

and Higgs

# LHC and Supersymmetry

Koichi Hamaguchi (Tokyo U.)

@基研研究会 「場の理論と弦理論」 July 25, 2011



# Plan of Talk

ちょうど先週の木曜から、  
EPS conference @ France  
で最新の結果が！！次々と！！  
(そろそろしてトークの準備が・・・)

● (いまさら聞けない) LHC の基礎知識  
+ LHC の最新の結果の一部

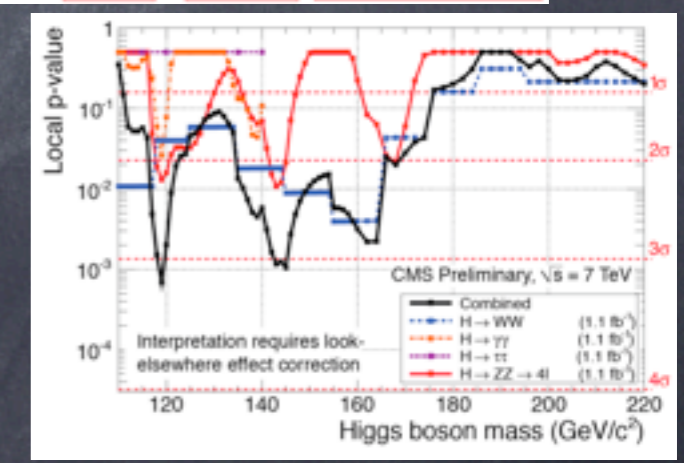
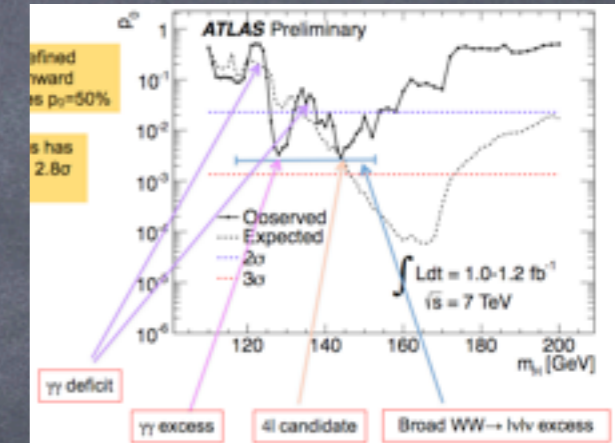
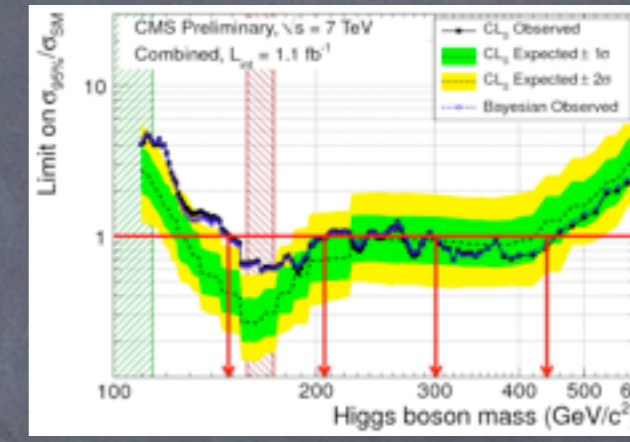
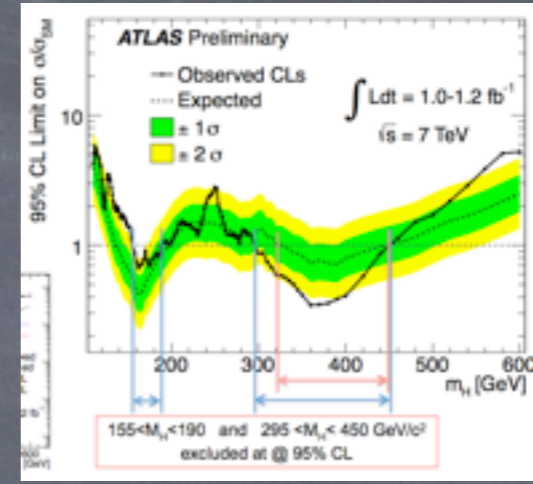
● SUSY

ほとんどの時間ココに費やします

● まとめ

●





LHC すごいです。(大げさかもしれませんが) 素粒子物理の歴史が大きく動きつつあると思います。1週間前とは雰囲気全然違います。

Higgs 質量は [115 - 150] or [200 - 300] or [450-] GeV

120~150 GeV に兆候が見えている?? かもしれない!  
あと半年~1年で決着がつきそうです。

SUSY は squark, gluino 1 TeV くらいまで兆候なし。

後ほどもうちょっと詳しく見ますが、その前に...

Higgs search summary  
by K.Cranmer [ATLAS], A.Korytov [CMS]  
@ Euroconference on HEP 2011



# Part I

## (いまさら聞けない) LHC の基礎知識

(僕もトークの準備しながら勉強しました。)

LHC って? / ルミノシティ / 断面積  
/ ビーム方向と横方向

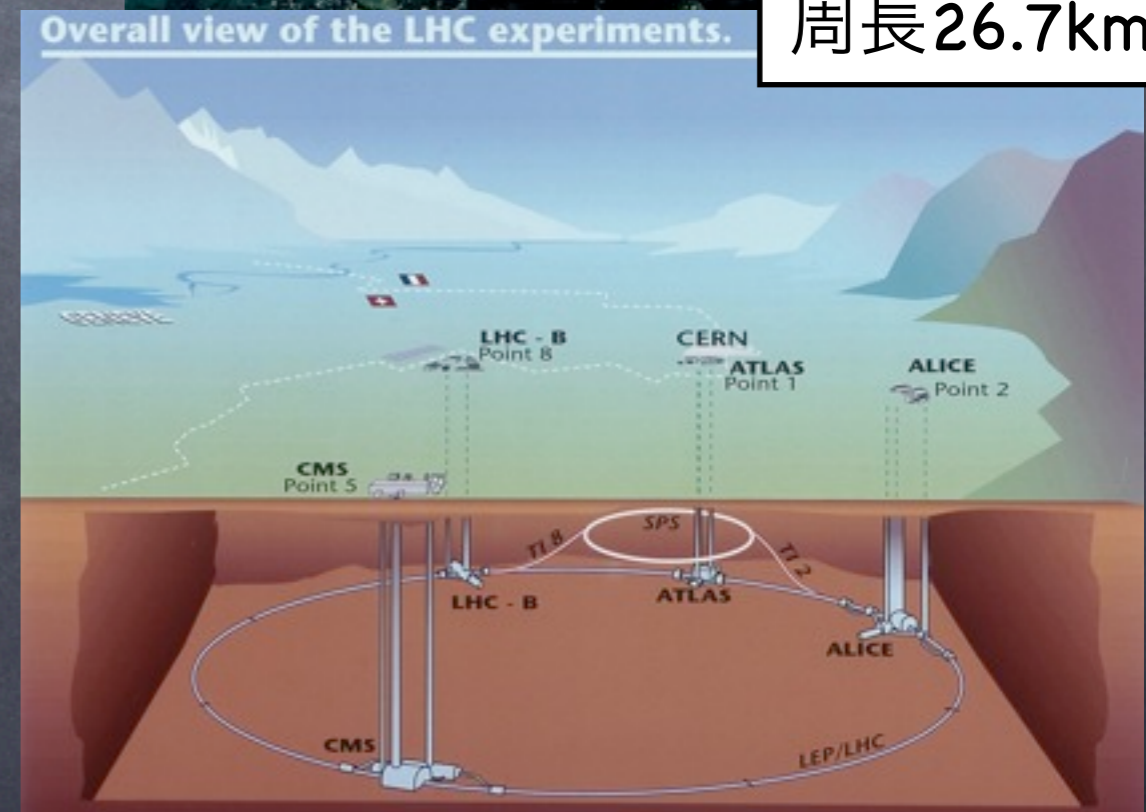


# LHC = Large Hadron Collider

- 陽子 + 陽子を加速 → 衝突
- 2010年3月より、ついに  
史上最高エネルギー 7 TeV  
(=3.5TeV+3.5TeV) で稼働
- 2015年から 14 (or 13) TeV



周長26.7km



「写真提供 CERN アトラス実験グループ」 <http://atlas.kek.jp/photo.html>



# LHC

## ATLAS 検出器

高さ25m 長さ44m

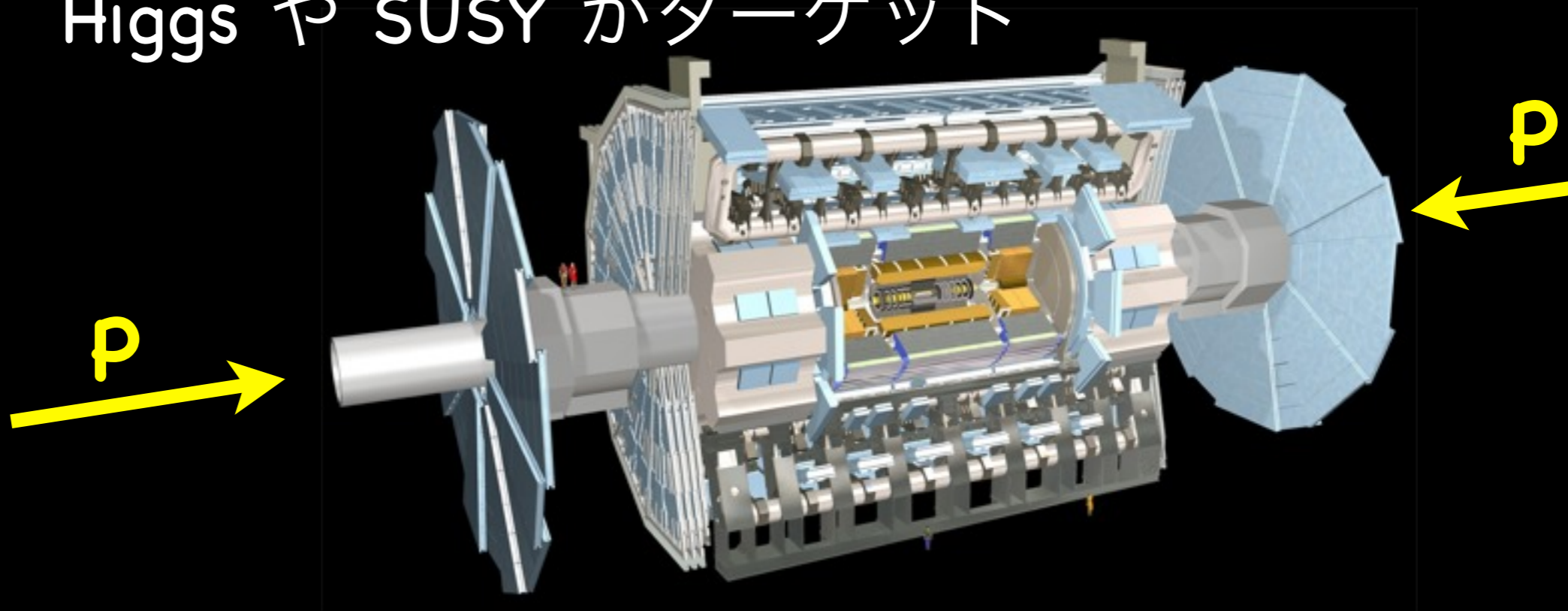
Higgs や SUSY がターゲット

● 陽子 + 陽子

● 2010年3月

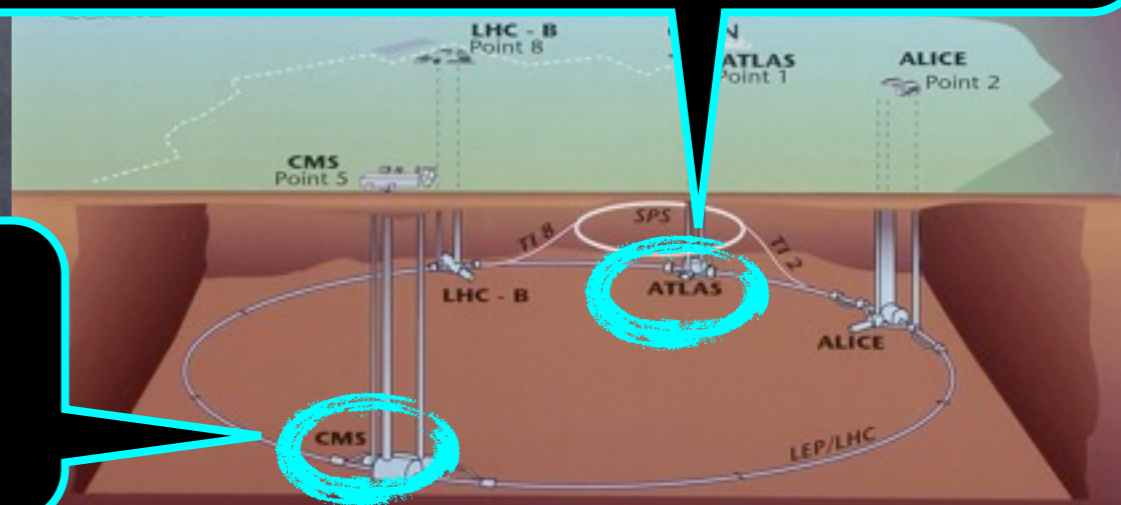
史上最高

(=3.5TeV)



● 2015年から 14 TeV

CMS 検出器  
ATLASのライバル



「写真提供 CERN アトラス実験グループ」 <http://atlas.kek.jp/photo.html>



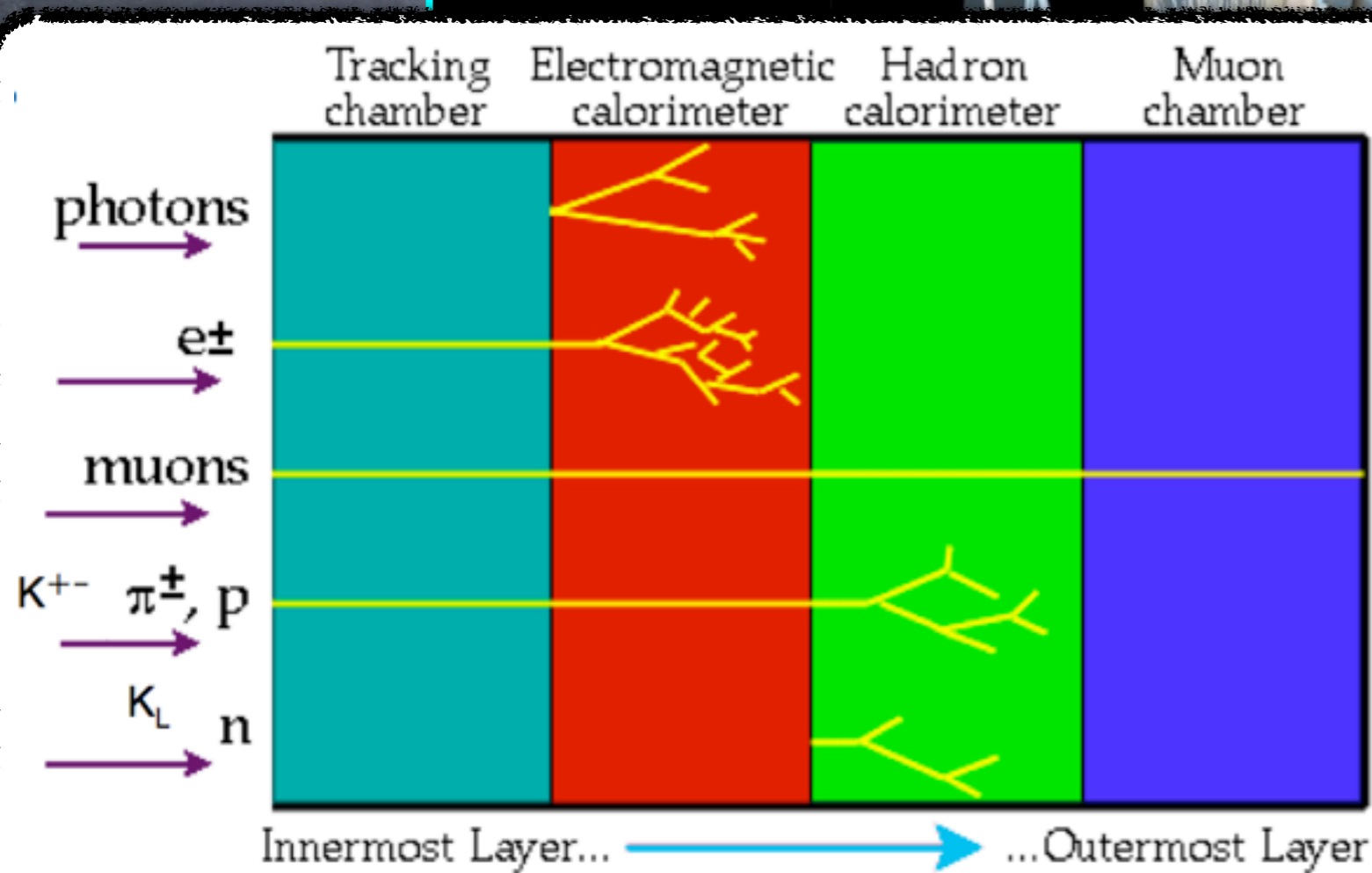
# LHC

## ATLAS 検出器

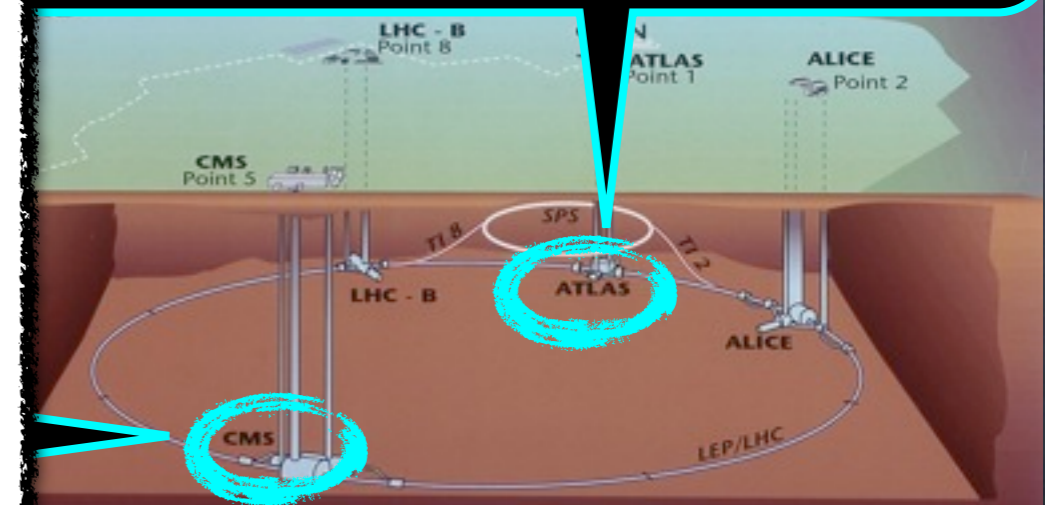
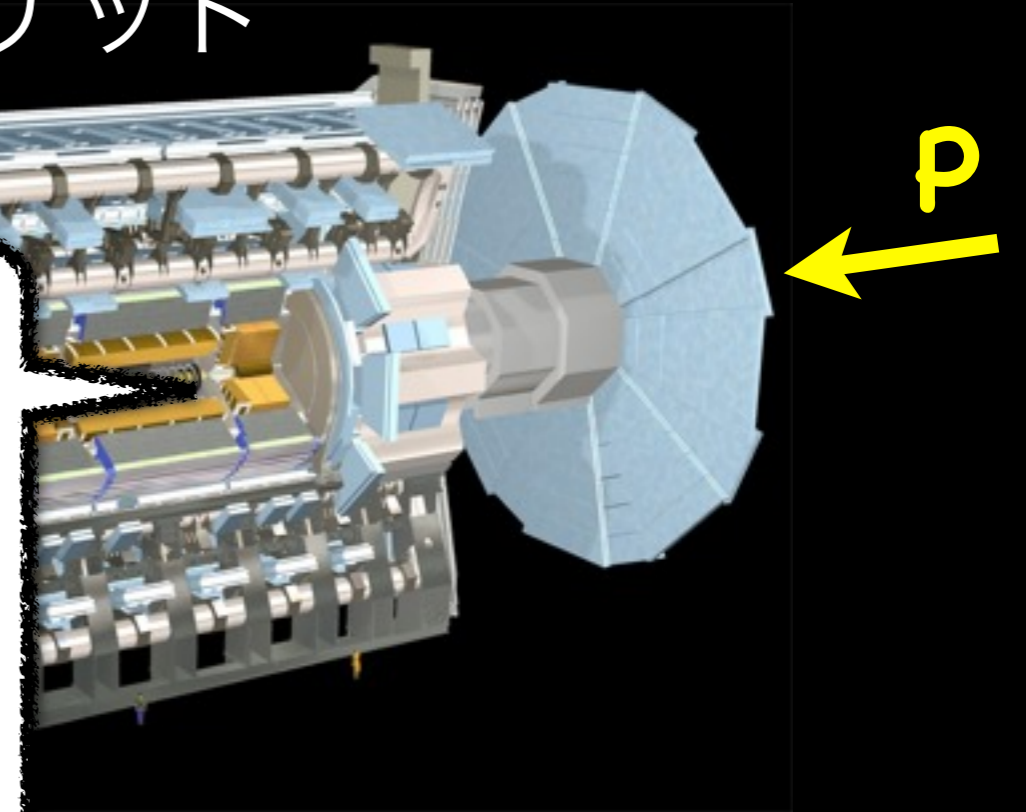
高さ25m 長さ44m

Higgs や SUSY がターゲット

● 陽子 + 陽子



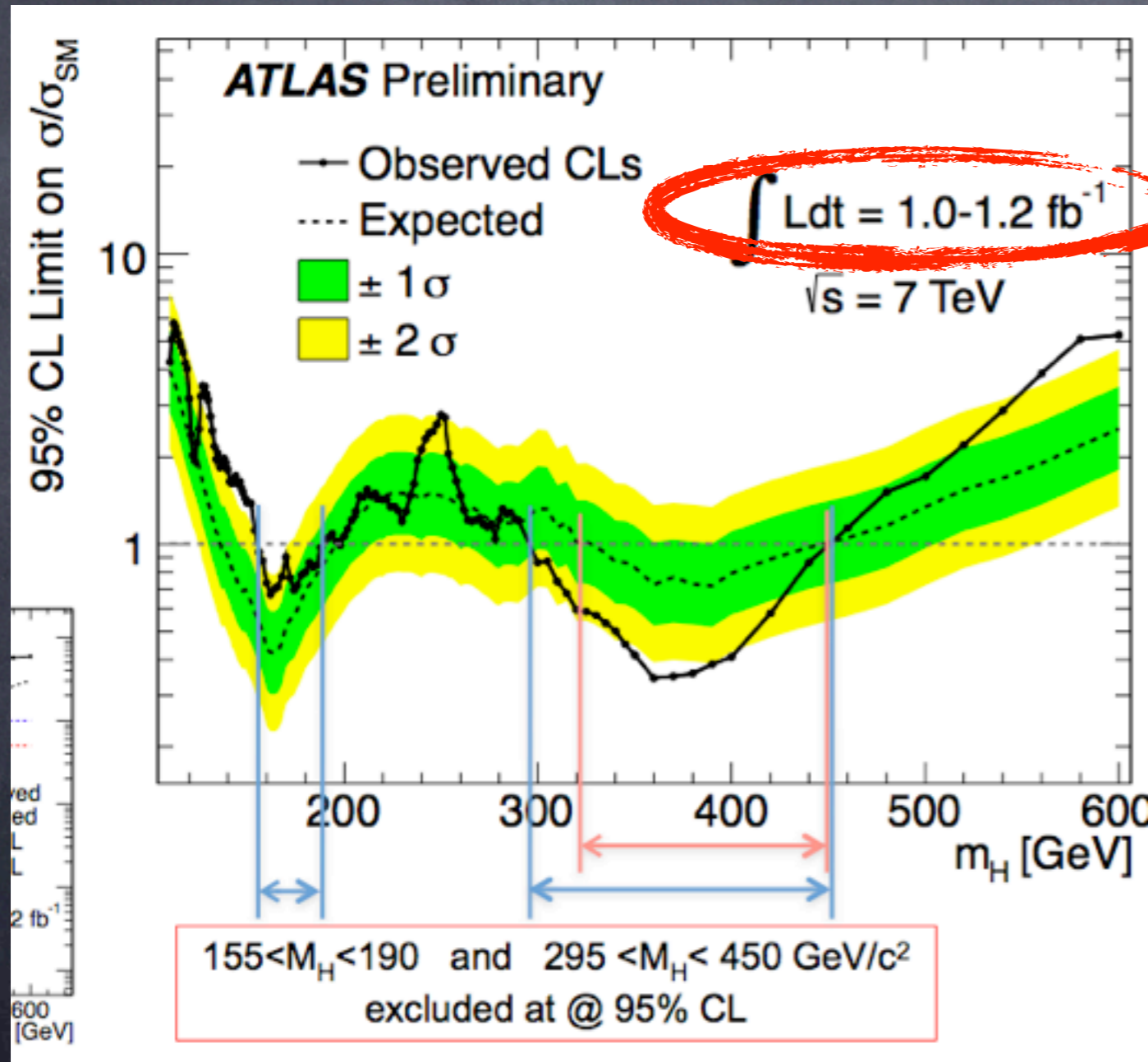
検出器の内側 → 外側



写真提供 CERN アトラス実験グループ <http://atlas.kek.jp/photo.html>



次に . . .



どの図にも必ず  
書いてある、  
この数字について

K.Cranmer [ATLAS] Euroconference on HEP 2011



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\frac{dN}{dt} = \sigma \times L$$

event rate                      cross section                      luminosity

$$N = \sigma \times \int L dt$$

total event number                      cross section                      integrated luminosity

(例) top quark の対生成断面積は

$$\sigma (pp \rightarrow t \bar{t} + \text{others}) \approx 170 \text{ pb (@ 7 TeV)}$$

$$p = \text{pico} = 10^{-12}$$

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



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{l} dN/dt \\ \text{event rate} \end{array} = \begin{array}{l} \sigma \\ \text{cross section} \end{array} \times \begin{array}{l} L \\ \text{luminosity} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} N \\ \text{total event} \\ \text{number} \end{array} = \begin{array}{l} \sigma \\ \text{cross section} \end{array} \times \begin{array}{l} \int L dt \\ \text{integrated} \\ \text{luminosity} \end{array}$$

(例) top quark の対生成断面積は

$$\sigma (pp \rightarrow t \bar{t} + \text{others}) \approx 170 \text{ pb (@ 7 TeV)}$$

$$p = \text{pico} = 10^{-12}$$

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

● これまでのルミノシティの最大値は  $L \approx 0.0016 \text{ pb}^{-1}/\text{s}$

$$\sigma \times L = 0.27 /\text{s} \quad (\text{4秒に1回 top quark!})$$



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

bottom

W, Z

top

SUSY

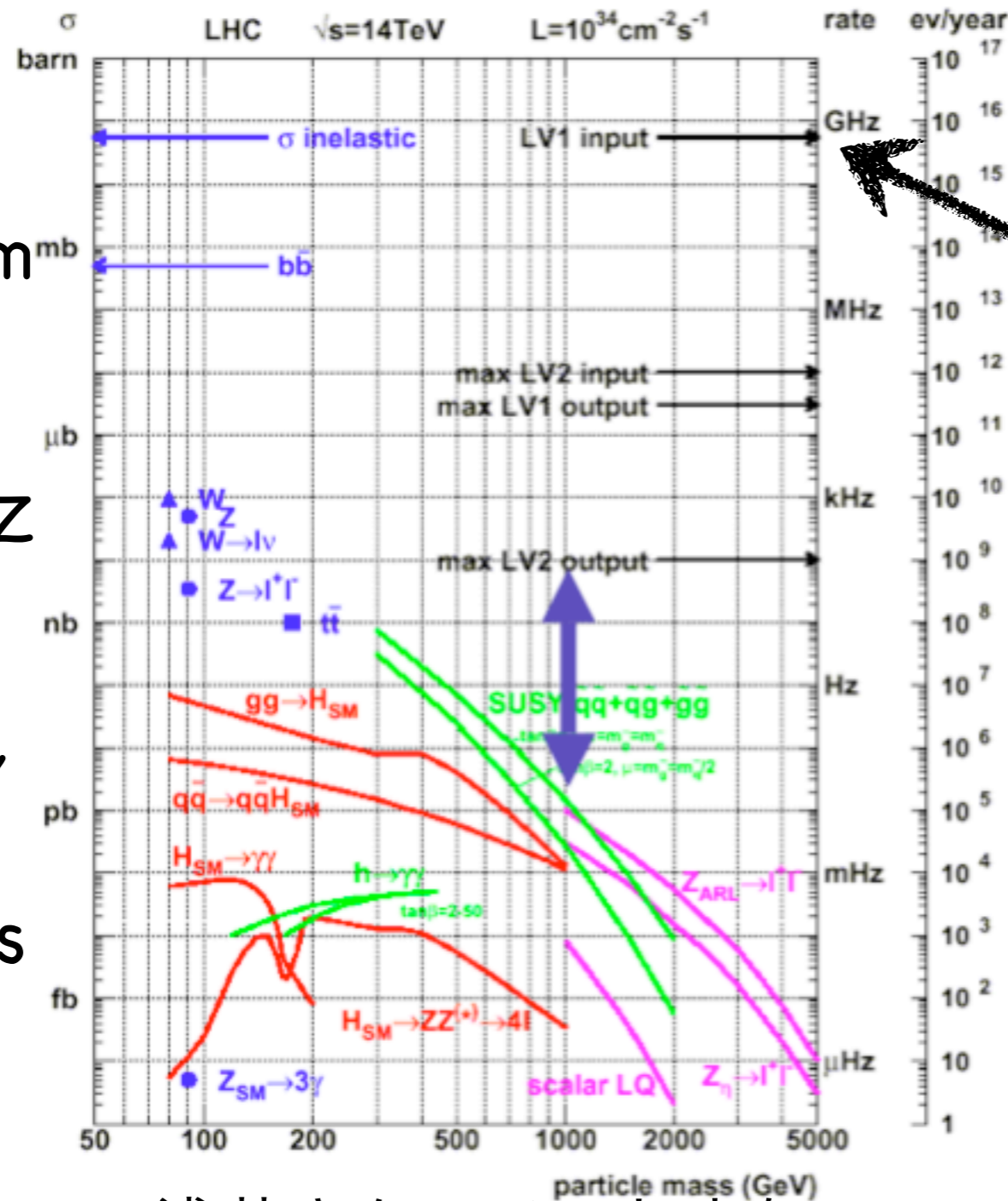
Higgs

(例)

$\sigma$

● これ

$\sigma \times$



浅井さんのノートより

これは14TeV  
の絵ですが

每秒10億event !!!

