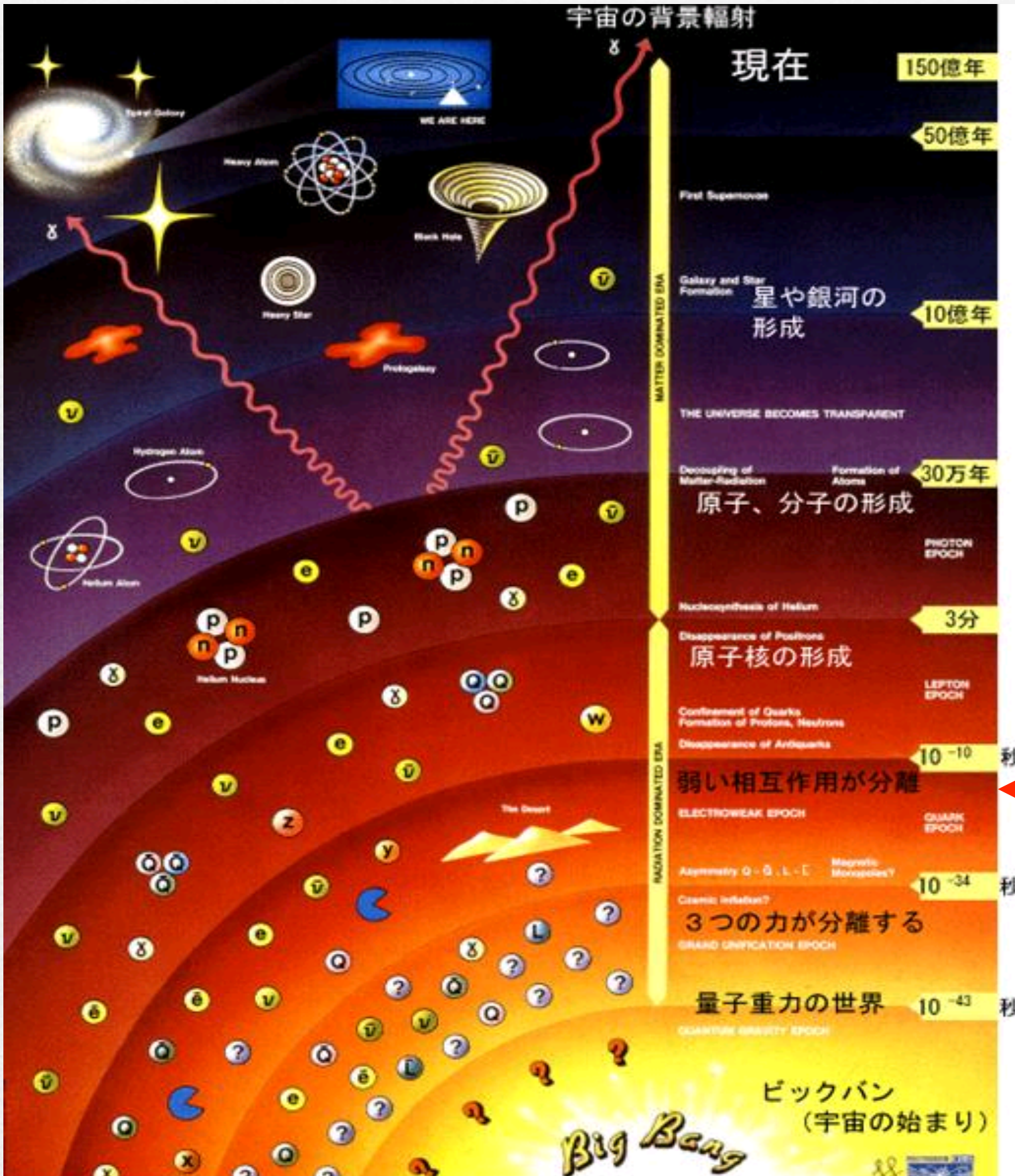
ALICE  
重イオン  
衝突実験



3.5~7TeVまで陽子を加速→ATLAS/CMSで衝突



# LHC実験の研究対象



← この辺り







# LHC実験の研究対象

素粒子研究の全体を網羅

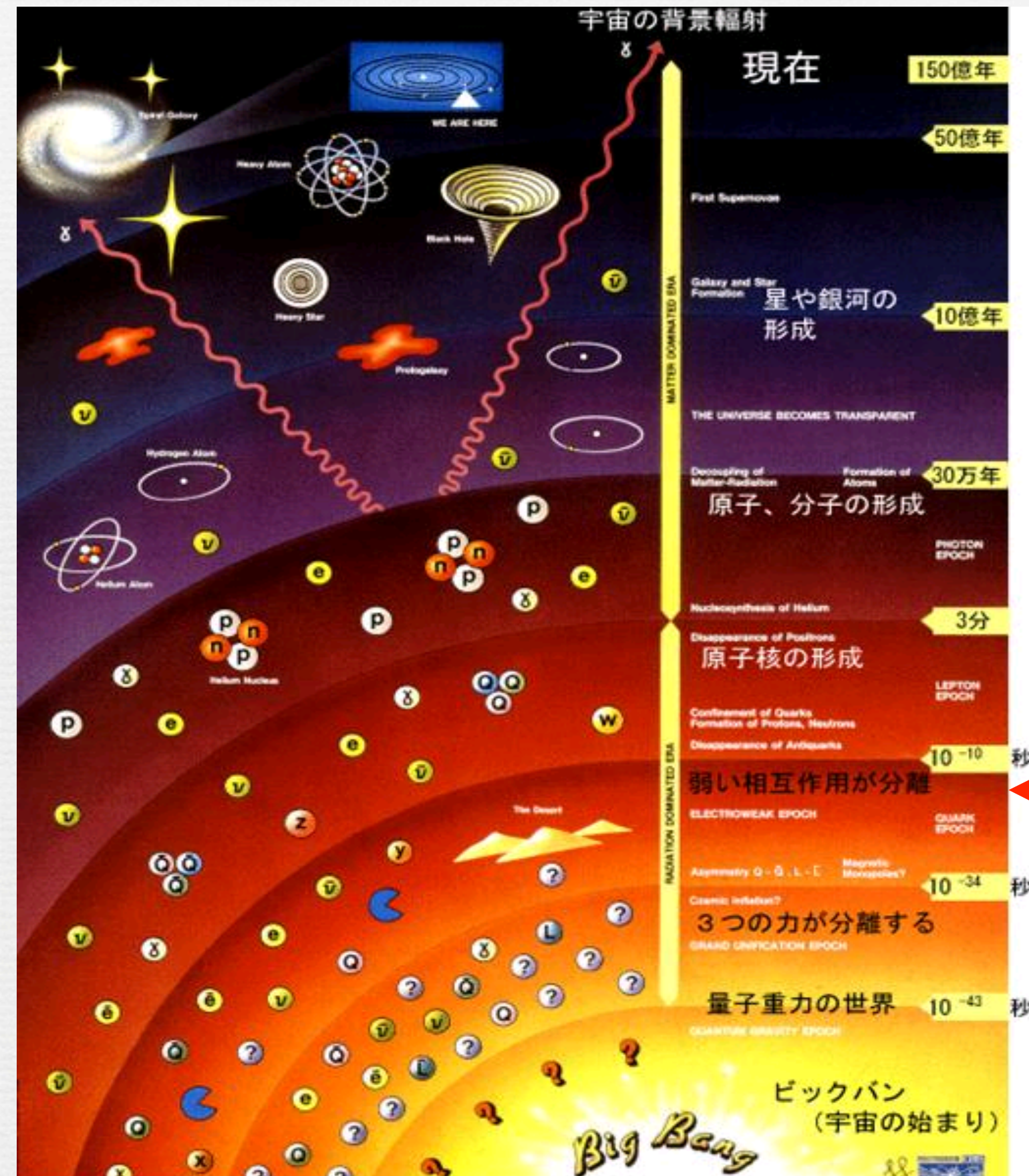
- QCD
- Heavy Ion physics
- Electroweak
- B physics
- Top quark physics
- Higgs
- New phenomena

超対称性？余剰次元？

← この辺り

論文投稿：230（うち183が出版済）  
Conference note：102+163+163

2012年11月30日 17:02 (JST) 時





# LHC実験の研究対象

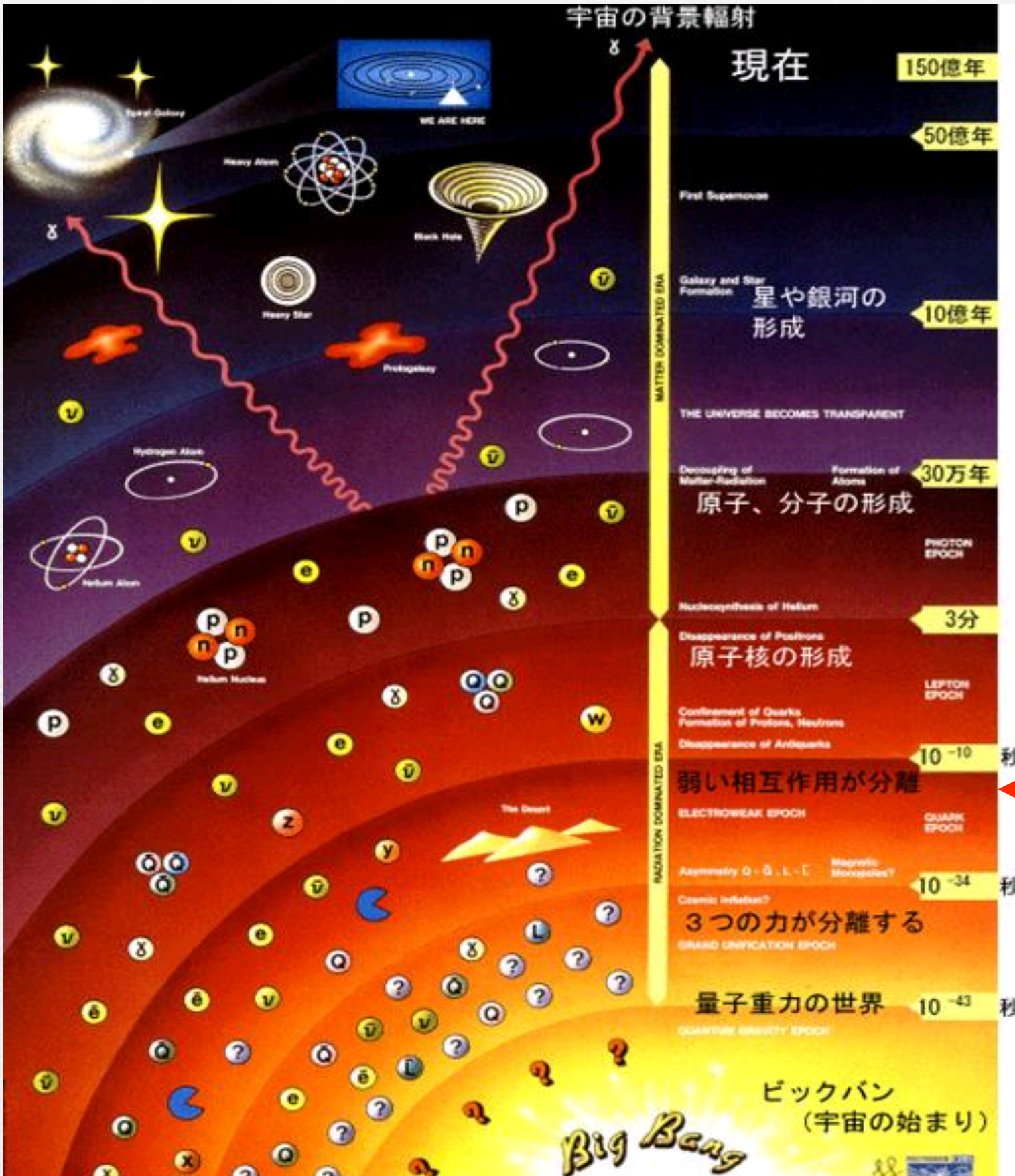
素粒子研究の全体を網羅

- 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

論文投稿：230（うち183が出版済）  
Conference note：102+163+163

2012年11月30日 17:02 (JST) 時





# LHCの近況

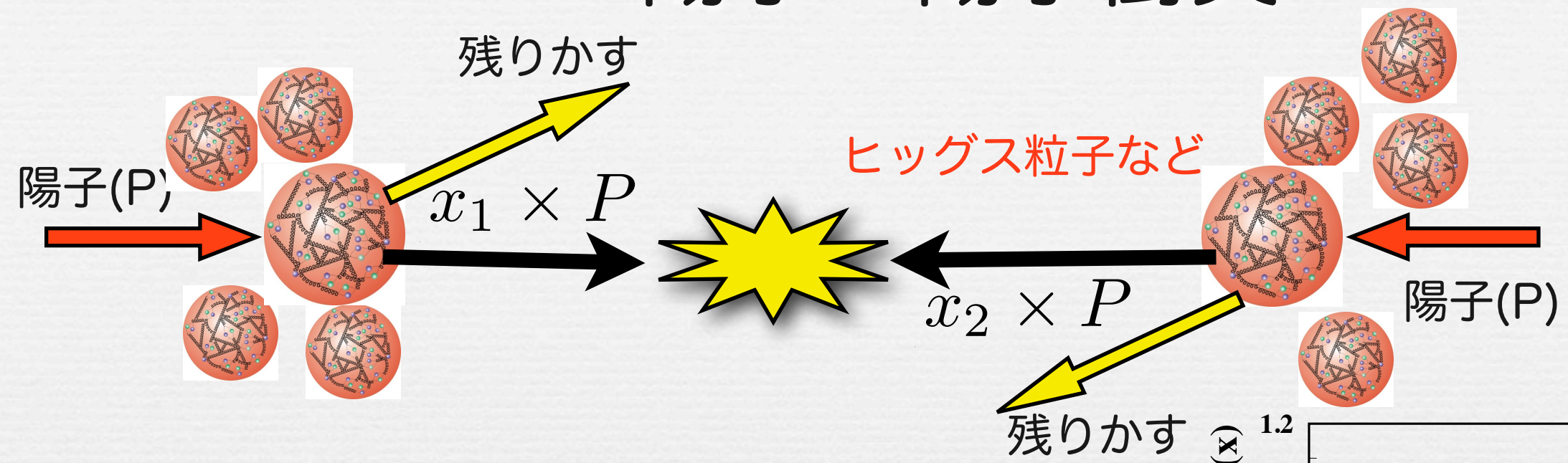
- |             |   |
|-------------|---|
| 2008年9月10日  | LHCではじめて陽子ビーム周回に成功                        |
| 2008年9月19日  | LHC加速器事故                                  |
| 2009年11月23日 | LHCで初めて陽子陽子衝突現象を観測                        |
| 2010年3月30日  | 7TeVの物理データ収集をスタート                         |
| 2011年12月13日 | ヒッ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<br>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



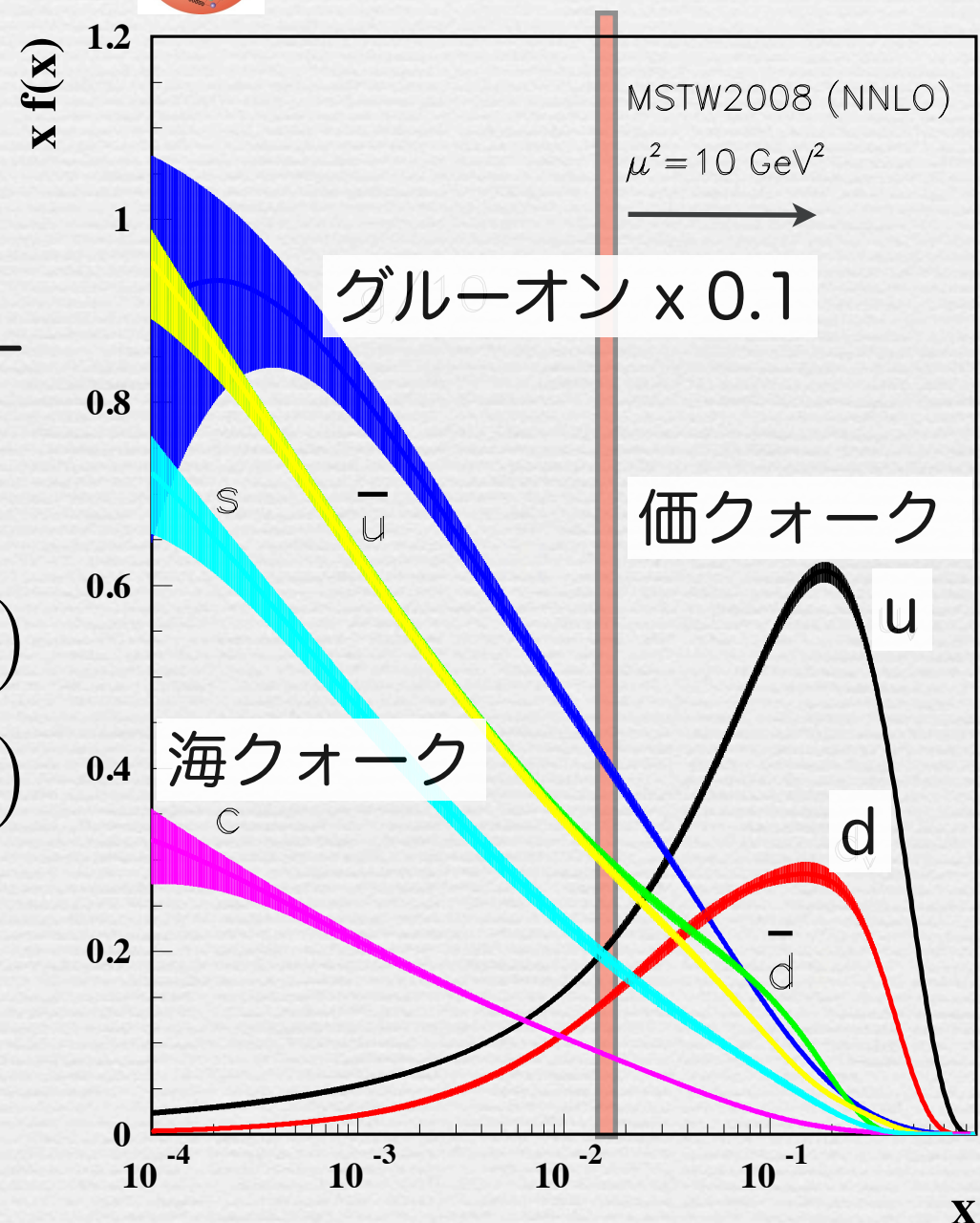
$$\sqrt{\hat{s}} = \sqrt{x_1 x_2} \sqrt{s_{pp}}$$

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)

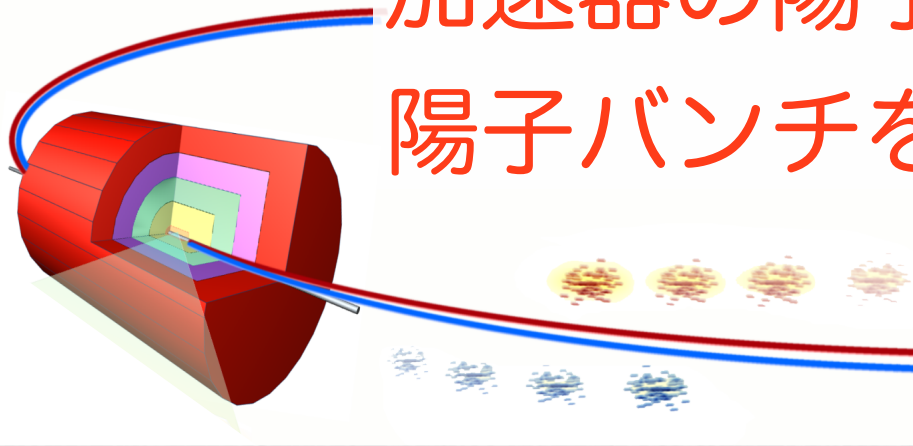
$\sqrt{s_{pp}}$  高い → 沢山のヒッグス粒子





# 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 ( $\sigma$ )



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

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

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

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

$$(1380 \text{ バンチ})$$

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

## 瞬間ルミノシティ

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

$$\rightarrow \text{反応率 } R = L \times \sigma$$

## 積分ルミノシティ

$$\int L dt \quad (\text{cm}^{-2})$$

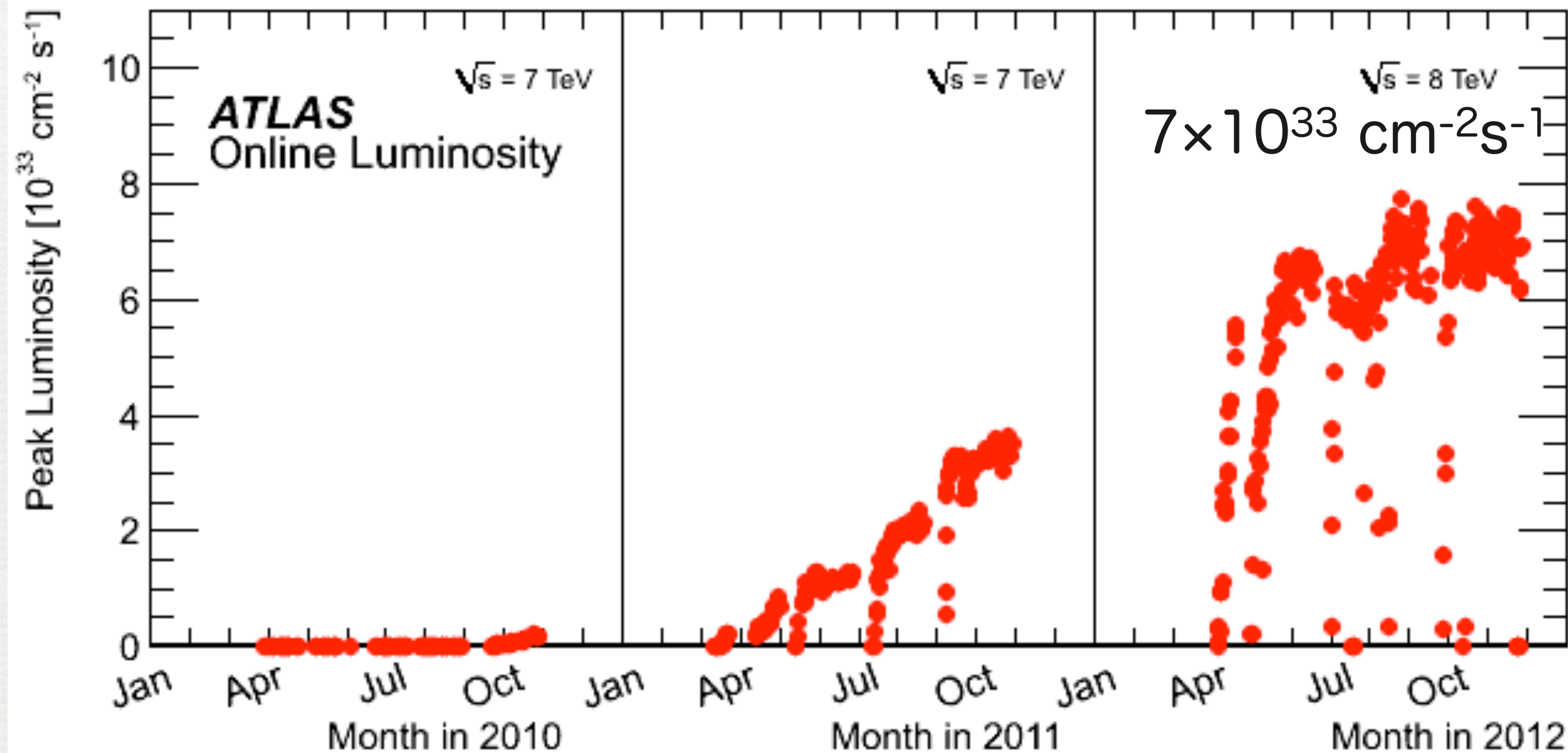
$$10^{24} \text{ cm}^{-2} = 1 \text{ b}^{-1}$$

