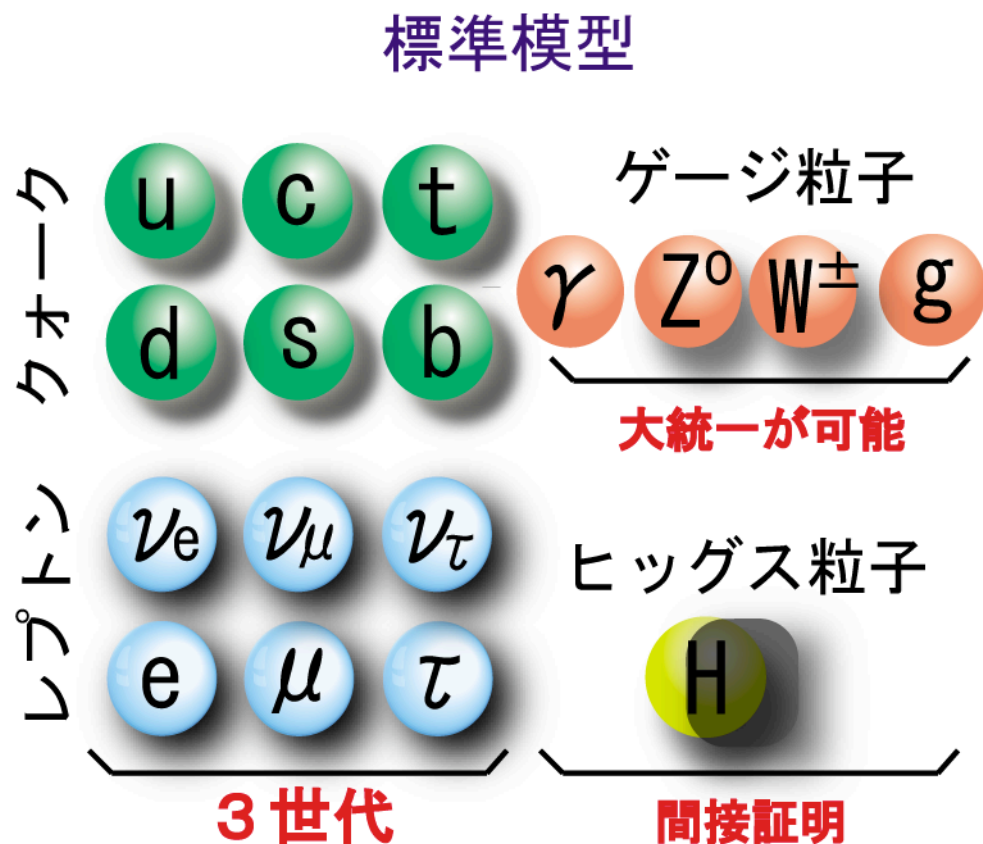


LHCが切り拓く21世紀の 素粒子物理学

1. 世紀末の状況
2. LHC計画・ATLAS検出器とは
3. Data量とトリガー
4. Higgs粒子
5. 超対称性粒子
6. 余次元とブラックホール
7. トップとB
8. 纏め

1. 20世紀末の状況

標準模型 (量子電弱理論 + 量子色力学) の著しい成功



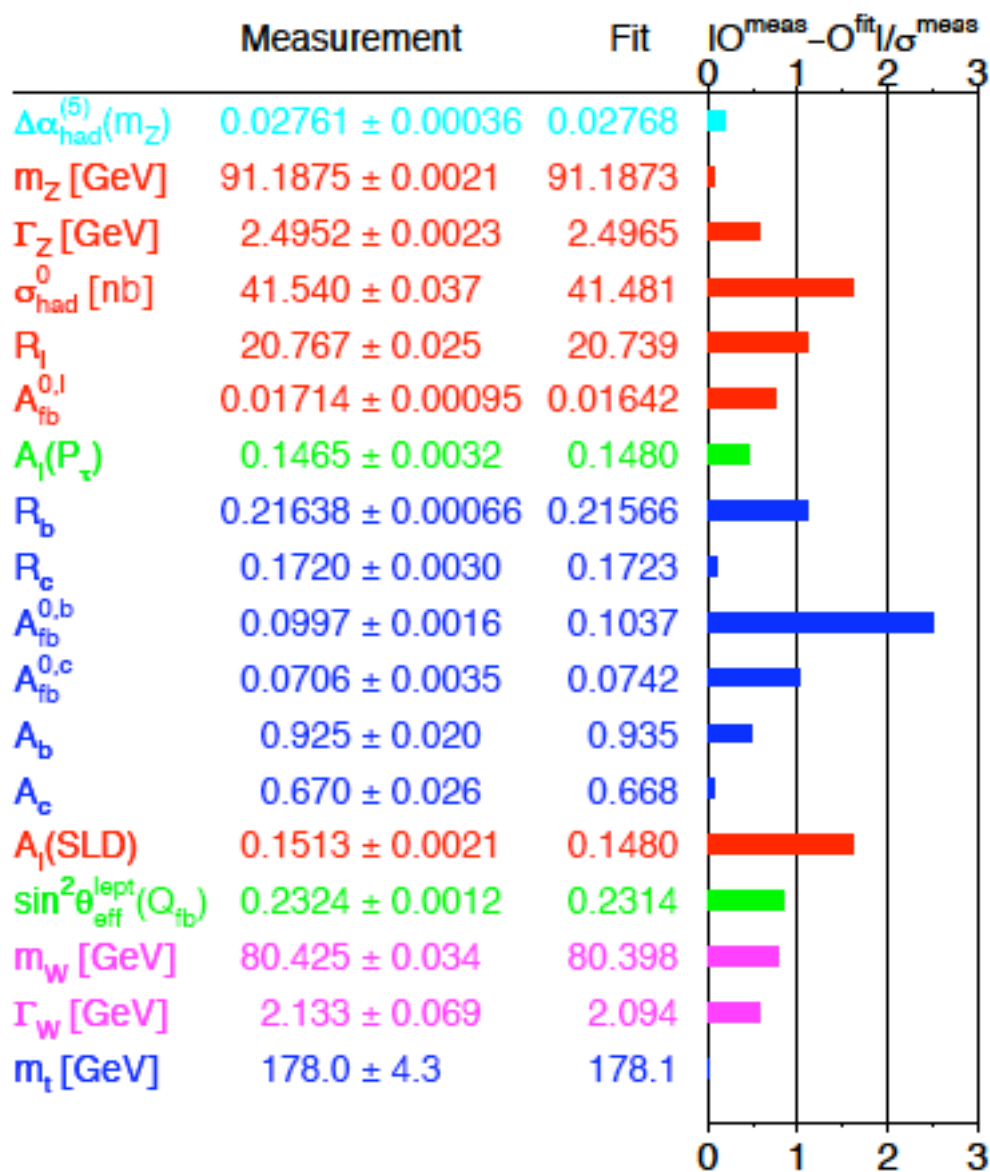
1. Lepton/Quarkが対をなして、3世代ある。(世代の謎?)

2. 力を伝搬するのは $\gamma, Z^0/W^{\pm}$ 、グルオン
3つの力
(重力をのぞいて3つ)
これらは、ゲージ原理に支配されている。

3. 質量の起源は? (Higgs?)

ニュートリノの質量の起源は別物(?)

Winter 2004



1989–2000年
LEP, SLD, Tatatron実験で
大量のZ/W. (top)を
生成して精密の検証を行う。

色々な物理量をO(0.1%)の高い
精度で測定。一次の輻射補正を
検証した。
(フロンティア実験での革命)

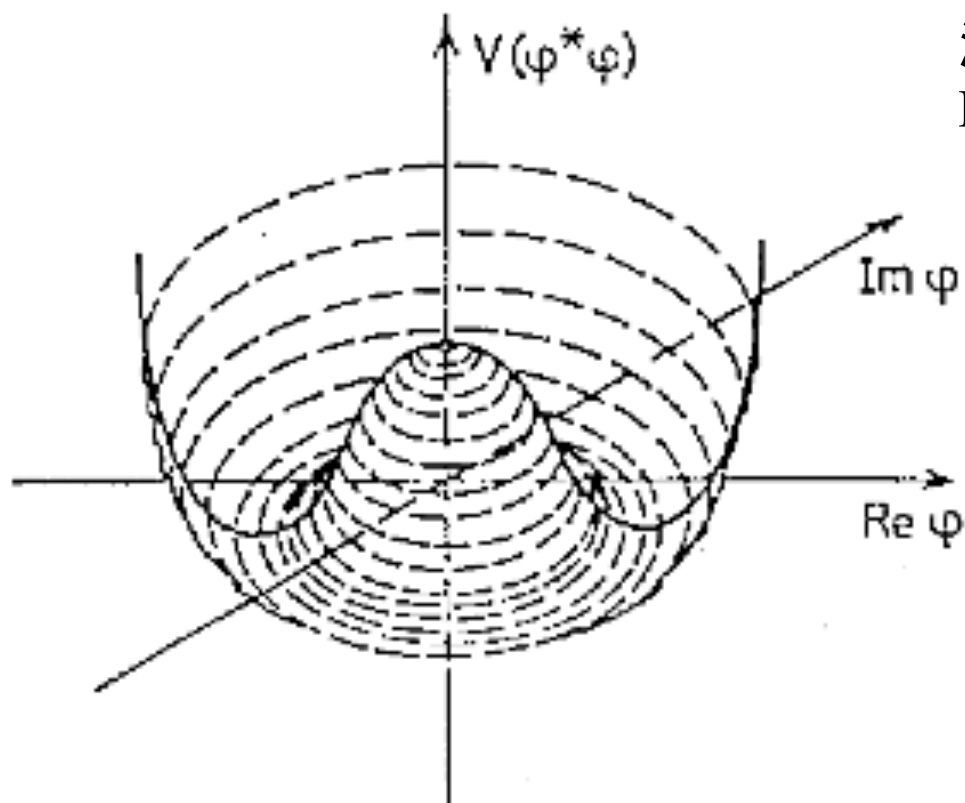
理論の予言する値と高い精度で
一致。(bのasymmetry)
(左図は、ズレを示す)

----->

非常に高い精度で**合格**

では、何故 “**TeV領域**”の加速器が必要か？

(作戦目的1) **ヒッグス粒子**の直接証拠を得て、
その性質を調べる。



接線方向自由度は、NGBは、Gauge場の縦波
垂直方向は、ヒッグスの質量：形が質量

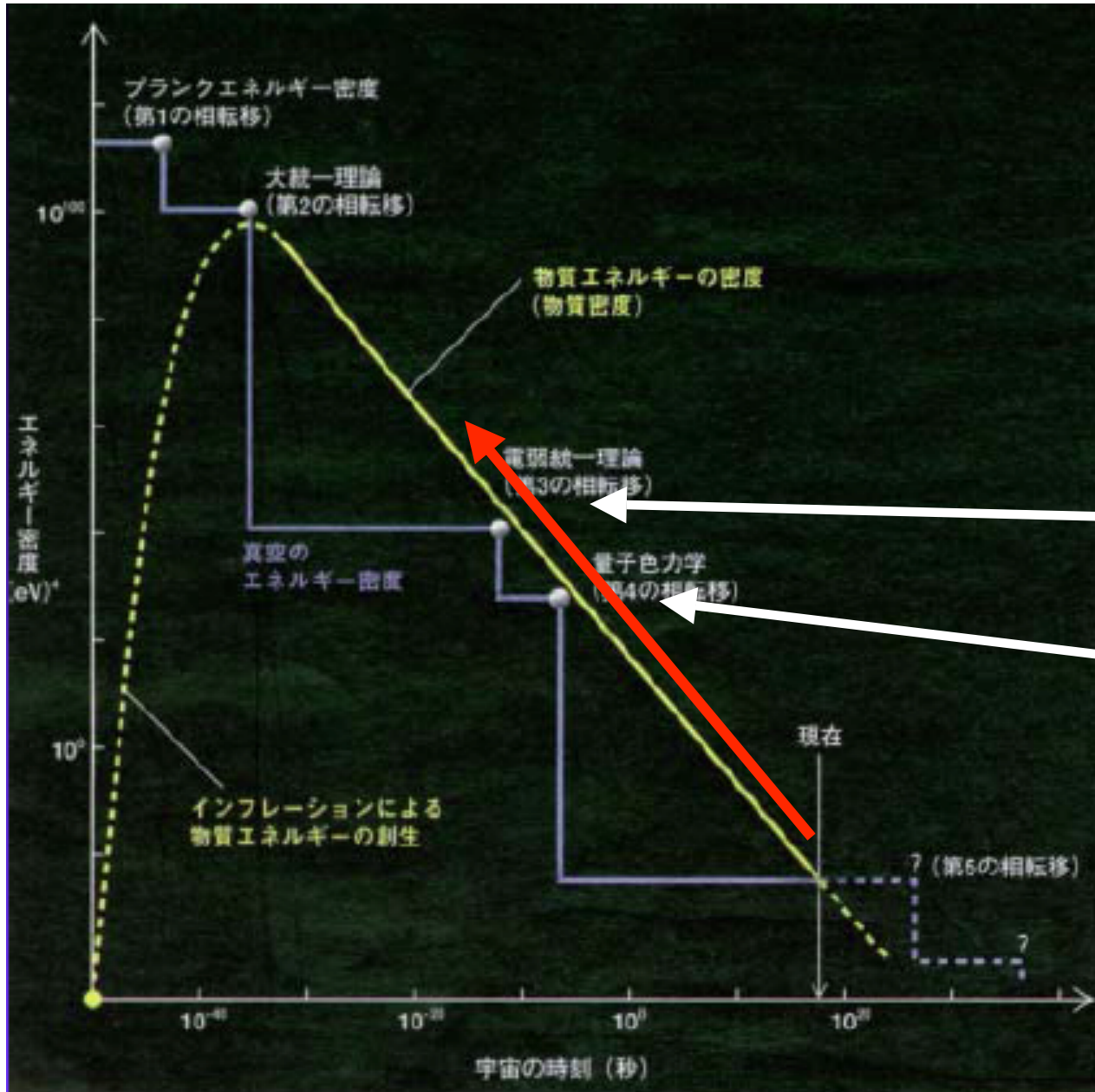
真空はただの空の入れ物でなく、
EW double Higgs場が
満たされている
Higgsのポテンシャルが鍵

