

LHCと宇宙物理

”Dark Side” と”Extraキワモノ”に重きを置いて

1. LHC/ATLAS/CMS 概略と現状
2. 超対称性研究
3. 余剰次元研究
4. スカラー場(まあHiggsです)
5. 纏め

物語の舞台は、ジュネーブ郊外のCERN 地下100m

円周27kmのリング

フランス側

ジュラ山脈

CERN

Geneva空港

ジュネーブの街

スイス側



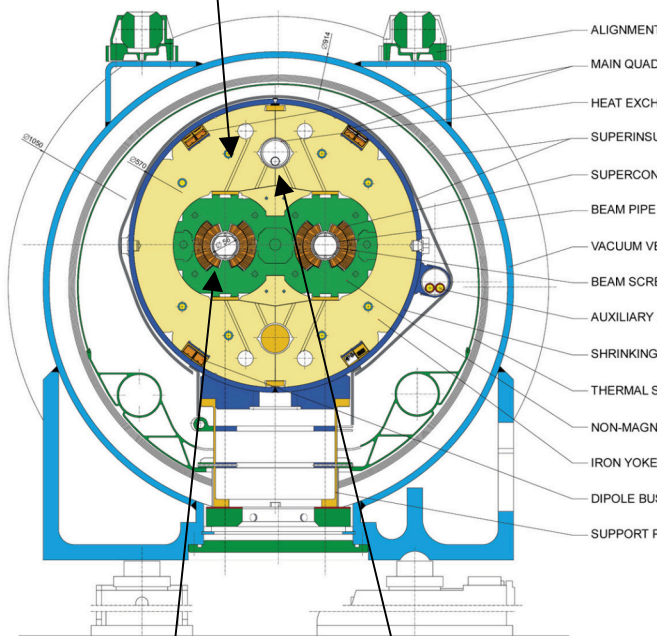
Bending dipole magnet

そこには、
15mの巨大二重魔法瓶

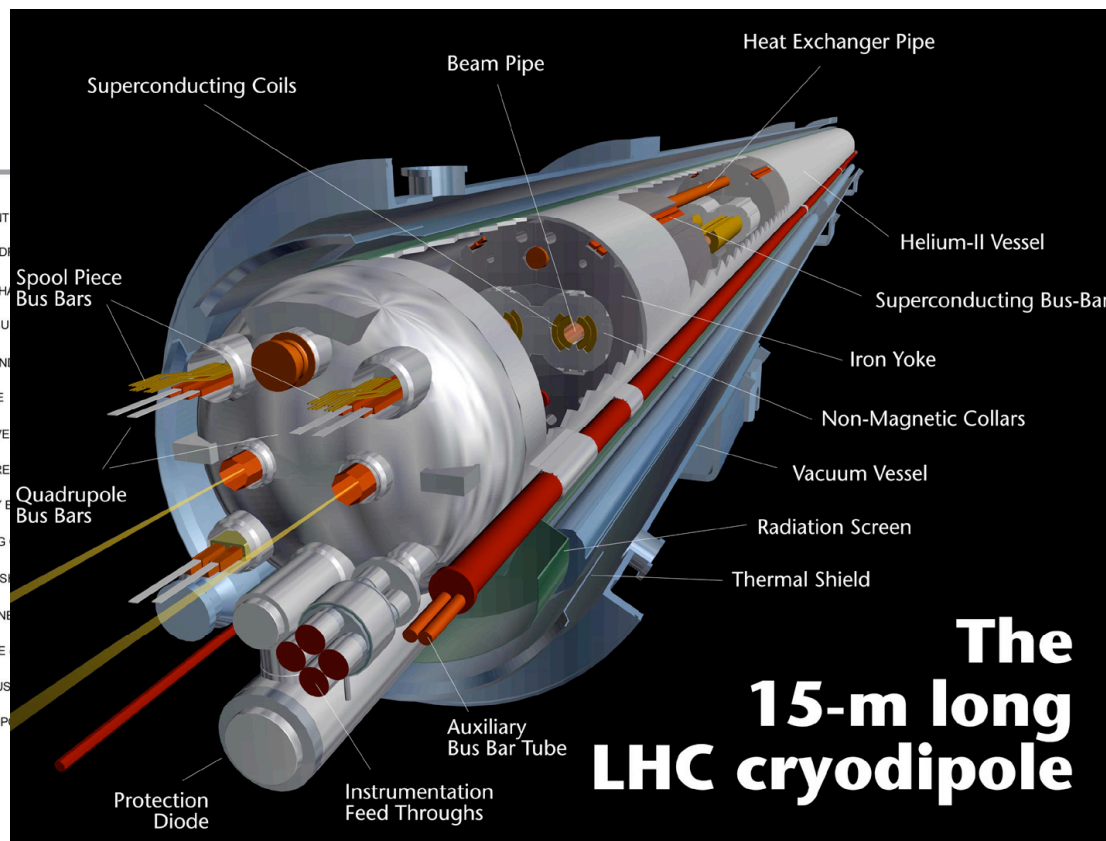
内側1.9K cold mass (世界最大の冷たい巨大構造体)

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DT/MM - HE107 - 30 04 1999



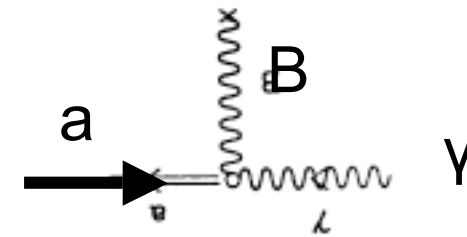
ヒートシンク



The
15-m long
LHC cryodipole

NbTi 超伝導1.9K(He温度)まで冷やして、 $B=8.3\text{T}$ (7TeV) (injection 0.5T at 450GeV)
コイル→磁場を上下方向に発生させている。 PPなので、逆向きの磁場がふたつ必要

(大きくて強い磁石！) バイプロダクト: CAST (solar Axion探索)



8.3T 15mなんてそんじょそこらにない。
Axion は、磁場中で γ に化ける。

確率 $(BL)^2$

太陽内でaxionが太陽温度 KeVの運動
エネルギーで放射。

プリマコフ、コンプトン
過程で太陽から
KeVのエネルギー
を持ったAxionが放出

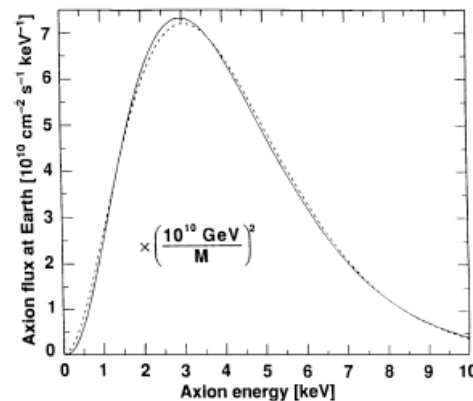
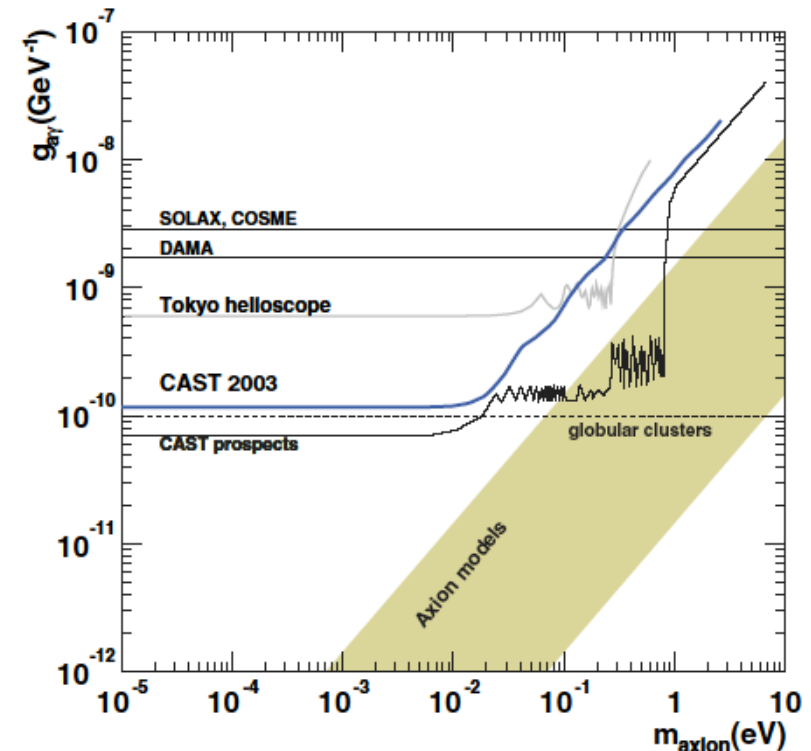


Fig. 22. Calculated spectrum of solar axions.



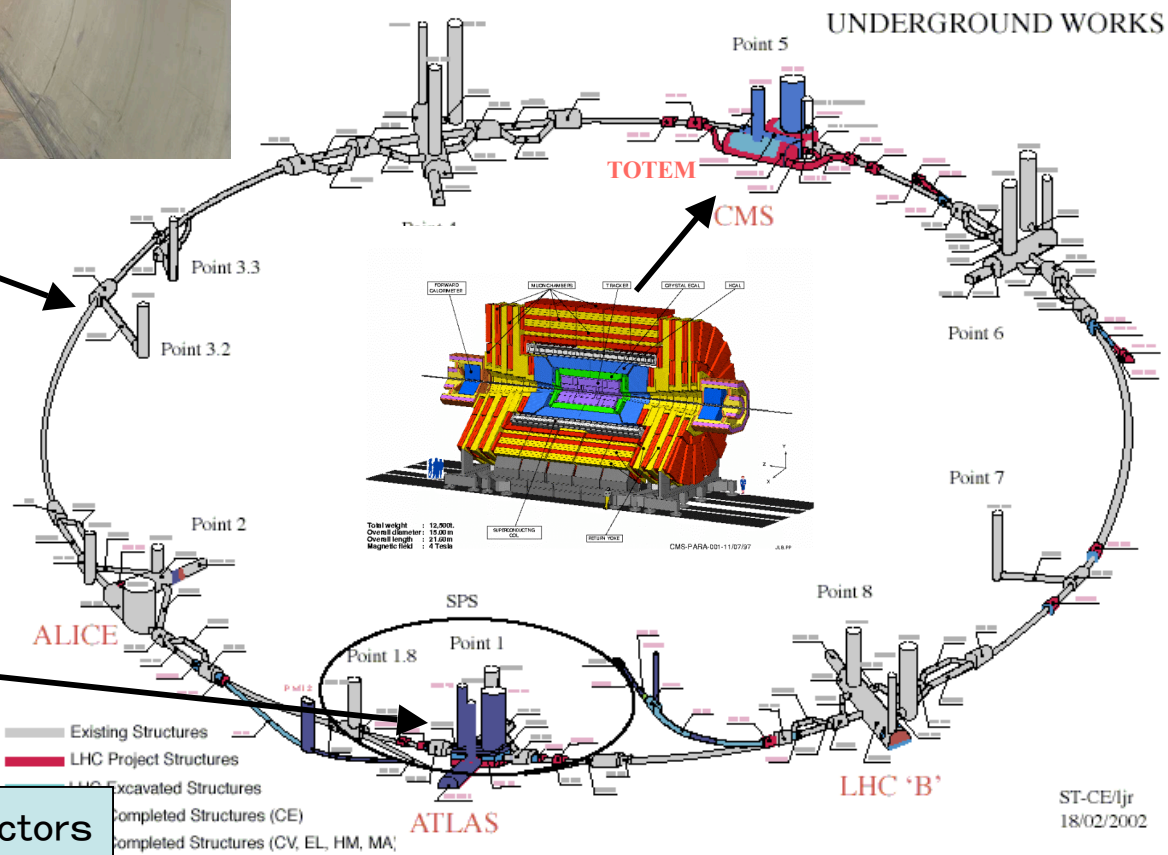
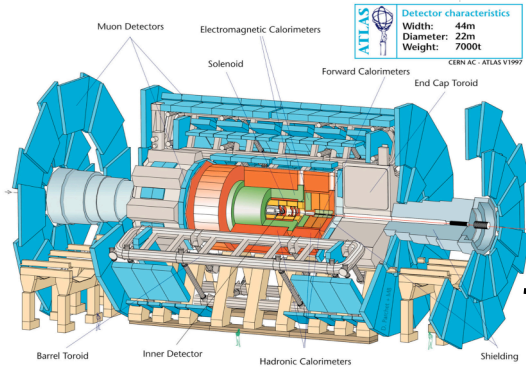
LHC加速器

一周27 km LHC 地下トンネル, 8.3T超伝導磁石
15mの1232本 ひきつめる。



PP collider $\sqrt{s}=14\text{TeV}$
Design $L=10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ($100\text{fb}^{-1}/\text{year}$ KEK-B並)
 $10^{32}\text{--}10^{33}$ for 2008 and 2009 (発見はOK)
陽子・陽子なので 反陽子の様に
ルミノシティの問題(Tevatron)ない

日本はATLAS



2つの General purpose Detectors
ATLAS and CMS

LHCの予定

4重極磁石の冷却事故

約2-3ヶ月遅れ

(ババを抜いたのはFNAL)

今年の実験はなし



Machine and Detectors Ready

晩秋-冬 2007

冬に冷却試験など

$\sqrt{s}=14\text{TeV}$ Commissioning Run

4月 2008

$\sqrt{s}=14\text{TeV}$ Physics Run

6、7月 2008

2008年の終わりには 約 $L=0.5-1 \text{ fb}^{-1}$

(SUSY up to 1.5 TeV , BH)

2009年の終わり $L = 10 \text{ fb}^{-1}$ (10^{33})

(Higgs , SUSY up to 2TeV)

2010,11年以降 Design Luminosity ($100\text{fb}^{-1}/\text{年間}$)

Detail study Higgs/SUSY/LED/ "SM"

2013,14?シャットダウン Update SuperLHC計画 ($1000 \text{ fb}^{-1}/\text{年間}$)

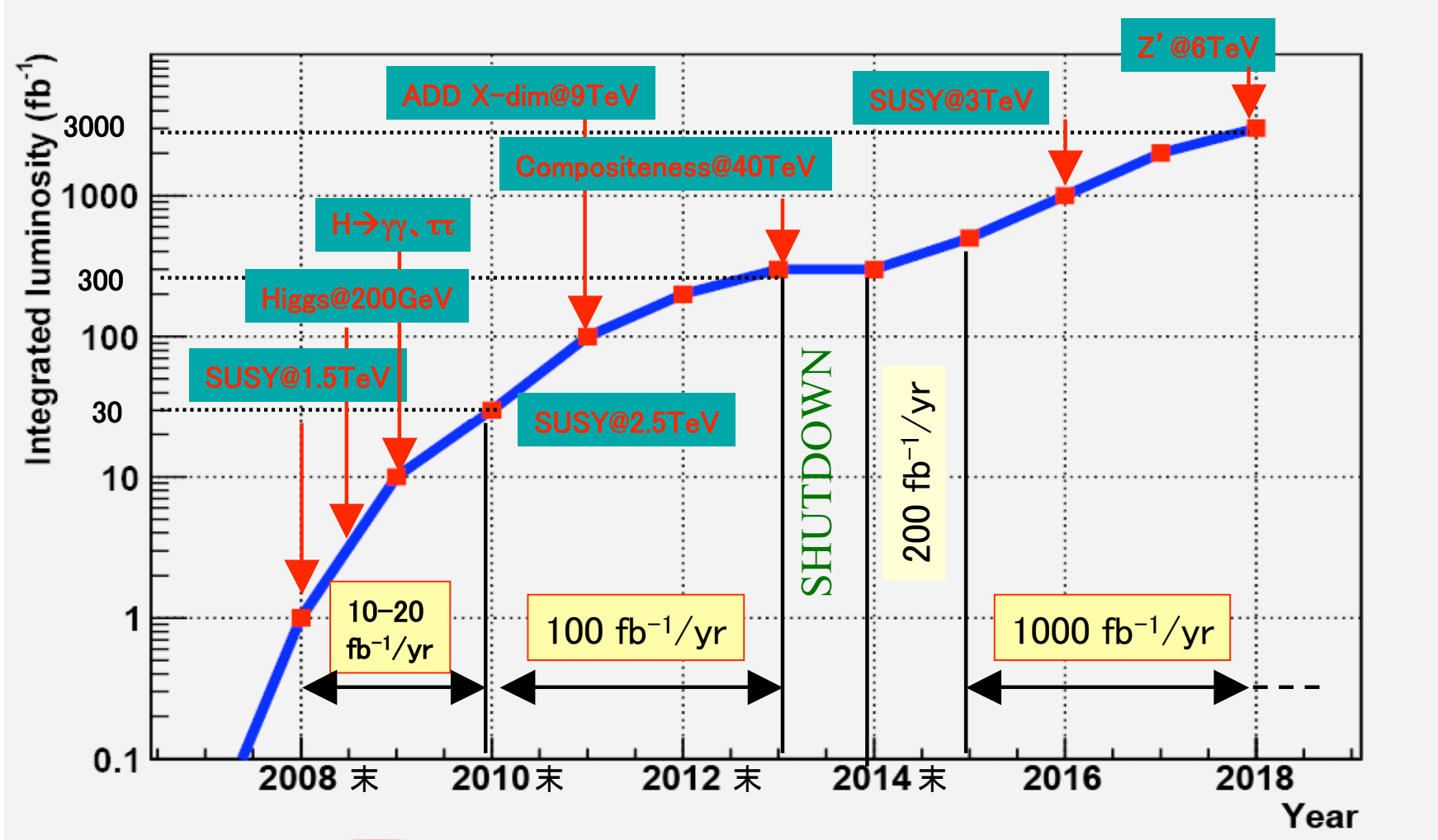
(まだ決定していない。Physだけじゃなくて、大人の世界が決める)

LHC Luminosity Profile

$L = 10^{33}$

$L = 10^{34}$

SLHC: $L = 10^{35}$



0.5 ~ 1 fb^{-1} by the end of 2008

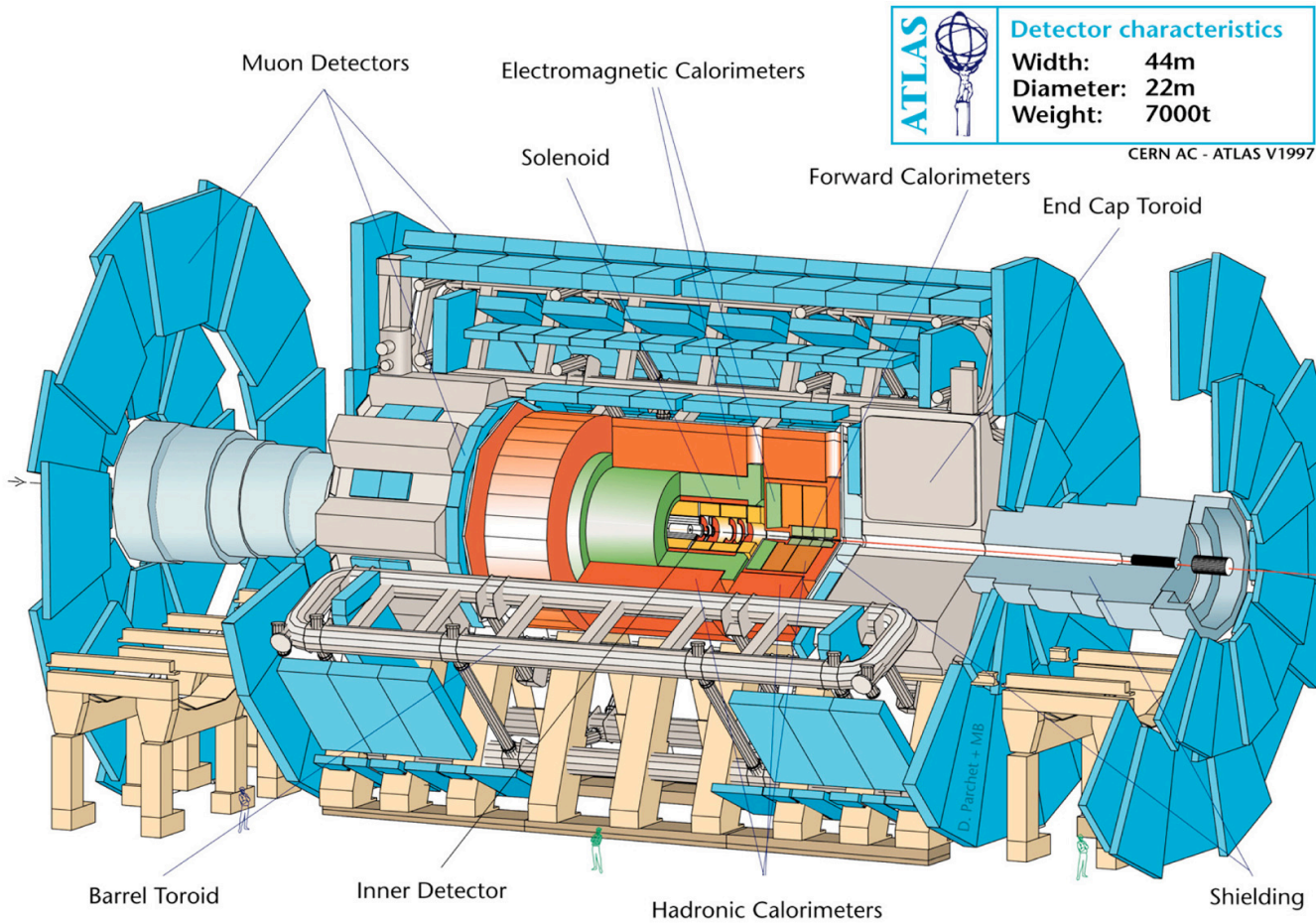
僅か $L=10\text{fb}^{-1}$ (2009)でも膨大な統計量のデータが観測

代表的な過程	Event rate 2×10^{33}	初めの1年半で $L=10\text{fb}^{-1}$	他との比較 (2007年までの積算)
$W \rightarrow e\nu$	30Hz	10^8	10^7 Tevatron-2
$Z \rightarrow ee$	3Hz	10^7	10^7 Tevatron-2
tt	1.6 Hz	10^7	10^4 Tevatron-2
bb: $P_T > 10\text{GeV}$	200KHz (HLT 10Hz)	2×10^{12} (10^8 inc. di- μ)	10^9 Belle
Higgs(130GeV)	200個/時	5×10^5	-----
SUSY(1TeV)	20個/時	5×10^4	-----

この表が示す様に、LHCは、**Top-factory**、**B-factory**であり、同時に**Higgs/SUSY factory**である。
そして後で示すように**Dark Matter factory**でもある

SM事象も非常に豊富: BGになるが、Calibration やControl sampleとして不可欠

ATLAS Detector



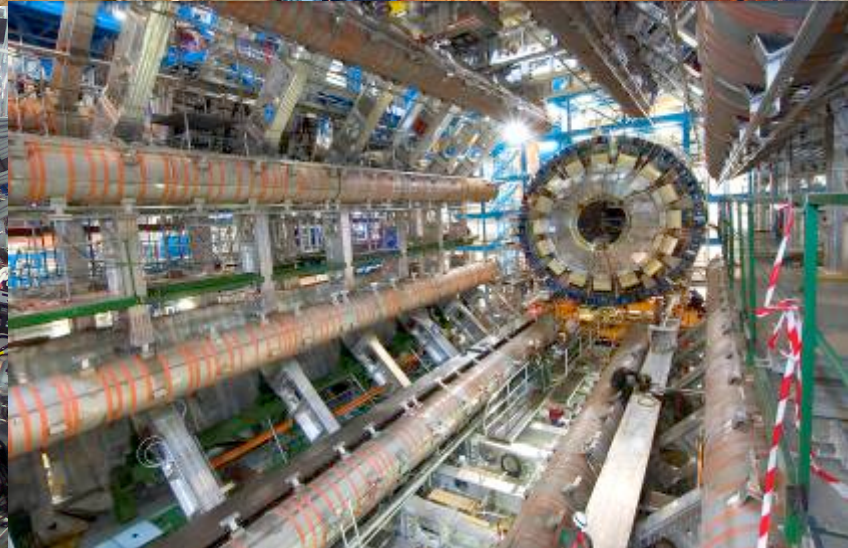
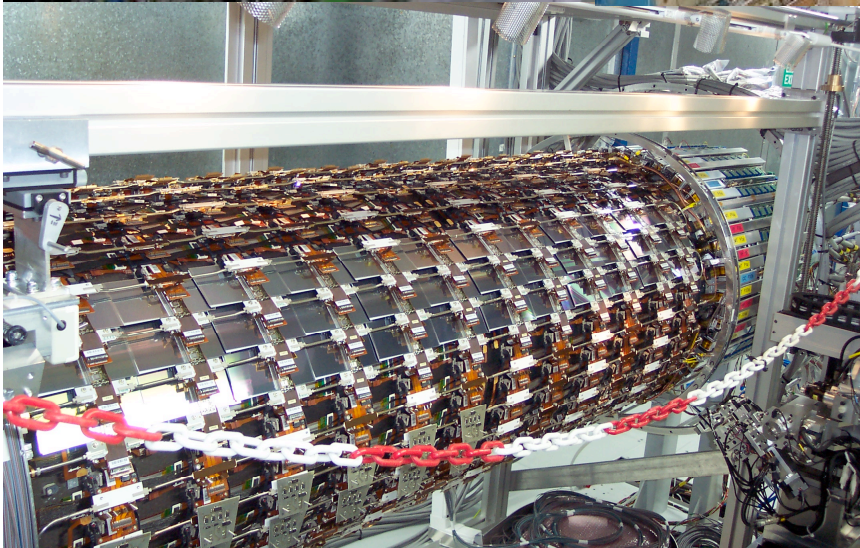
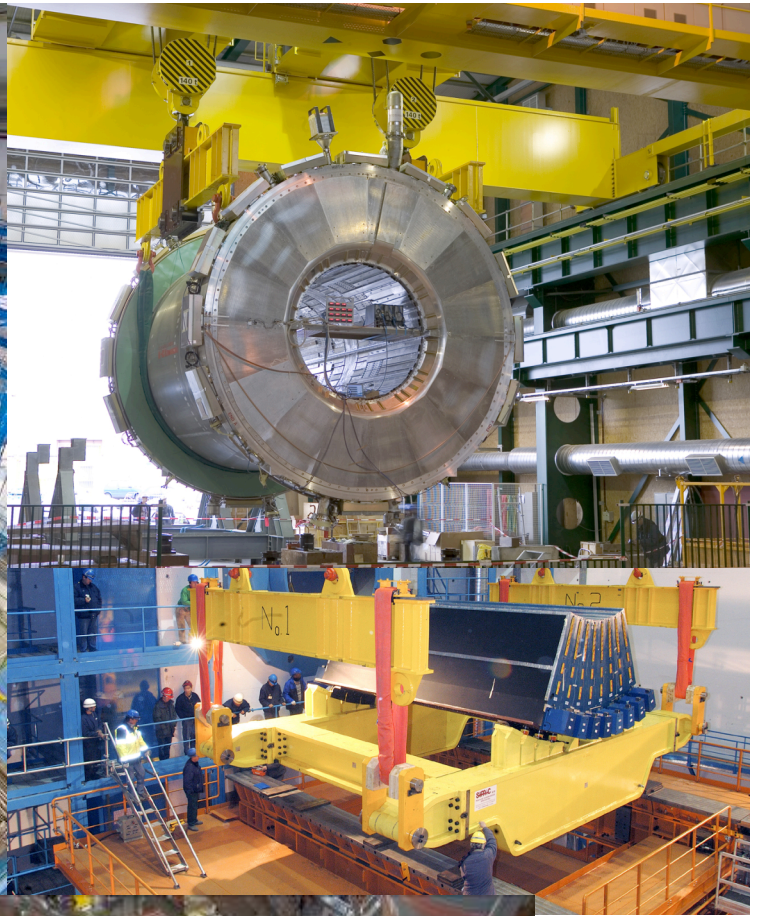
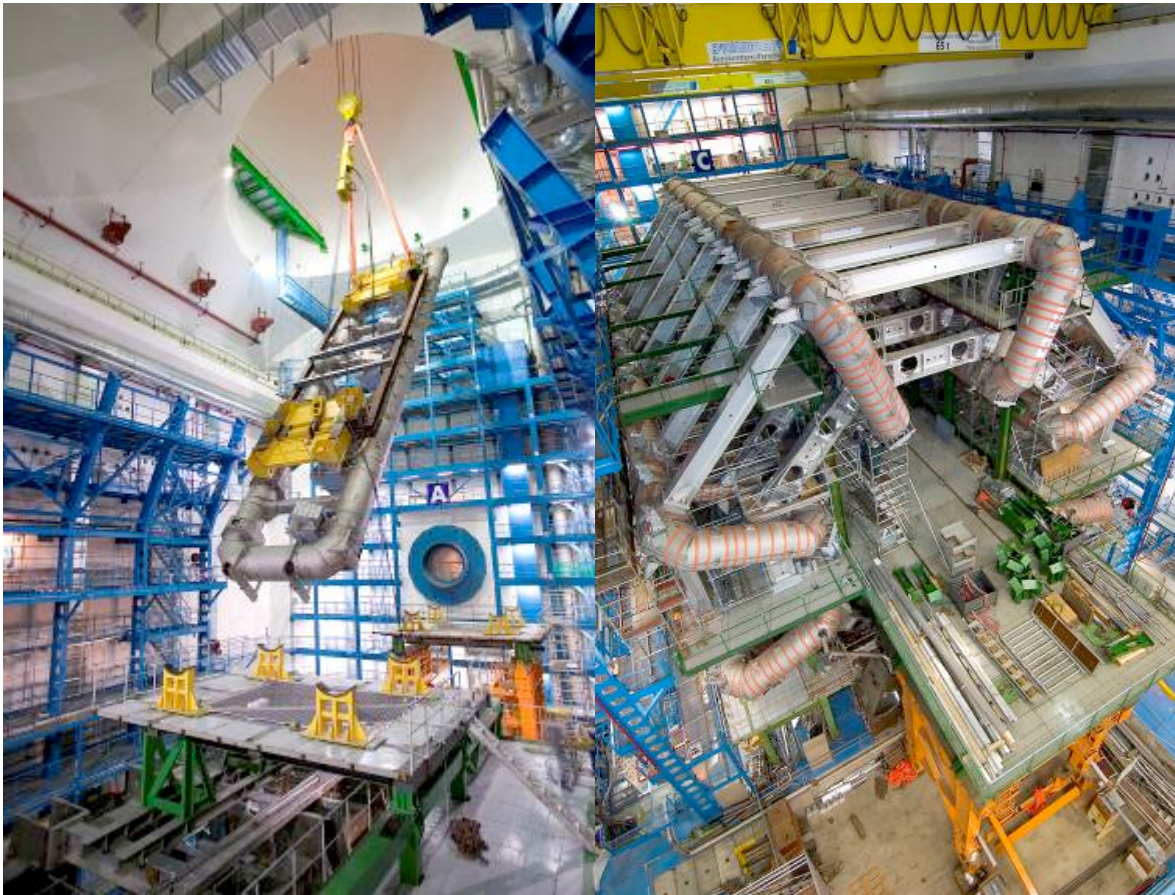
ATLAS
Detector characteristics
 Width: 44m
 Diameter: 22m
 Weight: 7000t
CERN AC - ATLAS V1997