$$\rightarrow \text{事象数 } N = \int L dt \times \sigma$$

高いルミノシティ  $\rightarrow$  沢山のヒッグス粒子

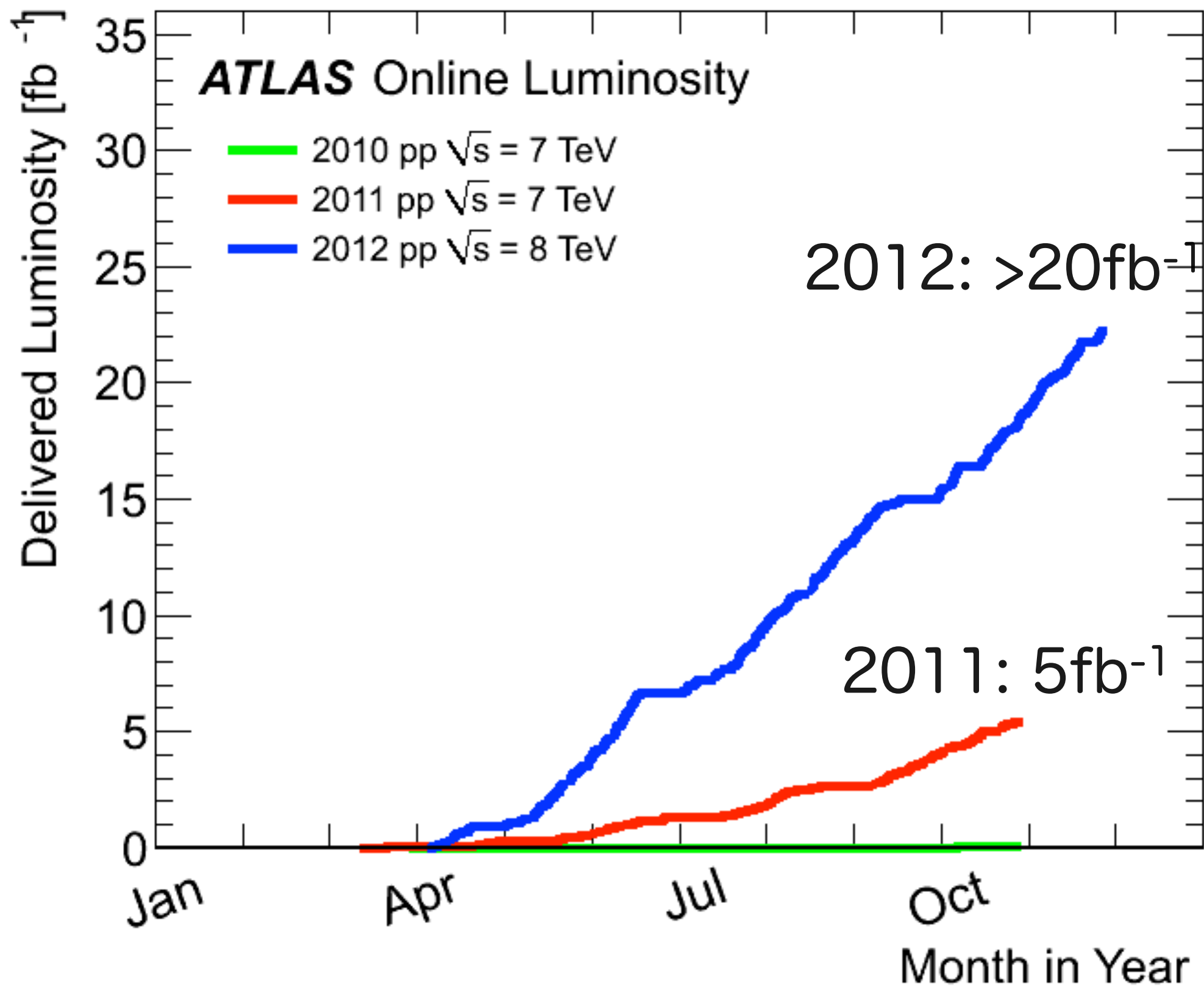


# 瞬間ルミノシティ



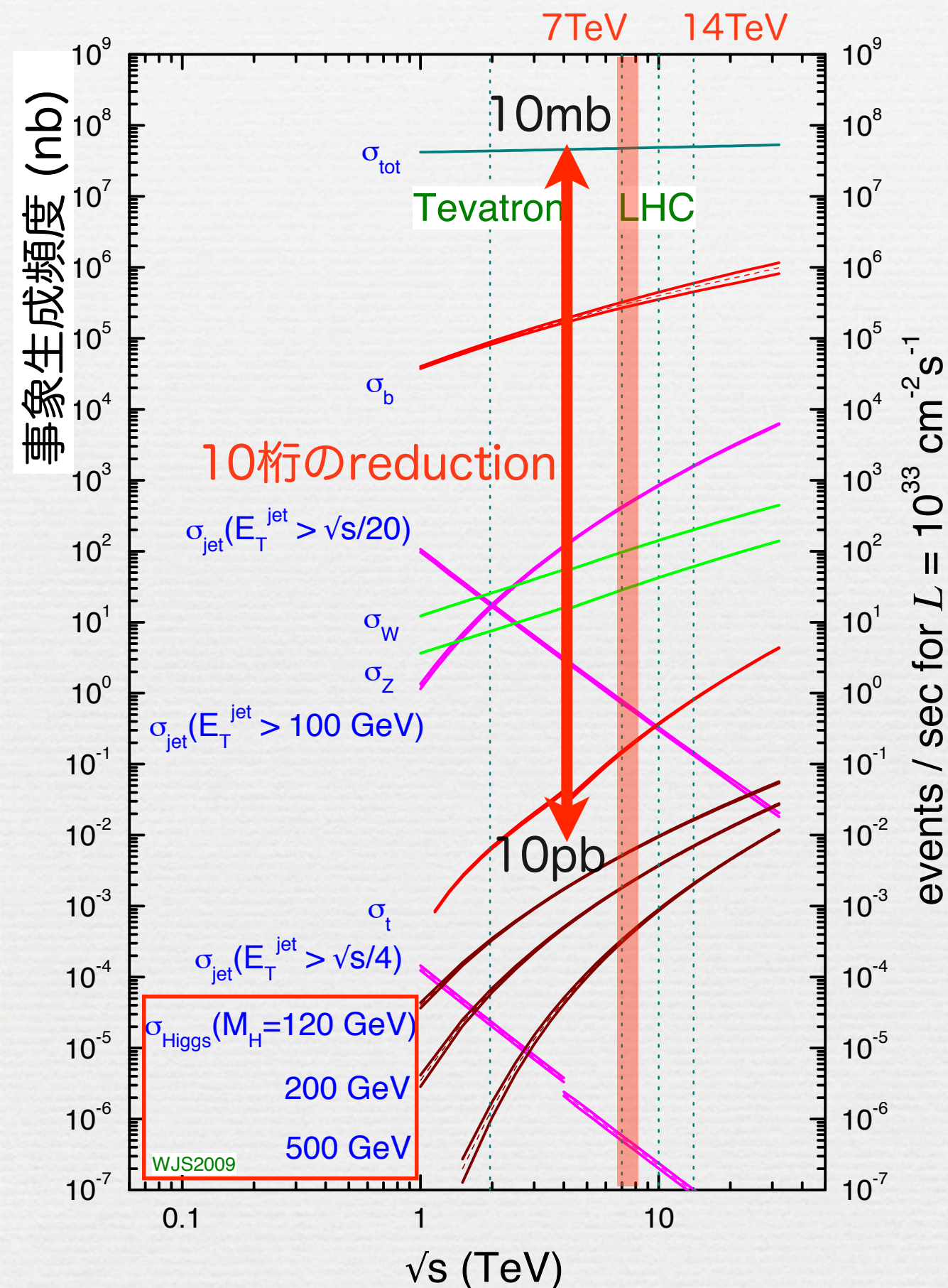


# 積分ルミノシティ





# 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)

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

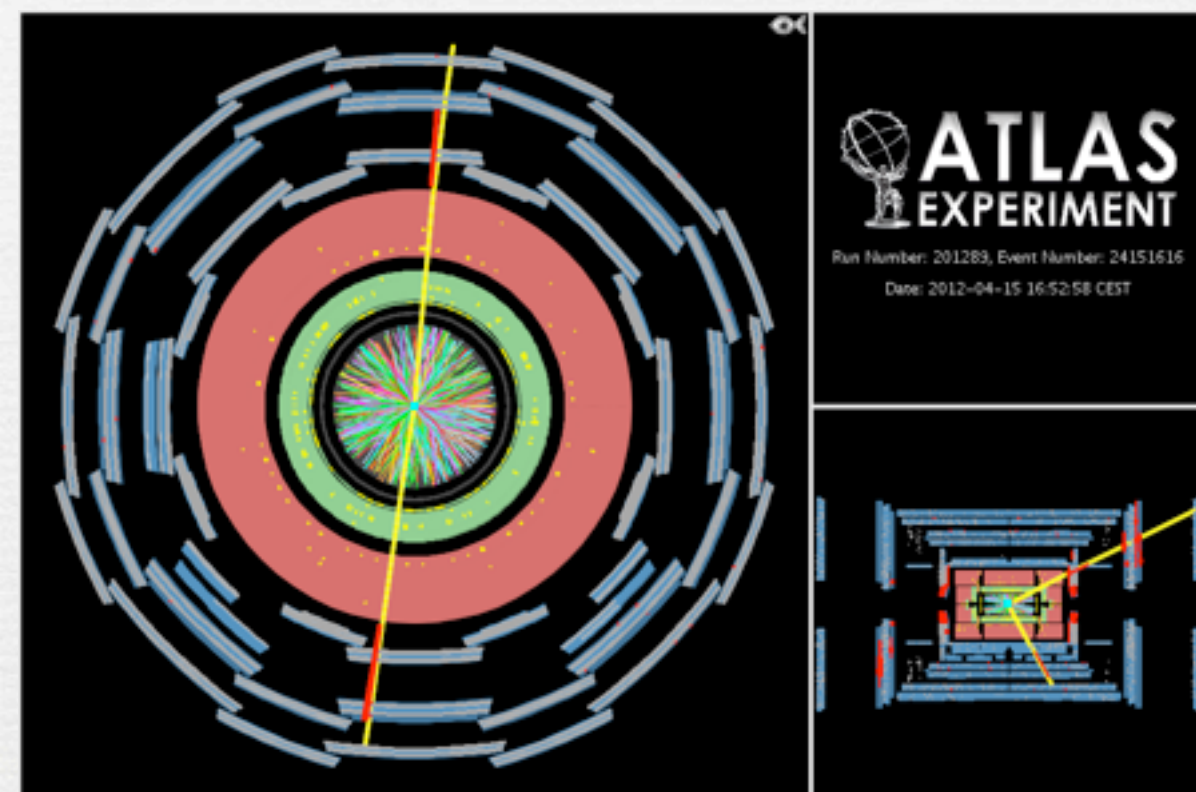
陽子交差頻度は20MHz

平均で数十のpileup事象

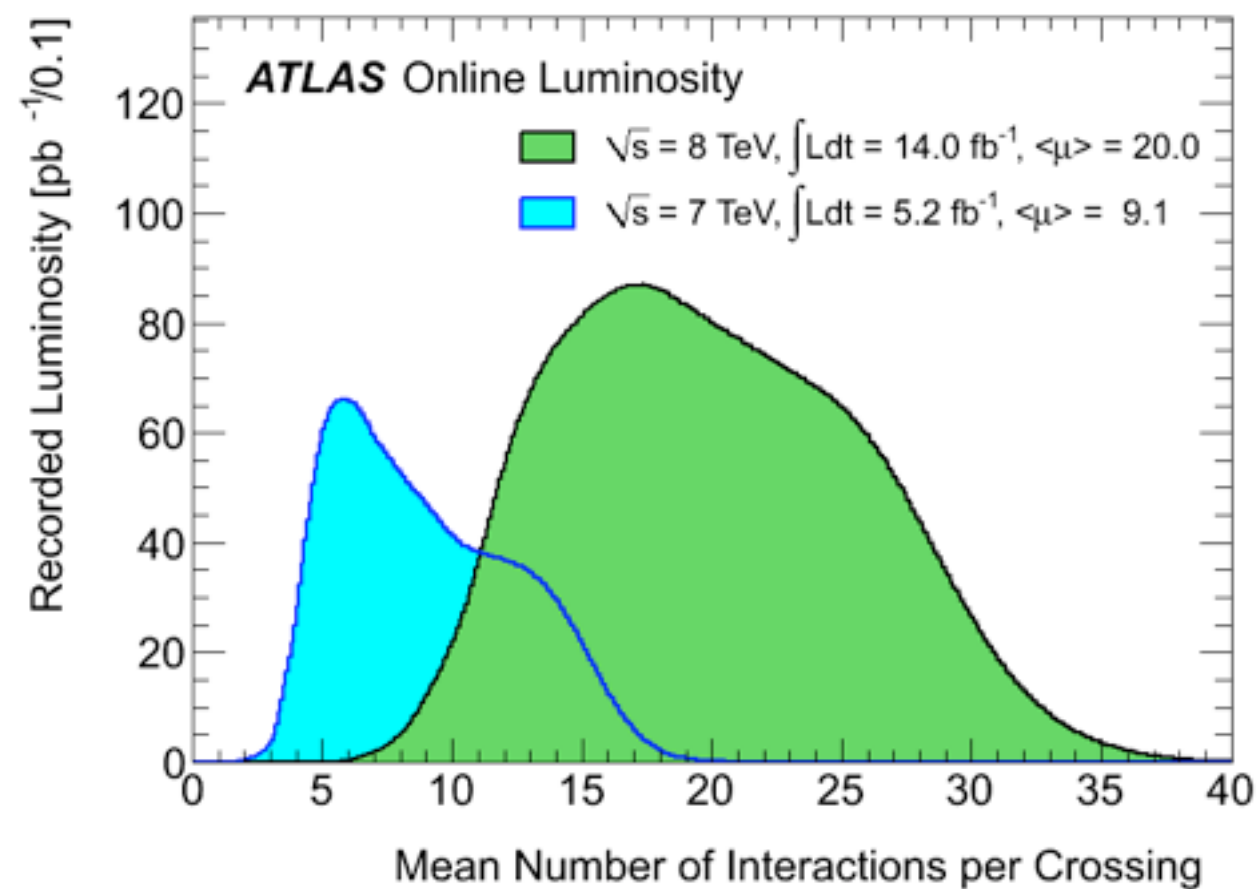
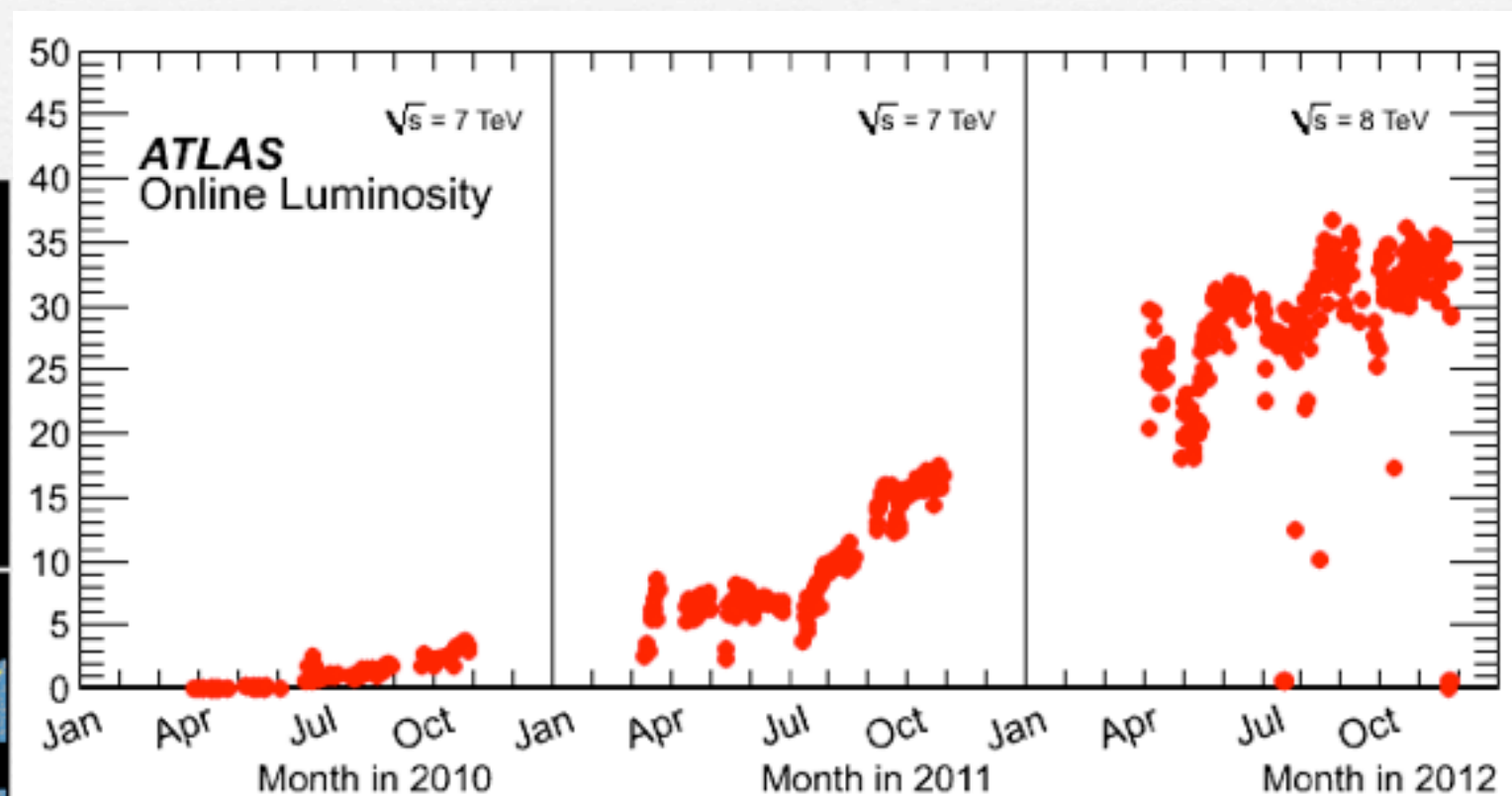


# pileup事象

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



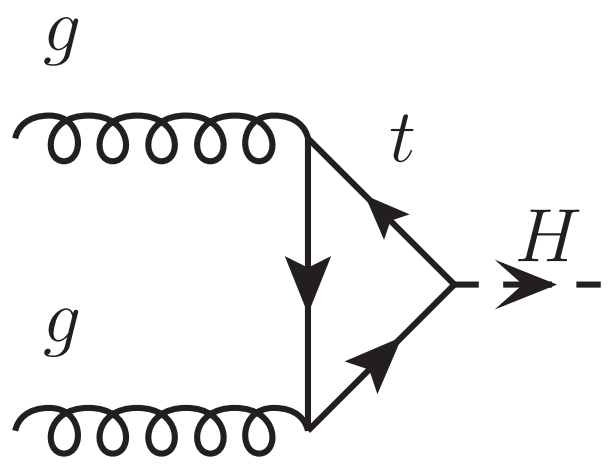
$$\sigma_z = 5 \sim 6 \text{ cm}$$





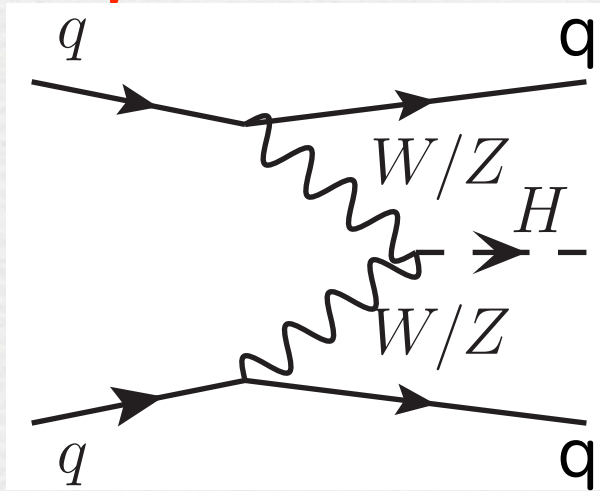
# ヒッグス粒子生成

## gluon fusion



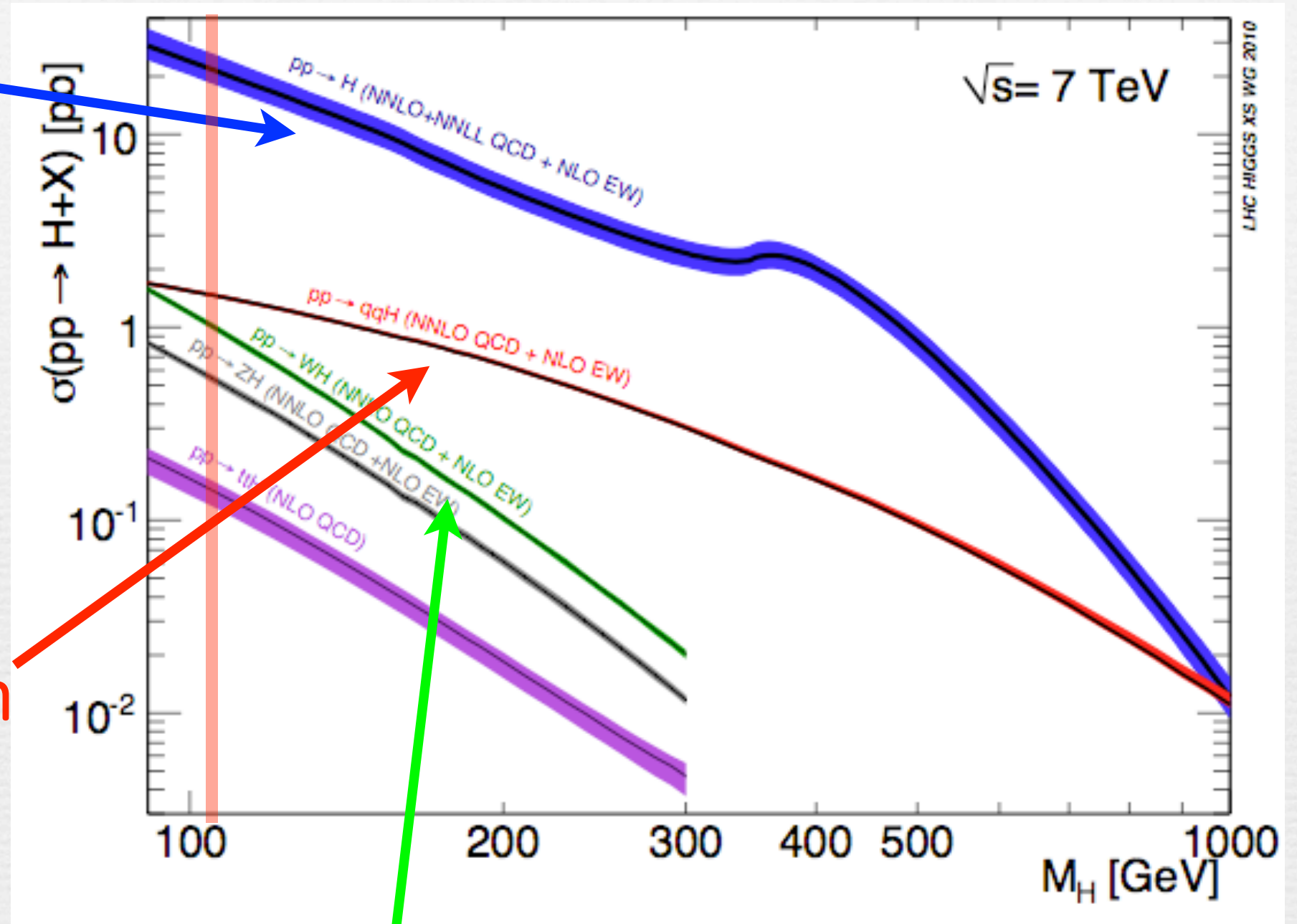
トップクォークとの湯川結合  
断面積最大  
QCDによる事象の排除困難

## W/Z boson fusion

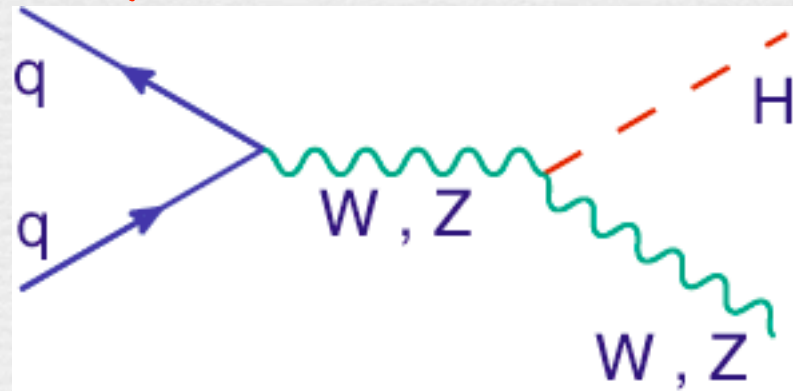


ゲージ結合  
Higgs + 2 forward jets

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

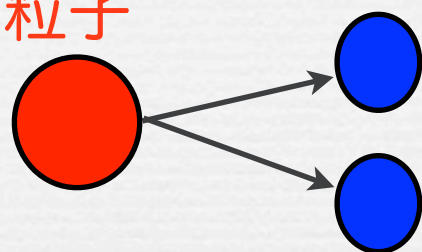
QCDによる事象を排除



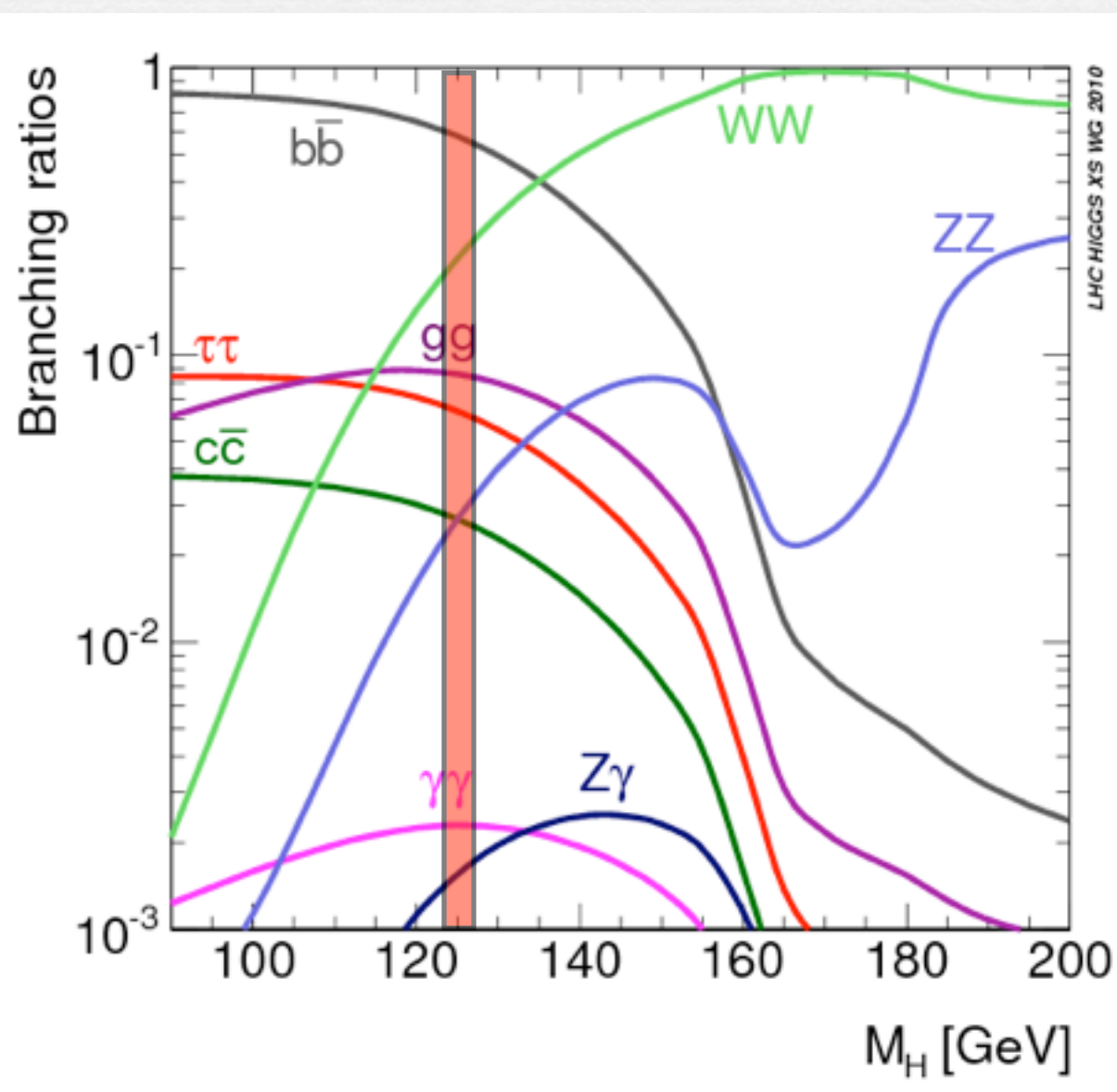
# ヒッグス粒子崩壊

ヒッグス粒子は重い素粒子と結合しやすい

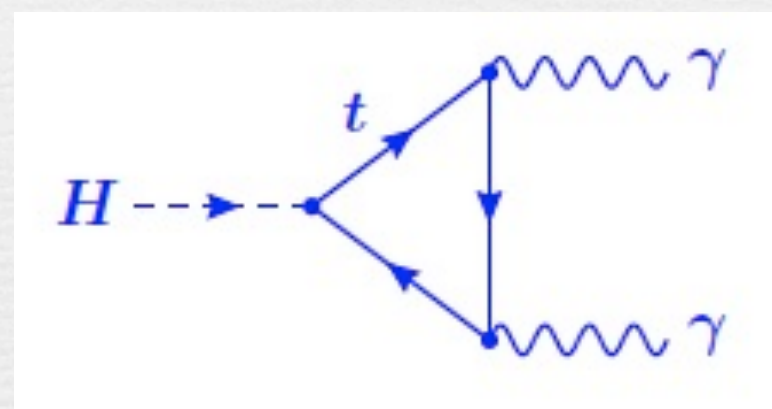
ヒッグス粒子



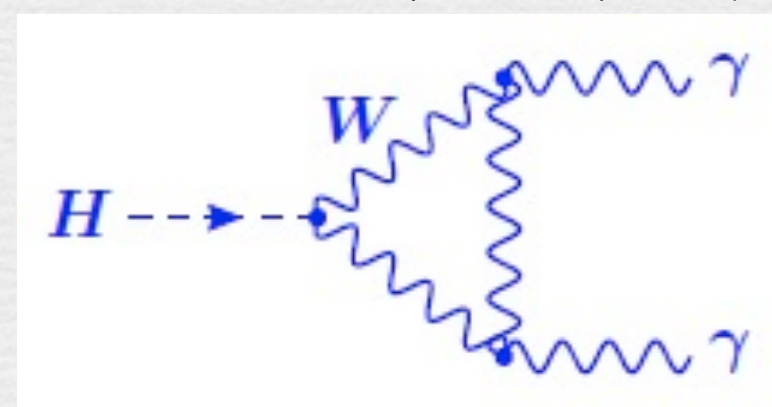
$W^+W^-$ ,  $ZZ$ ,  $t\bar{t}$ ,  $b\bar{b}$ ,  $\tau^+\tau^-$ ,  $c\bar{c}$ ...