自然は元来高い対称性を持っていた。これが、冷えて、対称性を破った基底状態の方がエネルギー的にお得な場合、**自発的に**ここに落ち着き、結果、**対称性が壊れた様**に見える。

——> 自発的対称性の破れ

「**質量の起源**」の解明

——> LHCの主目的 (1)



宇宙の進化→
対称性が破れ、
多彩な構造が
出来てきた

SU5 or SO10 or ?
GUT

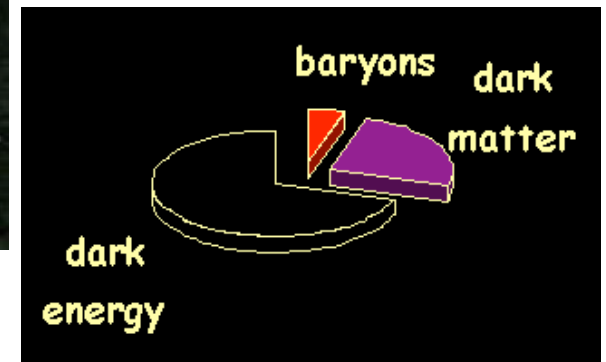
$SU2 * U1 \rightarrow U1_{em}$
Higgs?

カイラル対称性
NBとして、 π 中間子

Dark Energy 70%!?

量子重力?

佐藤勝さんより



(LHC 作戦目的2) **標準理論を超えた**新しい素粒子現象の発見

標準理論は、高いエネルギーですぐに破綻する。補正が大きくなりすぎる。

量子補正 $\sim \Lambda_{\text{cutoff}}$ TeV領域に新しい物理があることが示唆されている。

2-1 超対称性

Fermion/Bosonを交換する対称性

(A) 符号が逆でキャンセル



(B) GUTの可能性(次の頁)

(C) EWの精密測定もTeV SUSY

(D) 暗黒物質(DM)の良い候補

(E) 時空の構造に密接に結び

ついた対称性

量子論と重力を結ぶ上で

重要な役割 19世紀の二つ

の柱を統合

2-2 Large 余次元

高いエネルギースケールは
幻影。LEPでみた
EWだけが本当のエネルギー
スケールで、重力は余計な
次元の効果で小さく見ている
だけ。

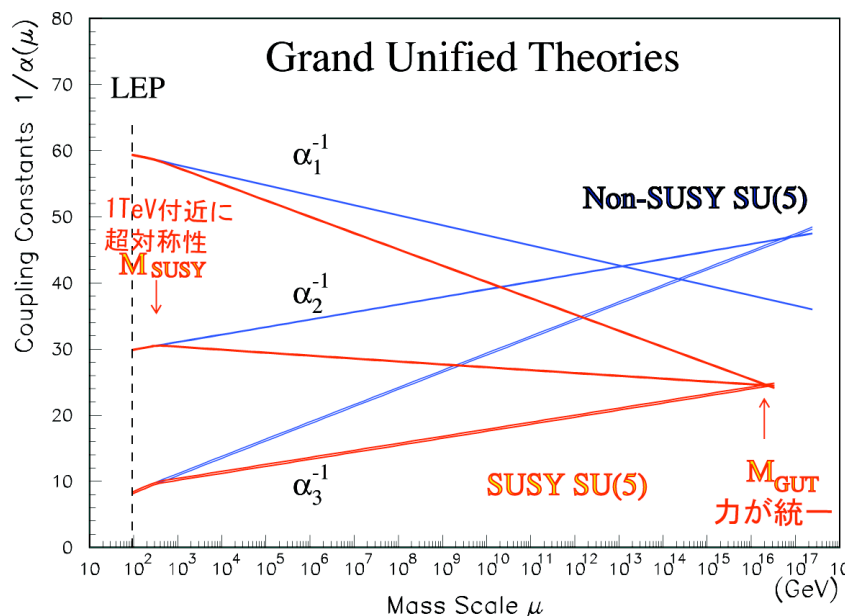
$d=4+N$ ($d=6-11?$)

余った次元は、丸まっている。
このスケールまで行くと、重
力も大きな力。

string起源のメンブレーション

超対称性の御利益

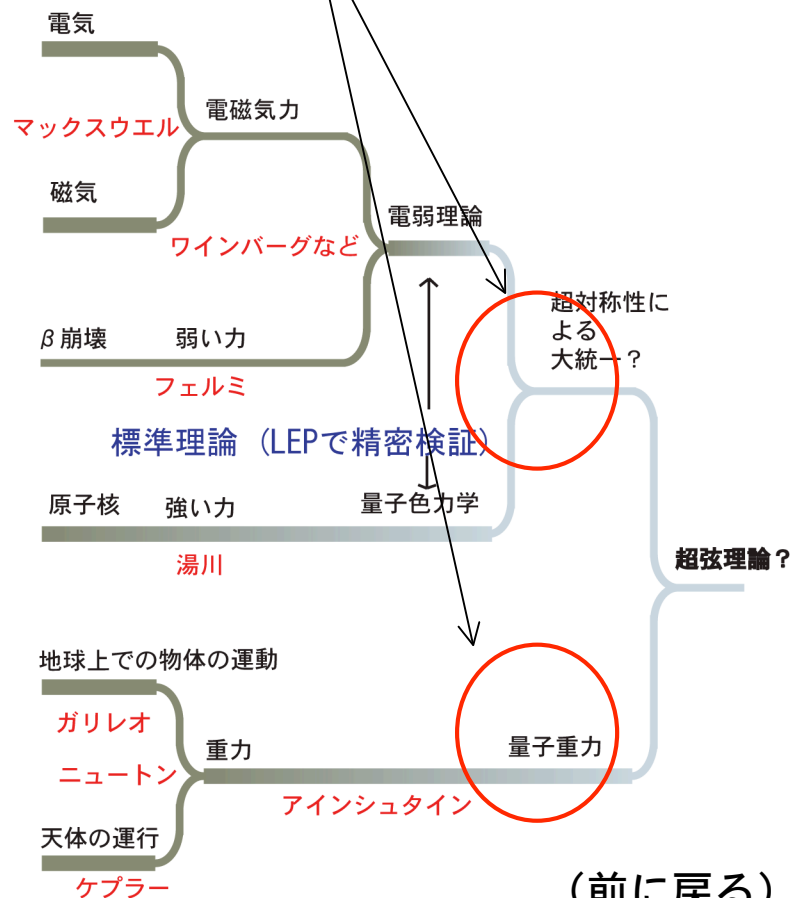
(A)



3つの力（電磁気力、弱い力、強い力）の強さを精密に測定。（@LEP）
 登場人物を入れると、その力が高いエネルギーで、どう振る舞うか予想出来る。（繰り込み群方程式）
 超対称性粒子が 1TeV 付近にあると、3つの力は 10^{16}GeV で一つの力になる可能性が示された。
 ——> **力の大統一！！**



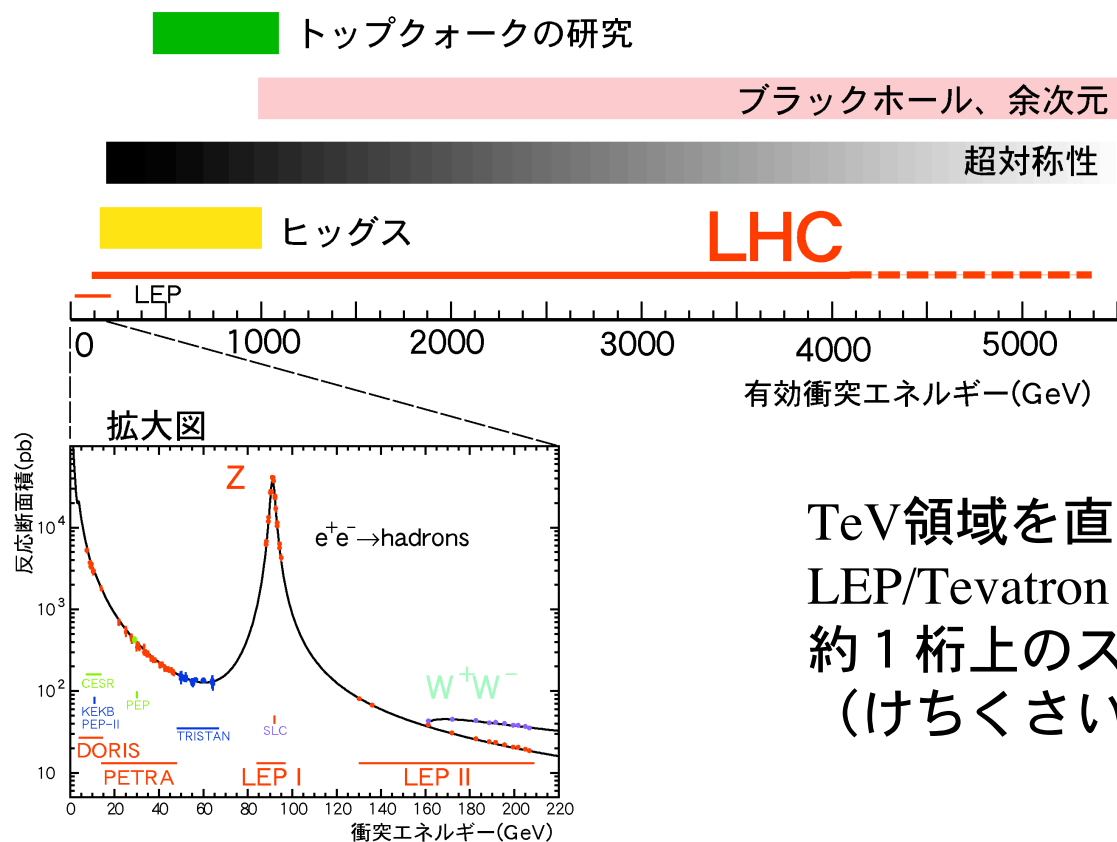
超対称性は、 で重要な働きをする。



(前に戻る)

