

# LHC: TeVの物理

## 2010年の成果と2011年の展望

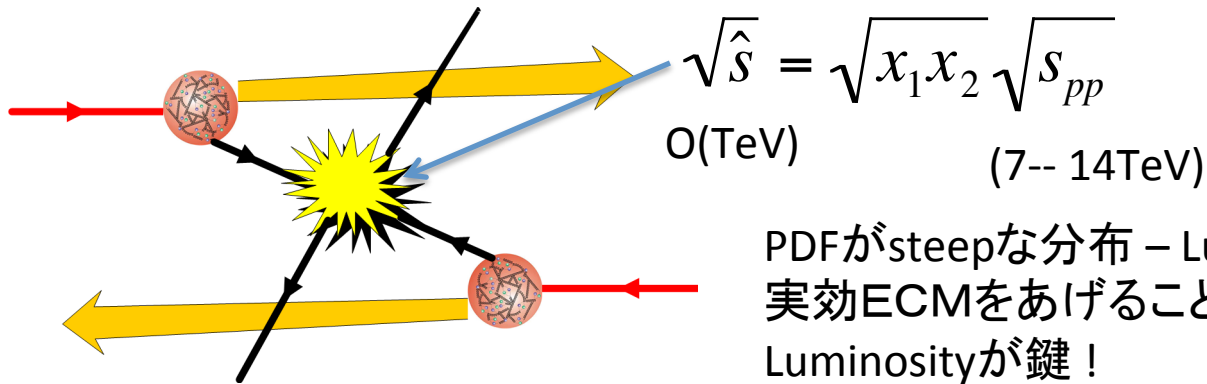
MeVの物理はやりません

1. LHC加速器状況
2. 標準モデルの再検証と間接探索
3. 超対称性粒子  $mE_T$ で探る
4. 長寿命粒子 (R-had, wino, Stau, RPV)
5. Higgs
6. ED with Photon (ADD, RS, UED)
7. Summary

あさい

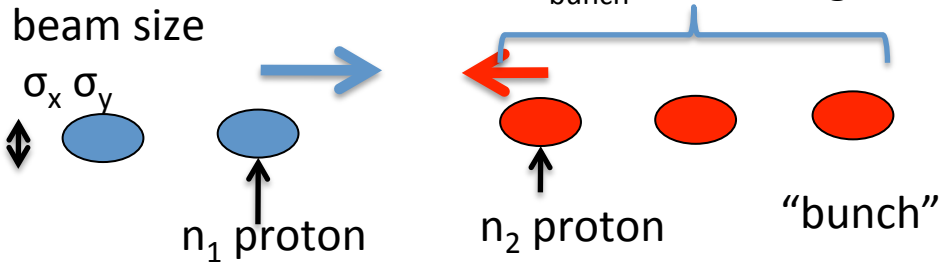
結果がたくさんで、背後の物理や解析などは別の機会に  
皆さんが何か新しいこと考える上でヒントになるような要素はちりばめました

# LHC operation at 2010 & Luminosity入門



PDFがsteepな分布 – Luminosityを上げることが  
 実効ECMをあげることになる。  
 Luminosityが鍵！  
 hadronコライダーはダラダラ見え始める。keep watch

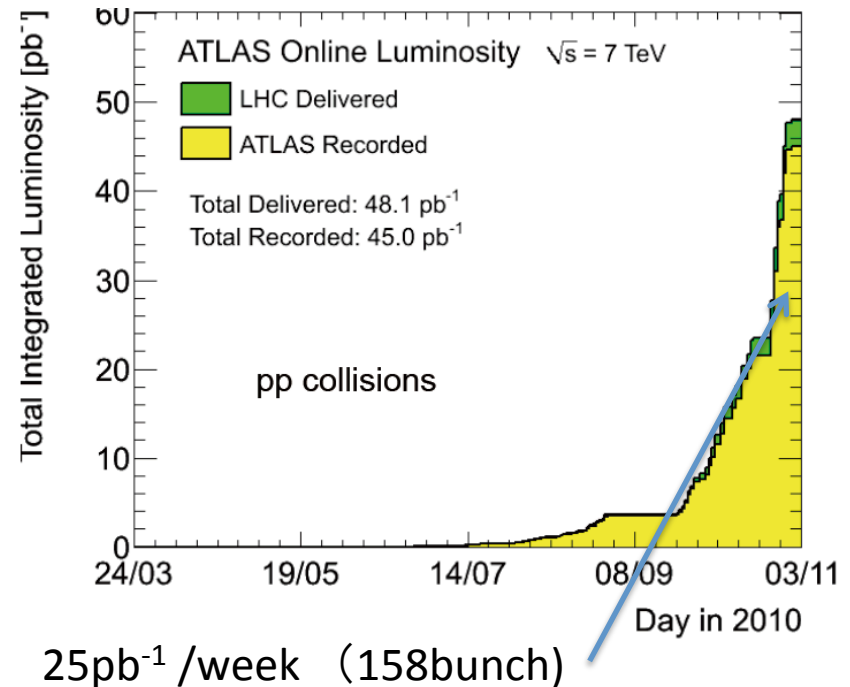
$$L = \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x \sigma_y} f$$



2010のrun  
 bunch数 368 これを1から少しずつ増す

$\beta^* = 3.5\text{m}$   
 $n = 1.2\text{E}11$

$$L = 2 * 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$



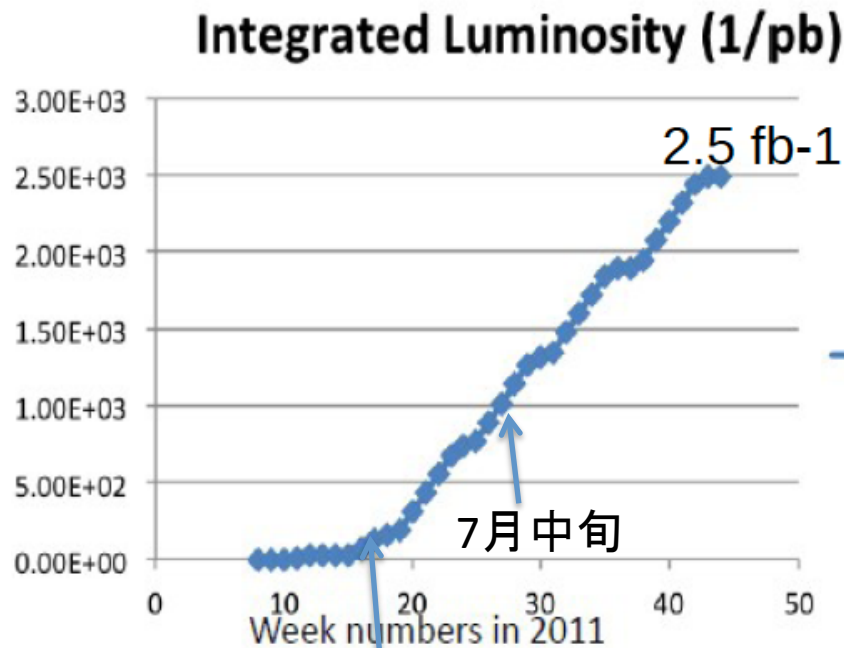
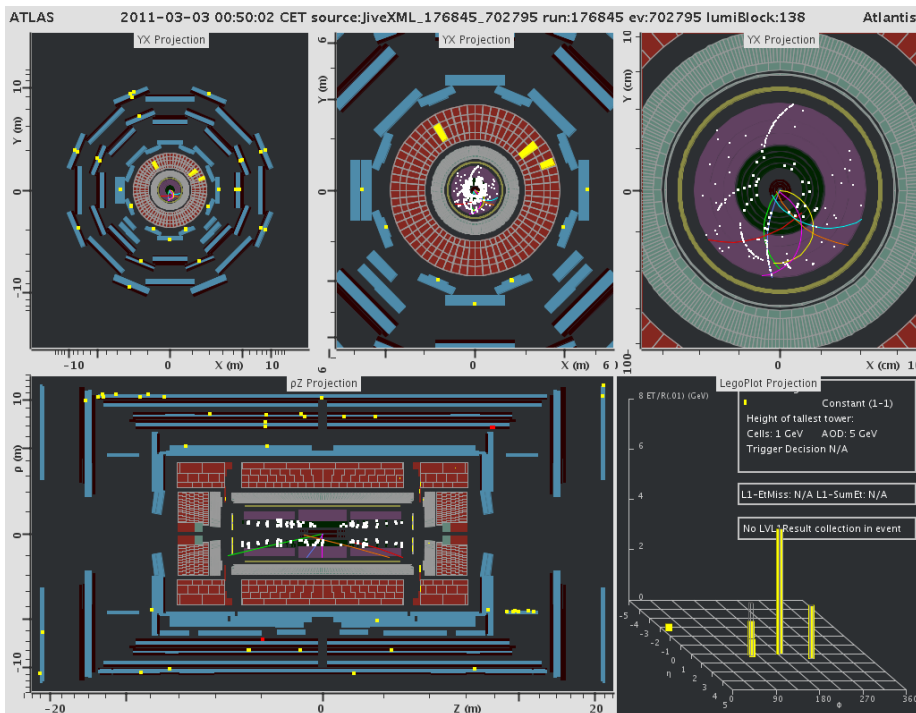
# LHC 2011の予定

bunch数 936 (3倍) (75nsec spacing)  
 $\beta^*$  1.5 m (2.3倍)  
 2010の7倍パラメータで運用予定

$L=1.3 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$   
 $\sim 20 \text{pb}^{-1}/\text{day}$

15MB/BC

3月3日 first collision 2011 (MB事象)



4月中旬

3月 コミッショニング (今年のparameter)

4月に ECM=2.7 TeVのrun 数日して

増強にむけてのTechnical stop

4月中旬から1ヶ月かけて

900バンチへ増強 ( $\sim 100 \text{pb}^{-1}/\text{week}$ )

7月夏の国際学会  $L \sim 1 \text{fb}^{-1}$

11月末に PP実験 おわり  $L \sim 2.5 \text{fb}^{-1}$

12月は なまりなまりガチャン

# LHC 2012の予定

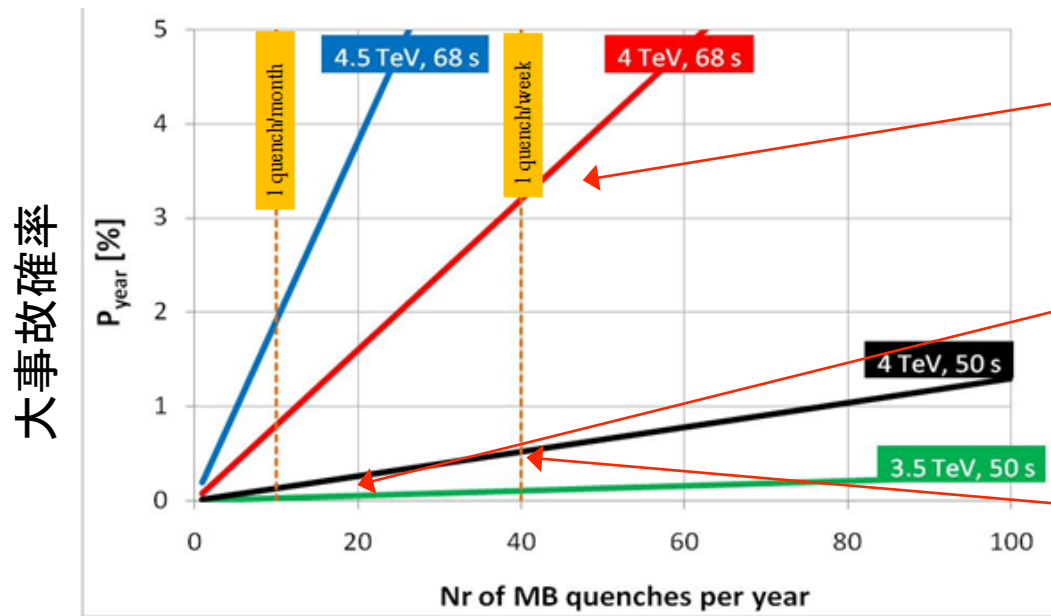
2012年 **実験続行決定!** (Higgsへの Big impact 後ほど)

ECM は不明 原因となっている不良接合の残留抵抗測定結果次第

最悪の予想より良かったら ECM= 8~9 TeV

最悪の場合は、 燃えてしまう確率が  $\ll 1\%$  ECM= 7TeV

Luminosity 基本的に2011 年のパラメーター+ $\alpha$ で run 5~7 fb<sup>-1</sup> Enough for Higgs



Unacceptably high!