$\gamma\gamma$ 、 $gg$ 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

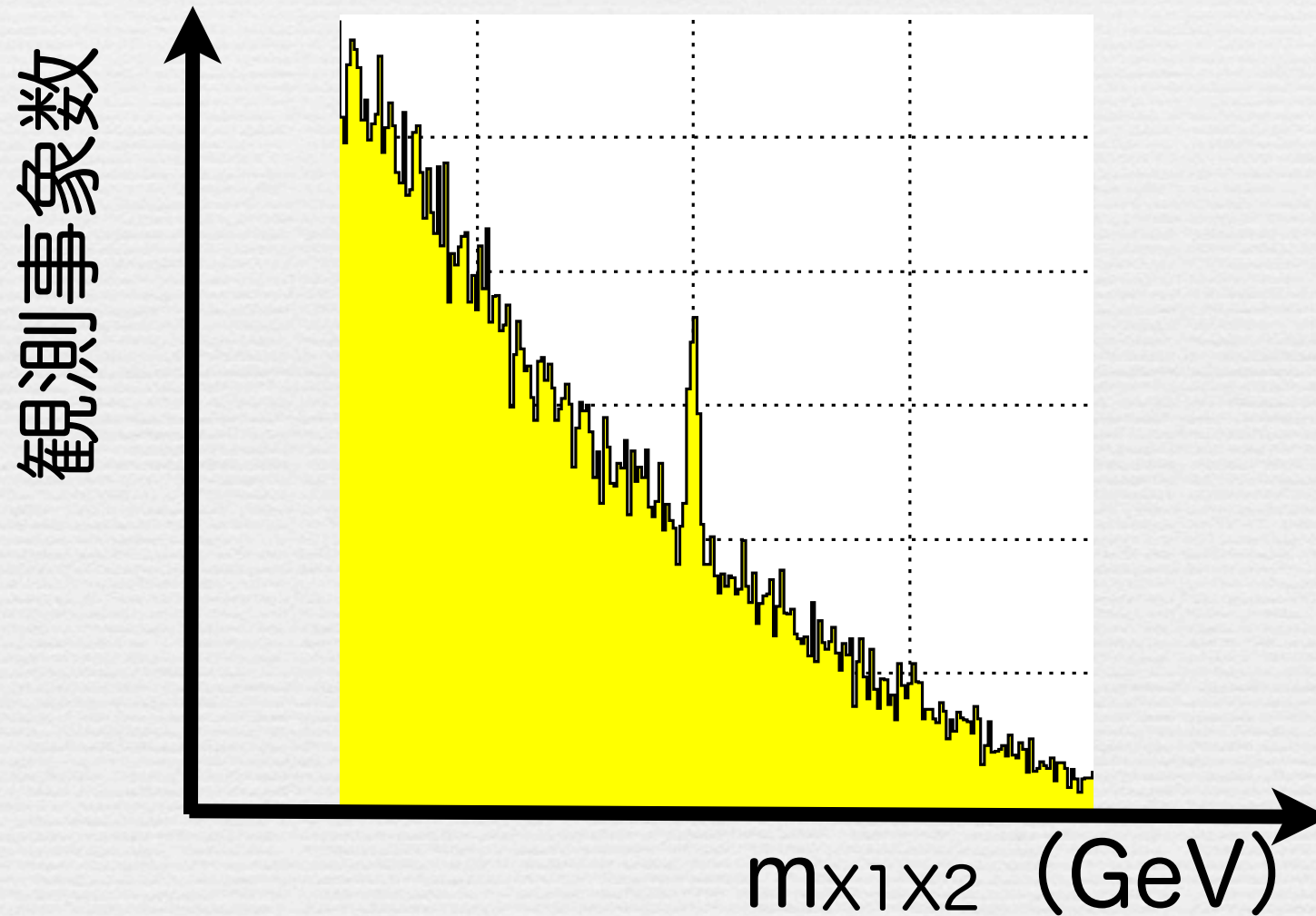


# ヒッグスの探索手法

ヒッグス粒子  $\rightarrow X_1 + X_2$

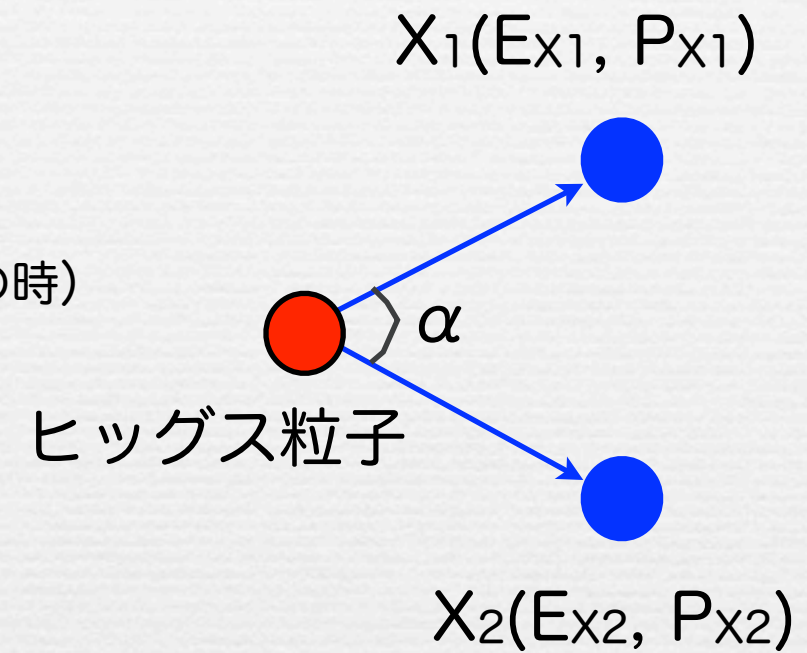
$$m_{X_1 X_2}^2 = (E_{X_1} + E_{X_2})^2 - (P_{X_1} + P_{X_2})^2$$

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



背景事象が少ない

運動量/エネルギー分解能が良い



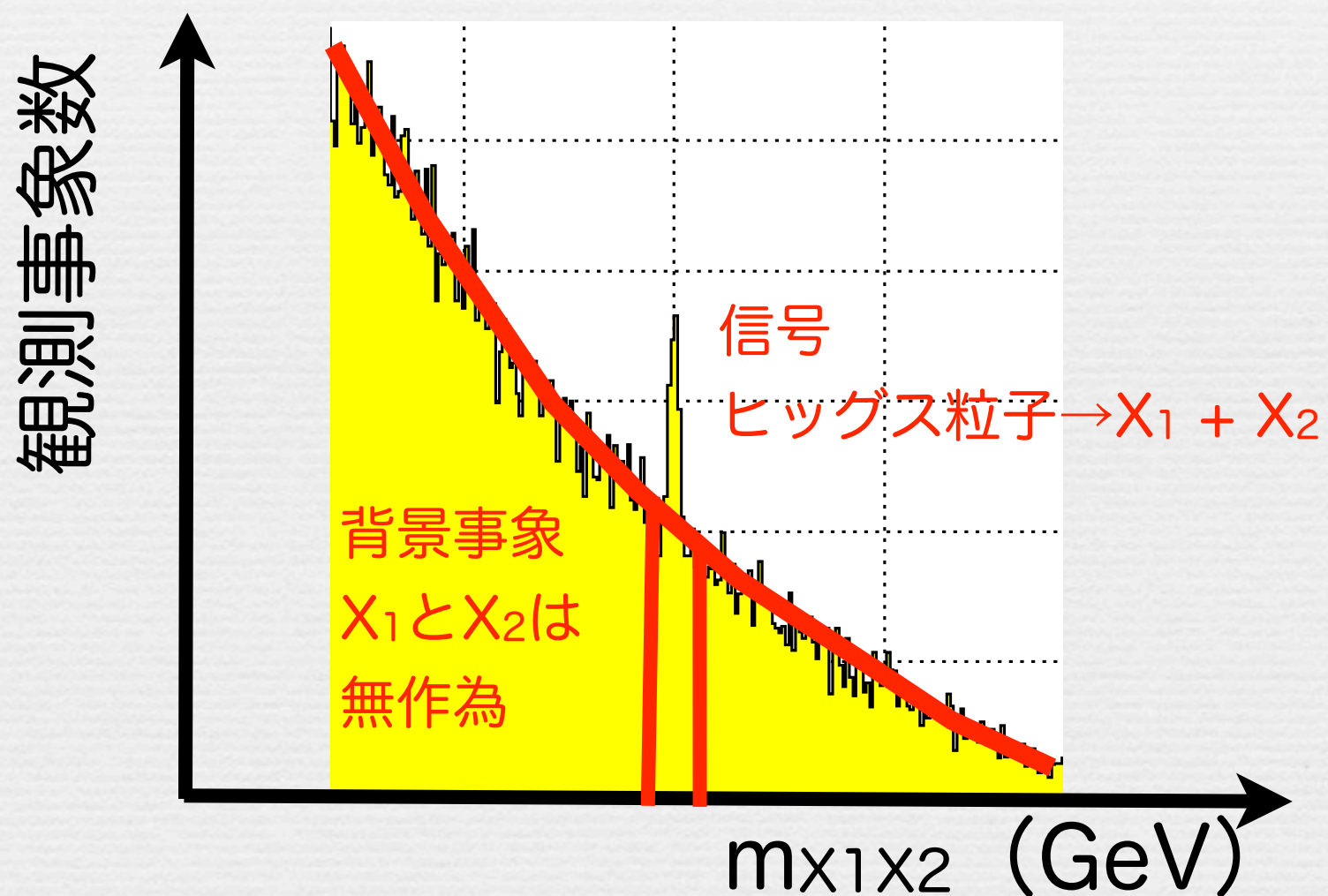
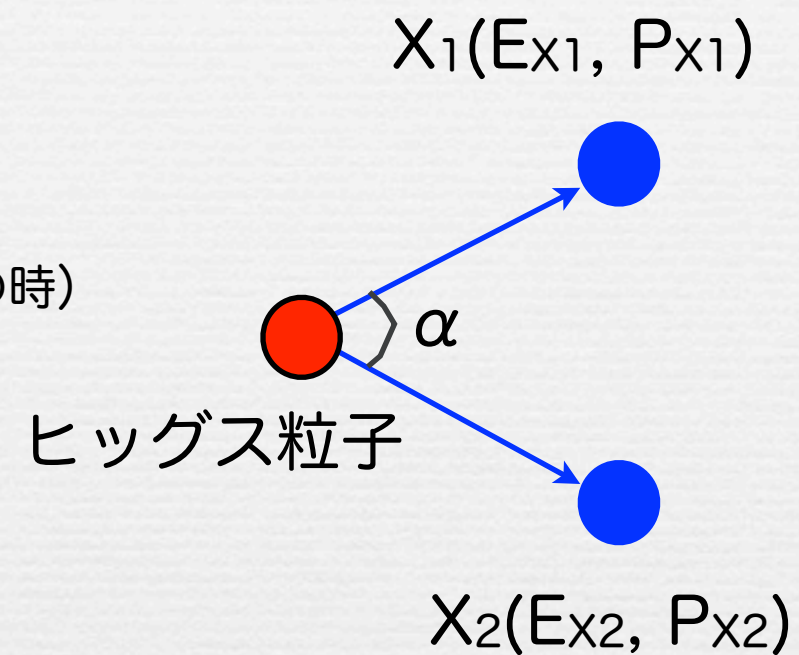


# ヒッグスの探索手法

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

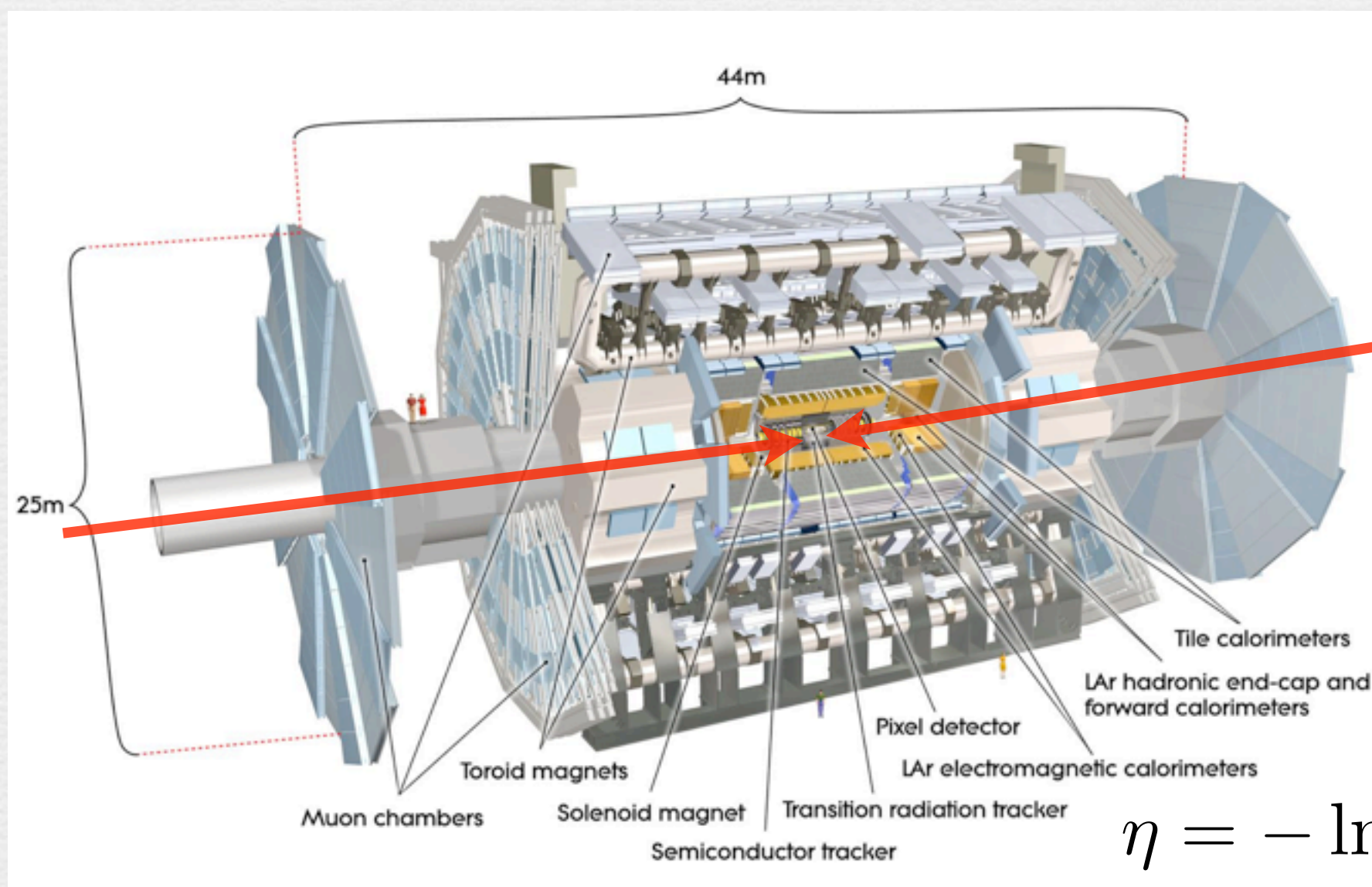


# LHC-ATLAS detector

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

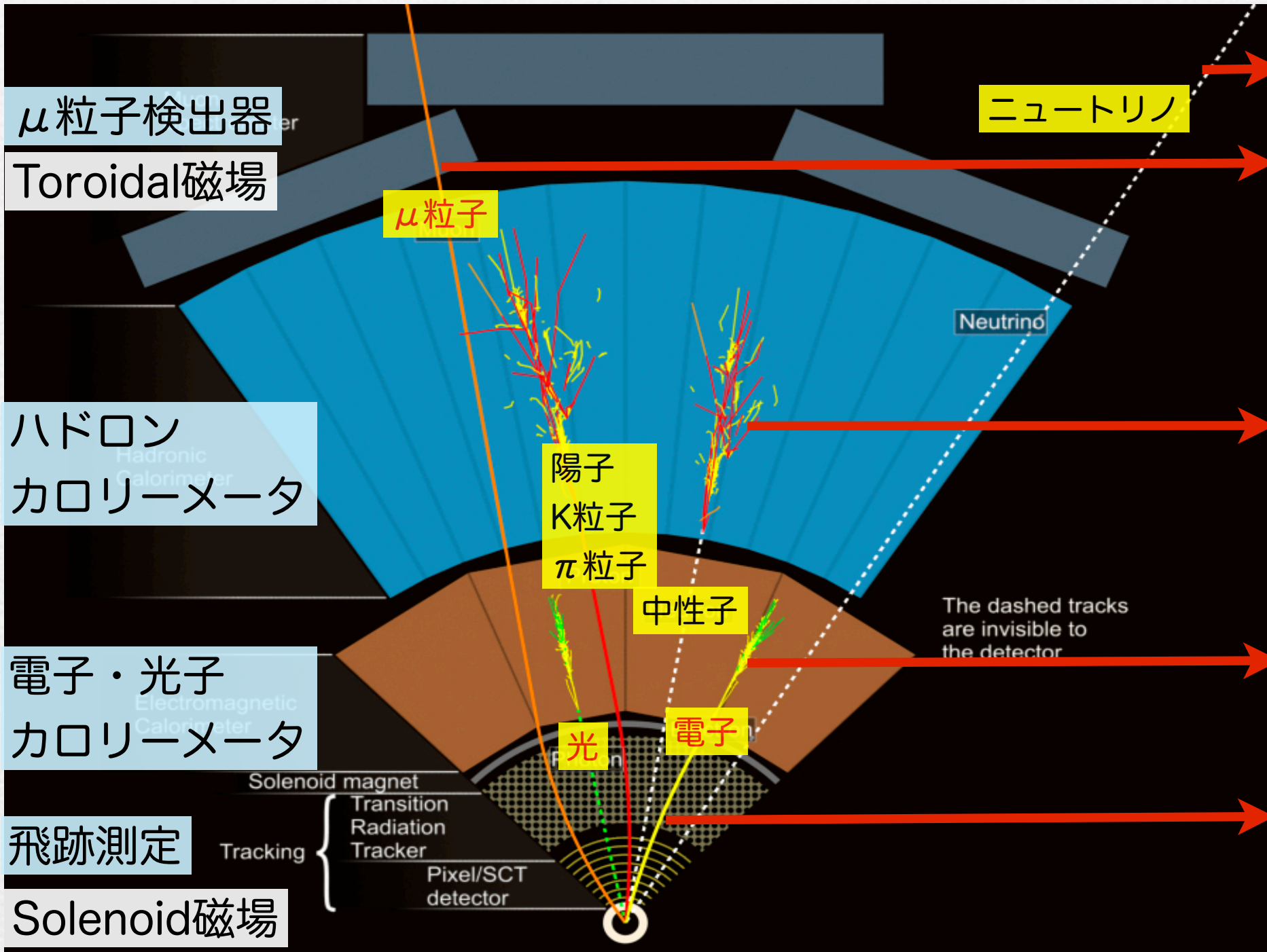


$$\eta = -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right]$$



# 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

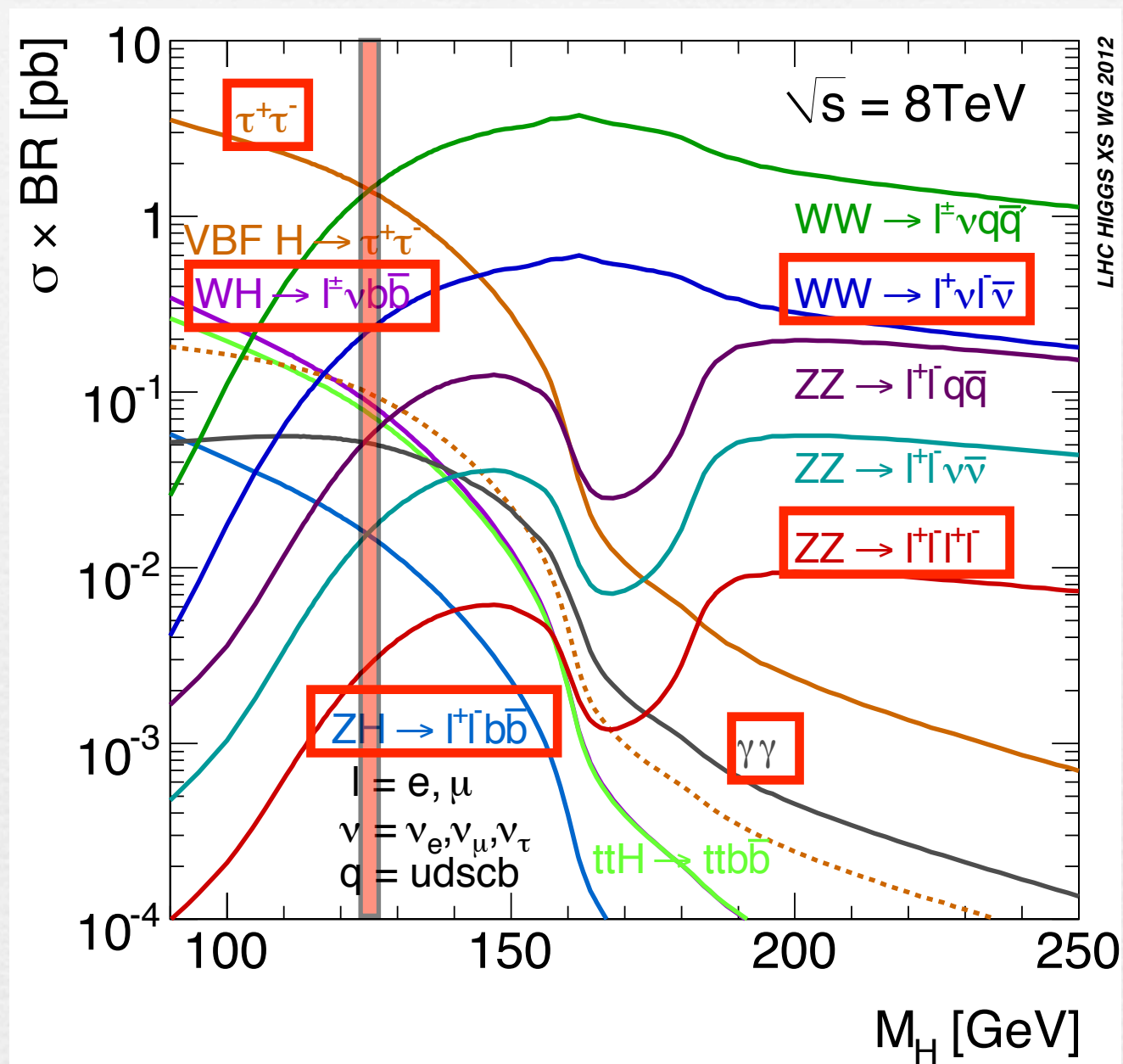
荷電粒子が残す微弱信号  
磁場で荷電粒子を曲げる  
→運動量測定

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

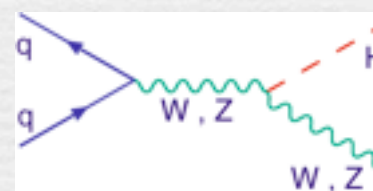
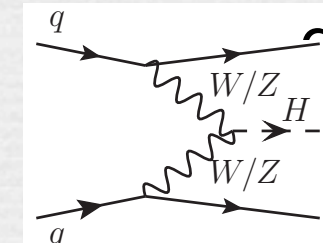
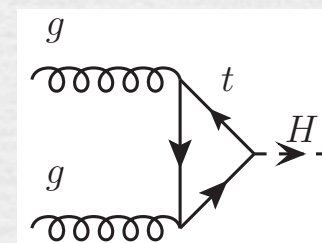


- gluon fusionとW/Z boson fusionを用いて

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

- W/Zとの随伴生成を用いて

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



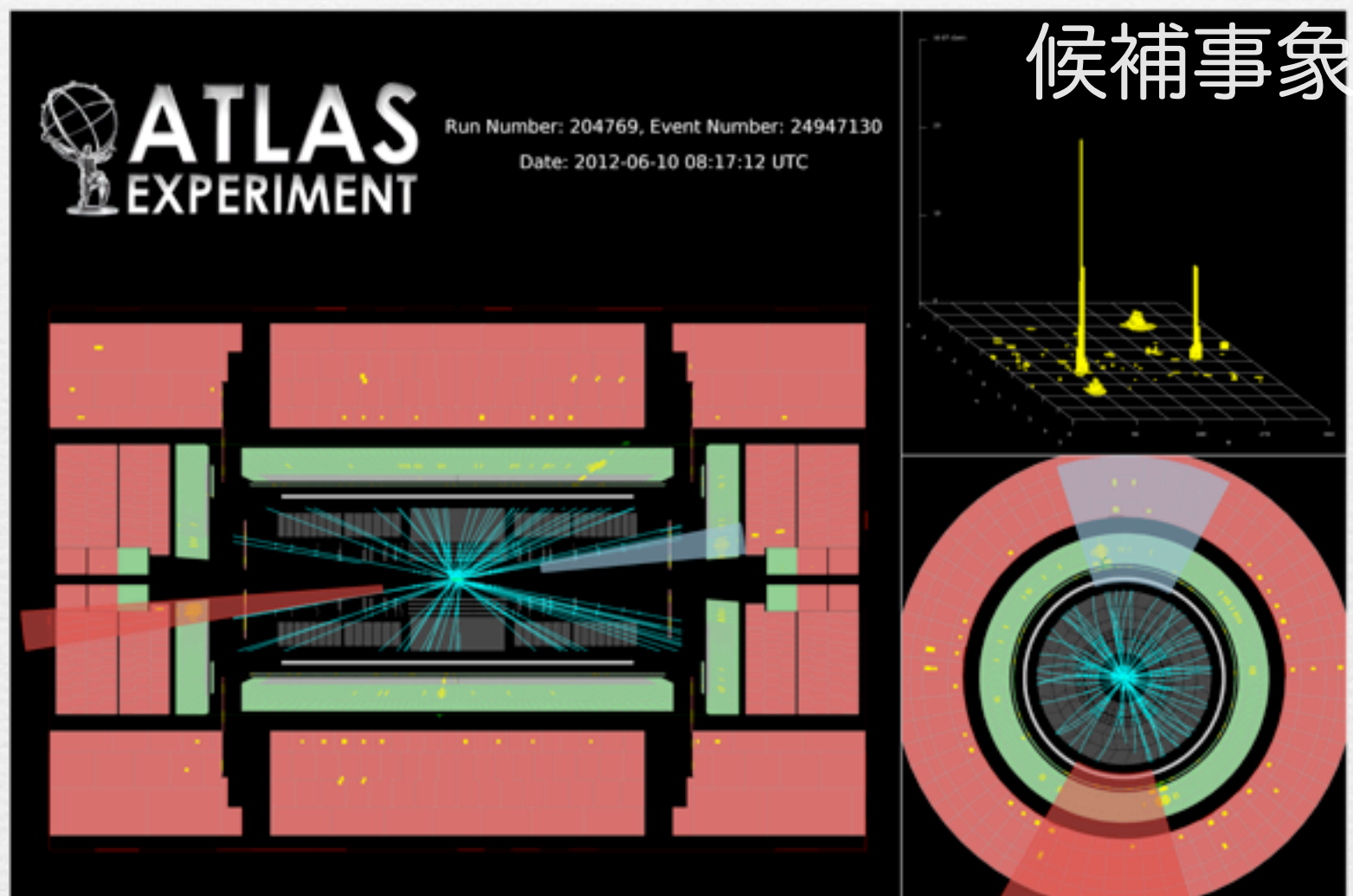
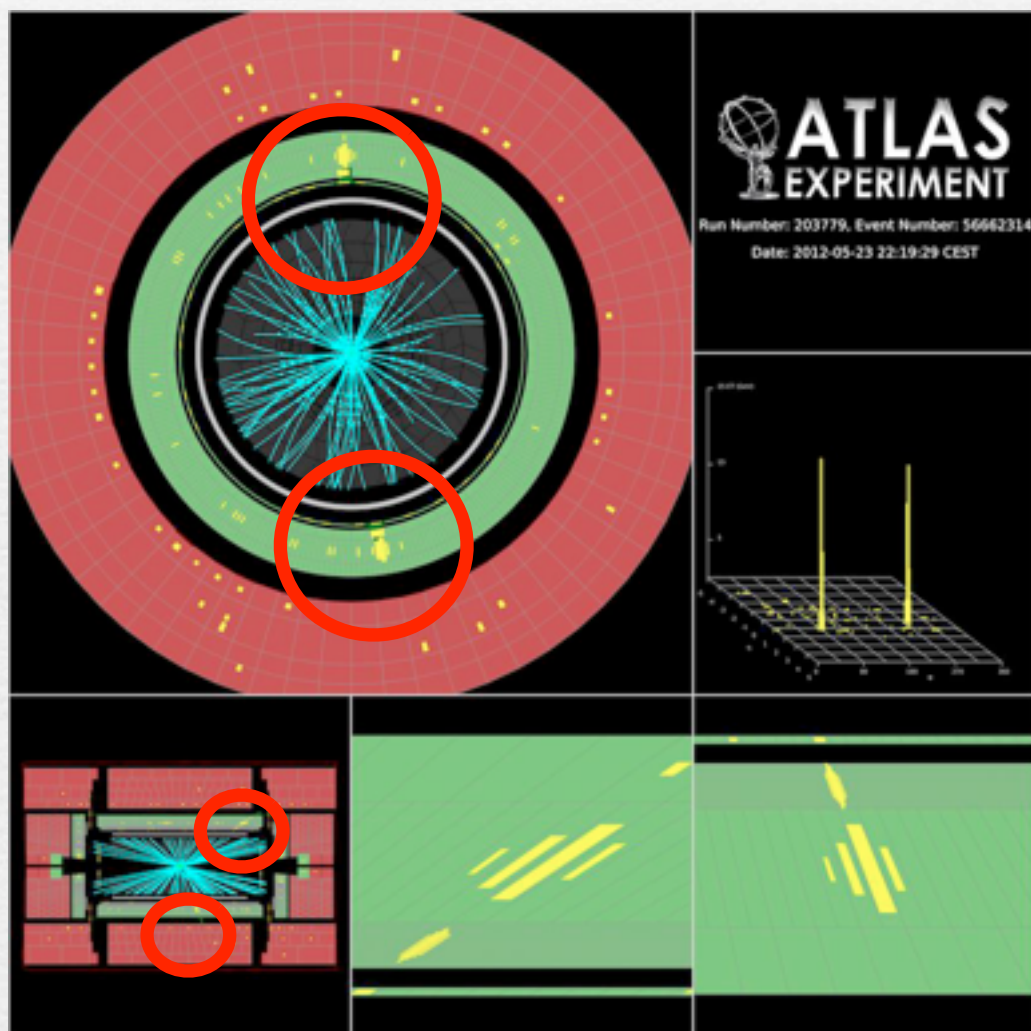