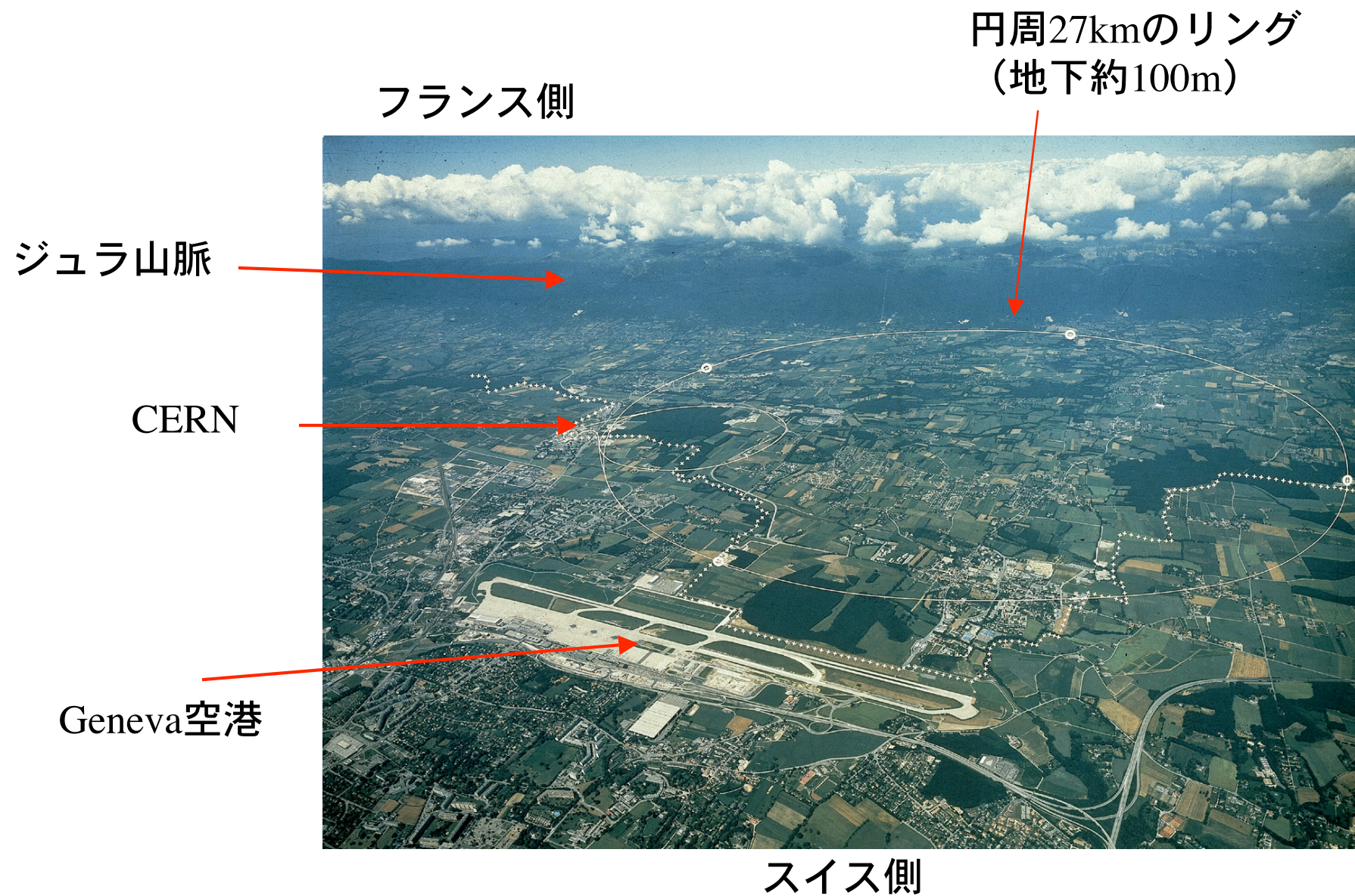
古今東西の例を紐解くと、かけ声と現実の乖離甚だしく、懐疑的にならざるをえない。

「ヒッグス見つけて、さらにBeyond Standardを発見できる」？
？本当に出せるの？(羊頭狗肉ではないか？)



TeV領域を直接探索出来る初めての実験
LEP/Tevatron に比べて
約1桁上のスケールを見る
(けちくさいスケールアップでない)

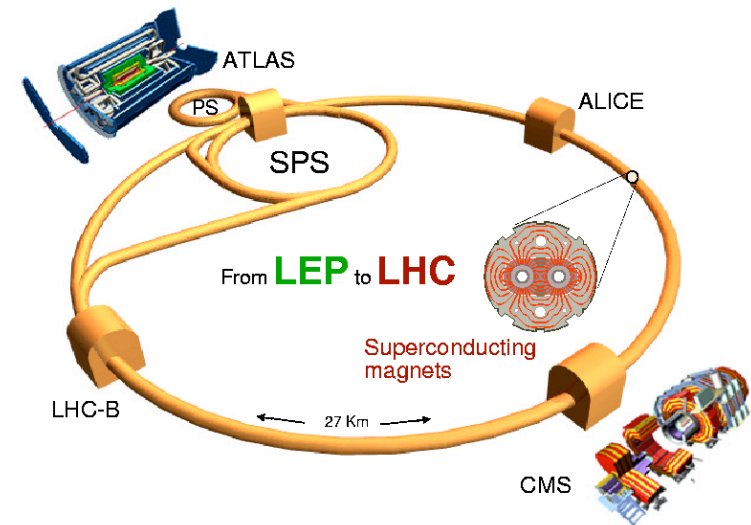
2. LHC計画・ATLAS検出器とその現状



LHC(Large Hadron Collider) 計画

1. 8.3Tの強力な超伝導dipole マグネット
2. 27kmのリング(LEPトンネルの再利用)
3. Proton同士を重心系**14TeV**で衝突
4. Design Luminosityは、 **$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$**
(**100fb⁻¹/年**) (国策B程度)
5. **ATLAS**とCMSの二つの汎用実験
LHCb (Bの物理) とALICE (QGP)

The Large Hadron Collider (LHC)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e ⁺ e ⁻	200 GeV	10 ³² cm ⁻² s ⁻¹
LHC	p p	14 TeV	10 ³⁴
	Pb Pb	1312 TeV	10 ²⁷

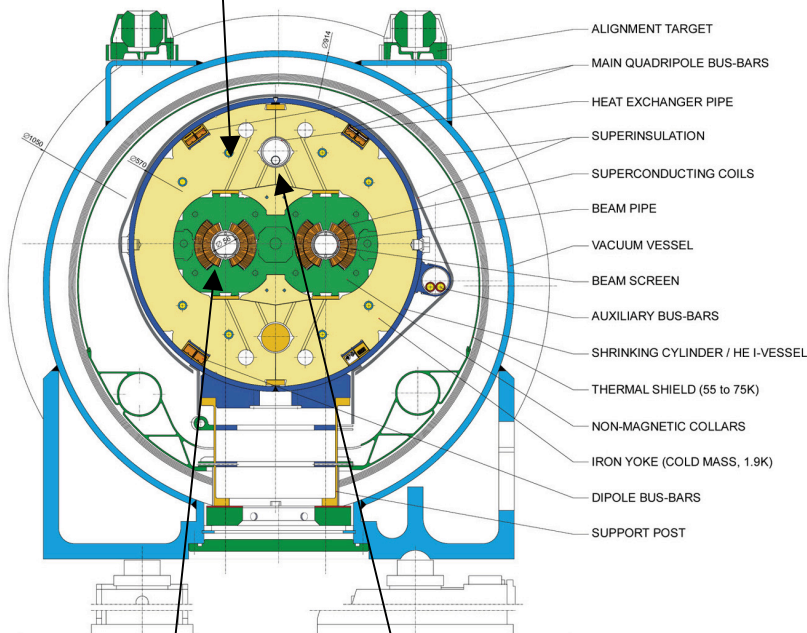
LHC加速器建設状況

1.9K cold mass (75% ready)

1232本のマグネットの75% Ready

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN.AC/DI/MM - HE107 - 30.04.1999



ヒートシンク

10%強は既にトンネルに溶接、
据え付けられた。
(あと1年で準備完了予定)

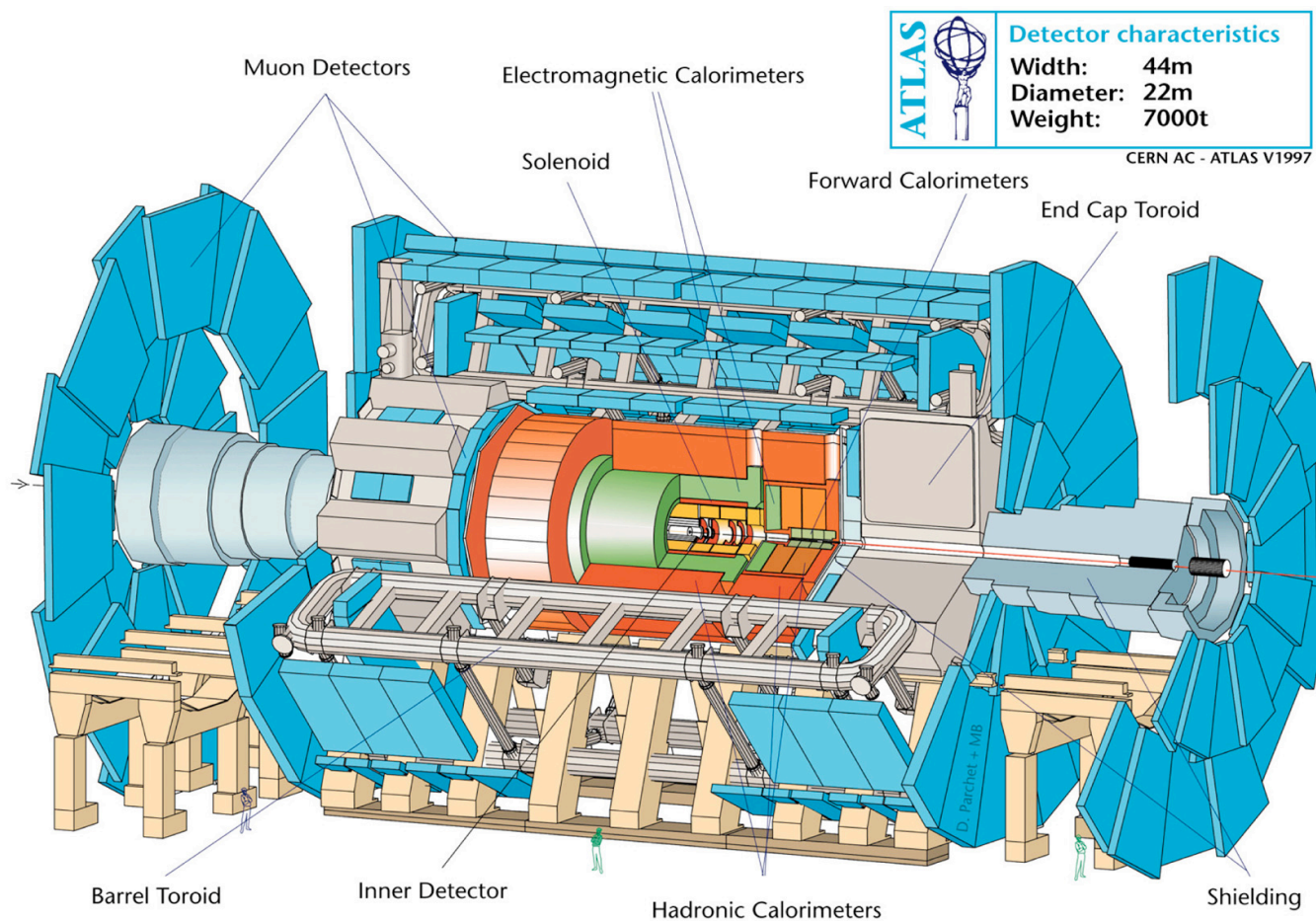


NbTi 超伝導1.9K(He温度)まで冷やして、 $B=8.3\text{T}$ (7TeV) (injection 0.5T at 450GeV)

コイルー>磁場を上下方向に発生させている。

ATLAS検出器

1700人の国際共同実験

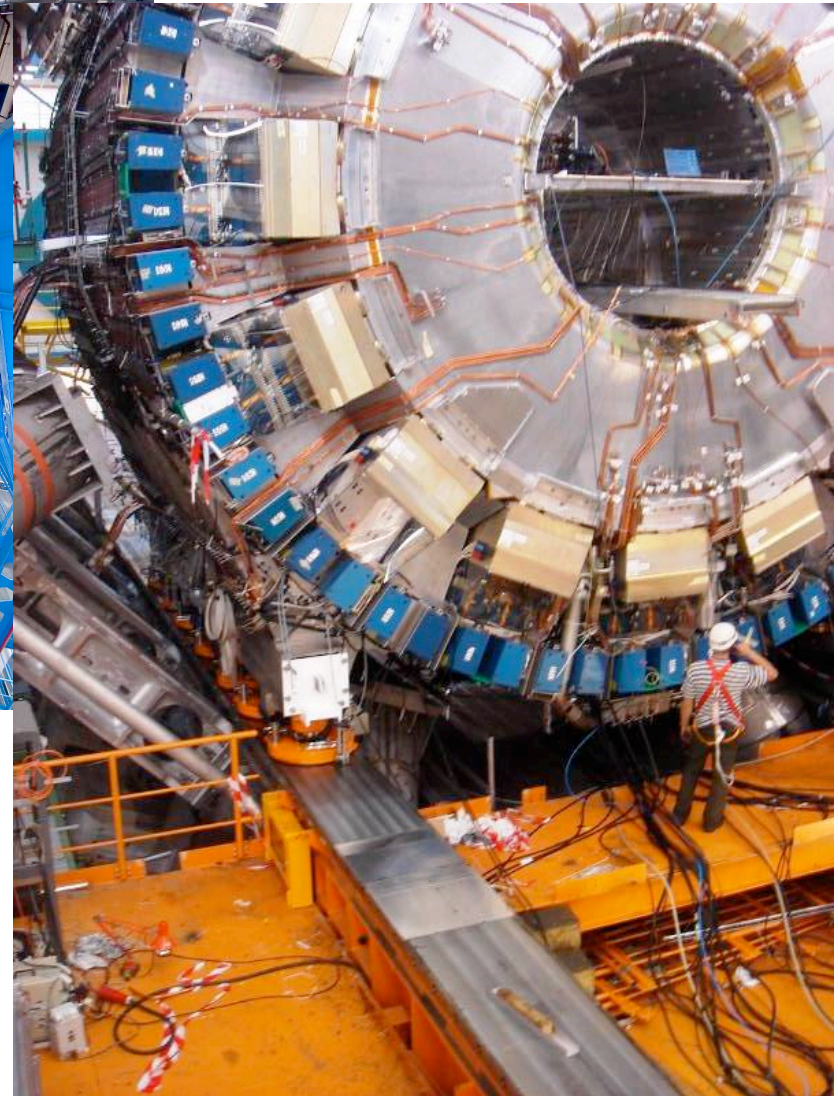


E,P分解能
($P \sim 100\text{GeV}$)