全部データ取ってたらメモリが足りないのでしょぼいイベントはどんどん捨てる（「トリガー」）。典型的には運動量の大きな粒子を含むイベントだけ残す。

それでも見たいイベント（例えばSUSY）に比べてバックグラウンド（例えば top）が何桁も多い。

→ カットをかけて減らす。



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccc} N & = & \sigma & \times & \int L dt \\ \text{total event} & & \text{cross section} & & \text{integrated} \\ \text{number} & & & & \text{luminosity} \end{array}$$

(例) top quark の対生成断面積は

$$\sigma (pp \rightarrow t \bar{t} + \text{others}) \approx 170 \text{ pb (@ 7 TeV)}$$

$$p = \text{pico} = 10^{-12}$$

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

● これまでのルミノシティの最大値は  $L \approx 0.0016 \text{ pb}^{-1}/\text{s}$

$$\sigma \times L = 0.27 /\text{s} \quad (\text{4秒に1回 top quark!})$$



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccc} N & = & \sigma & \times & \int L dt \\ \text{total event} & & \text{cross section} & & \text{integrated} \\ \text{number} & & & & \text{luminosity} \end{array}$$

(例) top quark の対生成断面積は

$$\sigma (pp \rightarrow t \bar{t} + \text{others}) \approx 170 \text{ pb (@ 7 TeV)}$$

$$p = \text{pico} = 10^{-12}$$

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

● これまでのルミノシティの最大値は  $L \approx 0.0016 \text{ pb}^{-1}/\text{s}$

$$\sigma \times L = 0.27 /\text{s} \quad (\text{4秒に1回 top quark!})$$

● これまで積分ルミノシティは  $\int L dt \approx 1400 \text{ pb}^{-1}$  (ATLAS + CMS  $\approx 2800 \text{ pb}^{-1}$ )

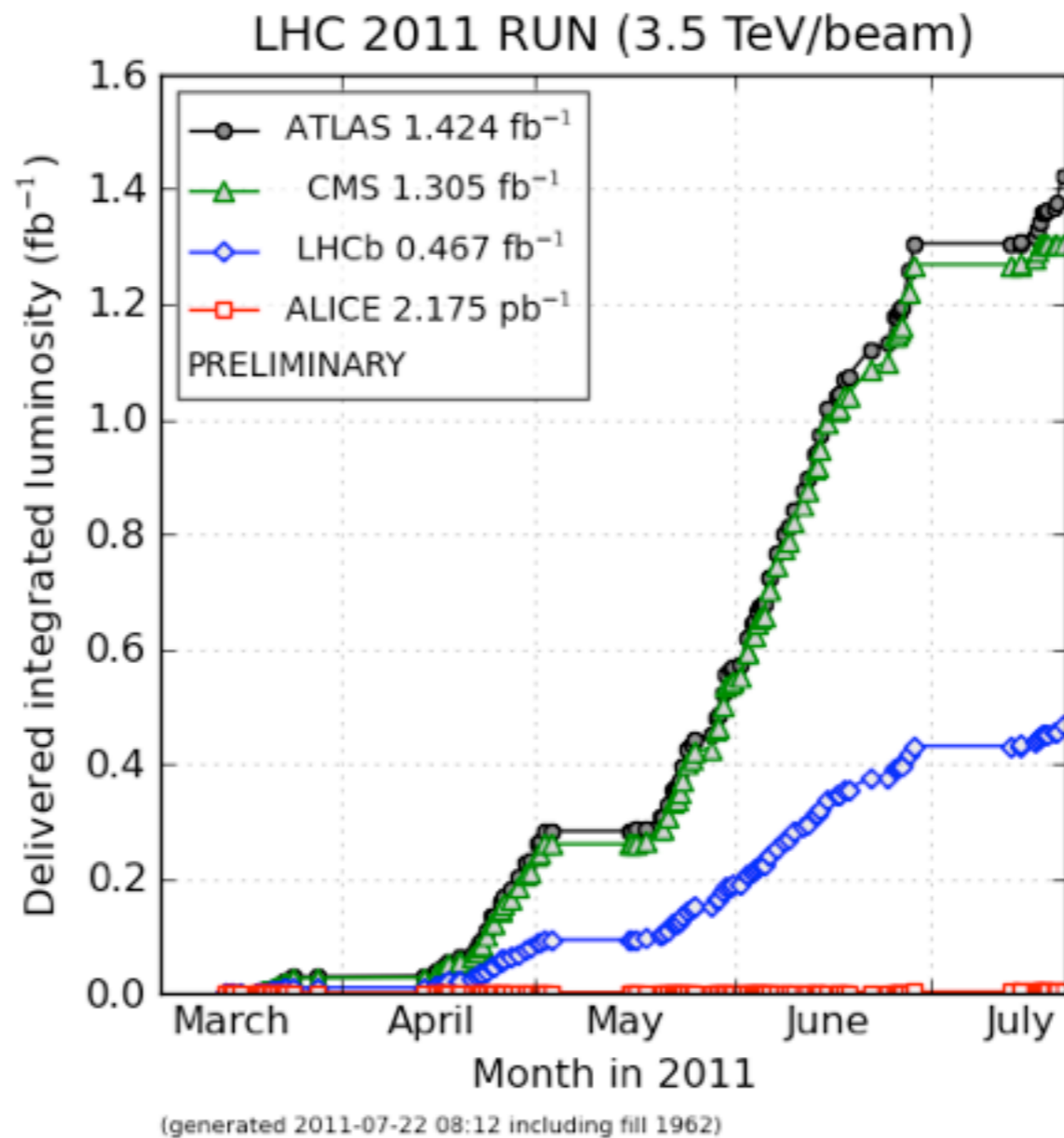
$$\sigma \times \int L dt = 240,000 \quad (\text{既に約50万個の top quark が!})$$



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$dN$   
event  
total  
num

まだまだデータは増え続けている



今ここ  
1.4 fb<sup>-1</sup> = 1400 pb<sup>-1</sup>

(例) top quark

$$\sigma (pp \rightarrow t \bar{t} + c)$$

● これまでのルミノ

$$\sigma \times L = 0.27$$

<http://lpcc.web.cern.ch/LPCC/>

● これまで積分ルミノシティは  $\int L dt \approx 1400 \text{ pb}^{-1}$  (ATLAS + CMS  $\approx 2800 \text{ pb}^{-1}$ )

$$\sigma \times \int L dt = 240,000 \quad (\text{既に約50万個の top quark が!})$$



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$


ルミノシティーは何で決まっているか



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

ルミノシティーは何で決まっているか



$$\begin{aligned} L &= \frac{f N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \\ &= \frac{40\text{MHz} (10^{11}\text{個})^2}{4\pi (16\mu\text{m})^2} = 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

@14 TeV (今はこの 1/100 くらい)



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

ルミノシティは何で決まっているか



$$L = \frac{f N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$
$$= \frac{40\text{MHz} (10^{11}\text{個})^2}{4\pi (16\mu\text{m})^2} = 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s}$$

@14 TeV (今はこの 1/100 くらい)



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

ルミノシティーは何で決まっているか



$$L = \frac{f N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$
$$= \frac{40\text{MHz} (10^{11}\text{個})^2}{4\pi (16\mu\text{m})^2} = 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s}$$

@14 TeV (今はこの 1/100 くらい)



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

ルミノシティは何で決まっているか



バンチ

バンチの太さ：髪の毛の 10分の1

$$\begin{aligned} L &= \frac{f N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \\ &= \frac{40\text{MHz} (10^{11}\text{個})^2}{4\pi (16\mu\text{m})^2} = 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

@14 TeV (今はこの 1/100 くらい)



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\begin{array}{ccccc} dN/dt & = & \sigma & \times & L \\ \text{event rate} & & \text{cross section} & & \text{luminosity} \end{array}$$

生成断面積は何で決まっているか



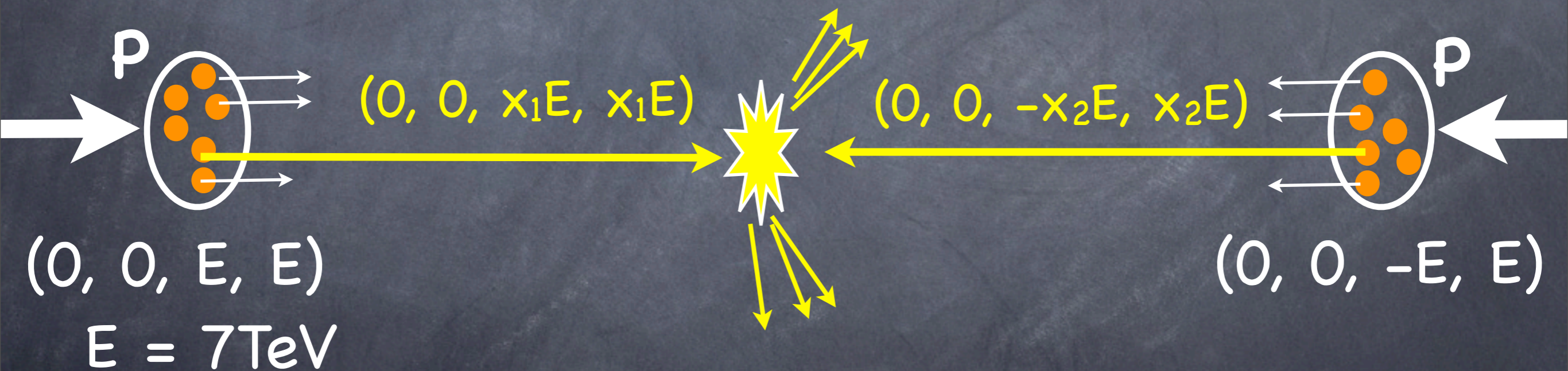
# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$\frac{dN}{dt} = \sigma \times L$$

event rate = cross section × luminosity

生成断面積は何で決まっているか

衝突するのは proton 中の quark, gluon (parton)



$$\sigma(pp \rightarrow X + \text{any}) = \sum_{i,j=\text{quark, gluon}} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1, Q^2) f_j(x_2, Q^2) \hat{\sigma}(ij \rightarrow X)$$

parton distribution function (PDF)

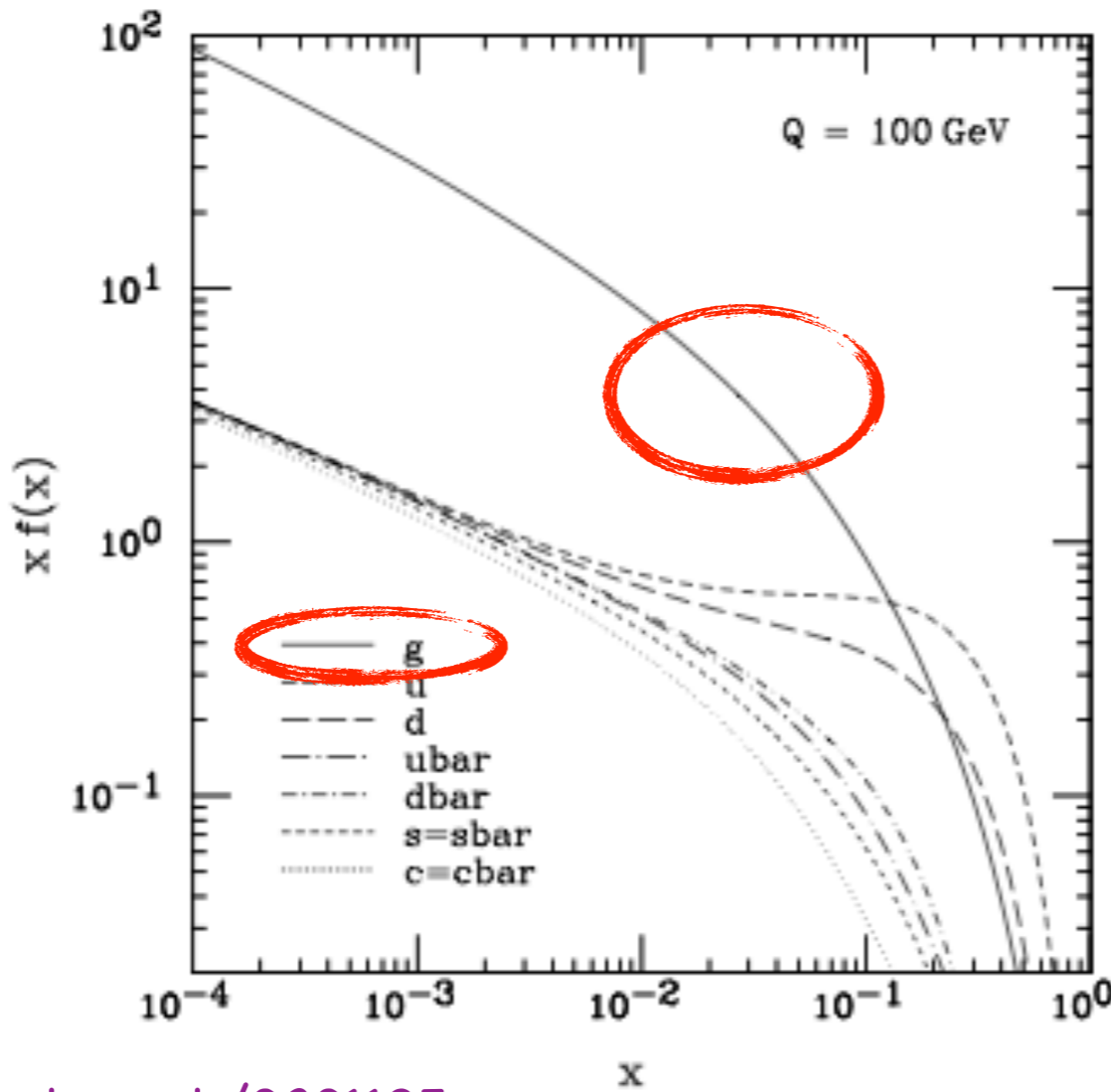
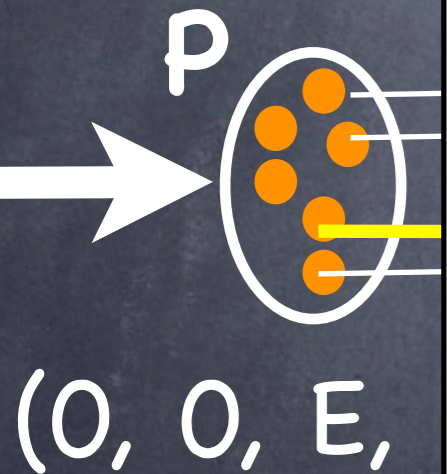
parton cross section



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$dN/dt = \sigma \times L$$

生成断面積  
衝突



hep-ph/0201195

例えば  $O(100 \text{ GeV})$   
 の粒子を生成するには  
 $x > O(100 \text{ GeV}) / 7 \text{ TeV}$   
 $\approx O(0.01-0.1)$

gluon が大きく寄与できる  
 → 例：Higgs 生成

$$\sigma(pp \rightarrow X + \text{any}) = \sum_{i,j=\text{quark, gluon}} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1, Q^2) f_j(x_2, Q^2) \hat{\sigma}(ij \rightarrow X)$$

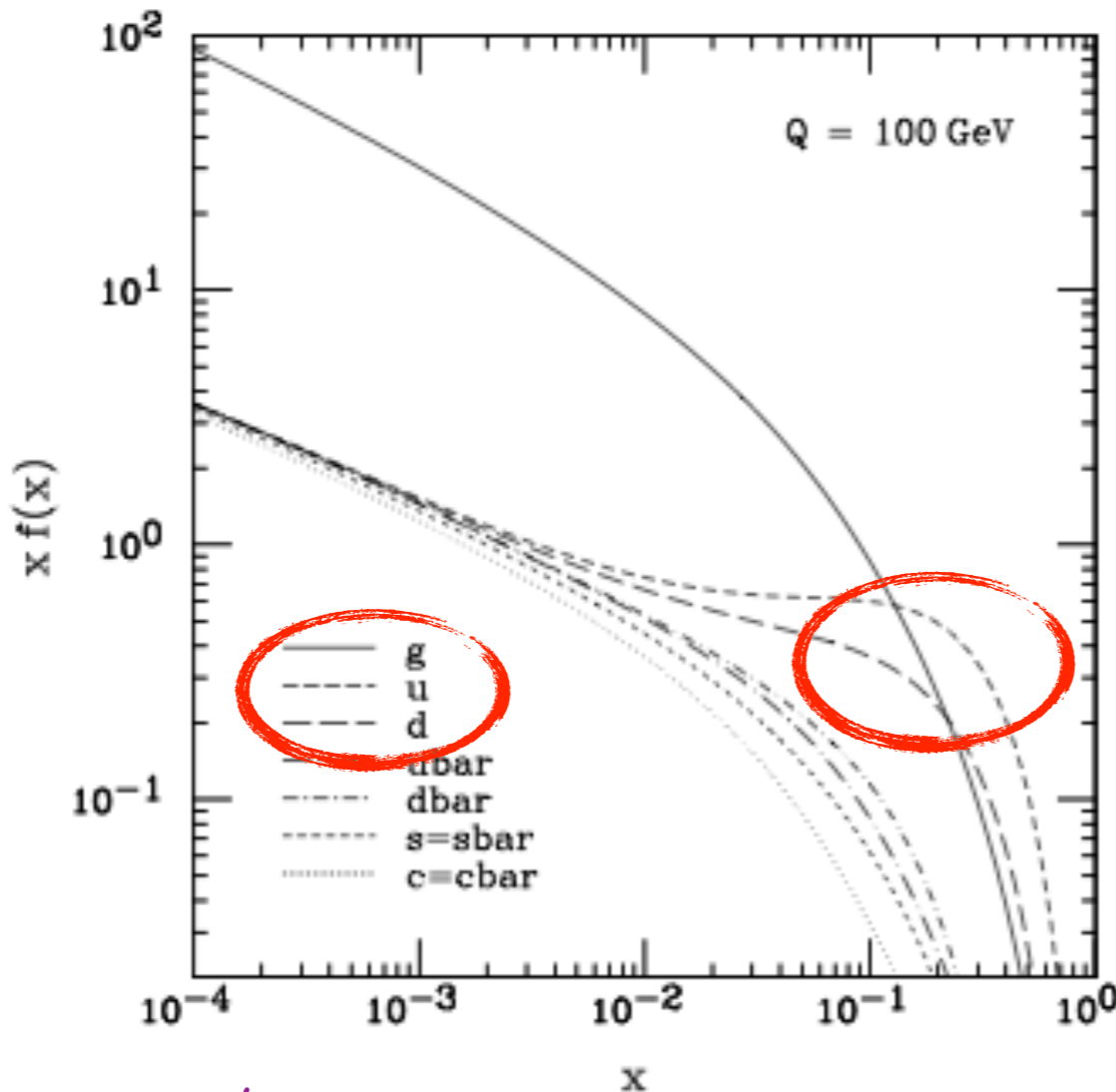
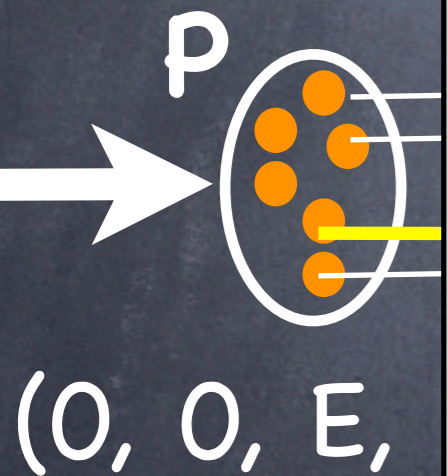
parton distribution function (PDF)
parton cross section



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$dN/dt = \sigma \times L$$

生成断面積  
衝突



1 TeV の粒子なら

$$x > 1\text{TeV} / 7\text{TeV} \approx O(0.1)$$

up, down, gluon が重要

→ 例: squark, gluino 生成

hep-ph/0201195

$$\sigma(pp \rightarrow X + \text{any}) = \sum_{i,j=\text{quark, gluon}} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1, Q^2) f_j(x_2, Q^2) \hat{\sigma}(ij \rightarrow X)$$

parton distribution function (PDF)
parton cross section



イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$N = \sigma \times \int L dt$$

total event number                  cross section                  integrated luminosity

現在 ( $\int L dt \approx 1400 \text{pb}^{-1}$ ) までに . . .



# イベント数 = 断面積 × 積分ルミノシティ

$$N = \sigma \times \int L dt$$

total event number      cross section      integrated luminosity

現在 ( $\int L dt \approx 1400 \text{ pb}^{-1}$ ) までに・・・(注)

$W(\rightarrow l\nu)$  :  $\sigma \approx 10,000 \text{ pb}$  .....  $\approx 14,000,000 \text{ events}$

$t \bar{t}$  :  $\sigma \approx 170 \text{ pb}$  .....  $\approx 240,000 \text{ events}$

Higgs (100 GeV) :  $\sigma \approx 20 \text{ pb}$  .....  $\approx 28,000 \text{ events !!!}$

Higgs (200 GeV) :  $\sigma \approx 5 \text{ pb}$  .....  $\approx 7,000 \text{ events !!!}$

squark & gluino (750 GeV) :  $\approx 1 \text{ pb}$  ....  $\approx 1,000 \text{ events !!!}$

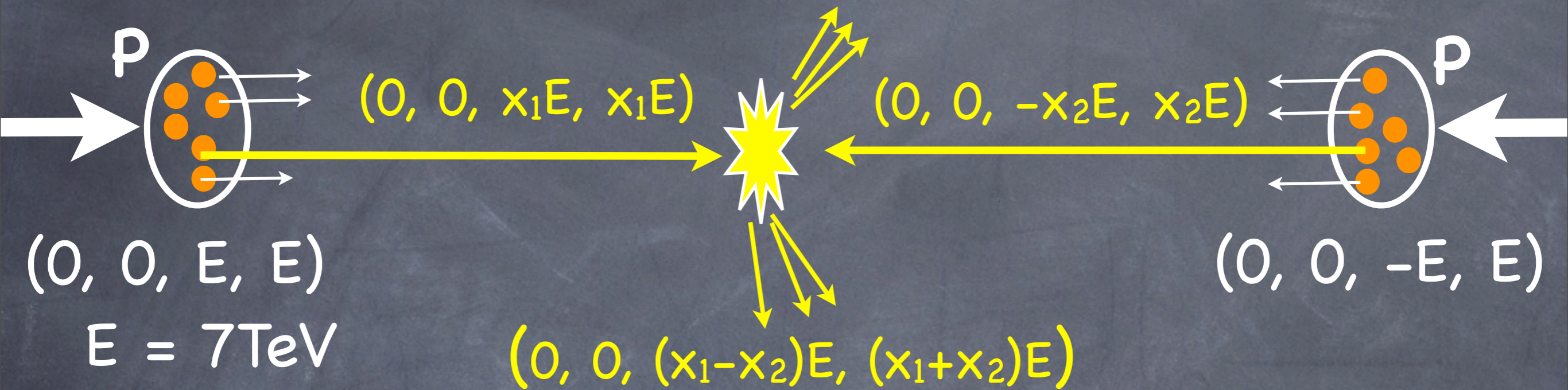
squark & gluino (1 TeV) :  $\approx 0.1 \text{ pb}$  ....  $\approx 100 \text{ events !!!}$

(注：数字は色んなところから取ってきたので値は概数です。)