# 陽子 + 陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ 光子 光子

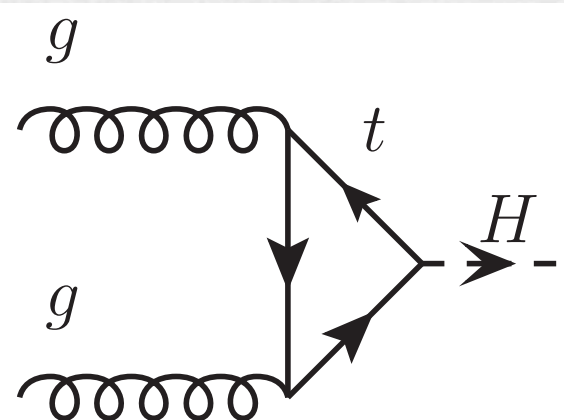
高い運動量の光子が2本(カロリメータにて)

$m_{\gamma\gamma}$ でヒッグスのピークを探索

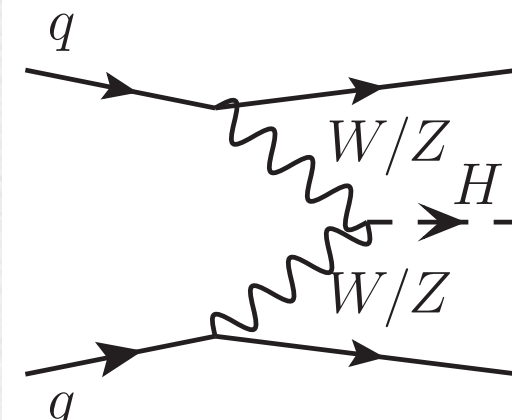
低背景事象、質量分解能が良い



候補事象



候補  
 $2\gamma + 0\text{jet}$

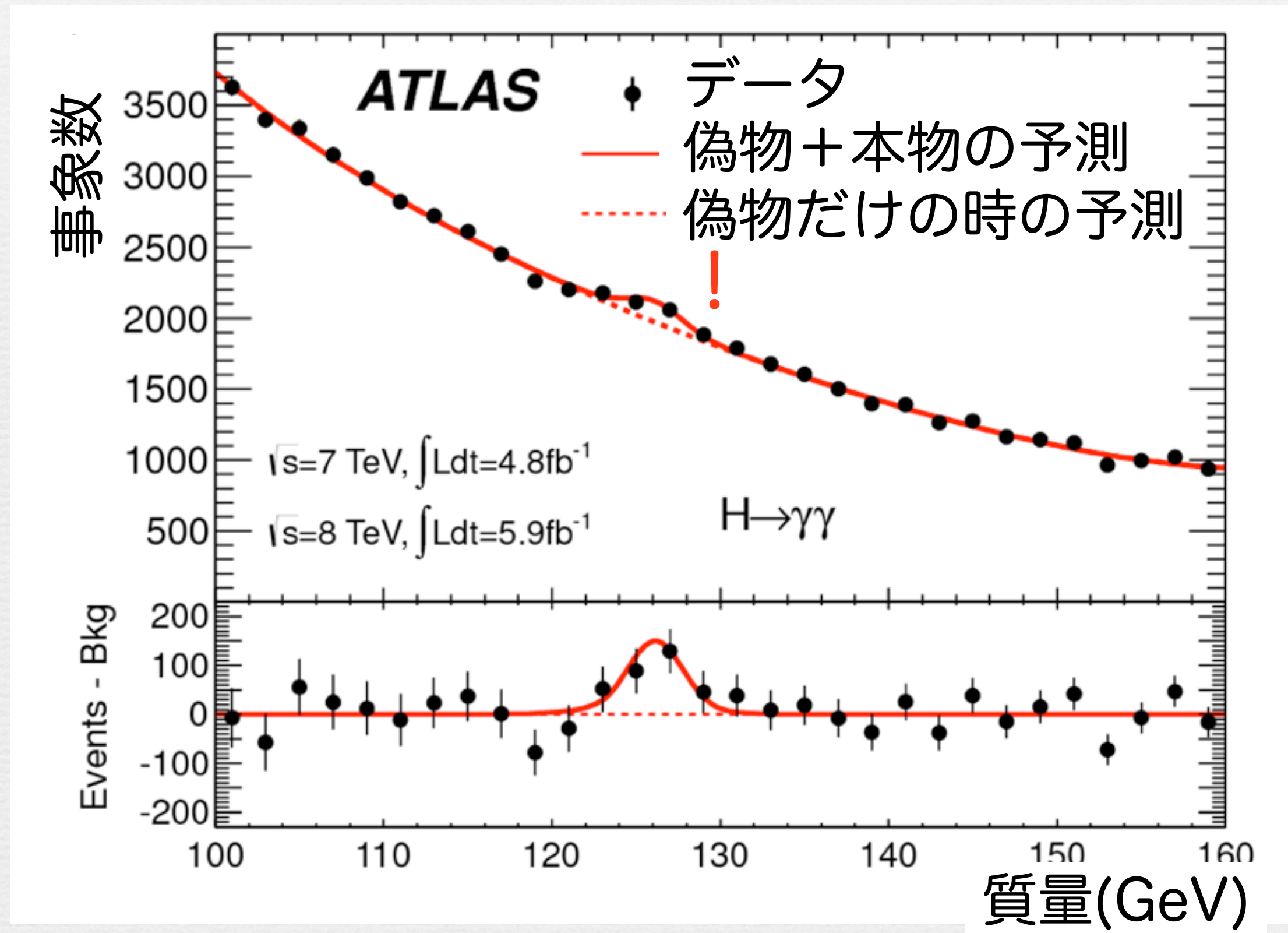


候補  
 $2\gamma + 2\text{jets}$



# 陽子 + 陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ 光子 光子

主な背景事象は、 $pp \rightarrow$  光子 光子

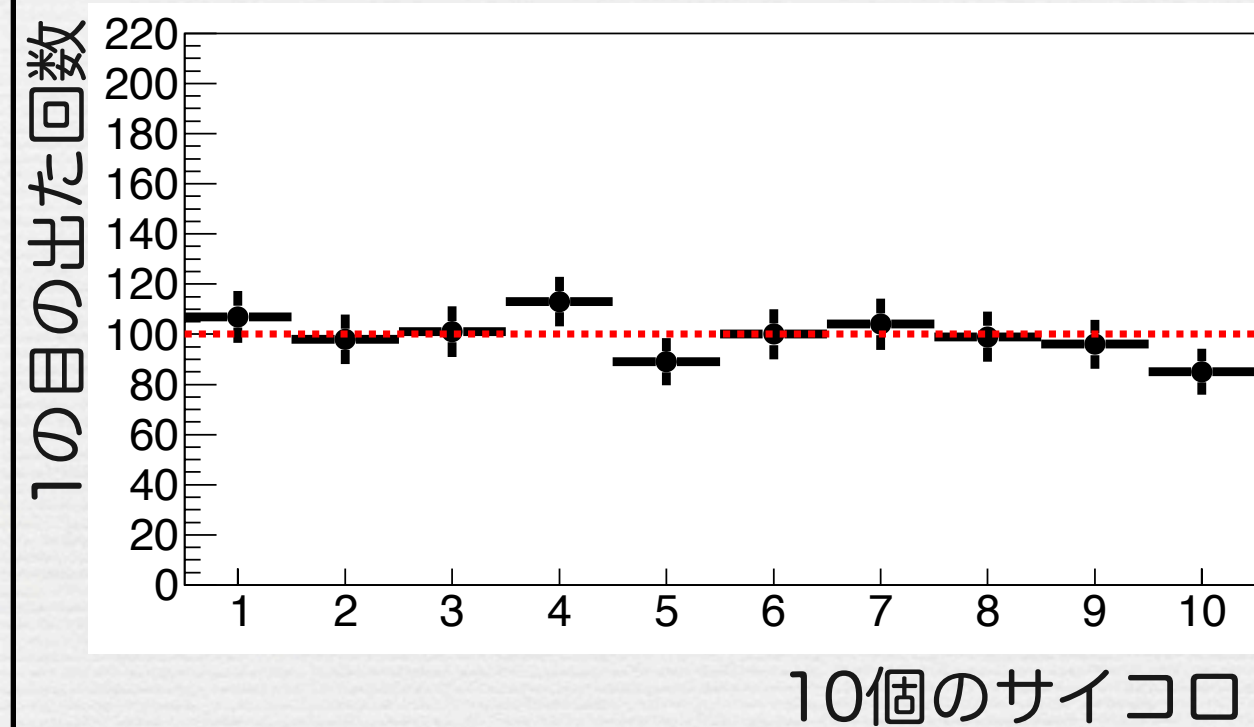




# 発見の指標

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

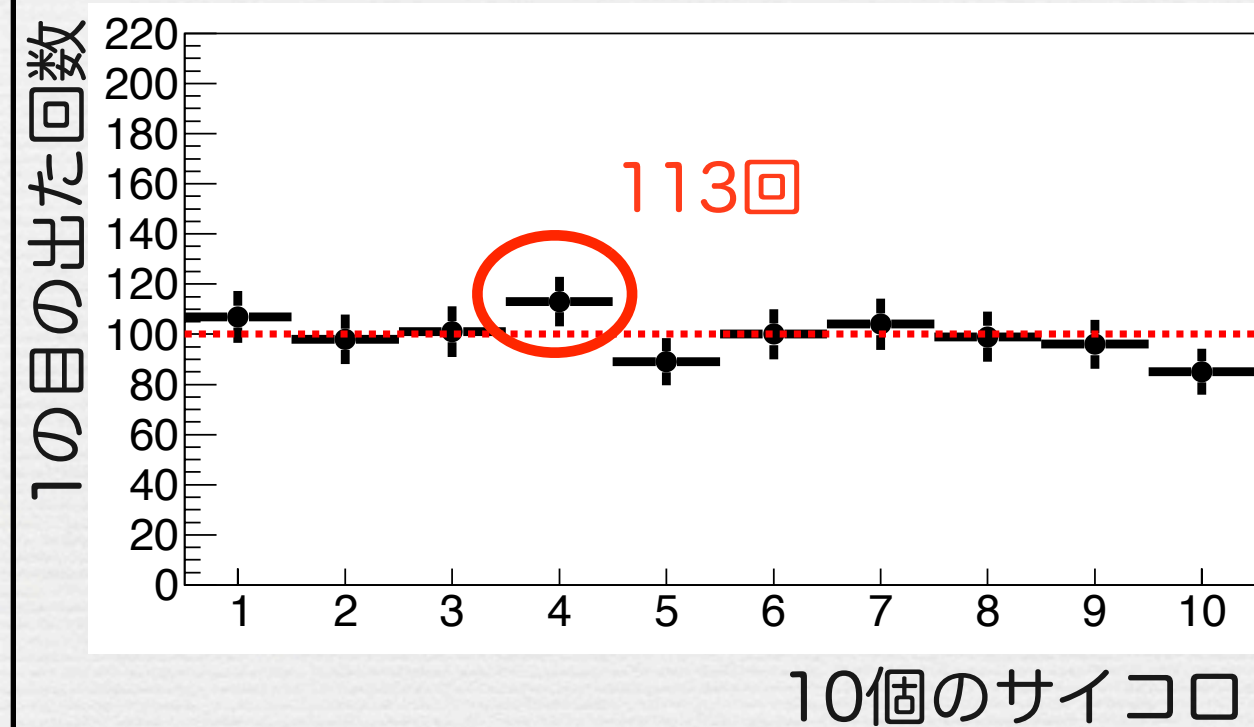




# 発見の指標

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

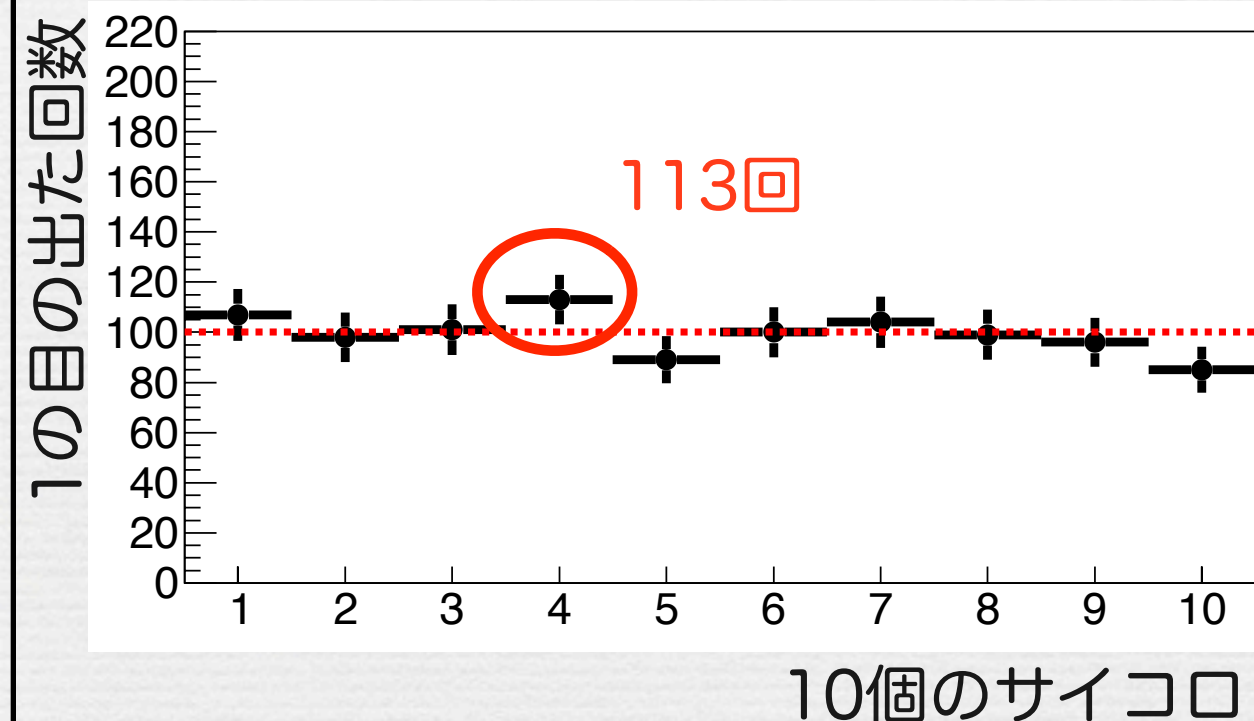




# 発見の指標

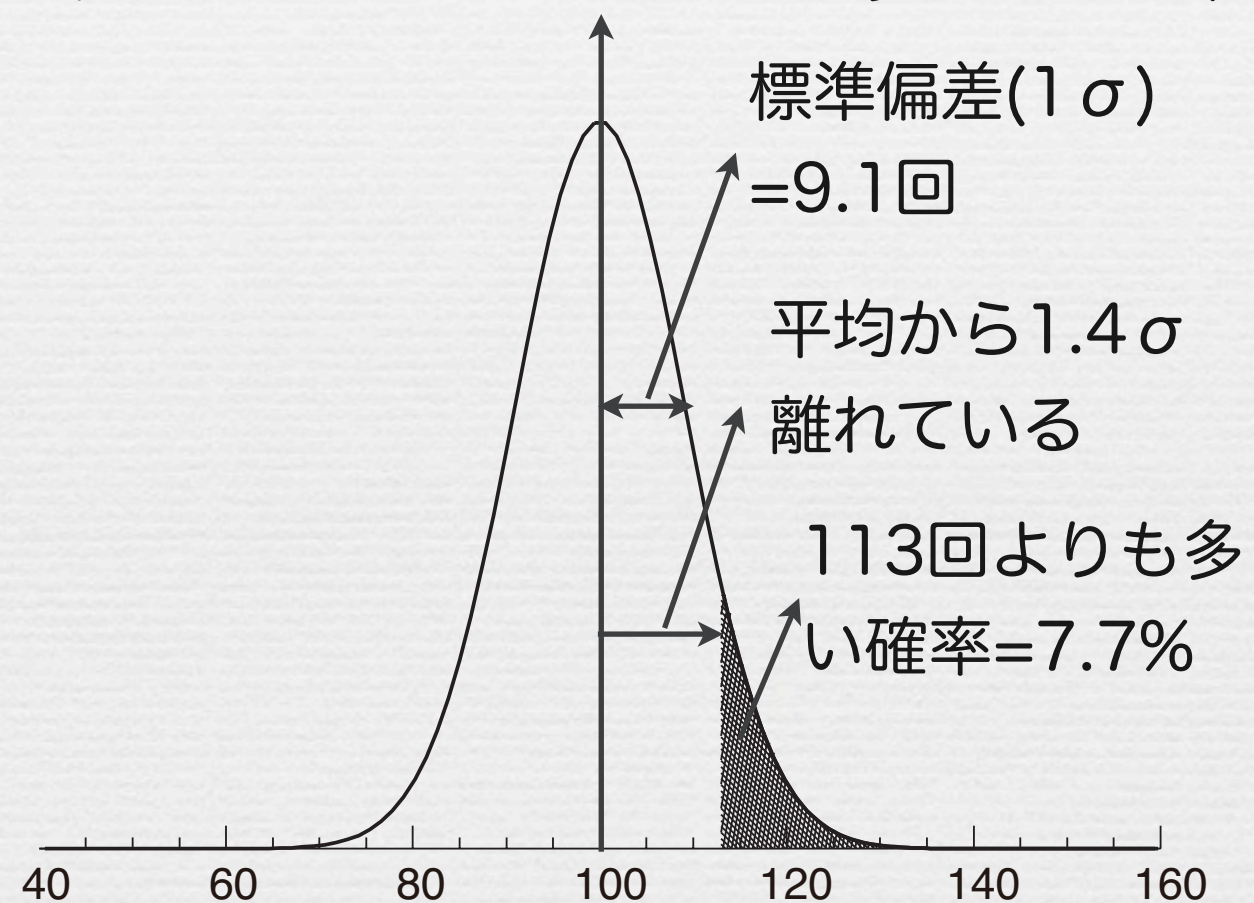
1の目の出る確率が1/5のサイコロを探せ

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

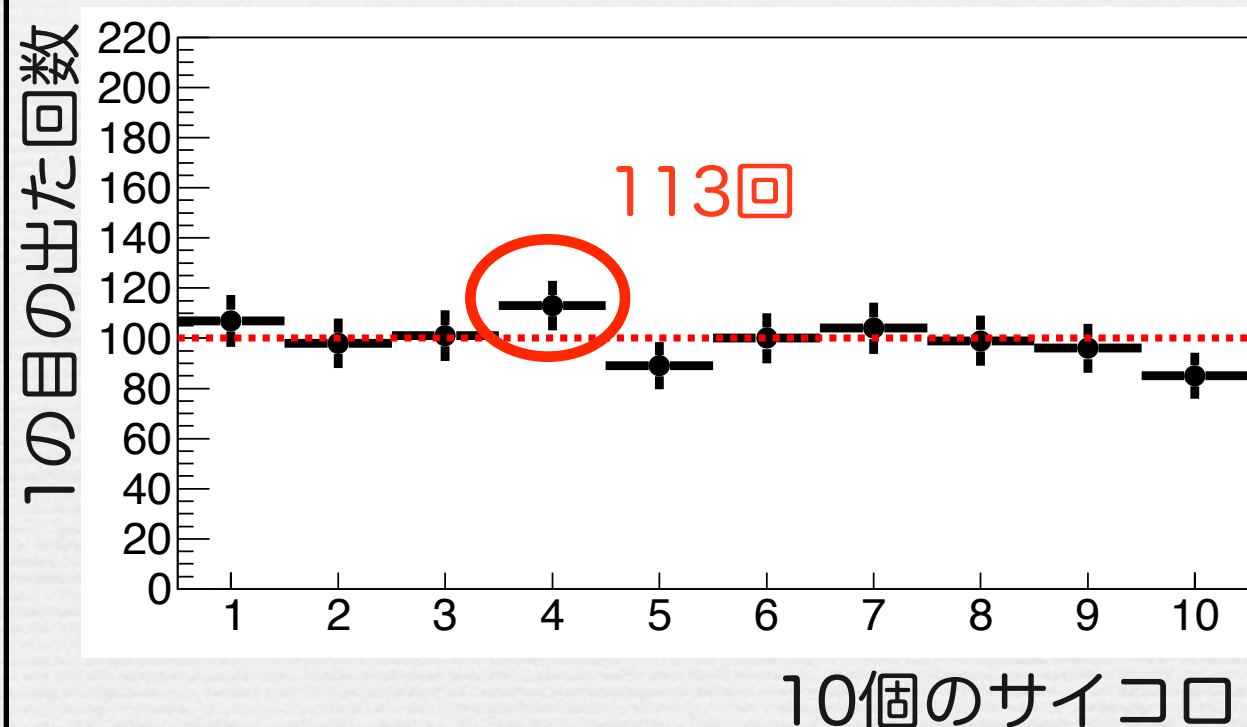




# 発見の指標

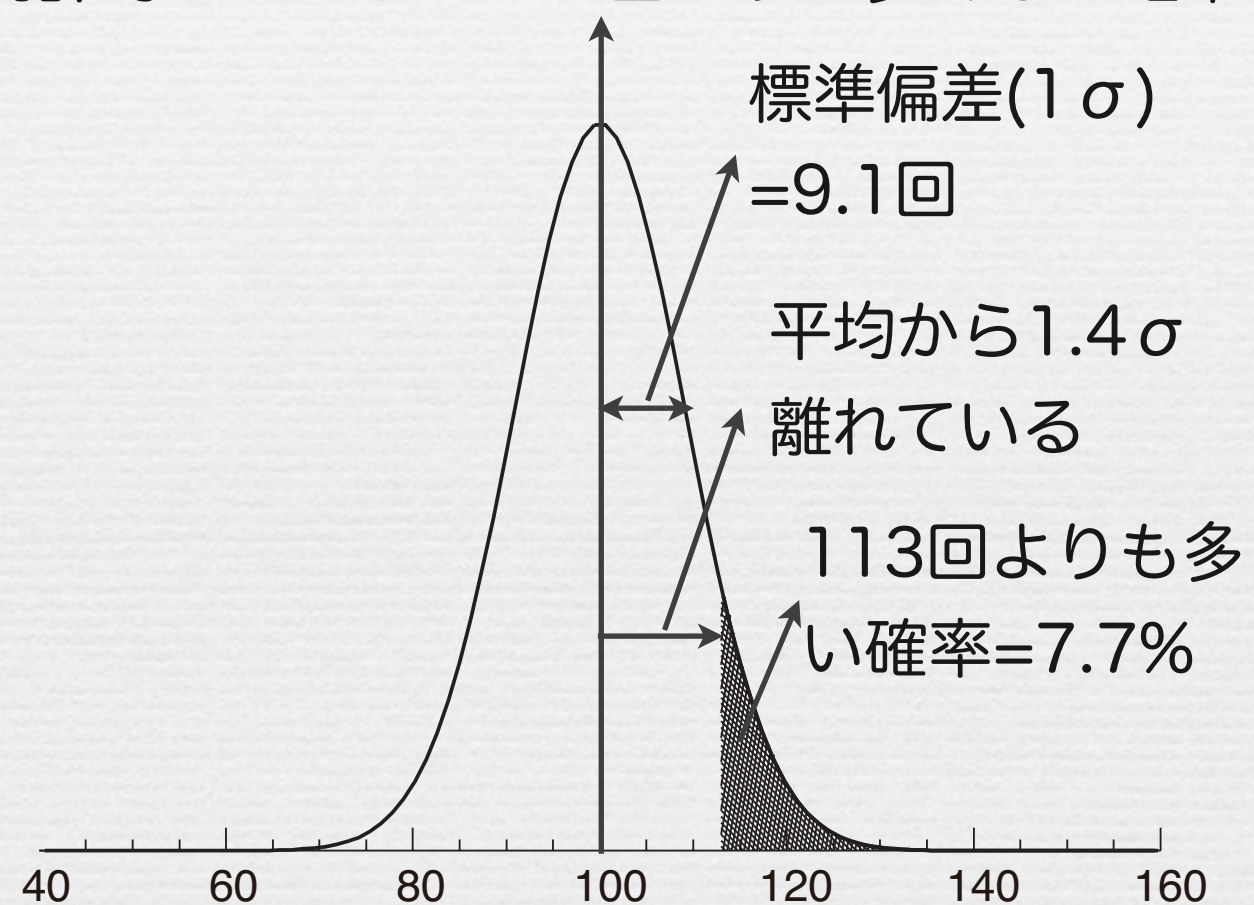
1の目の出る確率が1/5のサイコロを探せ

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  $> 5\sigma$ )