2010 operation

Considerable increase of risk ~5x, 1% in 2 yrs !

$$P_{\text{year}} = N_M * (P_G + P_B) + N_J * P_J \approx N_M * (P_G + P_B) \quad (N_J \ll N_M)$$

Probability per year for joint burn out

Number of dipole quenches per year

Number of prompt joint quenches per year

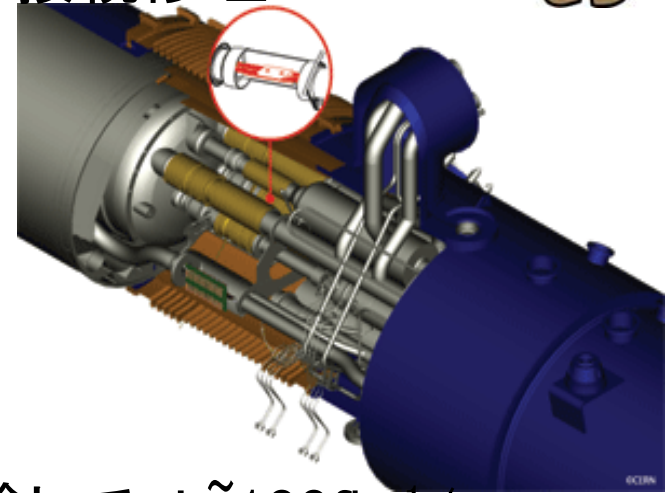
Asynchronous beam dump inducing series of quenches under study

# LHC 2013 以降

オオカミ中年  
今の段階の話

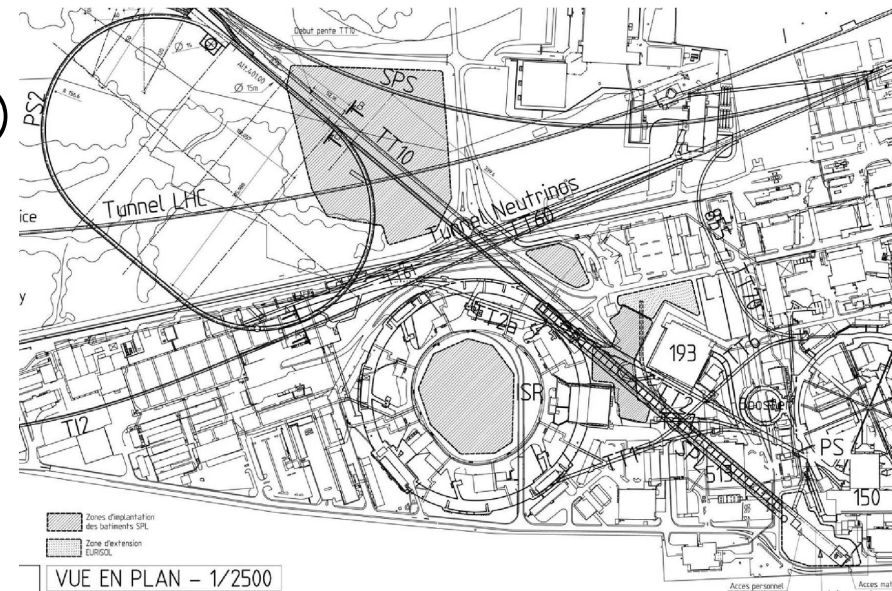


2013 年から shutdown 残留抵抗のある接続修理  
最低 18 ヶ月の shutdown  
まだ修理計画は不明



2014,15 年から 2,3年 13-14TeV の実験して  $L \sim 100 \text{fb}^{-1}/\text{year}$   
デザインミノシティー  
Nb=2800 (3倍)  $\beta^* = 0.5\text{m}$  (3倍)

2017,8? 2年間 Shut down  
2020? SLHC  $\sim L \sim 1000 \text{fb}^{-1}$



# 2010の結果: Data & MC samples

$L=45\text{pb}^{-1}$  ATLAS ( $43\text{pb}^{-1}$  CMS) のdataを記録

検出器がgood readyの部分だけ選ぶ。

(HVかかっていなかったり、Noisyだったりした部分を落とす)

**$L\sim 33-40\text{pb}^{-1}$  (解析による: 使う検出器が違う)**

## MC samples

(1) QCDジェット: PYTHIA とALPGENの両方で比較

(2) Topペアー MC@NLO

(3) W/Z+jets ALPGEN, SHERPA, PYTHIA ,,

(4) WW,WZ,,,, など

基本的に G4をベースにしたFull simulation

QCD,Wなどは断面積に不定性が多いのでdataで規格化をしたりdataから直接(data-driven)評価している。



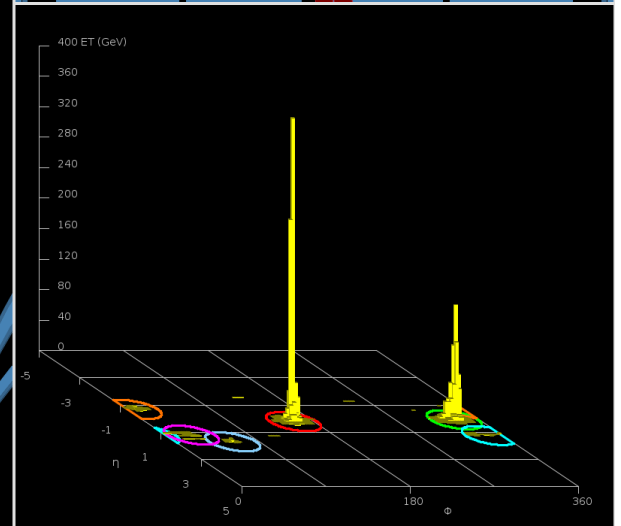
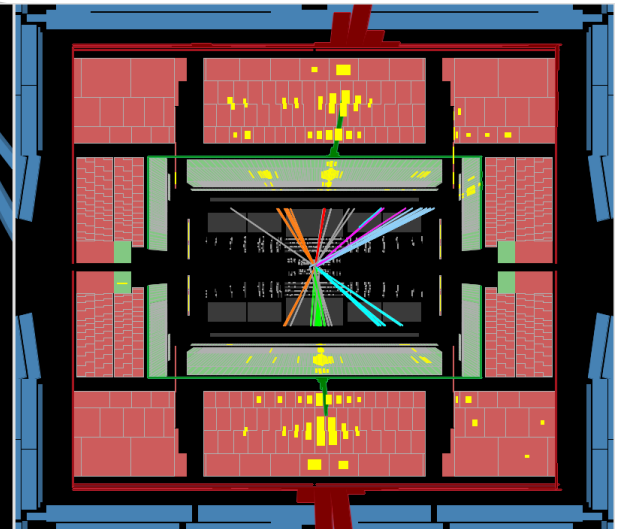
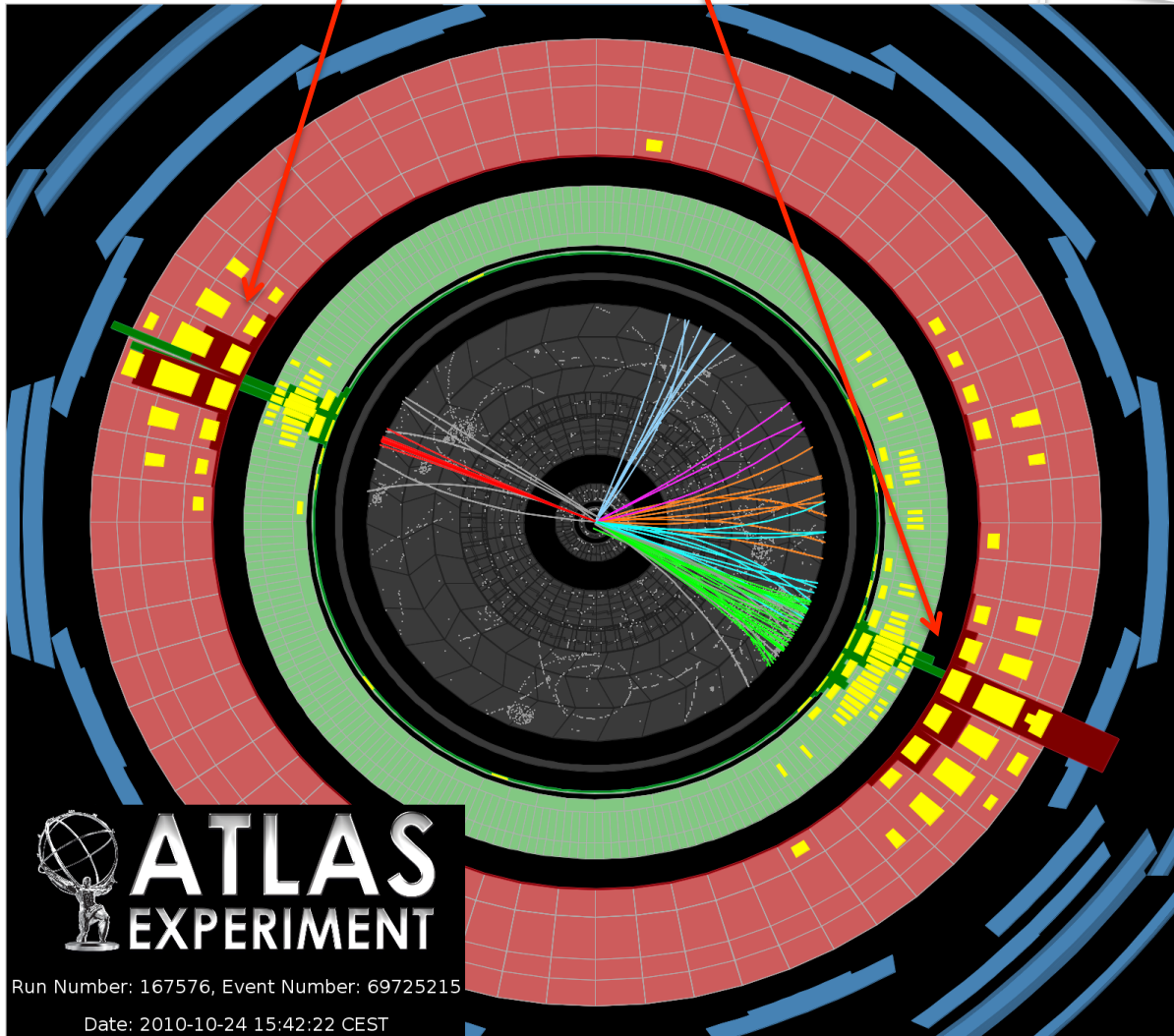
## 2. SMの再検証と間接探索

PT\_1=1.3TeV

PT\_2=1.2TeV

M<sub>jj</sub>=2.6TeV

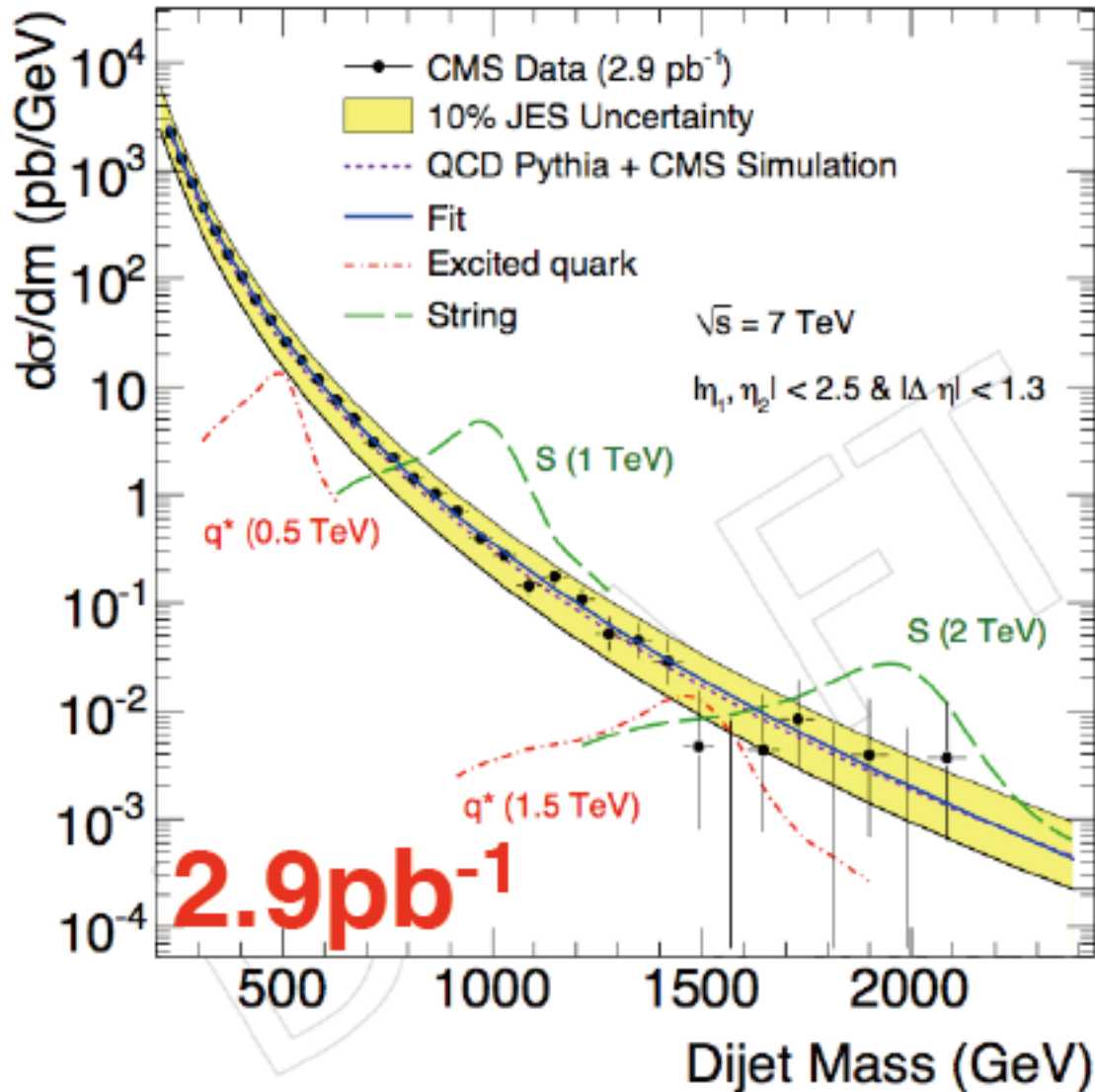
Central !! (new Physicsのkeyword)