Resolution
(Pt=100GeV)

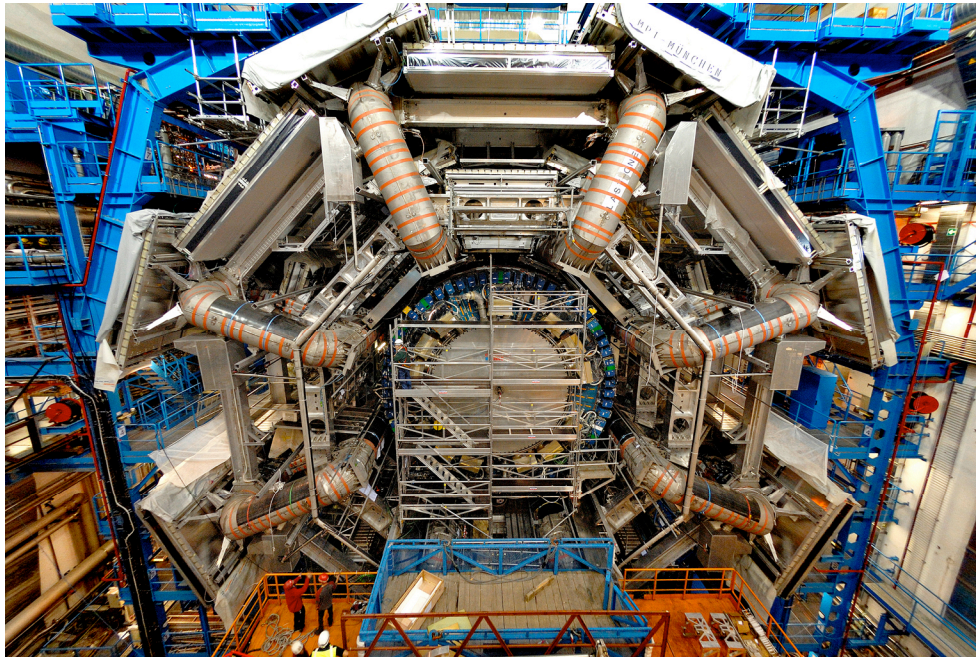
e, γ 1.3%
 Muon 2%
 Jets 8%

$B_z \rightarrow P_T \rightarrow \phi$
 $B_\phi \rightarrow P_z \rightarrow \eta$
 low Ptでも

- 兎に角、でかいDetectors: バランス優先のパフォーマンス
- Accordion Shape of L.Ar detectors カロリメータ (放射線耐性、奥行き情報)
- Large air-core toroidal magnet ミューオンシステム



地下
100m
での組
み立て
の様子



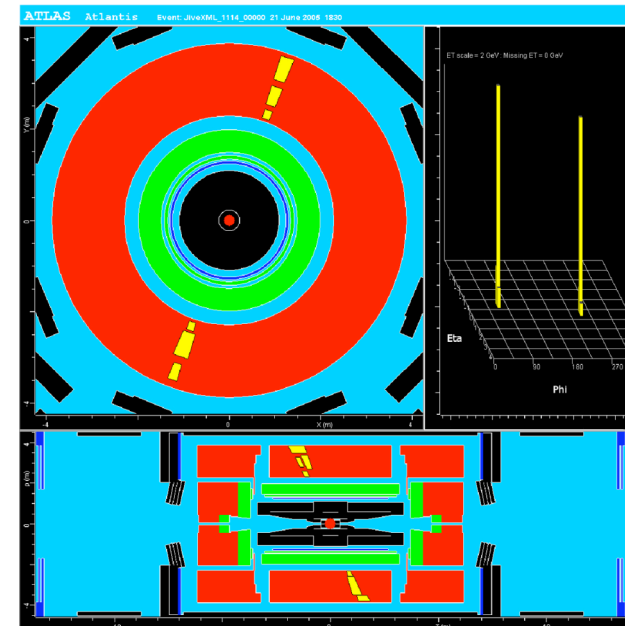
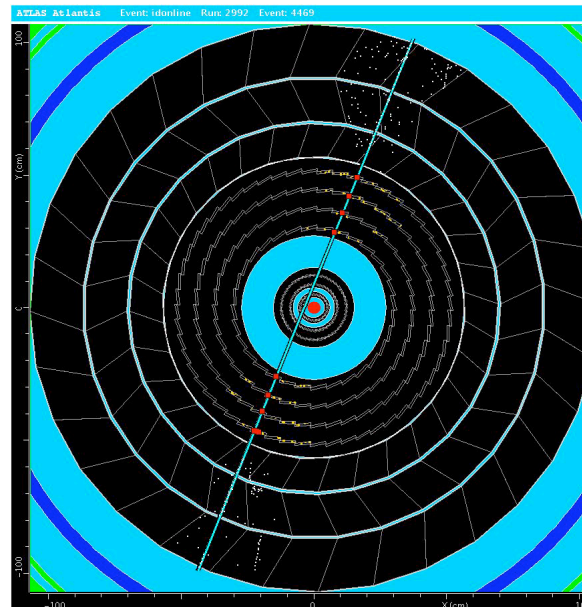
バレル側はほぼ完成
エンドキャップ側を
組み立て中

今年中に完成(予定)

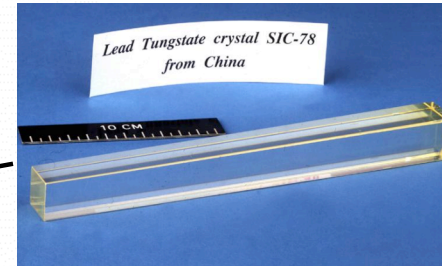
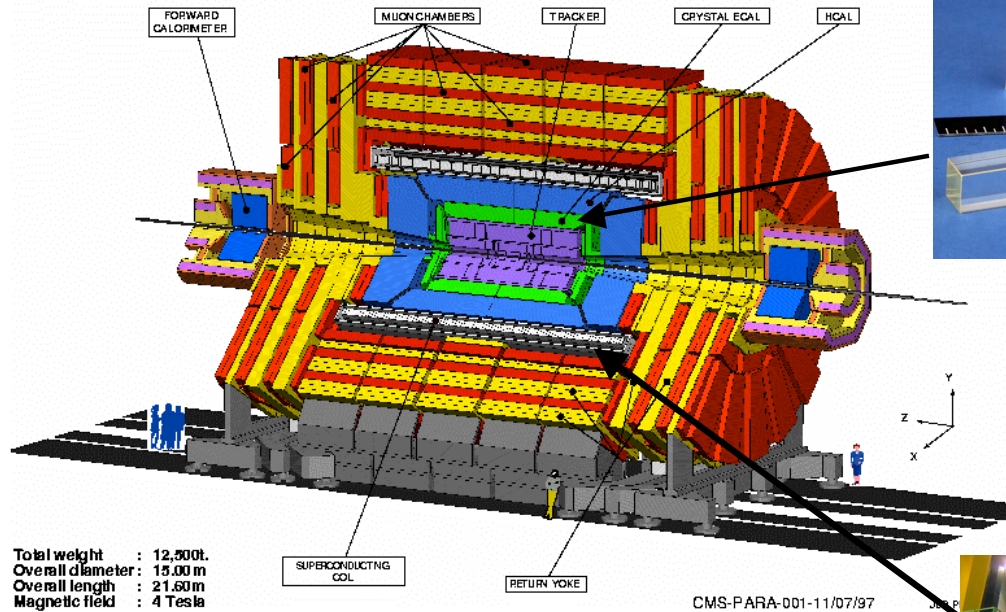
Tracker calorimeter

すでに、稼働
Detector commissioning
は始まっていて
“宇宙線”は捕らえている

Dead Channel: 0.2% SCT
Noise hit $\sim 10^{-4}$



CMS検出器

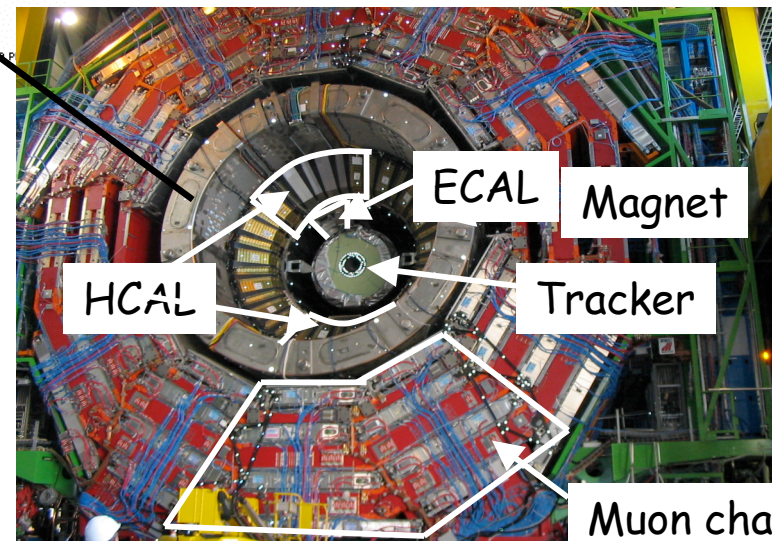


Resolution
(Pt=100GeV)

e, γ 0.9%
 Muon 2%
 Jets 12%

H=15m
 L=22m (about half of ATLAS)
 W=12,500ton (twice of ATLAS) 鉄のかたまり

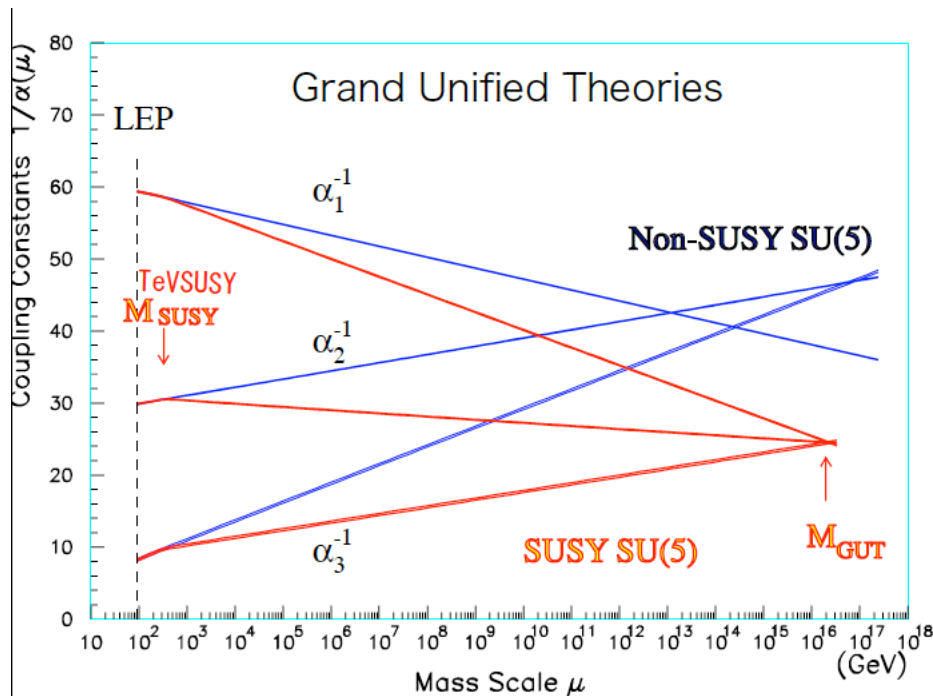
- 4T (強力) Solenoid Magnet
- $PbWO_4$ scintillator e/gammaに賭けた (高いE resolution)



[2] SuperSymmetry

TeV Scale SUSY 御利益

- GUTを実現-> (宇宙)物理へ大きなインパクト
- **Cold dark matter** :
- 理論的な御利益は枚挙にいとまがない:



[2-0] m SUGRAの簡単な纏め



5つのパラメーター：
 m_0 (mass @GUT), $m_{1/2}$ (VEV), $\tan\beta$ (scalar 3点), A_0 (Higgsino mass), $\text{sign}(\mu)$



一般的な傾向

大事なのはこの二つ

- Coloured partciles (\tilde{g}, \tilde{q}) は重い
- 第3世代の \tilde{f} は軽い。(Yukawa+LR mixingの効果)
- $\tilde{\chi}_1^0$ はLSPで安定(R-parity) Cold DMの良い候補
- Higgsino mass ($|\mu| > 0.8m_{1/2}$ (Wino) ($m_0 \gg m_{1/2}$ の場合以外)

$$\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \approx \tilde{B}^0, \tilde{\chi}_2^0 \approx \tilde{W}^0, \tilde{\chi}_1^\pm \approx \tilde{W}^\pm, \tilde{\chi}_{3,4}^0, \tilde{\chi}_2^\pm \approx \tilde{H} \quad (\text{次のページ})$$

GM Gravitino \tilde{G} : **AM** Wino \tilde{W}^0 LSP

Λ : braking scale

$m_{1/2}, m_0$ タキオン回避

Mm メッセンジャー スケール

KK Universal Extra Dimension (gamma KK n=1 γ^* LSP)

ごちゃごちゃあっても、基本的なイベント・トポロジーは同じ(大筋で同じ)

Chargino/ Neutralino

S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 Wino: \tilde{W}^+, \tilde{W}^0	m_1 m_2
S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$	μ

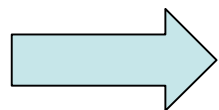
同じ量子数を持っている状態は混合し、
質量のeigenstateを作る。

これが、

Chargino (charged wino + charged higgsino)

Neutralino(bino, neutral wino+ neutral higgsino)

$$\begin{bmatrix}
 M_1 & 0 & -M_Z \sin\theta_W \cos\beta & M_Z \sin\theta_W \sin\beta \\
 0 & M_2 & M_Z \cos\theta_W \cos\beta & -M_Z \cos\theta_W \sin\beta \\
 -M_Z \sin\theta_W \cos\beta & M_Z \cos\theta_W \cos\beta & 0 & -\mu \\
 M_Z \sin\theta_W \sin\beta & -M_Z \cos\theta_W \sin\beta & -\mu & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \tilde{B}^0 \\
 \tilde{W}^0 \\
 \tilde{H}_1^0 \\
 \tilde{H}_2^0
 \end{pmatrix}$$



Mass eigenstate

$$\begin{pmatrix}
 \tilde{\chi}_1^0 \\
 \tilde{\chi}_2^0 \\
 \tilde{\chi}_3^0 \\
 \tilde{\chi}_4^0
 \end{pmatrix}$$

1. $\tilde{\chi}_1^0$ がLSP(Lightest stable particle) -> DM
2. M_1, M_2, μ, M_Z の大小関係が大切。 M_Z が小さいとすれば、LSPは、Bino-like(M_1 が小)、Wino-like(M_2 が小)、higgsino-like(μ が小)。。

DMの性質(結合定数、質量)はこれらの大小関係が鍵となる。 -> LHCでどのくらい決められるか?

Charginoも M_2, μ の混合状態でWino-like とhiggsino-like

その他の粒子の性質

Mass@EW 共通@GUT Running effect
結合が強い程太る

$$m^2(\tilde{g}) = (2.8m_{1/2})^2$$

$$m^2(\tilde{u}_L) = m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 + 0.35D$$

$$m^2(\tilde{u}_R) = m_0^2 + 5.87m_{1/2}^2 + 0.16D$$

$$m^2(\tilde{d}_L) = m_0^2 + 6.28m_{1/2}^2 - 0.42D$$

$$m^2(\tilde{d}_R) = m_0^2 + 5.82m_{1/2}^2 - 0.08D$$

$$m^2(\tilde{e}_L) = m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 - 0.27D$$

$$m^2(\tilde{e}_R) = m_0^2 + 0.15m_{1/2}^2 - 0.23D$$

$$m^2(\tilde{\nu}_L) = m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 + 0.50D$$

$(D = M_Z^2 \cos 2\beta < 0(\text{Higgs}))$

これはモデルによる

LとR : SU(2)に対する電荷を持っているか否かでfermionも2つに分類される。

それ以外の量子数は同じ。

SU(3) : 強い力 一番太る

SU(2) : 少し太る L > R

• Coloured particles (\tilde{g}, \tilde{q}) は重い

• この関係式は(1),(2)に共通
(3)に対しては、 $m_{1/2}$ の係数が
予言出来なくなる

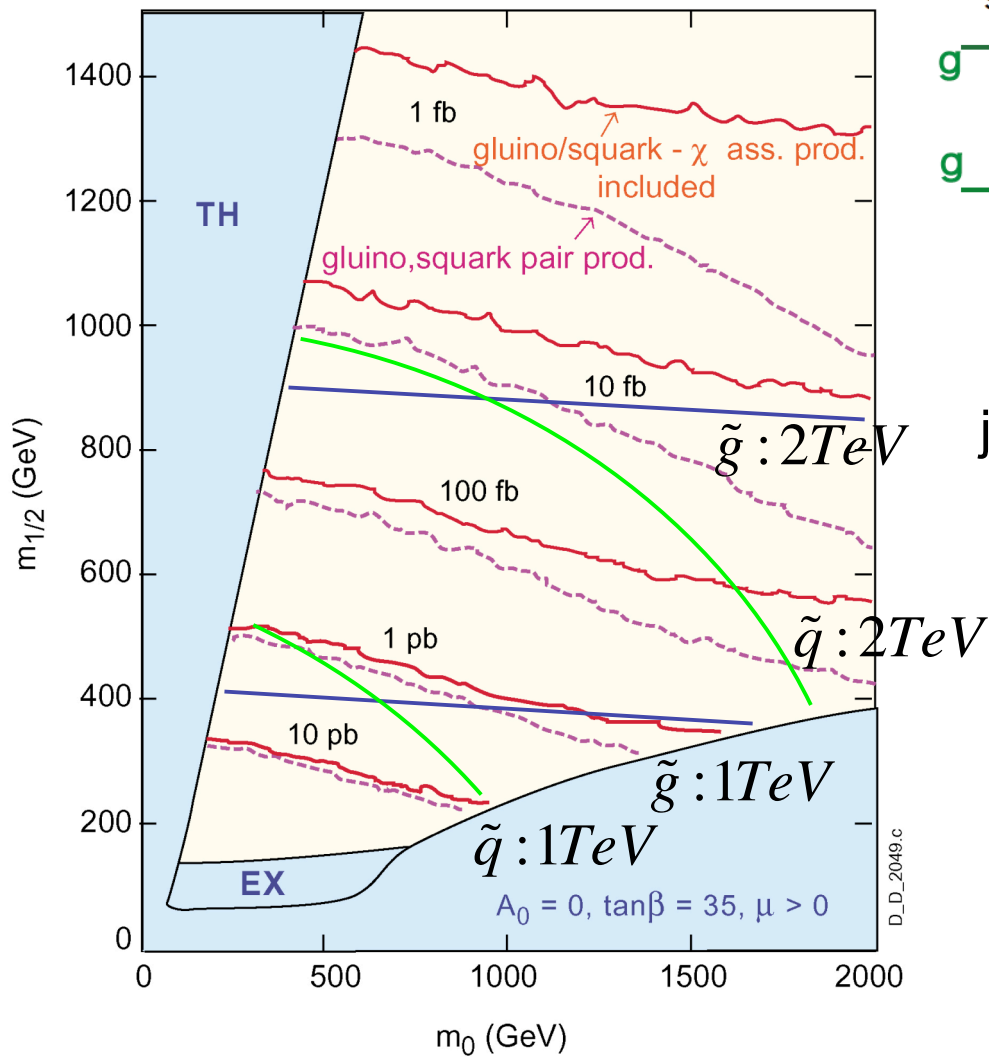
• 第3世代の \tilde{f} は軽い。
(Yukawa+LR mixingの効果)
DMとの関係では τ が大切

$$m^2(\tilde{\tau}) = \begin{bmatrix} m_0^2 + 0.52m_{1/2}^2 + m_\tau^2 - 0.27D & -m_\tau(A_\tau + \mu \tan\beta) \\ -m_\tau(A_\tau + \mu \tan\beta) & m_0^2 + 0.15m_{1/2}^2 + m_\tau^2 - 0.23D \end{bmatrix}$$

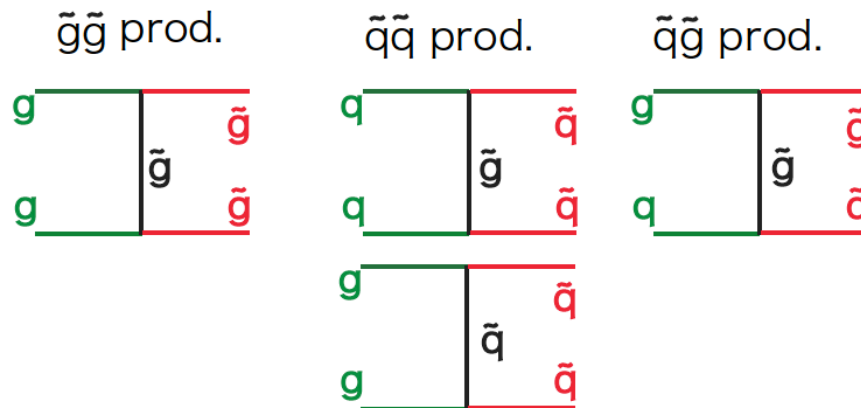
$\tan\beta$ が大きいと、 τ が大切

[2-1] LHCでの生成過程

QCDで出来る ($\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q}$)



PDFを考えれば、直感的に



just strong interaction (α_s):
 cross-sectionが大きい
 model independent except for mass
 (LRやflavorの縮退度合い)

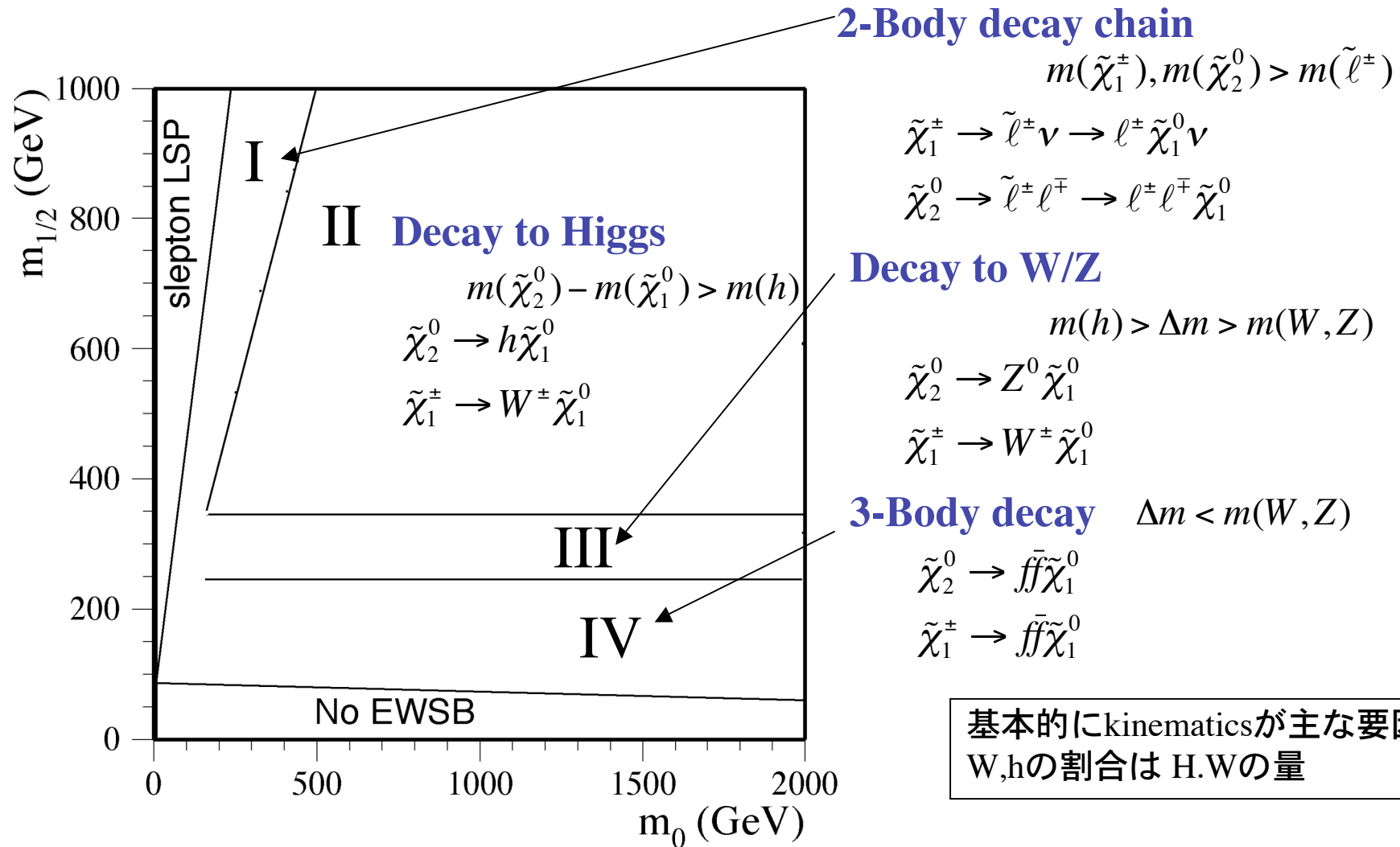
$m(\tilde{q}) = m(\tilde{g}) = 0.5TeV$	$\sigma \sim 100pb$ $\tilde{g}\tilde{g}$ が主
$m(\tilde{q}) = m(\tilde{g}) = 1TeV$	$\sigma \sim 3pb$
$m(\tilde{q}) = m(\tilde{g}) = 2TeV$	$\sigma \sim 20fb$ $\tilde{u}\tilde{u}, \tilde{u}\tilde{d}$

[2-2]崩壊過程 \tilde{g}, \tilde{q} のdecay table

	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 1)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 2)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 4)$		$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$
		$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}_1$ $b\tilde{b}_1$	
\tilde{q}_L	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{g}$	$\tilde{q}_L \rightarrow q\tilde{W}^0 (\approx 1)$ $q\tilde{W}^\pm (\approx 2)$	
\tilde{q}_R	$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{g}$		$\tilde{q}_R \rightarrow q\tilde{B}^0$