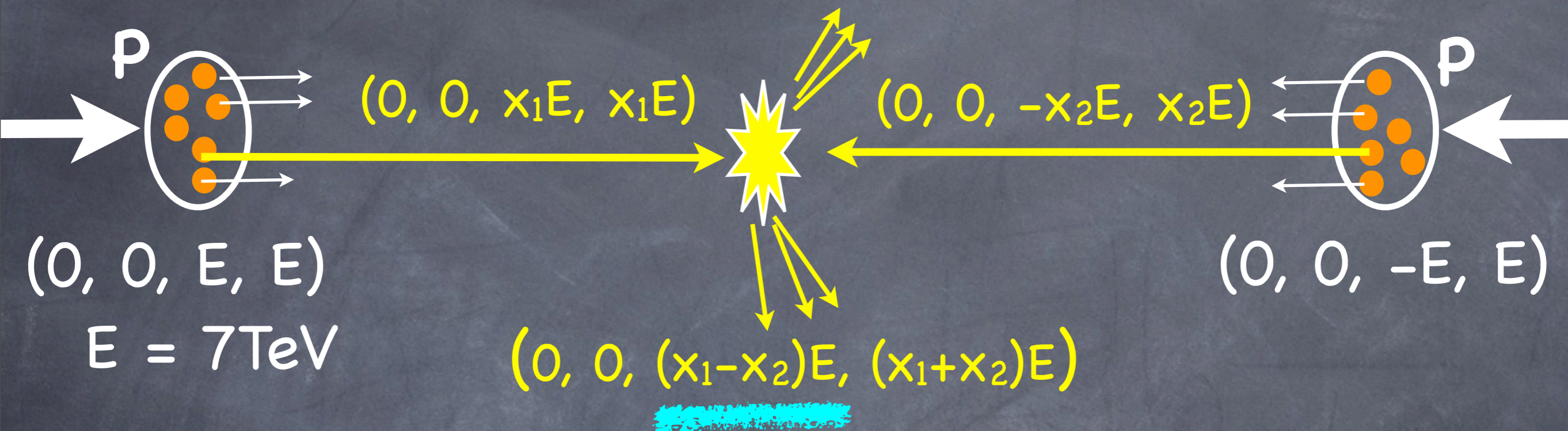
次に・・・

# ビーム方向と横方向





# ビーム方向と横方向

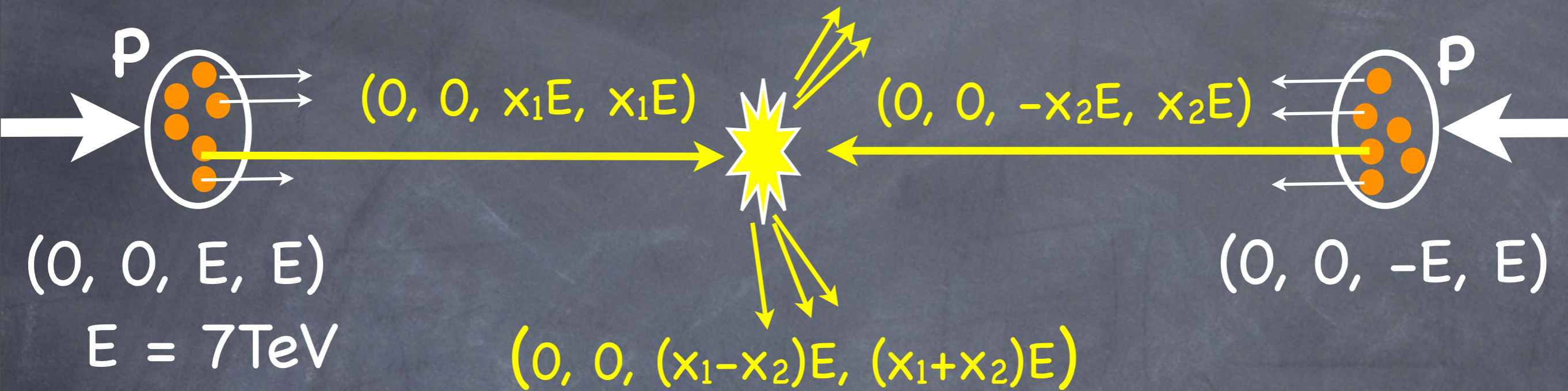


parton散乱では ビーム方向の運動量保存はない

ぶつかった parton 以外の残りカスは前方へ  
ビーム方向に抜けた粒子の運動量は測定出来ない



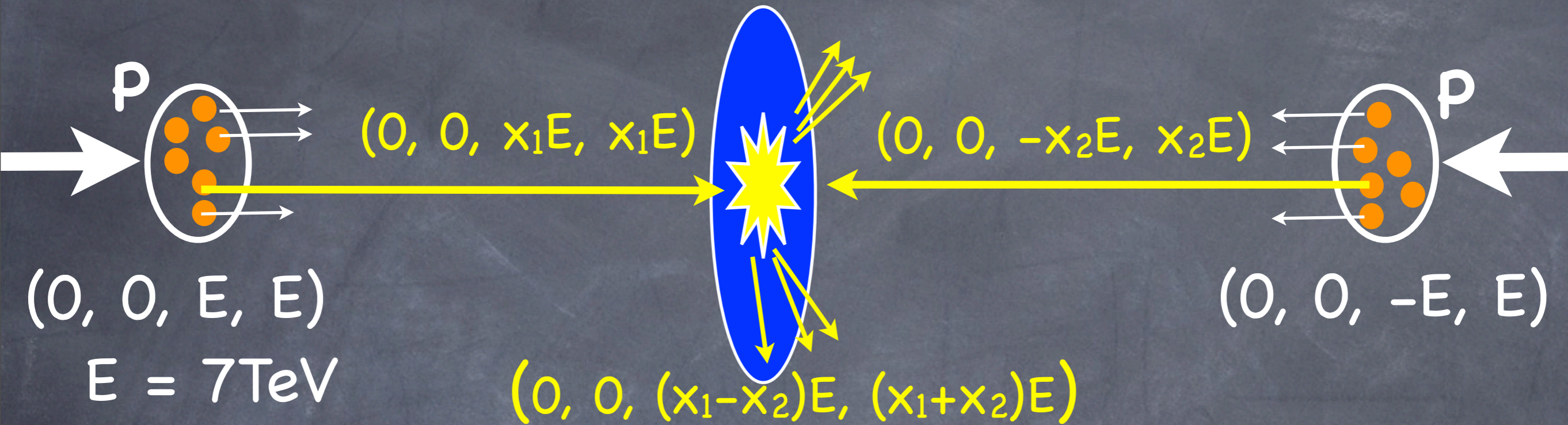
# ビーム方向と横方向



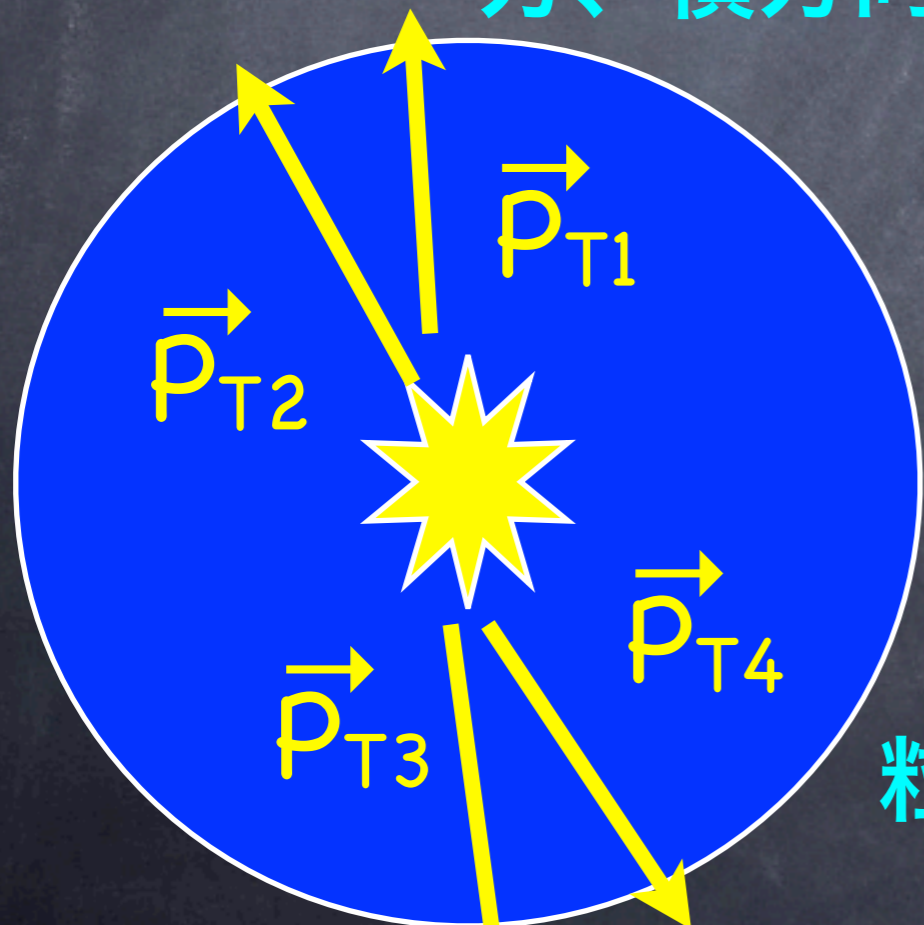
一方、横方向の運動量は保存している。



# ビーム方向と横方向



一方、横方向の運動量は保存している。

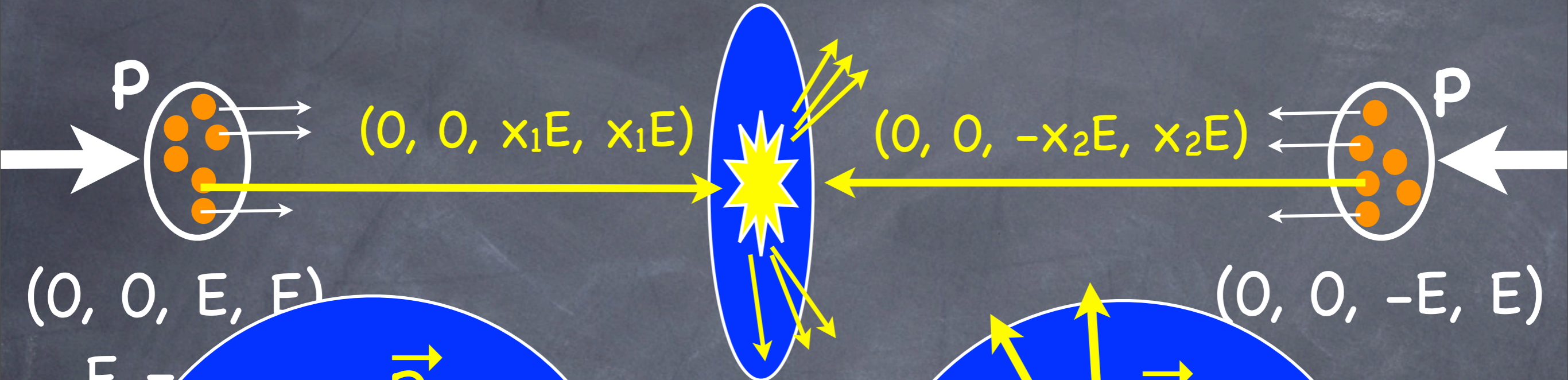


ビームに垂直な面に射影

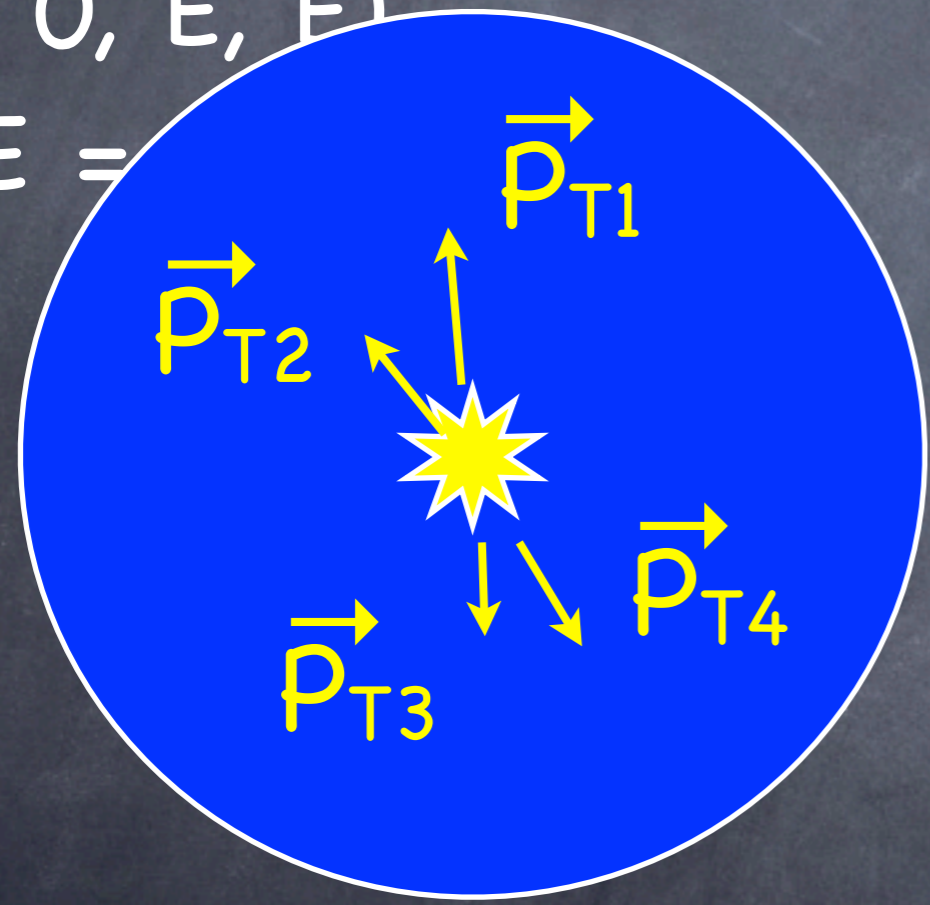
粒子の横方向の運動量  $p_T$  が大事。



# ビーム方向と横方向

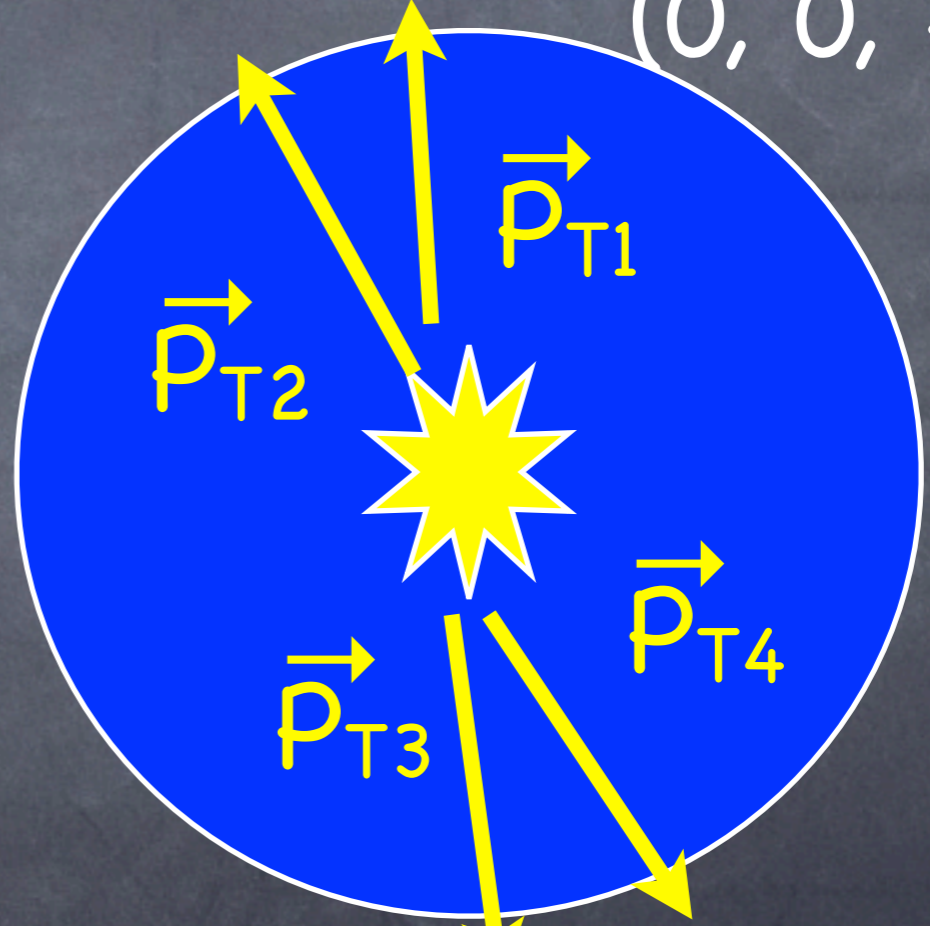


$(0, 0, E, E)$   
 $E =$



素過程がしょぼい反応だと  
 (例えばQCD反応の大部分)

$p_T$  もしょぼい

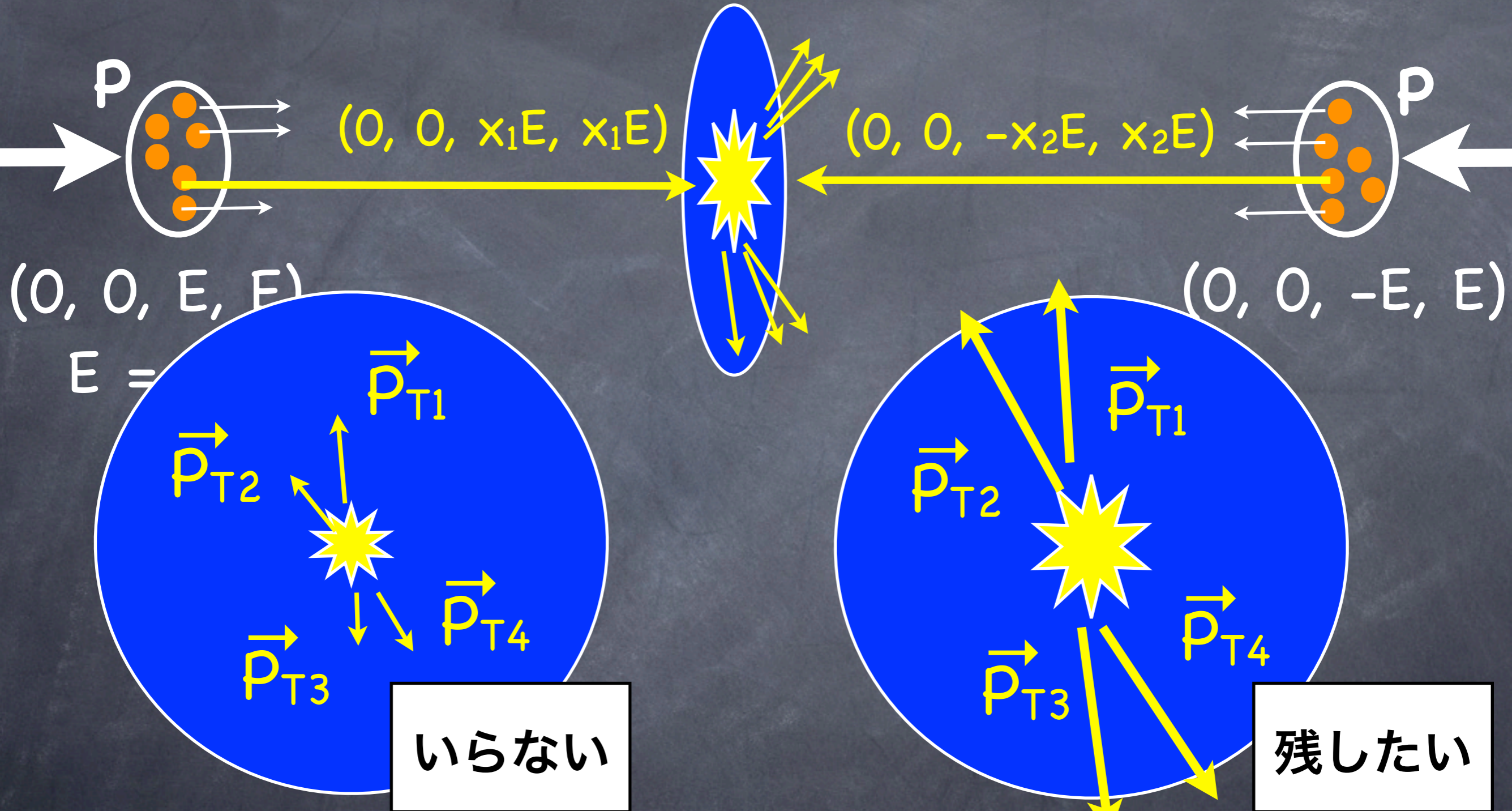


素過程が高エネルギー反応  
 (例えば重い粒子が出来る) だと

$p_T$  も大きい



# ビーム方向と横方向

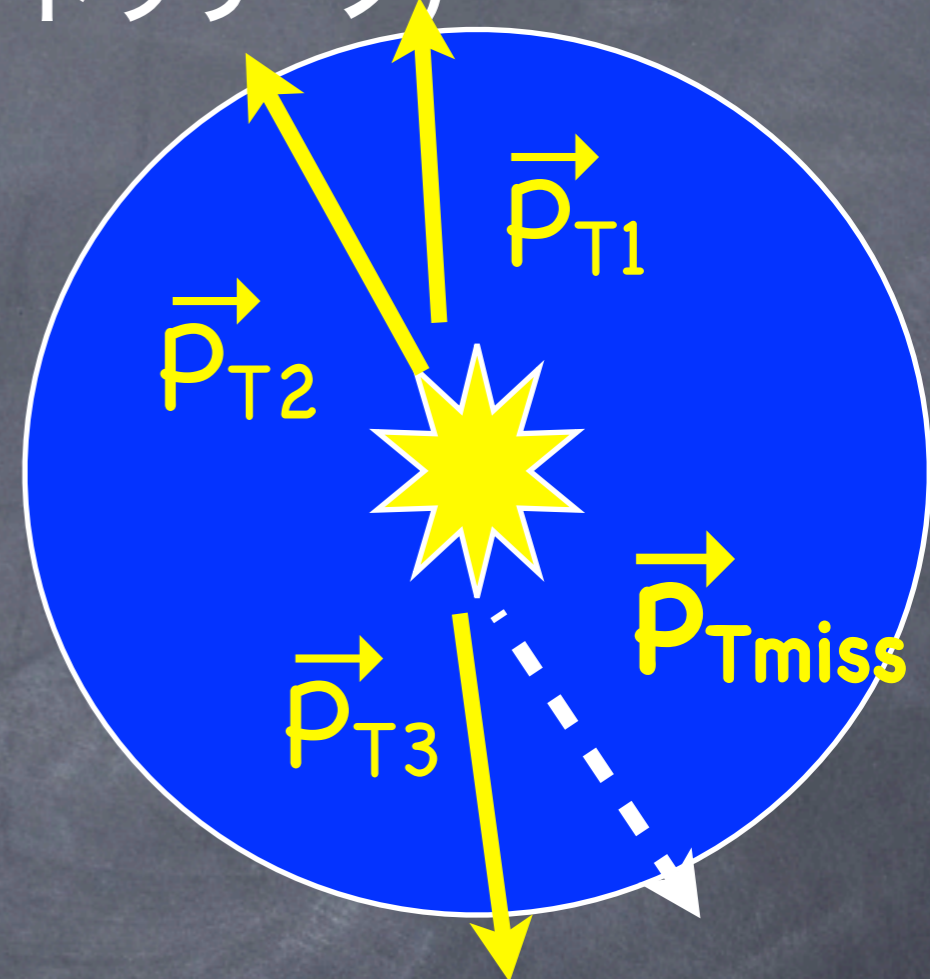
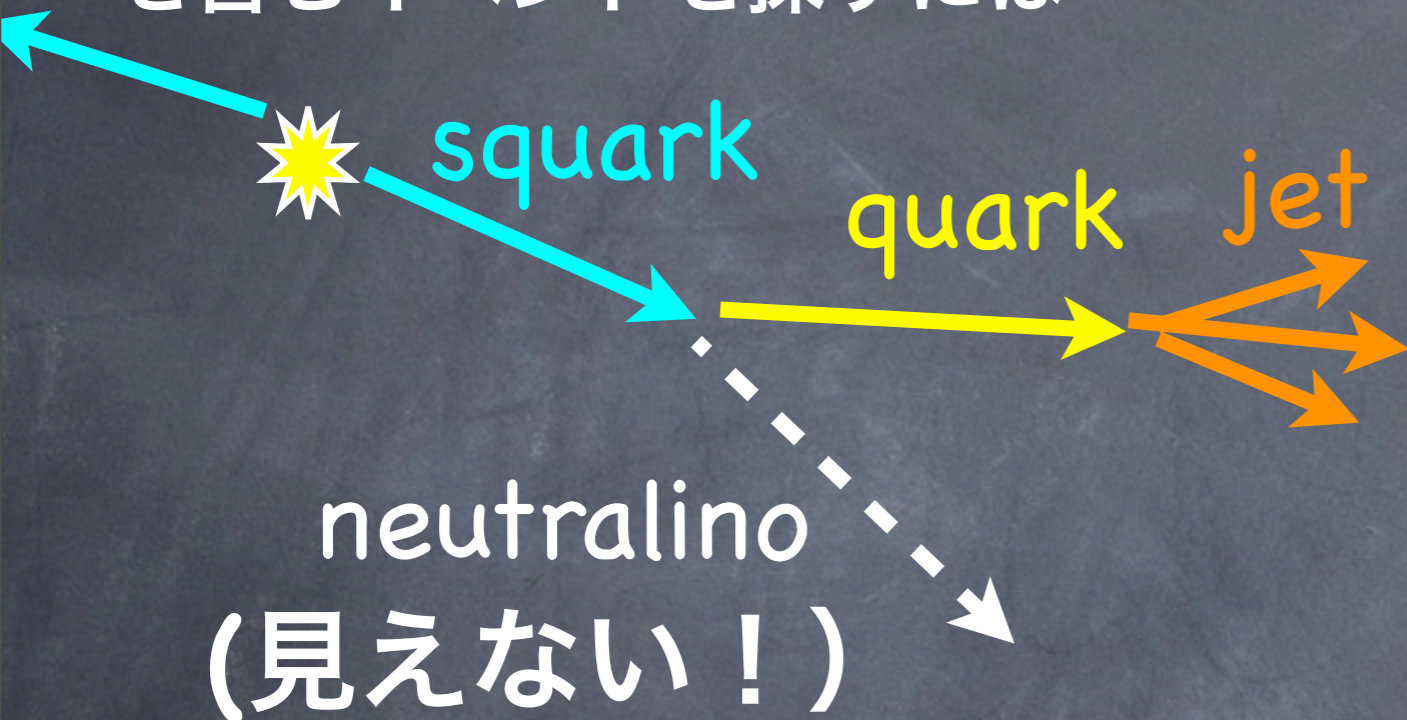


$\vec{p}_T$  の大きなイベントだけ選べばバックグラウンドを減らしてシグナルだけ残せる → カットとしてよく使われる。



# ビーム方向と横方向

さらに見えない粒子（例えば SUSY のニュートラリーノ）  
を含むイベントを探すには・・・



運動量保存より  $\vec{p}_{Tmiss} = - \sum_{\text{見えてる粒子}} \vec{p}_{Ti}$

$E_{Tmiss} \equiv |\vec{p}_{Tmiss}|$  の大きなイベントを選ぶと良い。  
(  $M_{eff} \equiv E_{Tmiss} + \sum |\vec{p}_{T jets}|$  もよく使われる。 )



# Part II

## LHC の最新の結果から

## Higgs と SUSY について

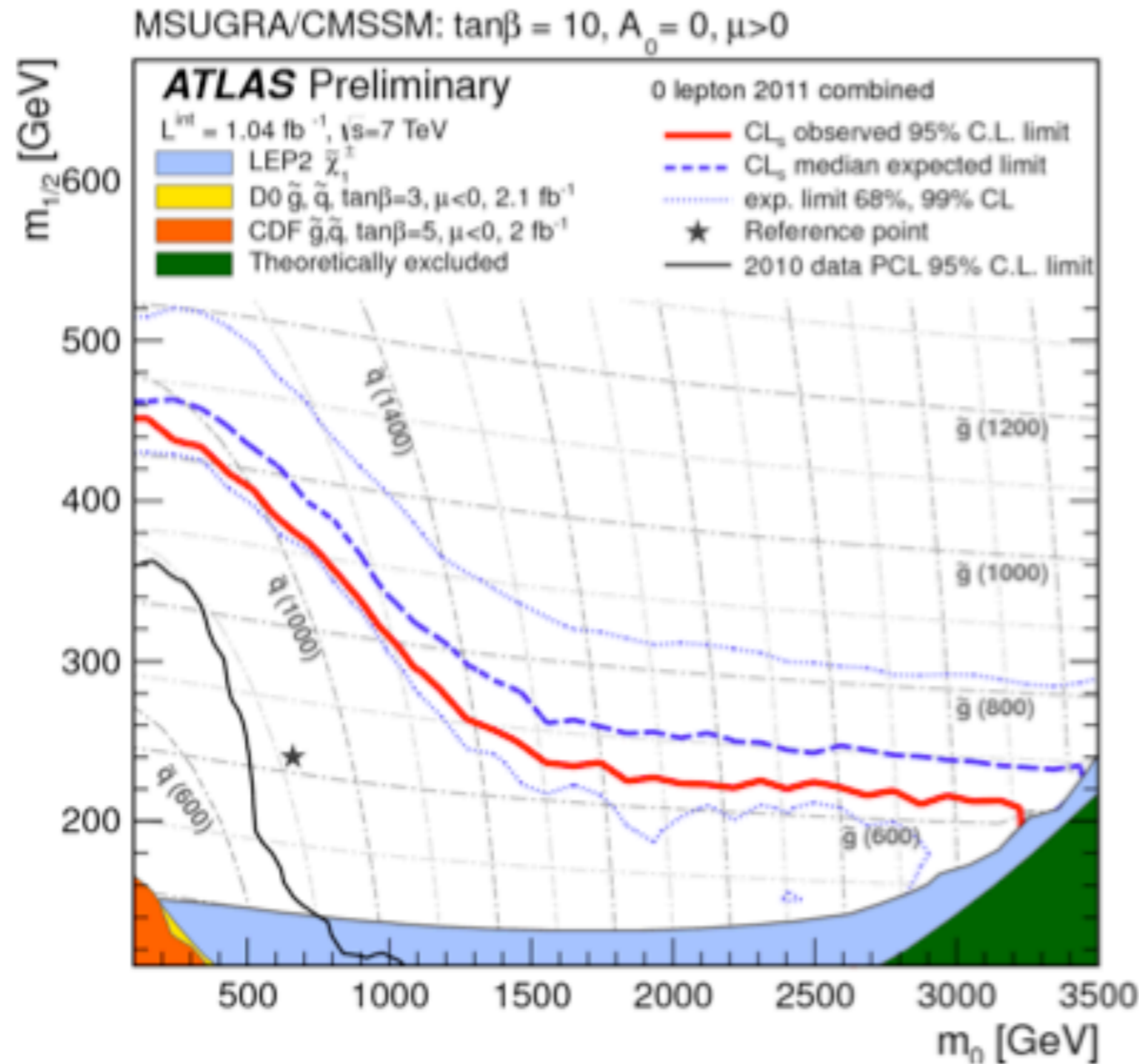
**注意！** EPS conference のスライドをダウンロードして勝手に貼り付けて勝手なこと書いています（いいのかな・・・）。書いてること不正確だったり解釈を間違えてるかもしれません。詳しい（正しい）ことは実験の方に聞いて下さい！



● まず SUSY



## MSUGRA/CMSSM $A_0=0, \tan\beta=10, \mu>0$



Exclude at 95% C.L

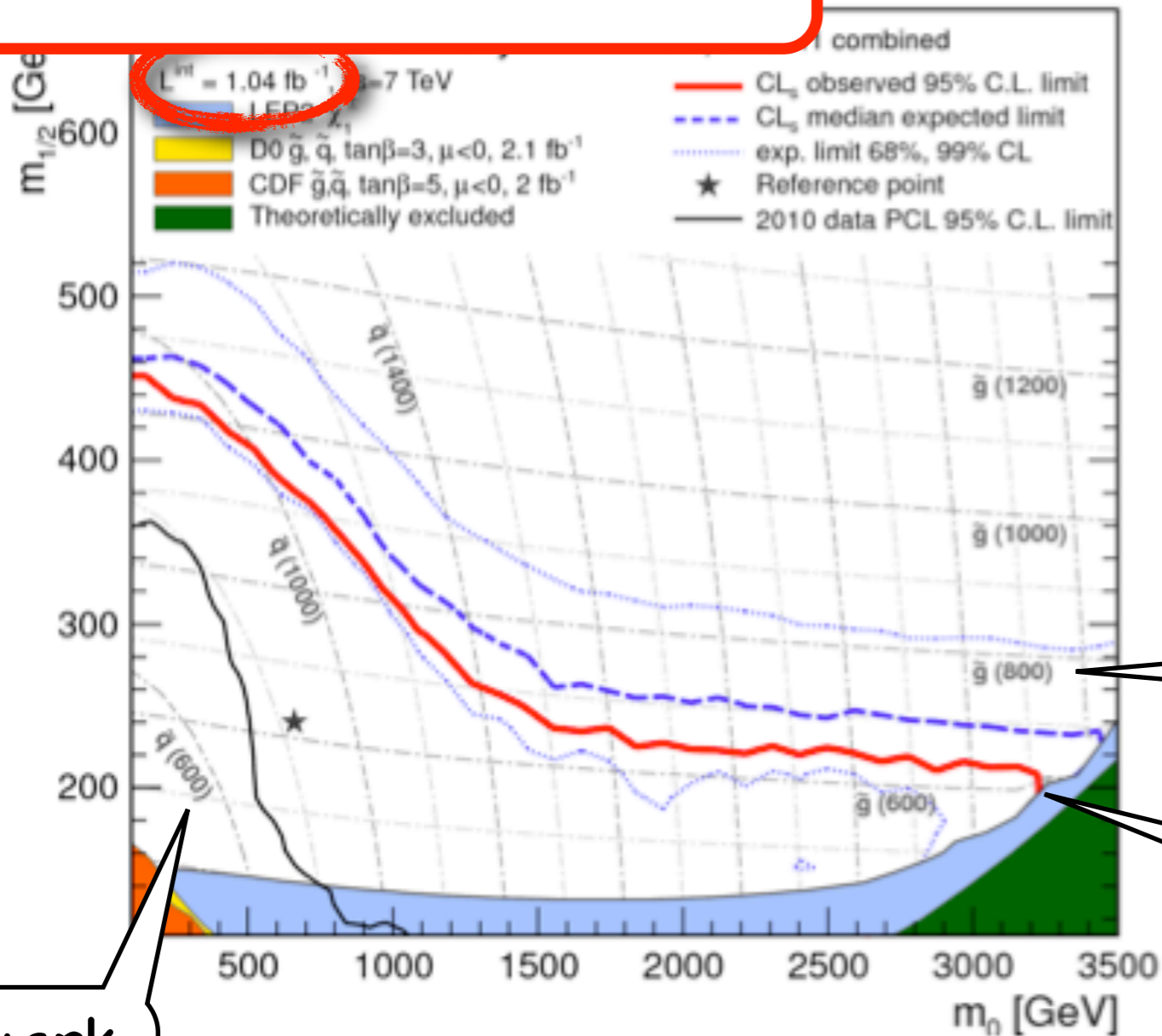
If  $m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{q}}$ , masses  $< 980 \text{ GeV}$