Run Number: 167576, Event Number: 69725215

Date: 2010-10-24 15:42:22 CEST

Using this result, we can set limits on the new physics decaying into 2jets



Excited quark

$q+g \rightarrow q^* \rightarrow q + g$

TeV Scale ED

$gg \rightarrow$ String resonance $\rightarrow gg$

$qq \rightarrow$ String resonance $\rightarrow qq$

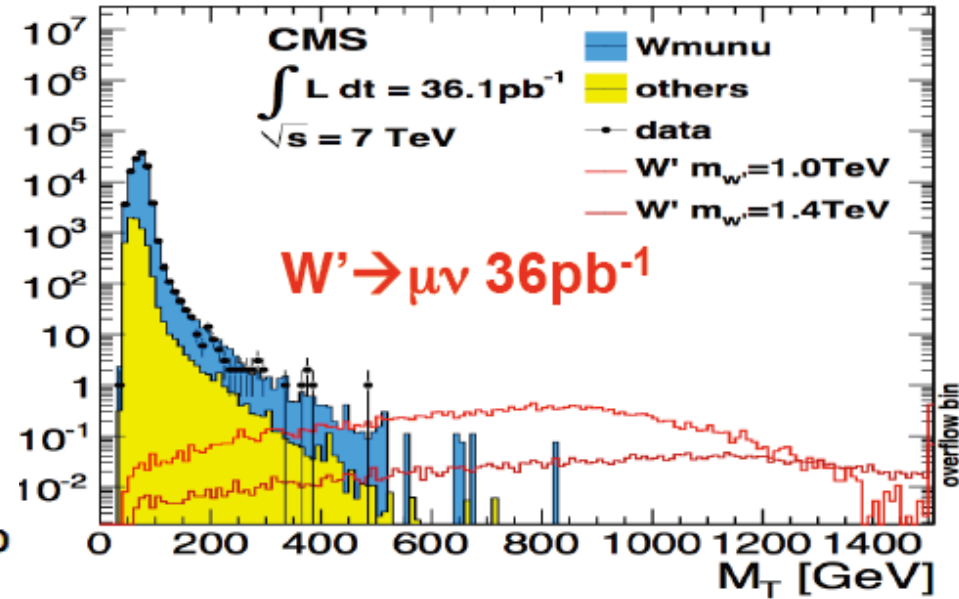
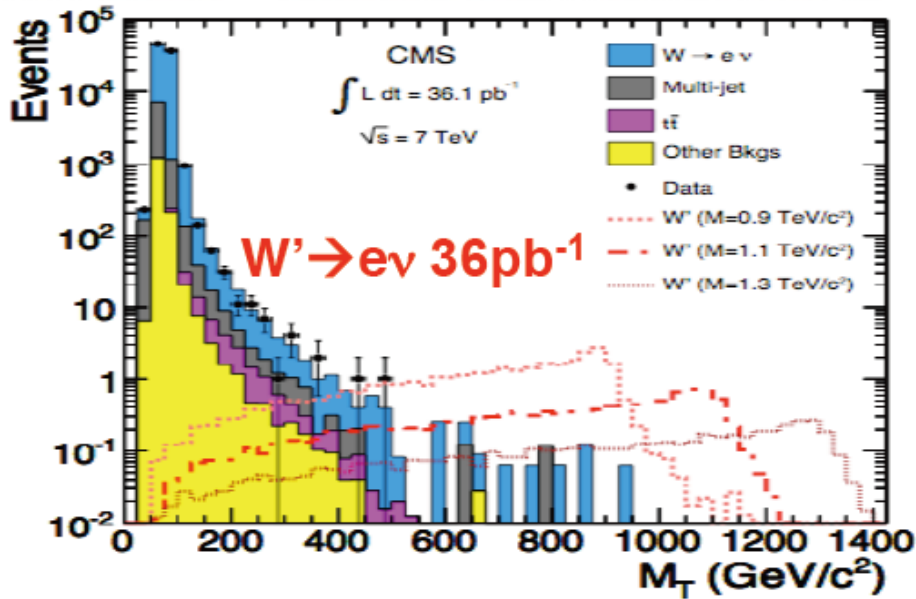
$qg \rightarrow$ String resonance $\rightarrow qg$

95%CL Limit

$m(q^*) > 2.6$ TeV  
 ATLAS L=36pb<sup>-1</sup>



# W( $\rightarrow l \nu$ ) MT distributions $W \sim M_W$ edge



$$M_T = \sqrt{2P_T^\ell E_T (1 - \cos \varphi)}$$

(1) muonの方がfakeは少ない  $< 10^{-4}$  (heavy flavor) **実験ではlepton universality X**  
 eは多い several \*  $10^{-4}$  ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  + track)

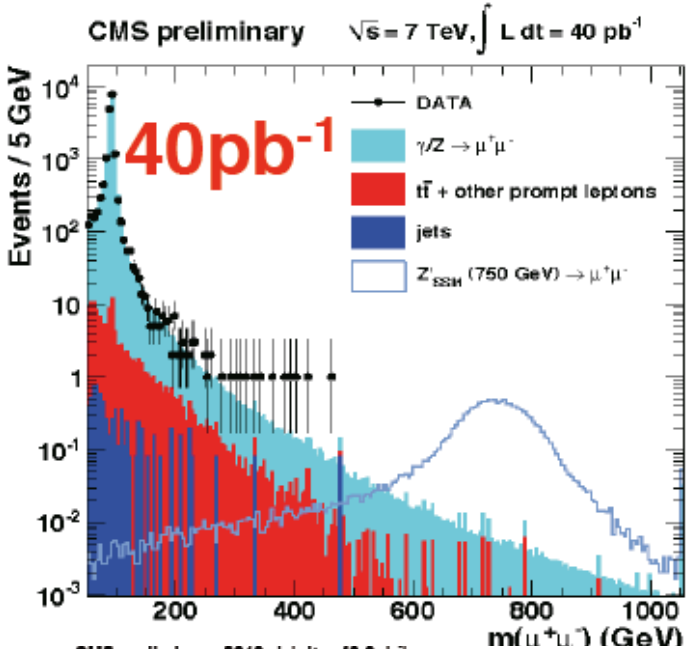
(2) high energy 分解能: (e/ $\gamma$  EM calorimeter  $\delta E/E \sim 1/\sqrt{E}$   $\mu$  Tracker  $\delta P/P \sim P$ )

(3) off-shell Wのテールまで綺麗に再現 高いところにやばい事象なし

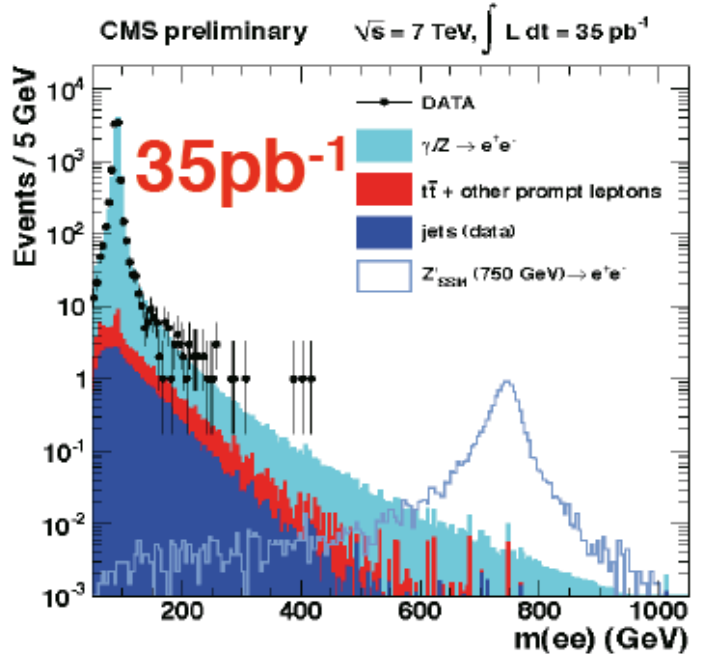
W' (SM Wと同じ結合を仮定)  $\sim$  **1.58 TeV (95%CL) (ATLAS 1.5 TeV)**

# Z( $\rightarrow$ ll) M distributions と KK Graviton

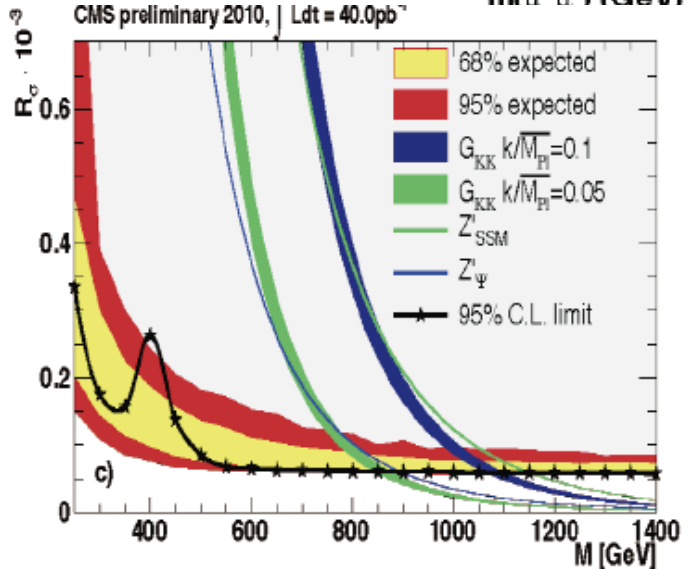
$Z' \rightarrow \mu^+ \mu^-$



$Z' \rightarrow e^+ e^-$



Z peak  
BY過程  
再現 data



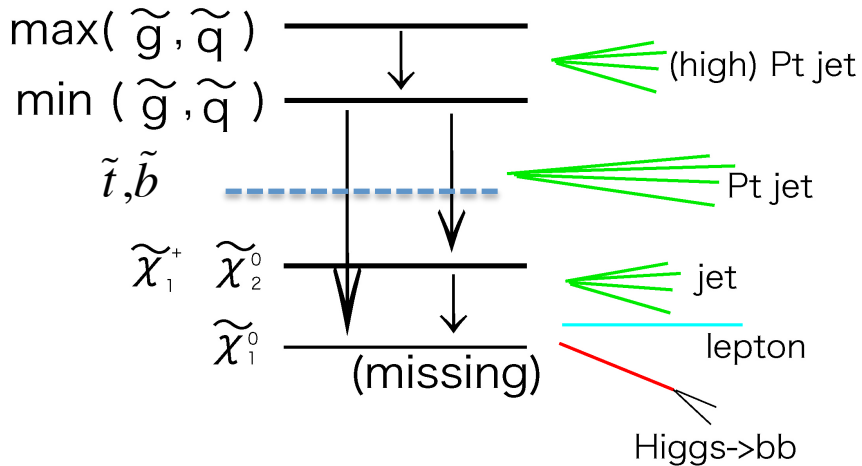
RS KK Graviton  $\rightarrow$  ll pair  
 mass(G) > **855-1079 GeV**  
 k/Mpl = 0.1-0.05  
 SM like Z' **1140 GeV**

(結合で幅が  
変わる)

**400 GeV 付近に!!!! ????**

# 3 SUSY : $mE_T$ のあるモード

LHCでのSUSY事象模式図 :  $mE_T$  が超対称性の一つの特徴



multi leptons  
 $E_T + \text{High } P_T \text{ jets} + \text{b-jets}$   
 $\tau$ -jets .....