$\mu \sim 2\%$
 $e, \gamma \sim 1.5\%$
Jets $\sim 8\%$

1. Si, TRT、2TのソレノイドによるTracking system
 2. Li.Ar を中心としたカロリメーター
 3. 空芯トロイド ミューオン検出器
- > 詳しくは2限目の資料をご覧ください

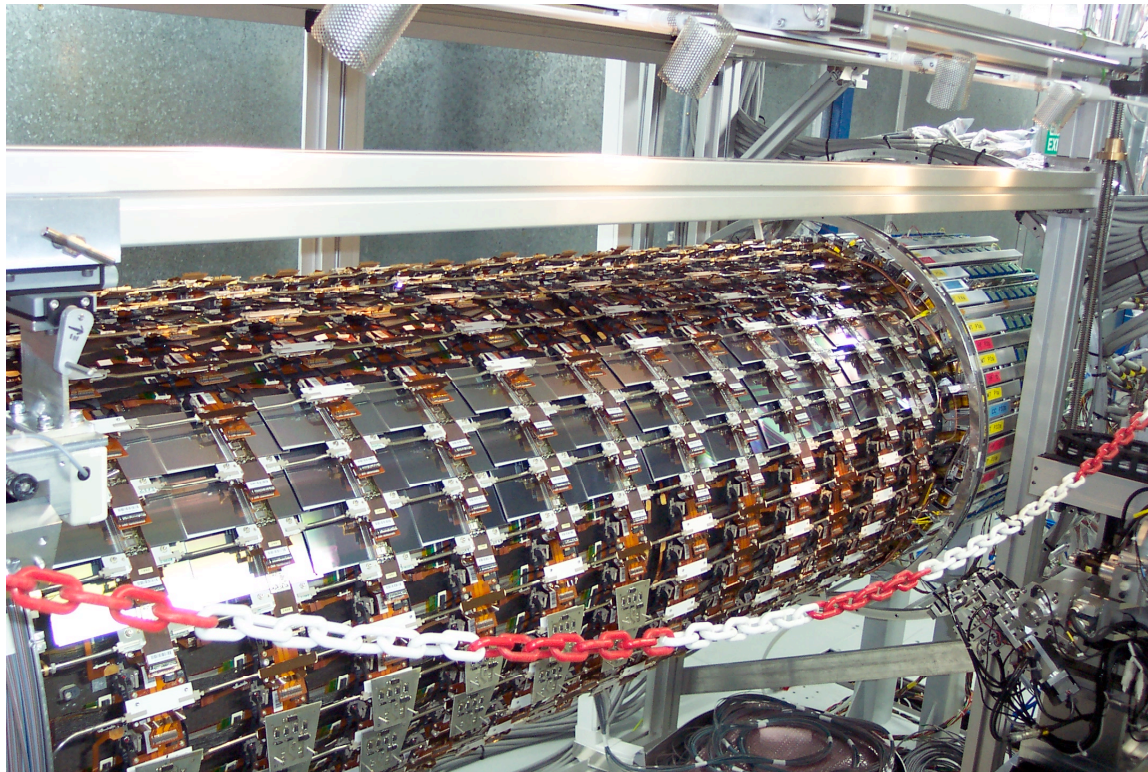
- 厳しい放射線環境
 - 高速 25nsec (40MHz)
 - 1億6千万チャンネルの読み出し
 - 320Mbyte/secのデータ (1TB/hour)
- 桁違い



トロイド磁石 8 個据え付け OK

ハドロン+EM+ソレノイド
が中に収まっている。
2007年春に完成に向けて
急ピッチで組みあがっている

あの穴に、飛跡検出器
TRTとシリコン (SCT 4 * 2 + ピクセル 3層)
をいれて、外側にMuonを貼りつけて “完成” (2007年春)
組上がっている SCT (4層目は日本担当)



ATLAS検出器の日本担当分

LHC加速器:四重極磁石
の開発、生産

	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

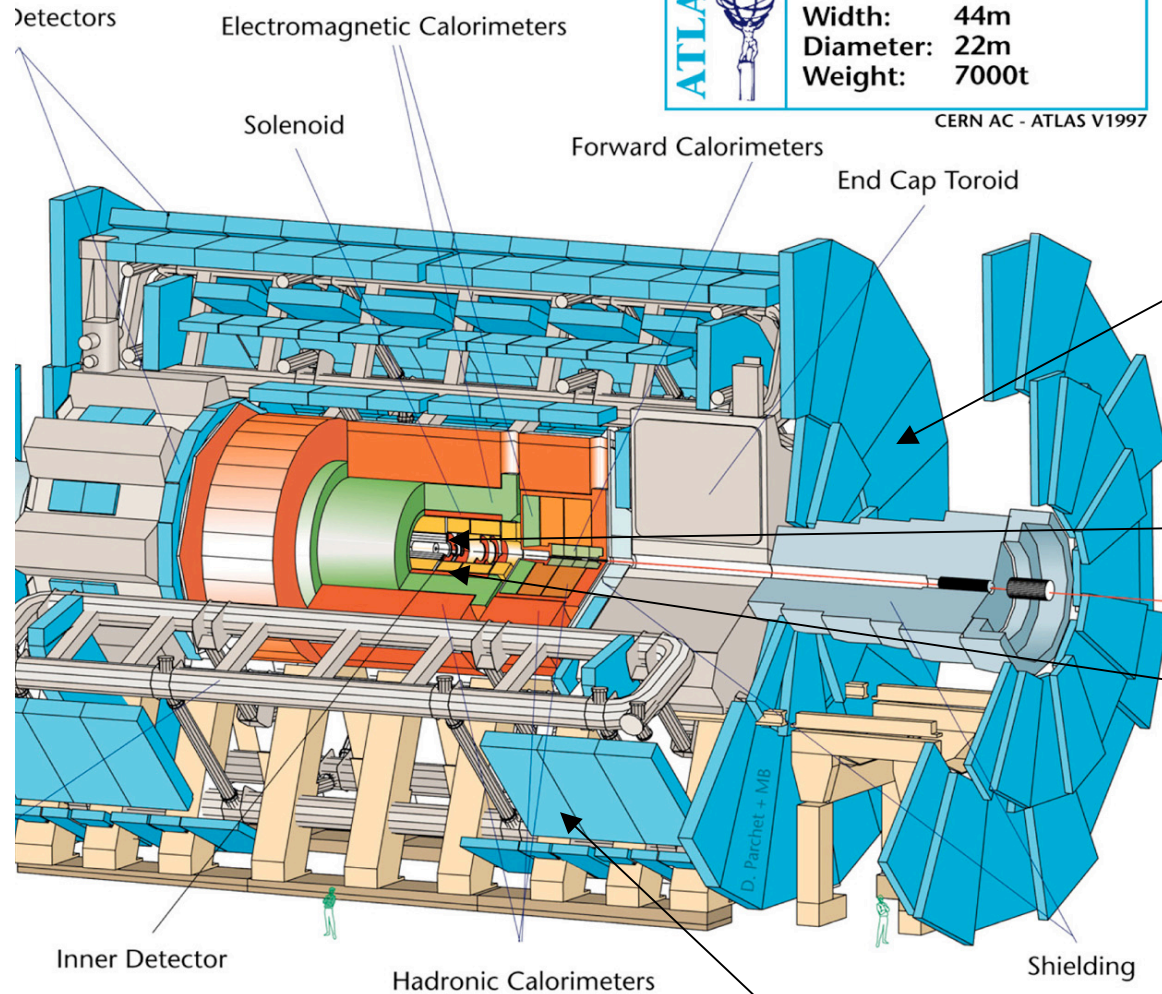
Endcap μ trigger
とその L1 Trigger エレキ

Si strip検出器
4層目

2Tソレノイド磁石

ソフトウェア
G4シミュレーション

Drift Tube のエレクトロニクス:TDCのチップ



Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

Forward Calorimeters

End Cap Toroid

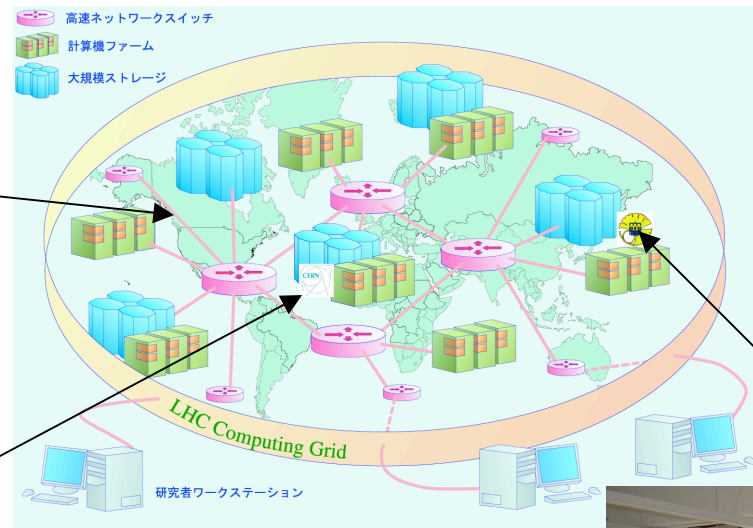
Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Detectors

1TB/hour → 年間 **3PB**のデータがつぎつき生成される。
これを解析するには
12PB程度のテープとDISKがそれぞれ
24MSI₂₀₀₀のCPUが必要
2004年最新のスペックで3万台ずつDISK,CPU

ここ、怖いくらい、
力を入れはじめている



GRIDで世界の
計算機資源を統合
して使う。

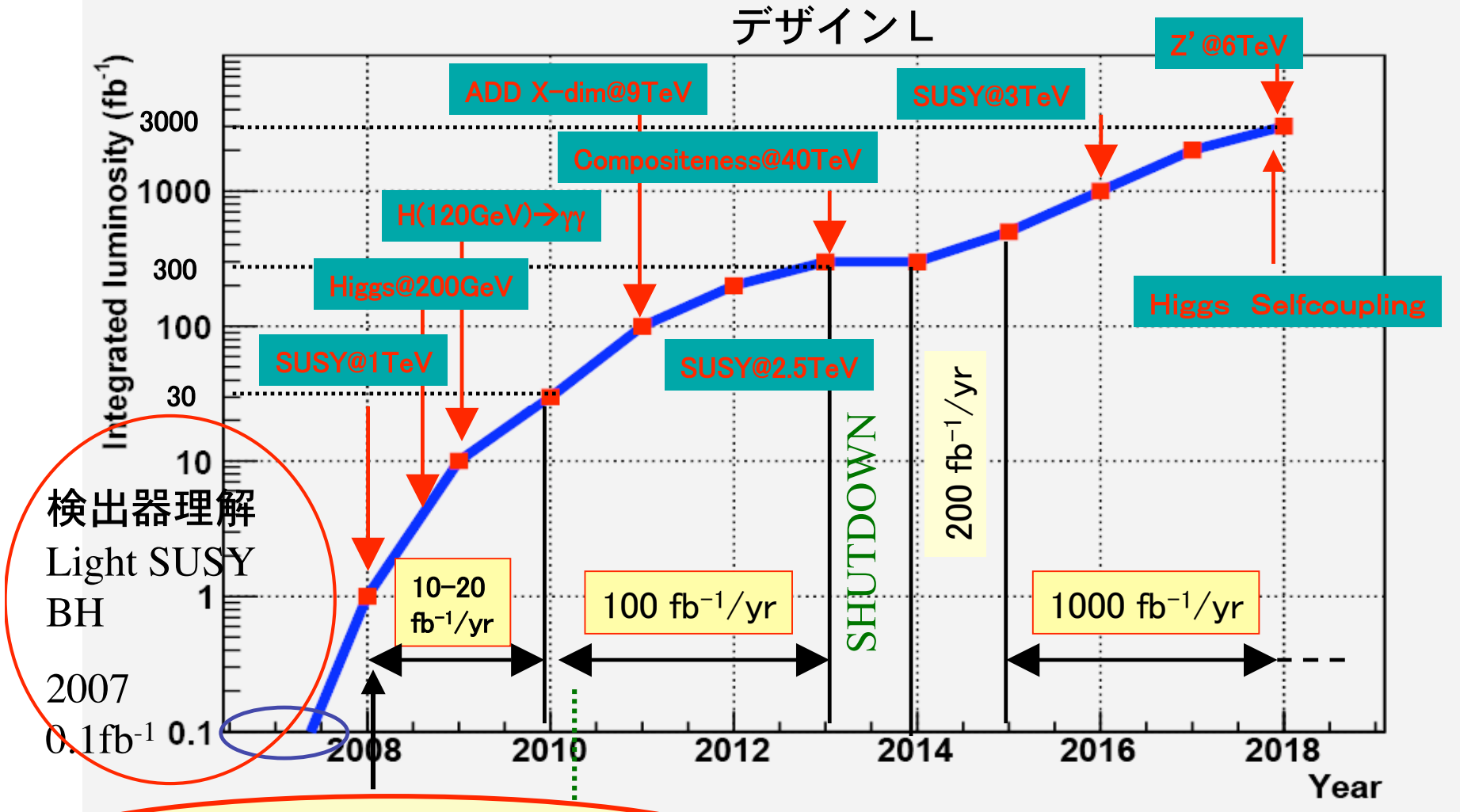
サッカー場ほど
施設は準備

(パイロットモデル)