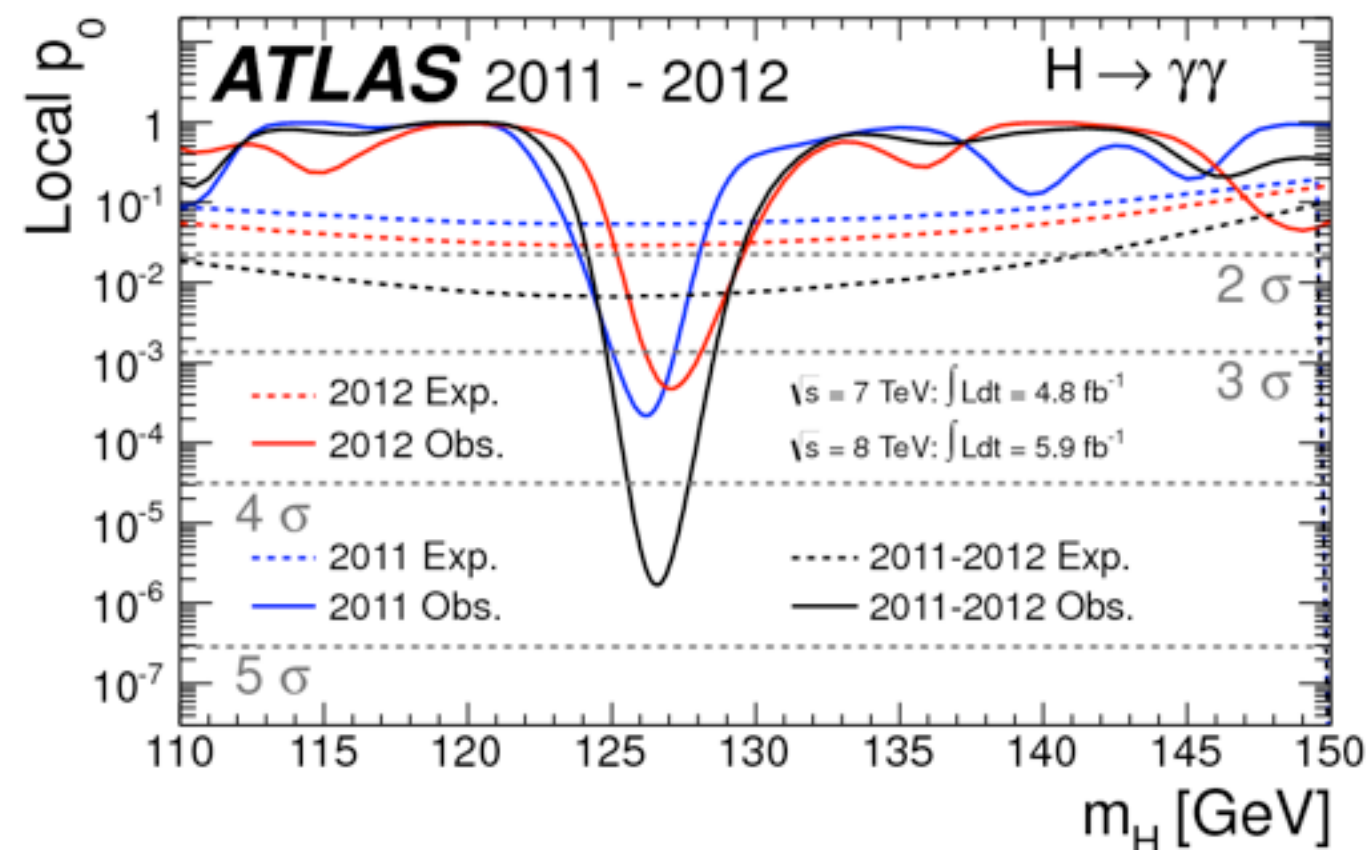
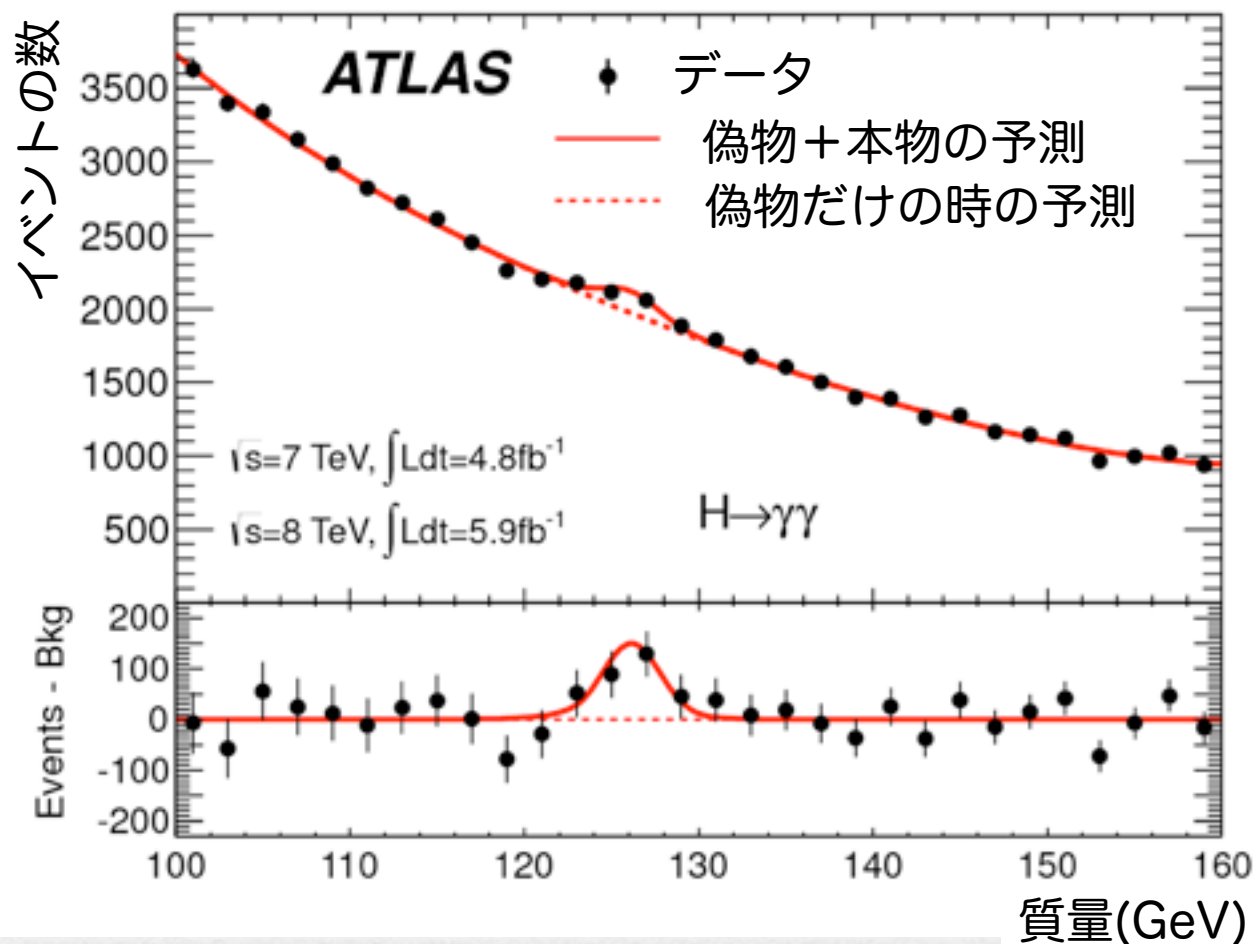
発見

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 :  $3.4 \times 10^{-6}$  ( $4.5\sigma$ ) ... Observed

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

ヒッグス粒子のスピン = 0 or 2

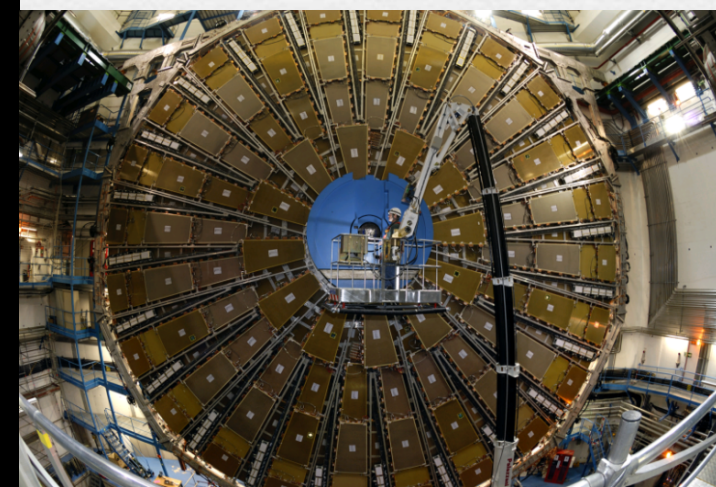
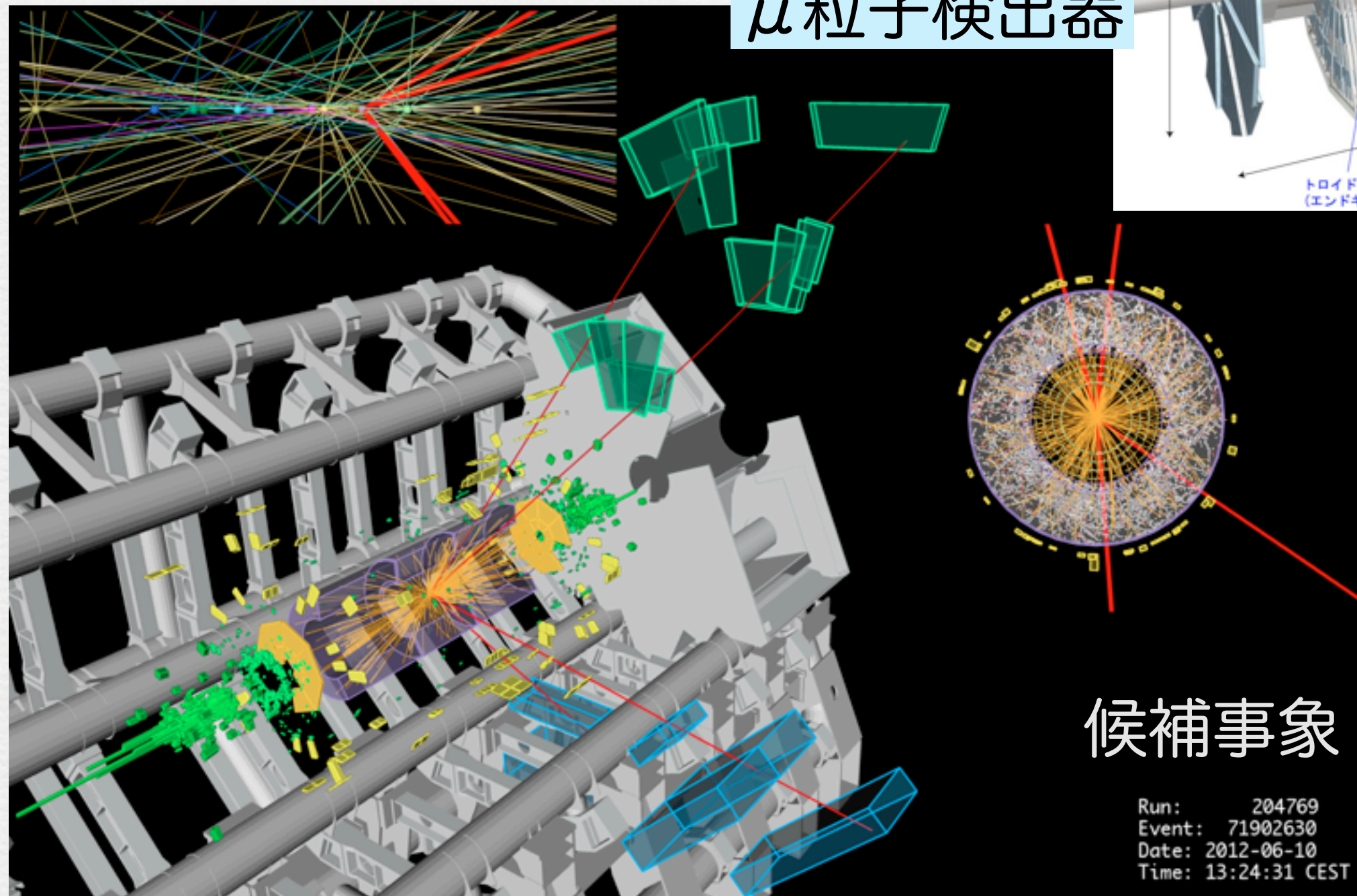
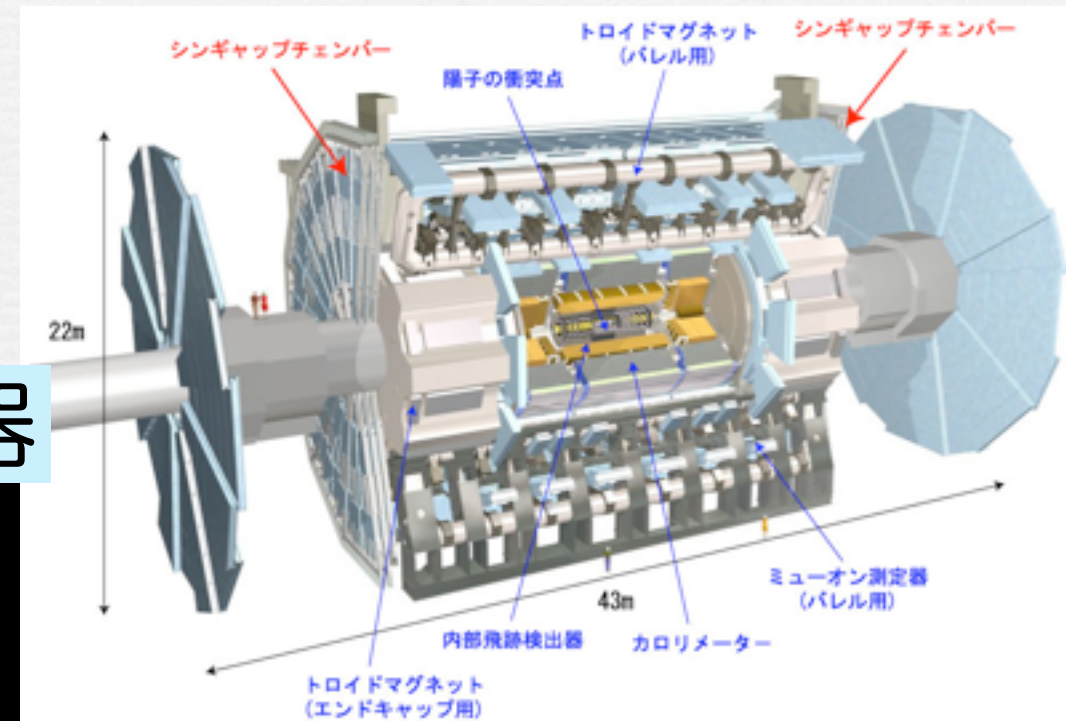


# 陽子 + 陽子 → H → ZZ → 4 レプトン

高い運動量の電子またはμ粒子  
m<sub>4l</sub>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

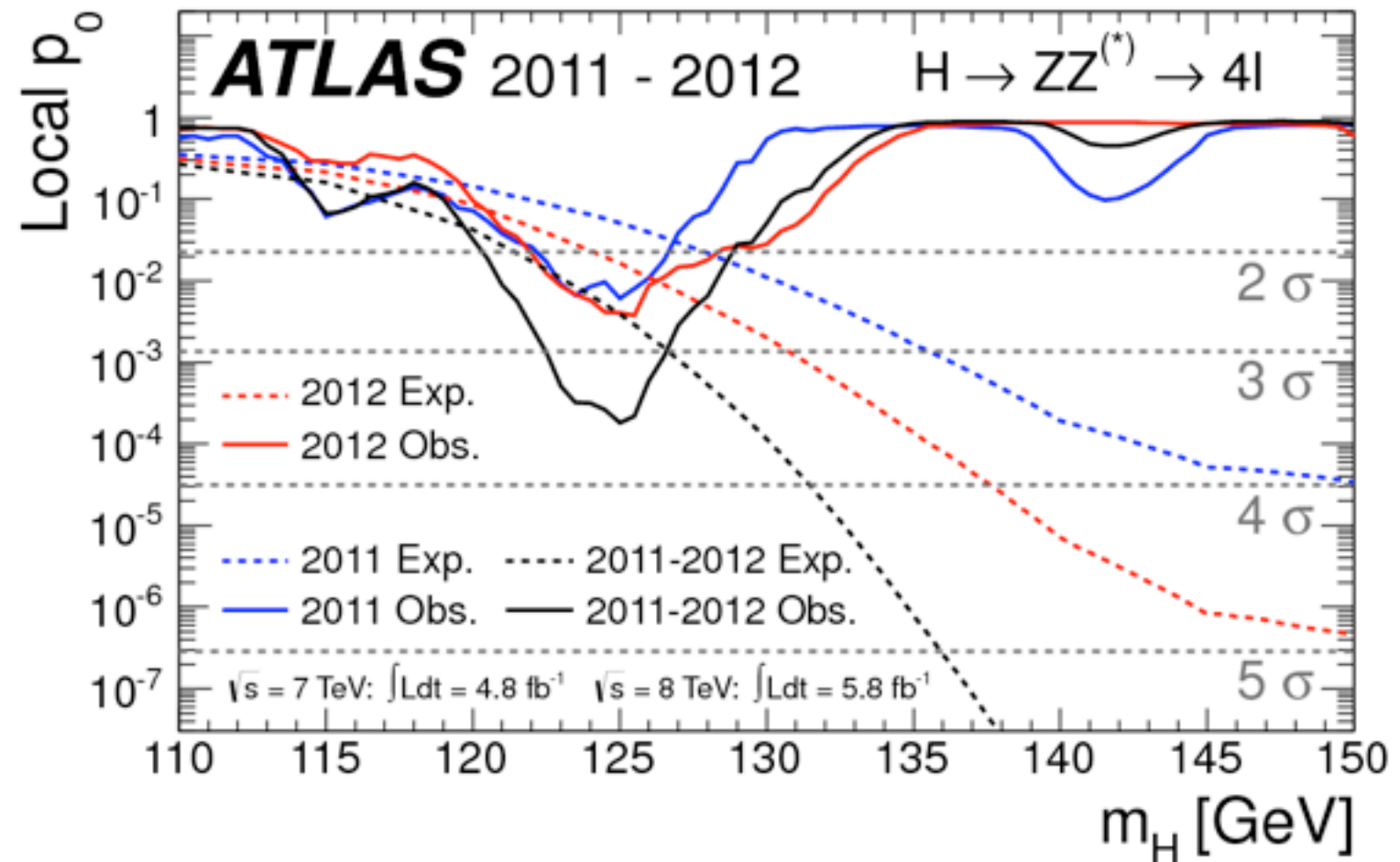
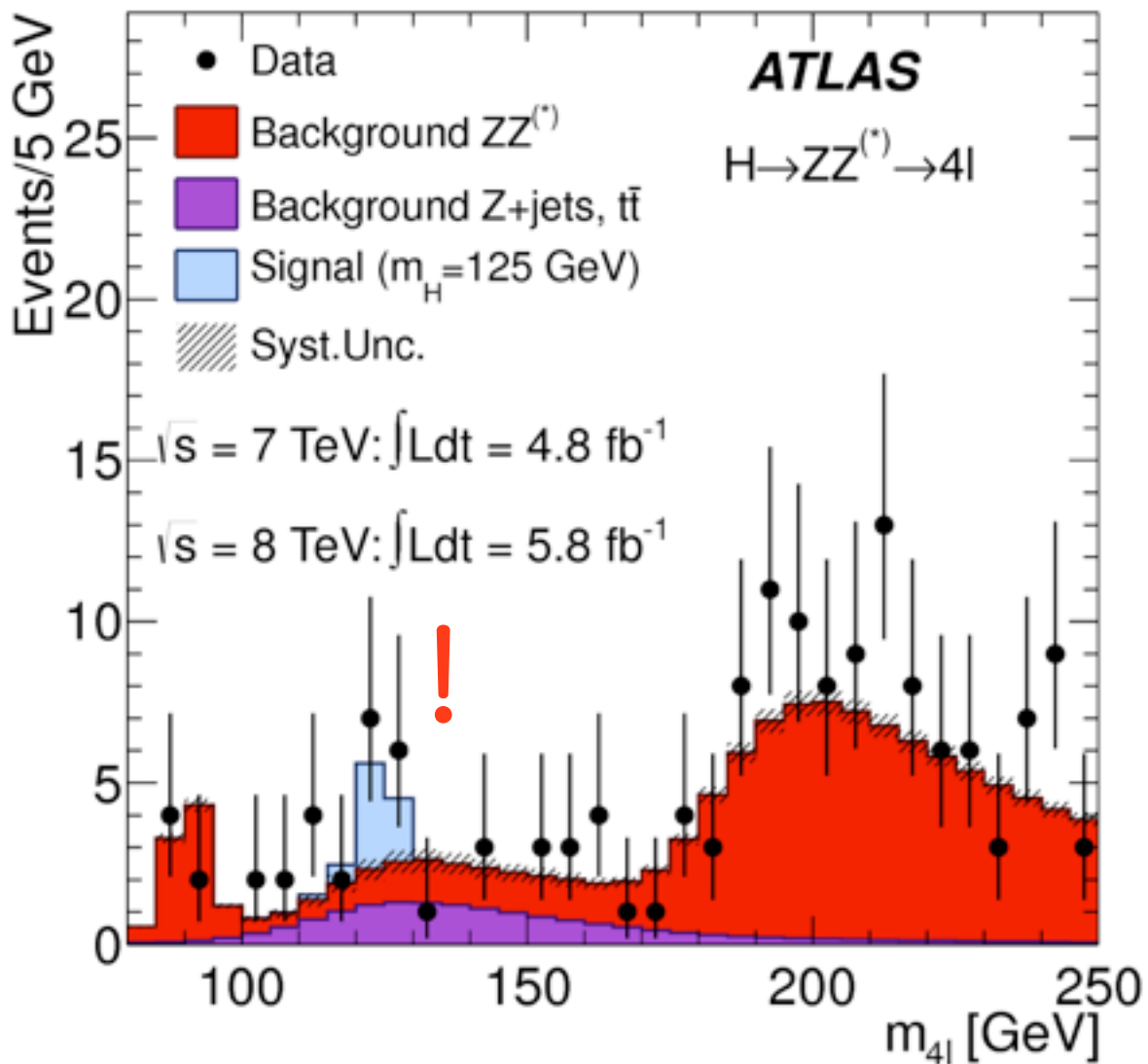
## μ粒子検出器





# 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 :  $1.6 \times 10^{-4}$  ( $3.6 \sigma$ ) ... Observed

$3.5 \times 10^{-3}$  ( $2.7 \sigma$ ) ... Expected @  $m_H = 125$  GeV

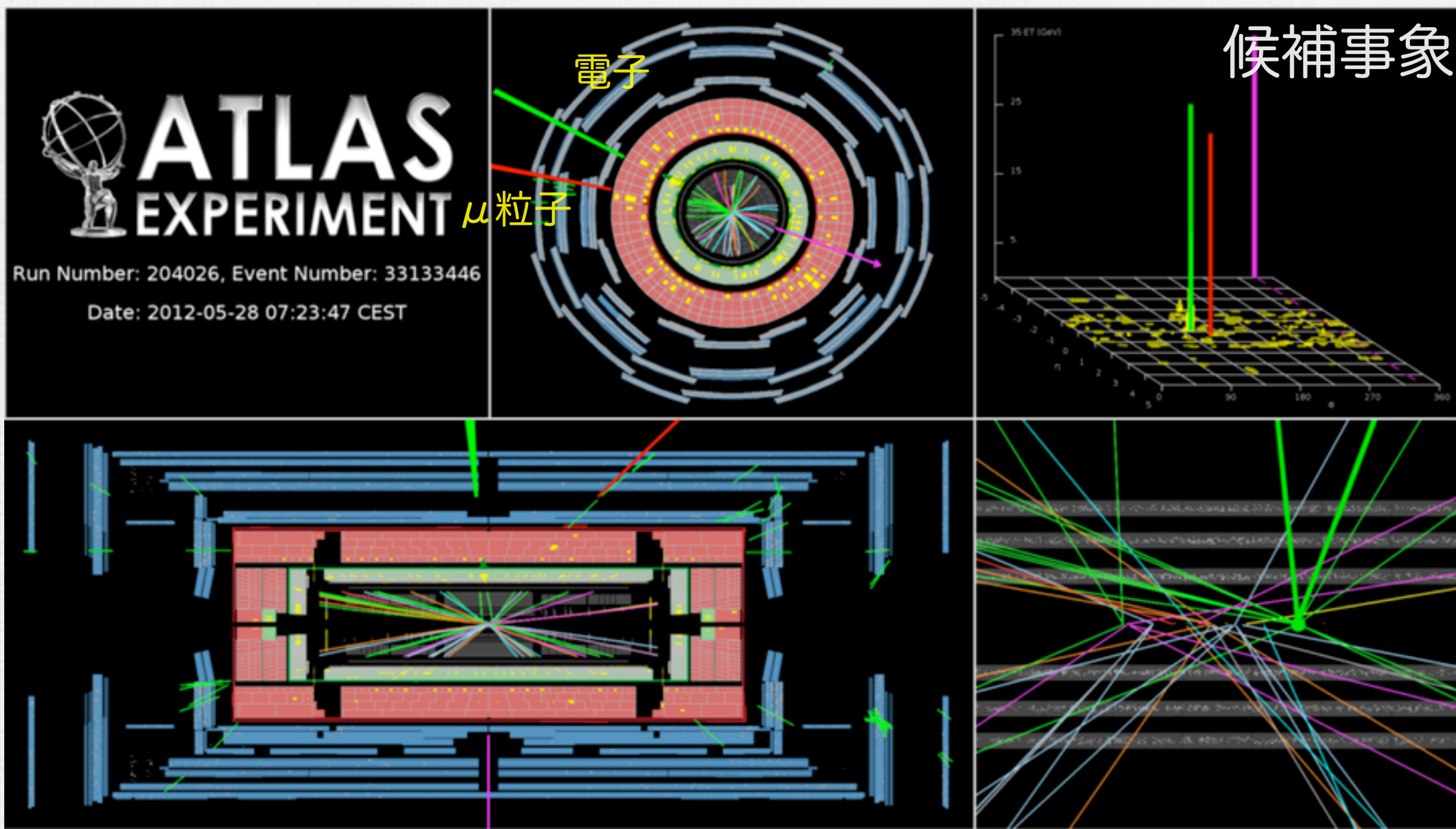


陽子 + 陽子  $\rightarrow$  H  $\rightarrow$  WW  $\rightarrow$   $l \nu l \nu$

2本の電子または $\mu$ 粒子、大きな欠損エネルギー ( $\nu$ )

$\nu$ のため不変質量の再構成が不可能

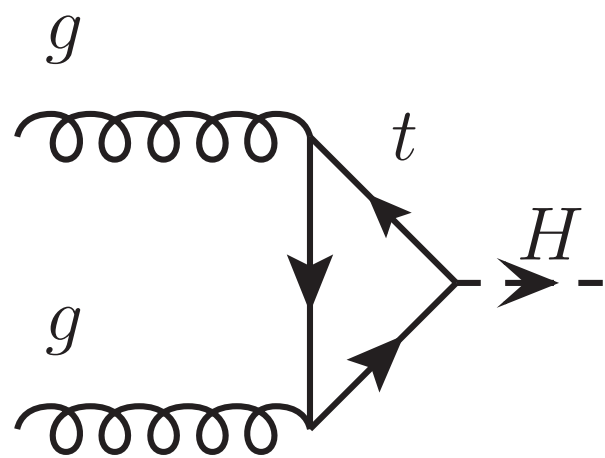
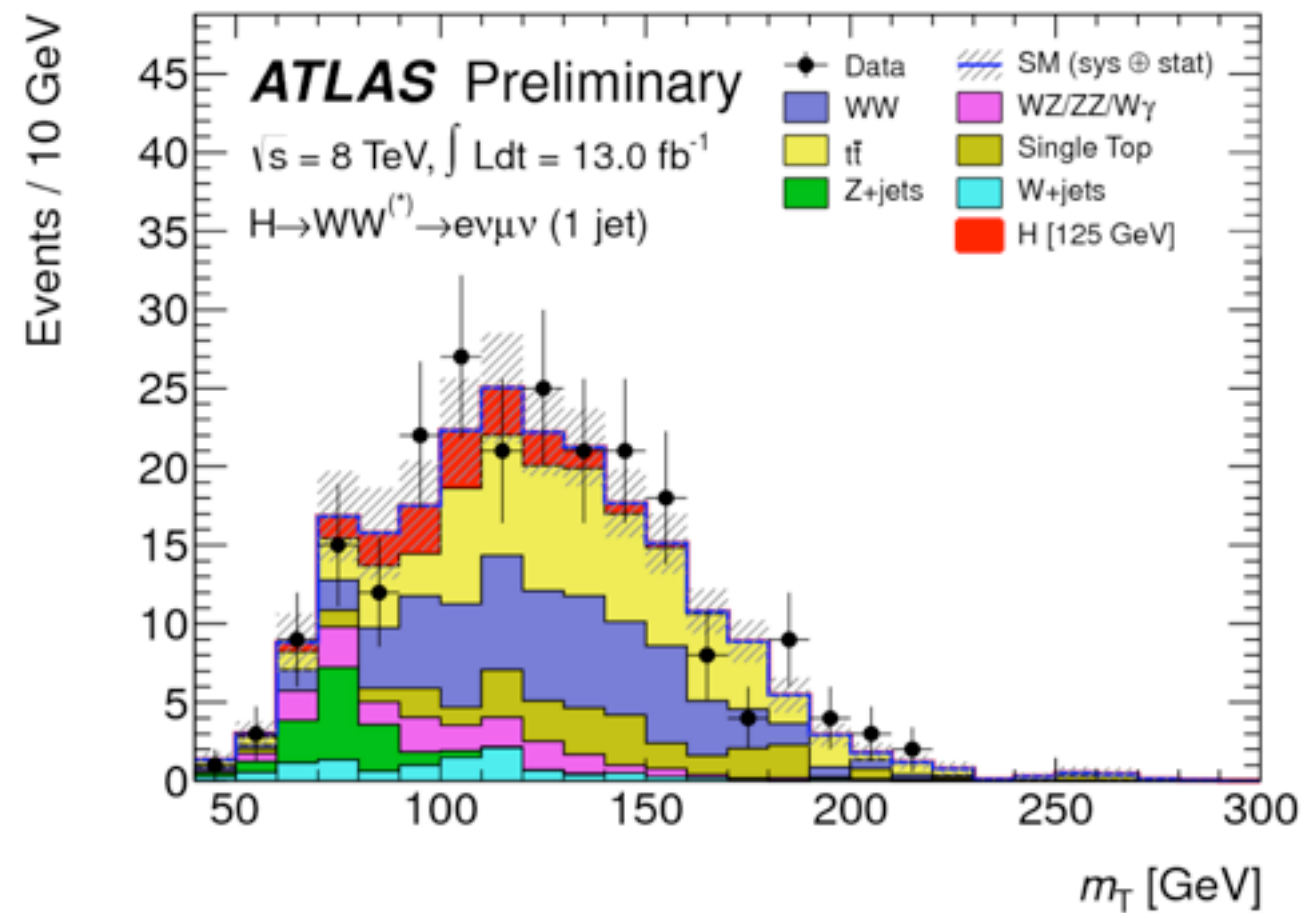
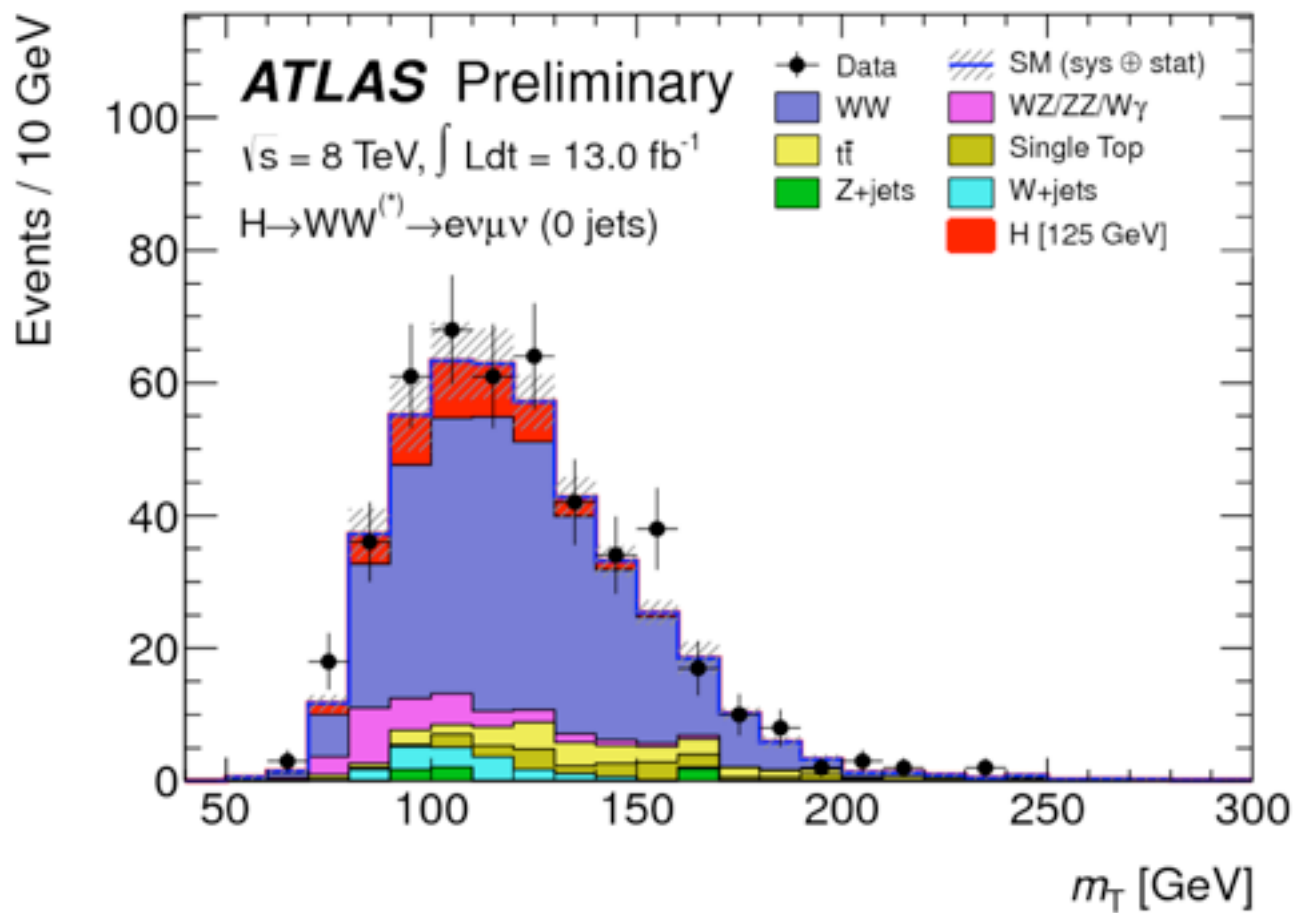
$$m_T = \sqrt{(E_T^{ll} + E_T^{miss})^2 - |\mathbf{p}_T^{ll} + \mathbf{E}_T^{miss}|^2}$$