Jet multi (high Pt)	Additional obj.	Favored Model	Dominant SM ba
High Multiplicity $N_j \geq 3, 4$	No lepton ★	SUGRA, AMSB, Large $m_0$	QCD(light & $bb/c$ ) $t\bar{t} (\rightarrow bb q\bar{q} \tau\nu)$ Z( $\rightarrow$ nunu) and W
	One lepton ★	SUGRA, AMSB, small $m_0$	$t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b} q\bar{q} l\nu)$ W( $\rightarrow$ lnu)+jets
	Dilepton, 3L	SUGRA, GMSB, RPV	OS: $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b} l\nu)$ SS, 3L ZW, ZZ $t\bar{t}$
	Tau	Large $\tan\beta$ , GMSB ( $N_m > 1$ )	W ( $\rightarrow$ taunu) $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b} q\bar{q} \tau\nu)$
	b ★	SUGRA, etc	$t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b} q\bar{q} \tau\nu)$
	$\gamma$	GMSB ( $N_m \sim 1$ ) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$	Almost BG Free $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b} e\nu)$
	Low Multiplicity $N_j \sim 1, 2$	No lepton ★	squark production
One lepton		squark production	W, Z $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b} l\nu)$
No jet $N_j = 0$	Dilepton, 3L	Direct $\tilde{\chi}$	WW, WZ, ZZ WZ main for 3L

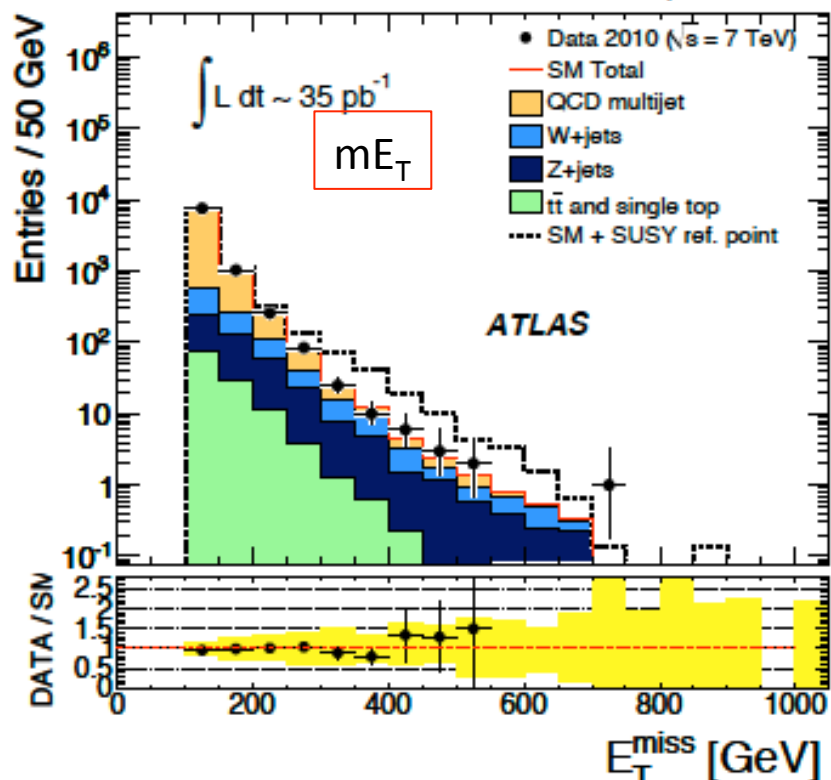
- (1) Neutralino DM が魅力
- (2) Tevatron and LEPと違ってカスケード
- (3) High PT jetはカラーから主に  
おまけの部分はEW

# 3-1 multijet+mE<sub>T</sub> (No lepton mode)

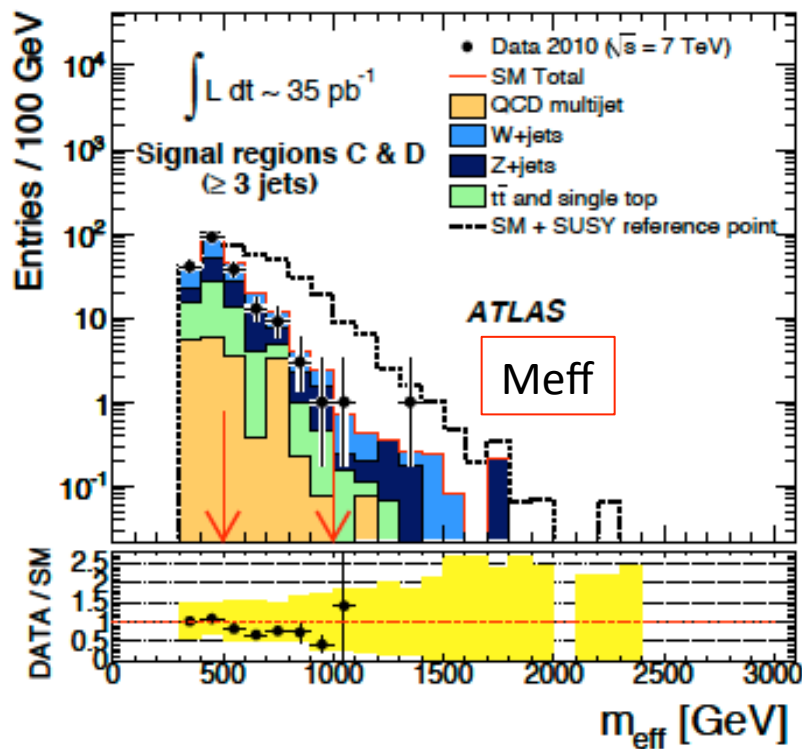
- Jets >120GeV (Trigger), 40GeV, 40GeV
- mE<sub>T</sub>>100GeV
- mE<sub>T</sub>/M<sub>eff</sub>>0.25 (QCDおとし signal kill)  
M<sub>eff</sub>=mE<sub>T</sub>+ΣP<sub>T</sub> ~ 1.5M<sub>SUSY</sub>
- Δφ (mE<sub>T</sub>-3jets)>0.4 (QCDおとし)

	data	BG	
M <sub>eff</sub> >1000	2	2.5+1	W/Z ~2
M <sub>eff</sub> >500	66	88+18	W/Z~62

2つのkinematicsに分けて。  
(Large m<sub>0</sub>, small m<sub>1/2</sub> -> M<sub>eff</sub>>500)



Ref. m<sub>0</sub>=200 m<sub>1/2</sub>=190 (msq~mgl~480)



No excess

Z/Wを残し過ぎている

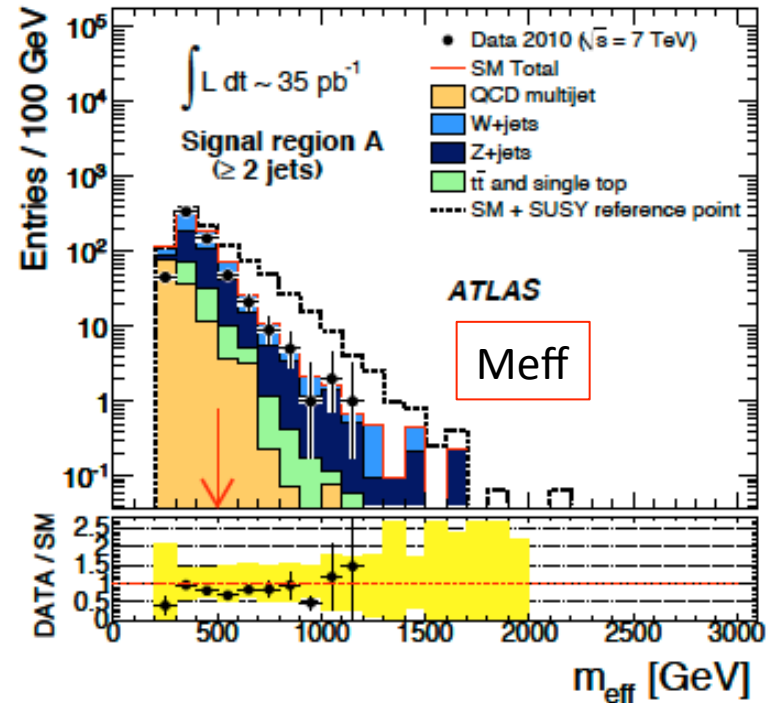
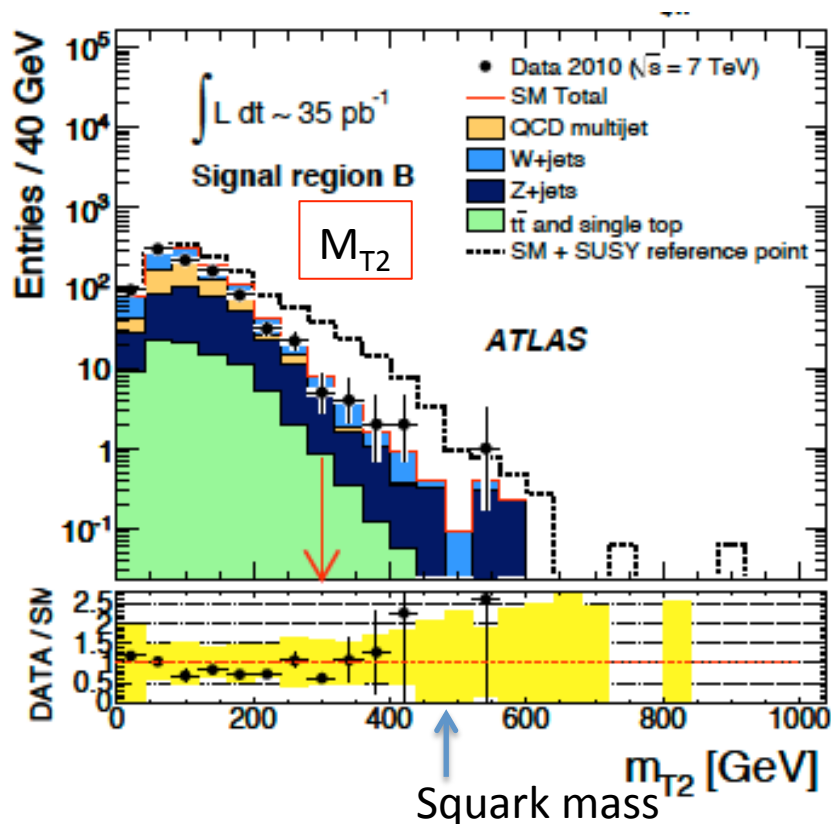
# 3-2 2jet+mE<sub>T</sub> (No lepton mode)