LHC Luminosity Profile

$L = 10^{33}$ $L = 10^{34}$ SLHC: $L = 10^{35}$
 デザイン L



0.5 ~ 10 fb^{-1} by the end of 2008

2009年には確実に 10 fb^{-1} 以上
 (Higgs/SUSY OK)

データ量とトリガー

僅か $L=10\text{fb}^{-1}$ (2008)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 runII
$Z \rightarrow ee$	3Hz	10^7	10^7 Tevatron runII
tt	1.6 Hz	10^7	10^4 Tevatron runII
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。
W,Zは検出器を理解する上で重要なサンプルである。

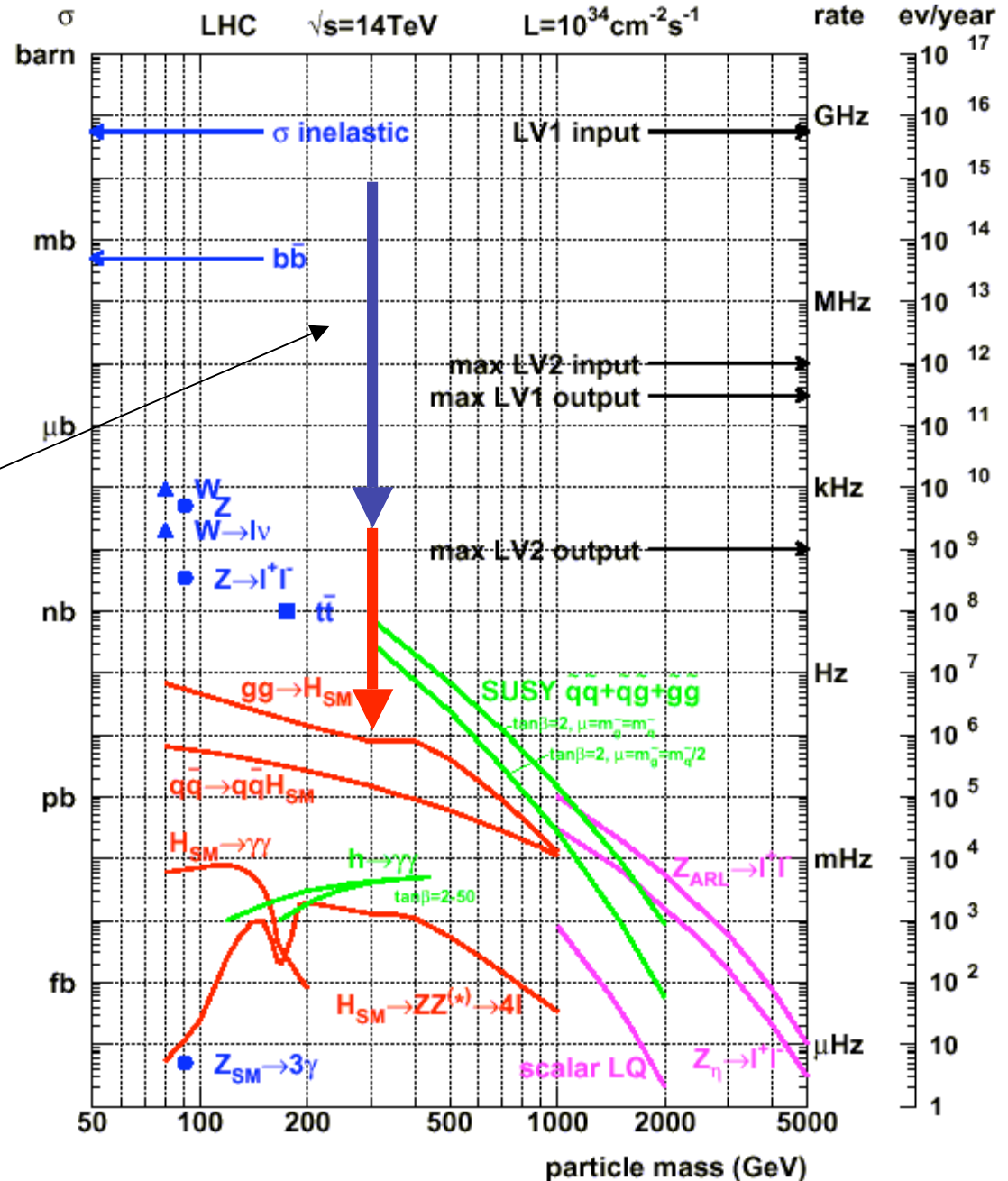
こう書くと、ちょろい
気がしますが。

ケチな非弾性散乱
(70mb)に比べて、
面白い物理は
10桁小さい

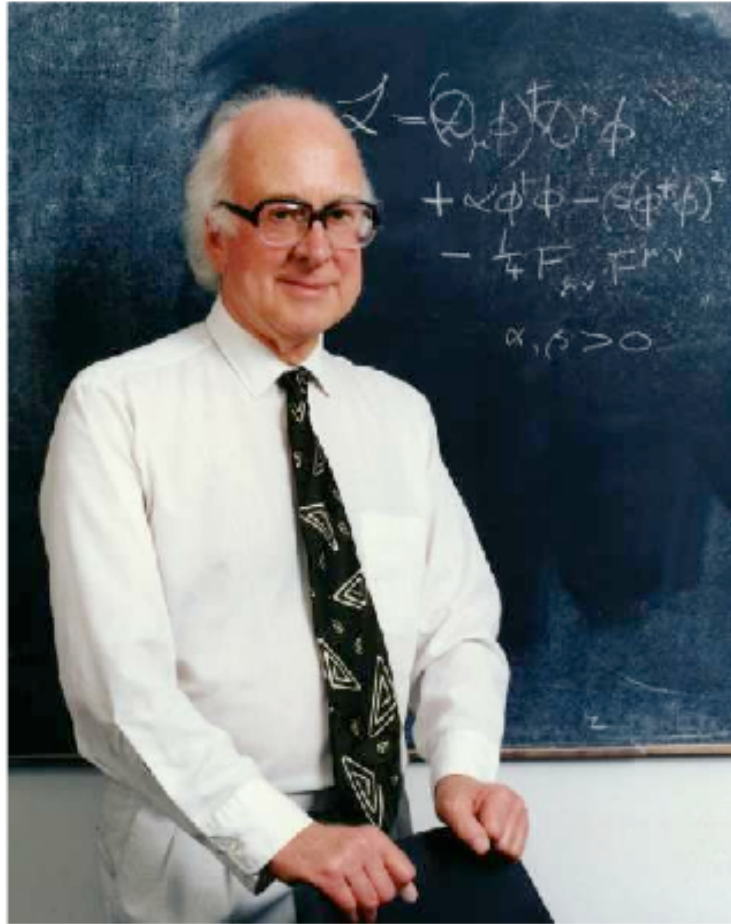
Triggerで上手に
40MHz→数百Hz
約6桁落とす。

物理解析で
約3桁落とす。

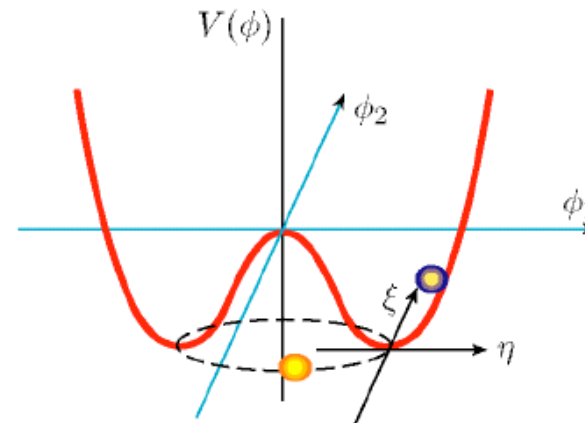
神業の様な仕事をして
Higgs/SUSYを探す。
電子・陽電子と違ってや
ることがいっぱいあっ
て、面白いです

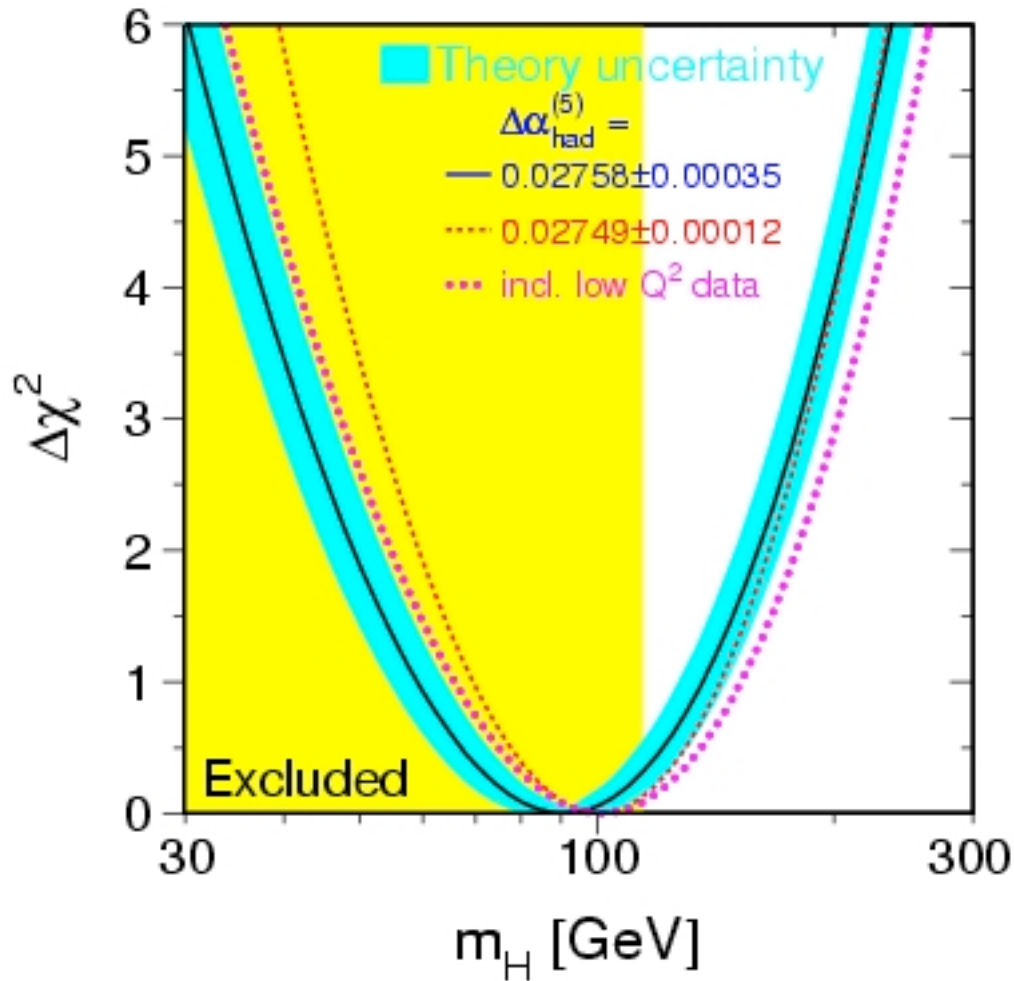


4. Higgs粒子



南部さん
“自発的対称性の破れ”