ここら辺はあまりモデルによらない。Massの関係やB,Wと χ の関係、第3世代などがモデル依存
 Runningの方程式：squarkの方が重い（第3世代を除いて）、DMまで気にすると m_0 が小さい

$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ の崩壊モードについて

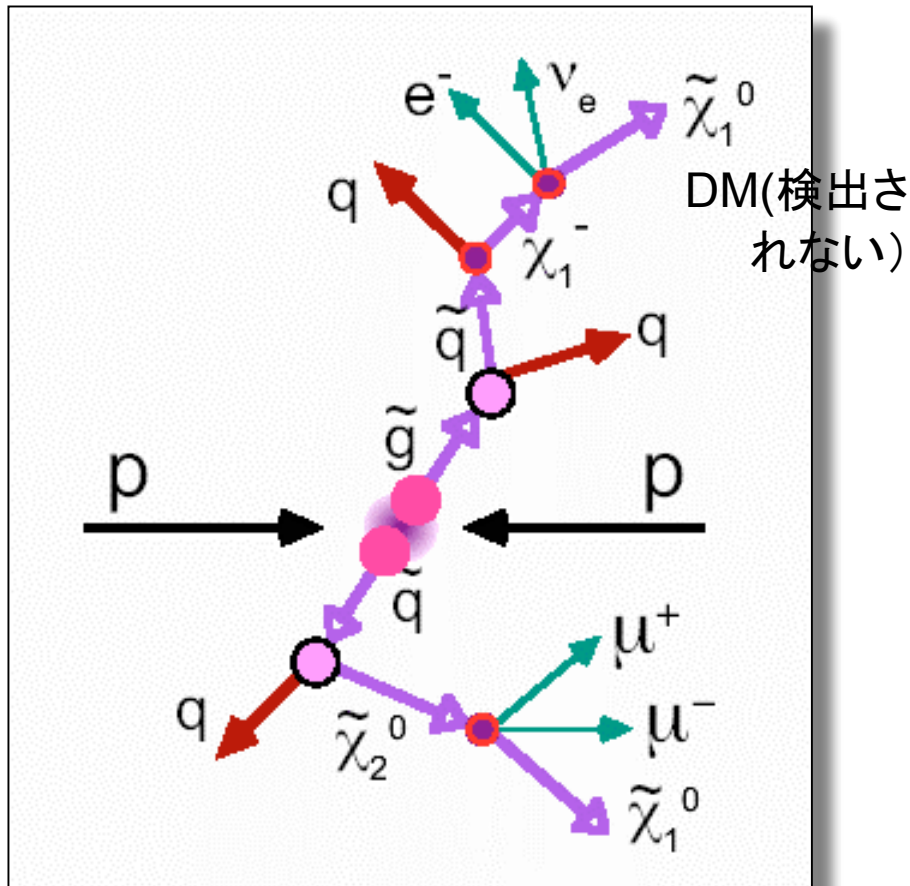


$\tan\beta \gg 1$ の時 $\tilde{\tau}_1$ が軽くなり、 τ へのdecay branchingが増える。
 τ -IDが大切。Higgsino成分が多くなると、然り。

[2-3] 期待される
Events topology

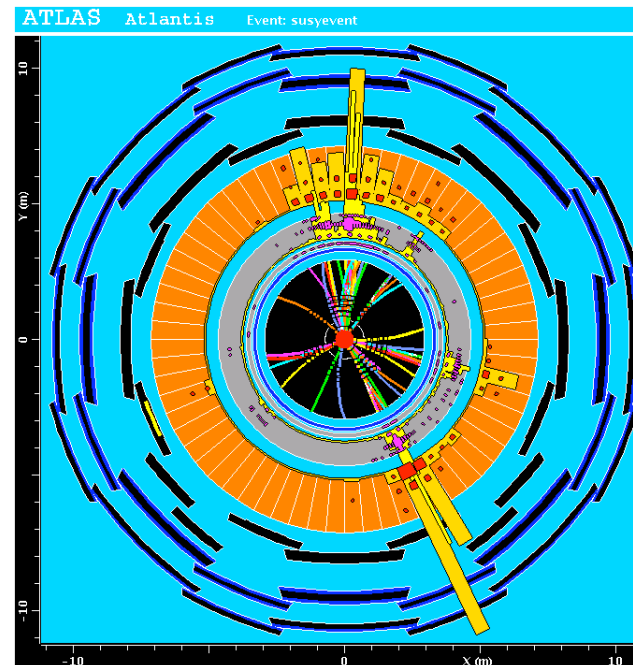
カスケード多段崩壊

高い P_T ジェット 複数
LSPが最後2個 LHC:Dmfactory
→missing (mET)
ゲージノから、時々レプトンなど



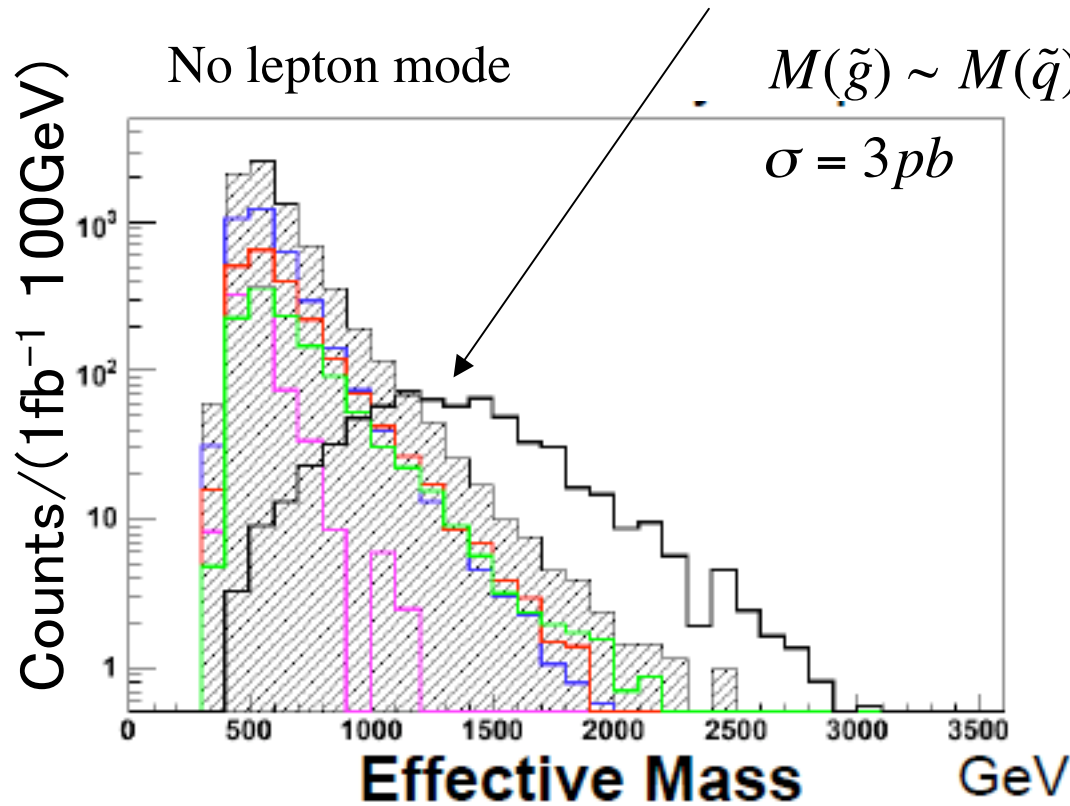
DM(検出されない)

multi leptons
 $E_T + \text{High } P_T \text{ jets (+ b-jets)}$
 τ -jets



[2-4] Background との比較

このPeak位置がSUSY粒子の質量スケール
と強く関係している($\sim 1.4 \cdot M_{\text{susy}}$)



重くなると->右下へ移動

BG:

W, Z と tt が主な
バックグラウンド

Leptoinc decayして
Neutrinoが放出する。

W: 85 pb (with 4jet)

Z: 80 pb (with 4jet)

Top: 830pb

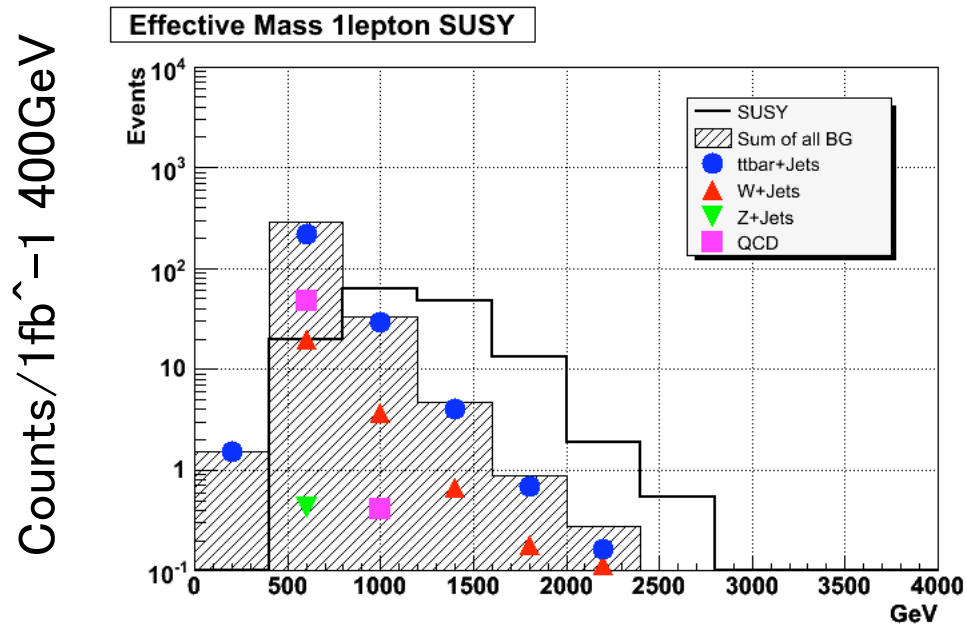
$$M_{\text{eff}} (\text{GeV}) = m_{\text{Et}} + \sum P_{\text{t}} \text{ of jet}$$

W/Zはmulti-Jetを要求することで 10^{-3} (0.2^4) になっている。
検出器がちゃんと動けば、QCD(bb,cc)は効かない

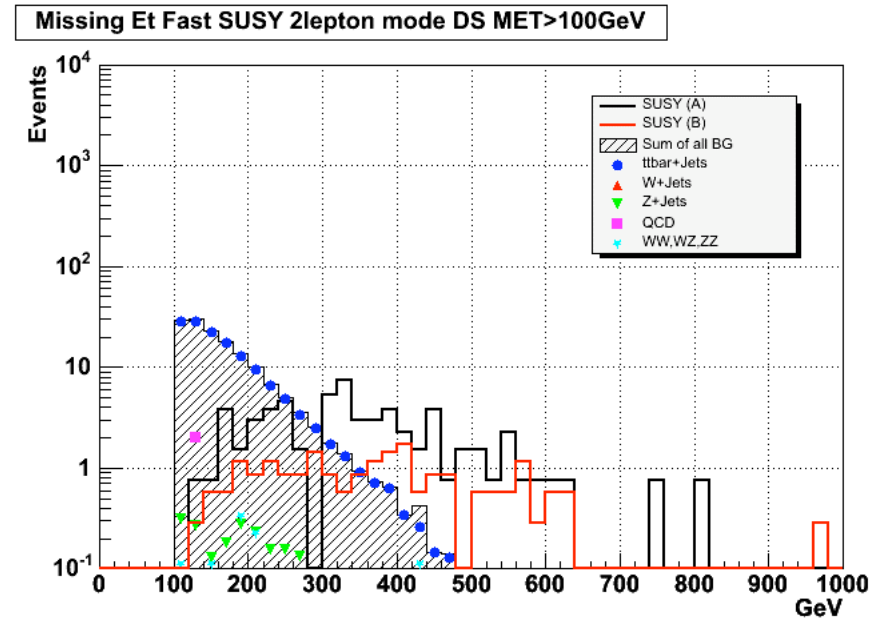
One lepton mode

レプトンを要求するとBGが落とせる
 Topが主なBGで予言能力も高い
 → excessが綺麗に見える

2個レプトンを要求すると
 BGは更に減る
 信号も少ない:モデル依存性が
 強くなって行く



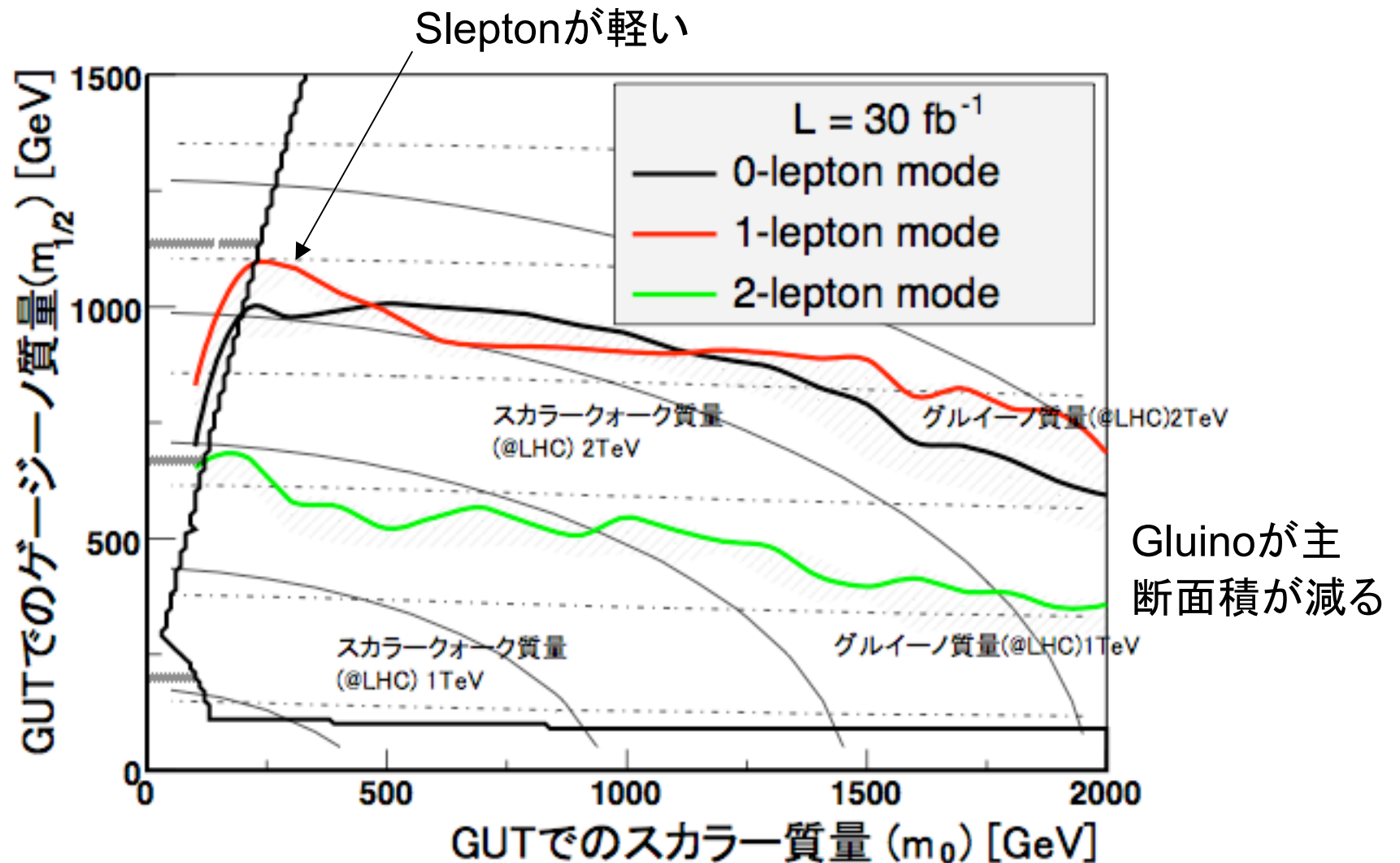
SUSY signal
 Mass=1TeV



SUSY signal Mass=800GeV
 赤 stauが効くポイント
 Nu1とstauが同じようなmass

BG自体もデータから評価できる20-50%精度

[2-5] 発見能力 (5σ)

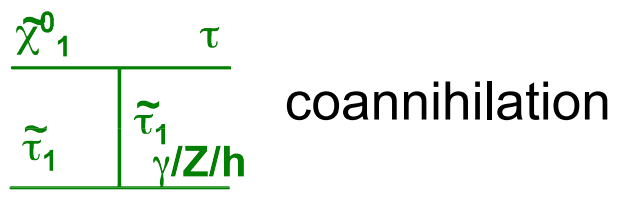


1.5 TeVまで発見 L=1fb⁻¹

2-2.3TeVまでの発見能力 L=30fb⁻¹

massと差が主

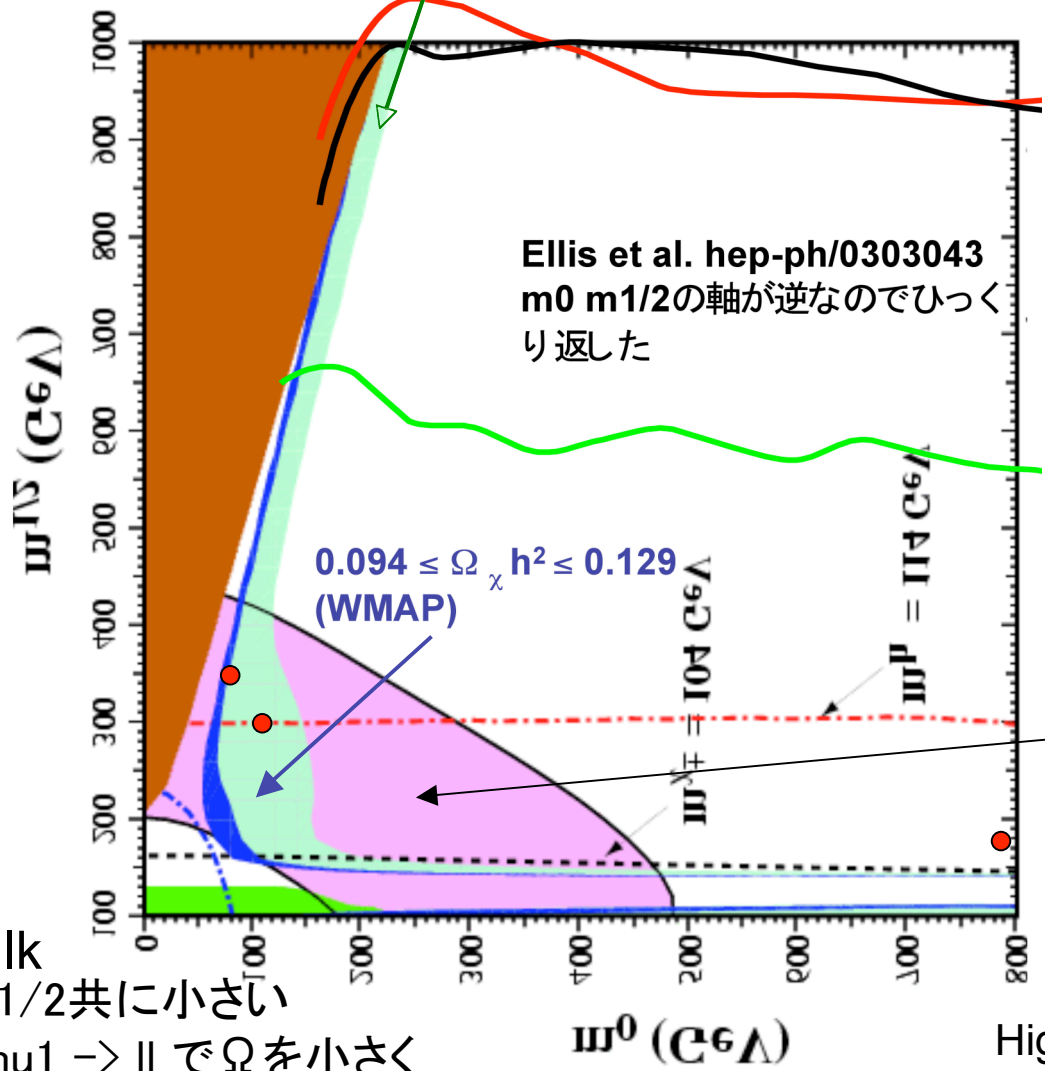
mSUGRA $A_0=0$,
 $\tan(\beta) = 10$, $\mu > 0$



WMAPの結果と比較
 $\Omega_{CDM} h^2 = 0.11 \pm 0.02$

mSUGRAの特徴
 LSPがBino
 この条件ゆるめると
 もっと広がる

赤: one lepton
 黒: no lepton
 緑: dilepton



まだグレーですが、 $\mu g-2$

Focus Point

Bulk
 $m_0, m_{1/2}$ 共に小さい
 $\nu_1 + \nu_1 \rightarrow \tau\tau$ で Ω を小さく
 (t-channel slepton)

Higgsino成分大きい
 $\nu_1 + \nu_1 \rightarrow WW$ (Higgsの結合)

$mE_T + \text{Jets} + \text{Photon}(s)$

GMSUSY signal

$$M(\tilde{g}) \sim 700 \text{ GeV}$$

$$M(\tilde{q}) \sim 1 \text{ TeV}$$

$$N_{\text{jet}}(P_T > 50 \text{ GeV}) \geq 3$$

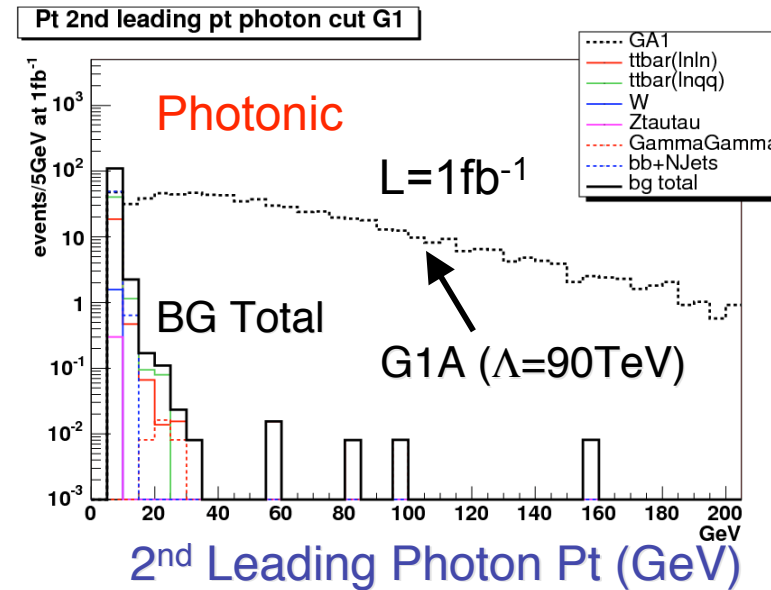
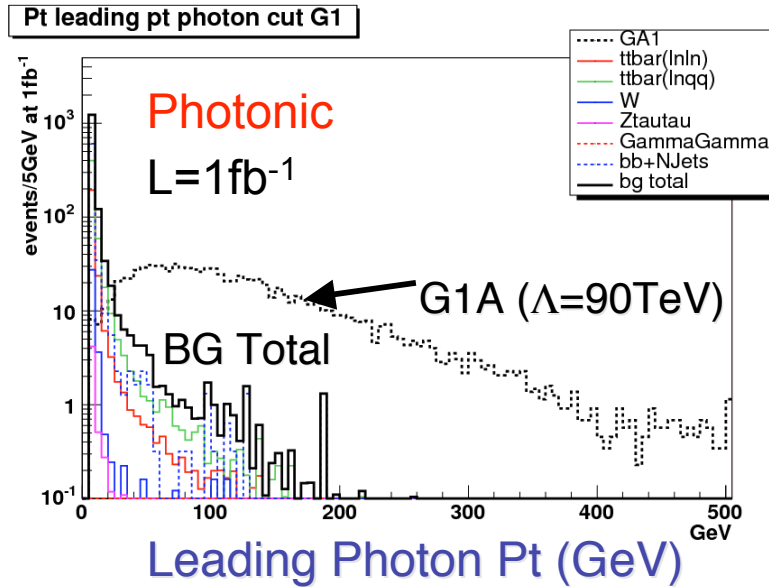
$$mE_T > 100 \text{ GeV}$$

$$P_{T_LJ, 2\text{nd Jet}} > 100 \text{ GeV}$$

2 photons are required

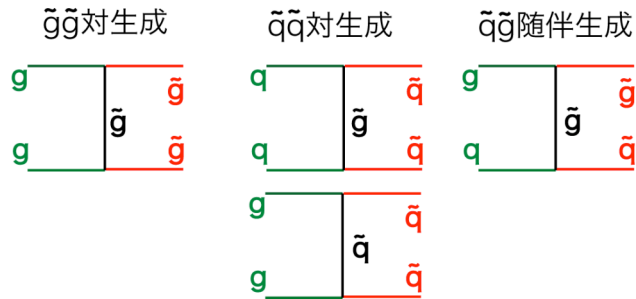
GM $N_m=1$
 $\text{Nu}1 \rightarrow \gamma \tilde{G}$

ATLAS Preliminary

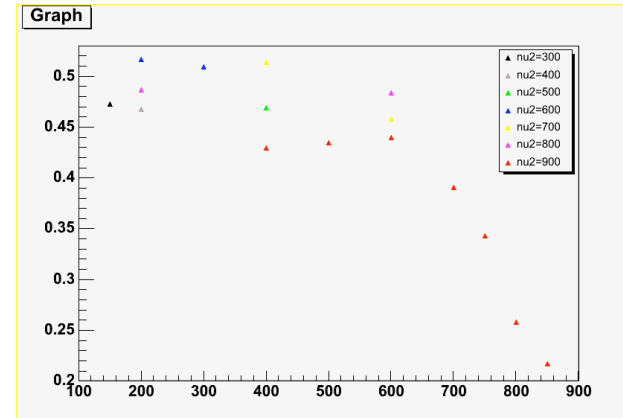


Main Bg is top-pair in which W decays into $e\nu$ with hard FSR
 Almost BG free ($N_{\text{ph}} \geq 2$) and this is clean signature of GM SUSY
 (gluino mass upto 1.6 TeV can be discovered with $L=1\text{fb}^{-1}$)

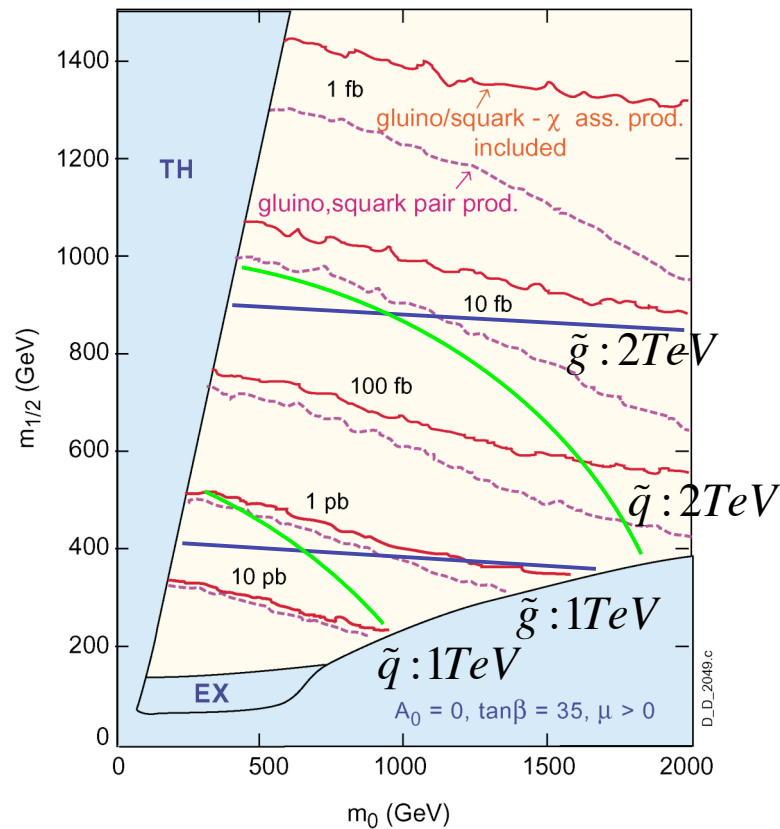
LHCの能力がモデルに著しく依存したSUSYしかカバーできないか？



生成過程は
 ただのstrong interaction.
 Gluino, squark の
 massだけでほとんど
 決まる。Cross-section
 はmass countur