# SUSY search A.Taffard [ATLAS] Euroconference on HEP 2011

MSUGRA/CMSSM  $A_0=0, \tan\beta=10, \mu>0$

最新の結果であることを表している



この図では  
mSUGRA というモデルを  
仮定して解析しているが  
典型的なSUSYモデルでは  
squark, gluino mass に対して  
大雑把には同じ制限

gluino  
mass

この赤い線より  
下が excluded

squark  
mass

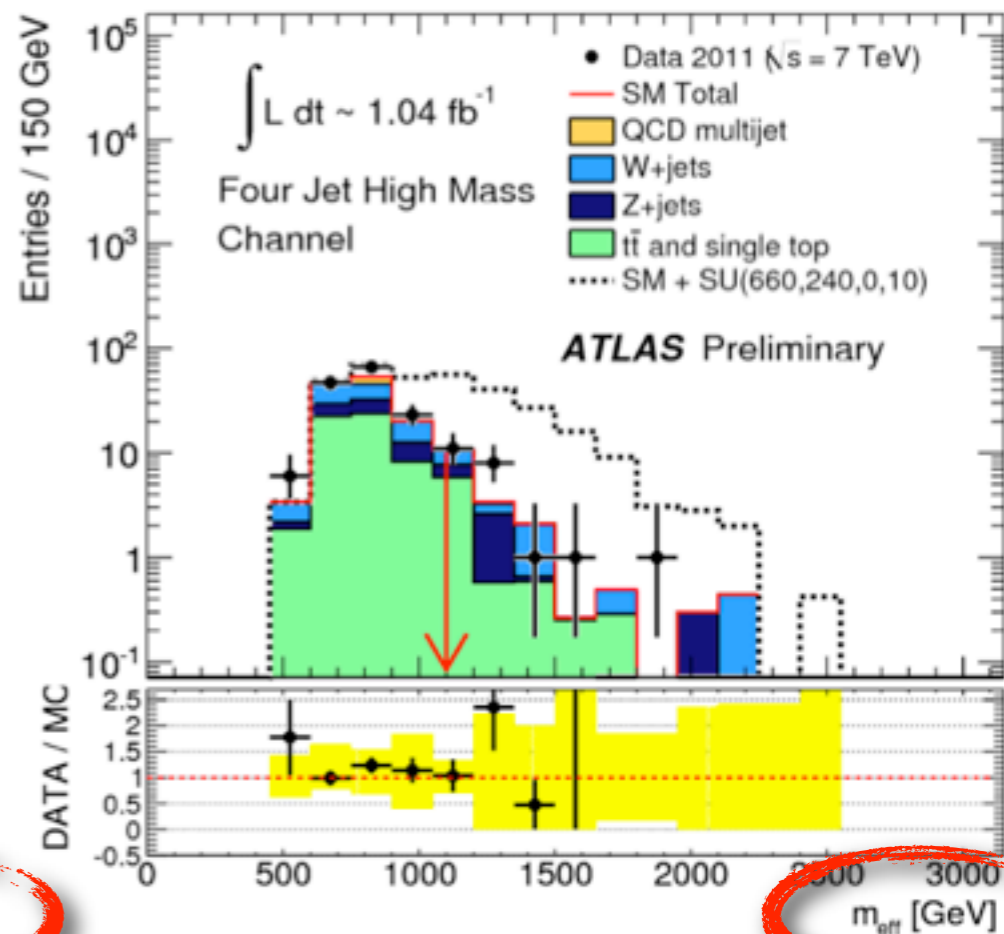
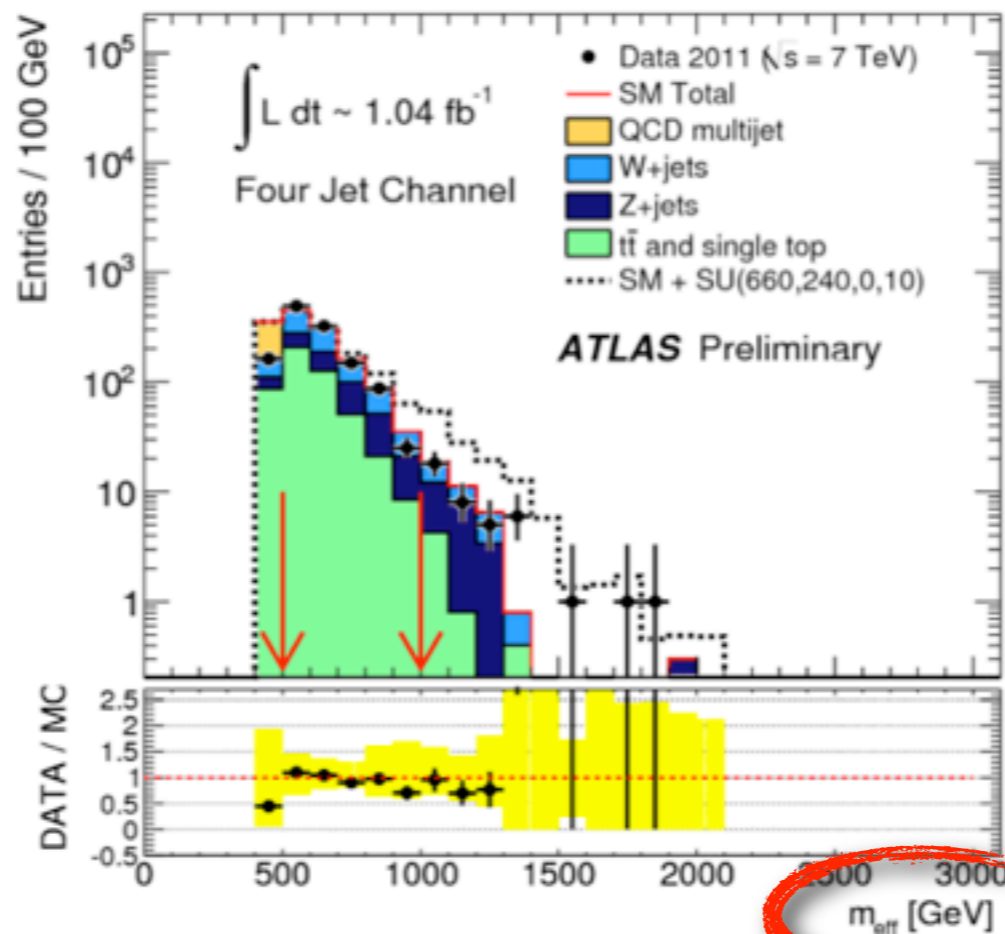
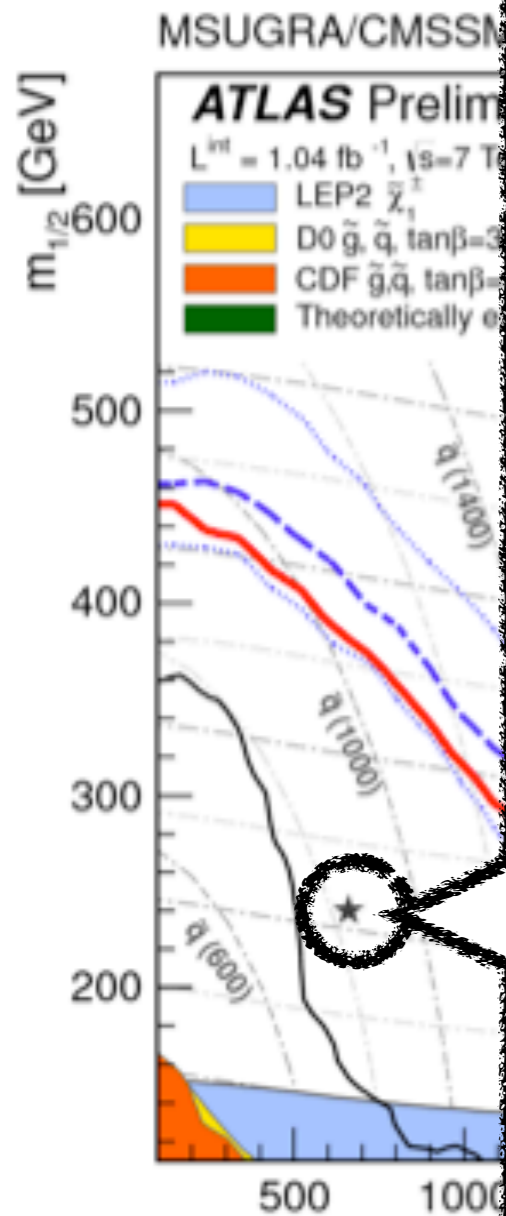
exclude at 95% C.L.  
If  $m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{q}}$ , masses < 980 GeV



MSUGRA/CMSSM  $A = 0$ ,  $\tan\beta = 10$ ,  $\mu > 0$

例えばこの点はどんな感じに

exclude されているのかというと . . .



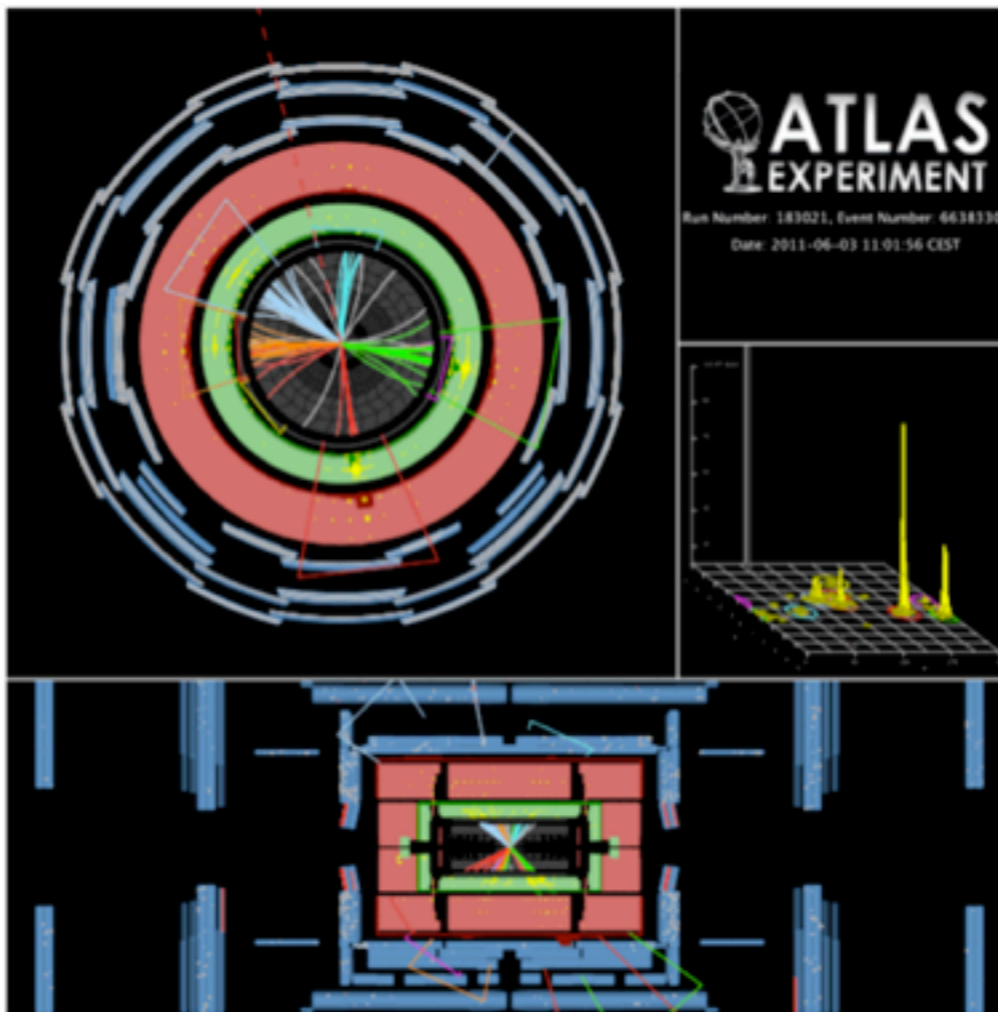
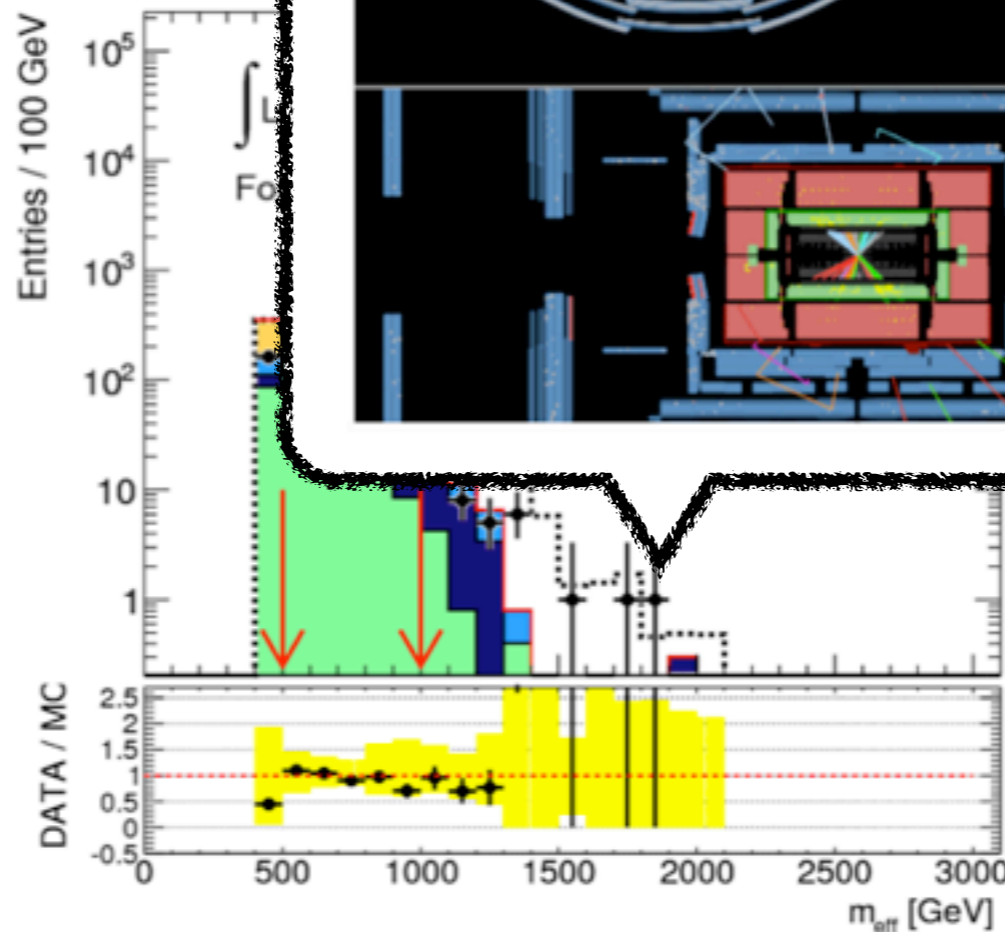
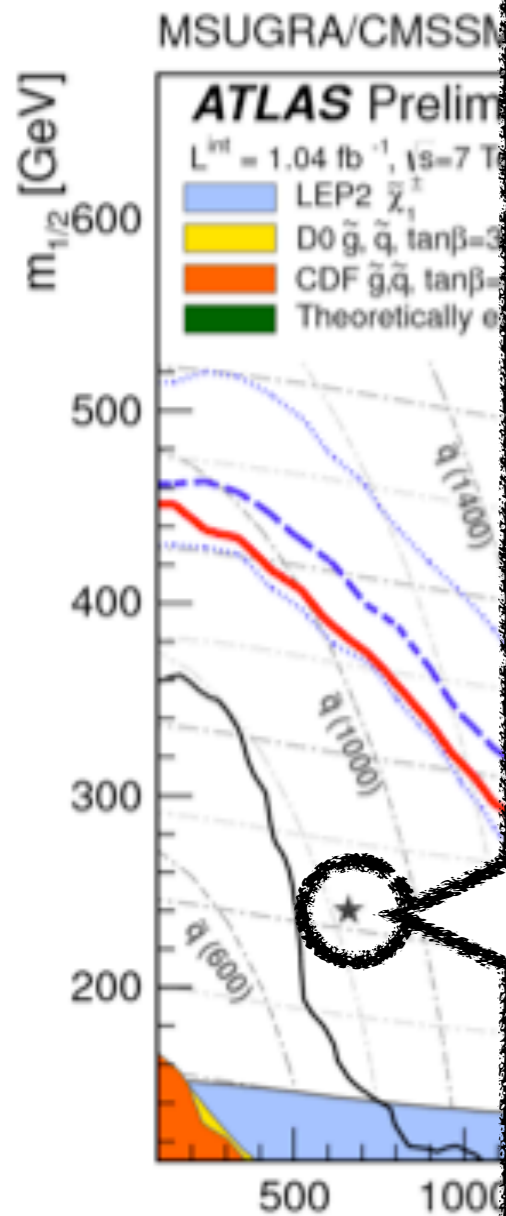
Exclude at 95% C.L  
 If  $m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{q}}$ , masses  $< 980 \text{ GeV}$

さっきやった Meff

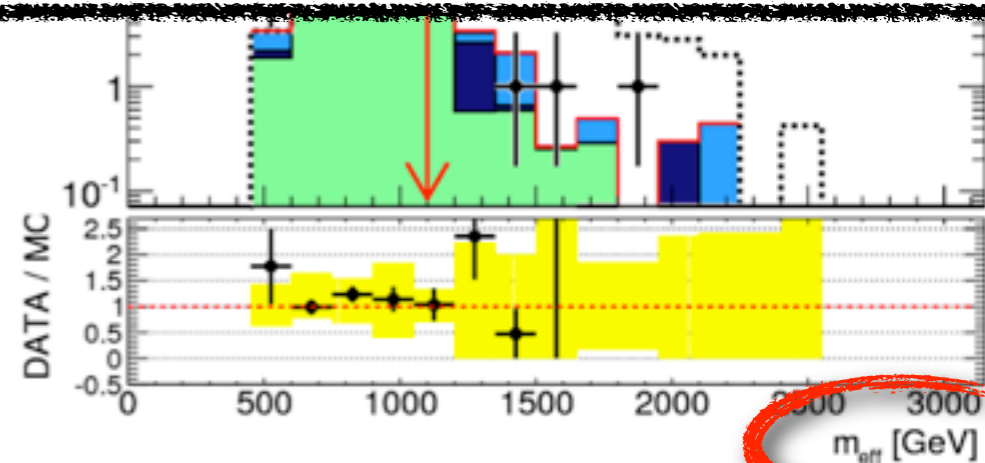


# SUSY search A.Ta

## MSUGRA/CMSSM



$M_{eff} = 1810 \text{ GeV}$   
 $E_T^{miss} = 460 \text{ GeV}$   
 Jet  $p_T = 528, 418, 233, 171, 42 \text{ GeV}$

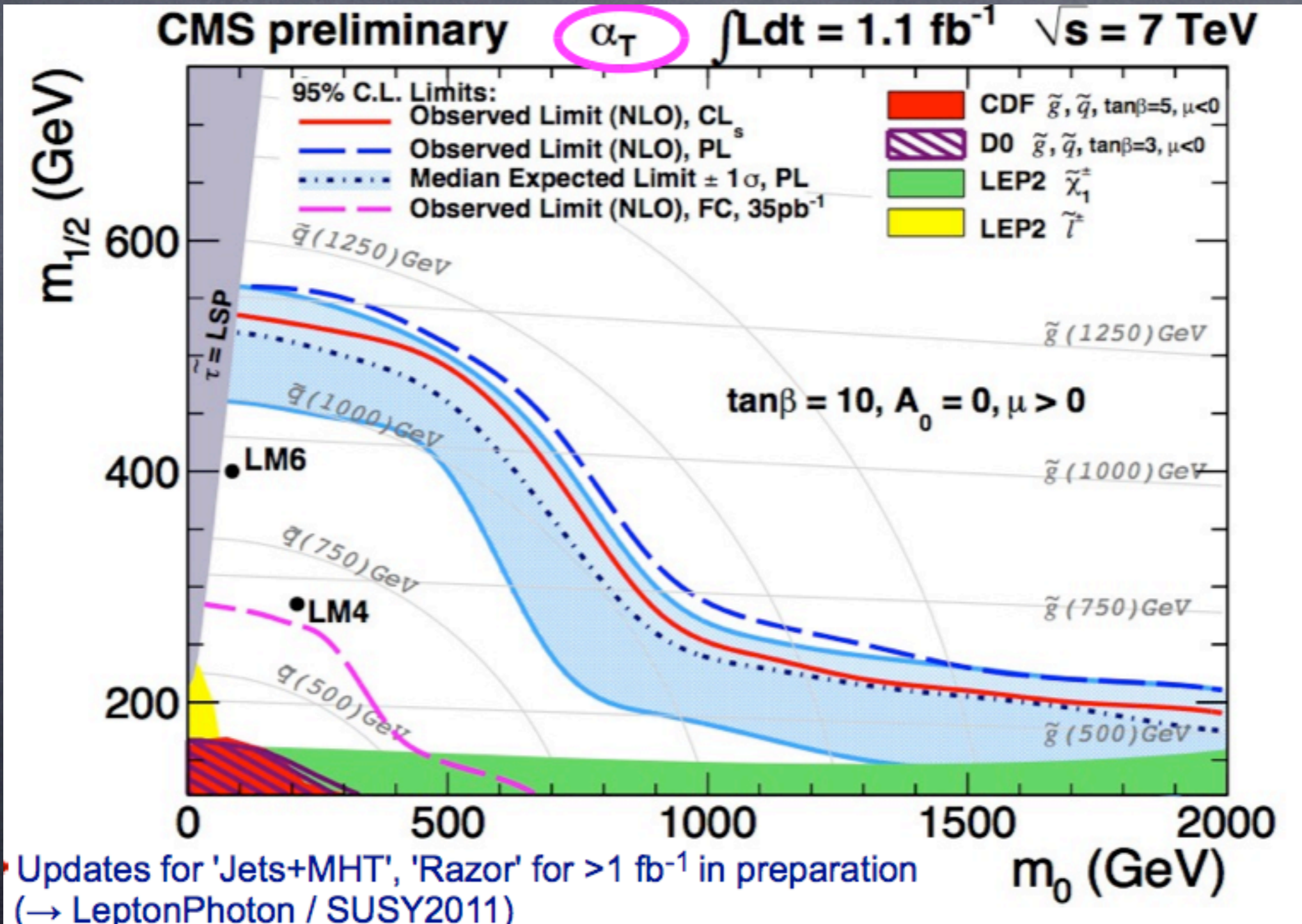


Exclude at 95% C.L.  
 If  $m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{q}}$ , masses < 980 GeV

さっきやった  $M_{eff}$



CMSも同様





● 次に Higgs (ひょっとすると兆候?)

● (注) SUSY にとっては Higgs が 130 GeV以下かどうかがとても大事!

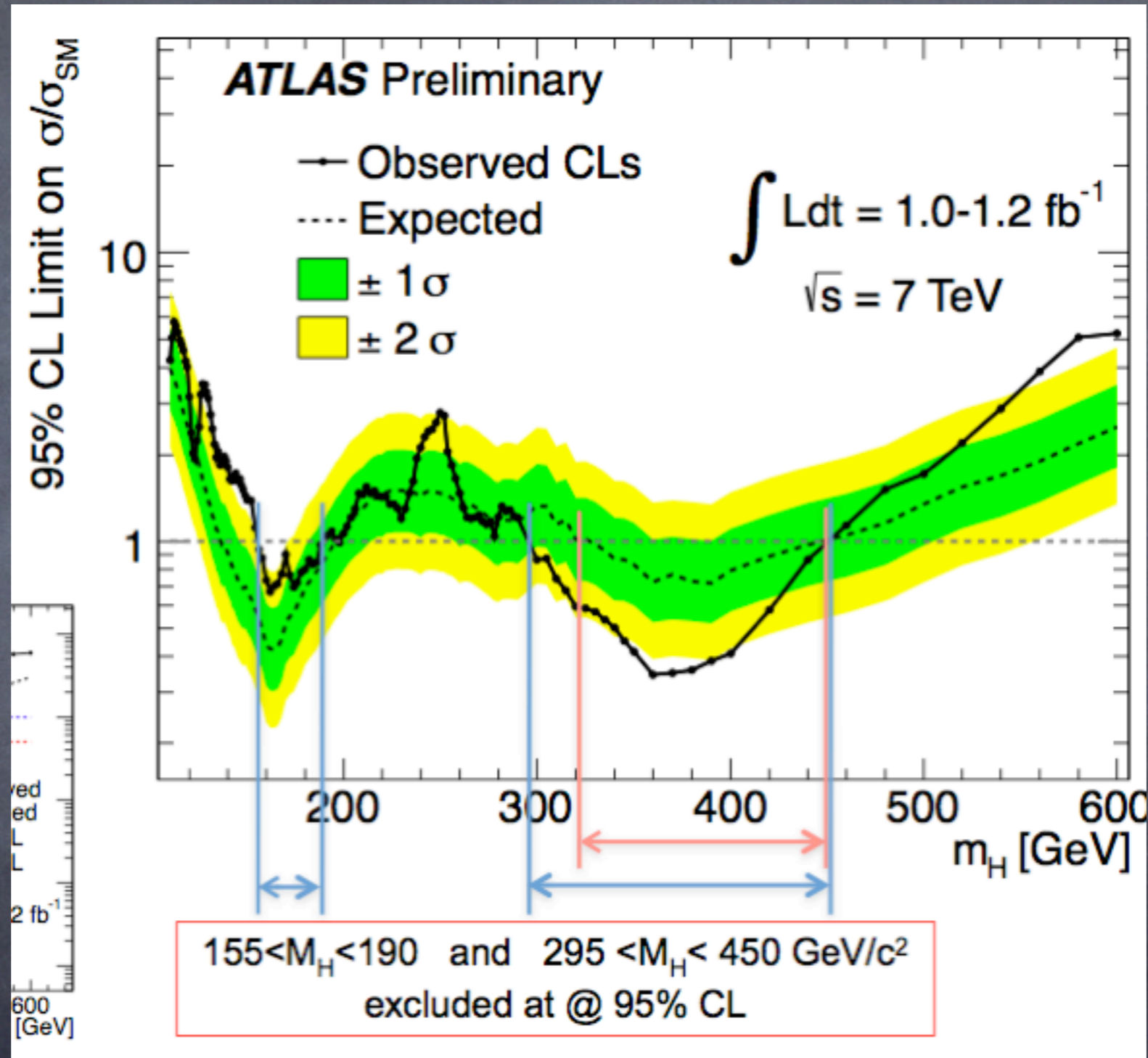
$$m(\text{higgs}) < 130 \text{ GeV} \quad \text{for MSSM}$$

[cf. Okada, Yamaguchi, Yanagida, '91 他]



# Higgs search K.Cranmer [ATLAS] Euroconference on HEP 2011

この絵は exclusion



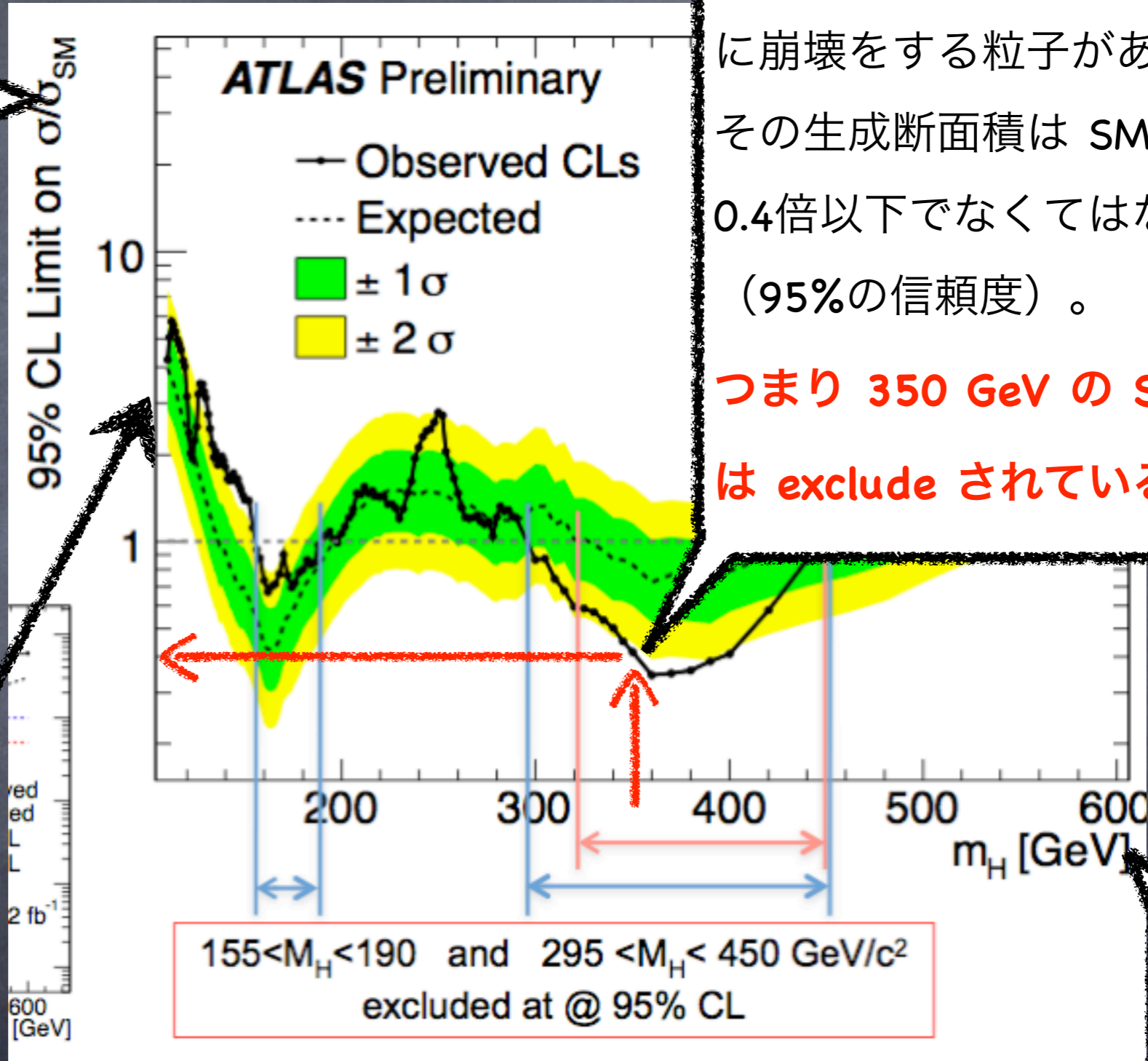


# Higgs search K.Cranmer [ATLAS] Eu

この絵は exclusion

Y軸 =

その質量を持った Higgsっぽい粒子があった時、その生成断面積が (95%の信頼度で) SM Higgs の予言する生成断面積に比べて何倍まで許されるか。黒い実線が今回の結果。