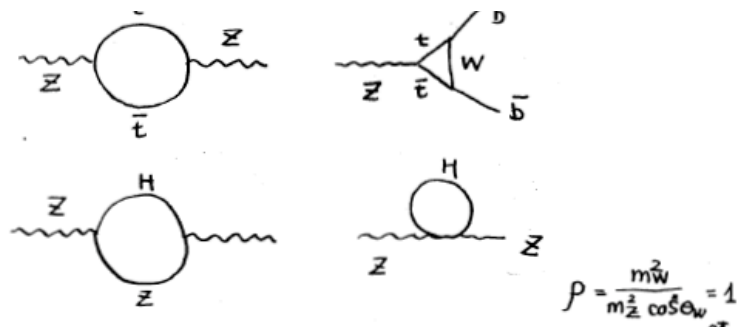
Higgs粒子は SM唯一の
未発見粒子である

LEPでの電弱相互作用の
精密測定の結果
Higgs < 200 GeVである。

またmSUSYだと
< 130-140GeV

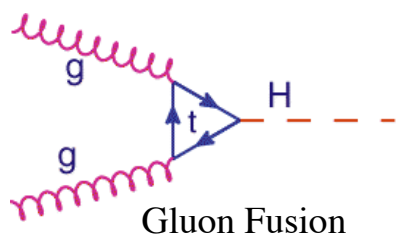
直接探索で
棄却
M_{higgs} > 114GeV

ずいぶん追い込んでいる



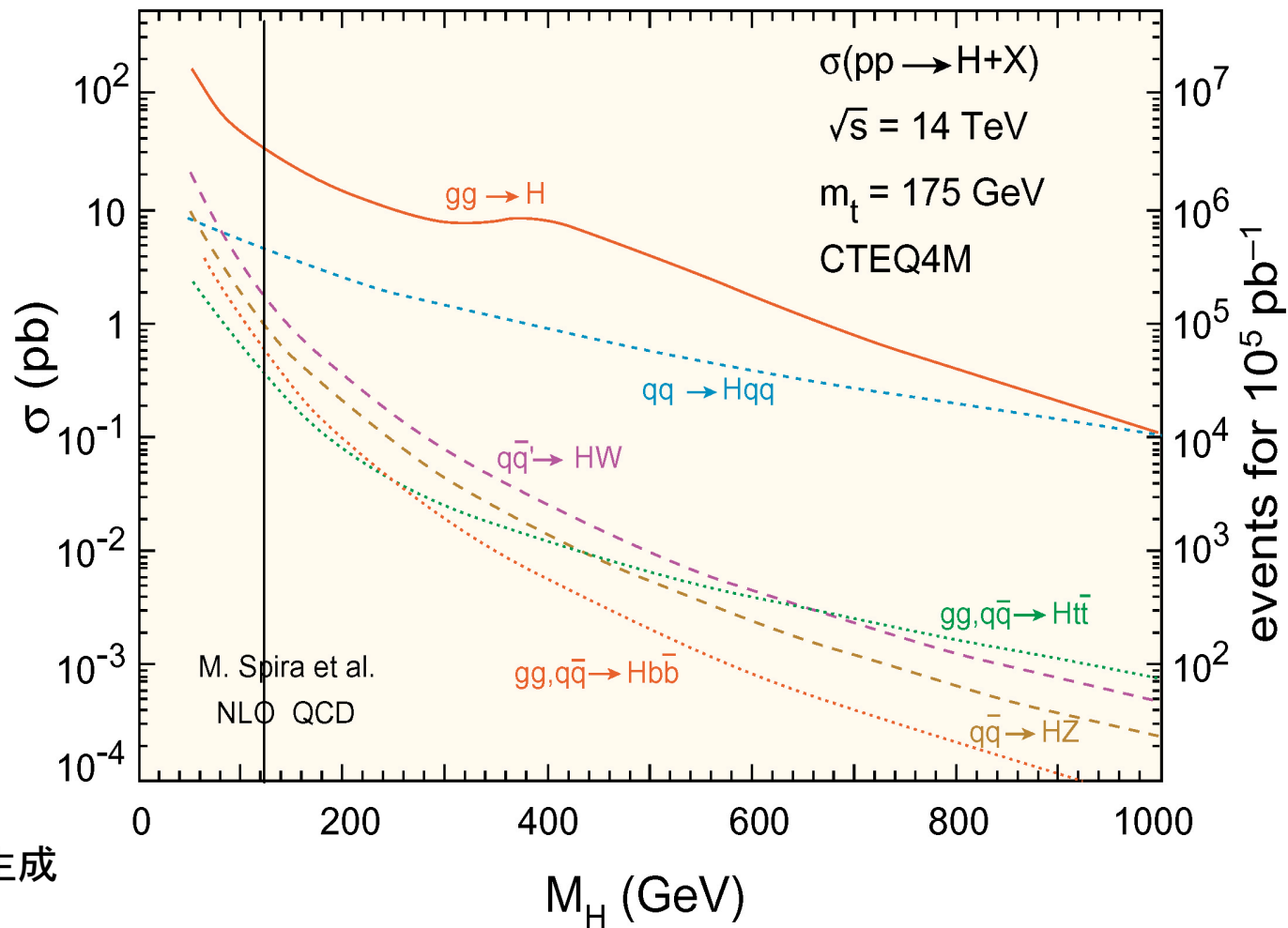
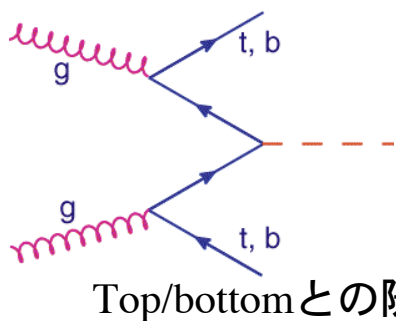
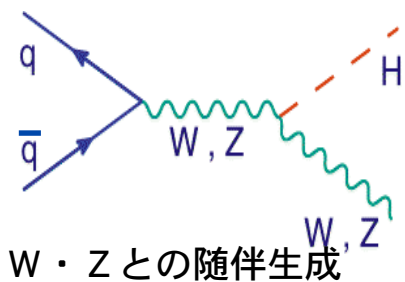
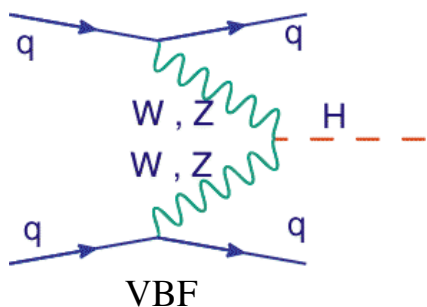
<— こういう輻射補正を見ている

LHCでのHiggs生成過程4つとその断面積



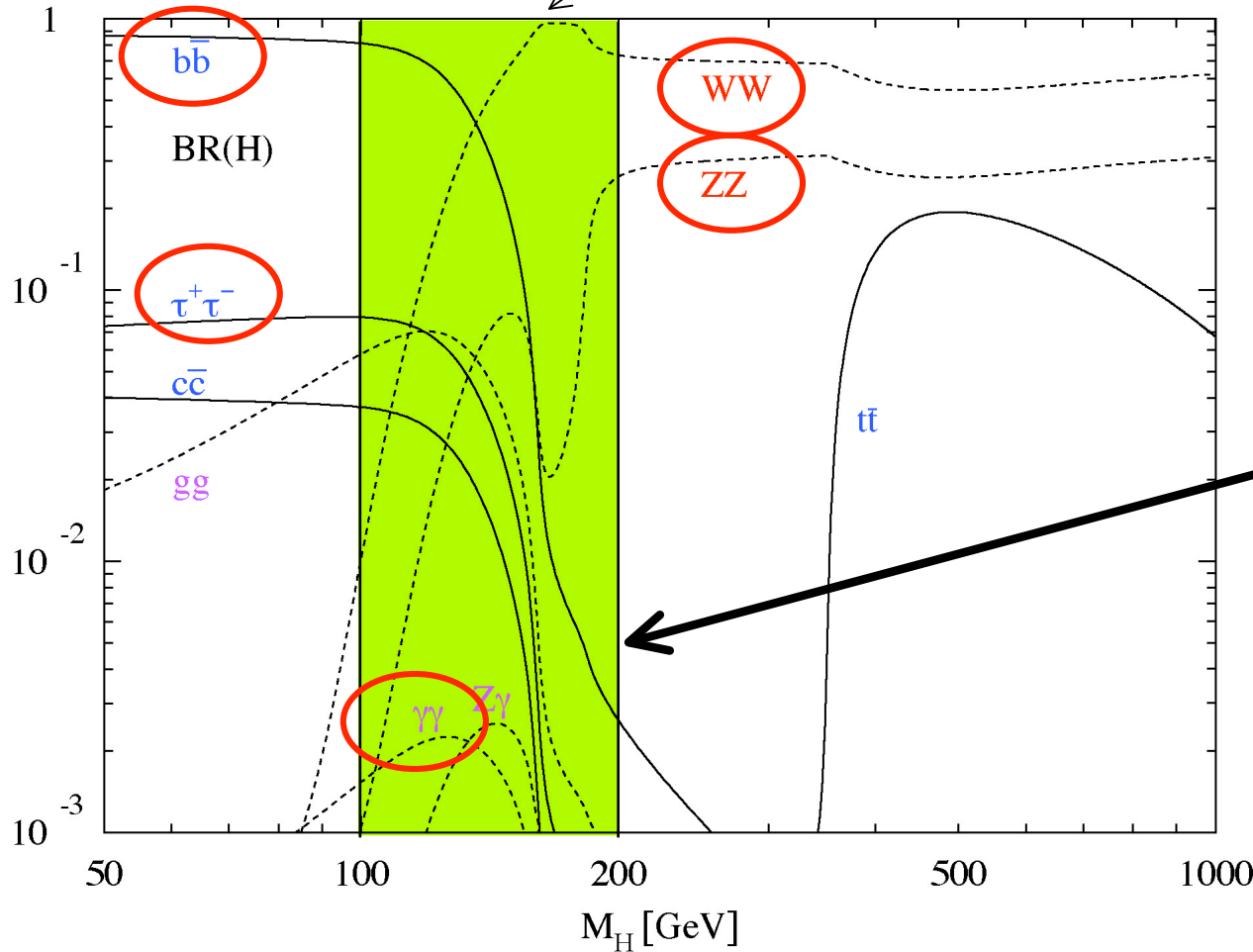
LEPで
棄却

生成断面積



Higgsの崩壊過程

170GeVの時H→WW
がほとんど



Higgsの結合は
質量に比例

LEPが示唆する質量
領域では、bb, $\tau\tau$ 、
 $\gamma\gamma$ 、WW, ZZの
5つの崩壊モードが
大切になる。

H→ $\gamma\gamma$ は
Top/Wを介した
ループ

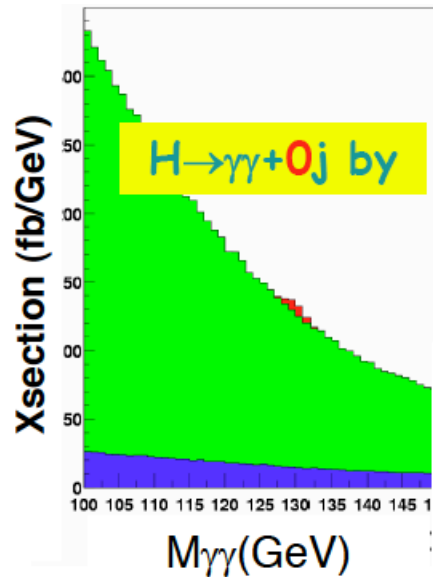
複数のモードで観測可能 → 性質を理解する上で極めて重要

SM Higgsの研究で有効なチャンネルの纏め

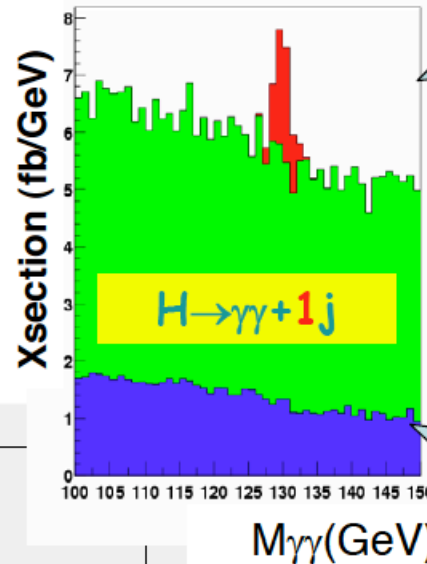
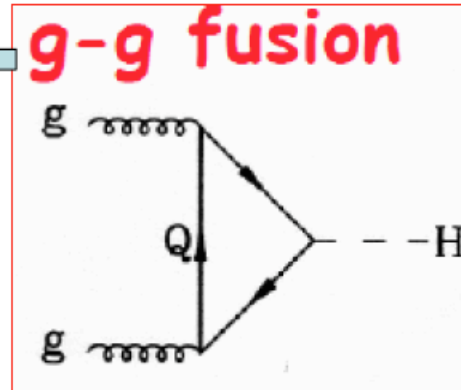
生成過程	崩壊過程	有効な領域とその効能	
Gluon Fusion	$H \rightarrow \gamma\gamma$	110–140GeV	発見 Mass 測定 spin=0の傍証
	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$	140–1000	発見・Mass, spin, coupling測定
	$H \rightarrow WW$	130–170 GeV	発見
Vector Boson Fusion	$H \rightarrow \tau\tau$	110–140GeV	発見・Mass, coupling測定
	$H \rightarrow WW$	130–200GeV	発見・W coupling測定
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	110–140GeV	発見 (fake、高次効果研究) Mass測定
ttH	$H \rightarrow bb$	110–130GeV	Ytの測定
	$H \rightarrow \tau\tau$	110–130GeV	
	$H \rightarrow WW$	130–180GeV	
WH	$H \rightarrow WW$	140–170GeV	発見・W coupling測定