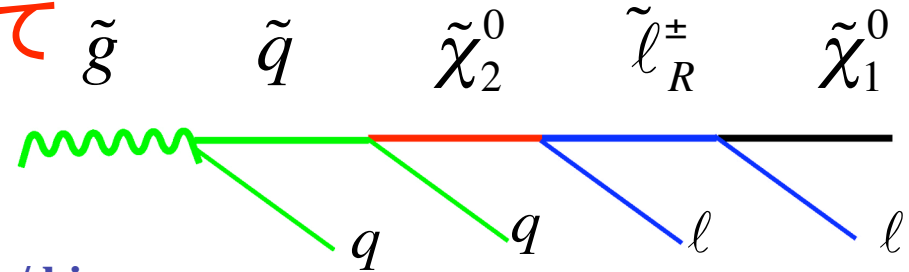
LSP mass (GeV) for Gluino mass 1TeV



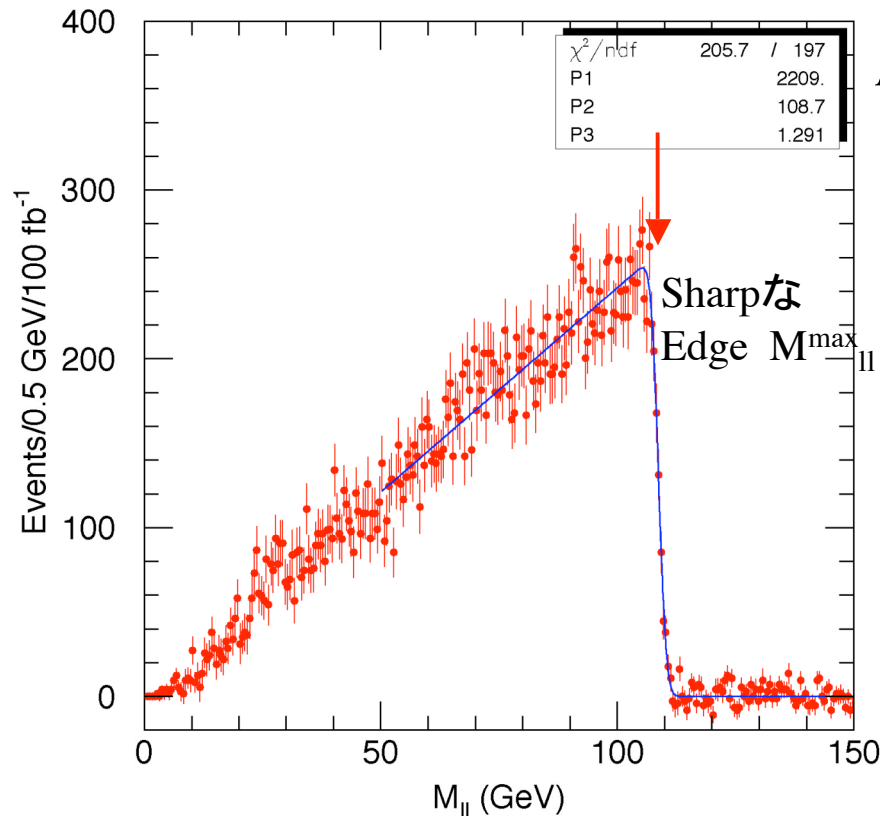
一方崩壊の違いによる
 Efficiencyの違いは小さい。
 効くのは、LSPとのmass differenceが主:
 $\Delta M(\text{coloured vs LSP})=400\text{GeV}$ くらいまでは安定
 300GeVくらいから急激に小さくなる。
 mET分布がきつくなる。

ΔM が極端に小さく(300GeV)なるようなことが
 起きなければ、LHCでしくじらない。
 Gluino, squarkのmassだけで決まる。

[2-6] 質量の再構成に関して



1. 適当なdecay chainを選ぶ (key point!)
 上手なselections less contamination / bias
2. mass や P_T などのkinematic distributionを作る
3. Edgeやendpointからmassの関係に束縛を与える

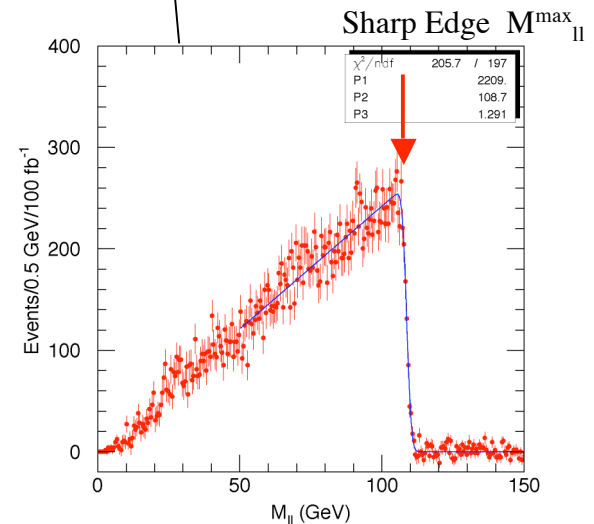
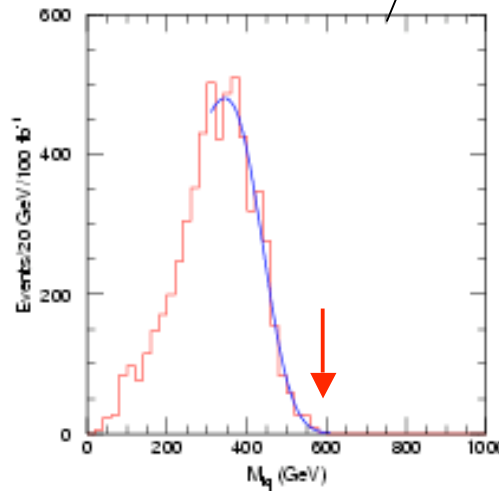
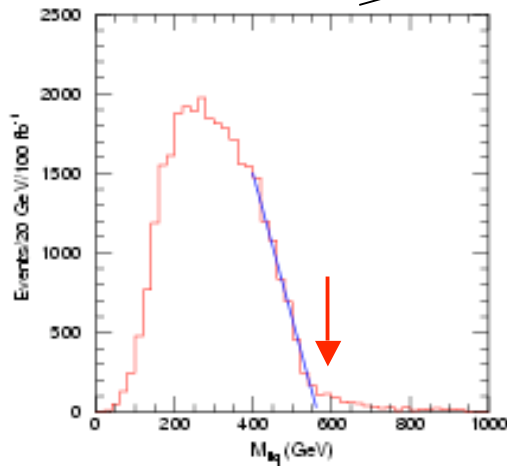
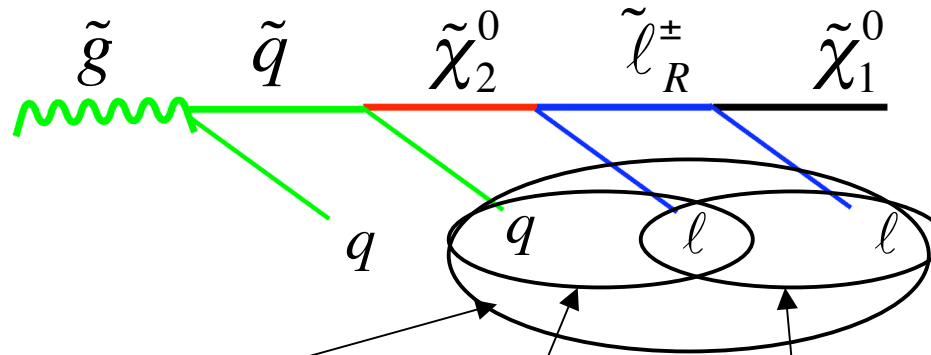


$$M_{ll}^{\max} = m(\tilde{\chi}_2^0) \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}{m(\tilde{\chi}_2^0)}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\chi}_1^0)}{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}\right)^2}$$

- 一般に関係式の方が未知数 (質量) より少ない。Modelの助けを借りて Massの絶対値を決める。
- 発見と違って、model依存性が強い

例として、Bulk point

$m_0=100\text{GeV}$
 $m_{1/2}=300\text{GeV}$
 $m(\text{sq}_L)=690\text{GeV}$
 $m(\text{nu}_2)=230\text{GeV}$
 $m(\text{sl}_r)=160\text{GeV}$
 $m(\text{nu}_1)=120\text{GeV}$



$$M_{ll}^{\max} = \sqrt{\frac{(m(\tilde{q}_L)^2 - m(\tilde{\chi}_2^0)^2)(m(\tilde{\chi}_2^0)^2 - m(\tilde{\chi}_1^0)^2)}{m(\tilde{\chi}_2^0)^2}}$$

$$M_{\ell\ell}^{\max} = m(\tilde{\chi}_2^0) \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}{m(\tilde{\chi}_2^0)}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{m(\tilde{\chi}_1^0)}{m(\tilde{\ell}_R^\pm)}\right)^2}$$

$$M_{lq}^{\max} = \sqrt{\frac{(m(\tilde{q}_L)^2 - m(\tilde{\chi}_2^0)^2)(m(\tilde{\chi}_2^0)^2 - m(\tilde{l}_R)^2)}{m(\tilde{\chi}_2^0)^2}}$$

Edge 1%程度で決まる。(ここまでは実験屋がまあ自信を持って言える)

→ $m_q(3\%)$ $m(\text{nu}_2)=6\%$ $m(\text{nu}_1)=10\%$

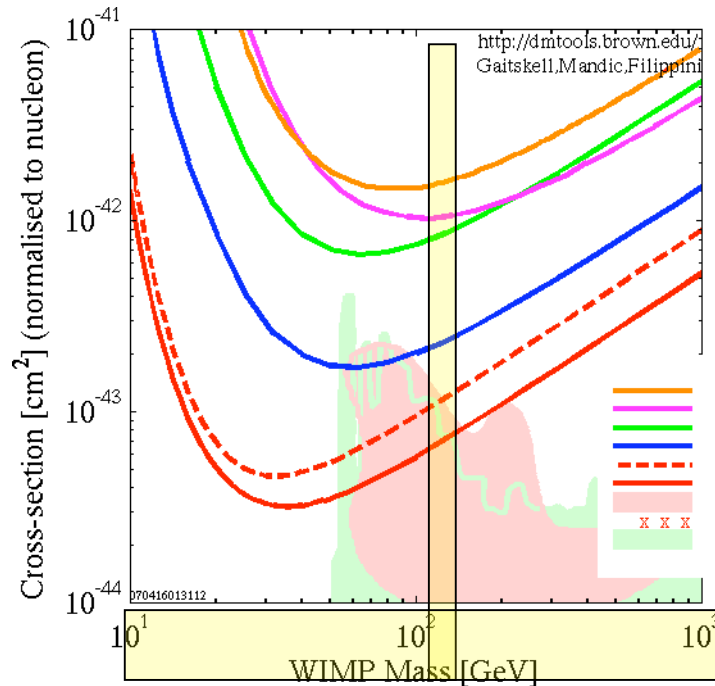
Variable	Value (GeV)	Errors		
		Stat. (GeV)	Scale (GeV)	Total
$m_{\ell\ell}^{max}$	77.07	0.03	0.08	0.08
$m_{\ell\ell q}^{max}$	428.5	1.4	4.3	4.5
$m_{\ell q}^{low}$	300.3	0.9	3.0	3.1
$m_{\ell q}^{high}$	378.0	1.0	3.8	3.9
$m_{\ell\ell n}^{min}$	201.9	1.6	2.0	2.6
$m_{\ell b}^{min}$	183.1	3.6	1.8	4.1
$m(\tilde{\ell}_L) - m(\tilde{\chi}_1^0)$	106.1	1.6	0.1	1.6
$m_{\ell\ell}^{max}(\tilde{\chi}_4^0)$	280.9	2.3	0.3	2.3
$m_{\tau\tau}^{max}$	80.6	5.0	0.8	5.1
$m(\tilde{g}) - 0.99 \times m(\tilde{\chi}_1^0)$	500.0	2.3	6.0	6.4
$m(\tilde{q}_R) - m(\tilde{\chi}_1^0)$	424.2	10.0	4.2	10.9
$m(\tilde{g}) - m(\tilde{b}_1)$	103.3	1.5	1.0	1.8
$m(\tilde{g}) - m(\tilde{b}_2)$	70.6	2.5	0.7	2.6

Modelを仮定

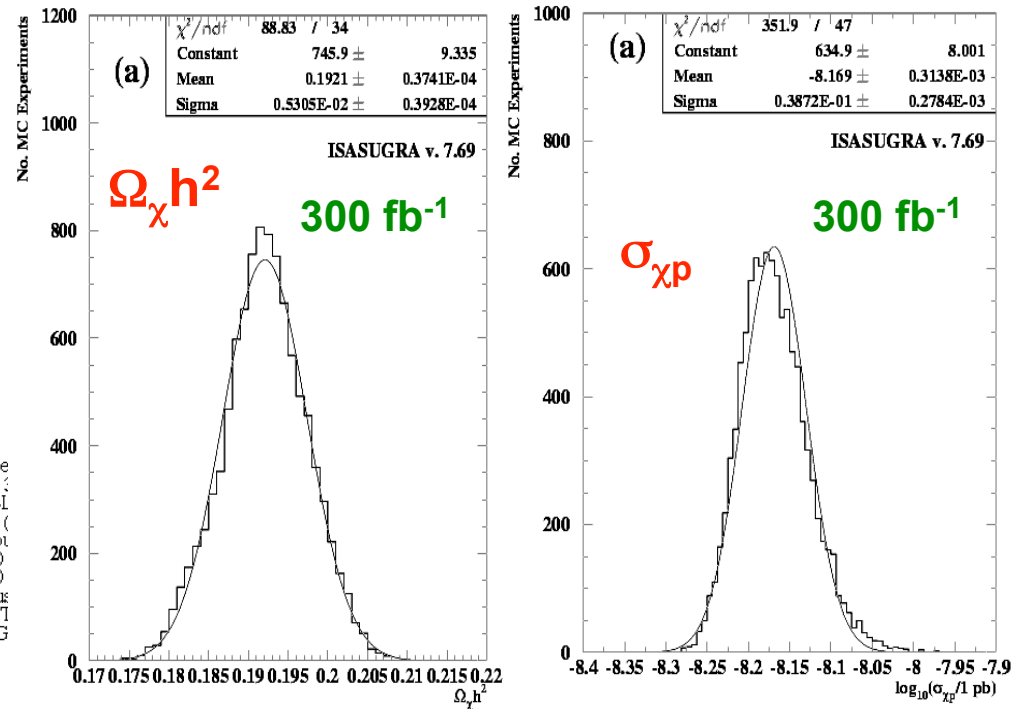
差 → parameter →

$$\Omega_\chi h^2 = 0.1921 \pm 0.0053$$

$$\log_{10}(\sigma_{\chi p}/\text{pb}) = -8.17 \pm 0.04$$

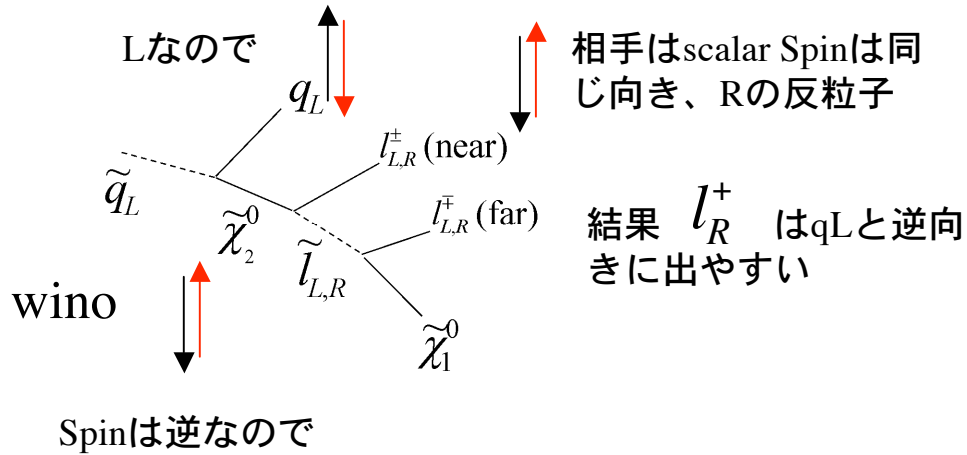


DM particle mass m_χ (GeV)

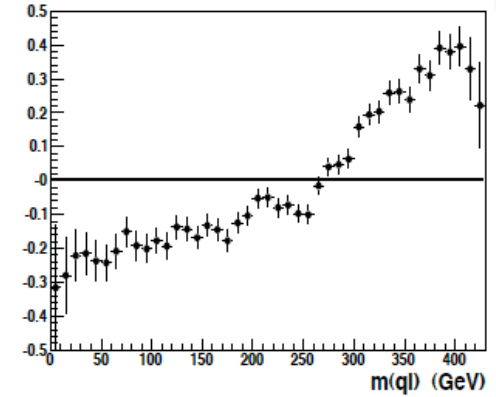


Recoil 実験と直接比較が可能になる
赤 最新Xenon10(Xe2相)

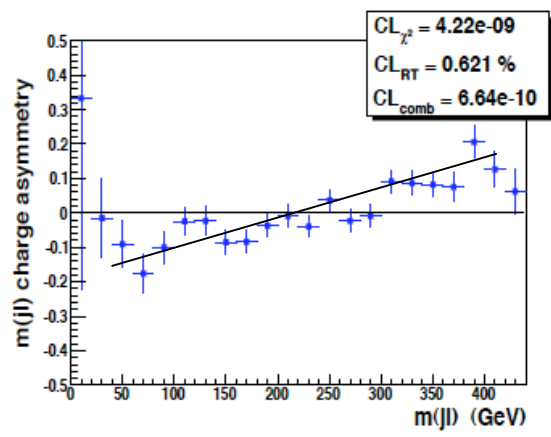
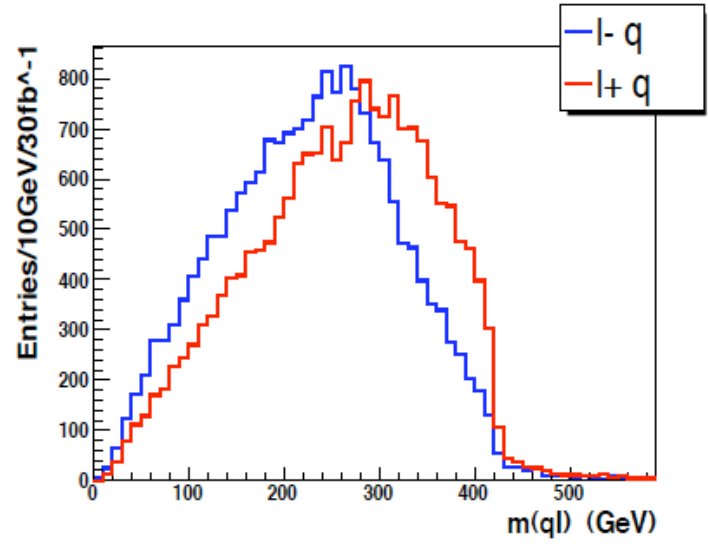
SUSYの証明 Spin測定($\tilde{\chi}_2^0$)



$$m(q_L) = 630 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_2^0) = 219 \text{ GeV}, m(\tilde{l}_R) = 155 \text{ GeV}$$



パートンレベル

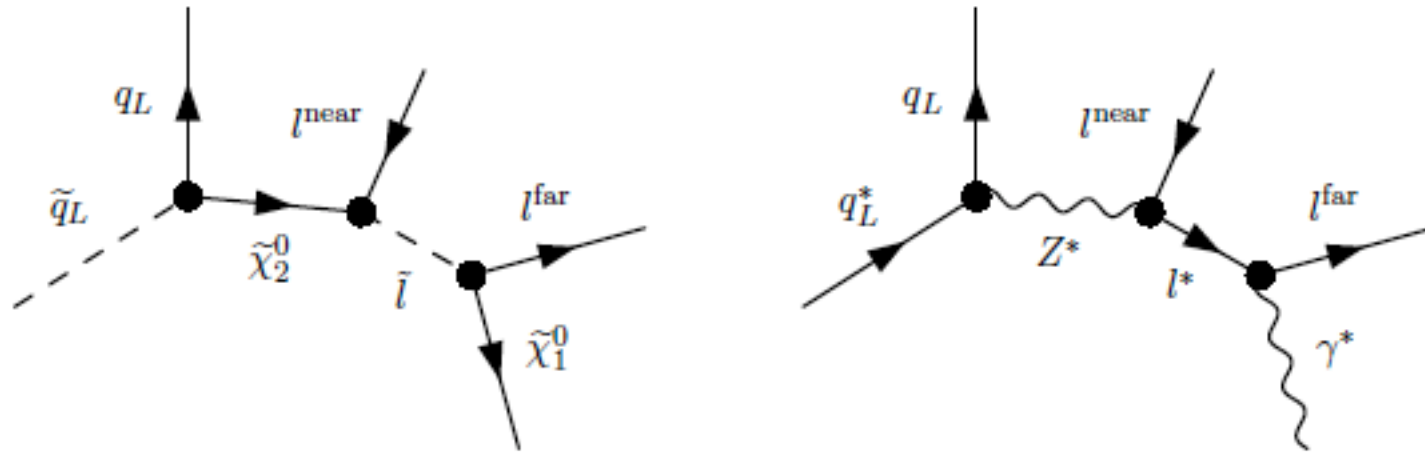


LHCはPPなので
 $N(\tilde{q}_L) > N(\tilde{\bar{q}}_L)$

Fast Simulation

m_0 が小さい2body decay chainの時可能

Universal Extra Dimension: 全てのSM粒子にKK excited Mode



基本的にSUSYと同じトポロジー
一つ高いexcitation stateが SUSY パートナー

区別は？ -> spinを見る (Z^* spin 1)

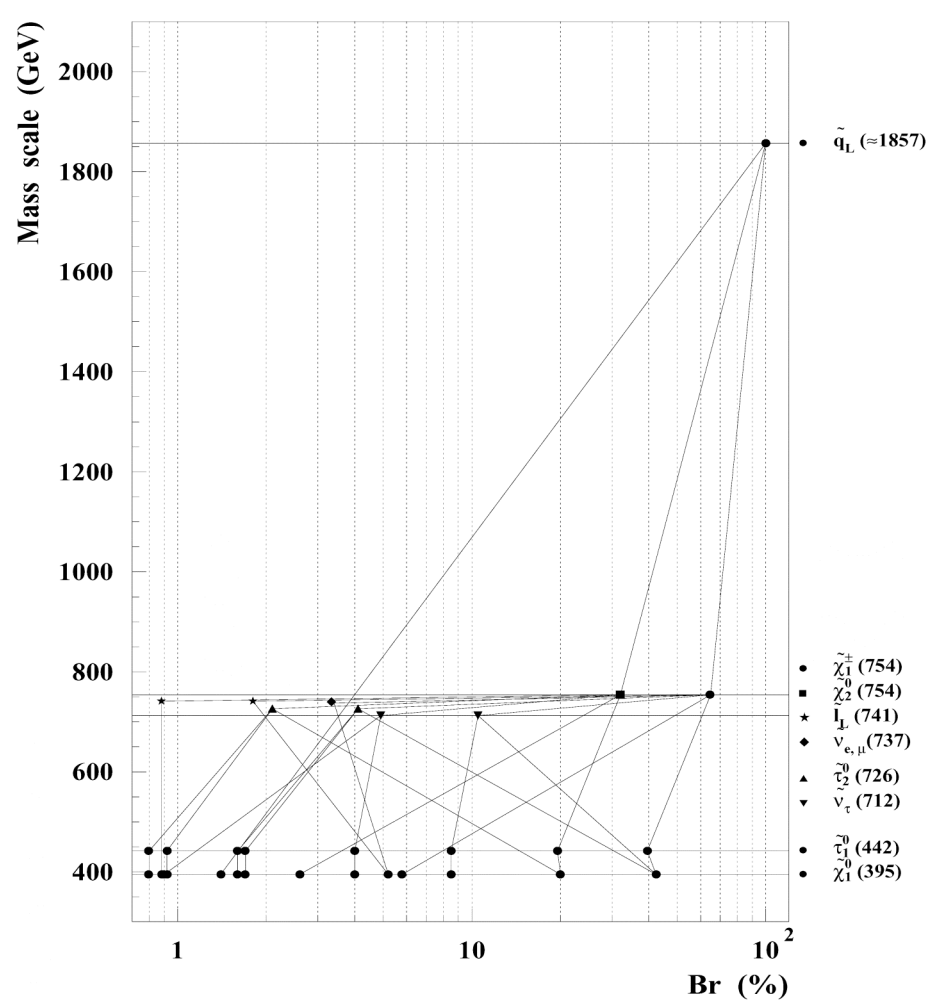
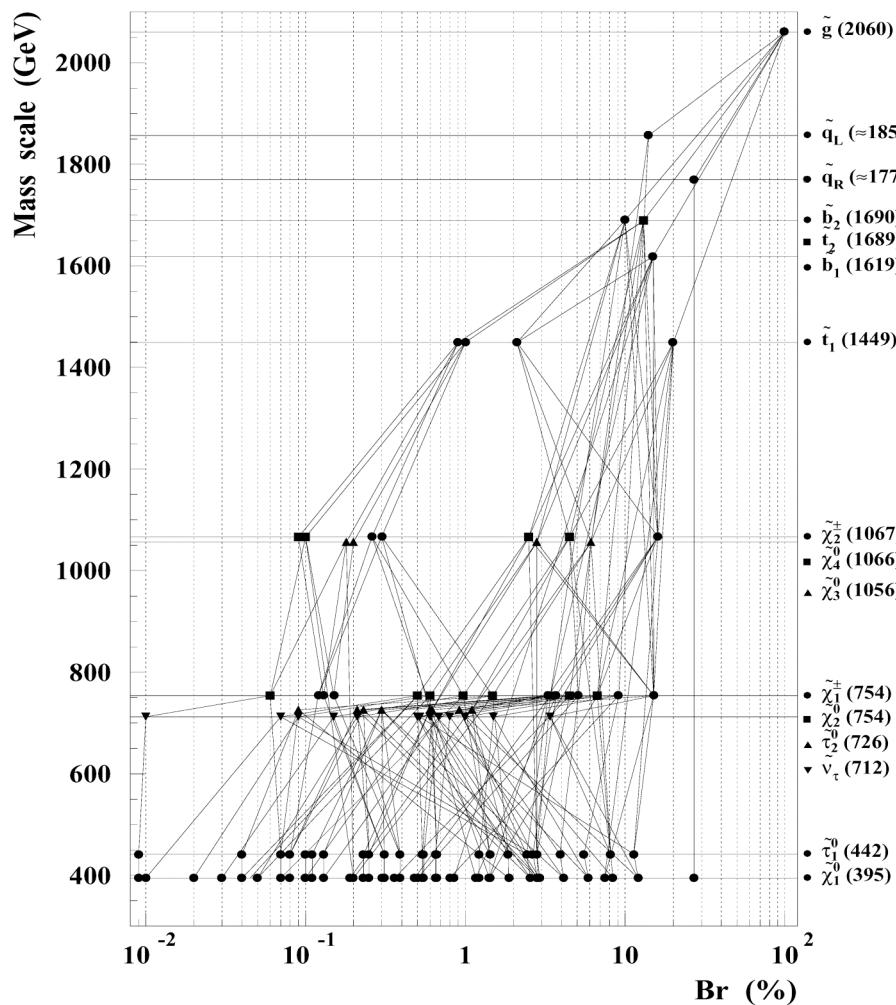
崩壊分岐比や結合定数の測定 -> ほぼ不可能

Decay Chaine

gluino

Squark_L

(tanβ=35)



3rd Generation(stop,sbottom) が軽くなる Yukawa結合する higgsino成分へ 2段増える

[3] 余剰次元

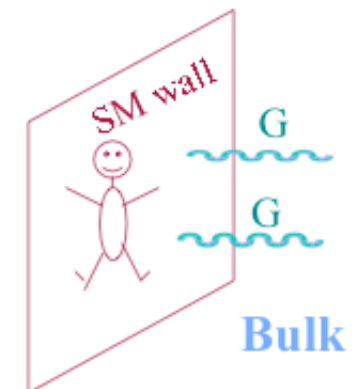
階層問題 Plank Scale vs EW scale

この問題をSUSYはcancelで保証：
余剰次元がある場合： TeVの余剰次元でPlanck
を説明、Plank Scaleの余剰次元のwarp factorで
EW scaleを説明

(1) KK excitation of Graviton: (small Extra dim)

(2) BHやモノジェット(LED)

我々は、3次元の膜の上に住んでいる！？



[3-1] KK excitation of Graviton

M_{pl} : 4次元でのPlanck scale
(大きい)

余剰次元のサイズ $r_c \sim M_{pl}^{-1}$

k : バルクの曲率 $(0.1-0.01) * M_{pl}$ (0で歪みなし)