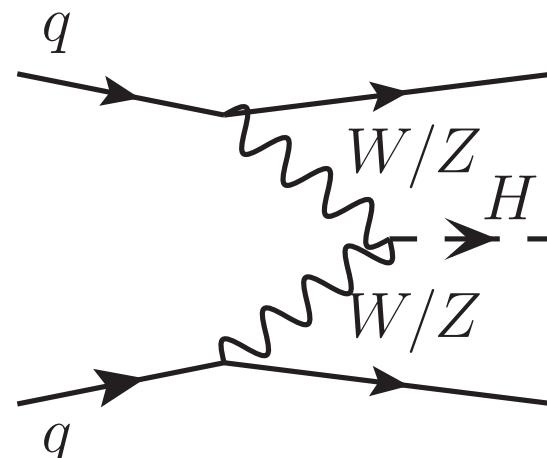


# 陽子 + 陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ WW $\rightarrow$ $l\nu l\nu$

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



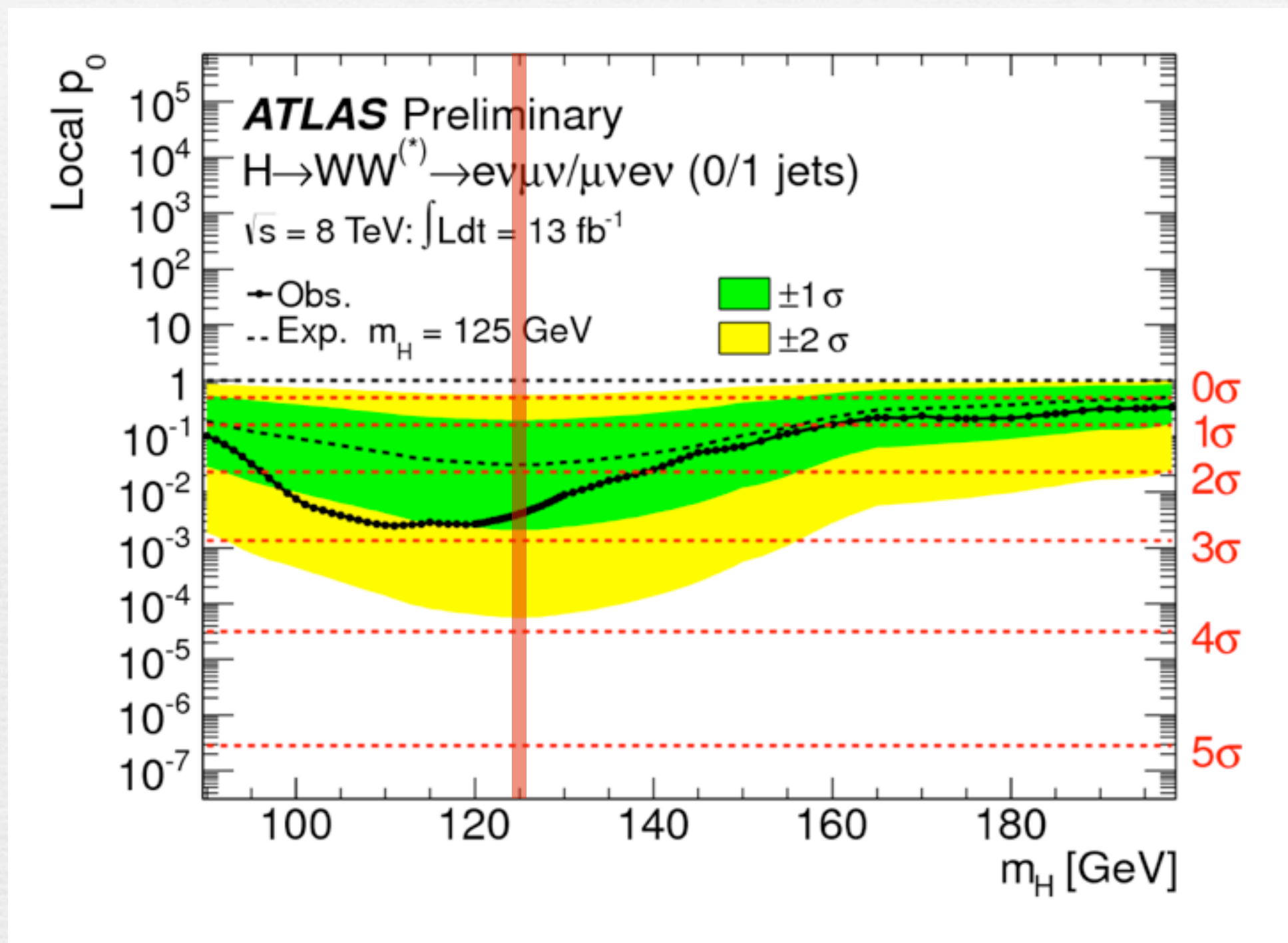
候補  
2W+0jet



候補  
2W+jet



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



p-value :  $4 \times 10^{-3}$  ( $2.6 \sigma$ ) ... Observed

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



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

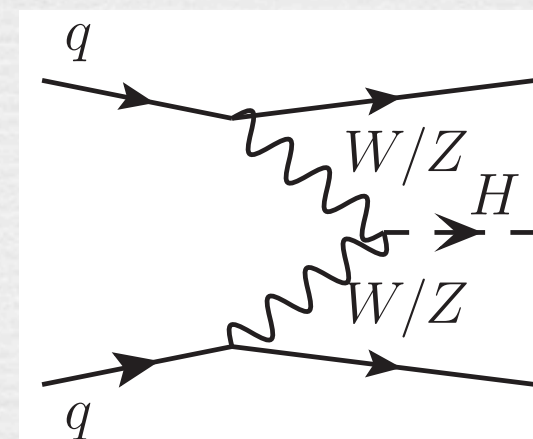
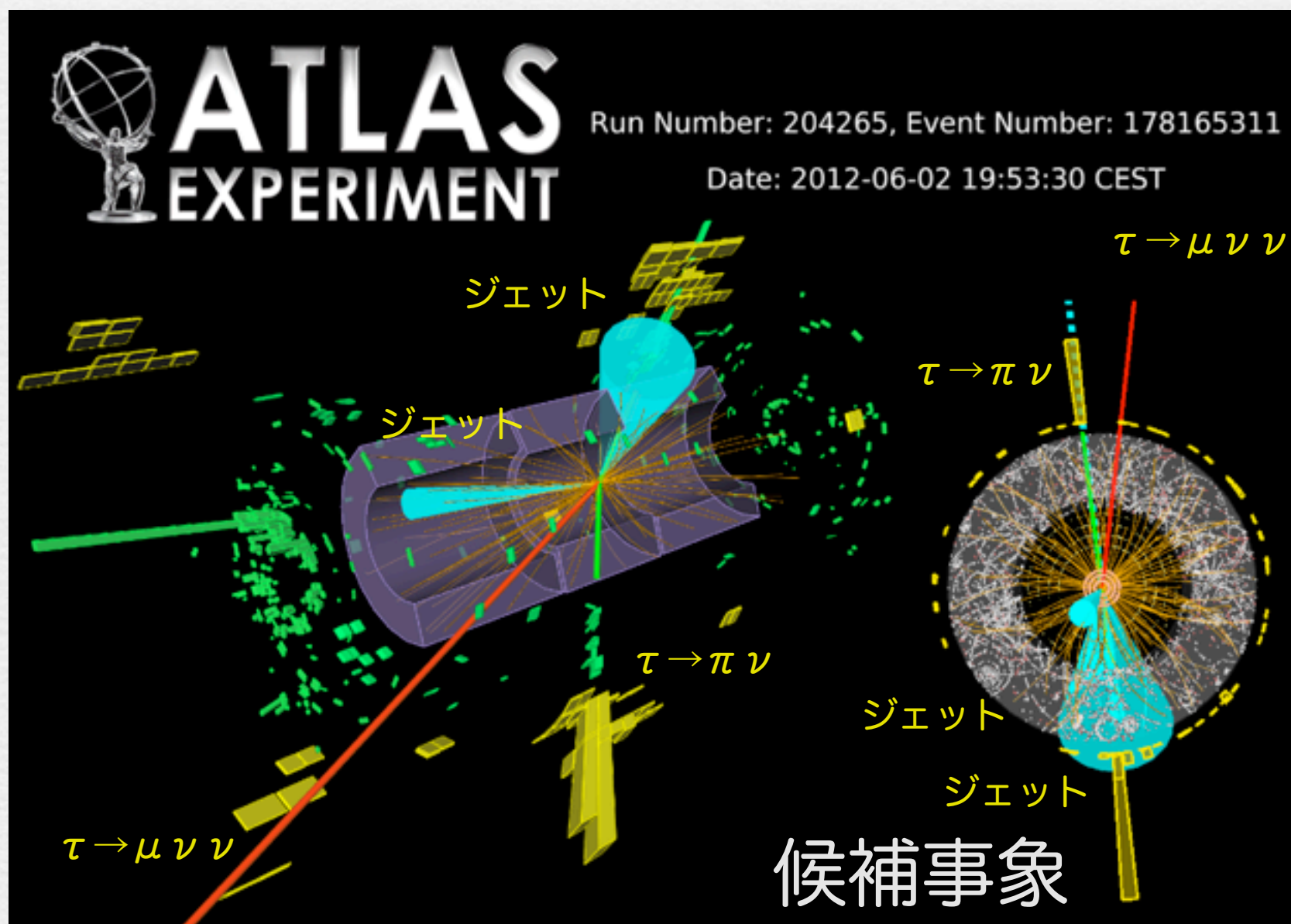
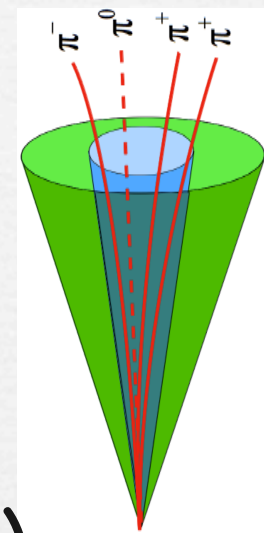
ヒッグスと $\tau$ レプトンの湯川結合の測定で重要  
 $\tau$ のレプトン崩壊、ハドロン崩壊を用いる

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

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

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

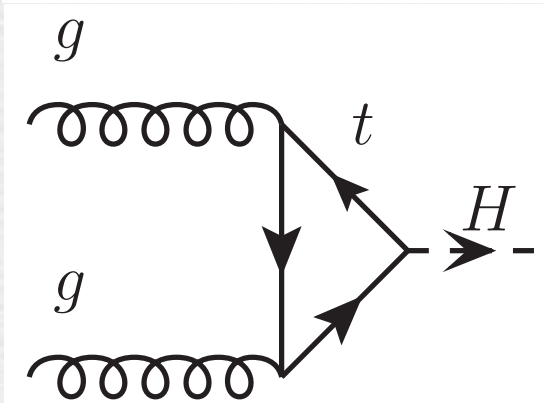
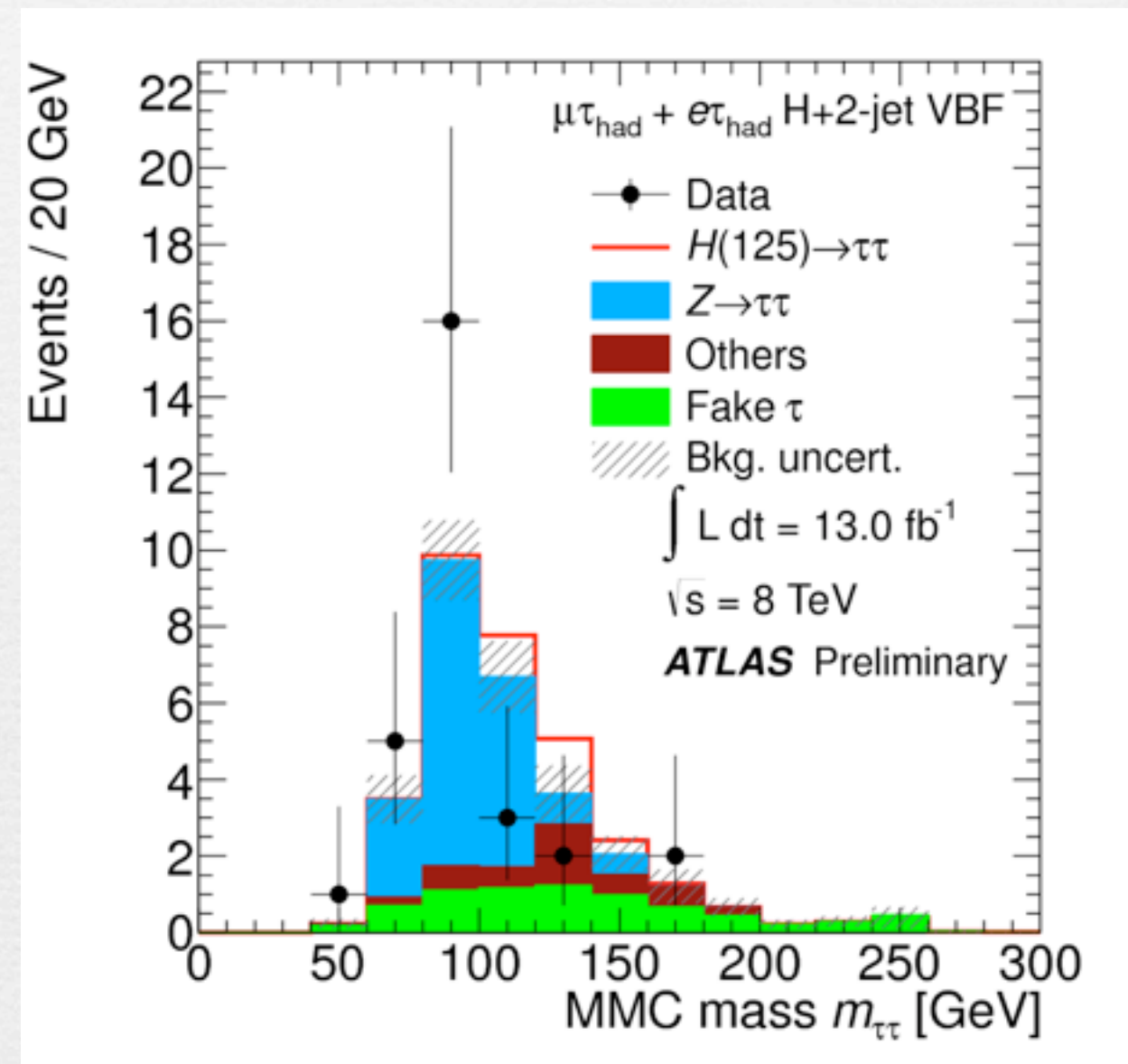
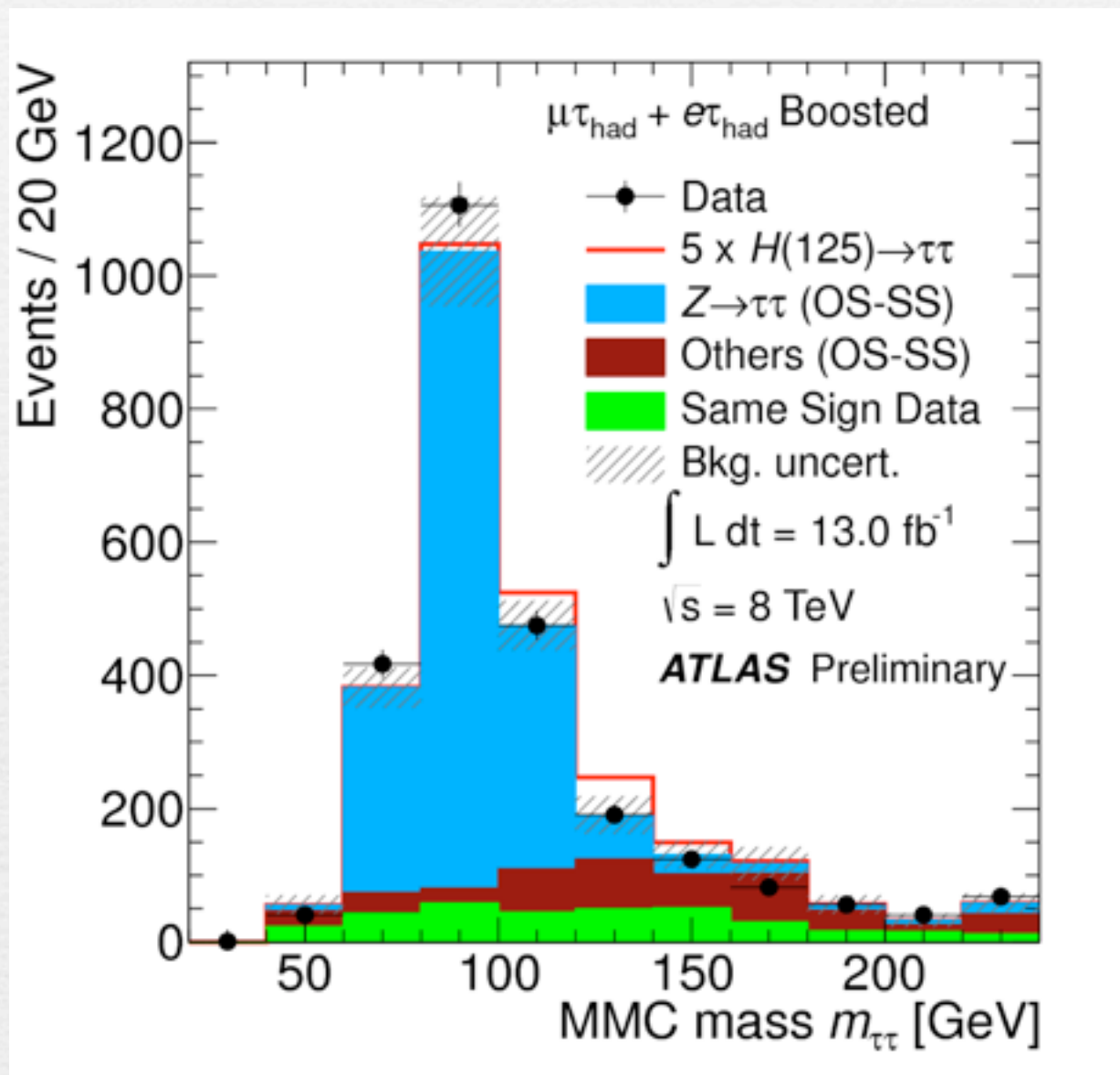
$m_{\tau\tau}$  :  $\nu$ の存在のため、質量分解能はあまり良くない



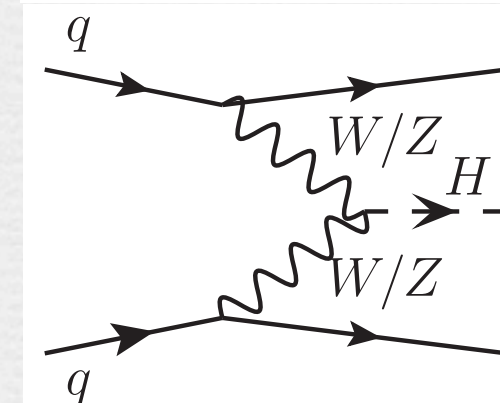
候補  
 $2\tau + 2\text{jets}$



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



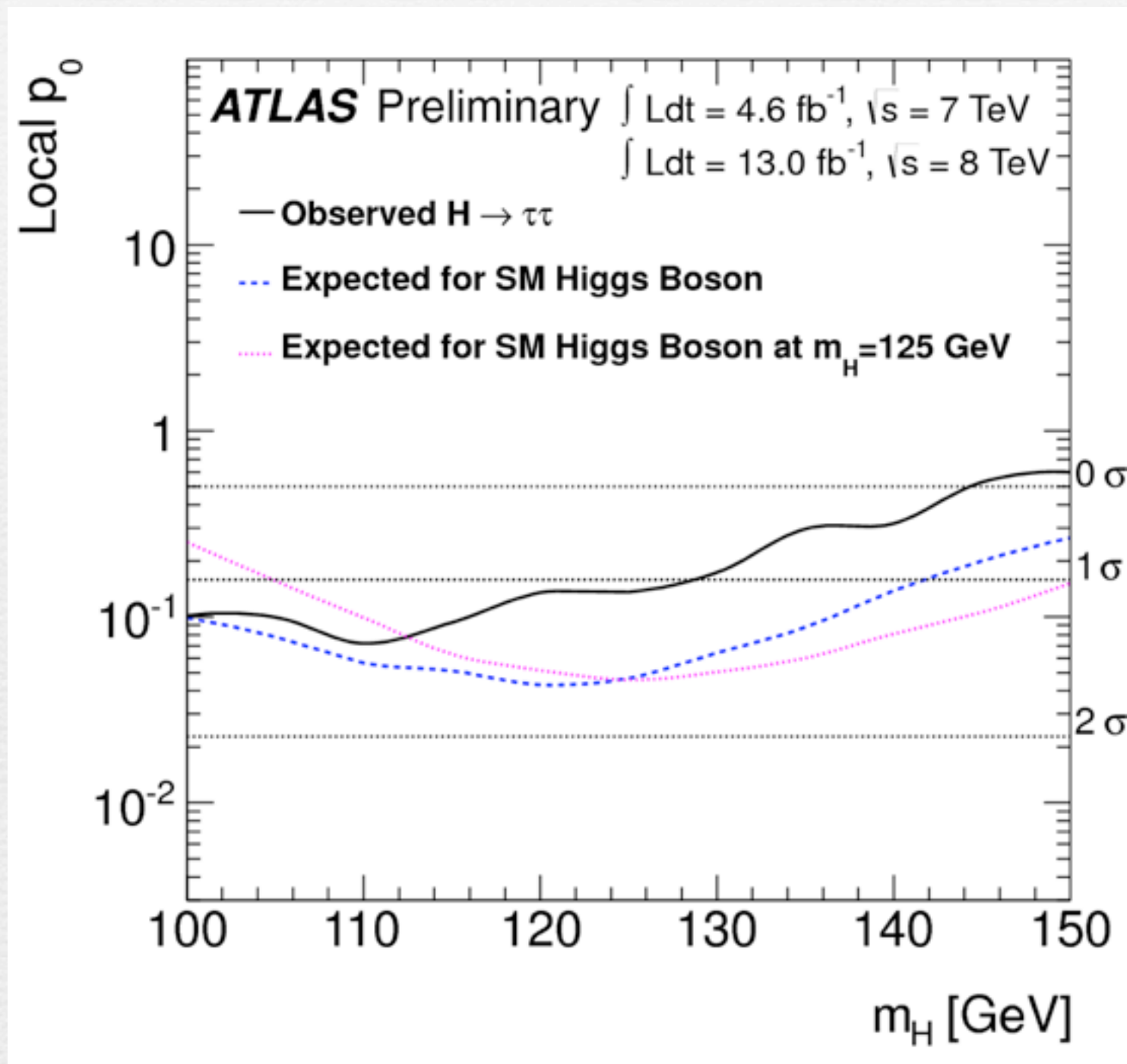
$2 \tau + 0 \text{ jet}$



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



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



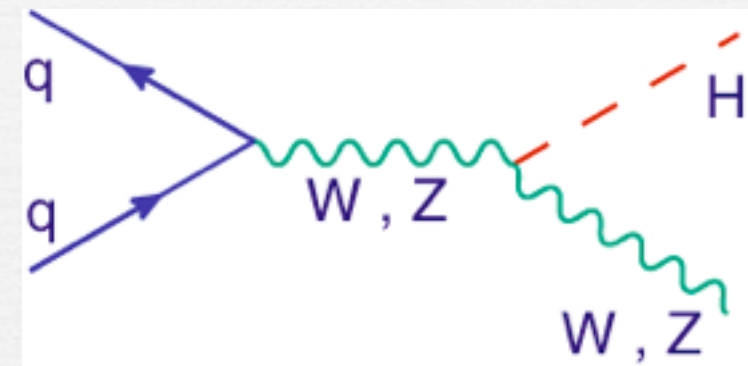
p-value : 0.13 (1.1  $\sigma$ ) ... Observed