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

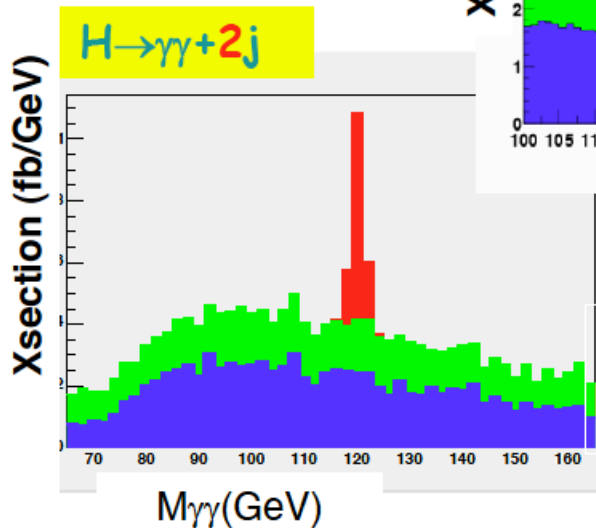
3 analyses on $H \rightarrow \gamma\gamma$ @ATLAS preliminary



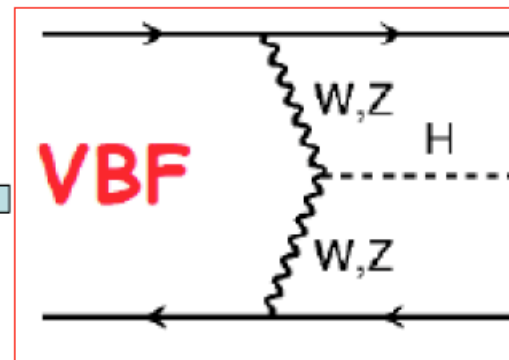
No -jet tagging :
huge BG. S/N ~0.3% → S/N is bad



- gg Fusion with additional one jet
 - VBF: one of two forward jets is out of acceptance.
- Statistics of Signal is enough. S/N is not so good (~ 10 %).

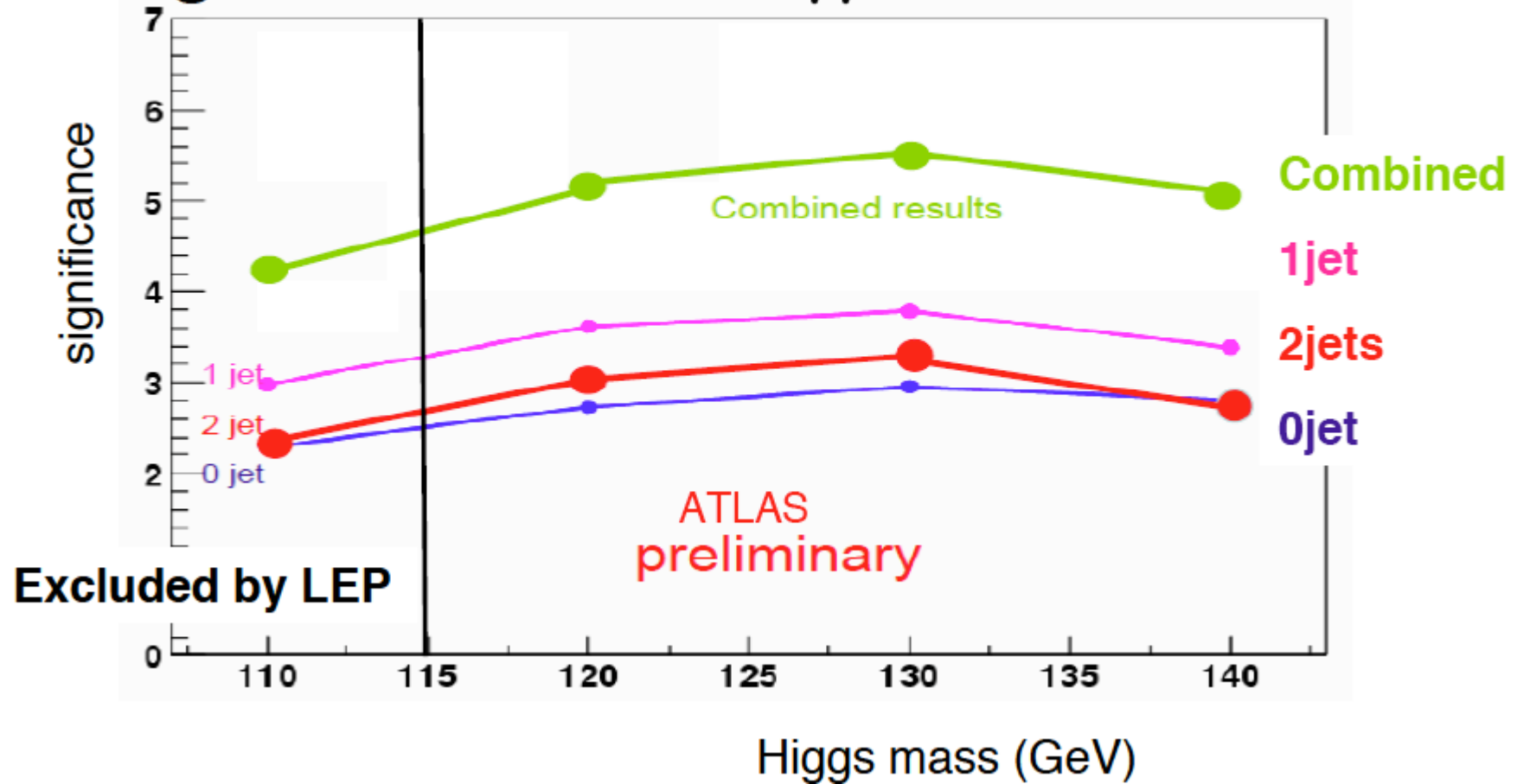


Statistics of Signal is limited.
S/N is good. (>100%)



Important to discover of Higgs at early stage

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

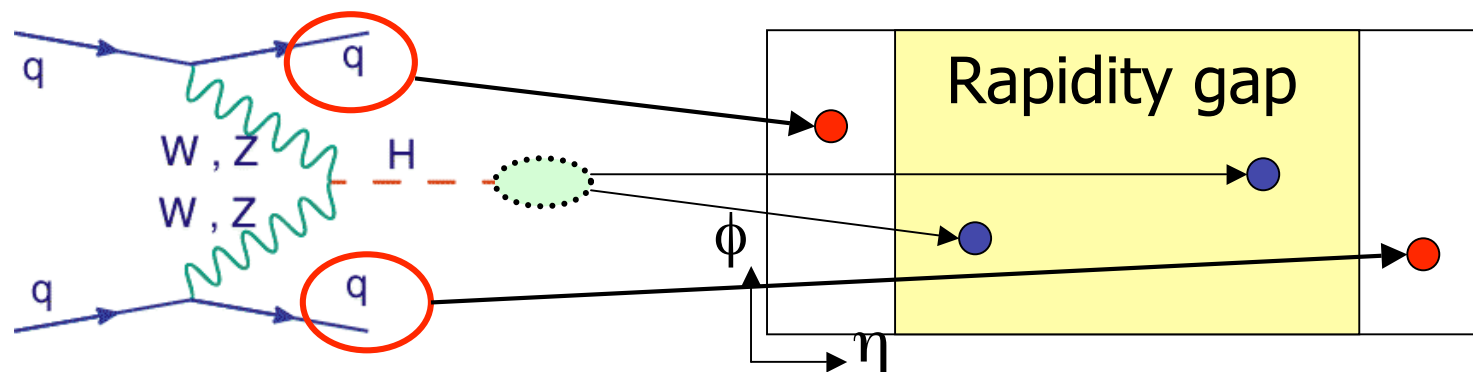


軽いHiggsは、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ だけで 5σ ($L = 10\text{fb}^{-1}$)

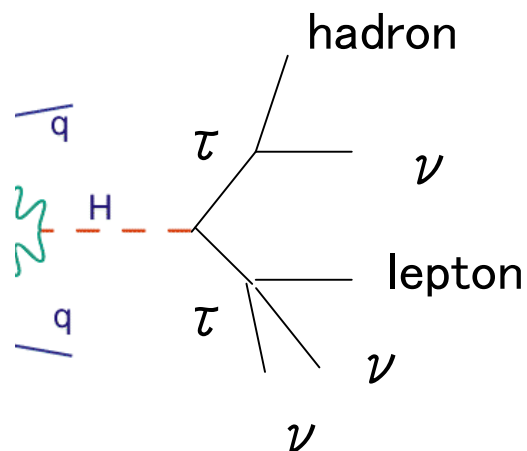
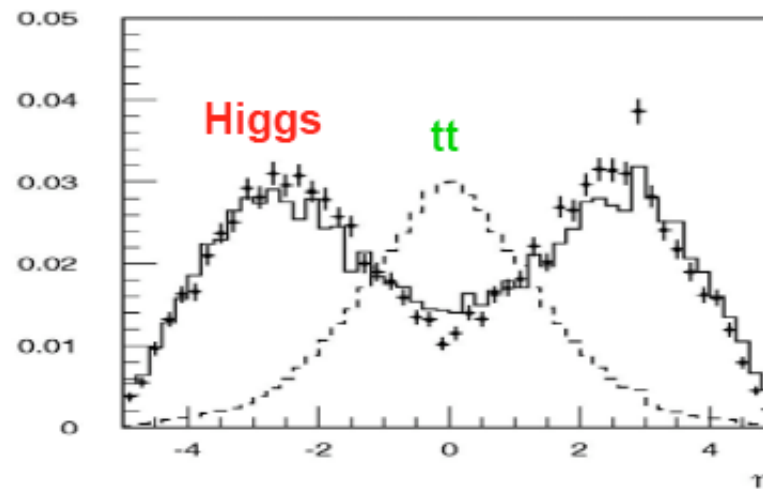
しかも spin が zero (2も可であるが) であることを示す 重要な証拠

[2] VBF: $H \rightarrow \tau\tau$ も見える

VBFの特徴 QCD起源のBG



カラーの交換がない。Rapidity Gap
が観測され、その間にhiggsが見える



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

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

Tau 34% leptonic decay

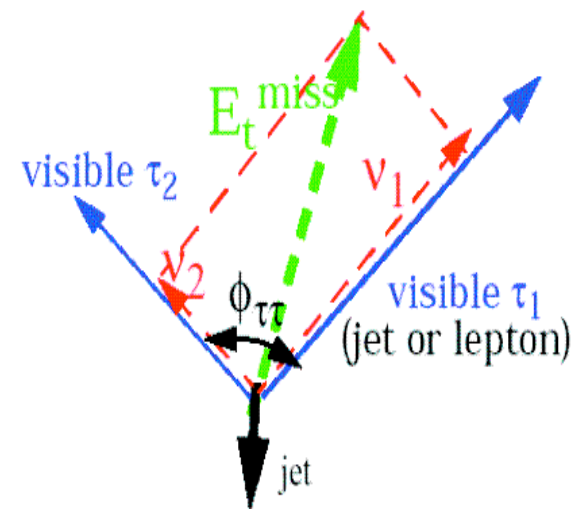
-> trigger (一方か両方のtauがleptonic decay)