ワープ係数 $\exp(-kr_c\pi) = 10^{-17}$ で階層問題が解決

KK: Graviton スケール $\Lambda_\pi = M_{pl} \exp(-kr_c\pi)$

$M_n = x_n(k/M_{pl}) \Lambda_\pi$ $x_n = 3.8, 7, 10.2 \dots n=1, 2, 3$

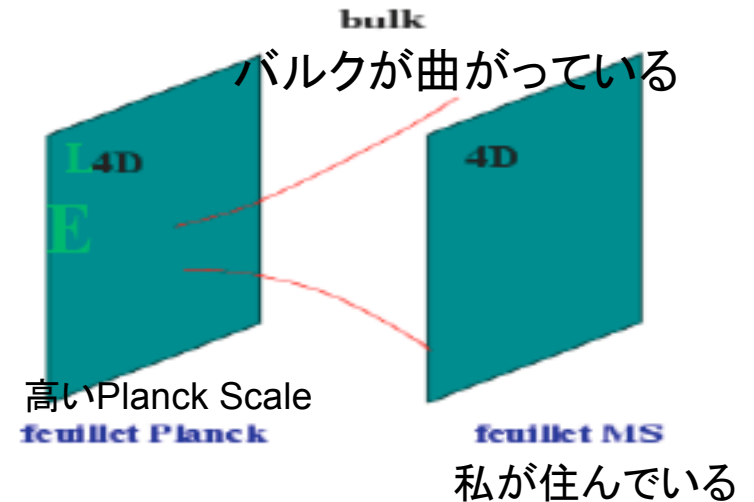
Coupling $1/\Lambda_\pi$

M_1 : 1-10 TeV first excitation stateの質量 数TeV

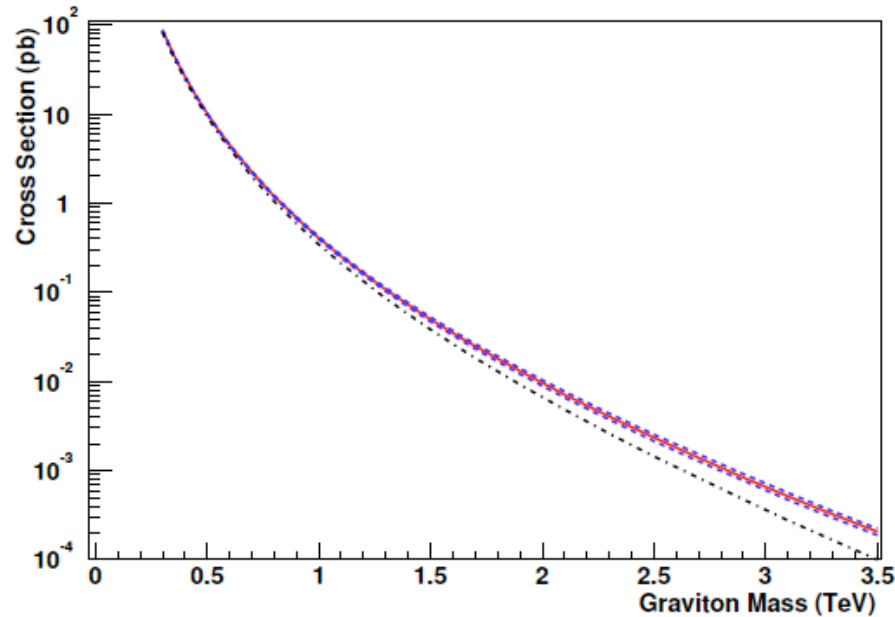
$\Lambda_\pi = 10-100$ TeV (coupling)

$k/M_{pl} = 0.01-0.1$

(3parameterは独立でない)



KK Gravitonが生成される



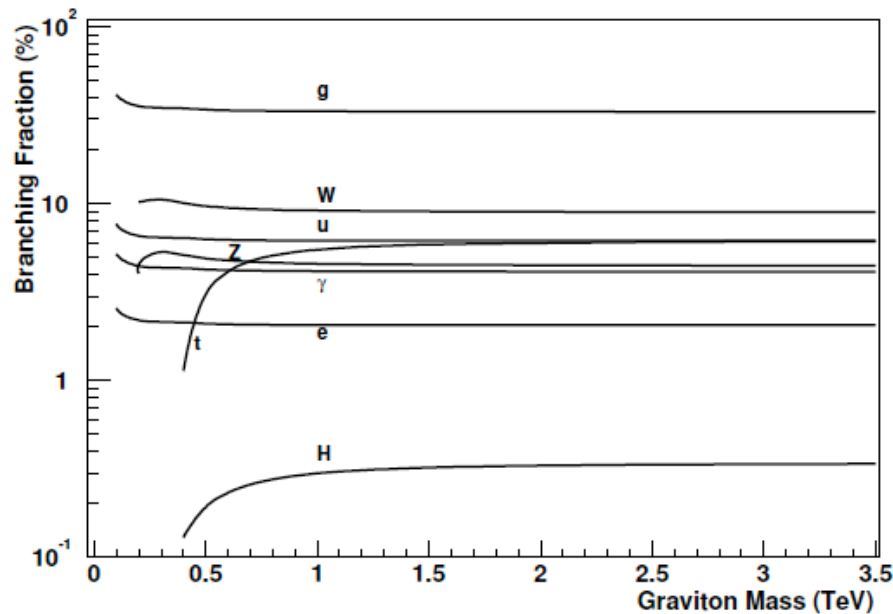
$pp \rightarrow G^*$ 生成段面積

$m(G^*) = 2\text{TeV}$

$\sigma = 10\text{fb}$

($k/M_{\text{pl}} = 0.01$)

もし、 k/M_{pl} が
大きいと σ が増える



分岐比は”民主的”

すべてに等しく

後は自由度

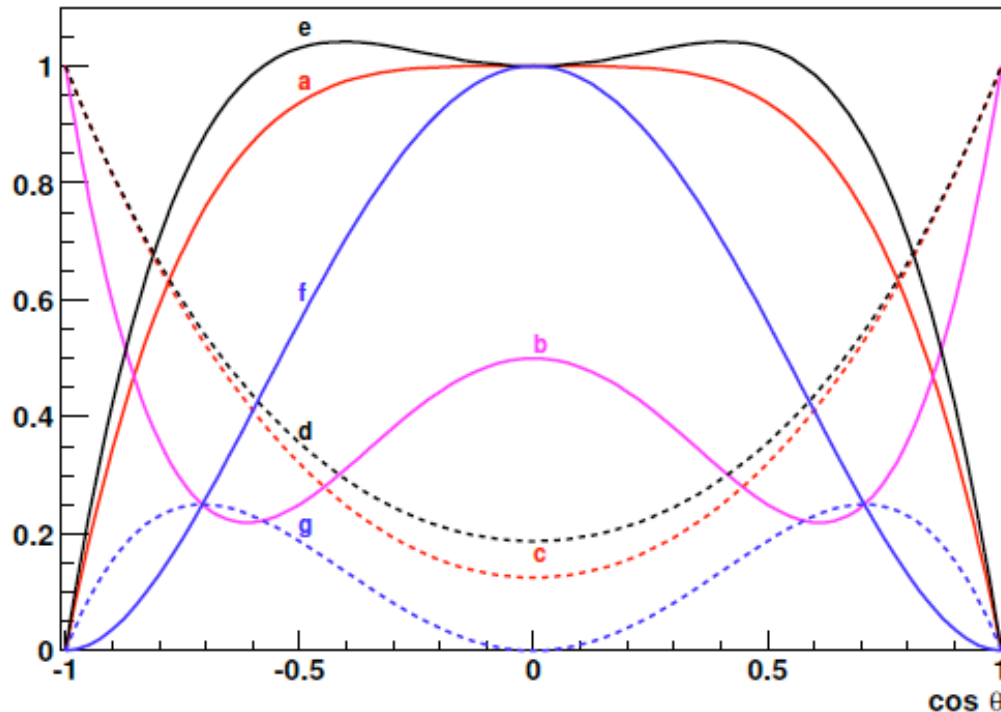
(spin, flavor, color)

$pp \rightarrow G^* \rightarrow e^+e^-$ が一番いいチャンネル:

Trackの分解能 $\Delta p/p \sim p$ で高い領域では悪くなる(μ駄目)

カロリメータ分解能 $\Delta E/E \sim 1/\text{SQRT}(E)$ (統計) で良くなる

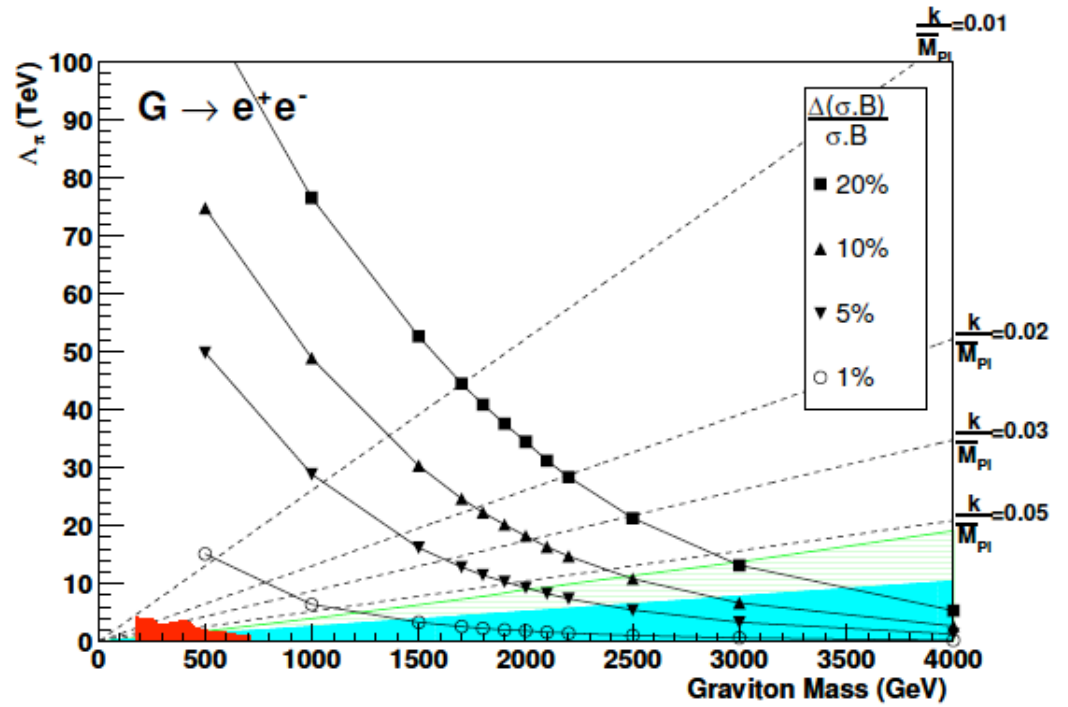
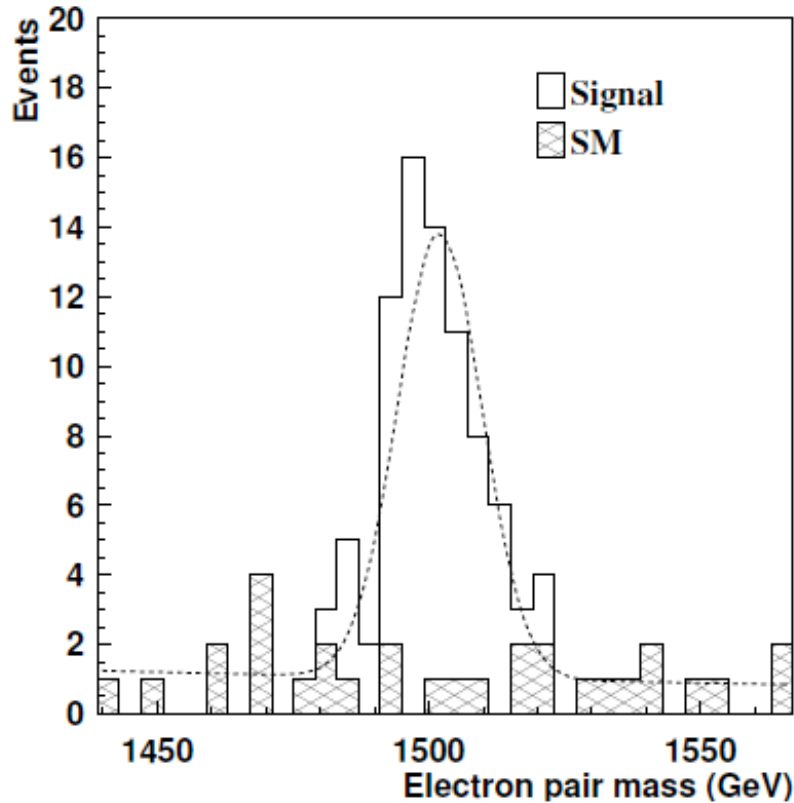
$gg \rightarrow G^* \rightarrow \gamma\gamma$ の角度分解能がBGに近くなる



Process	Distribution	Plot
$gg \rightarrow G \rightarrow f\bar{f}$	$\sin^2 \theta^* (2 - \beta^2 \sin^2 \theta^*)$	a
$q\bar{q} \rightarrow G \rightarrow f\bar{f}$	$1 + \cos^2 \theta^* - 4\beta^2 \sin^2 \theta^* \cos^2 \theta^*$	b
$gg \rightarrow G \rightarrow \gamma\gamma, gg$	$1 + 6 \cos^2 \theta^* + \cos^4 \theta^*$	c
$q\bar{q} \rightarrow G \rightarrow \gamma\gamma, gg$	$1 - \cos^4 \theta^*$	a
$gg \rightarrow G \rightarrow WW, ZZ$	$1 - \beta^2 \sin^2 \theta^* + \frac{3}{16} \beta^4 \sin^4 \theta^*$	d
$q\bar{q} \rightarrow G \rightarrow WW, ZZ$	$2 - \beta^2 (1 + \cos^2 \theta^*) + \frac{3}{2} \beta^4 \sin^2 \theta^* \cos^2 \theta^*$	e
$gg \rightarrow G \rightarrow HH$	$\sin^4 \theta^*$	f
$q\bar{q} \rightarrow G \rightarrow HH$	$\sin^2 \theta^* \cos^2 \theta^*$	g

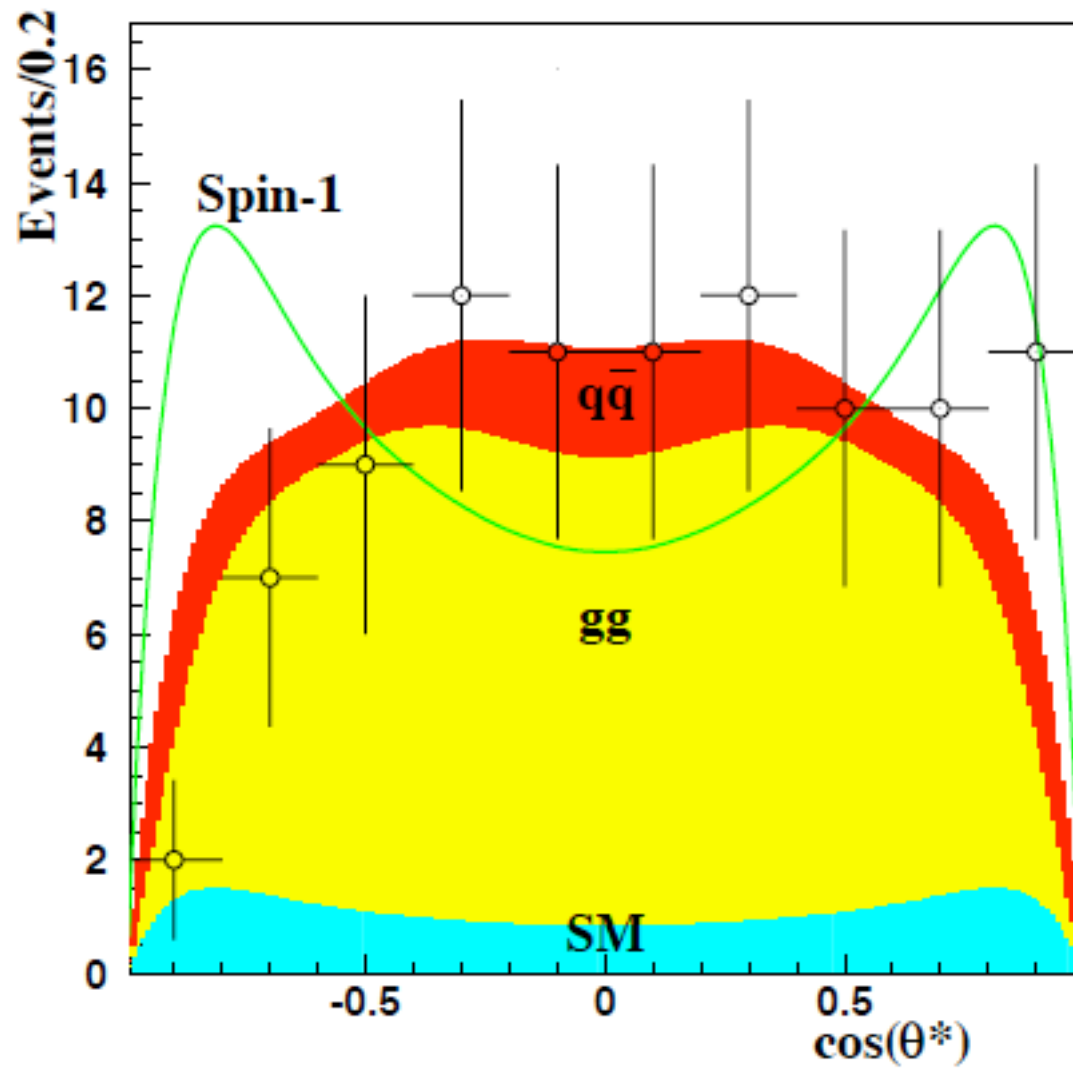
$L=100\text{fb}^{-1}$ $k/M_{\text{pl}}=0.01$

$G^*=1.5\text{TeV}$



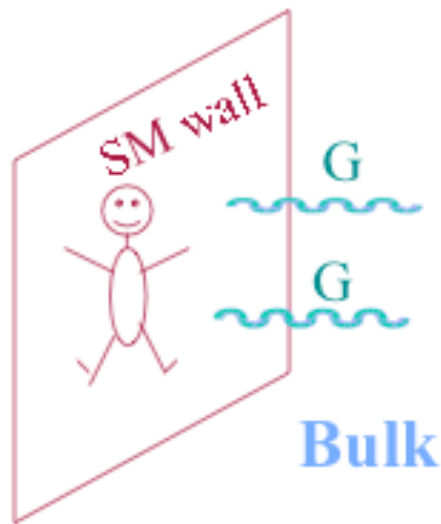
綺麗なレゾナンス
BG DY過程 $Z^* \rightarrow ee$

$k/M_{\text{pl}} = 0.01$ $m(G^*) < 1.7\text{TeV}$
 $k/M_{\text{pl}} = 0.1$ $m(G^*) < 3.5\text{TeV}$



ちゃんと
Spin2が
観測できて、
G*であることが
分かる。

3-2 TeVスケールの余剰次元 (Large ED) (Black Hole や KK-Graviton)



If gravity propagates in $4 + n$ dimensions, a gravity scale $M_D \approx 1 \text{ TeV}$ is possible \rightarrow hierarchy problem solved

$$V_4(r) \sim \frac{1}{M_{\text{Pl}}^2} \frac{1}{r}$$

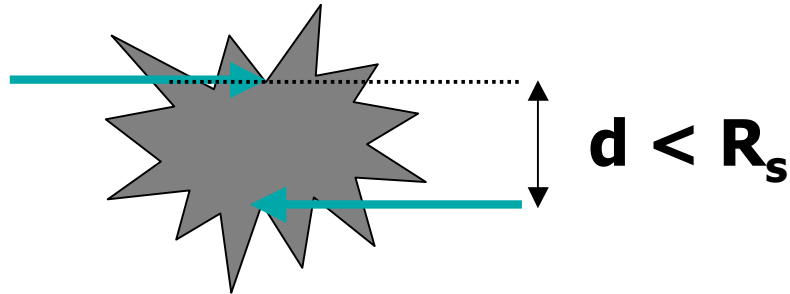
$$V_{4+n}(r) \sim \frac{1}{M_D^{n+2} R^n} \frac{1}{r}$$

at large distance

$$M_{\text{Pl}}^2 \approx M_D^{n+2} R^n$$

n, R = number and size of extra-dimensions

M_p (Planck scale $\sim \text{TeV}$)
 隠れた次元 n

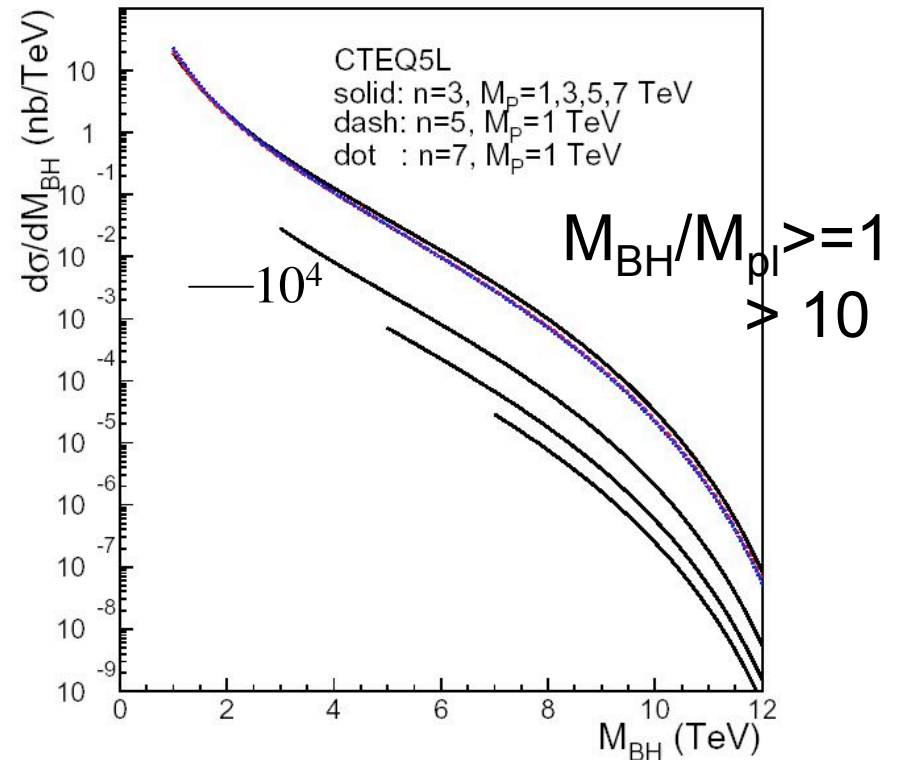


R_s より小さい d で parton が
 衝突すると BH ができる。
 断面積が大きい。
 (7,8TeV以下年間1万個以上)

衝突するパートンの不変質量 M_{BH}
 (Black Holeの質量)

$$R_s = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[\frac{M_{BH}}{M_P} \left(\frac{8\Gamma(\frac{n+3}{2})}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$

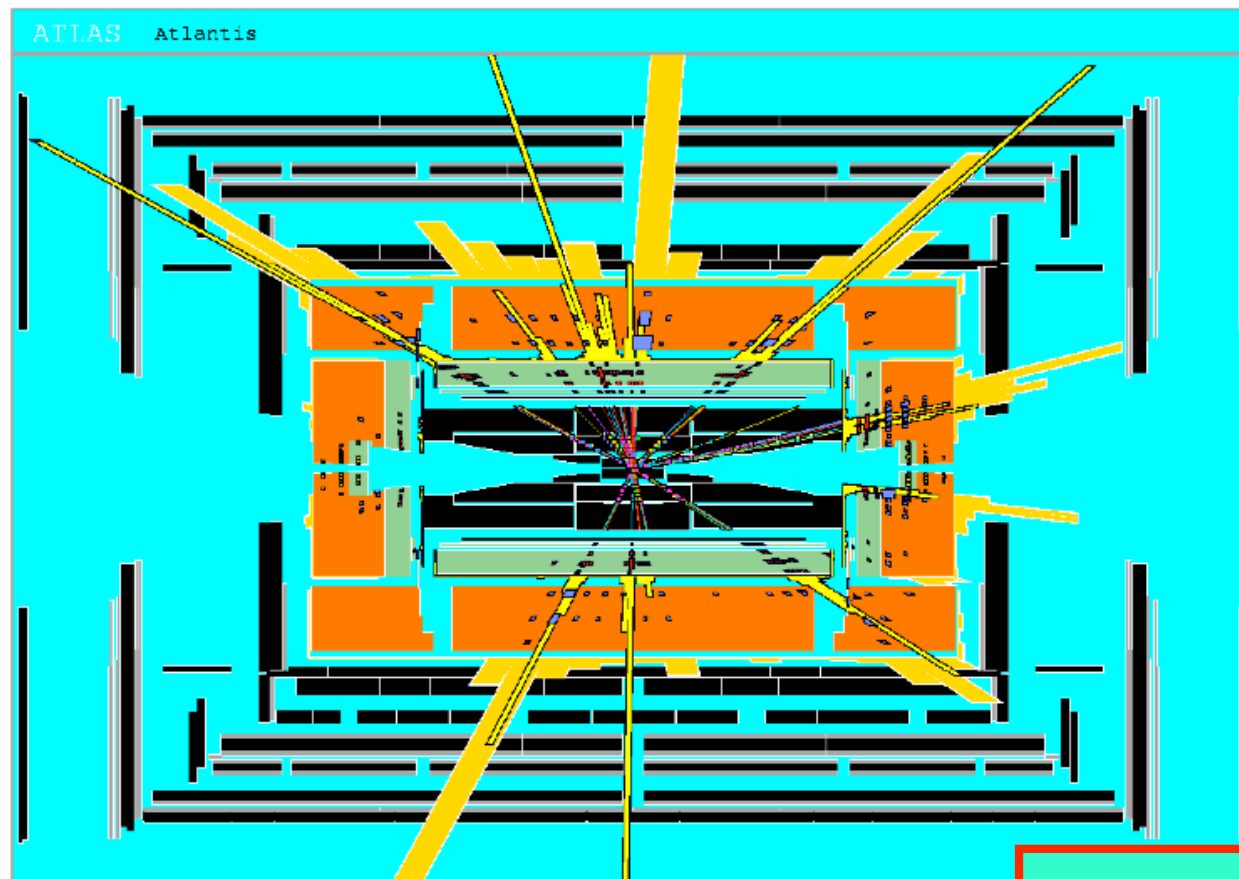
古典近似を使って良いTHSが？



出来たBHは、安定化の後
 Hawking Radiationで蒸発。

$$T_H = M_P \left[\frac{M_P}{M_{BH}} \left(\frac{n+2}{8\Gamma((n+3)/2)} \right) \right]^{\frac{2}{1+n}}$$

$$\frac{dN}{dE} \propto \frac{(E/T_H)^2}{\exp(E/T_H) + c}$$



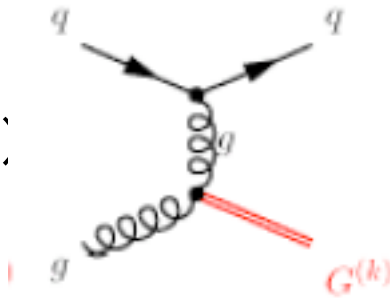
$M_{\text{pl}}=1\text{TeV}$, $n=2$ $M_{\text{BH}}=5\text{ TeV}$

(Energetic 数100GeV のjet,
photon, lepton がザクザクいて、ま
るいeventが特徴)

$M_{\text{pl}} < 6\text{TeV}$ or 2TeV
for $n=2-7$ ($L=10\text{fb}^{-1}$)