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



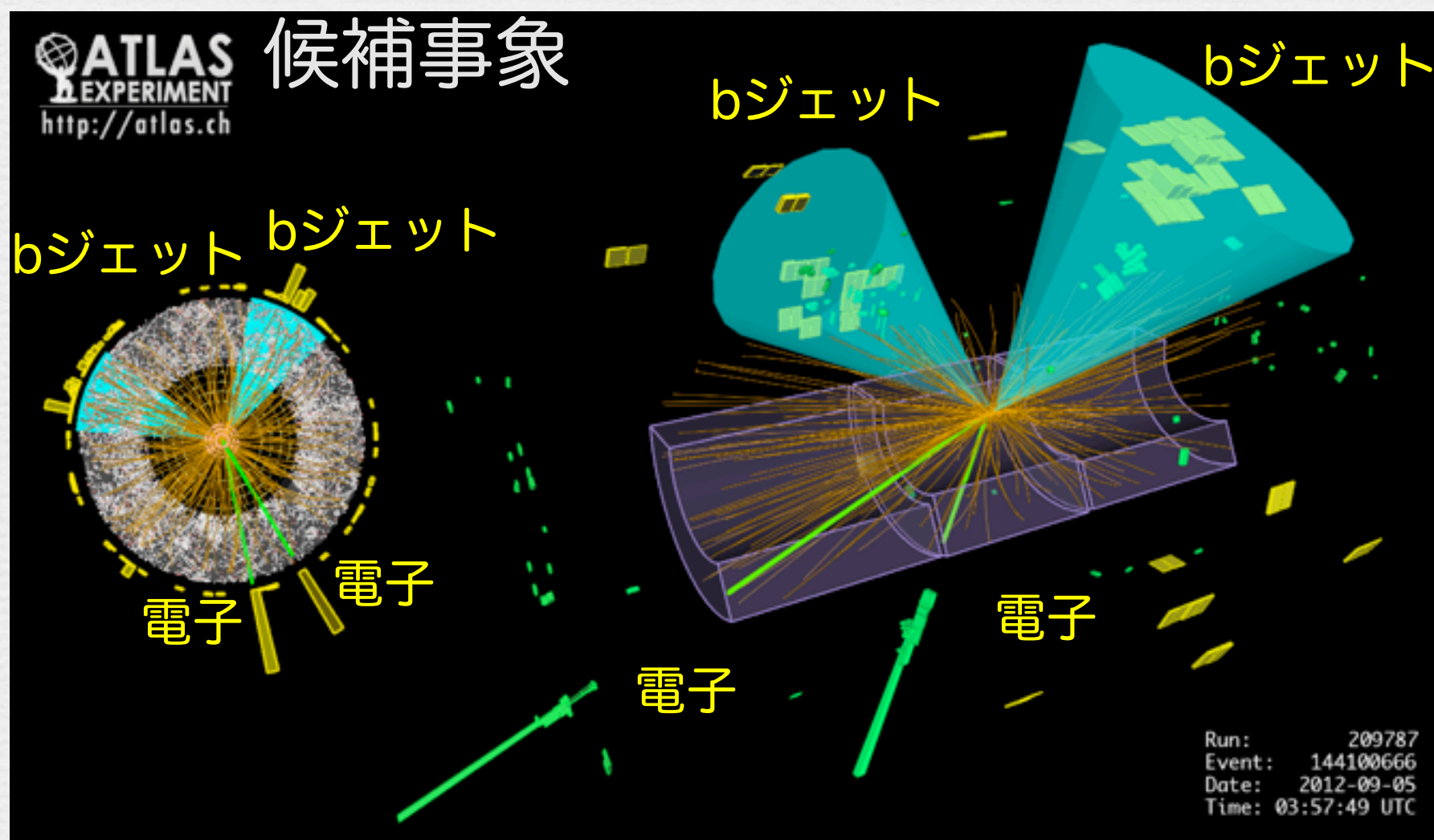
# 陽子 + 陽子 $\rightarrow$ W/Z + H

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、 $Z \rightarrow \ell \ell$

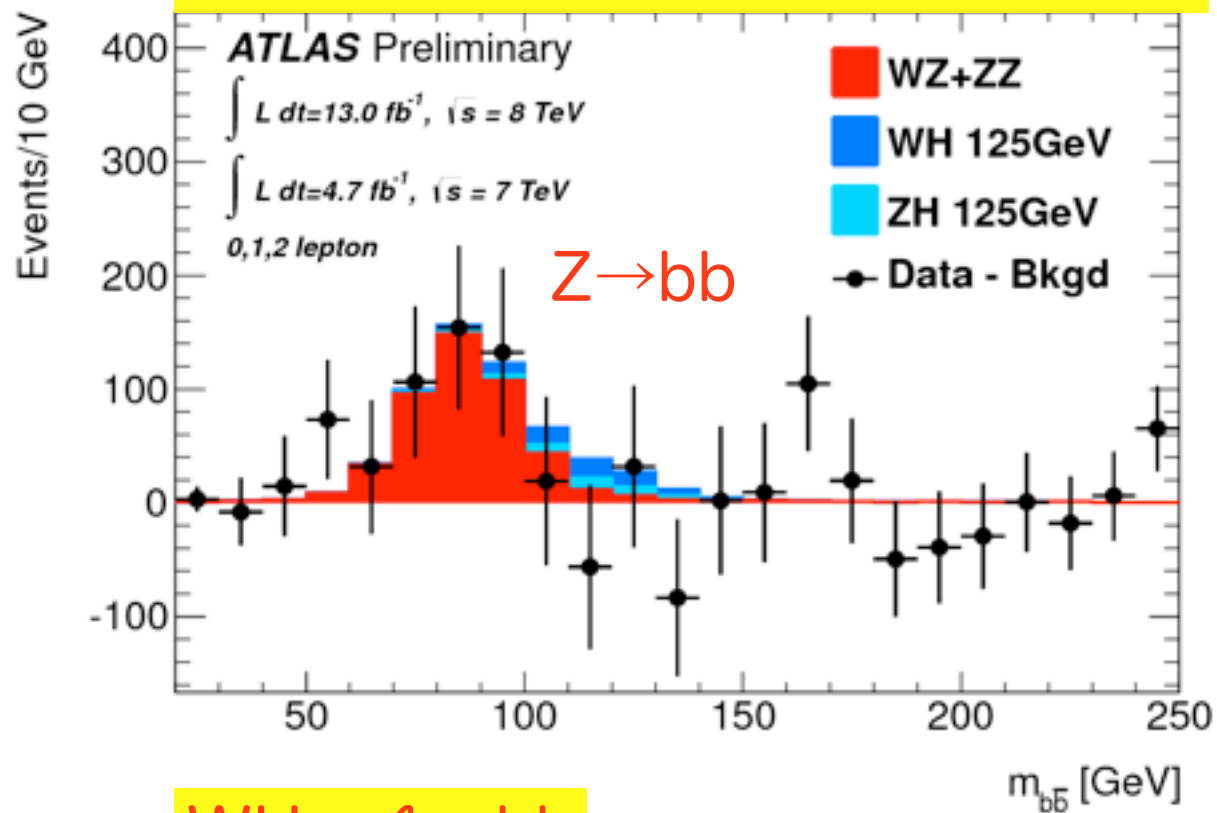
2つのb-jetの不変質量 $m_{bb}$ でヒッグス粒子のピーク探索  
→質量分解能はあまり良くない



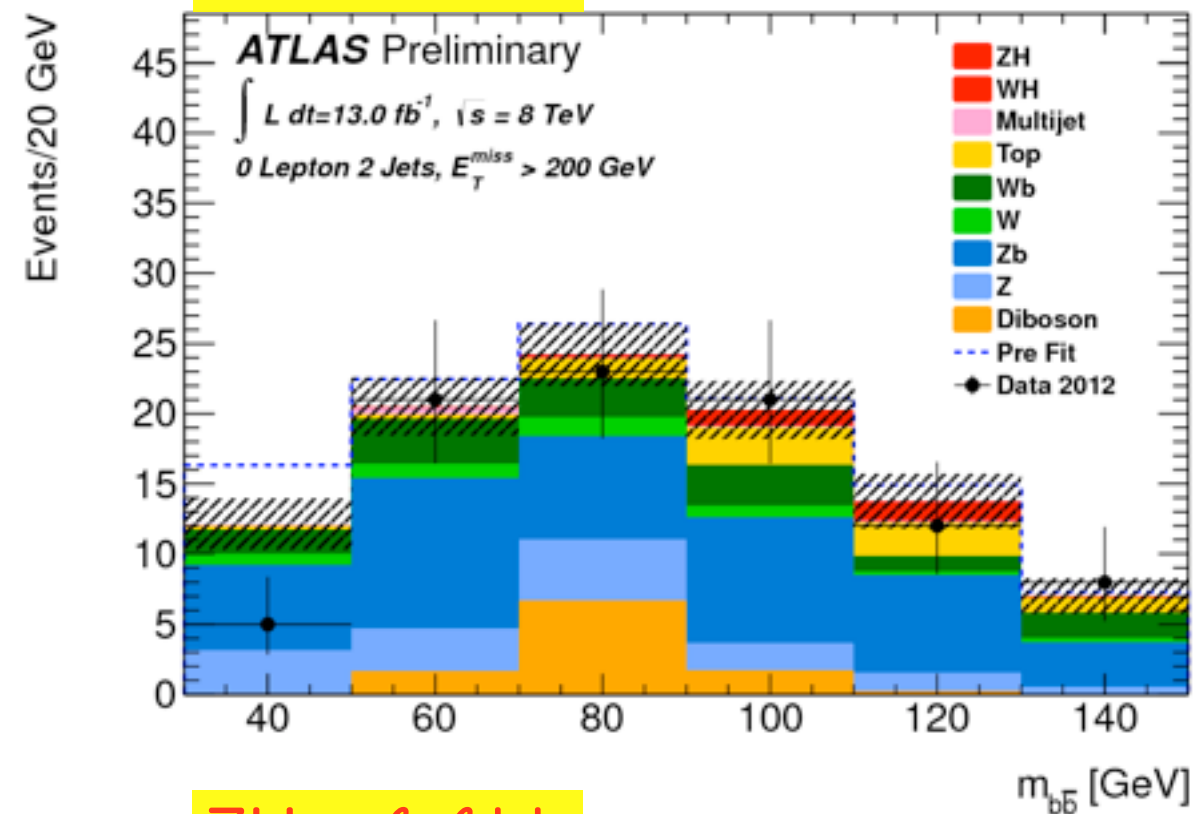


# 陽子 + 陽子 $\rightarrow$ VH $\rightarrow$ Vbb

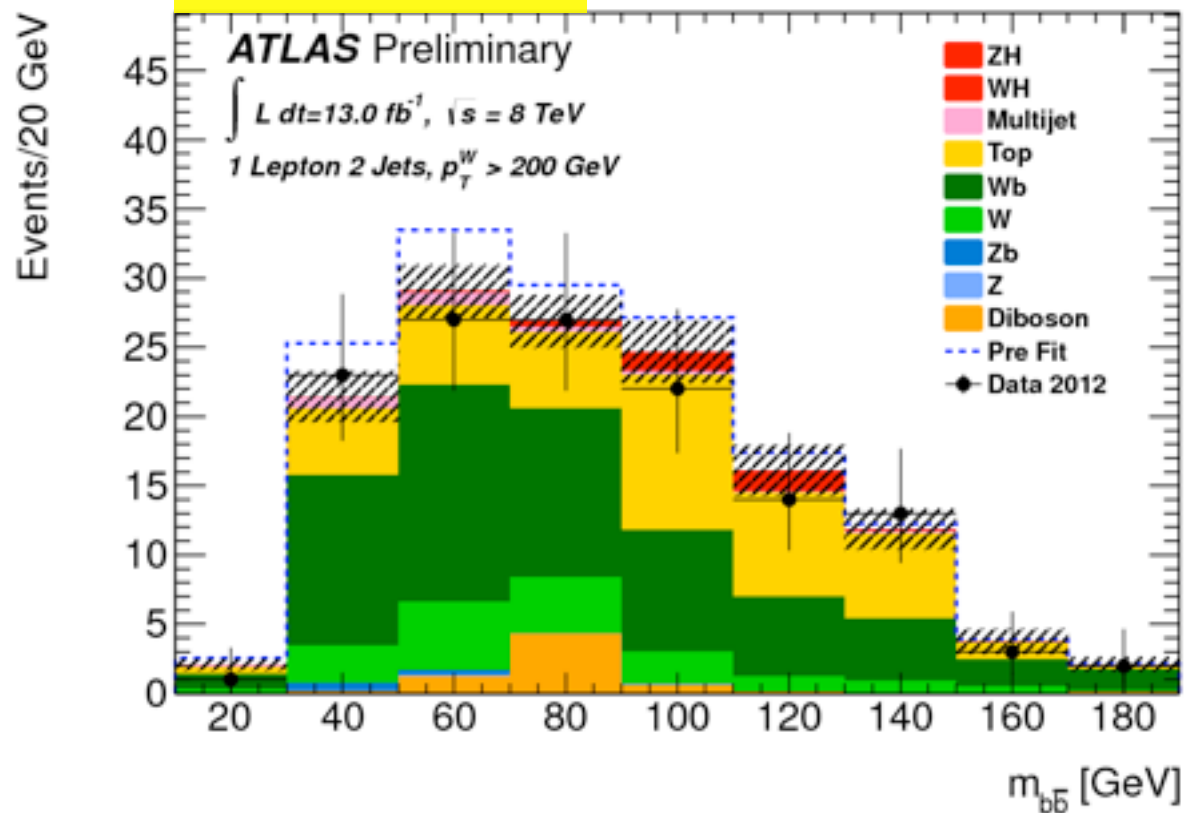
$WZ+ZZ \rightarrow \ell \nu bb + \nu \nu bb + \ell \ell bb$



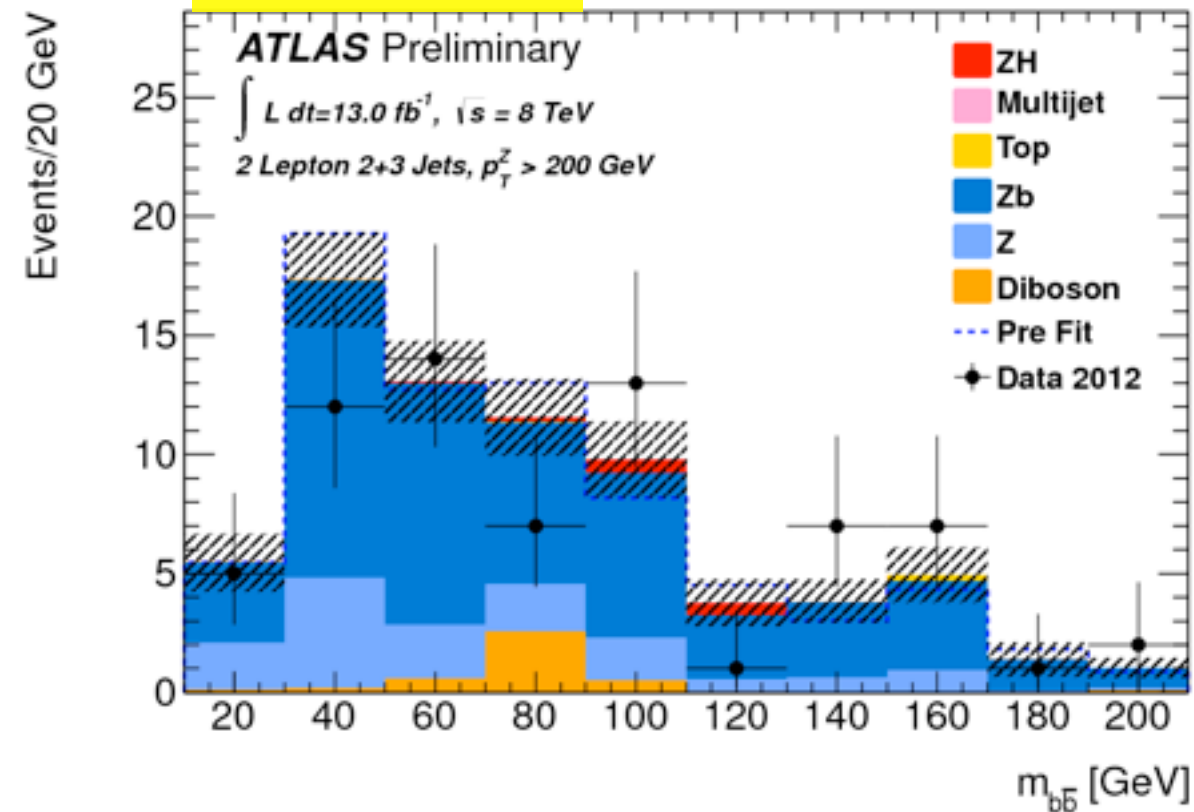
$ZH \rightarrow \nu \nu bb$



$WH \rightarrow \ell \nu bb$

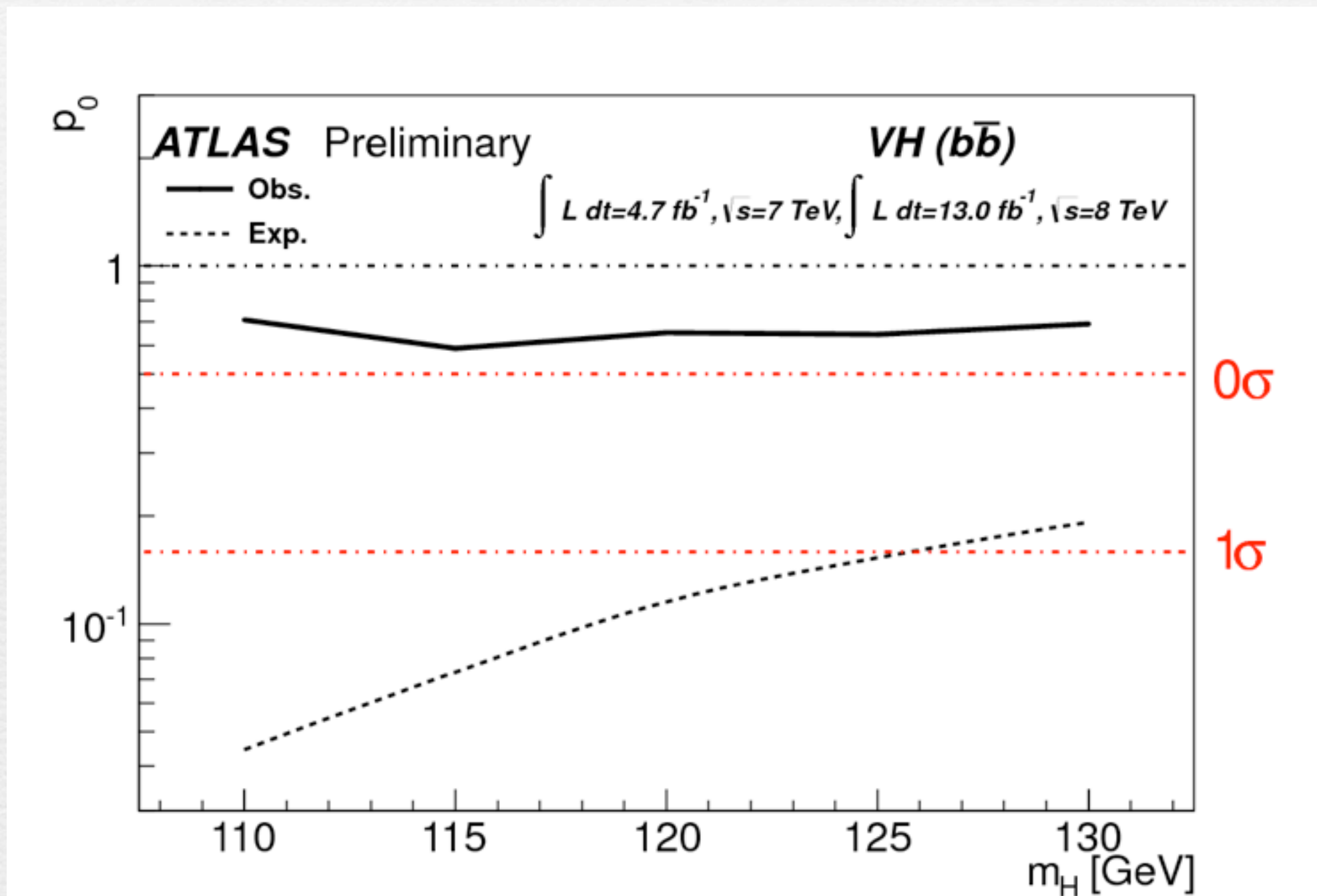


$ZH \rightarrow \ell \ell bb$





陽子 + 陽子  $\rightarrow$  VH  $\rightarrow$  Vbb



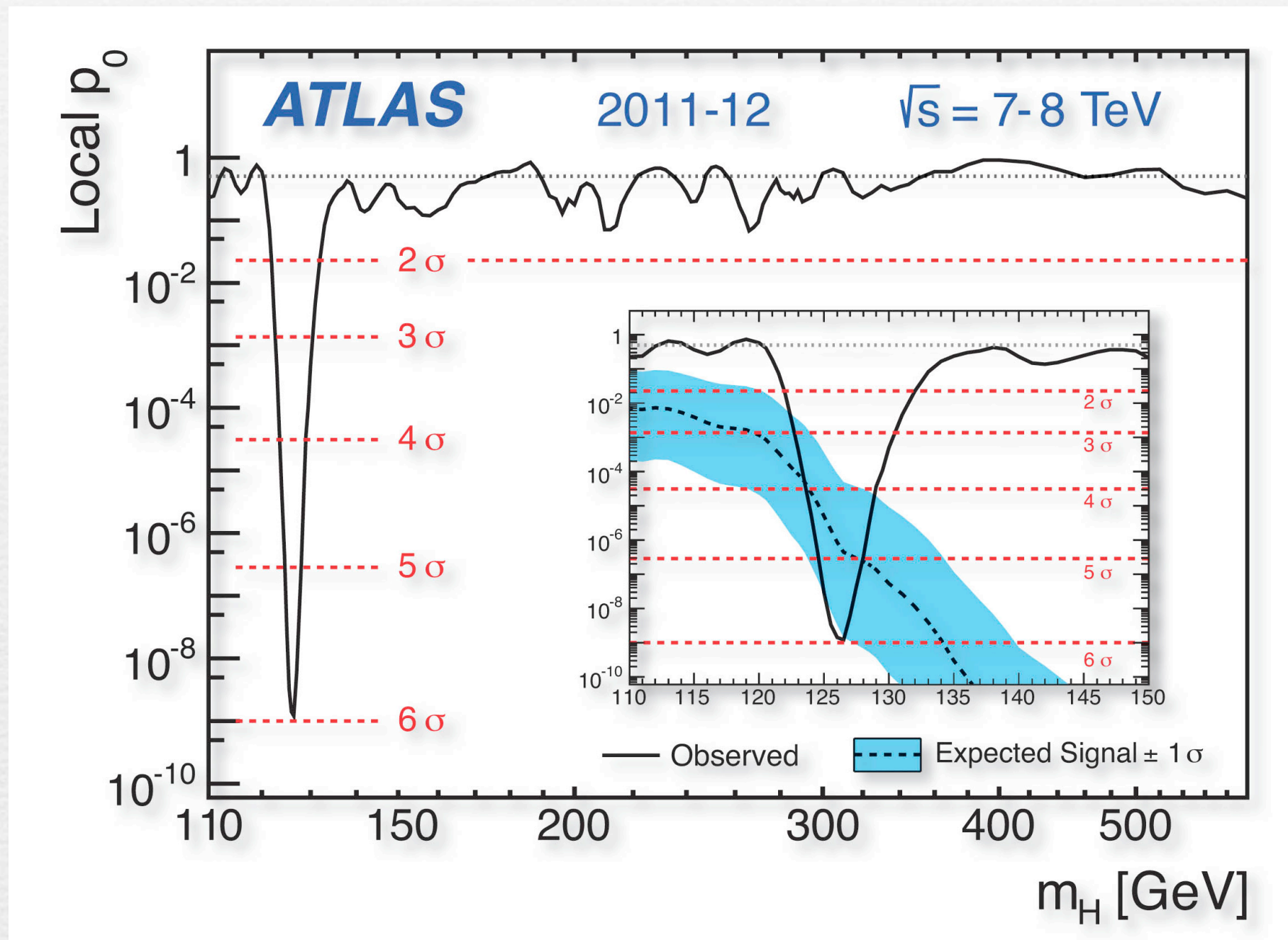
p-value : 0.64 ... Observed

0.15 ... Expected

@ $m_H = 125 \text{ GeV}$



# combination



p-value :  $9.9 \times 10^{-10}$  ( $6\sigma$ ) ... Observed

**発見！！**

$4.8 \times 10^{-7}$  ( $4.9\sigma$ ) ... Expected

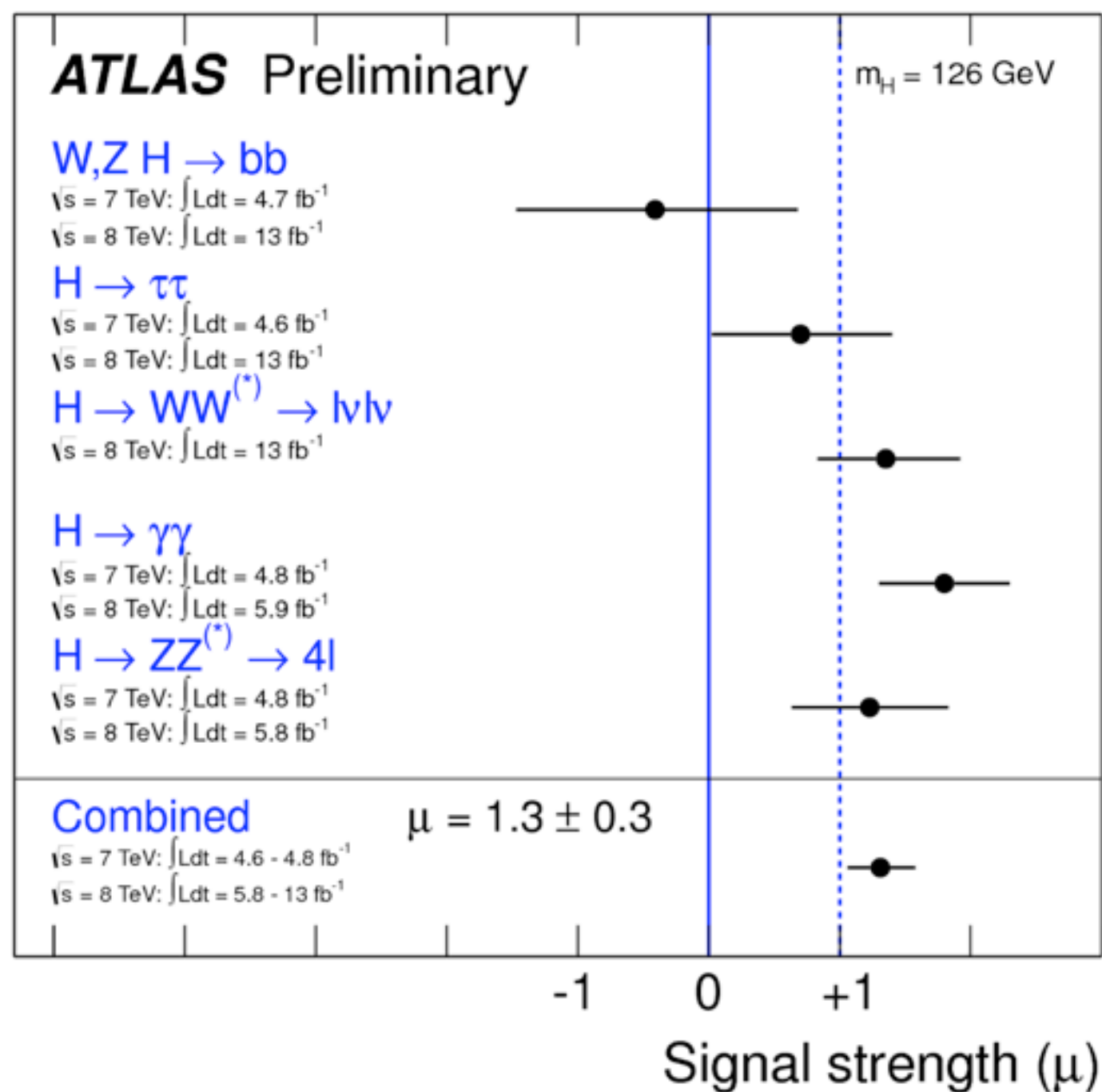
@ $m_H = 126$  GeV

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 ( $\mu$ )

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、 $\mu$ 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,  $\tau$ )



# 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： $126.0 \pm 0.4$  (統計誤差)  $\pm 0.4$  (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



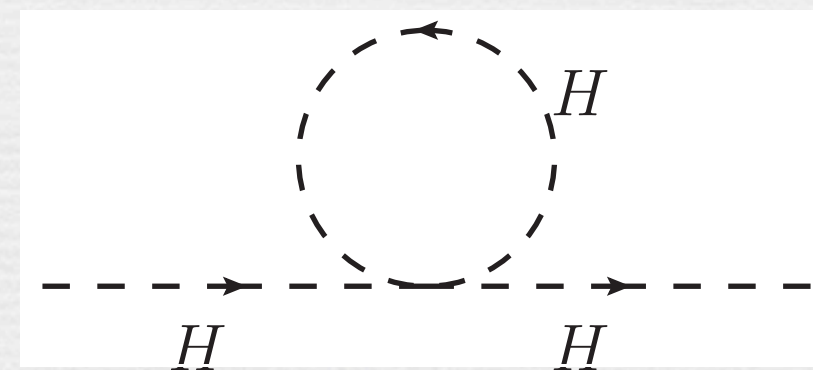
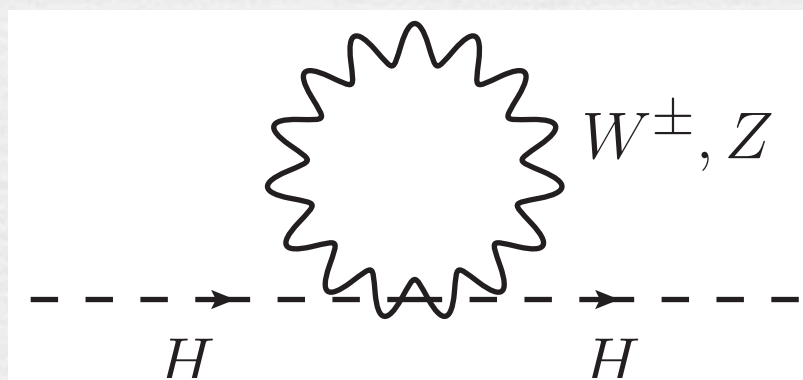
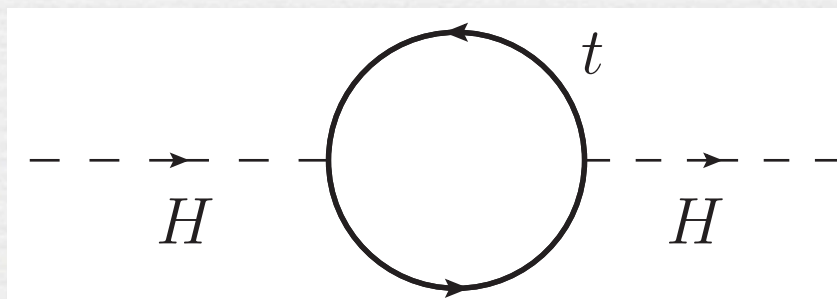
# 新粒子発見の先

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 O(1 TeV) に存在?