例えば 350 GeV の、Higgs と同じように作られて同じように崩壊をする粒子があったら、その生成断面積は SM Higgs の 0.4倍以下でなくてはならない (95%の信頼度)。

つまり 350 GeV の SM Higgs は exclude されている。

X軸 =  
Higgs質量

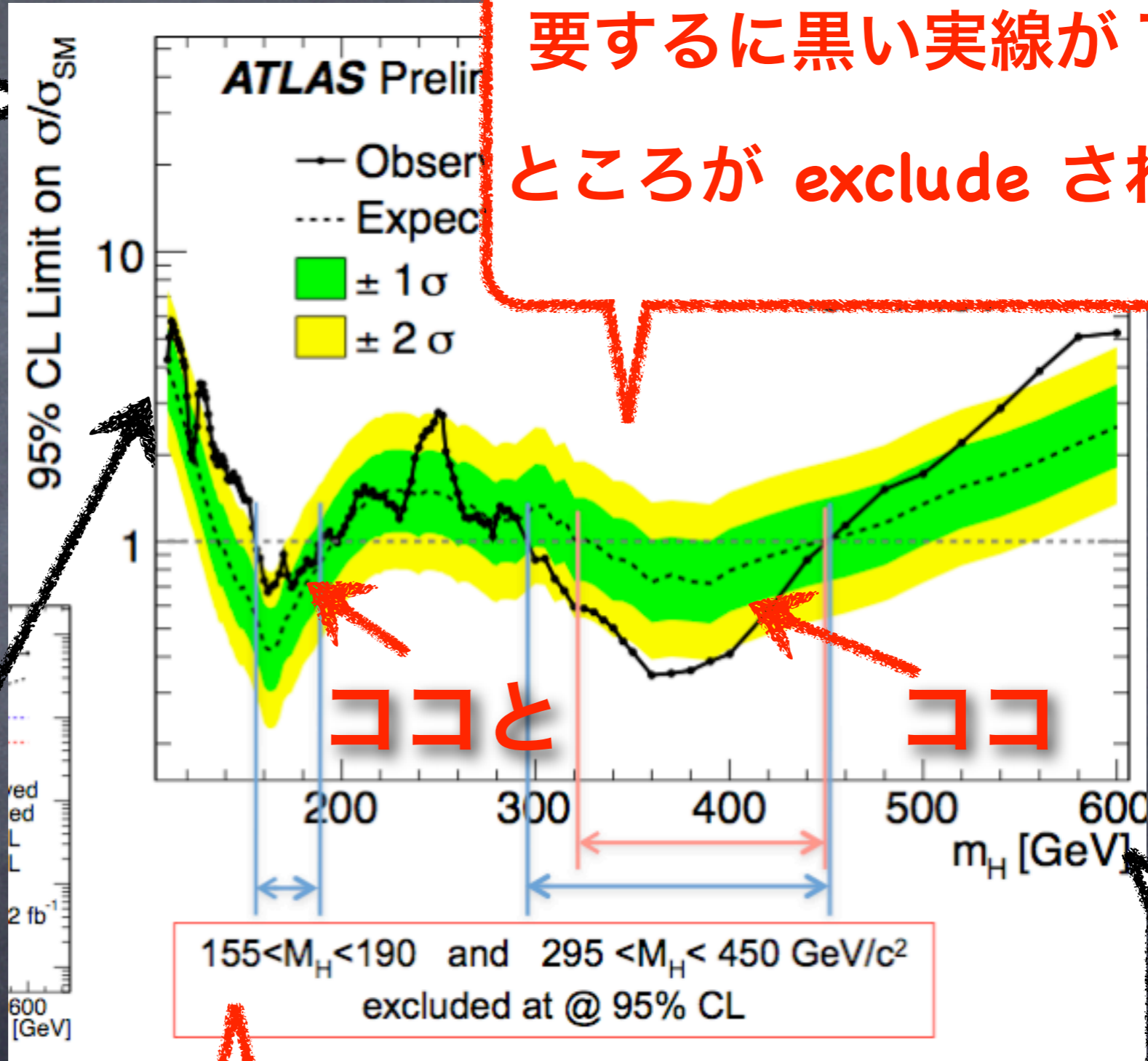


# Higgs search K.Cranmer [ATLAS] Euroconference on HEP 2011

この絵は exclusion

Y軸 =

その質量を持った Higgsっぽい粒子があった時、その生成断面積が (95%の信頼度で) SM Higgs の予言する生成断面積に比べて何倍まで許されるか。黒い実線が今回の結果。



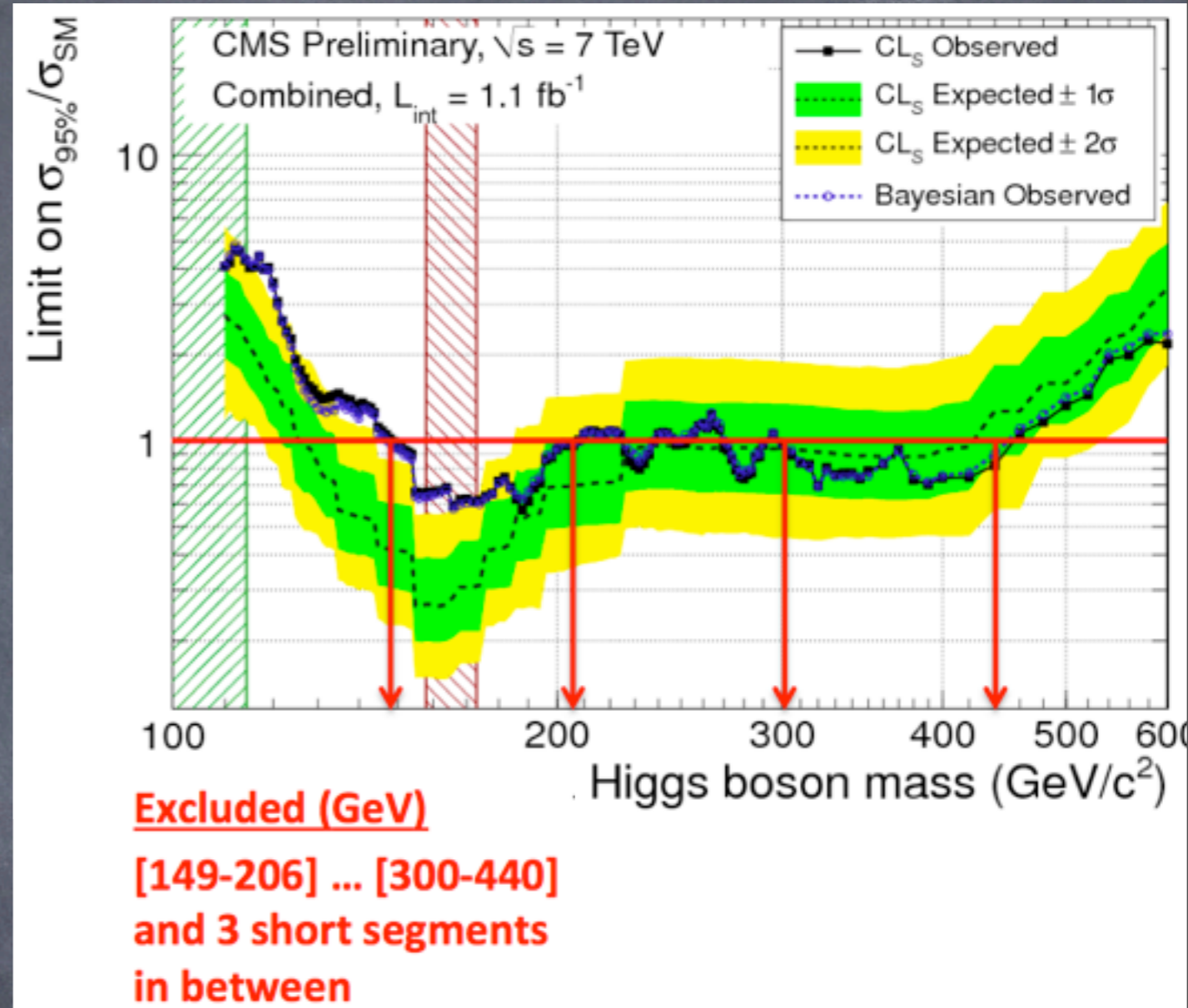
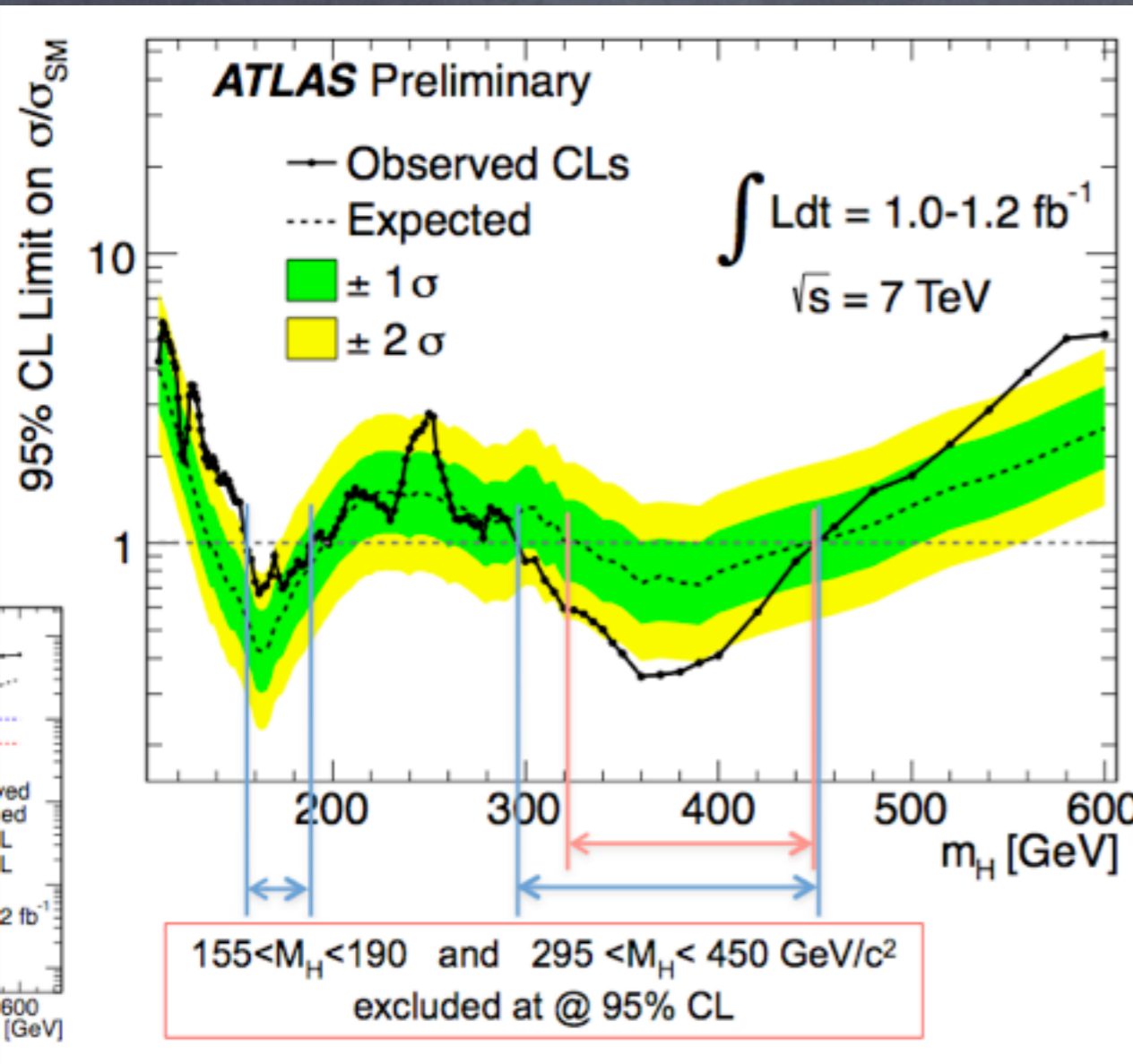
要するに黒い実線が1以下のところが exclude されている。

X軸 = Higgs質量

SM Higgs は 155~190 & 295~450 GeV にはない (95%)



# Higgs search ATLAS & CMS 見比べると . . .



K.Cranmer [ATLAS] Euroconference on HEP 2011

A.Korytov [CMS] Euroconference on HEP 2011

どちらも [150-200] と [300-450] 辺りを exclude

(その間の [200-300] もあと一息に見える。)

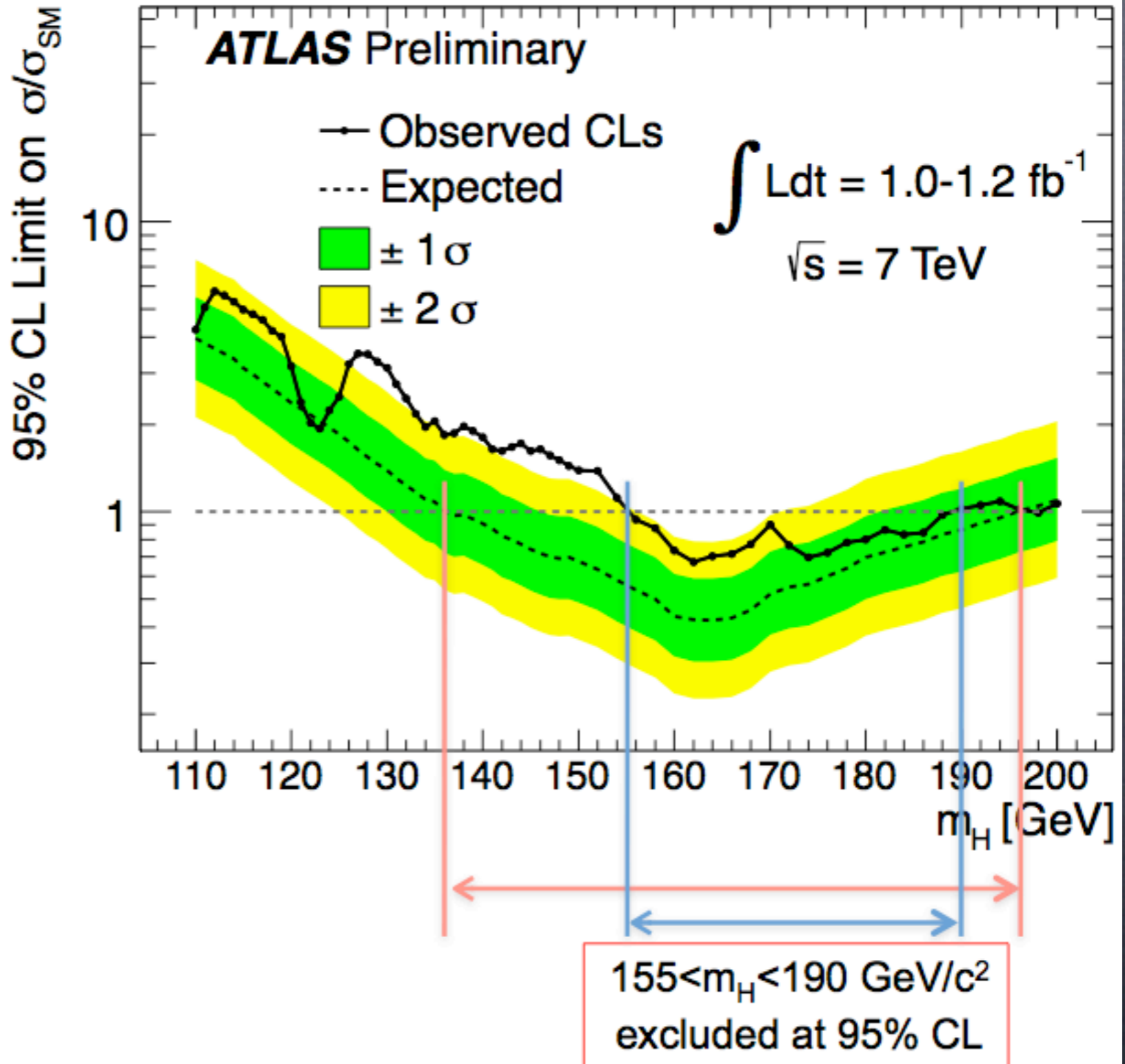


# Higgs search : 低い mass のところを詳しく見ると・・・

K.Cranmer [ATLAS] Euroconference on HEP 2011

Impressive sensitivity to a Higgs boson in the mass range 135-200 GeV

Excess in  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  leads to weaker-than-expected limits near  $M_H = 130-160$  GeV





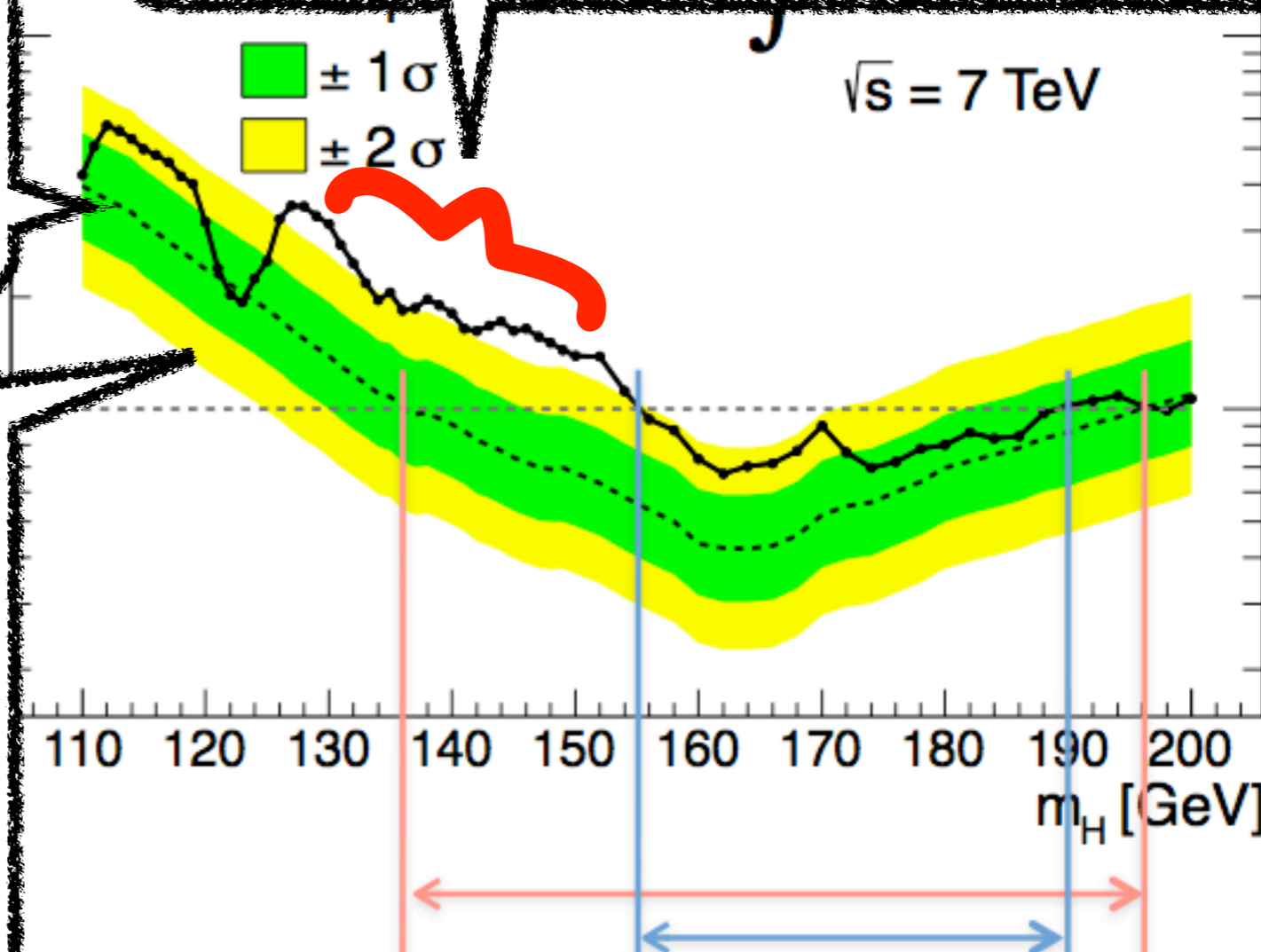
# Higgs search : 低い mass の

この辺は黄色より上にはみ出てる。  
つまり思っていたより (95%範囲内より)  
exclude 出来なかった。

つまり平均的バックグラウンドに比べて  
event が多かったことを表している。

点線は、Higgs がその領域に  
ないと仮定したとき、  
同じ統計 ( $1\text{fb}^{-1}$ ) の実験を  
何セットもやったら平均的に  
得られる exclusion の線

(だと思えます。違ってたらゴメンナサイ)



155 <  $m_H$  < 190  $\text{GeV}/c^2$   
excluded at 95% CL

黄色 (緑) は、Higgs がその領域に  
ないと仮定したとき、  
同じ統計 ( $1\text{fb}^{-1}$ ) の実験を  
何セットもやったら 95% (68%) の  
確率で exclusion 線が入る領域。

(だと思えます。違ってたらゴメンナサイ)



# Higgs search : 低い mass のところを詳しく見ると . . .

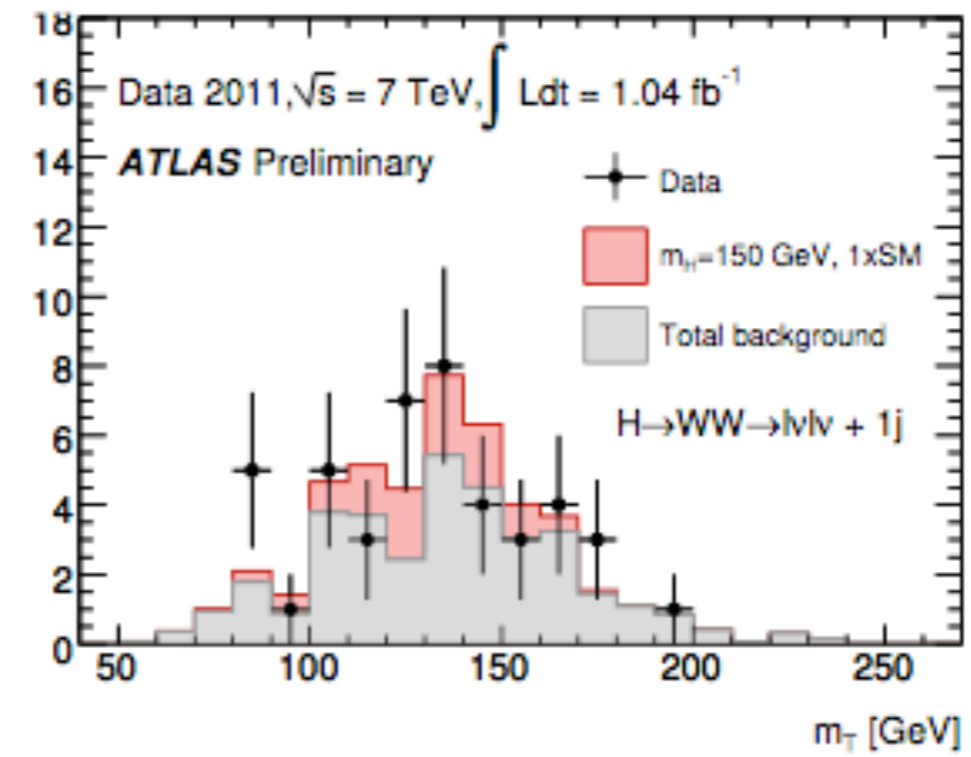
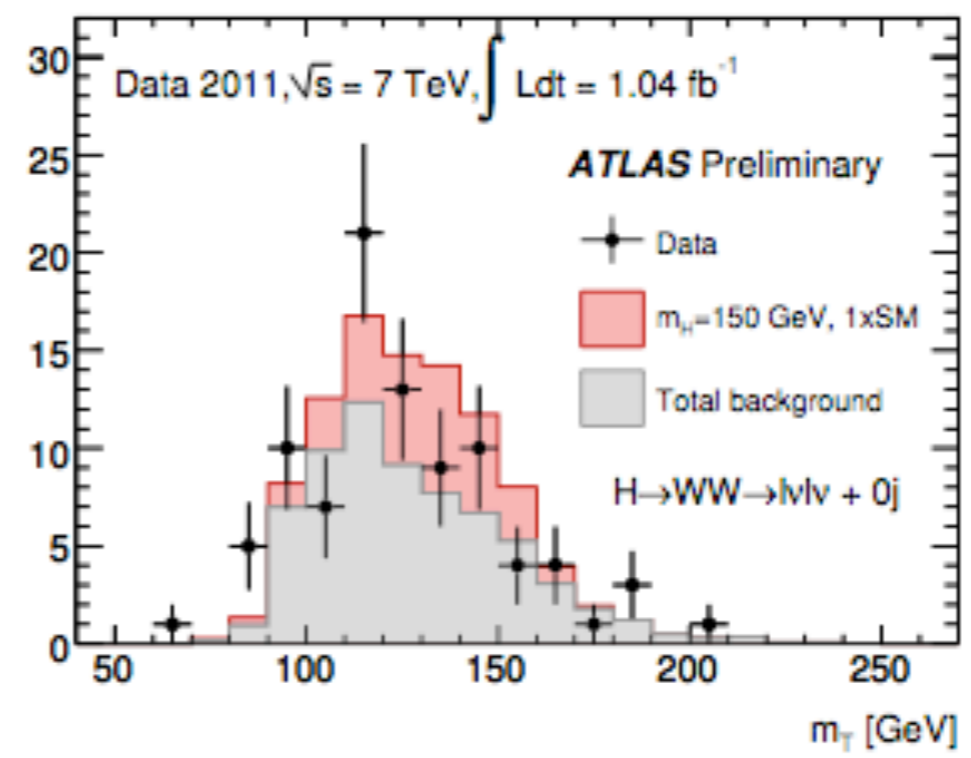
K.Cranmer

## The $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ Channels

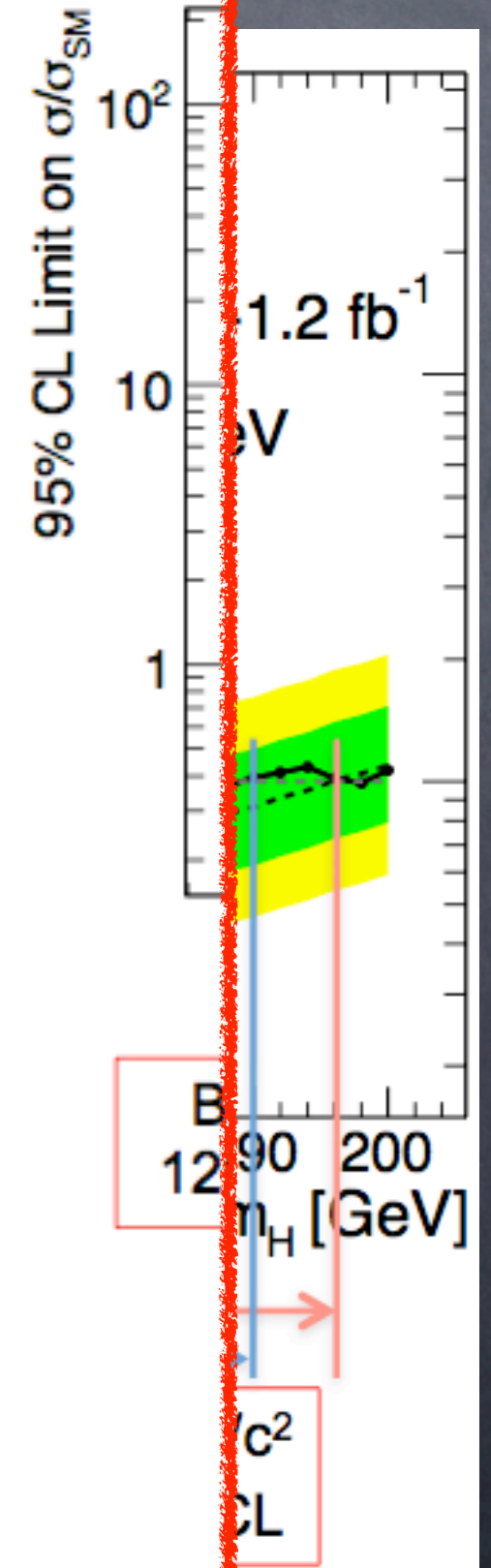
Impressive sensitivity to a Higgs boson in the mass range 135-200 GeV

Excess in  $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$  leads to weaker-than-expected limits near  $M_H = 130-160$  GeV