- Jets >120GeV (Trigger), 40GeV
- mE<sub>T</sub>>100GeV
- mE<sub>T</sub>/M<sub>eff</sub>>0.3
- Δφ (mE<sub>T</sub>-2jets)>0.4

$$M_{\text{eff}} = mE_T + \Sigma P_T$$

	data	BG	
M <sub>eff</sub> >500	87	118+25	W/Z ~102
MT2>300	11	10.0+4.3	W/Z~8.5

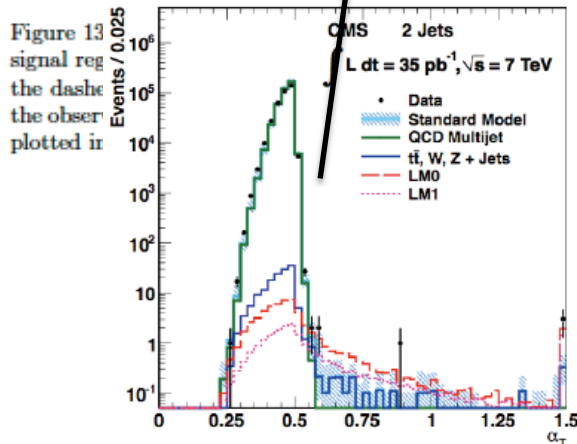
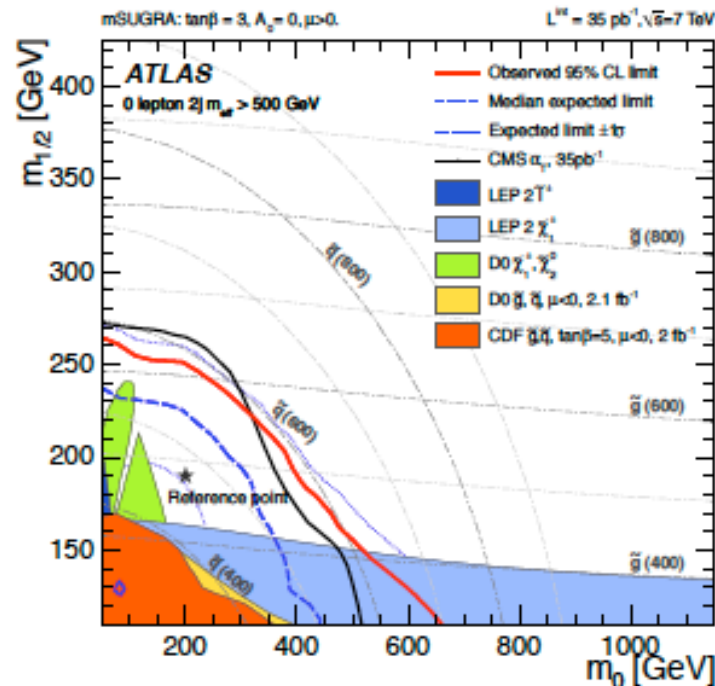
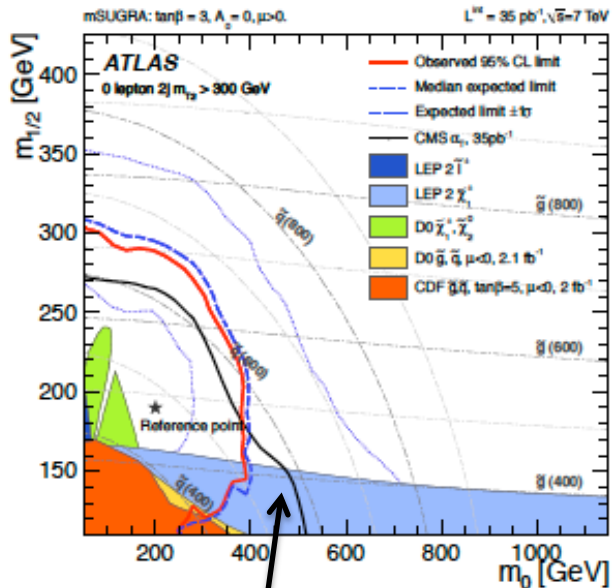
M<sub>eff</sub>、MT2 流儀 MT2使い方注意



No excess

$$\min_{\{P_T^{\chi(1)} + P_T^{\chi(2)} = -P_T^{vis(1)} - P_T^{vis(2)}\}} \left[ \max\{m_T^{(1)}, m_T^{(2)}\} \right]$$

Scalar Sum MET+J1+J2 よりは MT2の方が  
vector 情報も使っている



2 jet and  $m_{T2} > 300$   
pected 95% CL limit  
tively. The red line is  
200,  $m_{1/2} = 190 \text{ GeV}$   
by a star.

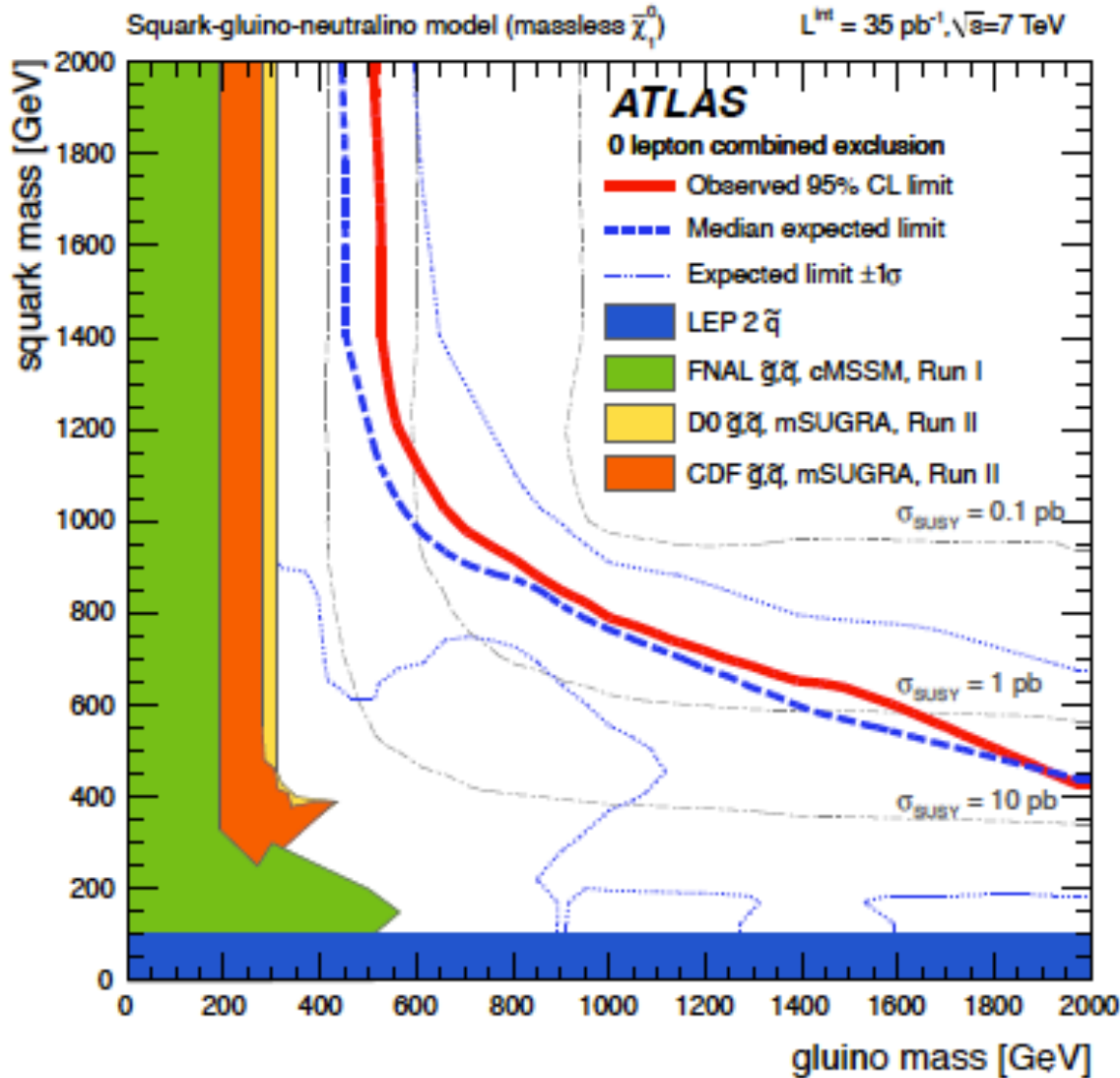
Figure 12: Expected and observed exclusion limits in the 2 jet and  $m_{eff} > 500 \text{ GeV}$  signal region. The blue dashed line corresponds to the expected 95% CL limit, the dashed-solid blue lines to  $\pm 1\sigma$  95% CL limits respectively. The red line is the observed limit. The reference mSUGRA point ( $m_0 = 200, m_{1/2} = 190 \text{ GeV}$ ) plotted in the signal distribution histograms is indicated by a star.

$$\alpha_T = \frac{E_T^{j2}}{M_T^{j1, j2}} = \frac{\sqrt{E_T^{j2} / E_T^{j1}}}{2} < \frac{1}{2}$$

Jet Asymmetry



# 3-3 naïve(=Limit (simplified model)



ちょっとナイーブすぎますが

squark みんな同じ  
 きやつらは  $q \rightarrow q \nu_1$   
 ... ( $\nu_1$  massless)

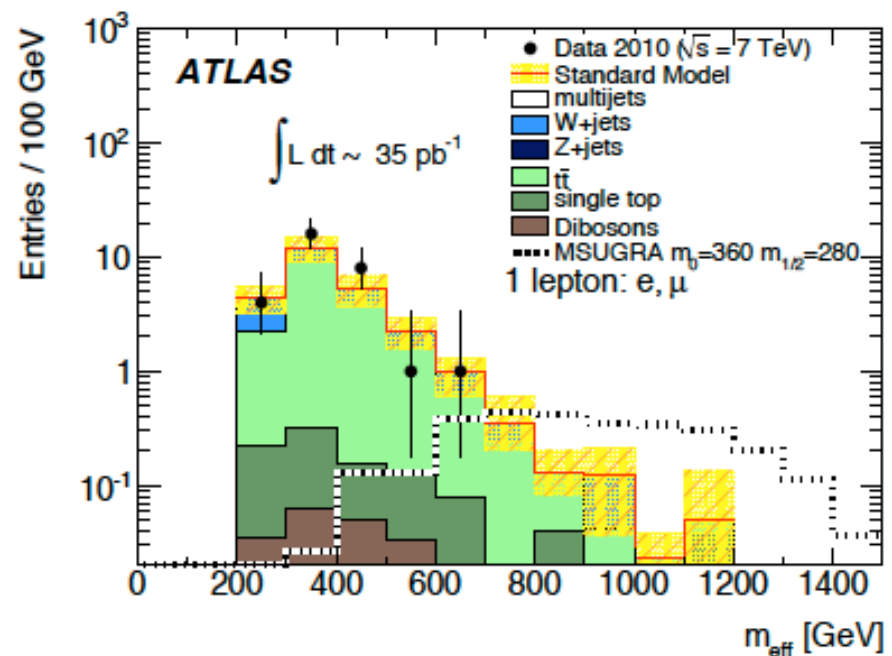
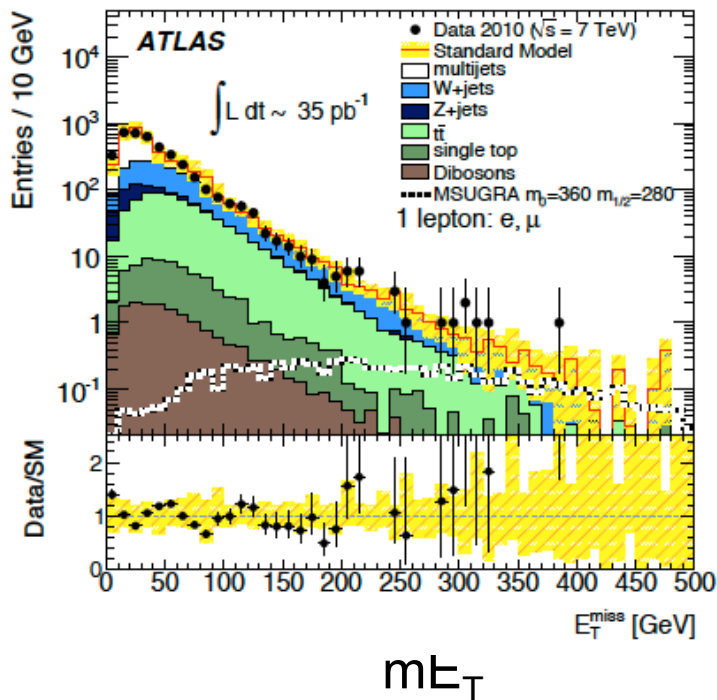
squark 重くすると

gluino  $\sim 500 \text{ GeV}$  limit

# 3-6 Lepton+multijet+mE<sub>T</sub> (one lepton mode) (I)

- One lepton (e, mu) PT > 20 GeV (Trigger)
- at least 3 Jets PT > 60, 30, 30 GeV
- mE<sub>T</sub> > 80 GeV (実質 125 GeV)
- mE<sub>T</sub>/M<sub>eff</sub> > 0.25
- MT > 100 GeV M<sub>eff</sub> > 500 GeV