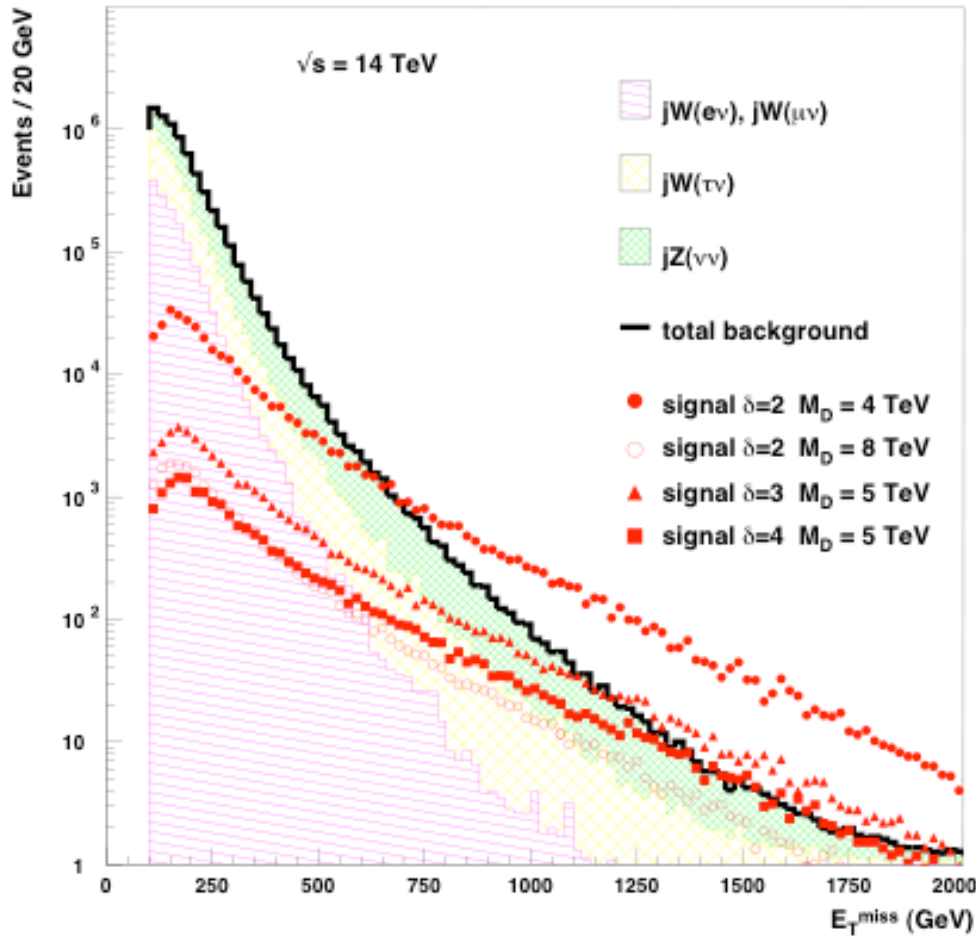
Particle E -> 黒色輻射 ->温度が決まる
はずだか実験的に難しい。

KK graviton
 $gg \rightarrow gK$ (モノジェット)



Gは狭い領域(TeV)⁻¹強い力
 Gが高いエネルギーのgに結合

E_T distribution

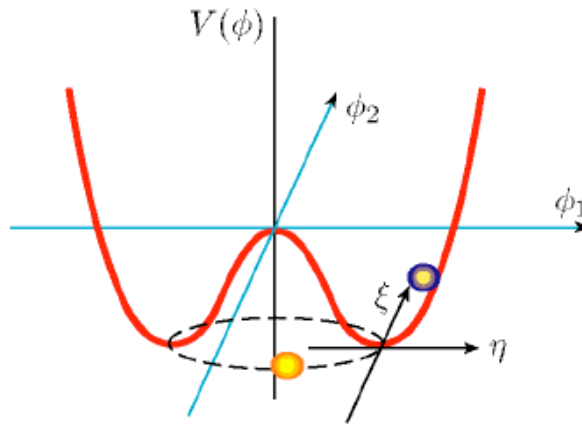


Events for HL, 100 fb^{-1}
 for $E_T^{jet} > 1 \text{ TeV}$

$jZ(\nu\nu)$	$jW(\tau\nu)$	$jW(e\nu)$	$jW(\mu\nu)$
523	151	12	14

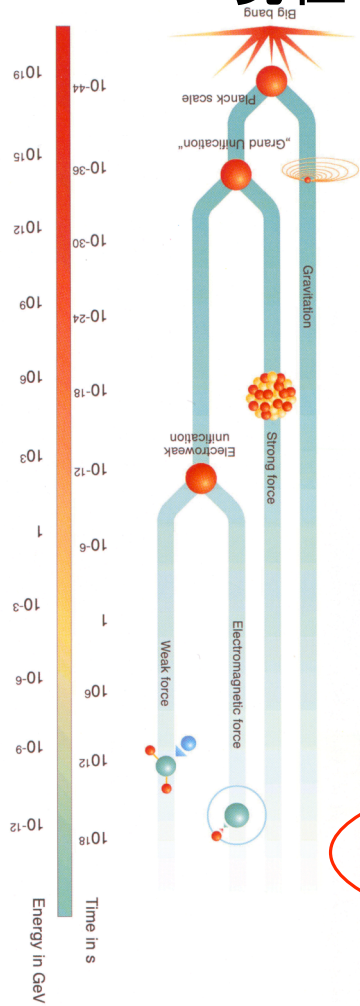
δ	M_D (TeV)	Events	$S_{max} = S/\sqrt{B}$
2	5	1430	61.4
	7	366	13.8
	9	135	5.1
3	5	705	26.7
	7	131	5.0
4	5	391	14.8
	7	53	2.0

[4]スカラー場： HIGGS場

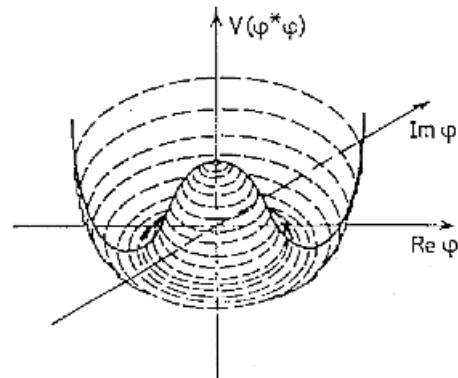


自発的対称性の破れとスカラー場
(EW Higgsがインフロンではないですが)
質量の起源を探る(宇宙の主役ではないですが)

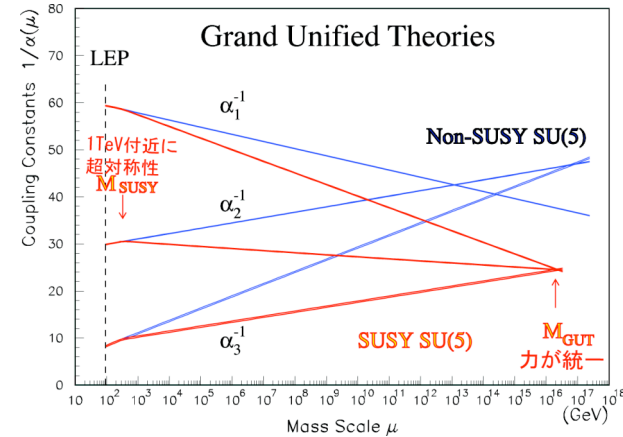
現在の素粒子・宇宙の根幹をなす考え方



Higgs場の破れ



力の分化

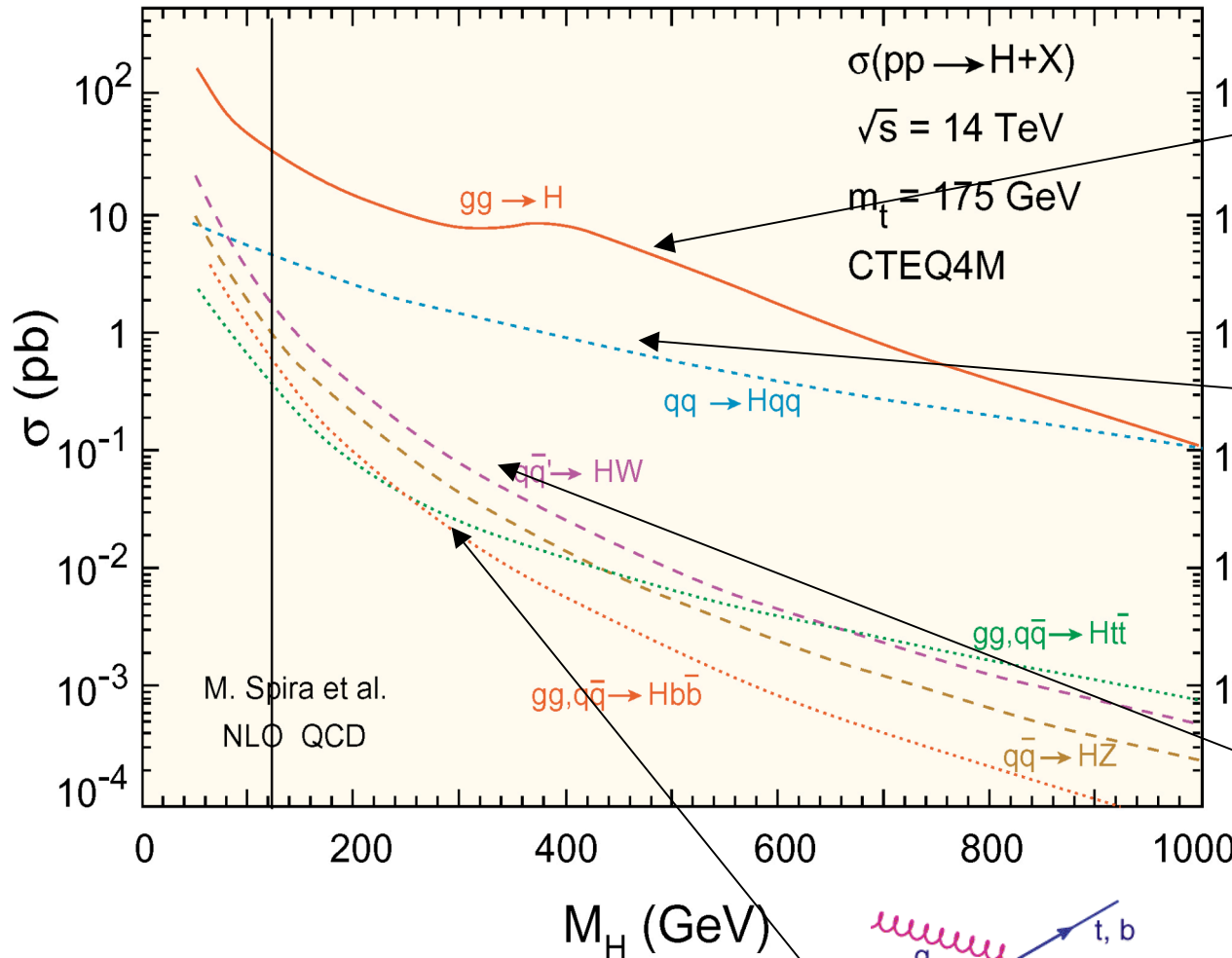


冷えていく
真空が不安定状態 → インフラトン(BB)
安定的な対称性を破った状態へ (SSB)
相転移: 力の分化が起こった

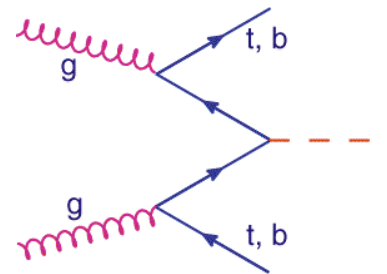
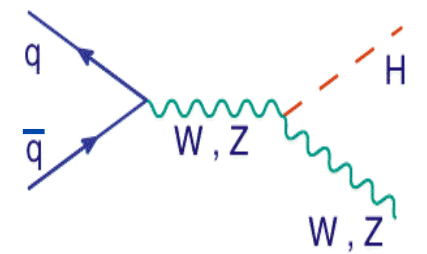
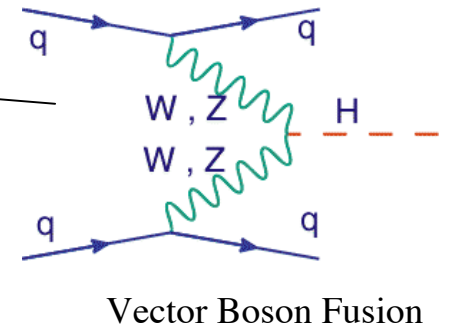
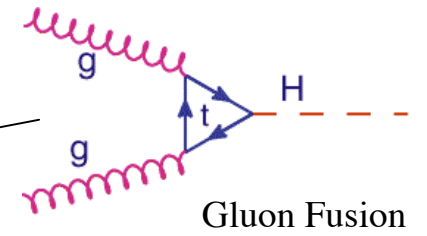
Higgsを見つける
ことの哲学

より高い対称性の状態から、自発的に対称性が破れて、今の「多彩な宇宙の構造」が作られた。
冷えることで → 対称性の破れ:
この場スカラー場を探る

[4-1] SM Higgs 生成過程 LHC



4 processes

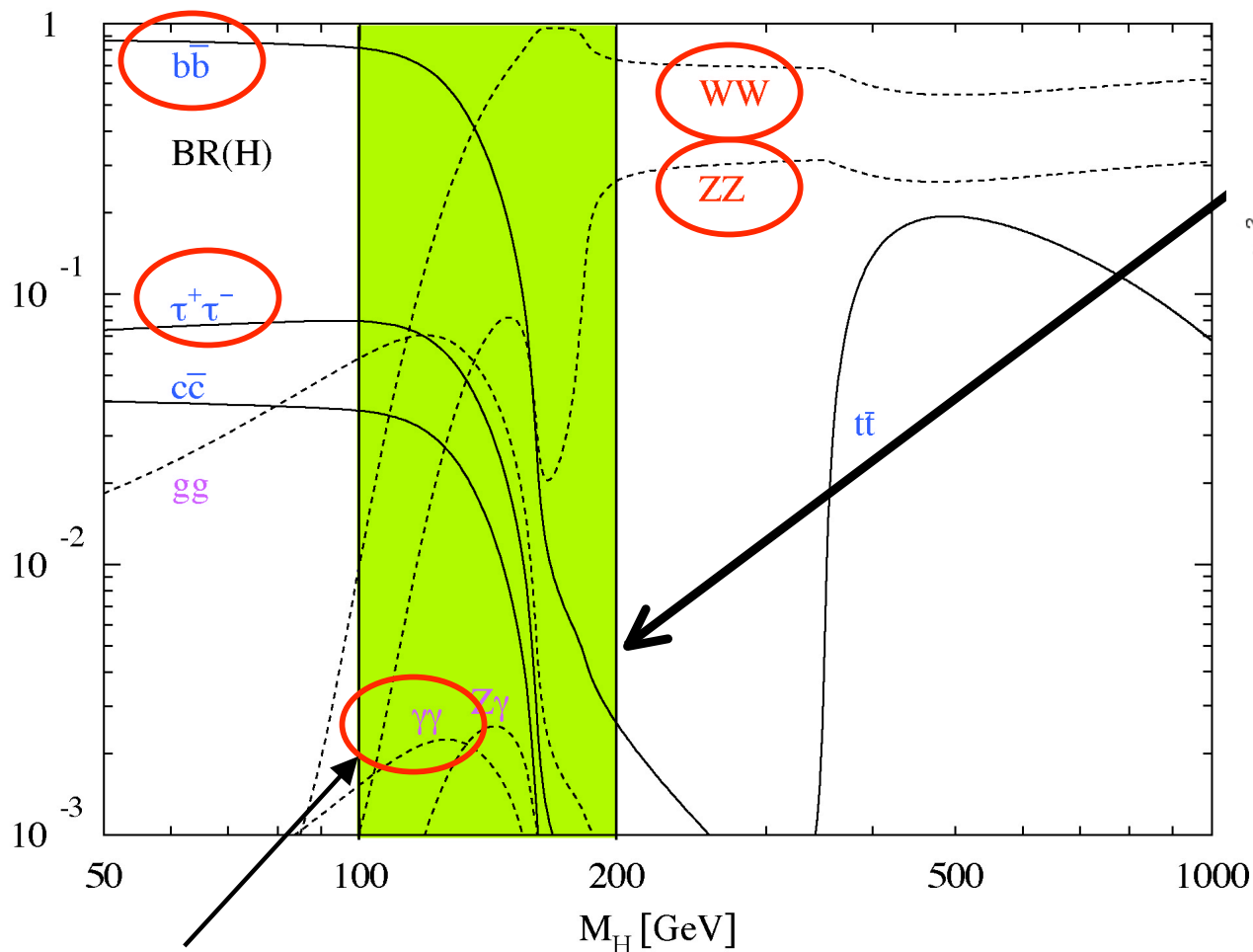


events for 10^5 pb^{-1}

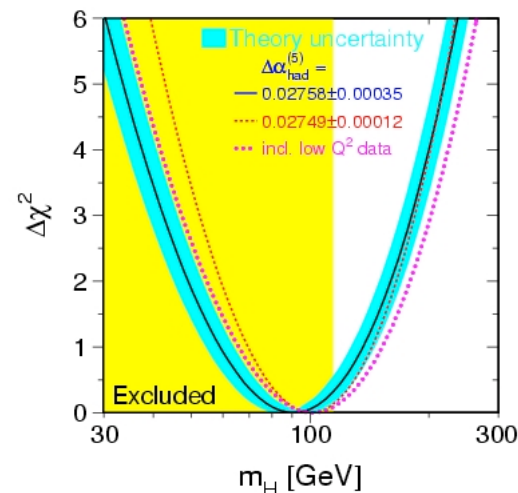
GF & VBF が段面積が大きい:
 ttH/bbH 段面積は小さいが
 direct information of Yukawa y_t/y_b .

[4-2] Decay Branching Fraction

LEP でのSM精密測定
 $M(H)=115-200\text{GeV}(95\%CL)$



$H \rightarrow \gamma\gamma$ Br は小さい 10^{-3} ,
 γ の分解能がいいので大切



軽いHiggsでは
 5 decay modeが大切

$H \rightarrow bb, \tau\tau, \gamma\gamma$

($M(H) < 140\text{GeV}$)

$H \rightarrow ZZ^*, WW^*$

($M(H) > 130\text{GeV}$)

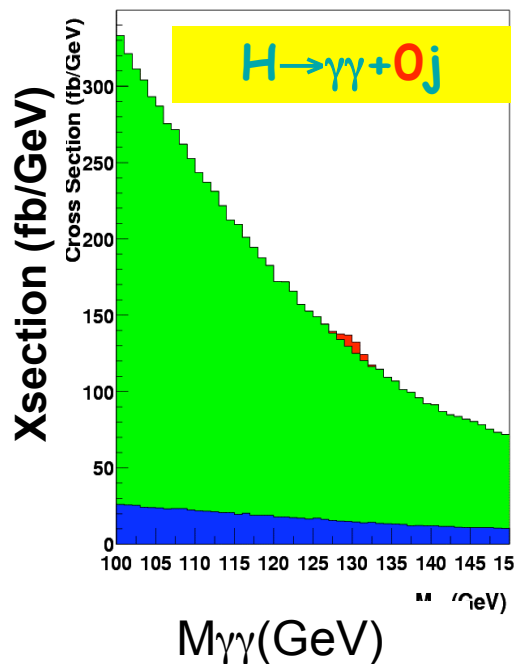
4 * 5 = 20通り

SM Higgsの研究で有効なチャンネルの纏め

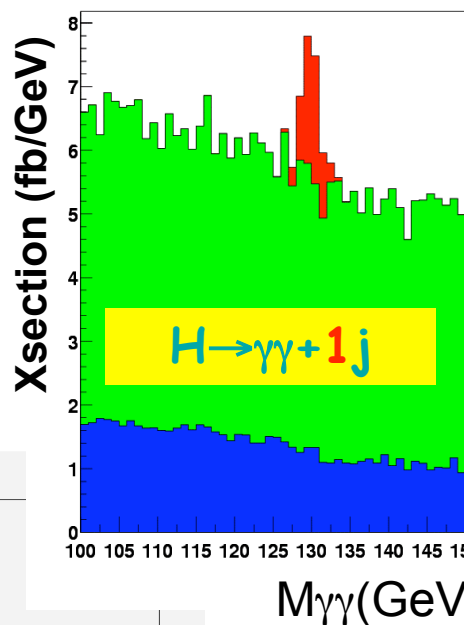
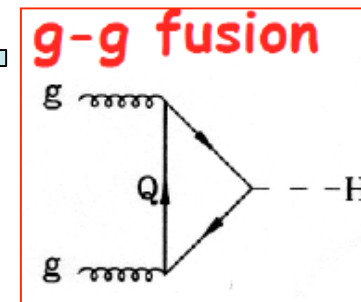
生成過程	崩壊過程	有効な領域とその効能	
Gluon Fusion	$H \rightarrow \gamma \gamma$	110–140 GeV	発見 Mass 測定 spin=0の傍証
	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	140–1000	発見・Mass, spin, coupling測定
	$H \rightarrow WW$	130–170 GeV	発見
Vector Boson Fusion (鍵のチャンネル)	$H \rightarrow \tau \tau$	110–140 GeV	発見・Mass, coupling測定
	$H \rightarrow WW$	130–200 GeV	発見・W coupling測定
	$H \rightarrow \gamma \gamma$	110–140 GeV	発見 Mass測定
ttH	$H \rightarrow bb$	110–130 GeV	Ytの測定(難しいチャンネル、)

(1) $H \rightarrow \gamma\gamma$ in gg-fusion and VV-fusion

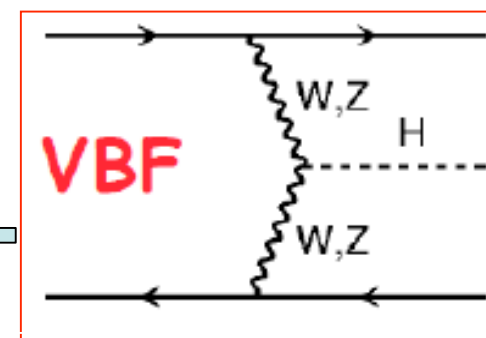
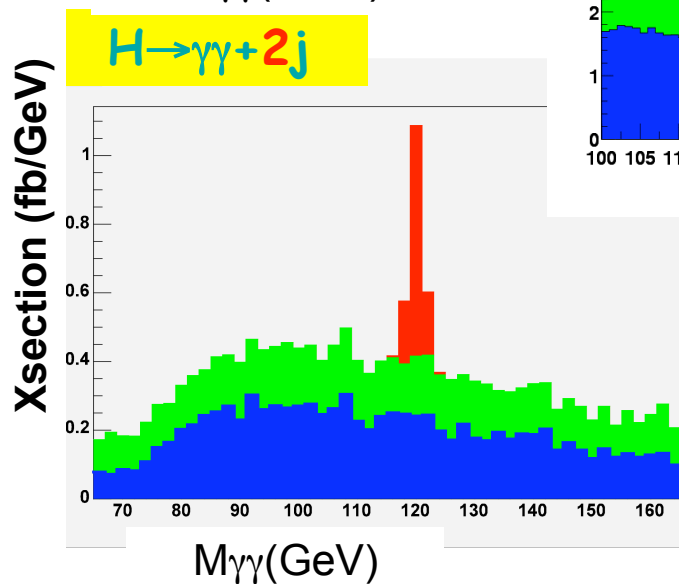
preliminary



huge BG. S/N ~1% → S/Nは悪い
バックグラウンドが急、高統計



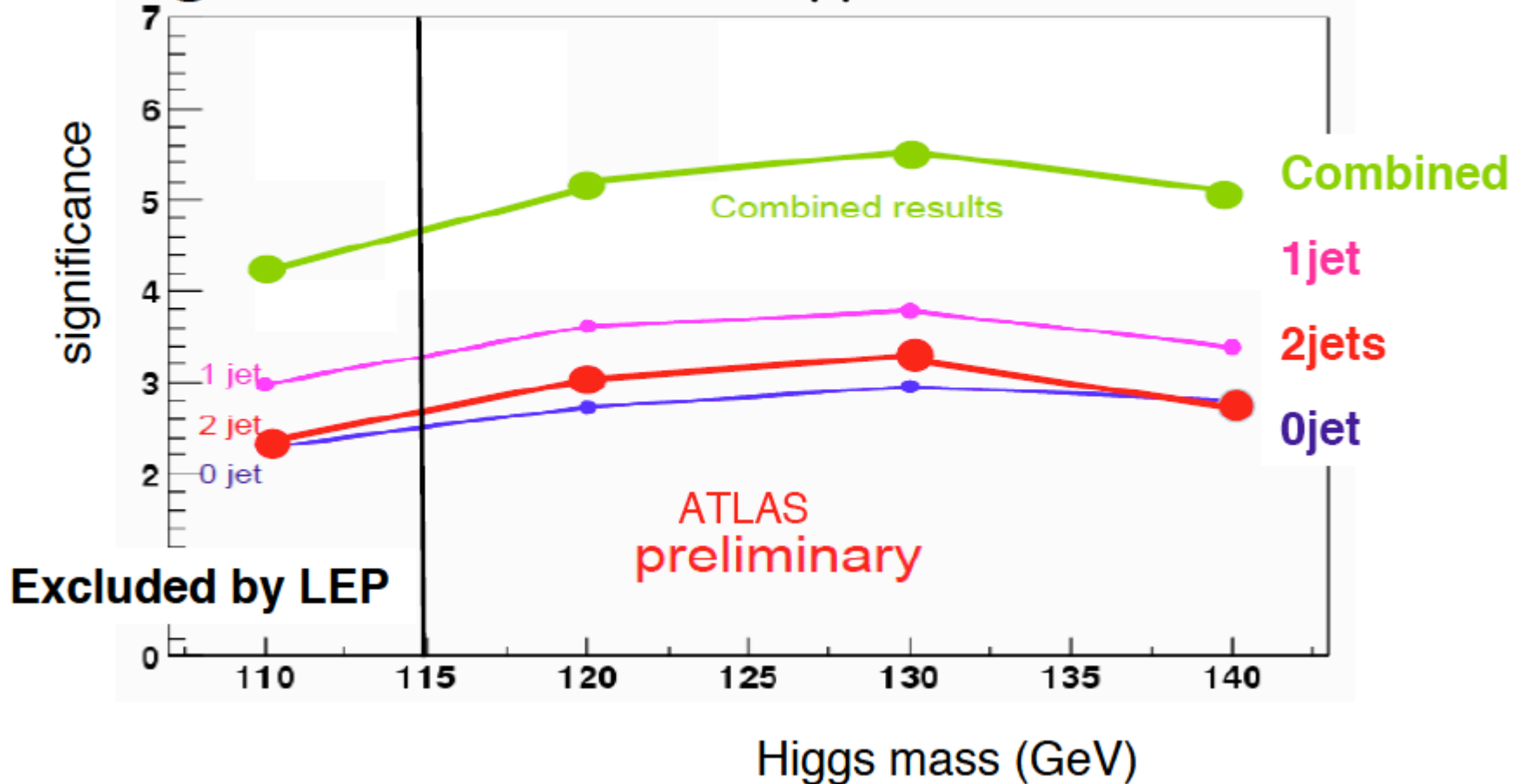
- Higgsは高いQの物理 gg Fusion に高いPt one jetがついた (計算精度)
- VBF: 一方のjetをミスった(low Pt) S/N がよくなる。 (~ 10%)



バックグラウンドを抑えることが可能: S/N 非常によい (>100%) Signal数が厳しい

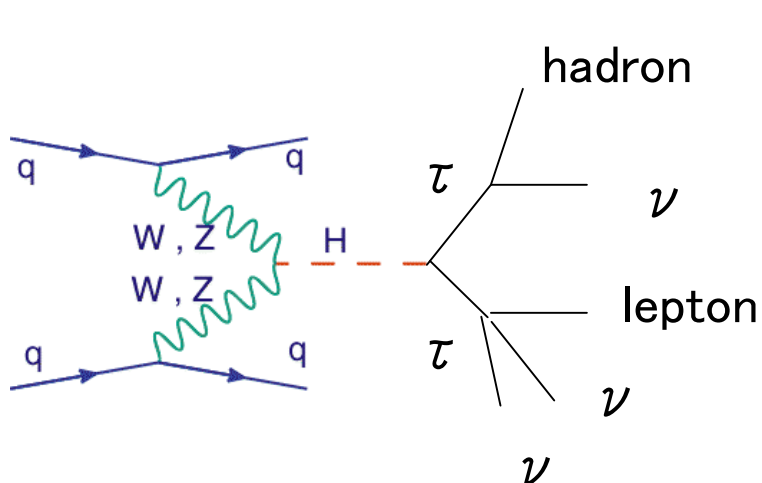
3つの解析は同じような発見能力をもっていて、3つ併せると、

Significance on $H \rightarrow \gamma\gamma$ @ $L = 10\text{fb}^{-1}$



軽いHiggsは、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ だけで 5σ ($L = 10\text{fb}^{-1}$)
しかも spin=0 (2も可であるが) であることを示す重要な証拠

[2] VBF: $H \rightarrow \tau \tau$ (Yukawa結合)