95% CL Limit on  $\sigma/\sigma_{SM}$   
Events / 10 GeV



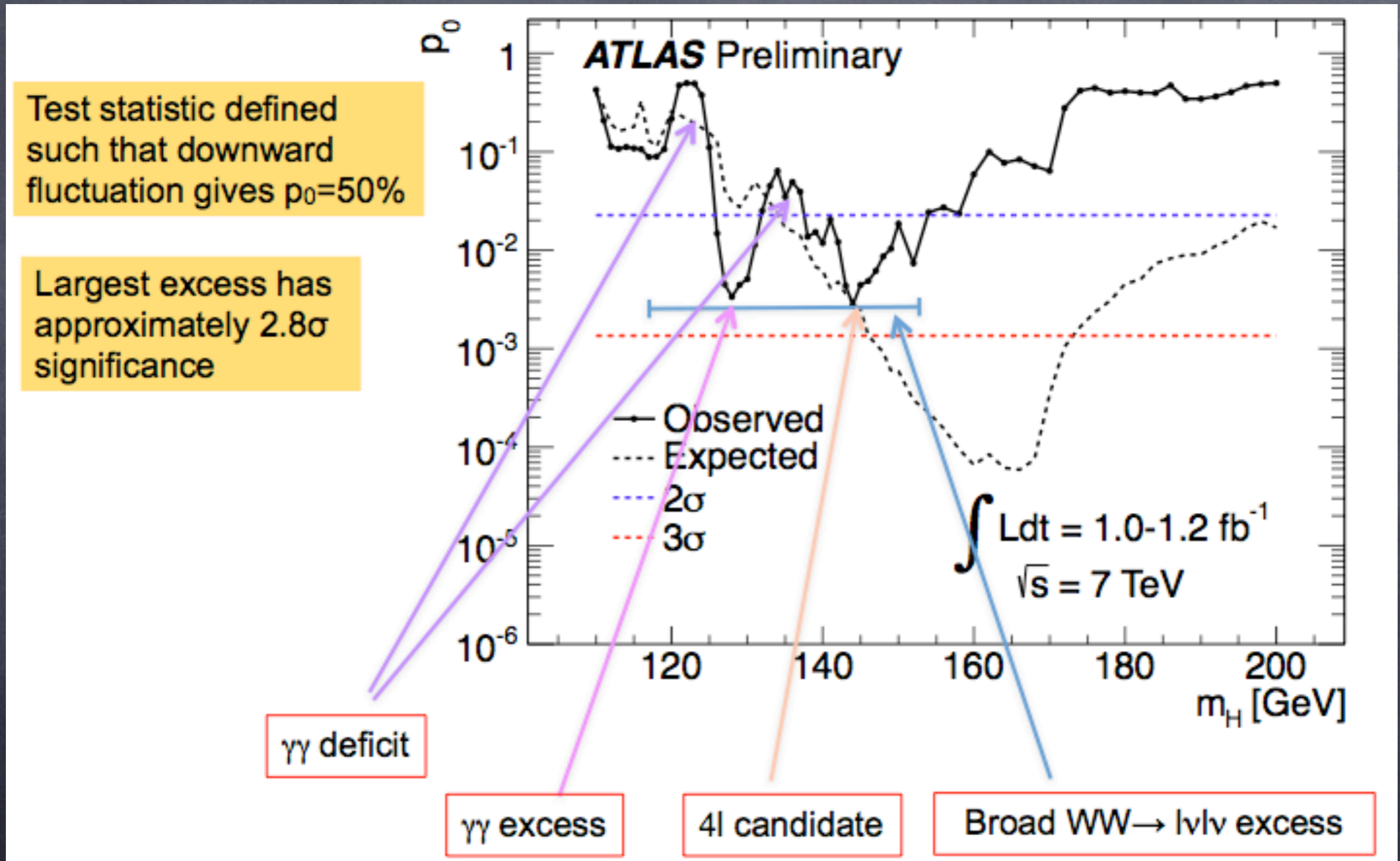
$$m_T = \sqrt{(E_T^{\ell\ell} + E_T^{\text{miss}})^2 - (\mathbf{P}_T^{\ell\ell} + \mathbf{P}_T^{\text{miss}})^2}$$





# Higgs search : 低い mass のところを詳しく見ると . . .

background only を仮定したときの p値 (注 : この図は下に行くほど excess)



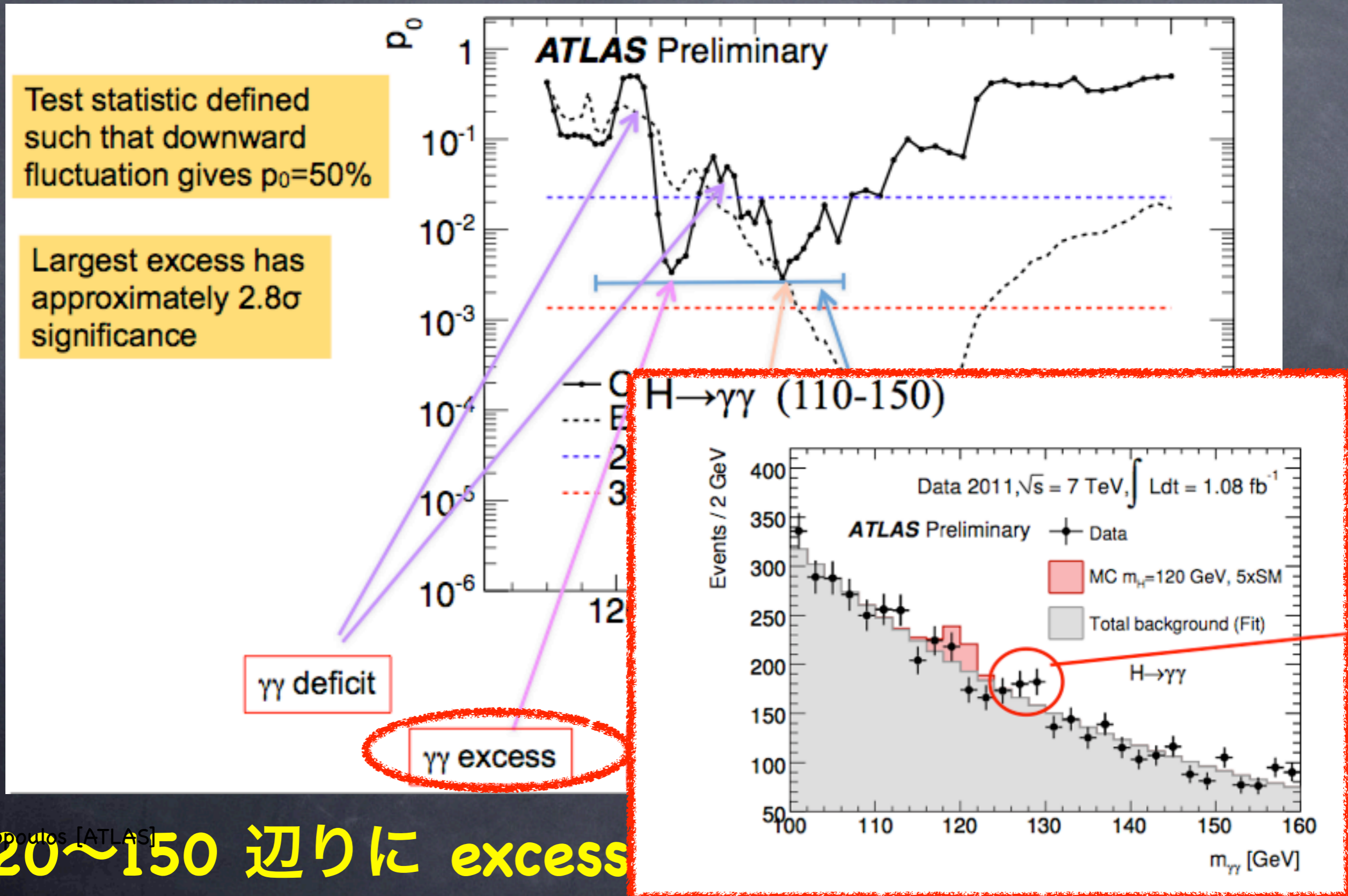
## 120~150 辺りに excess ....!

K.Cranmer [ATLAS]  
Euroconference on HEP 2011



# Higgs search : 低い mass のところを詳しく見ると . . .

background only を仮定したときの p値 (注 : この図は下に行くほど excess)



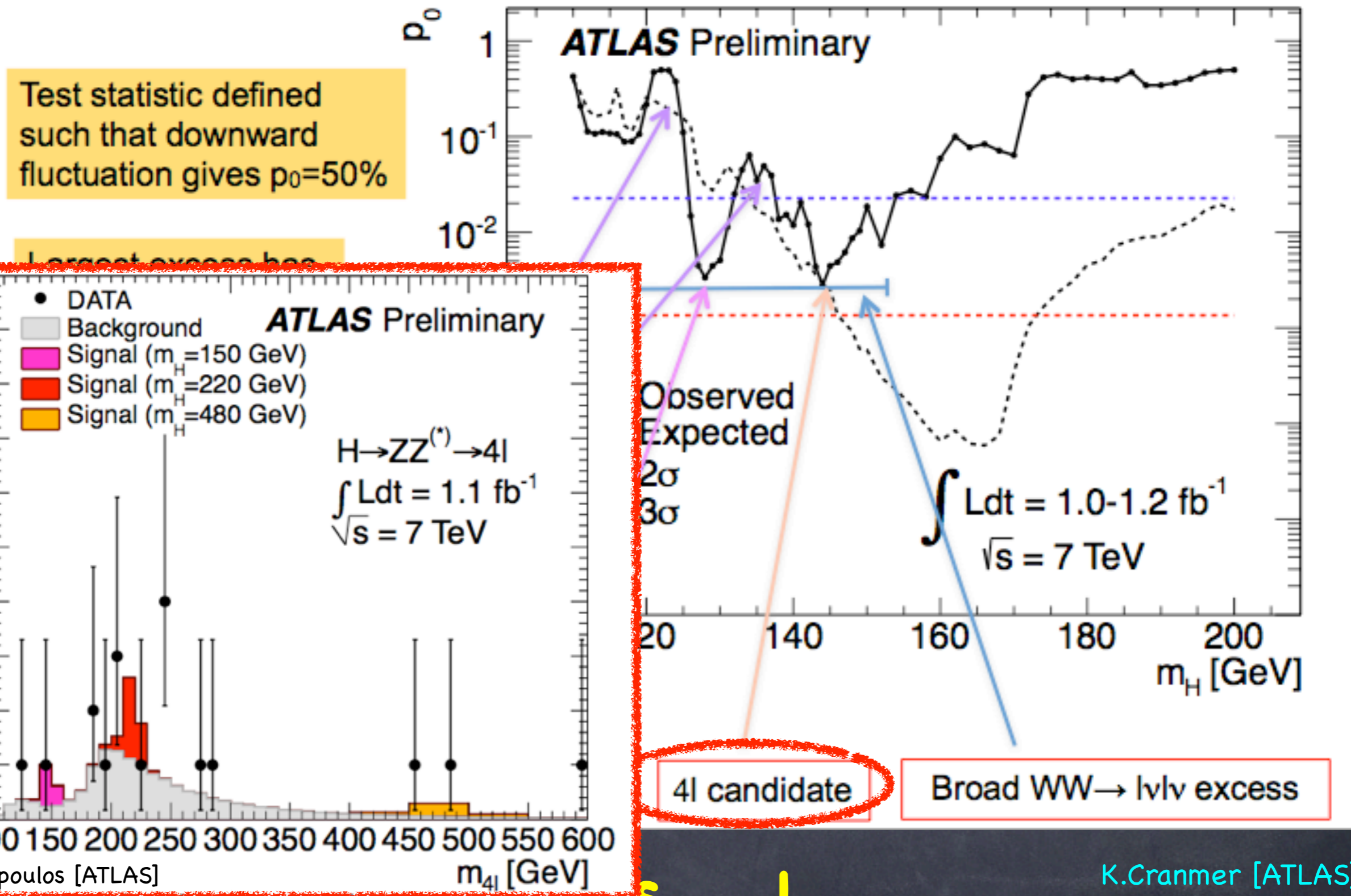
K.Nikolopoulos [ATLAS]

## 120~150 辺りに excess



# Higgs search : 低い mass のところを詳しく見ると . . .

background only を仮定したときの p値 (注: この図は下に行くほど excess)



K.Nikolopoulos [ATLAS]

K.Cranmer [ATLAS]  
Euroconference on HEP 2011



# Higgs search : 低い mass のところを詳しく見ると . . .

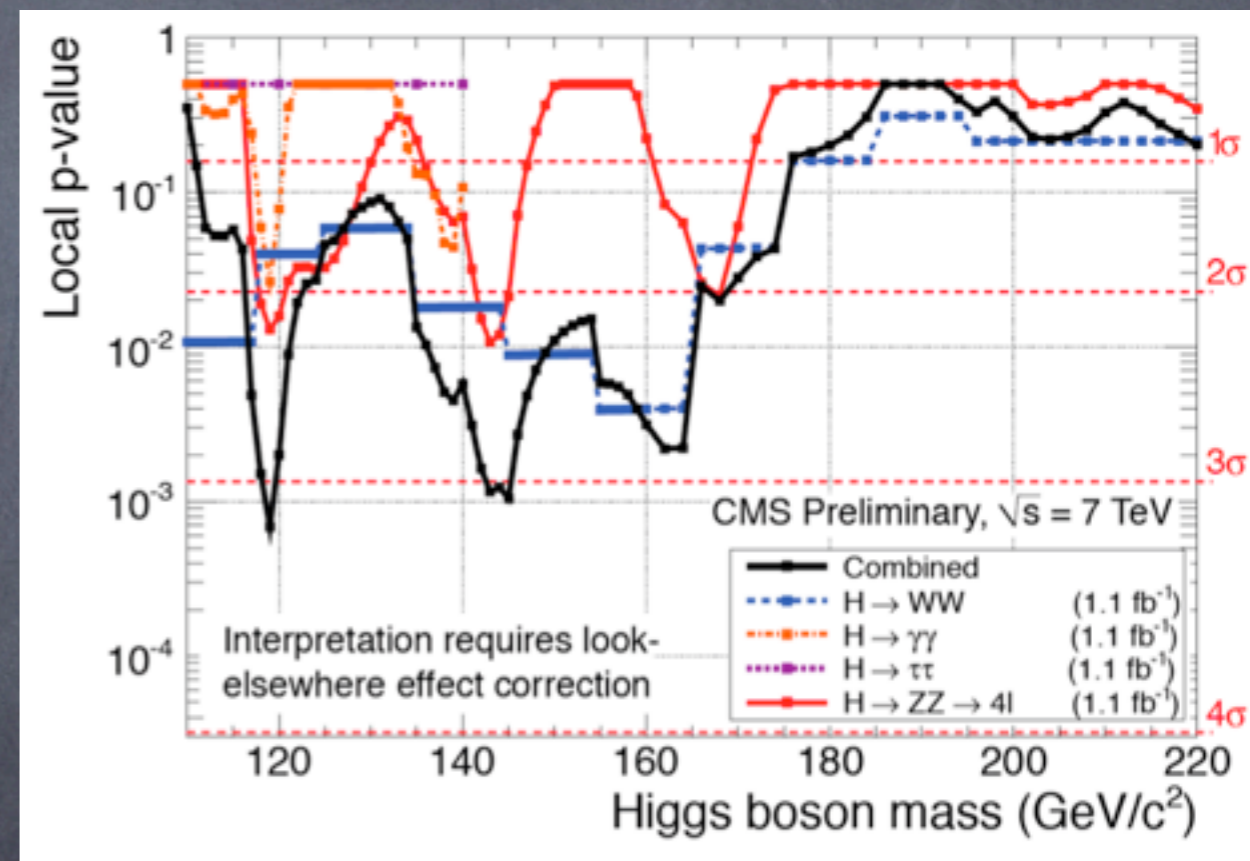
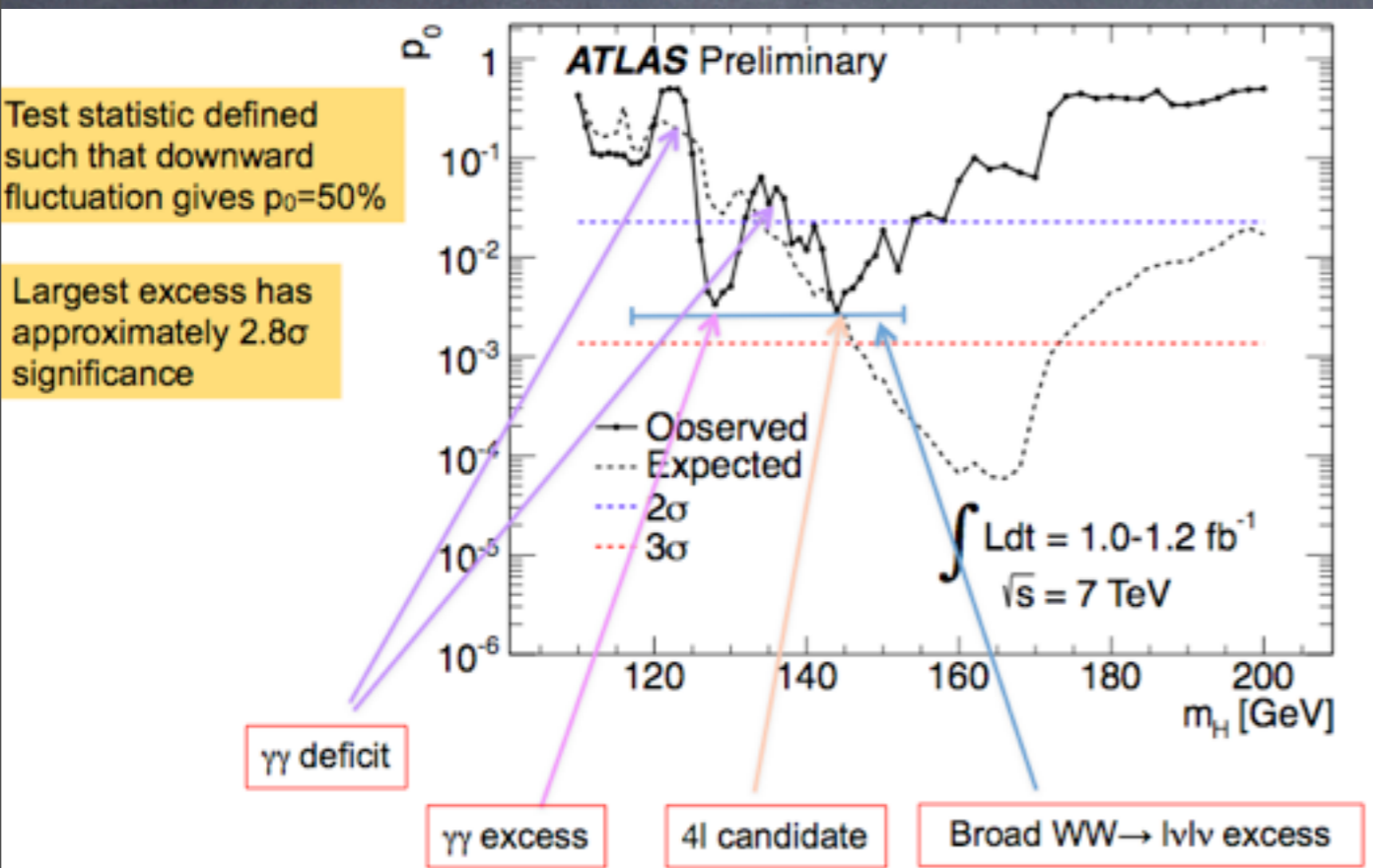
background only を仮定したときの p 値

(注 : この図は下に行くほど excess)

## ATLAS も CMS も 120-150 辺りに excess がある . . . . !!!

K.Cranmer [ATLAS] Euroconference on HEP 2011

A.Korytov [CMS] Euroconference on HEP 2011



## combined の結果が楽しみ！！

今日 (日本時間の20:30) の記者会見? 水曜のトーク? Lepton Photon 会議 (8月) ??



Part III

SUSY · · · ?



• Higgs は軽めにありそうだ。composite でなく elementary Higgs . . . SUSY と相性よい。

でも 120~150 の excess が本物なら . . .

多くの模型 (mSUGRA, GMSB) が予言する典型的な値 (< 120 GeV) よりちょっと重い。

特に 130~150 だとMSSMでは厳しい。 (→ NMSSM??)

• そもそも SUSY 粒子は見つかっていない (> 1TeV)  
それでも SUSY があると思っているのか??

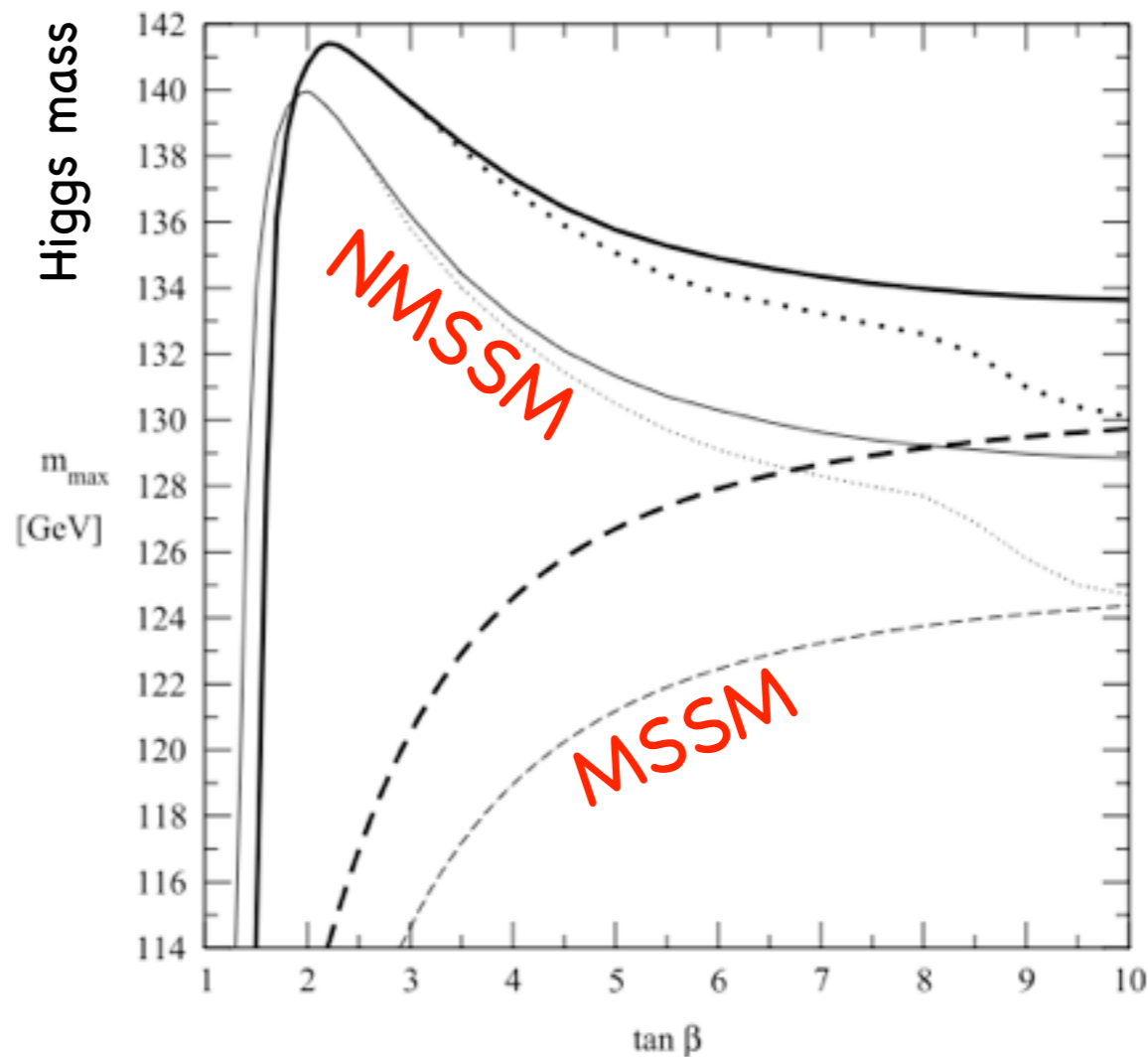


- Higgs は軽めにありたい  
elementary Higgs . . .

でも 120~150 の excess が本物  
多くの模型 (mSUGRA, GMSB)  
( $< 120$  GeV) よりちょっと重

特に 130~150 だとMSSMでは厳しい。 (→ NMSSM???)

- そもそも SUSY 粒子は見つかっていない ( $> 1$ TeV)  
それでも SUSY があると思っているのか??



U. Ellwanger, et.al. Phys.Rept.496 (2010)



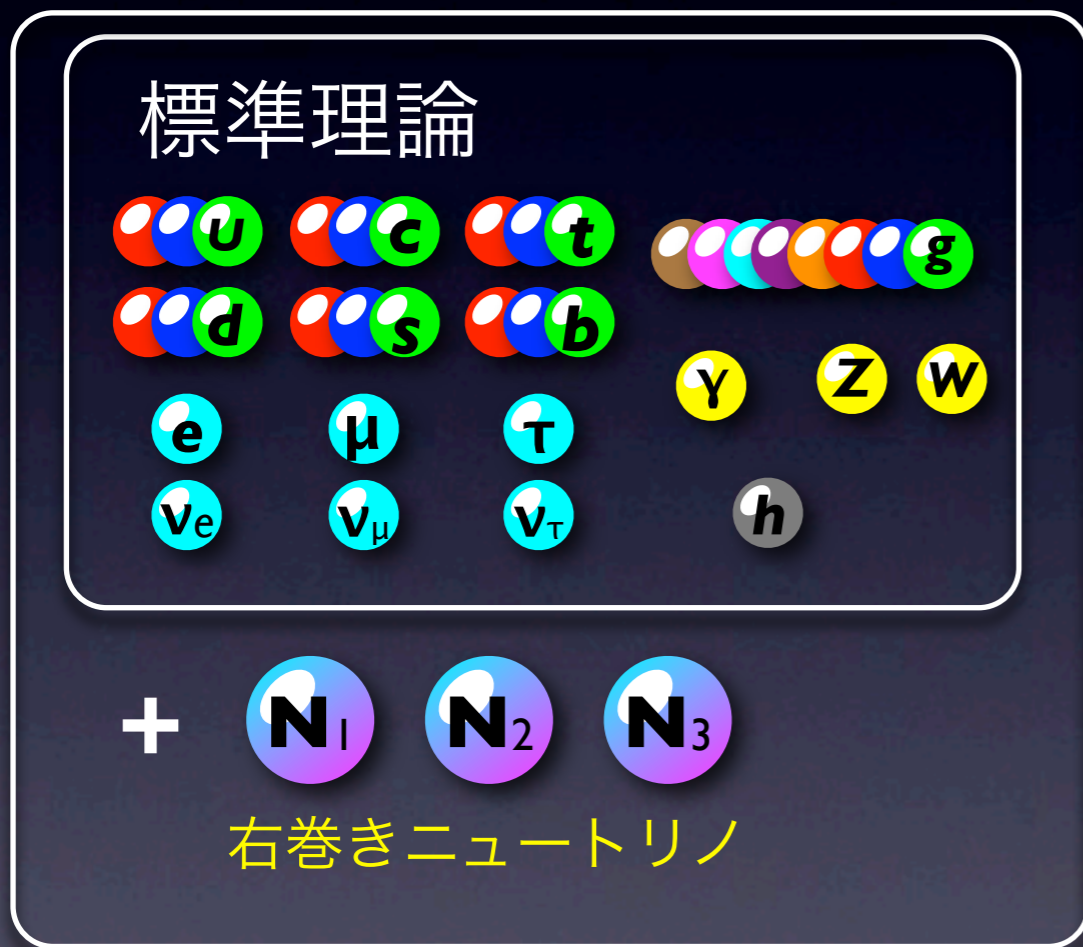
# SUSY があると本気で思っているのか？



# SUSY があると本気で思っているのか？

すごく小さいニュートリノ質量 と 宇宙の物質 > 反物質

→ 重い右巻きニュートリノ の存在を強く示唆している。



(1)  $\nu$  のすごく軽い質量を説明.

[シーソー機構] Yanagida, 1979 他

(2)  $N_1$  の崩壊 (CP を破っている) で物質 > 反物質を説明.

[レプトジェネシス] Fukugita, Yanagida 1986



宇宙の物質 > 反物質 を説明するには  $N_1$  の質量  $> 10^9 \text{ GeV}$  が必要。

KH, Murayama, Yanagida, '01 + Davidson, Ibarra, '02



# SUSY があると本気で思っているのか？

$N_i$  の質量  $> 10^9$  GeV  $\ggggg$  電弱スケール (100 GeV)

→ たとえ大統一理論がなくても、

$10^9$  GeV までは場の量子論で記述されているだろう。

high energy (short distance) により基本的な理論があると思うと . . .

(今までもそうだった。例：QCD)

naturalness problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$



(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

→ solved by the supersymmetry !