Efficiency e ~ 80%  
muon ~ 90%



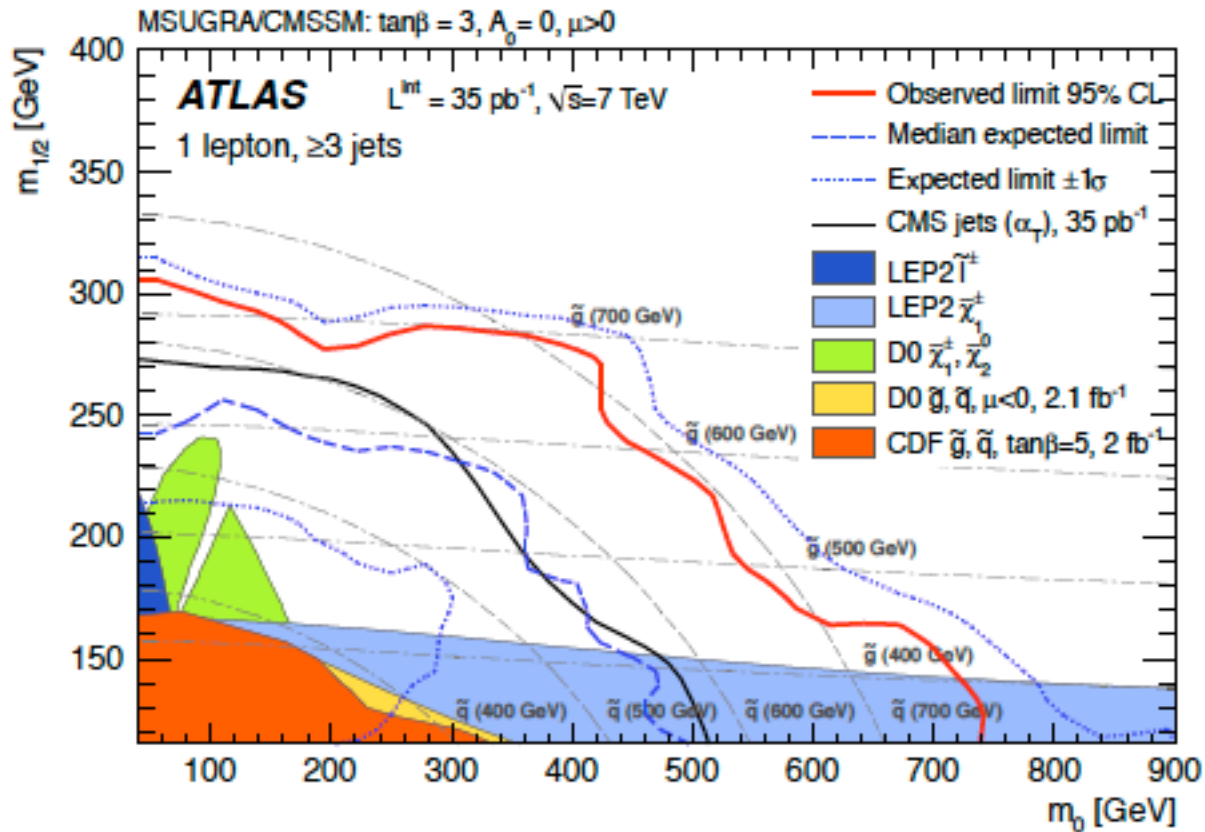
最終的に  $mE_T > 125 \text{ GeV}$ を要求するので W と topが主なBGになる  
 2 Events observed

**No excess**

# 3-6 Lepton+multijet+mE<sub>T</sub> (one lepton mode) (II)

Electron Data 1 BG 1.8±0.8  
 Muon Data 1 BG 2.3±0.9  
 (top が BG)

~700GeV ぐらいまで  
**exclude**



# 4 SUSY 長寿命粒子のいるモード

モチベーション

- (1) AMSB Wino LSP chargino life  $c\tau = 1-10$  cm
- (2) GMSB stau NLSP stable in detector
- (3) SPLIT SUSY ( $m_0 > 1000$  TeV) gluino  $\rightarrow$  R-hadron
- (4) R-parity violationで長寿命

実験的

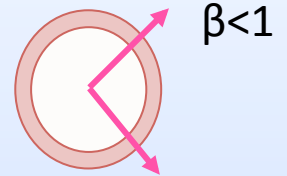
(A) Heavy stable charged particle (stau, R-hadron)

A1 Energy loss  $dE/dx \sim 1/\beta^2$  ベーテブロッホ

PIXEL検出器やTRT (集めた電荷のアナログ量ある)

A2 TOF (time of flight)  $\beta < 1$  なので到着時間が遅れる

muon検出器やハドロン検出器(時間精度 nsec + 外側の検出器)



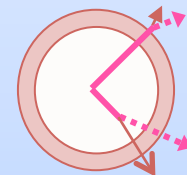
(B) Decay in flight (AMSB winoやR-parity)

B1 Kink/disappeared track (途中で折れたり消えたり)

TRT (連続飛跡検出器  $c\tau$  500-1000mm)

B2 Displaced vertex ( $c\tau$  O(1-100 mm))

b-tagと同じ



(C) Calorimeter Hadronで止まる  $\beta \ll 1$ は物質の中で止まることが出来る。

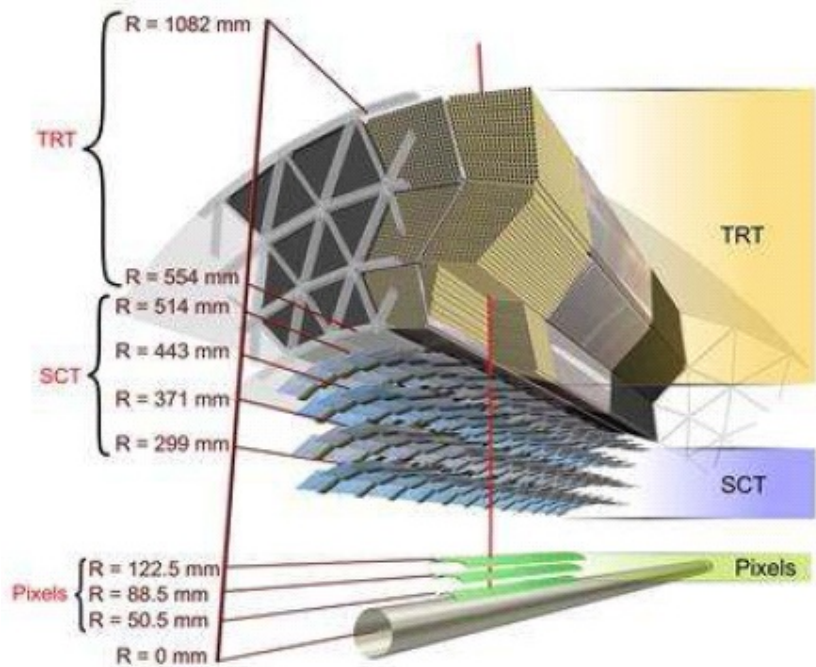
一定の寿命後に崩壊 (triggerが工夫)

# テクノロジーと寿命

(?) BGなど調査中

CTY 0.1mm 100mm 1000mm  $\infty$

	Displaced Vertex	dE/dx in Pixel	Kink / Disappearing	dE/dx in TRT	Time of Flight In Calorimeter	Time Of Flight In Muon Spectrometer	Stop in Calorimeter
RPV	✓		✓(?)				
AMSB		✓(?)	✓				
Stau		✓	✓		✓	✓	✓(?)
R-had		✓			✓	✓	✓



検出器コンポーネントの半径R 概値

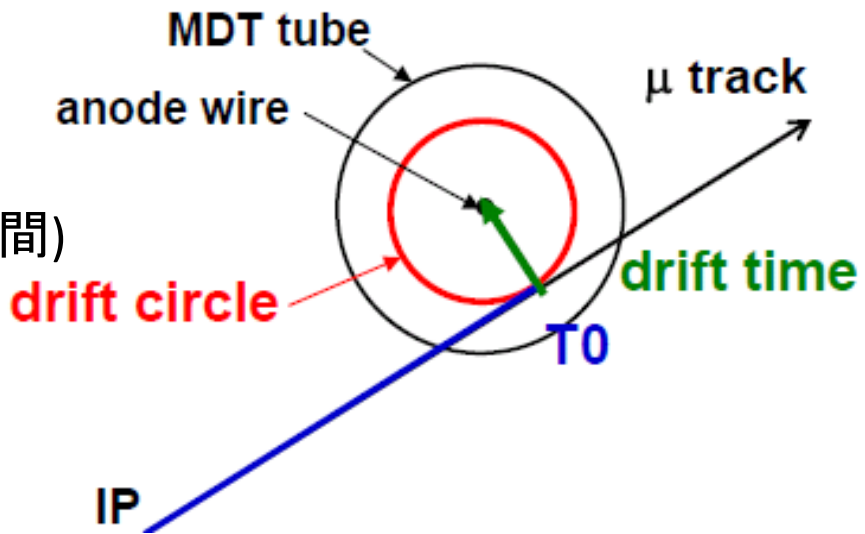
	ATLAS	CMS
Vertex	0.1mm	0.1mm
Pixel(dE/dx)	5-10cm	5-10cm
TRT(連続)	50-100cm	なし
Hcal	2-4m ( $\Delta t \sim 1\text{nsec}$ )	1.5-2.5m
$\mu$	5-10m ( $\Delta t \sim 1\text{nsec}$ )	4-6m

Hadron カロリメーター 厚さ1mの鉄  
 プラシで時間分解能  $\sim 1\text{nsec}$

# (A2) ミューオン検出器を用いた $\beta$ 測定 (I)

一般的な $\mu$ の位置測定について

**drift time** =  
 測定時間 -  $T_0$  (IPからtubeまでの時間)  
**drift circle** = drift timeの関数

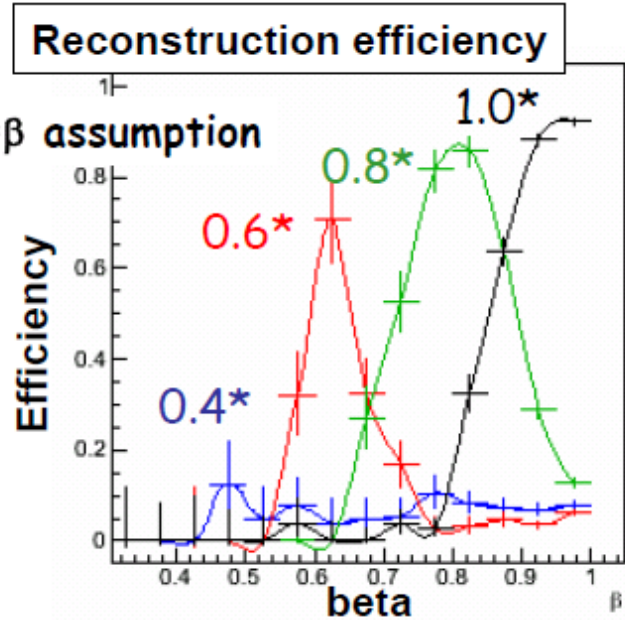


$\beta=1$ として計算しているため $\beta<1$ の粒子にたいして位置を正しく計算できない。

複数の点でfitした結果が悪い(ジグザク)の奴を選んでくる  
 $T_0$ を調整することで $\chi^2$ が良くなるトラックを探す

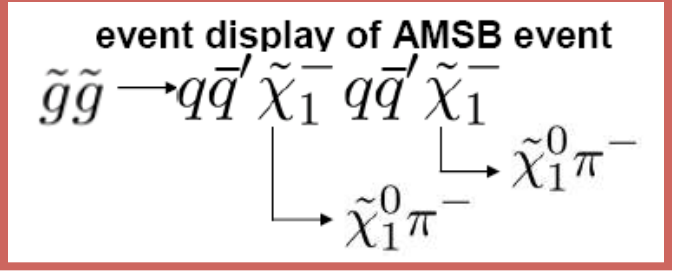
**$\beta = 0.4 - 0.97$**

Efficiency ~ 35%  
 Trigger muon





(B1) Kink/displaced track (I)