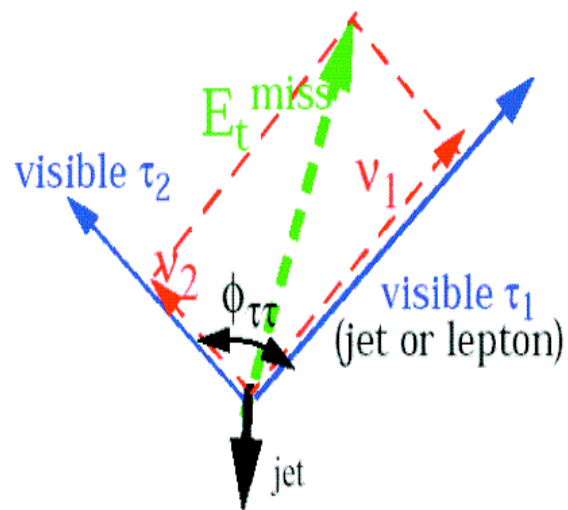
$H \rightarrow \tau\tau$ (Br=7%)

Br* $\sigma = 300\text{fb}$

Tau 34% leptonic decay

\rightarrow trigger

(一方か両方のtauがleptonic decay)



τ は軽いので ν の向きは lepton, hadron とほぼ同じ向き
(Collinear 近似)

ミッシング横方向のエネルギーの情報を使って
 τ の運動量が再構成出来る

\rightarrow Higgsの質量が再構成(信号のPeakが見える)

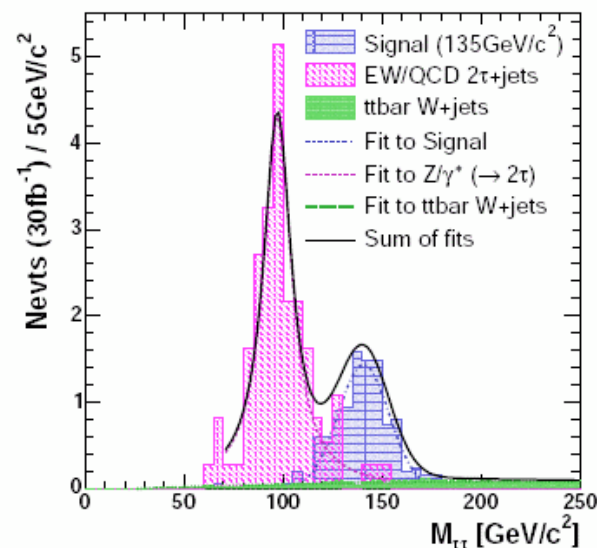
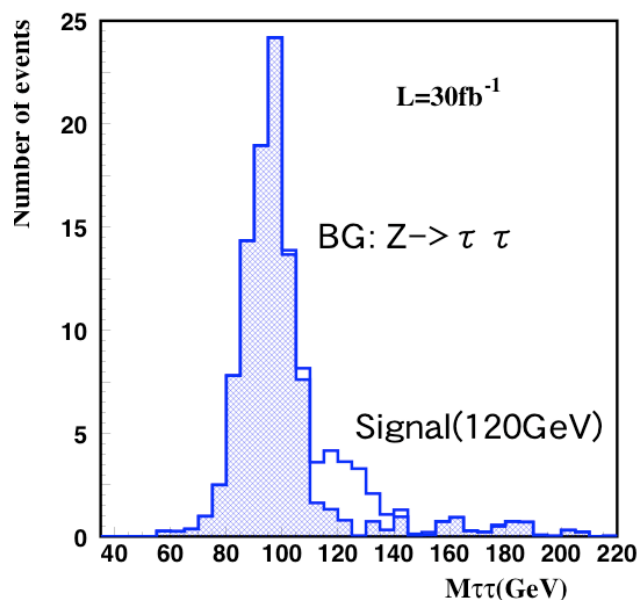
VBF $H \rightarrow \tau \tau$ の $M_{\tau\tau}$ 分布

$M_H = 120 \text{ GeV}$

Tauが再構成出来る
分解能は、ハドロン程度
 $\sigma \sim 9 \text{ GeV}$

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

$$\tau^+ \tau^- \rightarrow \ell \ell 4 \nu$$



- Backgroundとsignalの形が違う。DYの M_Z のpeakの横で綺麗に区別がつく。
- τ の再構成にmissing情報 (b-tagは使ってない) \rightarrow missing E_t の研究が鍵

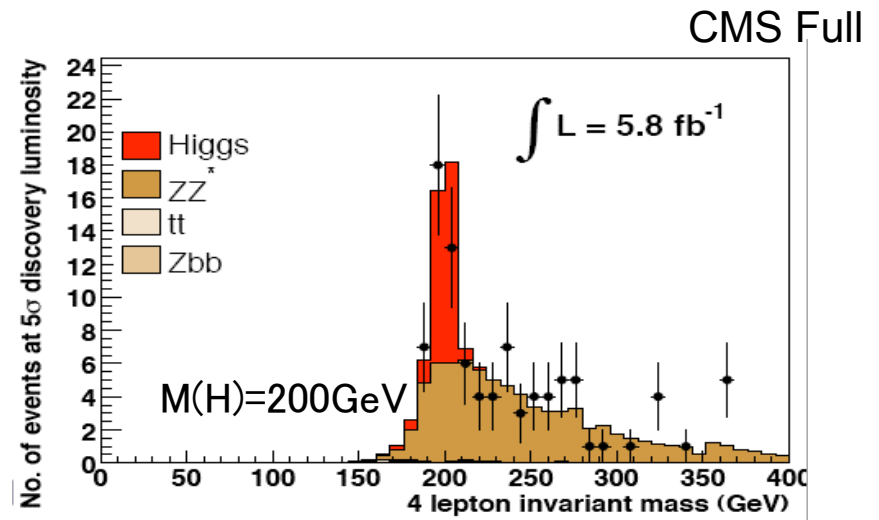
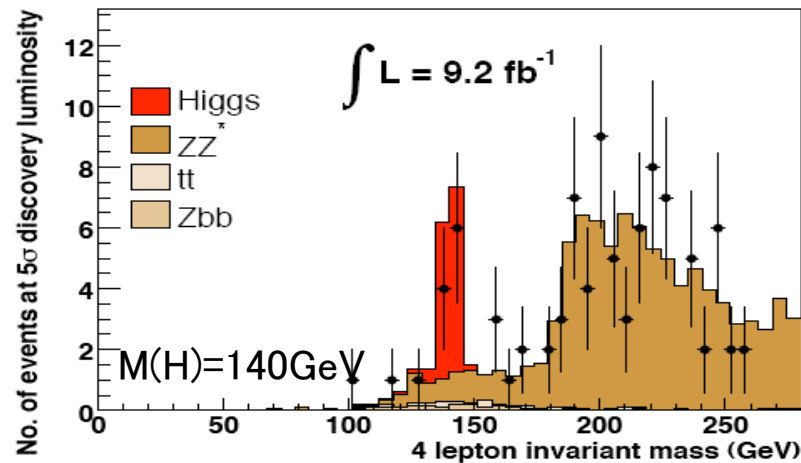
[3] $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\text{leptons}$

4レプトンの不変質量 非常に細くて綺麗

Irreducible BG $q\bar{q} \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ (連続分布)

Reducible BGs are $t\bar{t}$ & Zbb (Bのsemileptonic decayをレプトンとミス)

Isolation+impact parameterを厳しく



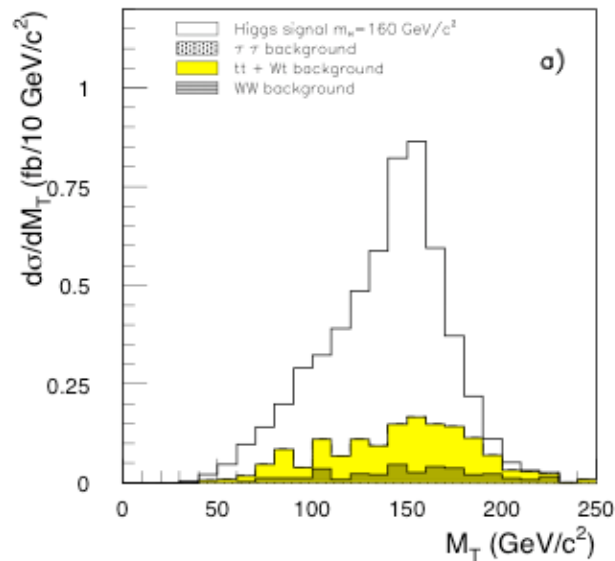
$M(H) < 130\text{ GeV}$ & $M(H) = 170\text{ GeV}$ (Branching small) 以外は綺麗
CP, Spin of Higgs を決めることができる。

[4] VBF $H \rightarrow WW$

Leptonic decays of W
 $W^+W^- \rightarrow l\nu l\nu$

$M_H = 160 \text{ GeV}$

ATLAS



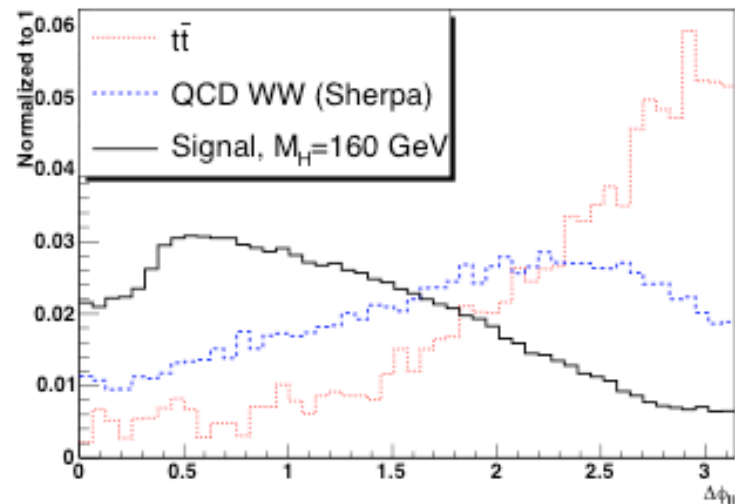
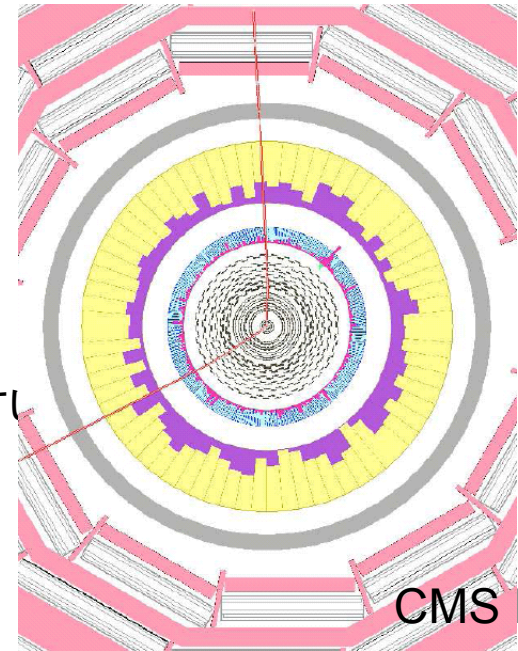
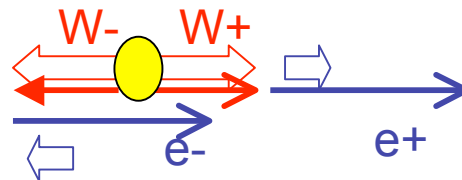
$W \rightarrow l\nu$ のアナロジー $M_T^2 = 2P_T P_{\nu LL} (1 - \cos \phi)$

Clear Jacobian Peak が綺麗に見える:
 $tt \rightarrow bb l\nu l\nu$ main BG:

Dilepton + mE_T

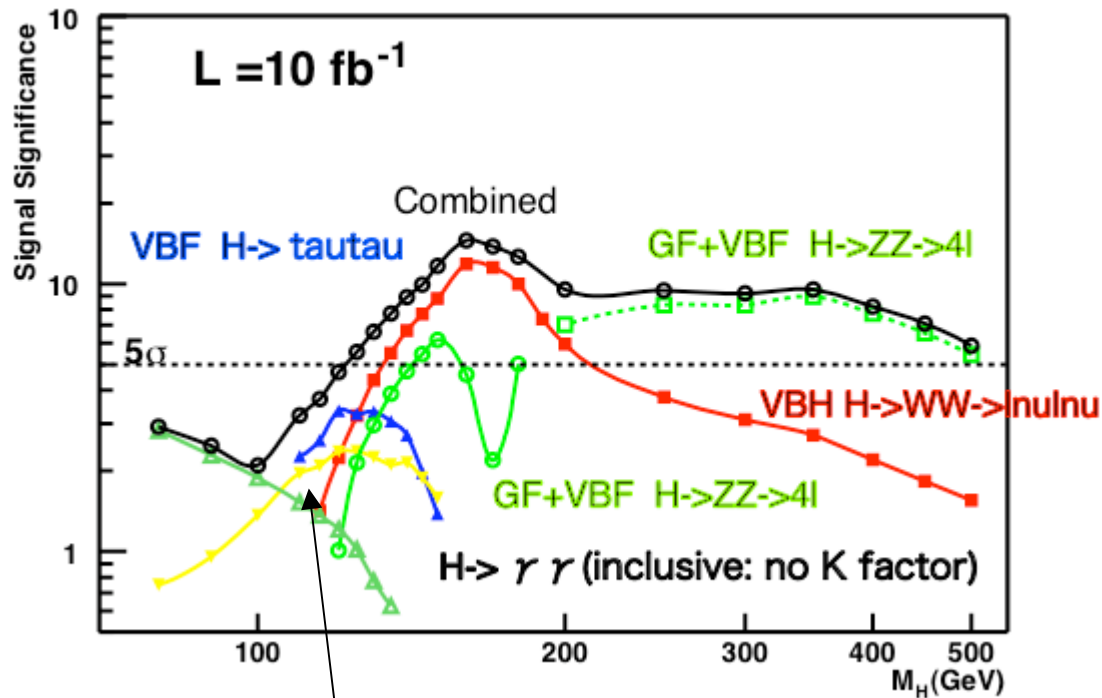
Lepton はスピンの
 関係で同じ方向に出やすい

Higgs Spin0



Φ between di-lepton (Rad)

SM Higgsの発見能力



ATLAS

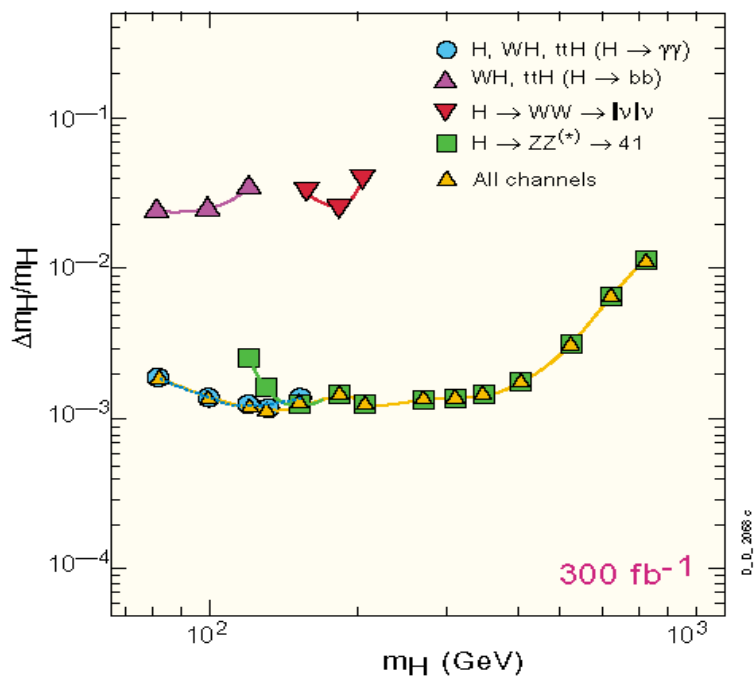
- 軽い場合 VBF・ $\tau\tau$
- GF+VBF $\gamma\gamma$
- 重い場合 VBF・WW
- 200 GeV以下の時は複数のモードで観測可能
- 200 GeVより重いと $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$ で 20σ 以上

$L=10\text{fb}^{-1}$ で 5σ 以上
→ 2008-2009年
で発見可能

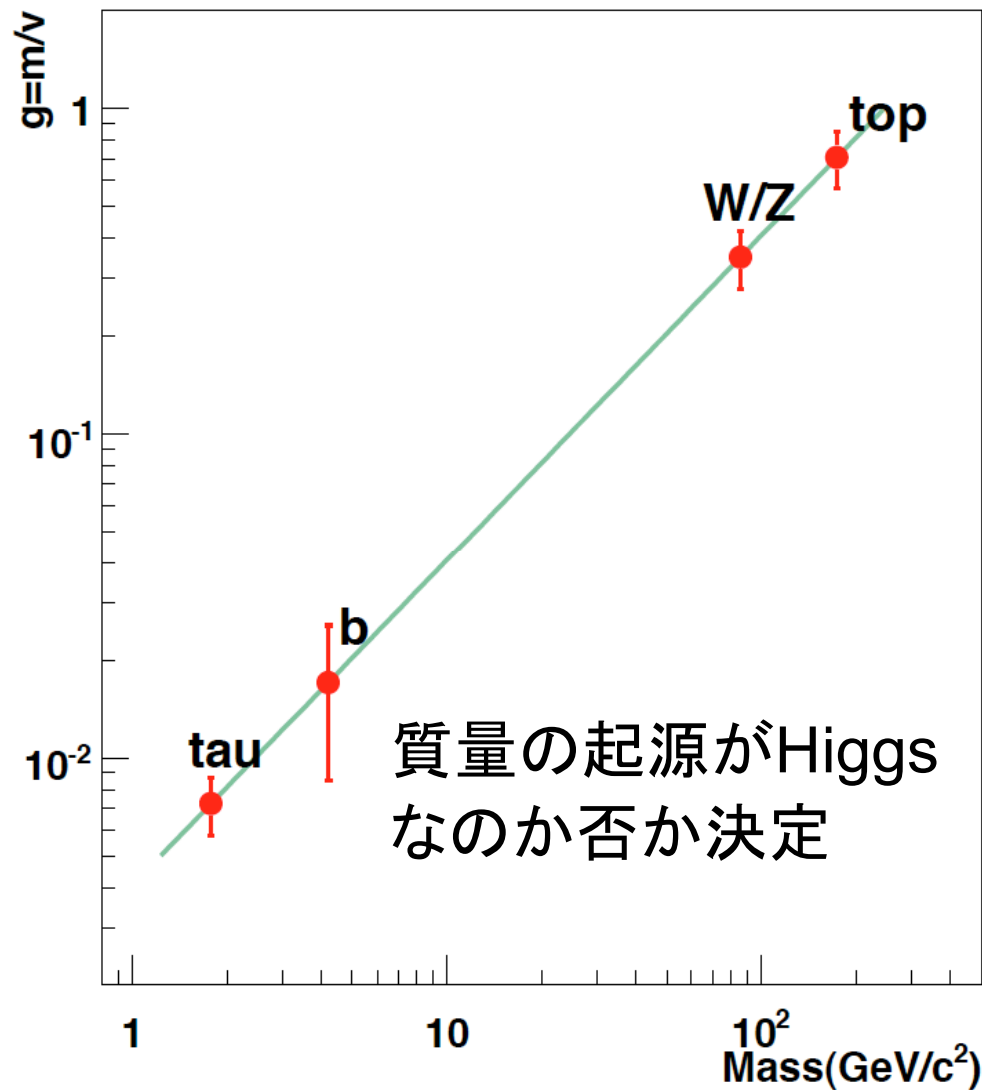
黄色($H \rightarrow \gamma\gamma$)がもっとよくなる。(jetの結果入れてない)
 (5σ @ $L=10\text{fb}^{-1}$ ほど)

Higgs Mass と coupling 測定 ($L=300\text{fb}^{-1}$)

Precision on SM Higgs mass



Mass 精度 0.1%
if $M(H) < 400\text{GeV}$.



纏め

LHC : end of 2010($L=30\text{fb}^{-1}$)

SUSY 2.5-3TeV までOK -> SUSYの厳しいテスト

Higgs OK -> 真空の相転移シナリオのcriticalなテスト

ED KK excitation 2-3TeV BH $M_{\text{pl}}=2-5\text{TeV}$

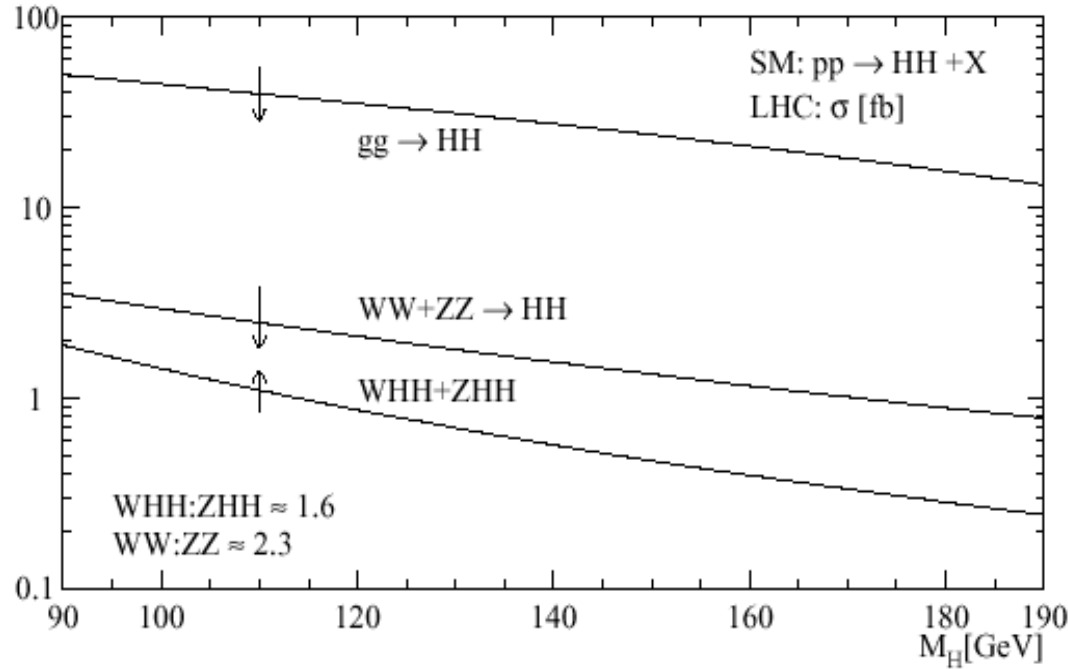
Little Higgs, W' なども探ることが可能

Dark Sideの”素粒子的な解釈の”進むべき方向指針

Dark Energyについて”直接”何か出来るか？

Higgs Self-couplings

$$\lambda_{HHH}^{SM} = 3 \frac{m_H^2}{v}, \quad \lambda_{HHHH}^{SM} = 3 \frac{m_H^2}{v^2}$$



In order to determine the shape of Higgs potential, Slope of potential is correspond to Self-coupling

$\sigma \times Br$ is small
Need very High Luminosity
— > SLHC

For **6000 fb⁻¹** (SLHC)

$\Delta\lambda \sim 19\%$ for 170 GeV M_H

$$gg \rightarrow HH \rightarrow W^+W^- W^+W^- \rightarrow \ell^\pm \nu jj \ell^\pm \nu jj$$

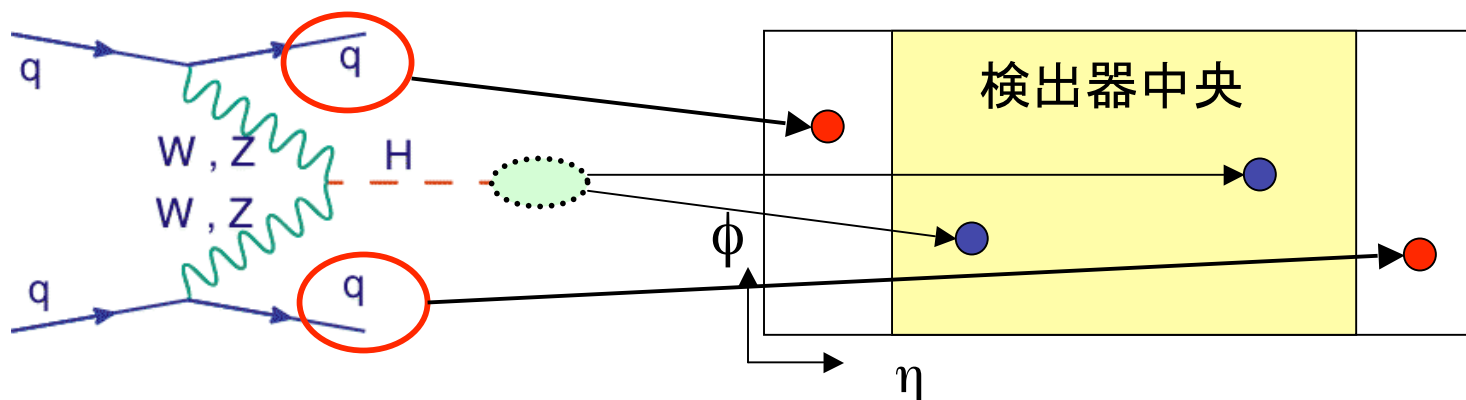
Table 8: Expected numbers of signal and background events after all cuts for the $gg \rightarrow HH \rightarrow 4W \rightarrow \ell^+ \ell'^+ 4j$ final state, for $\int \mathcal{L} = 6000 \text{ fb}^{-1}$.

m_H	Signal	$t\bar{t}$	$W^\pm Z$	$W^\pm W^+ W^-$	$t\bar{t} W^\pm$	$t\bar{t} t\bar{t}$	S/\sqrt{B}
170 GeV	350	90	60	2400	1600	30	5.4
200 GeV	220	90	60	1500	1600	30	3.8

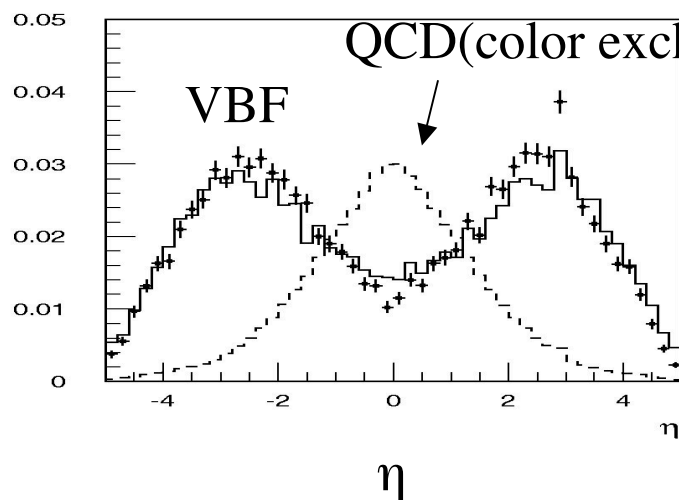
Vector Boson Fusion過程 (VBFの提案 1998 Zeppenfeld et al.)