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + (\Lambda^2 - \Lambda^2)$$



フェルミオン

ボゾン



# SUSY があると本気で思っているのか？

さらに・・・大統一理論：美しすぎる！！

標準理論：  
(バラバラ)

$$\left( \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L \quad \left( \text{u} \right)_R \quad \left( \text{d} \right)_R \quad \left( \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \right)_L \quad \left( \text{e} \right)_R \quad \left( \text{N}_i \right)_R$$

$$(3,2)_{+1/6} \quad (\bar{3},1)_{-2/3} \quad (\bar{3},1)_{+1/3} \quad (1,2)_{-1/2} \quad (1,1)_{+1} \quad (1,1)_0$$

SU(5) 大統一理論：

$$\left( \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L \quad \left( \text{u} \right)_R \quad \left( \text{e} \right)_R \quad \left( \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \right)_L \quad \left( \text{d} \right)_R \quad \left( \text{N}_i \right)_R$$

$$10 \quad \bar{5} \quad 1$$

SO(10) 大統一理論：

$$\left( \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L \quad \left( \text{u} \right)_R \quad \left( \text{e} \right)_R \quad \left( \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \right)_L \quad \left( \text{d} \right)_R \quad \left( \text{N}_i \right)_R$$

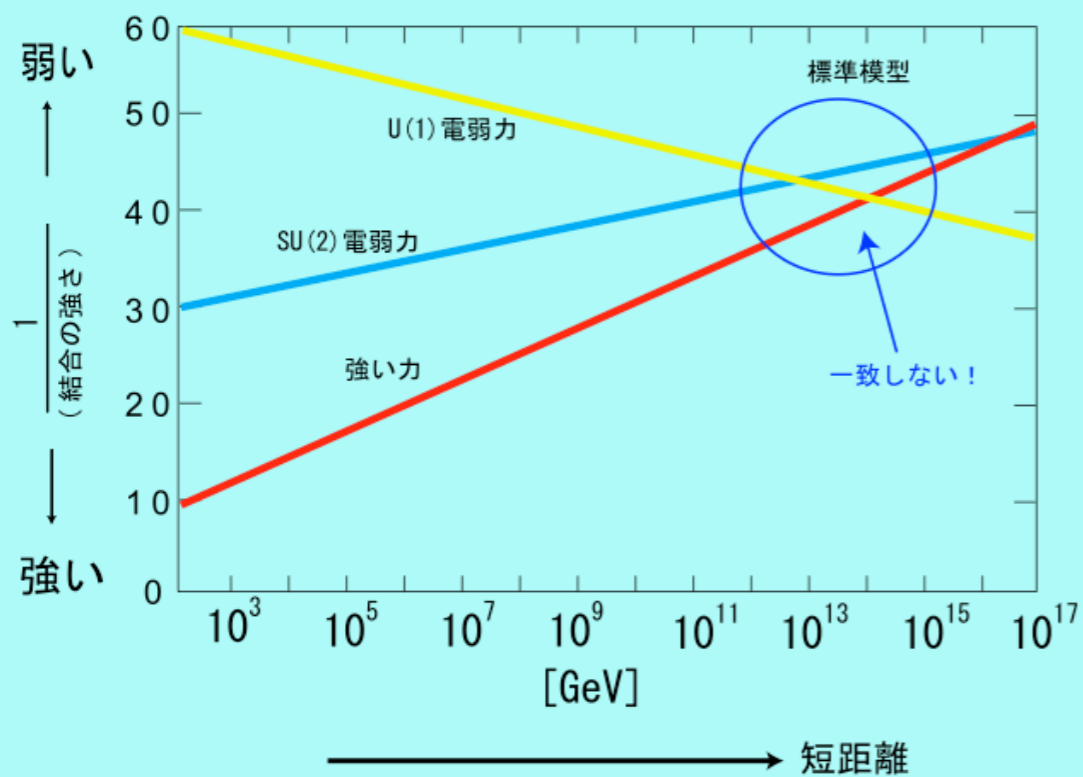
$$16$$



# SUSY があると本気で思っているのか？

そして・・・

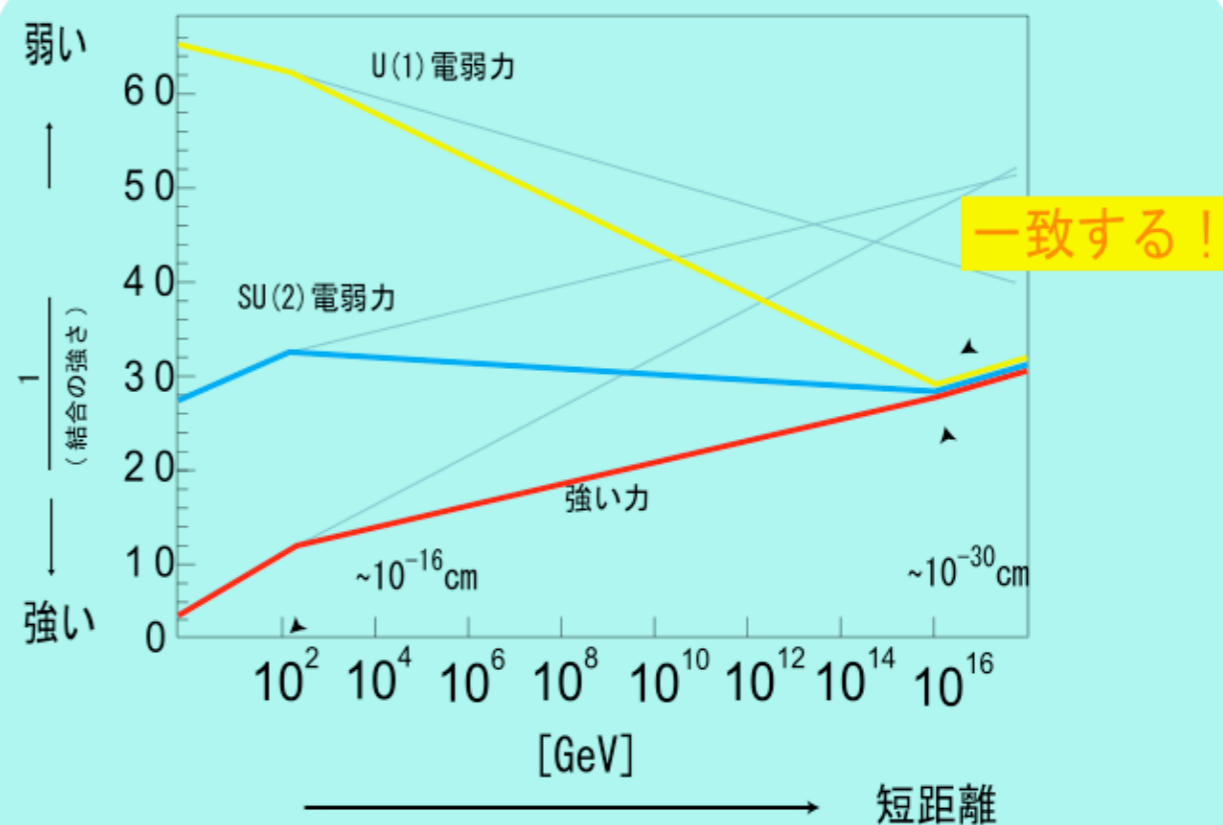
## 標準理論



標準模型での結合の強さの変化

標準模型では短距離にいったときに、結合の強さが一致しません。  
このままでは、大統一ができない！

## 標準理論 + SUSY



超対称標準模型での結合の強さの大きさの変化

超対称標準模型では、スーパーパートナーが加わることで結合の強さが一致ようになります

(研究室のオープンキャンパスのパネルより)



# SUSY があると本気で思っているのか？

→ **思っています！**

もし・・・もしも・・・

LHC 14 TeV run でも SUSY が見つからなかったら・・・

(あるいは他のものが見つかったら・・・)

大統一理論、

ニュートリノ質量、

物質 > 反物質の起源

などをどう考えれば良いかイチから考え直さなくてはならない・・・！



# fine-tuning . . . ?

(from Kitano-Nomura, hep-ph/0602096) : see Refs therein

各項間にどのくらいの  
cancellation がある  
か?

What is  $m_h^2$  in supersymmetric theories? For moderately large  $\tan\beta \equiv \langle H_u \rangle / \langle H_d \rangle$ , e.g.  $\tan\beta \gtrsim 2$ ,  $m_h^2$  can be written as

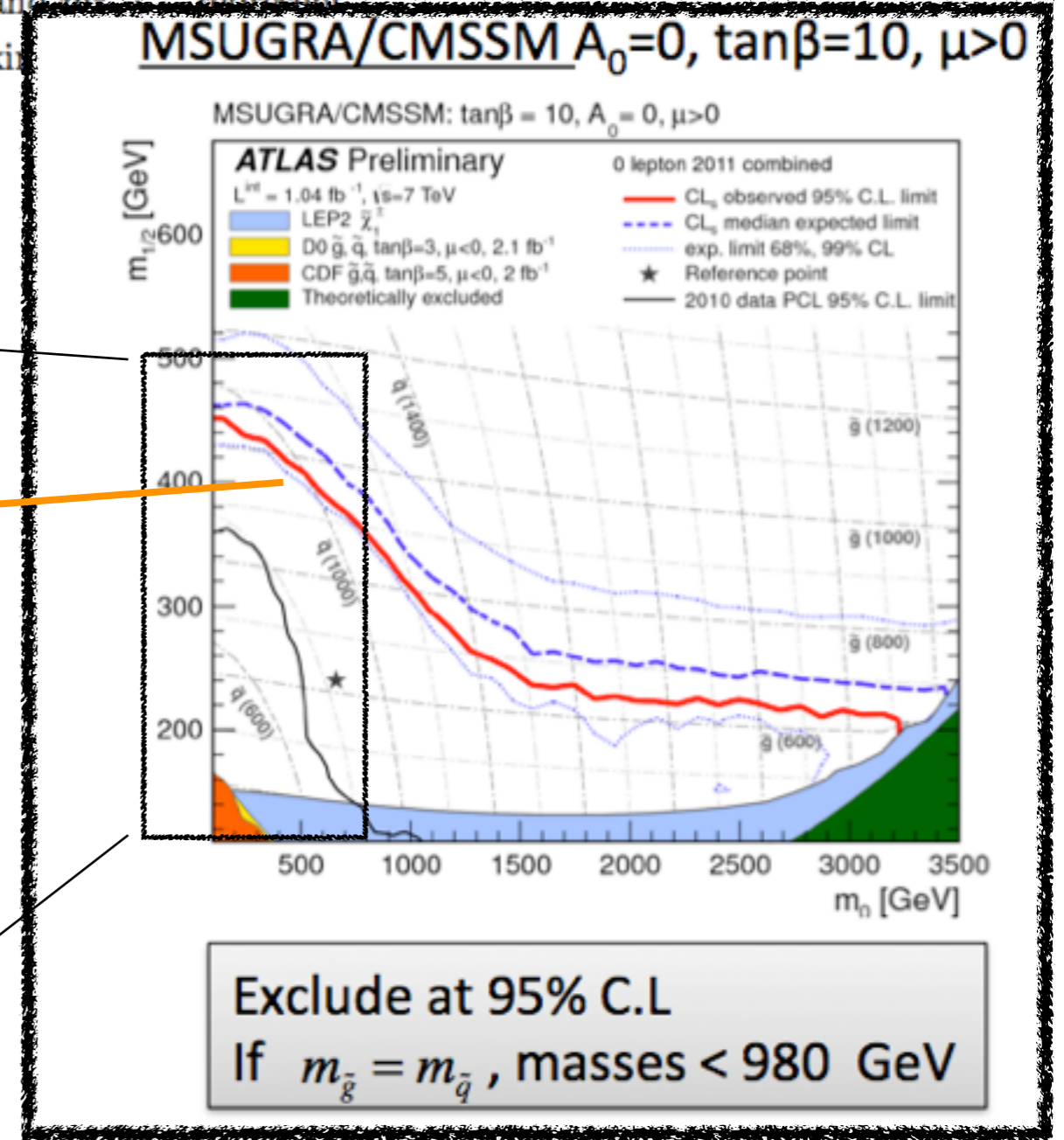
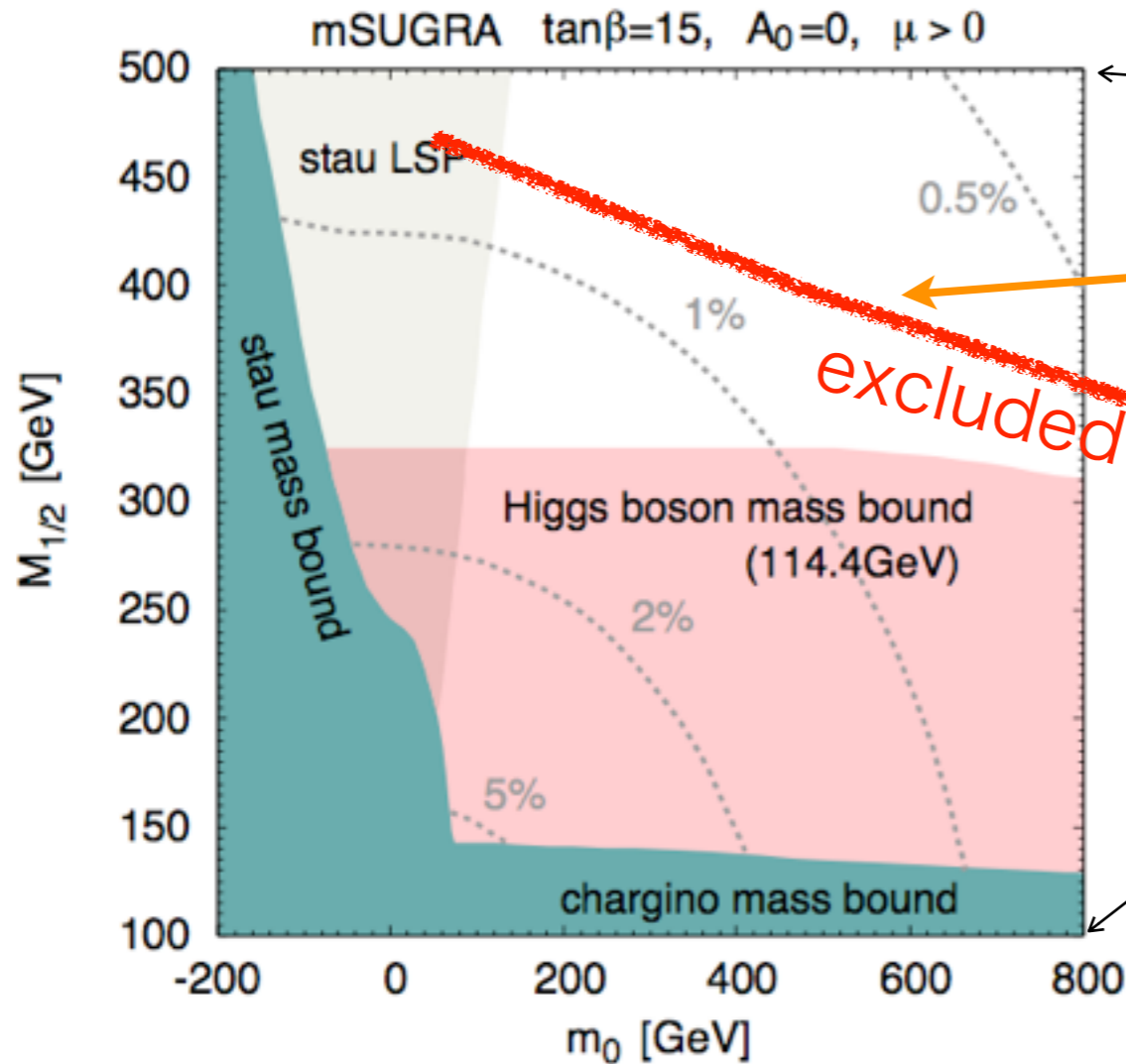
Higgs mass  
parameter

$$m_h^2 = |\mu|^2 + m_{H_u}^2|_{\text{tree}} + m_{H_u}^2|_{\text{rad}},$$

上の模型 (e.g. mSUGRA) で  
決まる parameter (3)

where  $\mu$  is the supersymmetric mass for the Higgs doublets, and  $m_{H_u}^2|_{\text{tree}}$  and  $m_{H_u}^2|_{\text{rad}}$  represent the tree-level and radiative contributions to the soft supersymmetry-breaking  $H_u$ . The dominant contribution to  $m_{H_u}^2|_{\text{rad}}$  arises from top-stop loop:

$$m_{H_u}^2|_{\text{rad}} \simeq -\frac{3y_t^2}{8\pi^2} (m_{Q_3}^2 + m_{U_3}^2 + |A_t|^2) \ln\left(\frac{M_{\text{mess}}}{m_{\tilde{t}}}\right),$$



Exclude at 95% C.L.  
If  $m_{\tilde{g}} = m_{\tilde{q}}$ , masses < 980 GeV

A.Taffard [ATLAS] Euroconference on HEP 2011



# fine-tuning . . . ?

## fine-tuning problem

$$m_H^2 = m_{H,0}^2 + \Lambda^2 \quad (\Lambda \gg m_H)$$



(fine tuning like 1.000000000000000001 - 1)

## "little" fine-tuning problem

$$m_h^2 = |\mu|^2 + m_{H_u}^2|_{\text{tree}} + m_{H_u}^2|_{\text{rad}},$$

("little" fine tuning 1.01-1 or 1.001-1)

## 深刻な問題 . . . ?

色々な考え方あります：

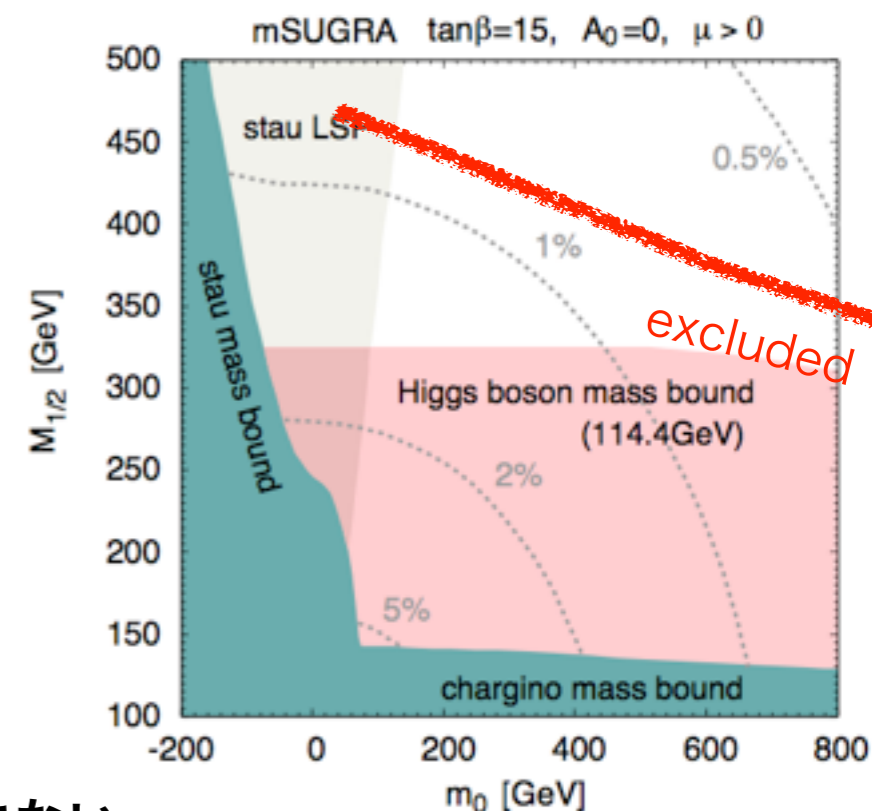
- fine-tuning が小さい parameter 領域にあると考える。
- これはヒントだ！と考え、fine-tuning が小さくなるような模型を模索する。
- 実は SUSY scale は小さいけど mass が縮退していて今は見えてない。
- 1%程度の fine-tuning なんか知ったことか。あとで考えよう。

いずれにせよ、SUSYを考える限り、parameter 間に

1%程度の tuning がある（ように見える）という事実は避けられそうにない。

何10桁もの fine-tuning はイヤだった  
(SUSYの motivation 1つ)

じゃあ 1% とか 0.1% の fine-tuning は許せるのか？





**Part IV**

**A model**

**最後に少しだけ宣伝・・・**



# GMSB + NMSSM + hidden matter

KH, Nakayama, Yokozaki, 1107.xxxx (明日)

	flavor/CP	$\mu/B\mu$	domain wall	correct EWSB	PQ mechanism for strong CP
GMSB	✓	✗			
GMSB + NMSSM	✓	✓	✗	✗	
GMSB + NMSSM + vector-matter	✓	✓	✓	✓	✗
<b>GMSB + NMSSM + hidden-matter</b>	<b>✓</b>	<b>✓</b>	<b>✓</b>	<b>✓</b>	<b>✓</b>

最も完成度の高い模型？！



# GMSB + NMSSM + hidden matter

KH, Nakayama, Yokozaki, 1107.xxxx (明日)

$$W = W_{\text{MSSM}} + \lambda S H_u H_d + (\kappa/3) S^3 \\ + \lambda' S Q' \bar{Q}' \\ + W_{\text{mess}} + W_{\text{mess-for-}Q'}$$

- mass spectrum は GMSB + NMSSM
- Higgs mass  $\sim$  130–140 まで可  
(ただし perturbativity messenger scale まで : 要 UV completion)
- 重力波が観測される可能性 (domain wall の崩壊)

詳しくは横崎さんをセミナーに呼んで聞いて下さい。



# まとめ

- (いまさら聞けない) LHC のおはなし  
+LHCの最新の結果の一部.... Higgs !!
- やっぱり SUSY でしょう !!
- NMSSM + GMSB + hidden matter ですべて解決？

KH, Nakayama, Yokozaki, 1107.xxxx



ご清聴ありがとうございました。

Let's Have a Coffee !





**backup**



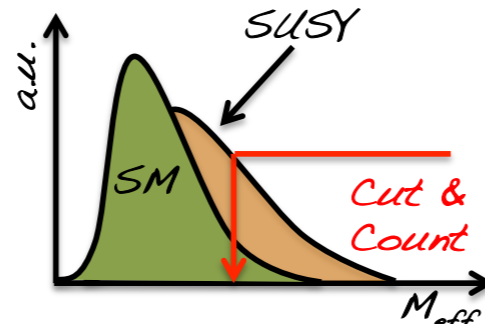
New: 1.04 fb<sup>-1</sup>

# Jets+E<sub>T</sub><sup>miss</sup> Search

- To maximize  $m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{q}}$  coverage, defines 5 signal regions:

Discard events with  $e(\mu) p_T > 20$  GeV (10 GeV)

- ✓  $\tilde{q}\tilde{q} \rightarrow (q\tilde{\chi}_0^1)(q\tilde{\chi}_0^1)$
- ✓  $\tilde{g}\tilde{g} \rightarrow (qq\tilde{\chi}_0^1)(qq\tilde{\chi}_0^1)$
- ✓  $\tilde{g}\tilde{q} \rightarrow (qq\tilde{\chi}_0^1)(q\tilde{\chi}_0^1)$



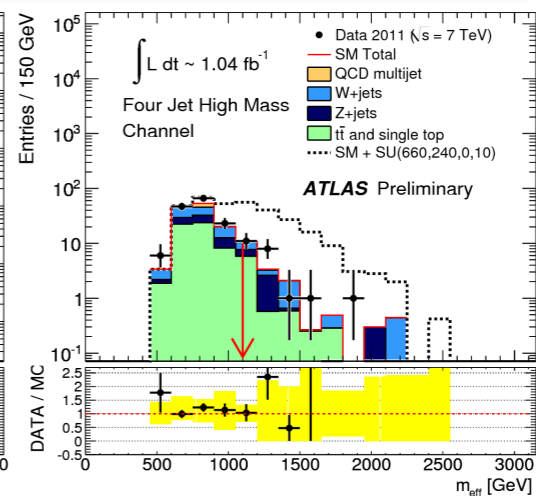
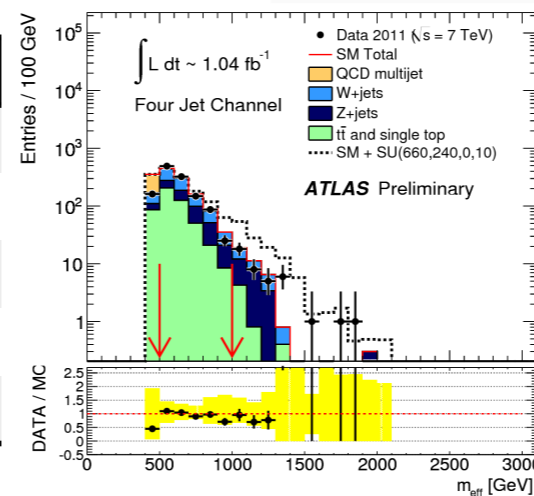
$$m_{eff} \equiv \sum_{i=1}^n |\mathbf{p}_T^i| + E_T^{miss}$$

Signal Region	≥ 2 jets	≥ 3 jets	≥ 4 jets	High mass
$E_T^{miss}$	> 130	> 130	> 130	> 130
Leading jet $p_T$	> 130	> 130	> 130	> 130
Second jet $p_T$	> 40	> 40	> 40	> 80
Third jet $p_T$	-	> 40	> 40	> 80
Fourth jet $p_T$	-	-	> 40	> 80
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{miss})_{\min}$	> 0.4	> 0.4	> 0.4	> 0.4
$E_T^{miss}/m_{eff}$	> 0.3	> 0.25	> 0.25	> 0.2
$m_{eff}$ [GeV]	> 1000	> 1000	> 500/1000	> 1100

## Background Sources

W+jets	Lepton measured as jets
Z/γ+jets	γ/leptons measured as jets
top	Hadronic τ decay
QCD jets	Mismeasurement of jets or ν in H.F decay

All background estimations are data-driven



Process	≥2-jets	≥3-jets	≥4-jets $M_{eff} > 500$ GeV	≥4-jets $M_{eff} > 10000$ GeV	High mass
Total	$62.3 \pm 4.3 \pm 9.2$	$55.0 \pm 3.8 \pm 7.3$	$984 \pm 39 \pm 145$	$33.4 \pm 2.9 \pm 6.3$	$13.2 \pm 1.9 \pm 2.6$
Data	58	59	1118	40	18



# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

## Figure from 1101.0593

Report of the LHC Higgs Cross Section Working Group

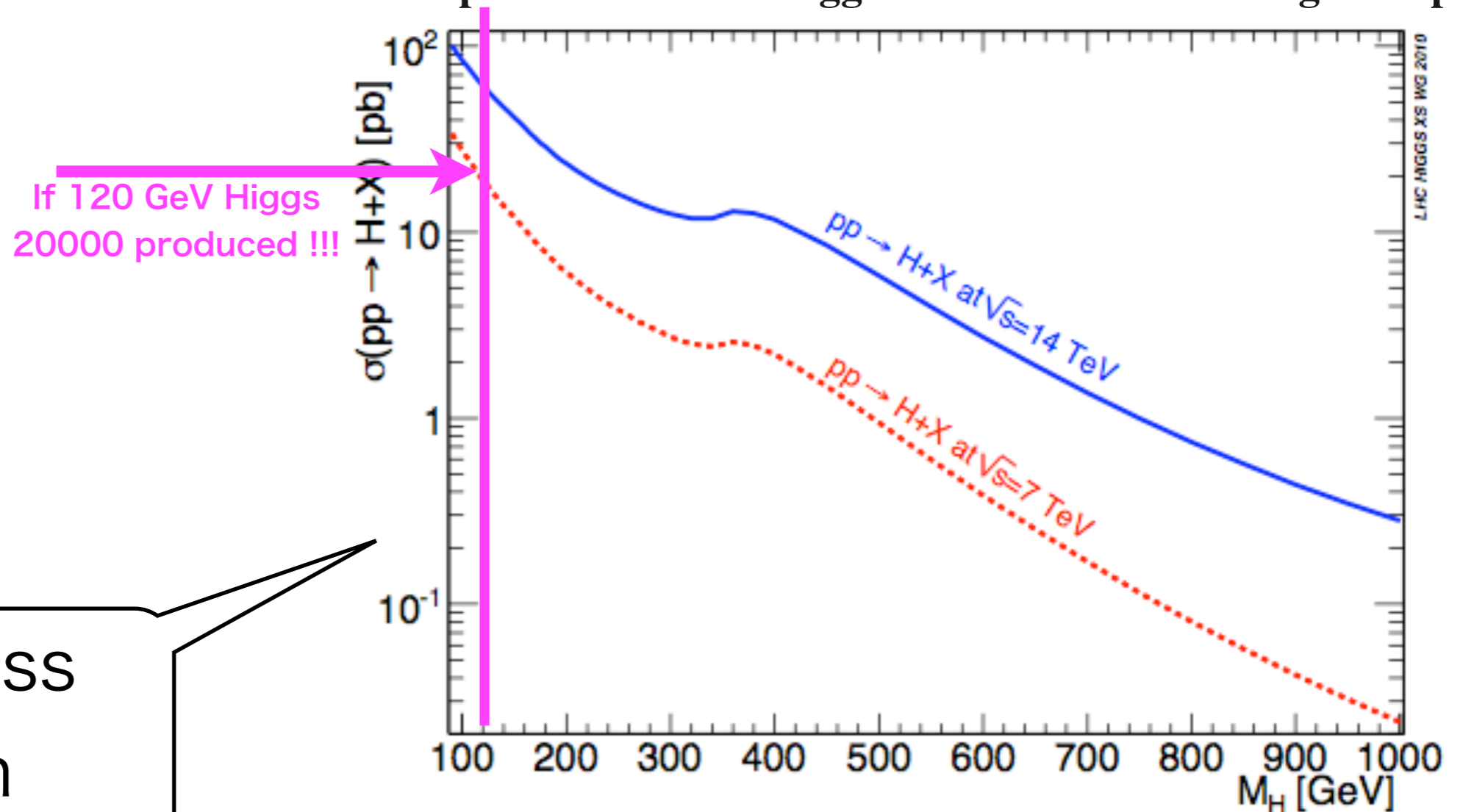


Fig. 40: The total SM Higgs production cross section at  $\sqrt{s} = 7$  TeV and 14 TeV.