直接探索 & ヒッグス粒子をプローブにして





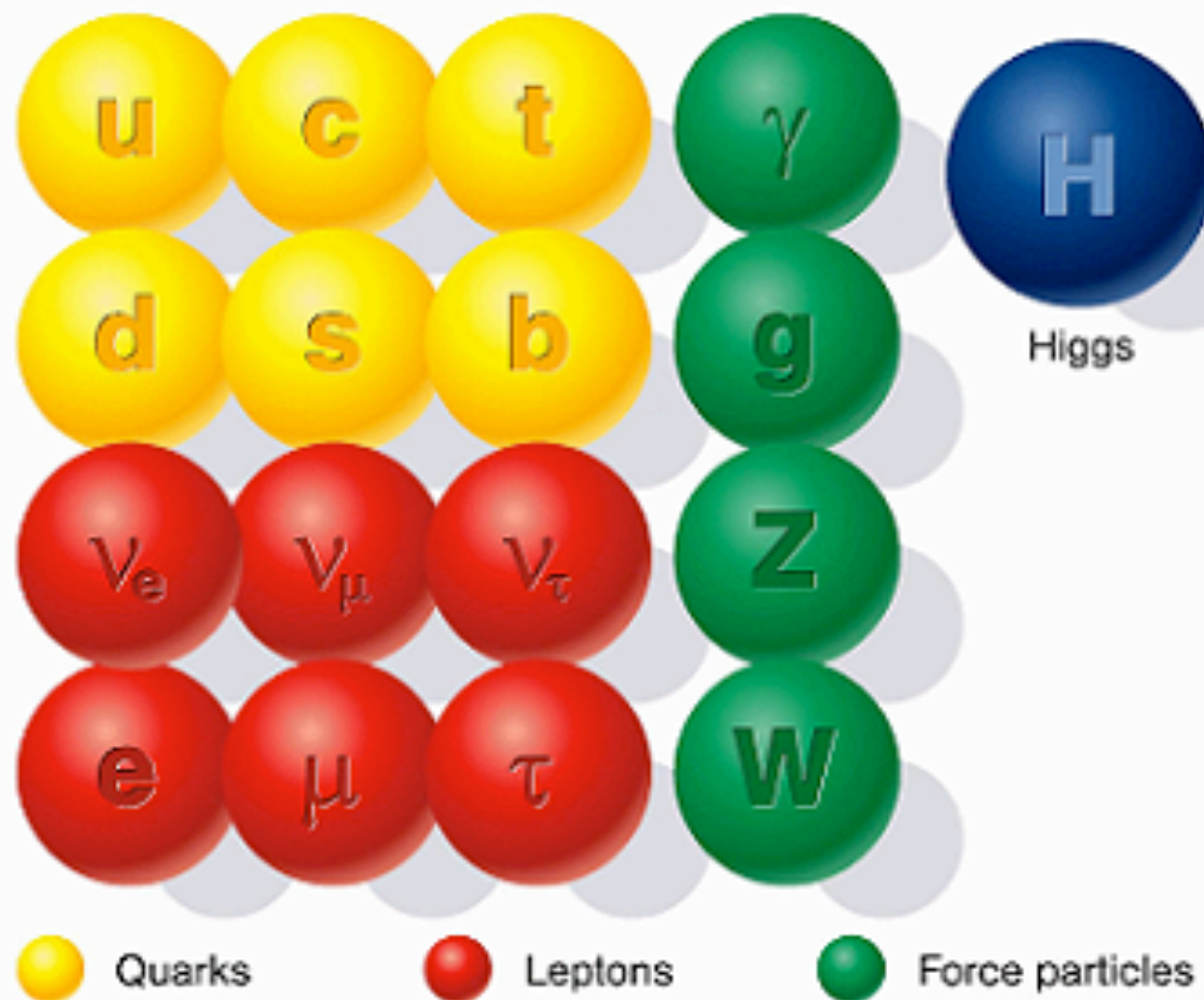


ばっくあっぷ



# 素粒子の標準模型

## Standard particles



1897年：電子

1900年： $\gamma$ 線

1932年：陽電子

1937年： $\mu$ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： $\nu_e$ と $\nu_\mu$ 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： $\tau$ 粒子

1977年：bクォーク

1979年：グルーオン

1983年：W/Zボゾン

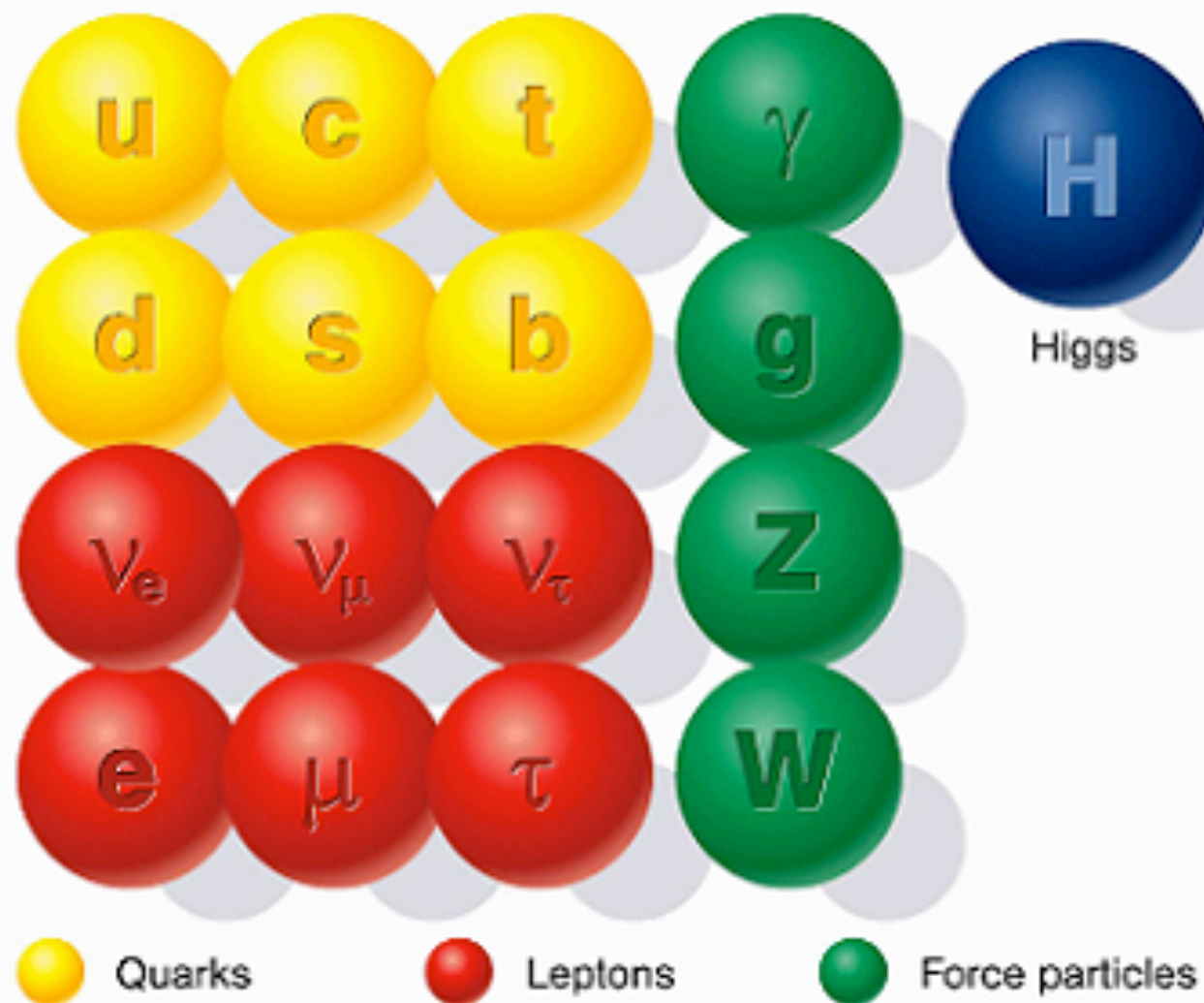
1995年：tクォーク

2000年： $\tau$ ニュートリノ



# 素粒子の標準模型

## Standard particles



1897年：電子

1900年： $\gamma$ 線

1932年：陽電子

1937年： $\mu$ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： $\nu_e$ と $\nu_\mu$ 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： $\tau$ 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

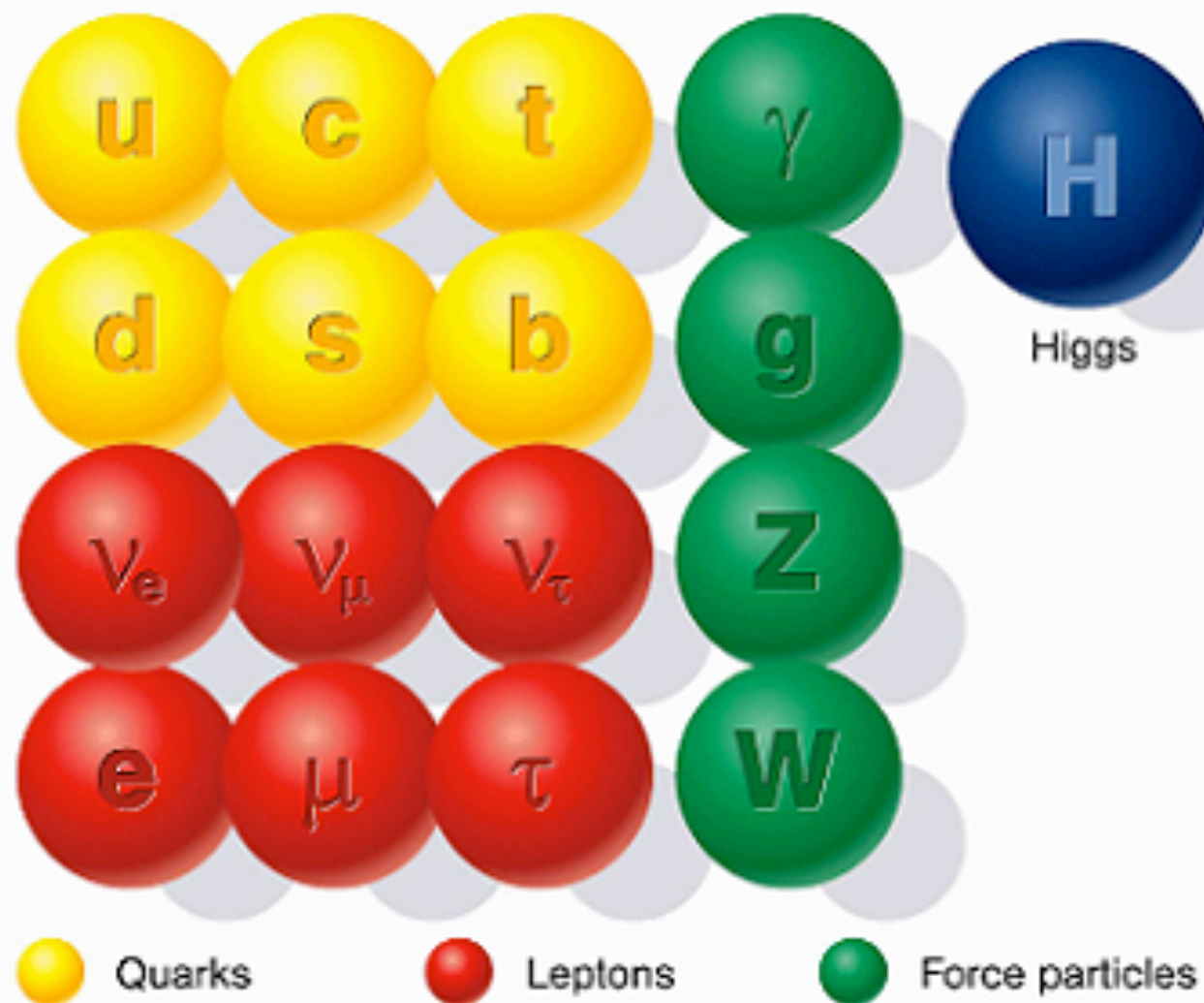
2000年： $\tau$ ニュートリノ

2012年：ヒッグス粒子



# 素粒子の標準模型

## Standard particles



1897年：電子

1900年： $\gamma$ 線

1932年：陽電子

1937年： $\mu$ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： $\nu_e$ と $\nu_\mu$ 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： $\tau$ 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

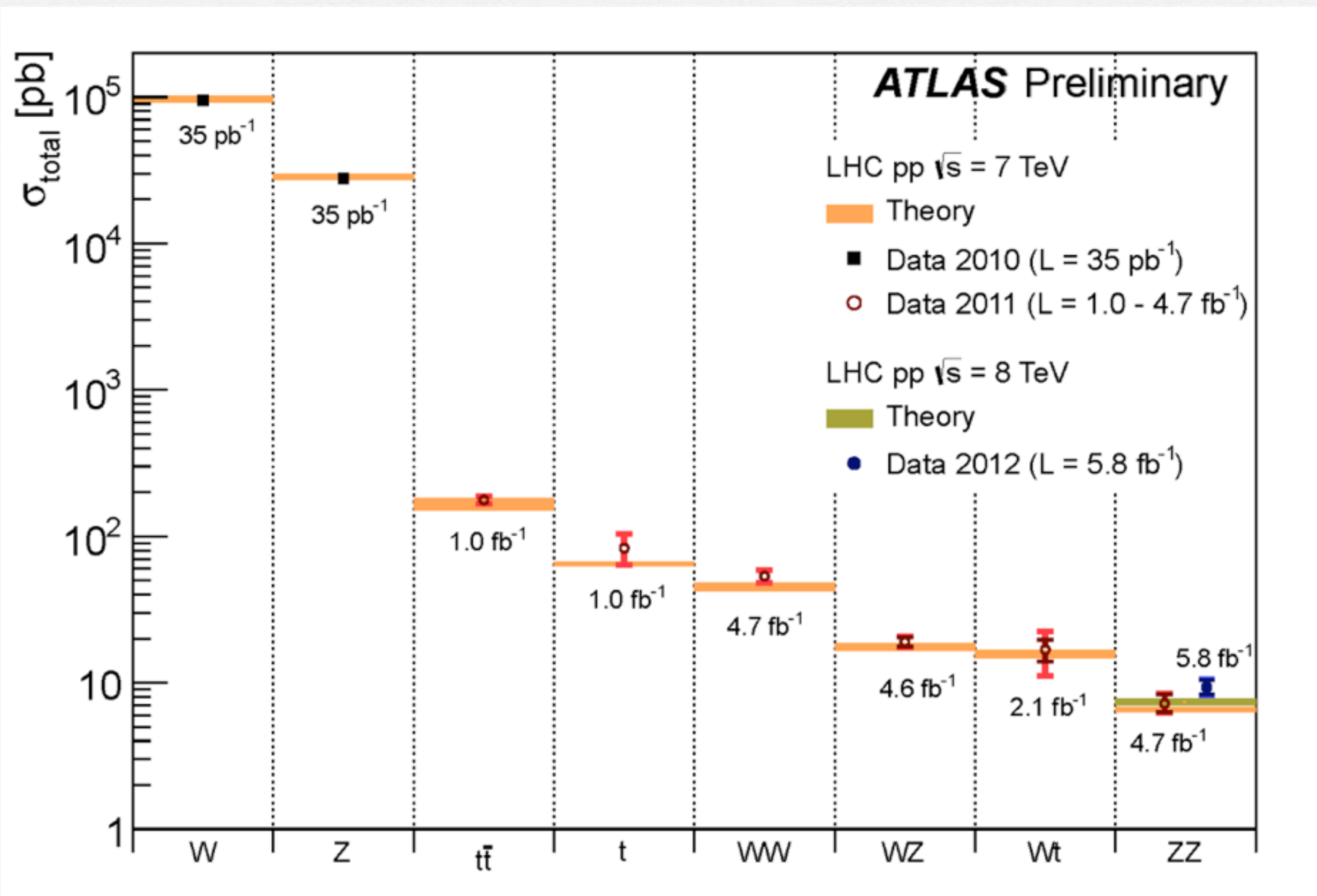
2000年： $\tau$ ニュートリノ

2012年：ヒッグス粒子

”らしき”新粒子

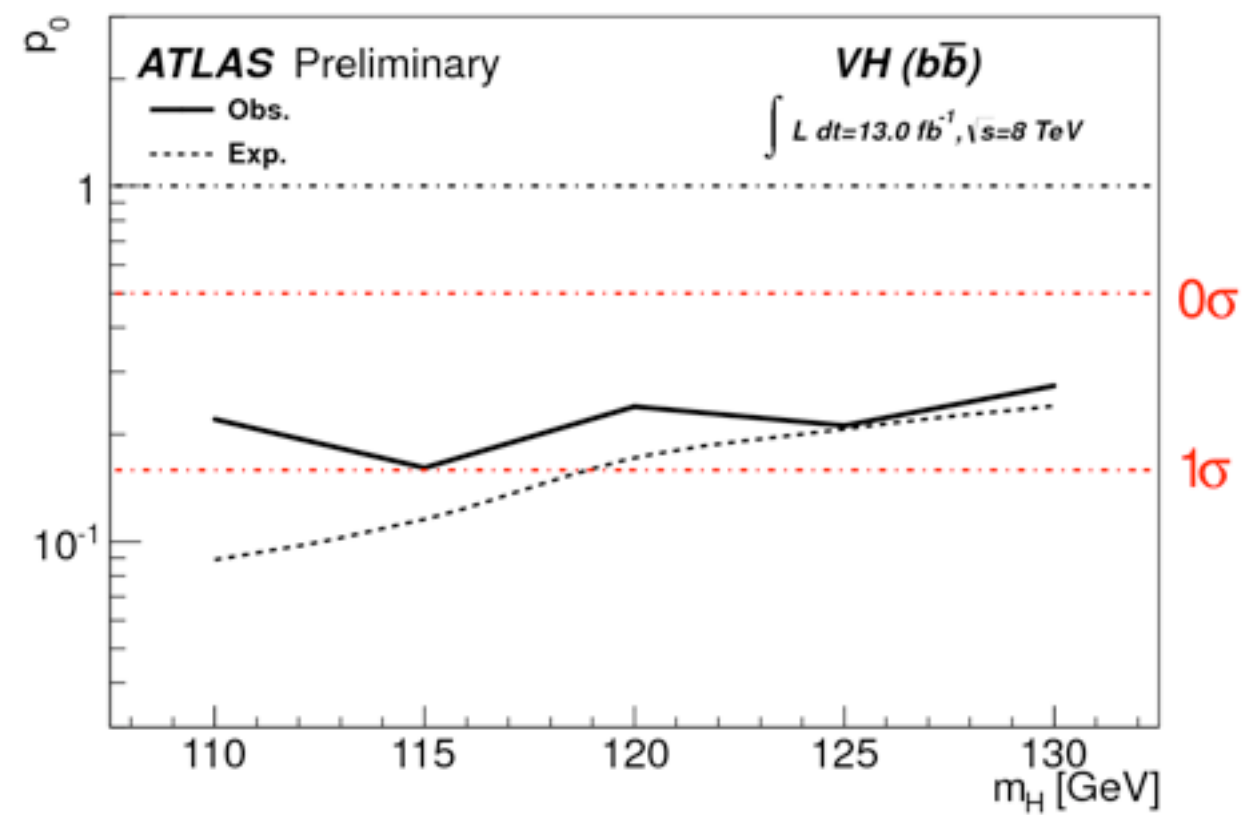
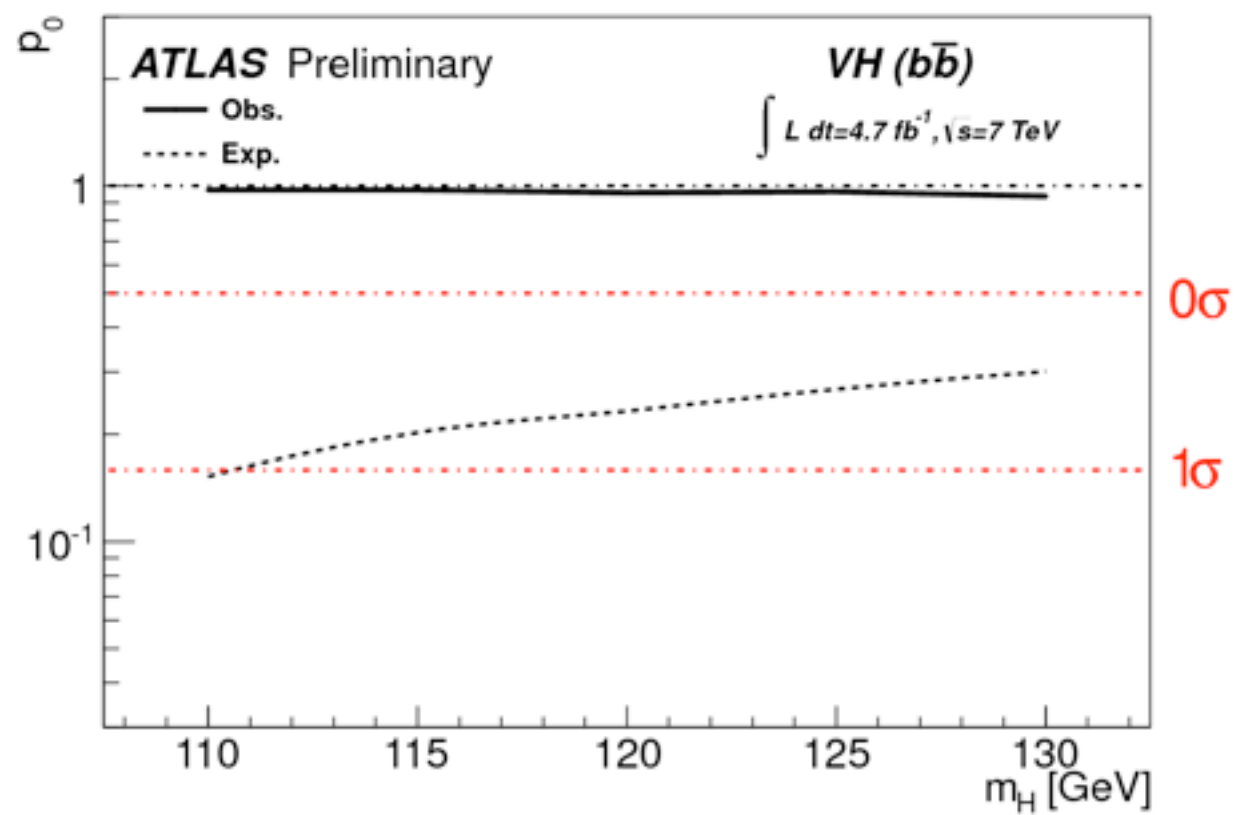


# 標準模型事象の測定





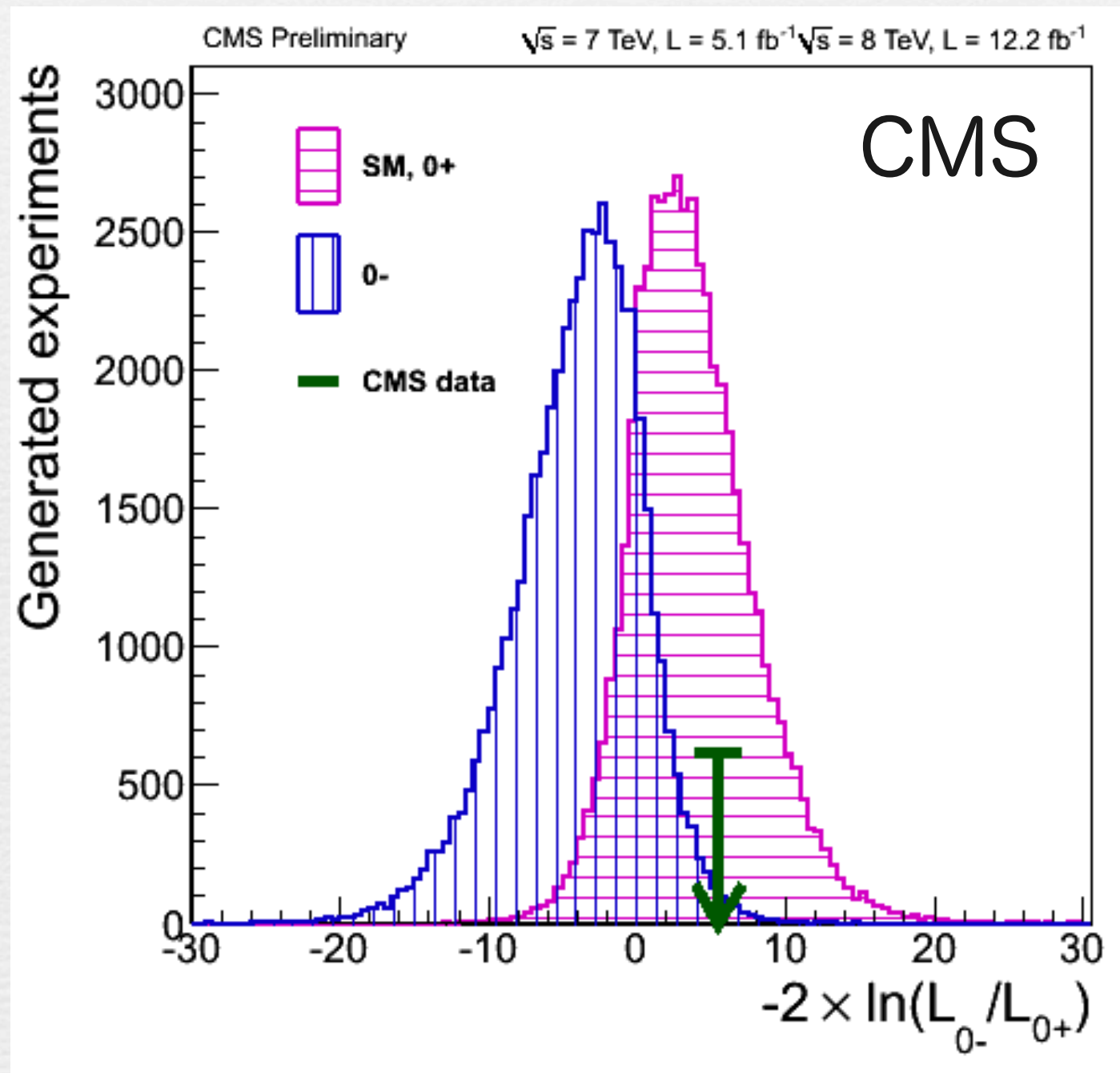
# 陽子 + 陽子 $\rightarrow$ VH $\rightarrow$ Vbb





# 新粒子のCP

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



2.5 $\sigma$ のレベルで $0^-$ を排除？



# coupling