クォークから放出されたゲージ粒子の融合からヒッグスが生成される。

Vector Boson Fusion過程の特徴



ジェットの数



反跳したパートンが前後方で検出
 横方向運動量: W/Zの質量 order
 Color exchangeがない。
 Rapidity GAPが存在

Color Exchangeがある場合の
 ジェットの分布評価など実際には
 難しい。(20-30%不定性)

1-3 Promising event topologies with mE_T are listed:

Jet multi (high Pt)	Additional obj.	Favored scenario	Dominant SM background processes
High Multiplicity $N_j \geq 3, 4$	No lepton	SUGRA, AMSB, Heavy \tilde{q}	QCD(light & bb/cc) $t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}\tau\nu)$ Z(->nunu) and W(->taunu)
	One lepton	SUGRA, AMSB, Heavy \tilde{q}	$t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}l\nu)$ W(->taunu)
	Dilepton, 3L	SUGRA, AMSB, GMSB ($N_m > 1$)	OS: $t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}l\nu l\nu)$ SS, 3L ZW, ZZ $t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}l\nu l\nu)$
	Tau (ditau)	Large $\tan\beta$, GMSB ($N_m > 1$)	W (->taunu) $t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}\tau\nu)$
	YY	GMSB ($N_m \sim 1$) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$	Almost BG Free $t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}e\nu e\nu)$ FSR
Low Multiplicity $N_j \sim 1, 2$	No lepton	Heavy \tilde{g} KK Graviton	Z(->nunu) W(->taunu)
	One lepton	Heavy \tilde{g} Top like particle LH(W'Z')	W, Z $t\bar{t}(\rightarrow b\bar{b}l\nu l\nu)$
No jet $N_j = 0$	One Lepton	W'	W
	Dilepton, 3L	Direct $\tilde{\chi}$	WW, WZ, ZZ WZ main for 3L

(Black shows various SUSY models and Blue non-SUSY models)

[4-4] Understanding of the background processes

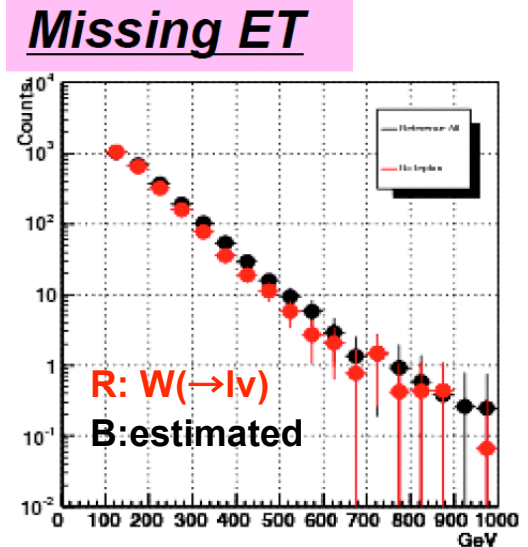
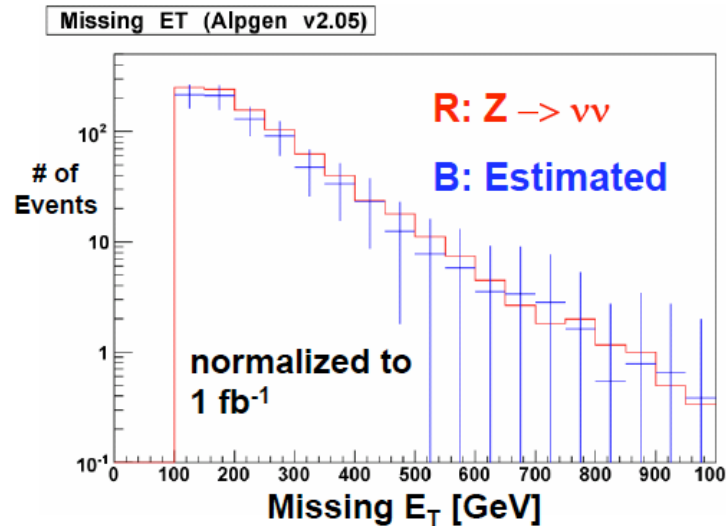
Background is estimated with “real data itself” (not estimated with MC):

We have good control samples of $Z(\rightarrow ee/\mu\mu)+jets$, $W(\rightarrow lv)+jets$ and $tt\rightarrow bblvqq$ with $M_T < M_W$. From them, the background of $Z(\rightarrow \nu\nu), W(\rightarrow lv)$, tt with large mE_T & $M_T > M_W$ can be estimated.

For examples: these four plots show mE_T spectra for various processes

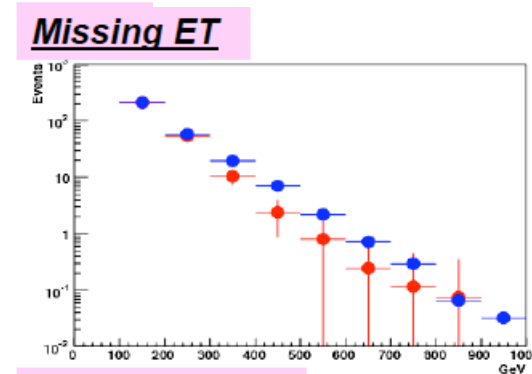
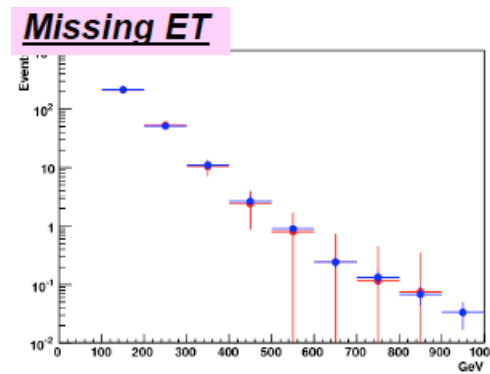
ATLAS Preliminary

Z and W background for no-lepton mode



Top pair background for one lepton mode

R: tt BG
B: estimated

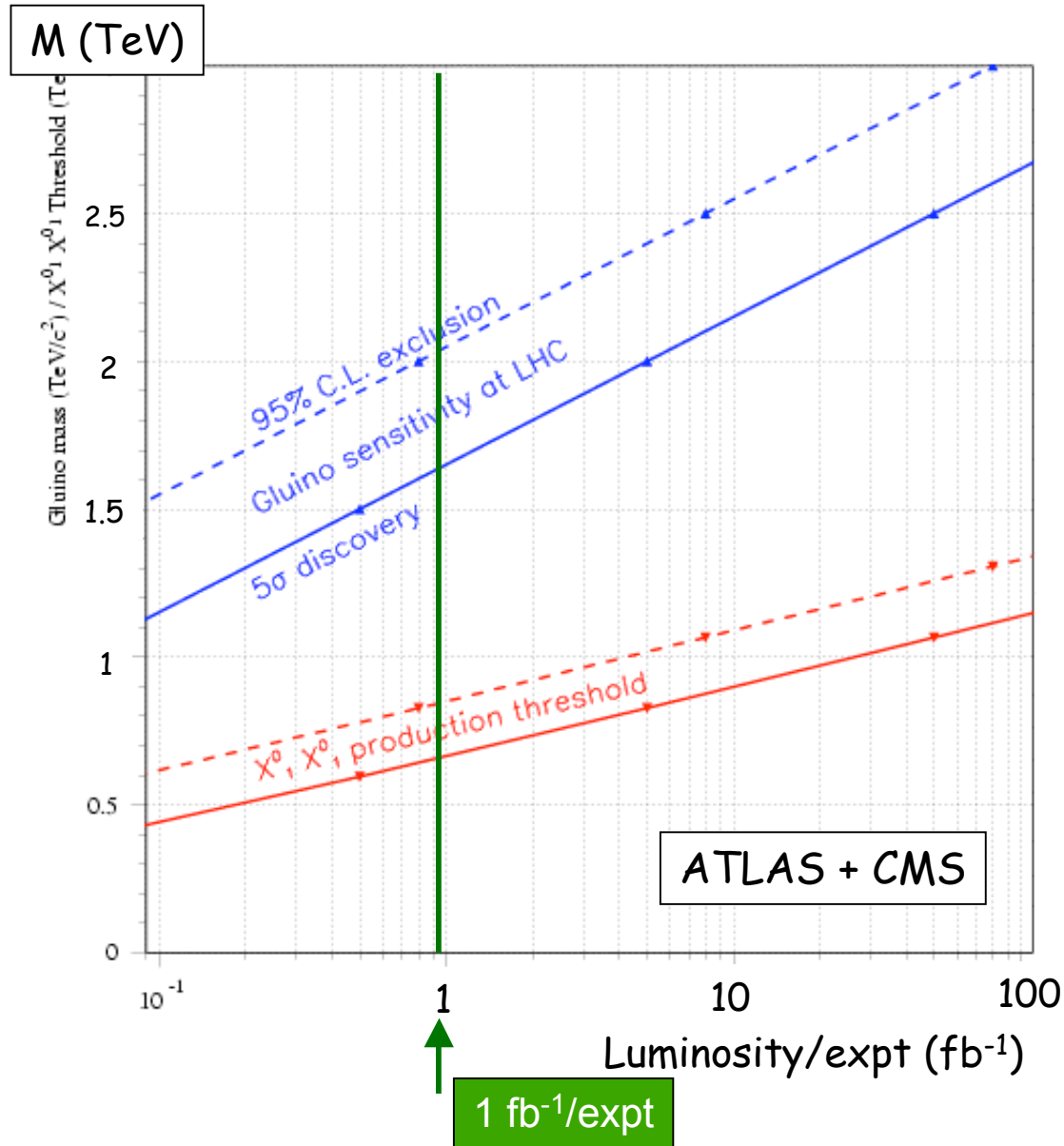


Without SUSY signal

With 1TeV SUSY signal

Background could be estimated with real data itself with accuracy of about 50%

Let's combine ATLAS & CMS



With L=1fb⁻¹

\tilde{q}, \tilde{g} Up to 1.6TeV

(2TeV for 95%CL exclusion)

These do not strongly depend on model:

Important parameters are masses of \tilde{q}, \tilde{g} and the mass difference between them and LSP(>= 400GeV)

$$\tilde{g} \sim 1.6\text{TeV}$$

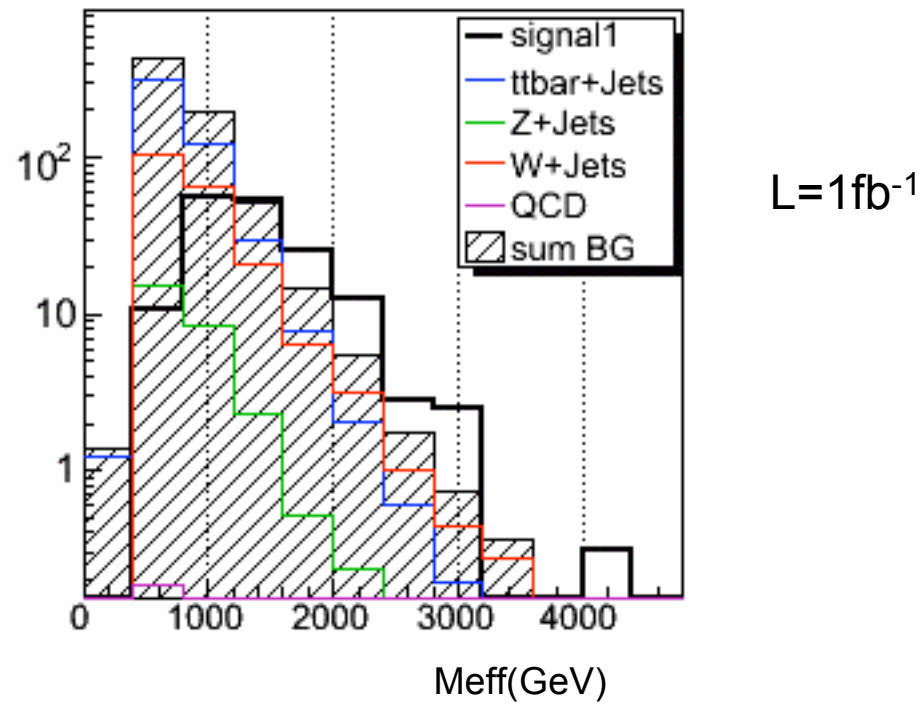
$$\tilde{\chi}_1^\pm \approx 500\text{GeV}$$

$$\tilde{\chi}_1^0 \approx 250\text{GeV}$$

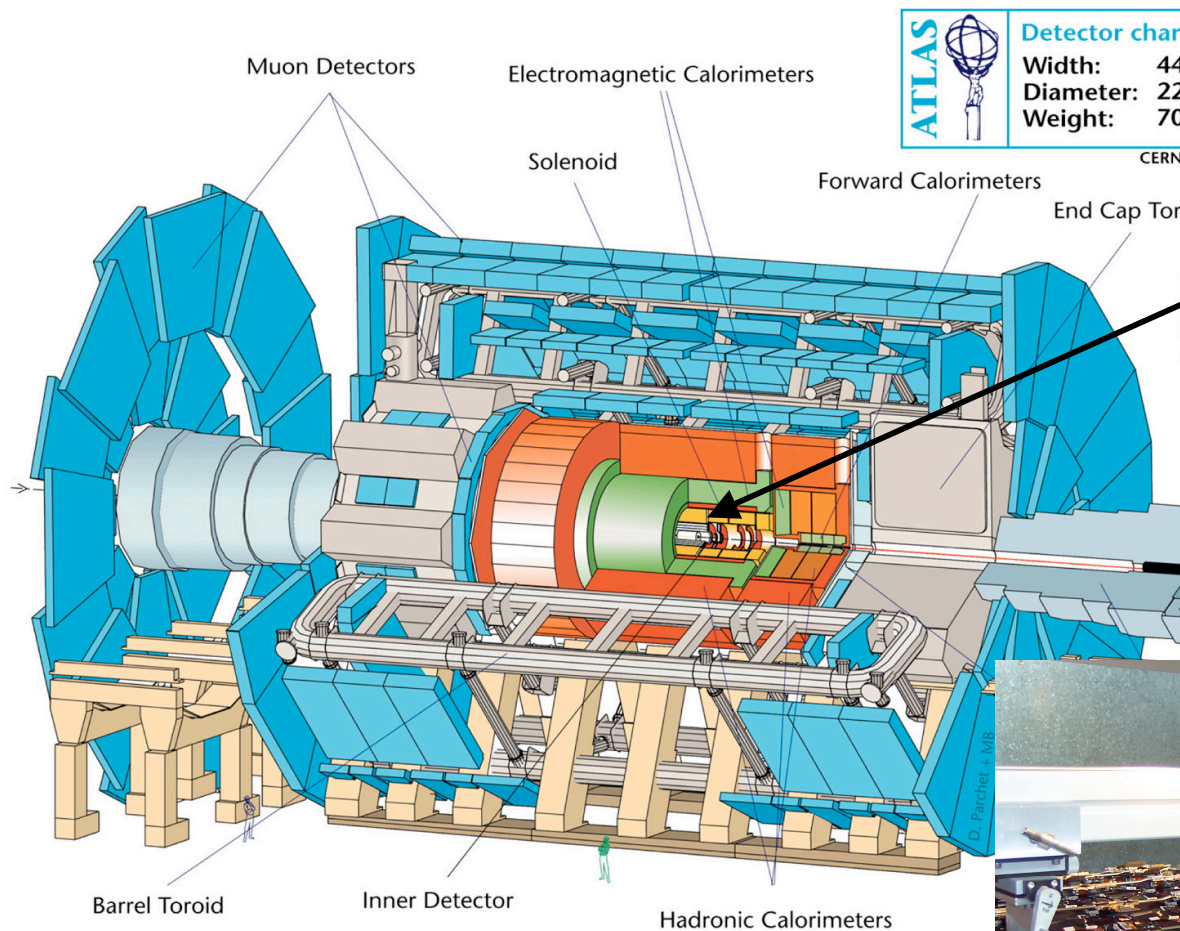
Naïve GUT assumption
Gaugino-like


One Tau BG process: Top & W contribute:

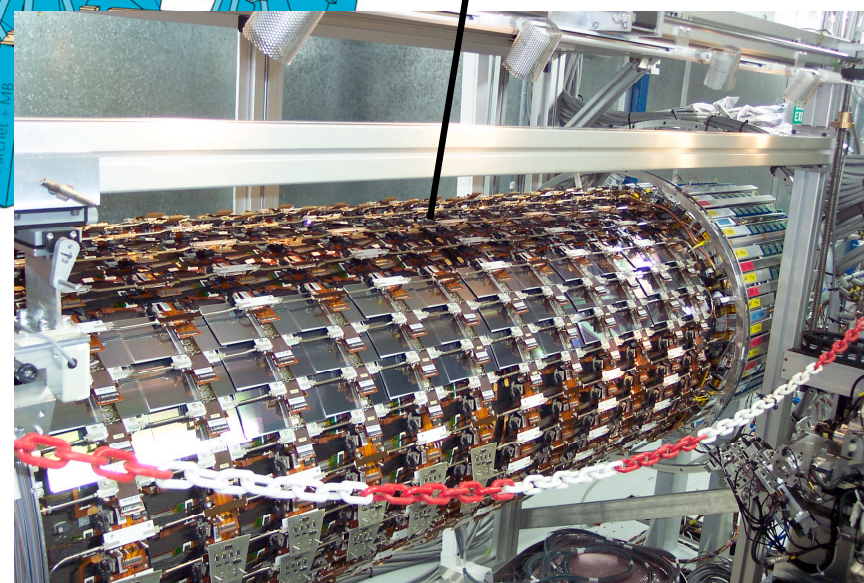
One Tau



Tracking System



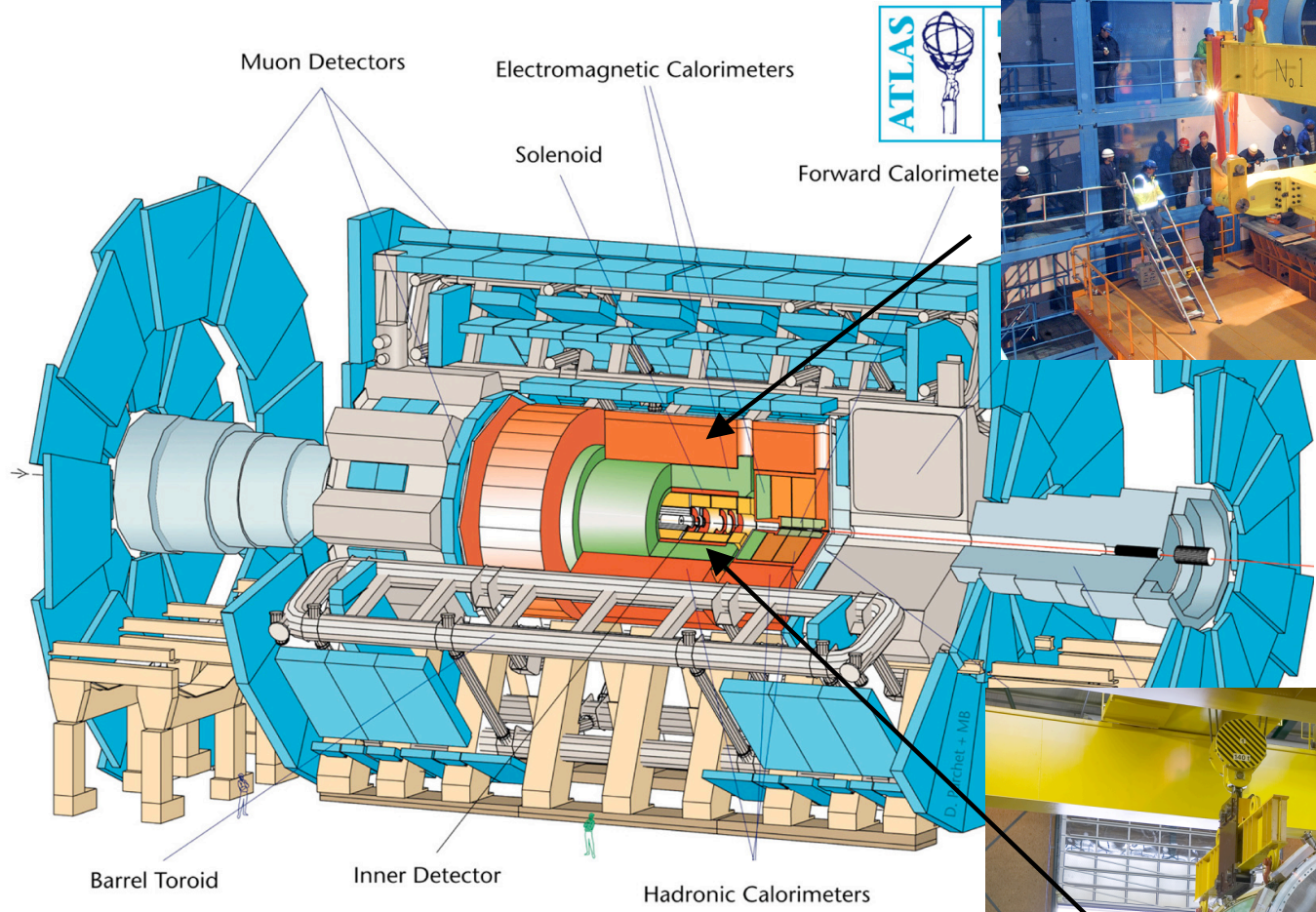
	Detector char
	Width: 44
	Diameter: 22
	Weight: 70
	CERN



Tracking ($|\eta| < 2.5$) is composed with

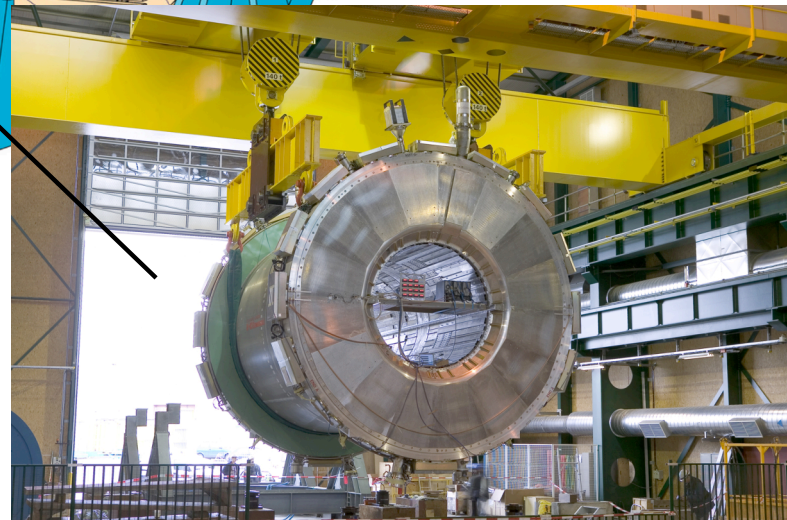
- Si pixels and strips semiconductor
- Transition Radiation Tracker Detector (e-ID)
- 2T solenoid magnet

Calorimeters



Tile Hadron Calorimeter

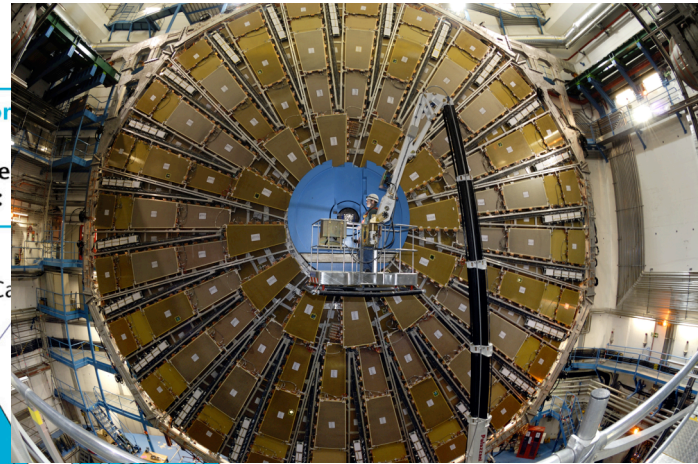
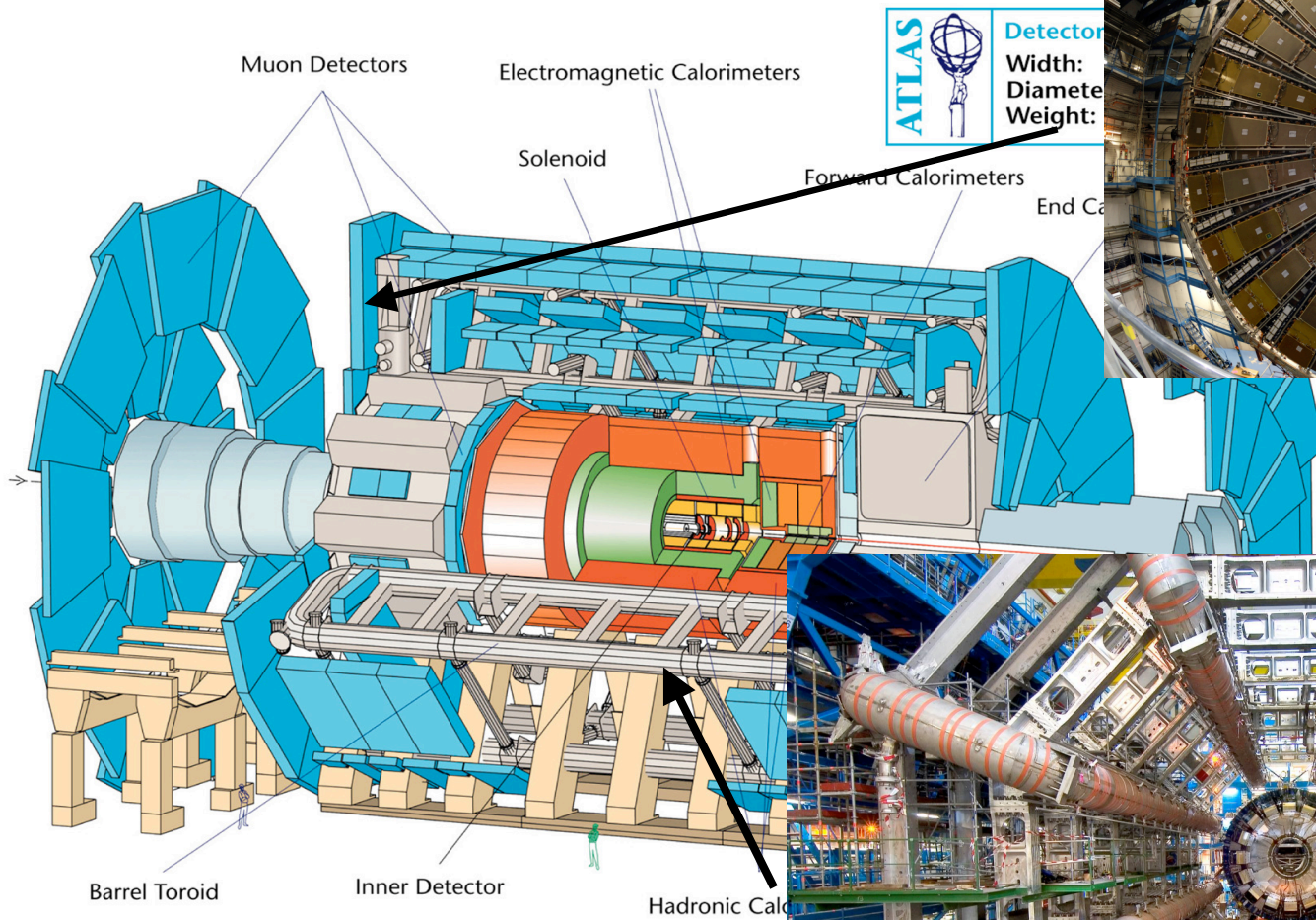
EM+Magnet



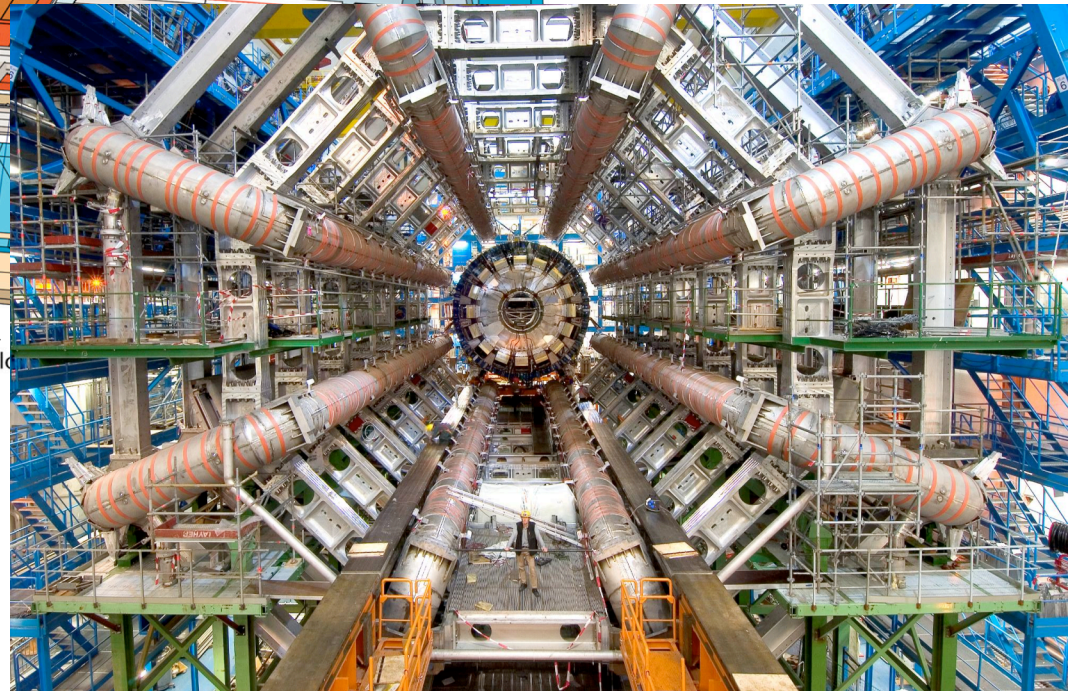
Calorimeter covers to ($|\eta| < 5 \sim 1 \text{ degree}$):

- EM is Pb absorber L. Ar with accordion shape electrode.
- HAD is Fe/scintillator (central),
- Cu/W-LAr (fwd)

Muon system



Endcap muon
Toroidal Magnet



- Muon Spectrometer ($|\eta| < 2.7$) :
air-core toroidal with muon chambers
 (small E loss, benefit in forward region)