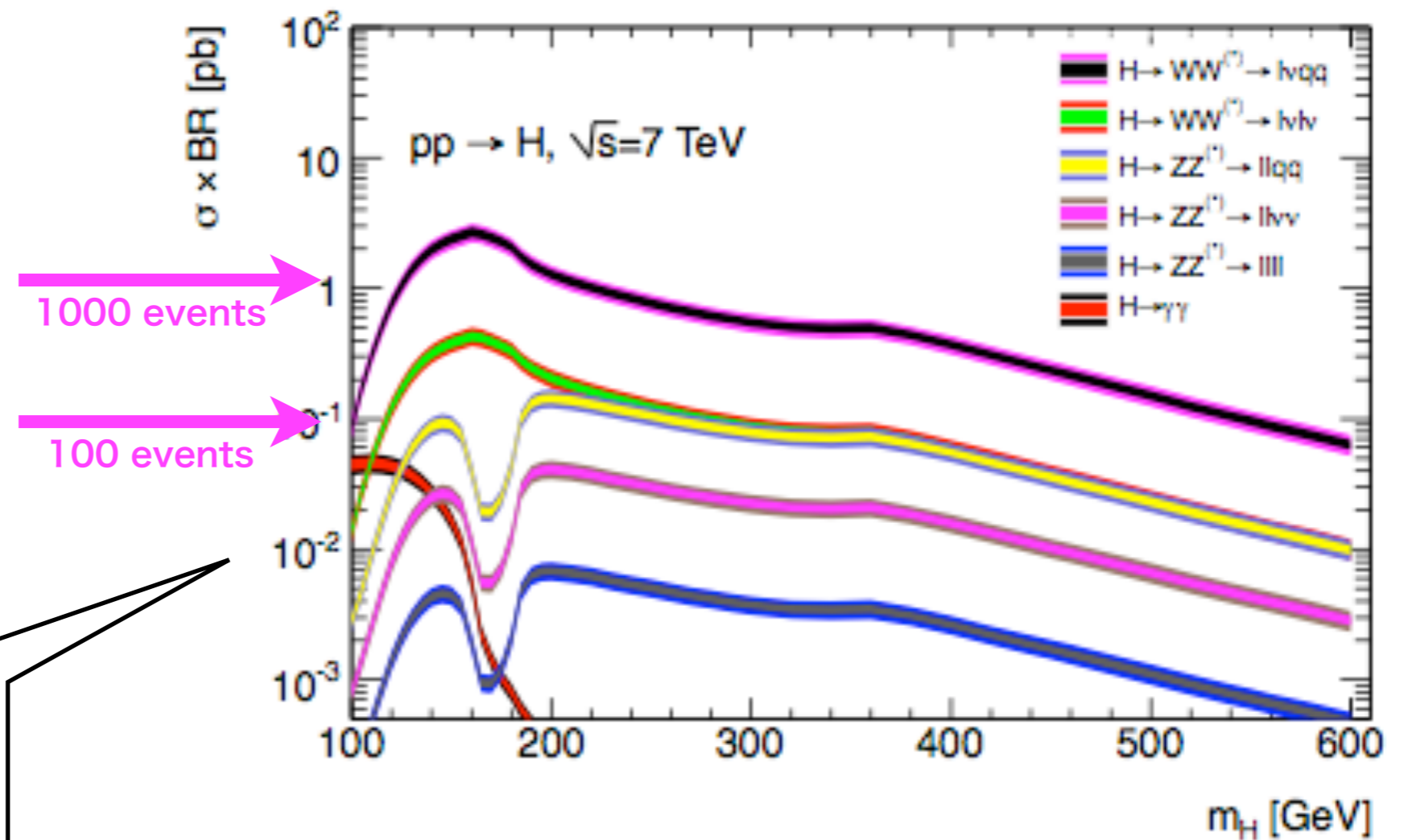


# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

(SUSY の前にちょっと Higgs)

## Figure from 1101.0593

Report of the LHC Higgs Cross Section Working Group



cross section  
times Br

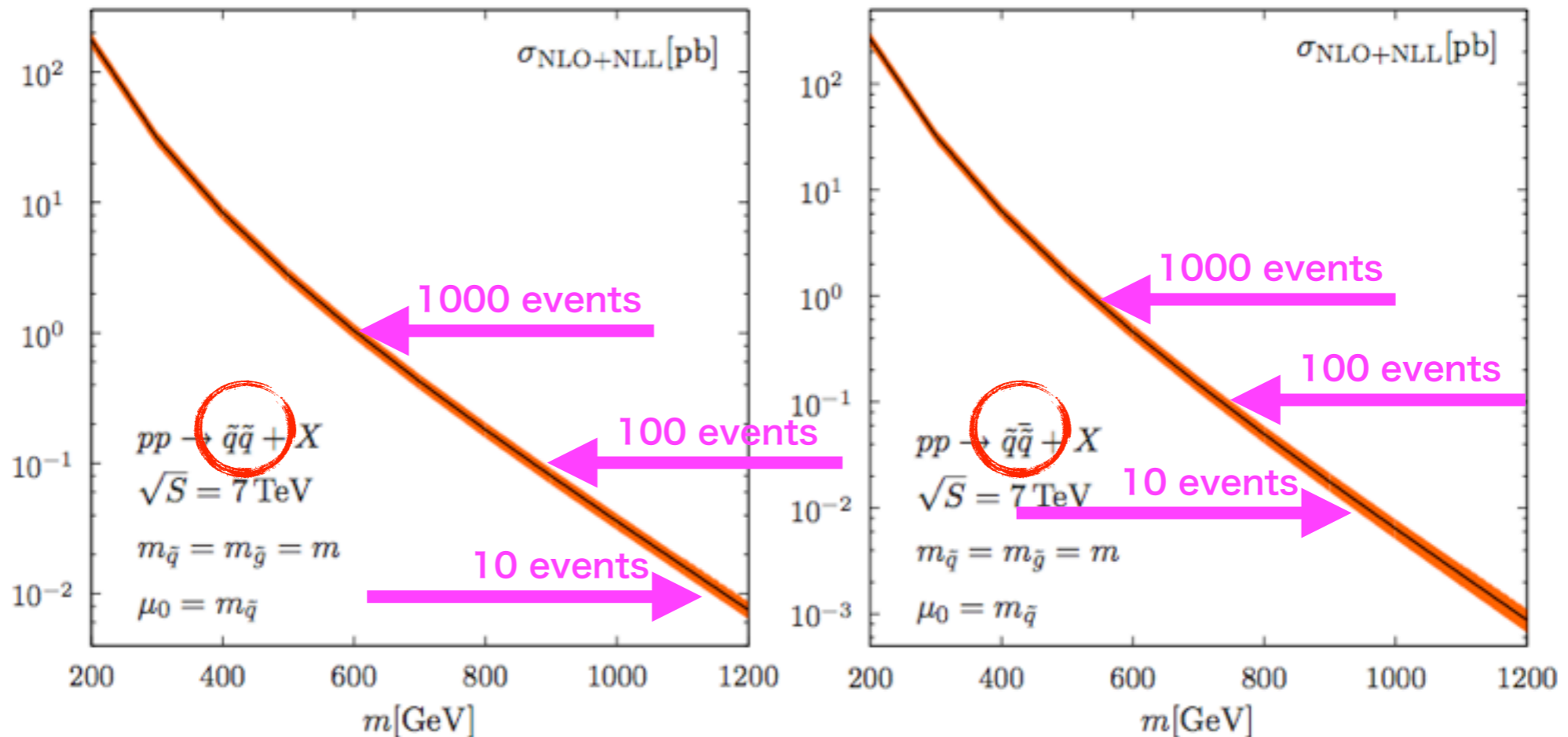
Fig. 1. The cross section multiplied by decay branching ratios for Standard Model Higgs boson production in  $pp$  collisions at



# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

SUSY なら . . .

Figure from 1105.1101

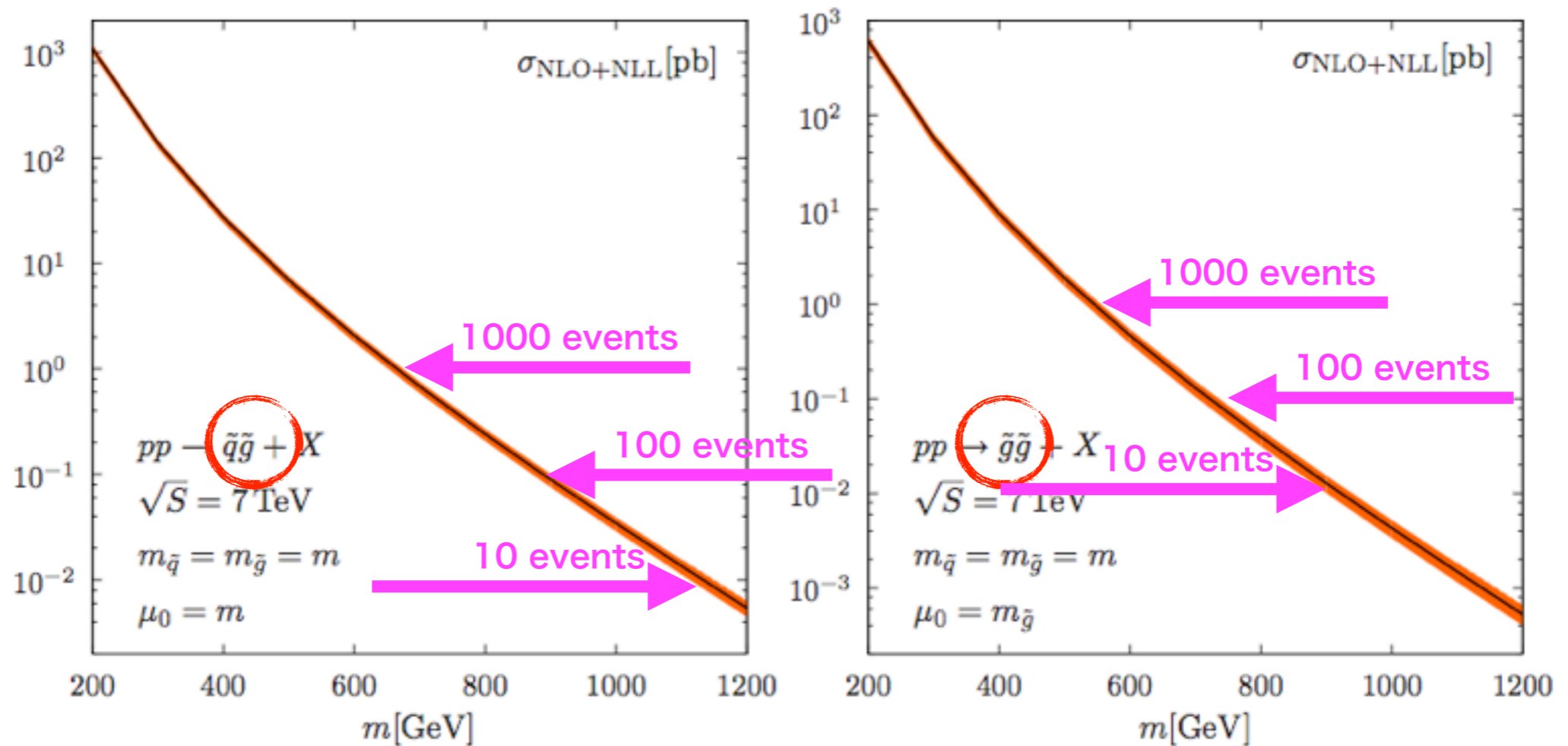




# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

SUSY なら . . .

Figure from 1105.1101





# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

SUSY なら . . .

Figure from 1105.1101

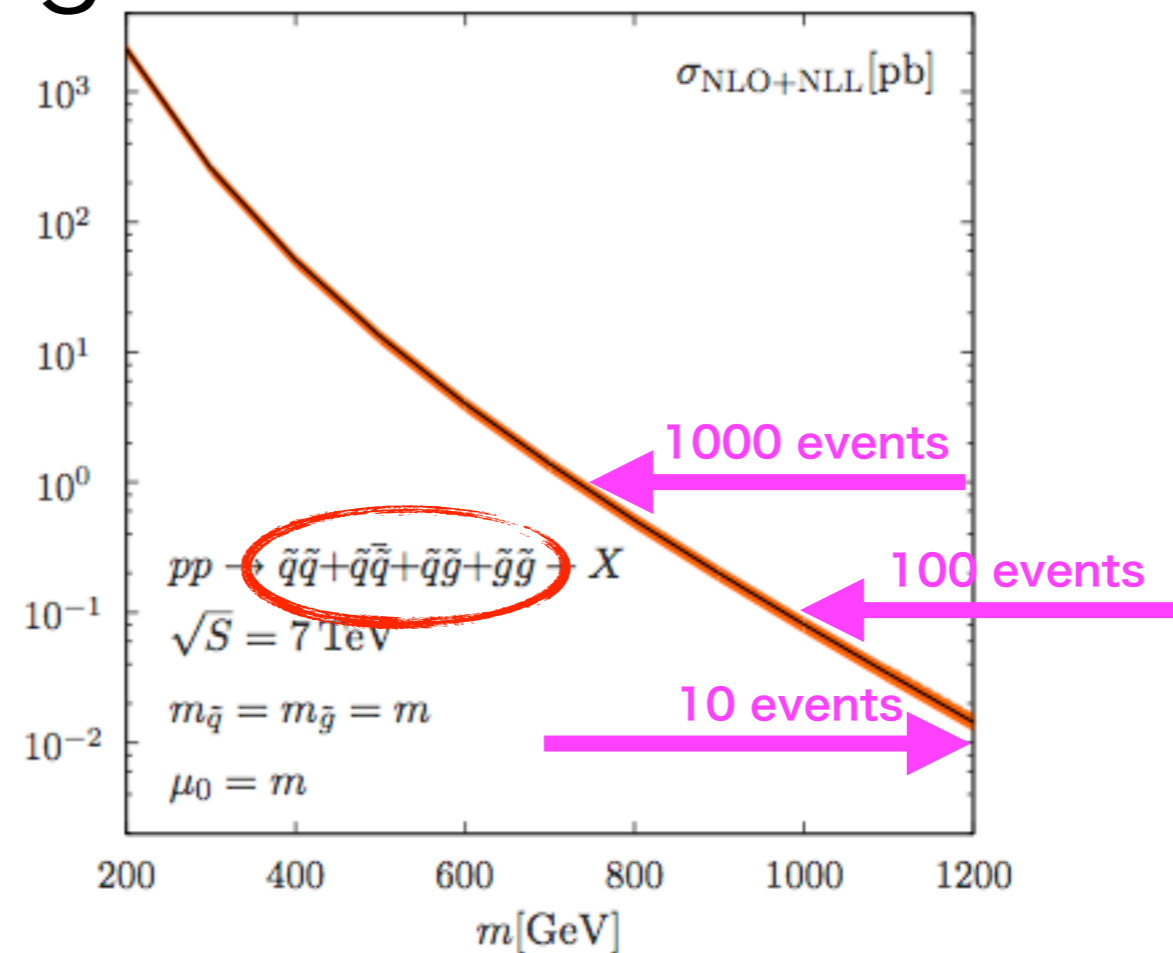


Fig. 6. The NLO+NLL SUSY-QCD cross section for inclusive squark and gluino pair-production at the LHC with 7 TeV,  $pp \rightarrow \bar{q}q + \bar{q}q + \bar{q}g + g\bar{g} + X$ , as a function of the average sparticle mass  $m$ .



# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

SUSY なら . . .

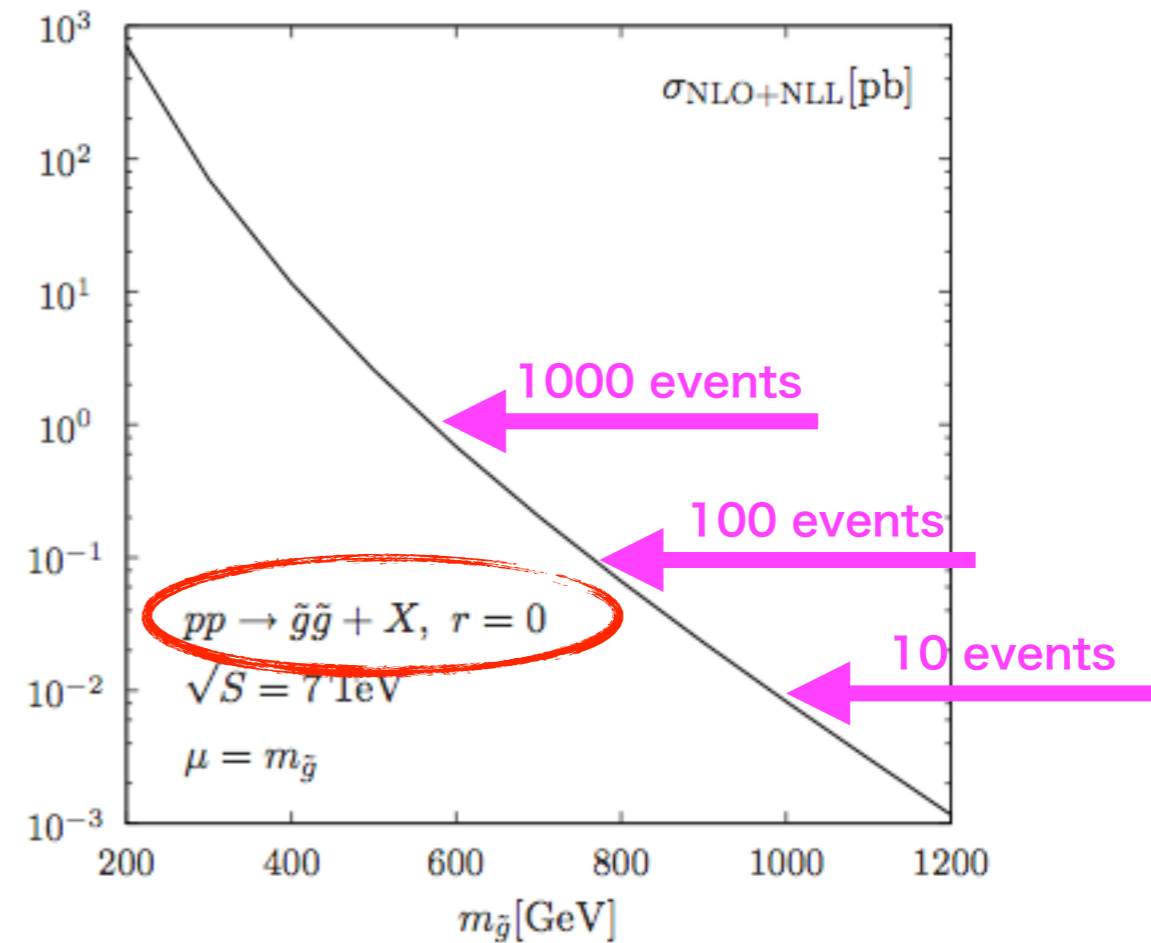


Figure from 1105.1101

Fig. 11. The NLO+NLL SUSY QCD cross section for gluino pair-production in the heavy squark limit,  $r = m_{\tilde{g}}$  of the gluino mass  $m_{\tilde{g}}$ .



# 1 fb<sup>-1</sup> ってどんな感じ？

SUSY なら . . .

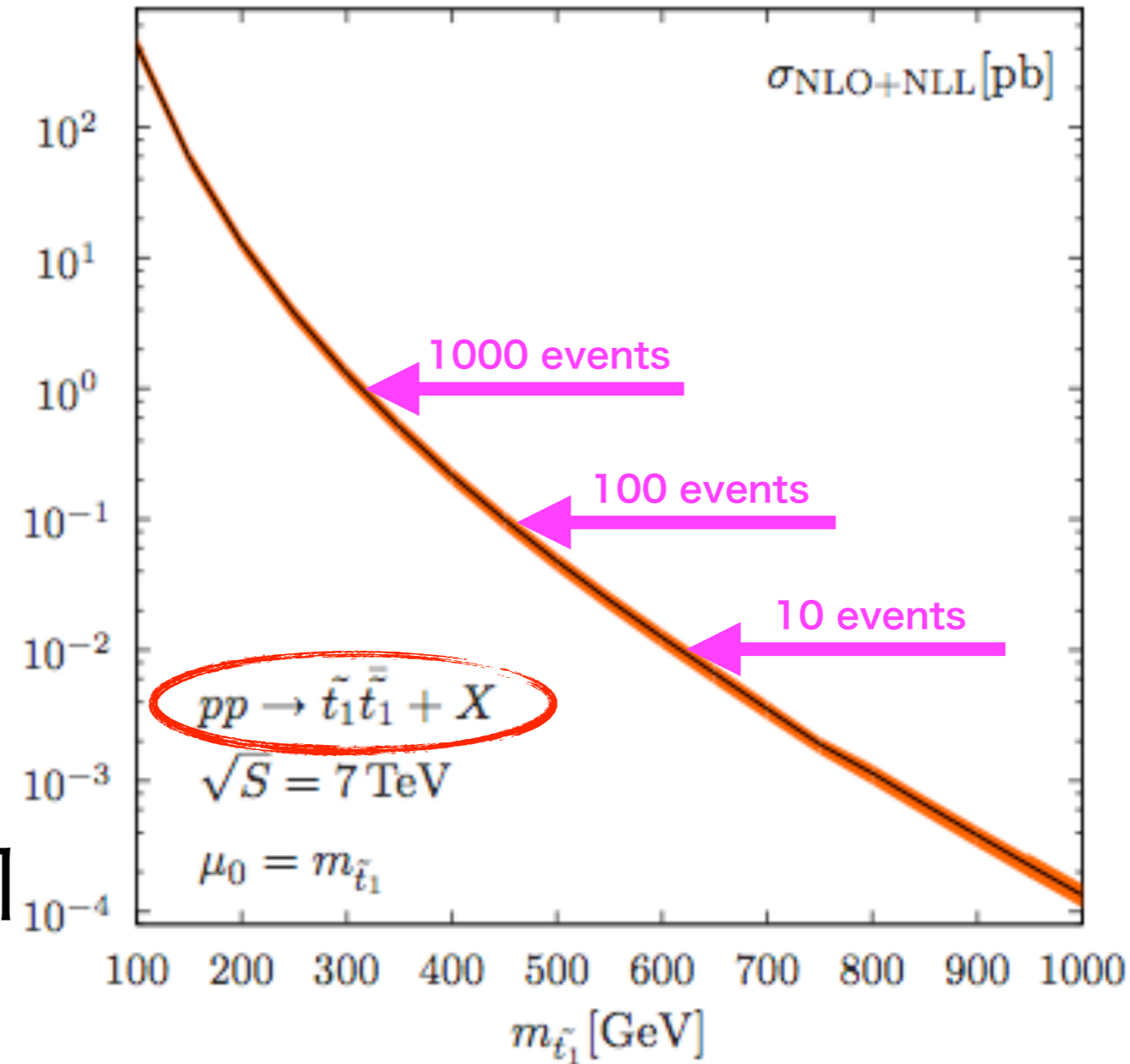
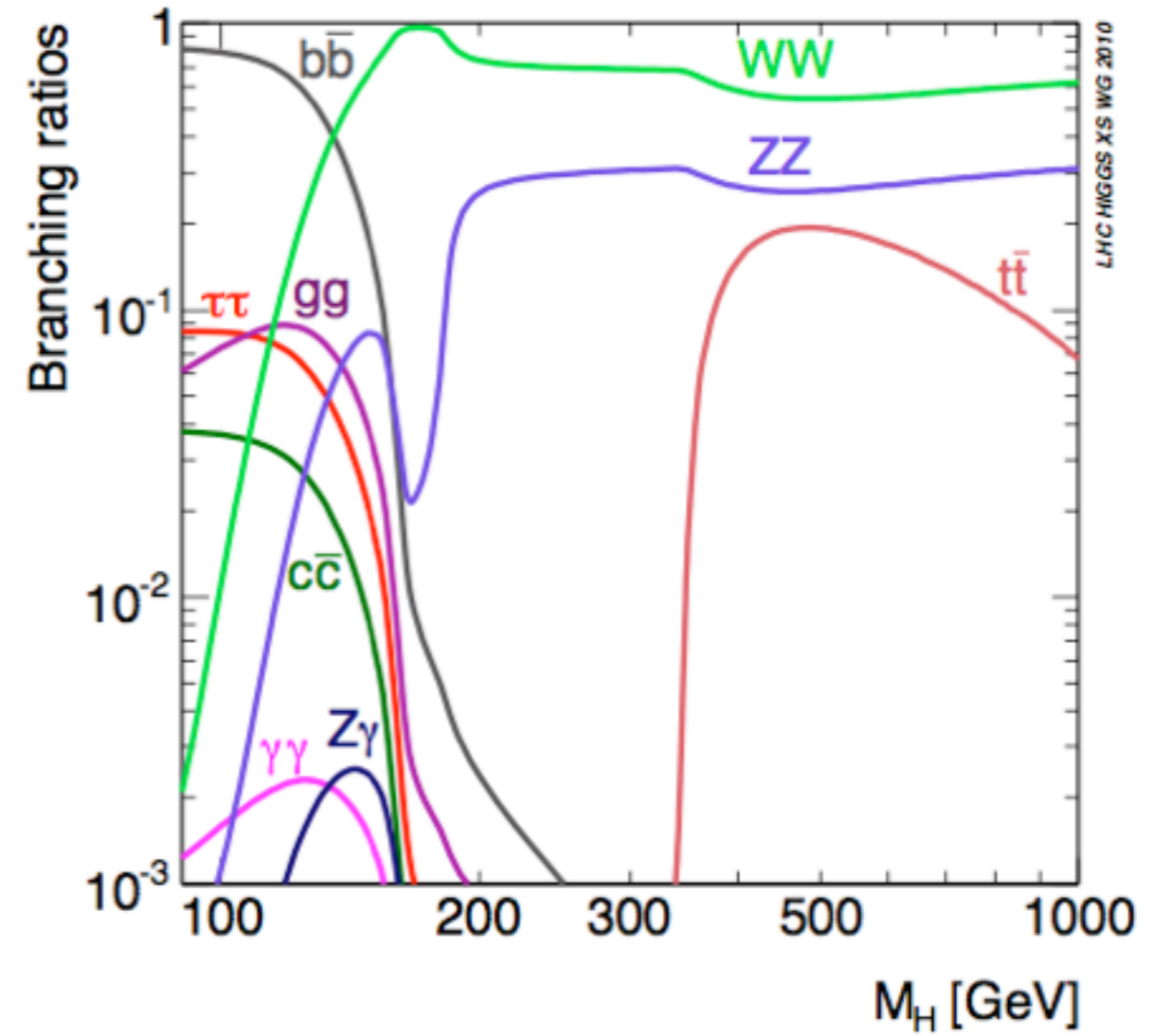
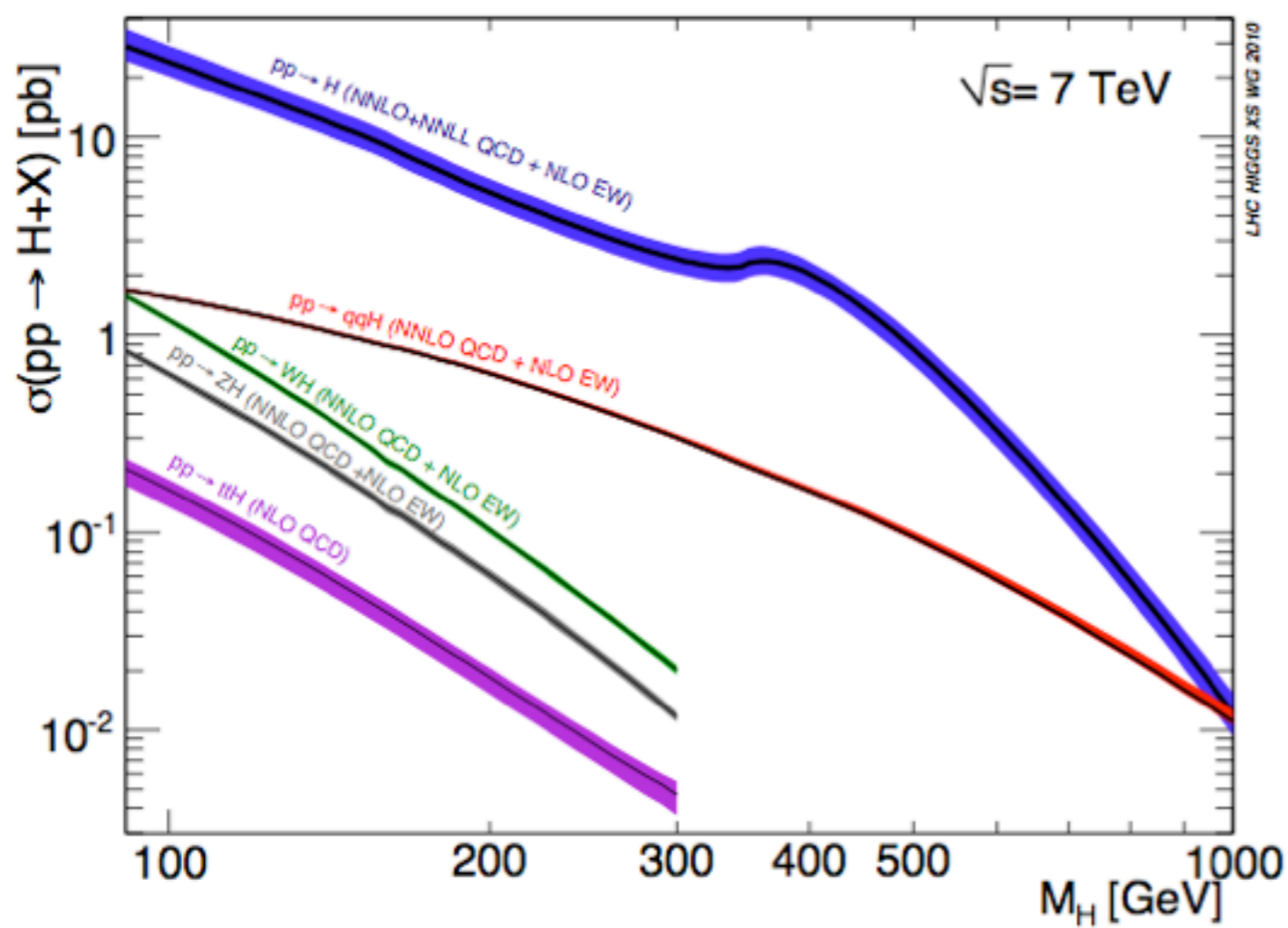


Figure from 1105.1101



# SM Higgs production cross section and branching ratio



LHC Higgs cross section WG