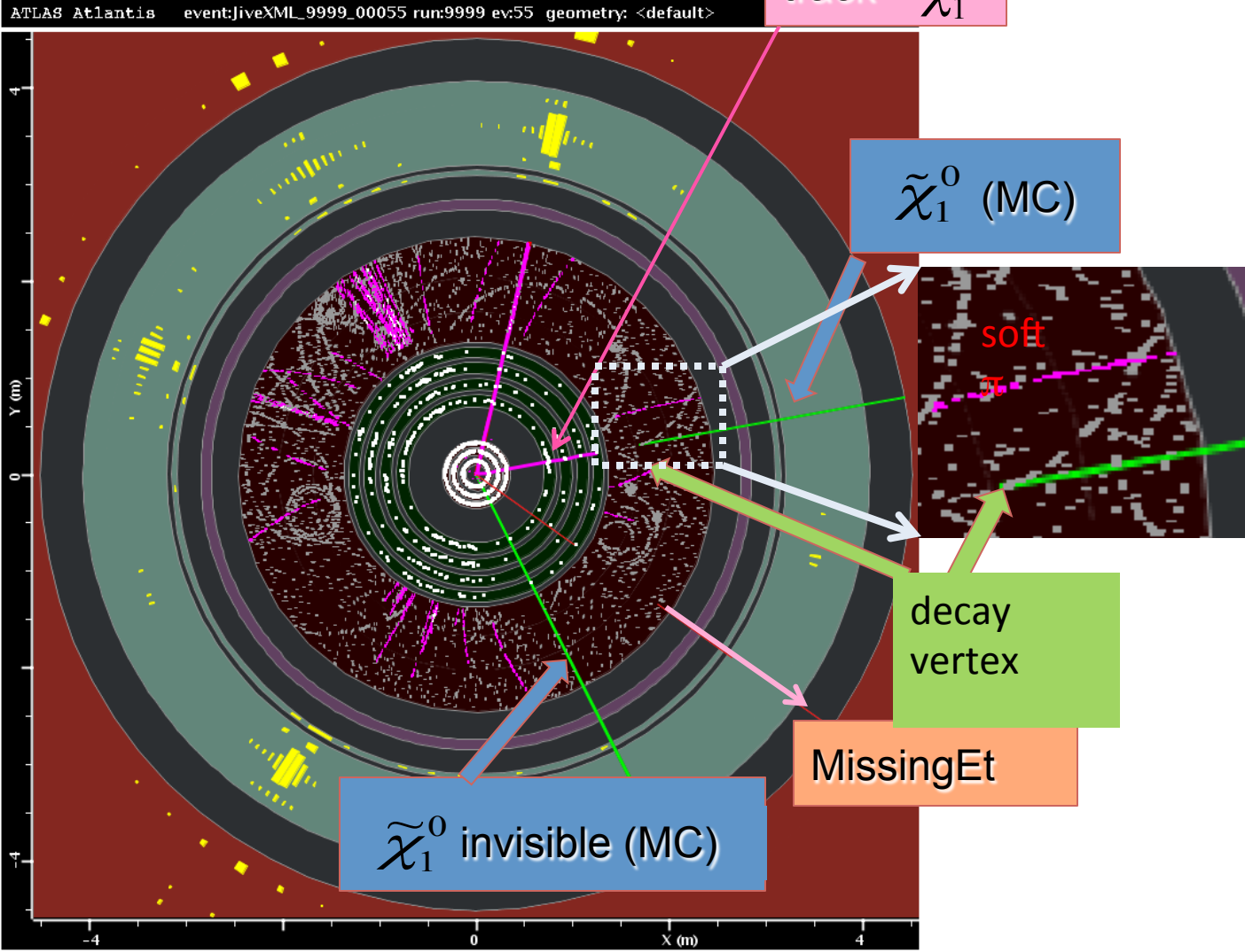


AMSB:  
WinoがLSP

Chargino Wino<sup>+</sup>  
Neutralino Wino<sup>0</sup>  
Mass 縮退

mass (  $\tilde{g}$  ) = 1TeV  
mass (  $\tilde{q}$  ) = 1TeV

Br(  $\tilde{g} \rightarrow qq'\chi$  ) = 1  
mass(chargino) = 100.157GeV  
mass(neutralino) = 100.000GeV  
 $\tau$  of chargino = 300mm  
cross section : 170 fb



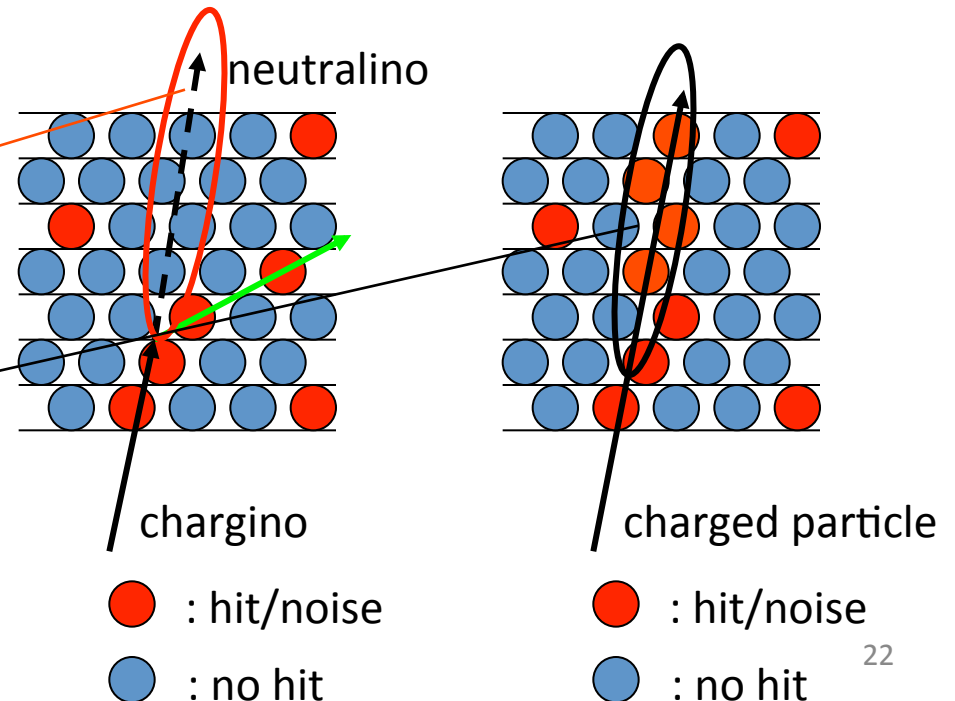
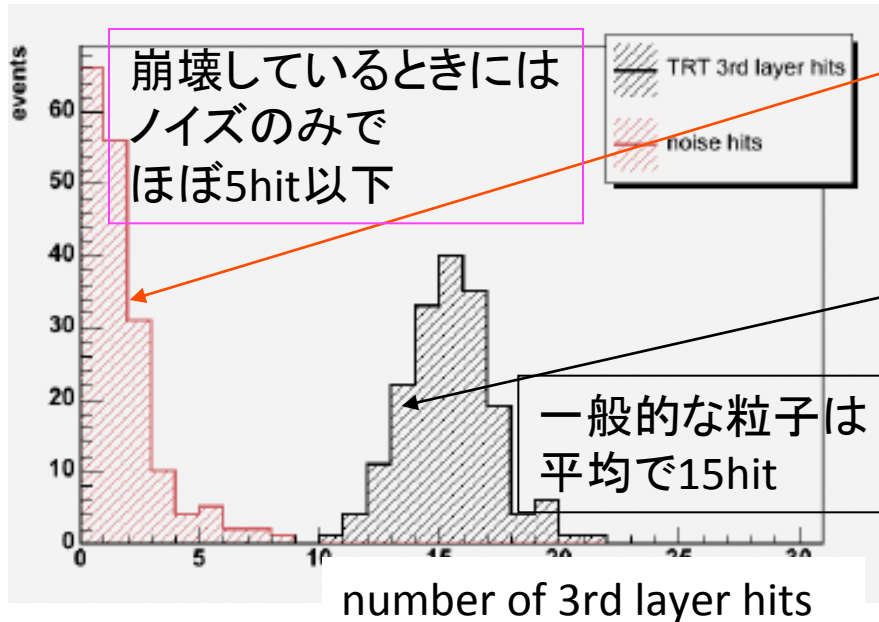
## (B1) Kink/displaced track (II)

### track探索の方法

ATLASのTRT検出器を用いる。TRTは大きく3層構造になっているので、3層目までに崩壊したものを探す。

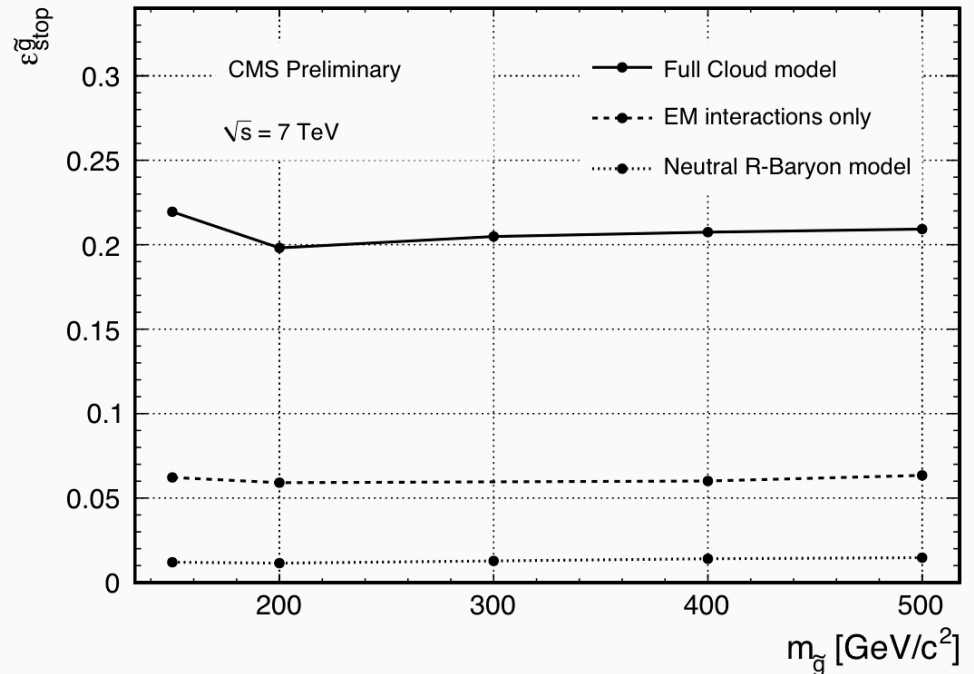
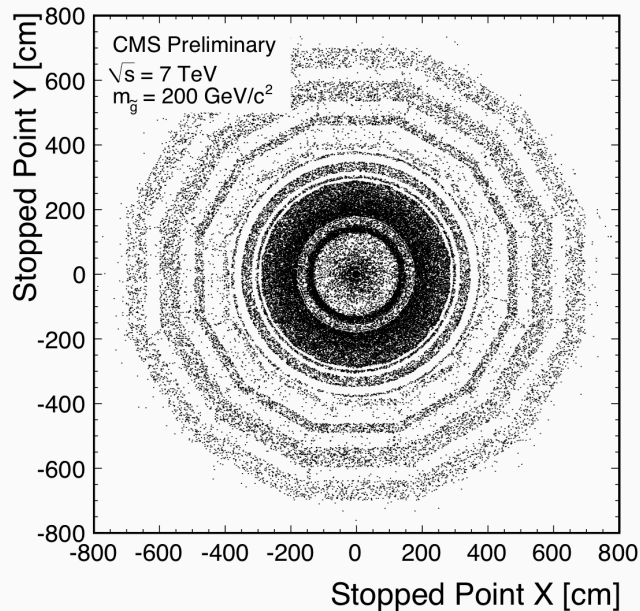
高い運動量のtrackから、TRT検出器までextrapolateし、各layer毎でのtrackの位置を計算する。track付近のhitを数える。

→途中でdecayしているかをhit数で区別 消える点を計る->life測定も可能



## (C) Stop in Calorimeter

- (1) charged heavy particles (stau,  $R^+$  ....) loss kinetic energy  $dE/dx \sim 1/\beta^2$   
 Emitted particles with small  $\beta$  stop in dense material (Hcal)  
 -> about 5% will stop (stau case -> See PRL 103:141803(2009) Asai, Hamaguchi,)
- (2) Neutral Hadron (R-hadron) case -> strong interaction there is large systematic error

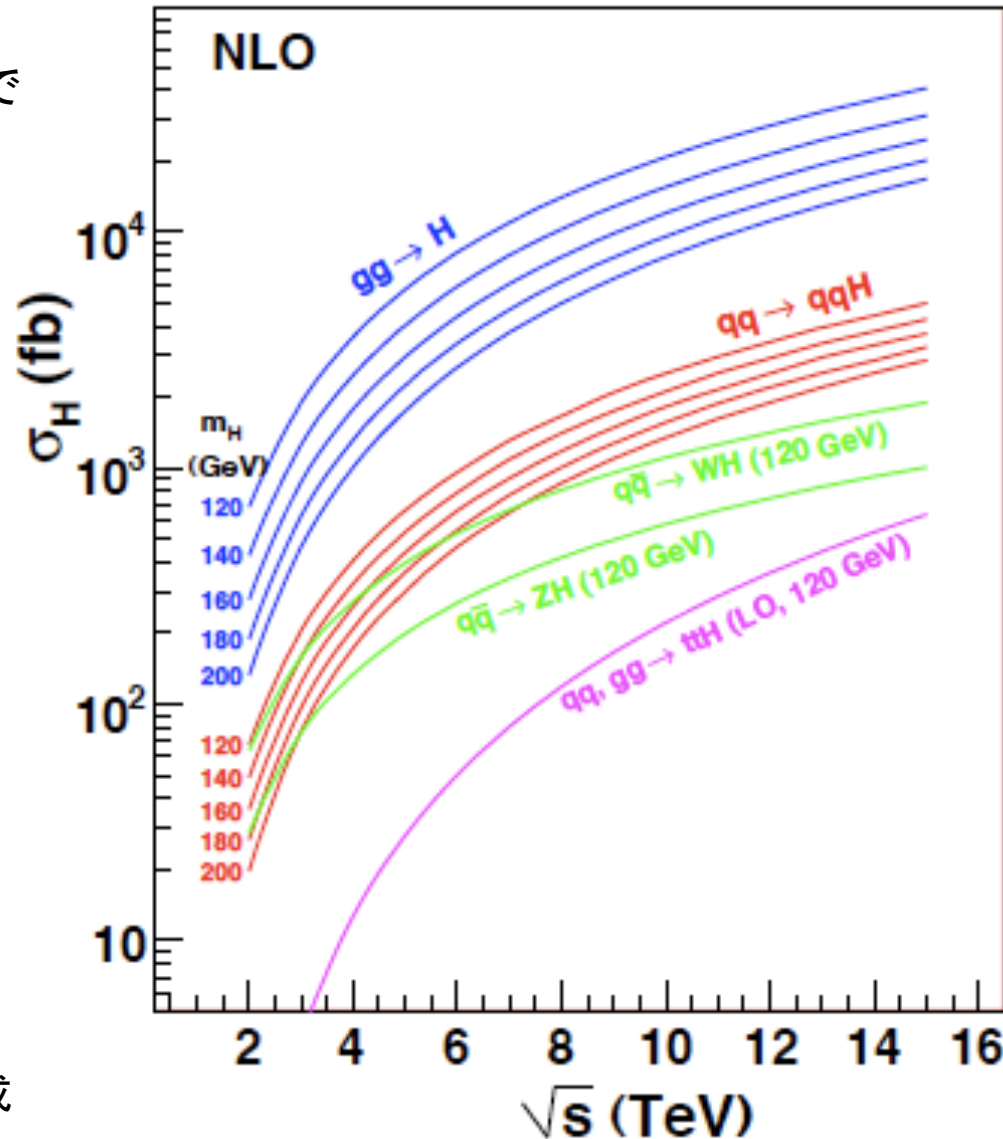
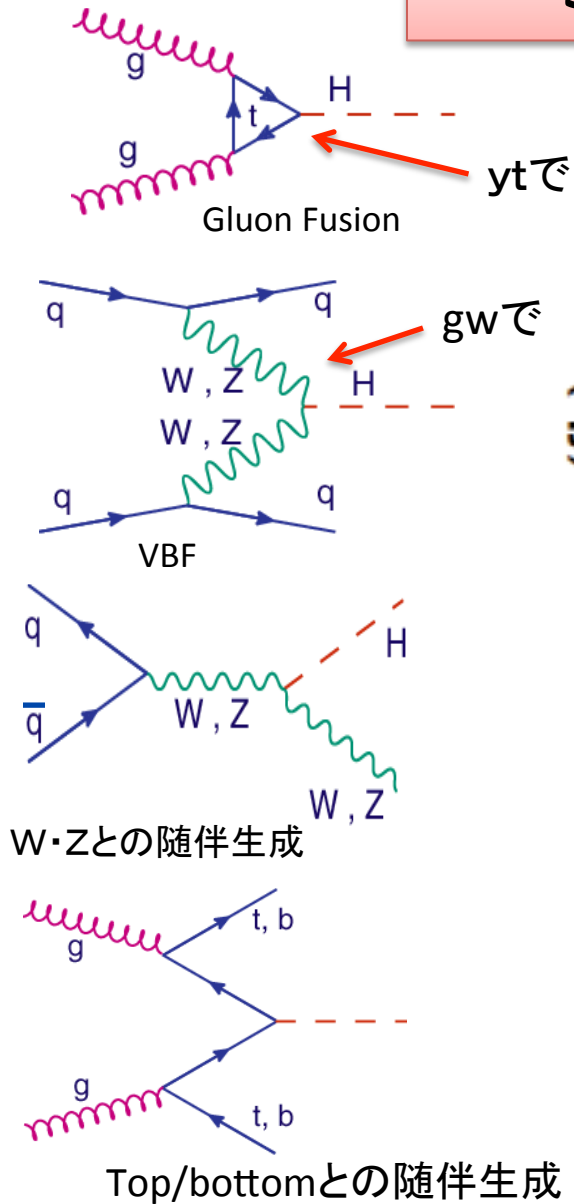


Stop particle decay with  $\tau = 10^{-7} - 10^{10}$  sec, single cluster will be observed in Hcal.

Dedicated trigger has been introduced in CMS (empty bunch is used: good for high rate case)

In PRL, beam dump is proposed (good for low rate case).

# 5 Higgs & diBoson



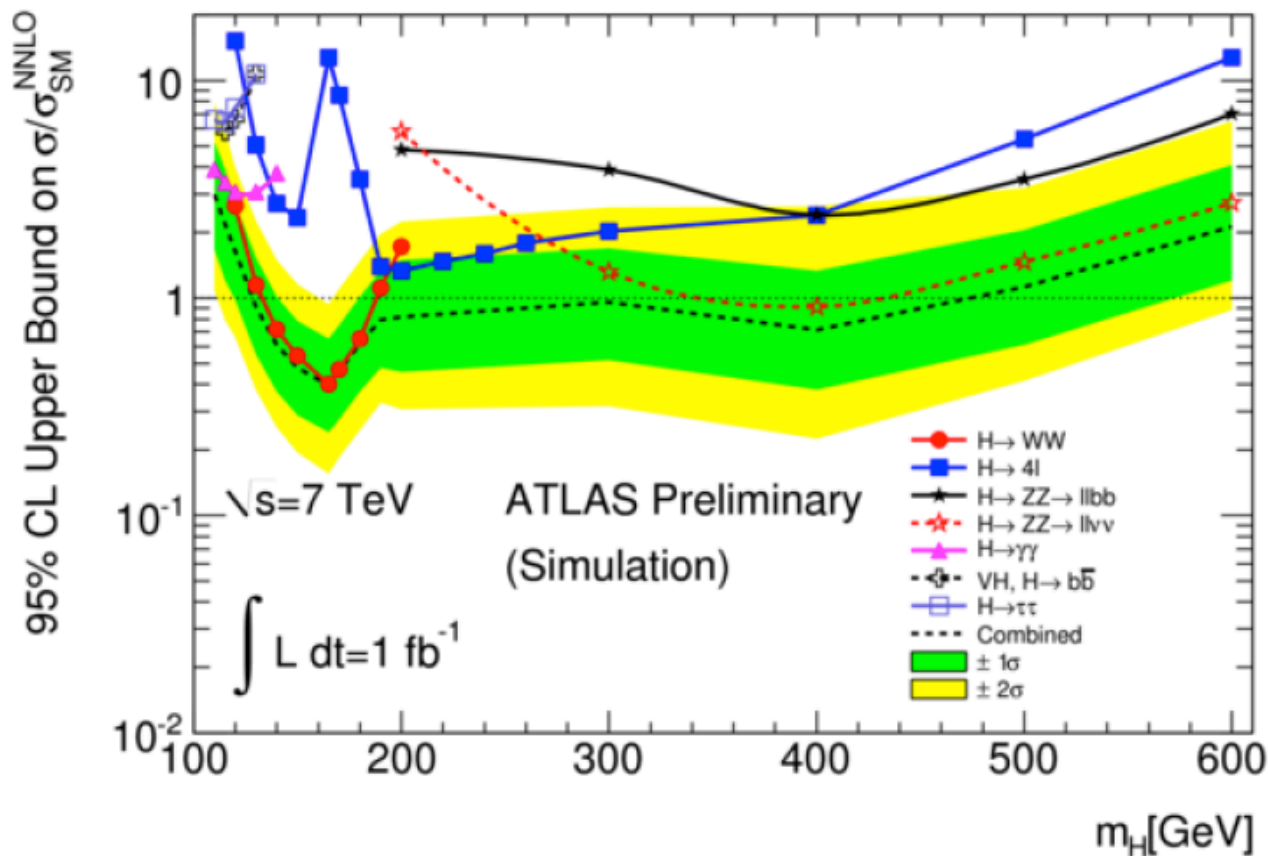
120GeV  
Higgsで

20~35pb  
for GF

2.5~4 pb  
for VBF

10TeVだと  
14TeVの  
半分くらい  
7TeVだと  
更にその  
半分程度

# 5-4 この夏の予想 (寂しい場合)

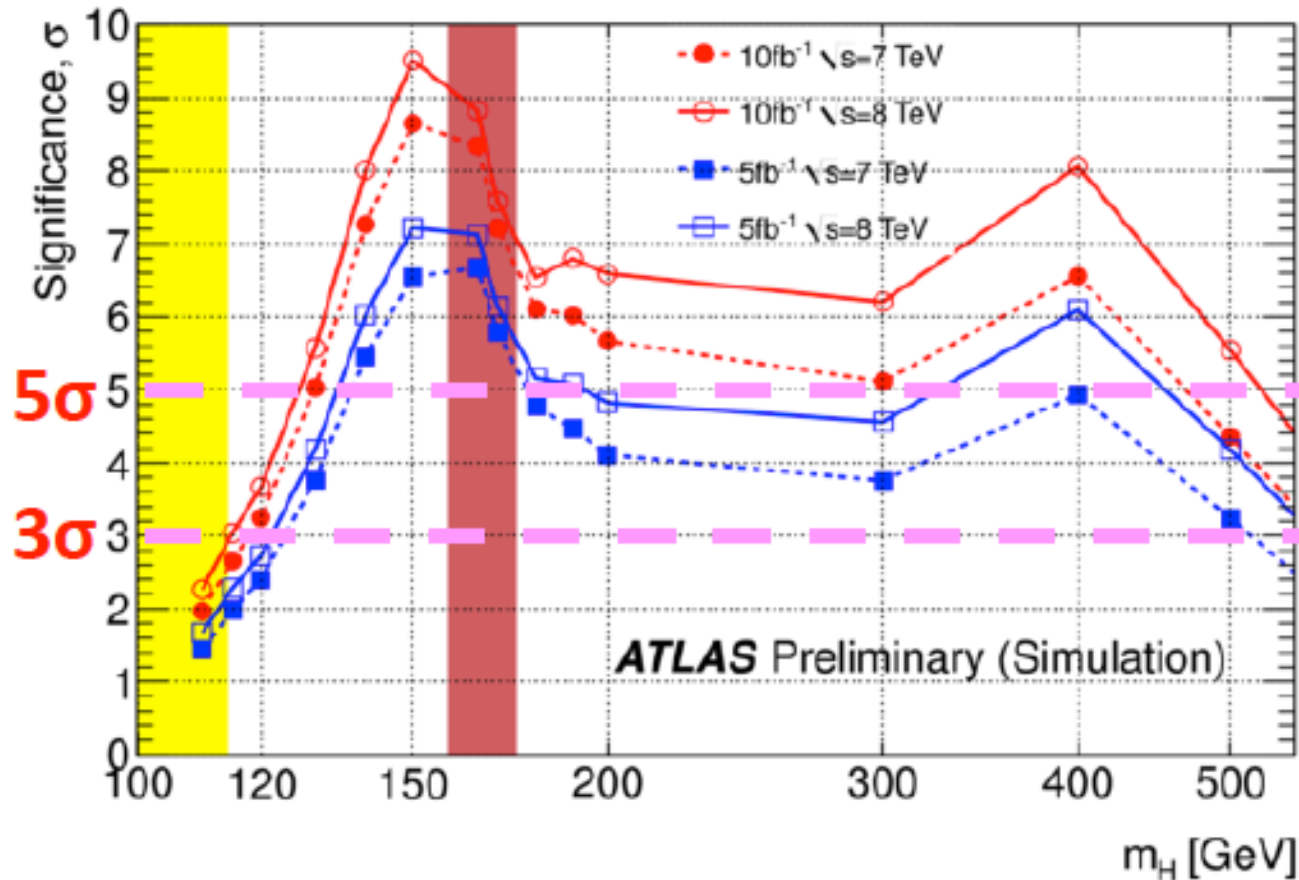


WWが軽いときも鍵  
思っていたより  
 $\gamma\gamma$  tautauは  
根性無し

大事なことは、  
gluon fusionをexclude  
ただけ。  
 $Y_t$ がsuppressされると  
このlimitは有効でない  
(生成図)

**$M_{Higgs} = 130-450$  GeV SM Higgs をexclude 出来る**

# 5-5 来年の予想 (もっともらしい)



Mh>130GeV  
だと ATLAS単独で  
軽く5 $\sigma$ 超え

来年 7 fb<sup>-1</sup> だと あわせて 10fb<sup>-1</sup> いくので 3 $\sigma$ レベル  
ATLAS+CMSで5 $\sigma$ 近い発見 が可能

そろそろ W/top  
と分離して何か  
議論が出来る  
ようになる。。



# 纏め

ないないづくし ごめんなさい。  
今年は No surprise  
Sub-TeV に new physics はない  
Naïve Bino DMはきつい

$L \sim 2.5 \text{ fb}^{-1}$

今年はTeV超え SUSY, ED  
Higgs は exclude この夏