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

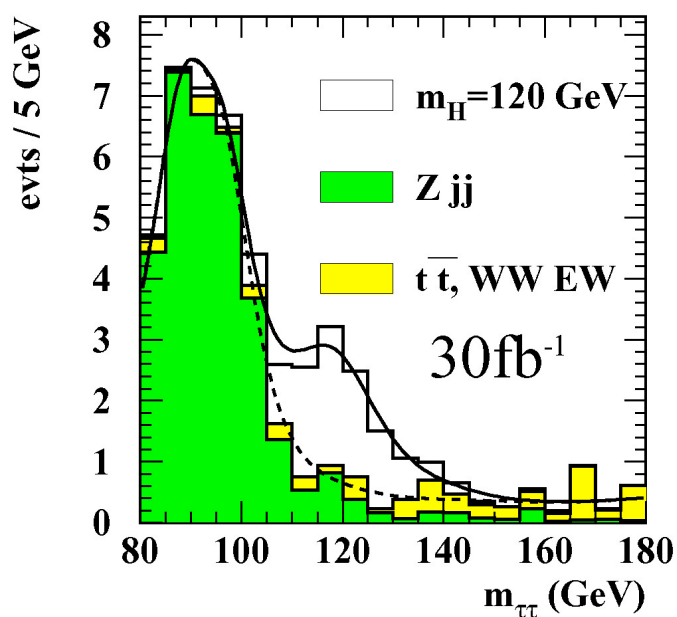
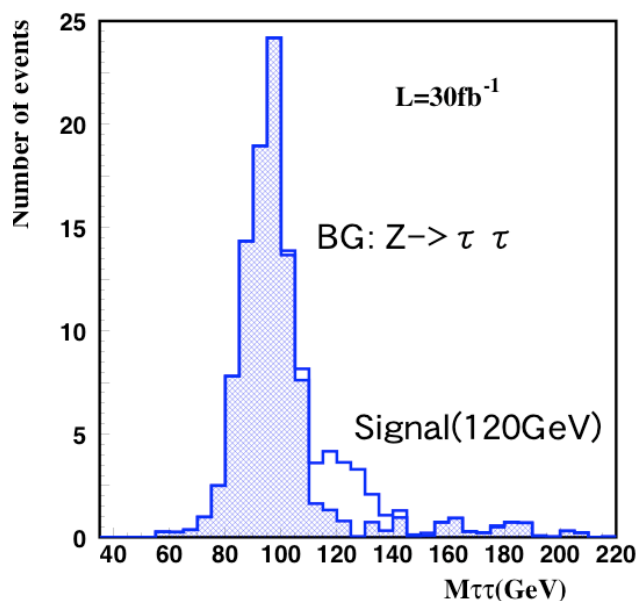
$M_H = 120 \text{ GeV}$

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

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



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



・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。

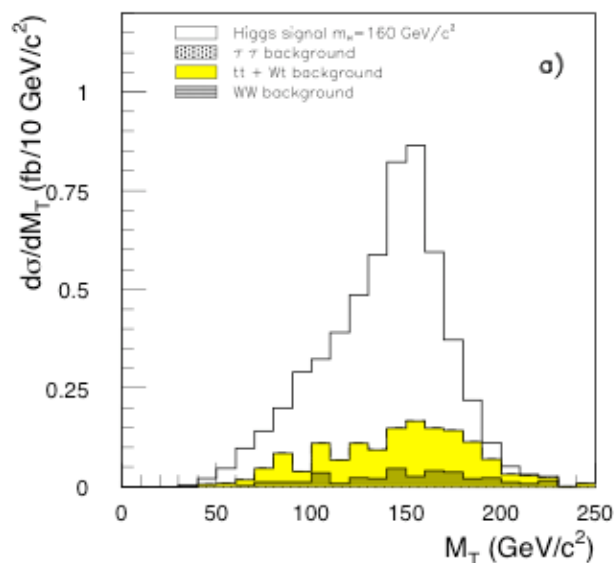
τ の再構成にmissing情報 (b-tagは使ってない) \rightarrow missing E_t の研究が鍵

[3] VBF H→WWのM_T分布

M_H=160GeV

$$W^+W^- \rightarrow \ell\nu\ell\nu$$

M>140GeV H→WWが主力になる。この時は、
WW→lnulnuがkeyチャンネル



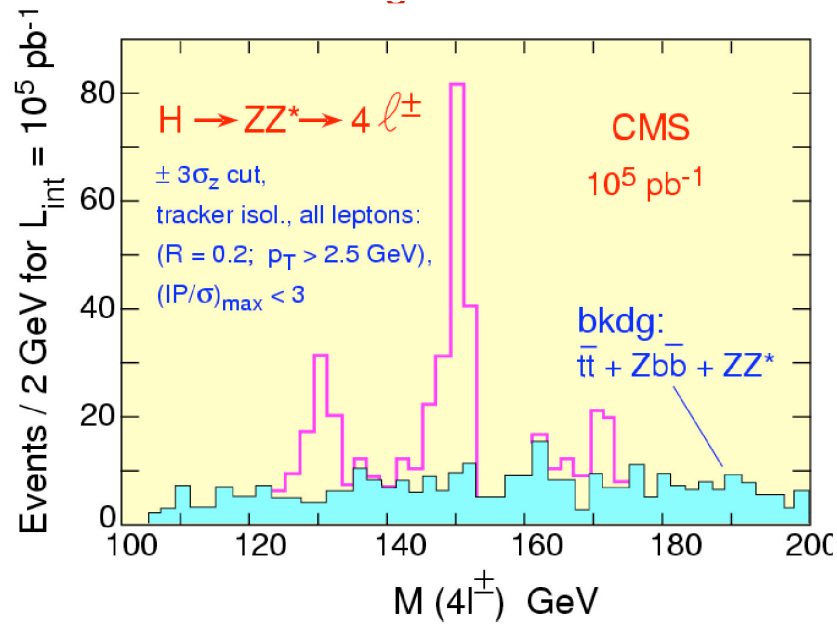
peak を作らない。やこびあん
(形は似ているが、数はfactor 5以上)

Spinの情報が見る事が可能
Spin Zero → WW のspinの向きが
逆向き

→ leptonは揃った方向に出る。
→ spinを見る事がこの領域でも
可能。

Higgsであること、
Spin と結合(後述)をみる事が必要

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



$M_H = 130, 150, 170 \text{ GeV}$
 (170 GeVの付近は $H \rightarrow WW$ がほぼ100%)

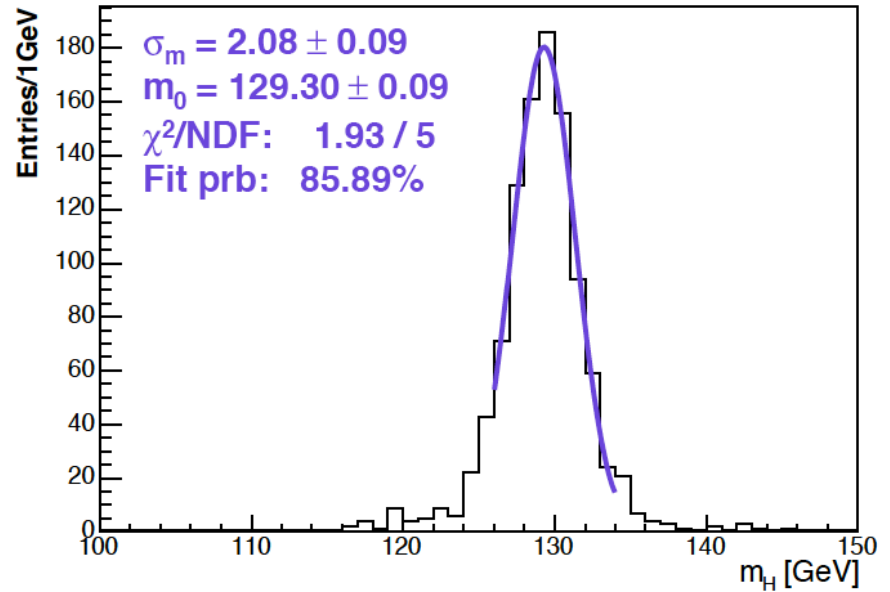
分解能は高い: $\sigma = 1.5\text{--}2 \text{ GeV}$ 1% 程度)
 BGから綺麗に分離可能

140 GeVより重い場合の
WWと並んでFirst Discovery channel

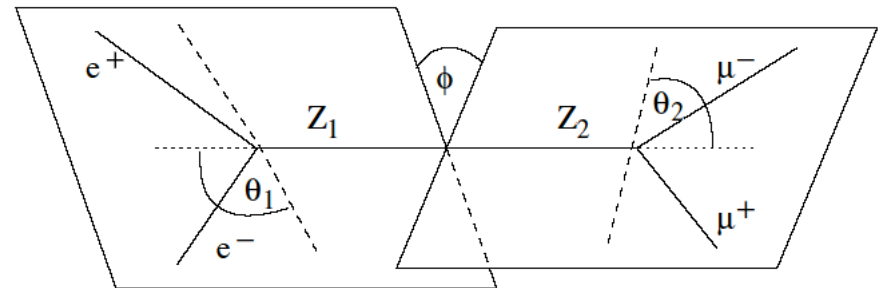
200 GeVより重い場合 **First Discovery channel**

G4 Full simでもOK

$H[130] \rightarrow 2e2\mu$

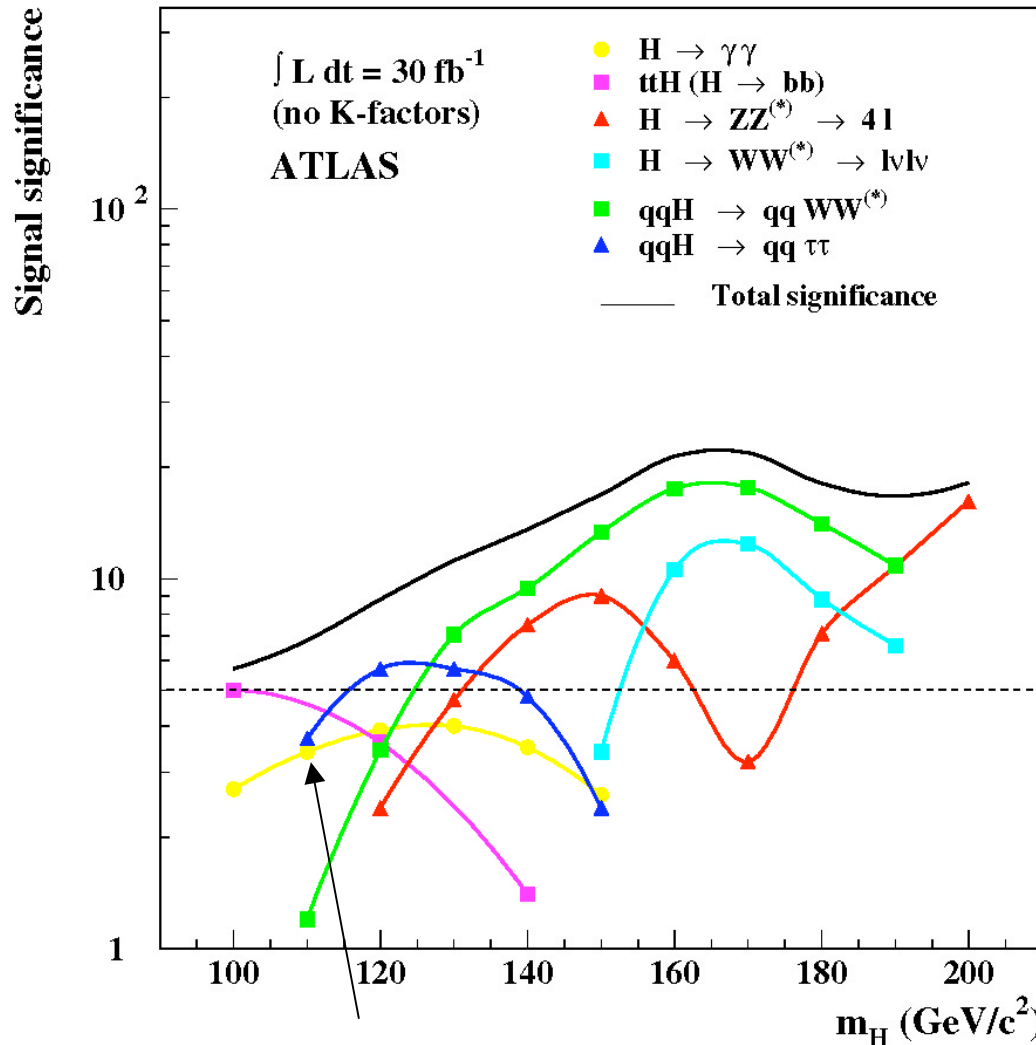


このチャンネルspin,
 CPの直接測定が可能



SM Higgsの発見能力

$L=30\text{fb}^{-1}$ で 9σ 以上の発見が可能 ($M_H > 114\text{GeV}$: LEP limit)

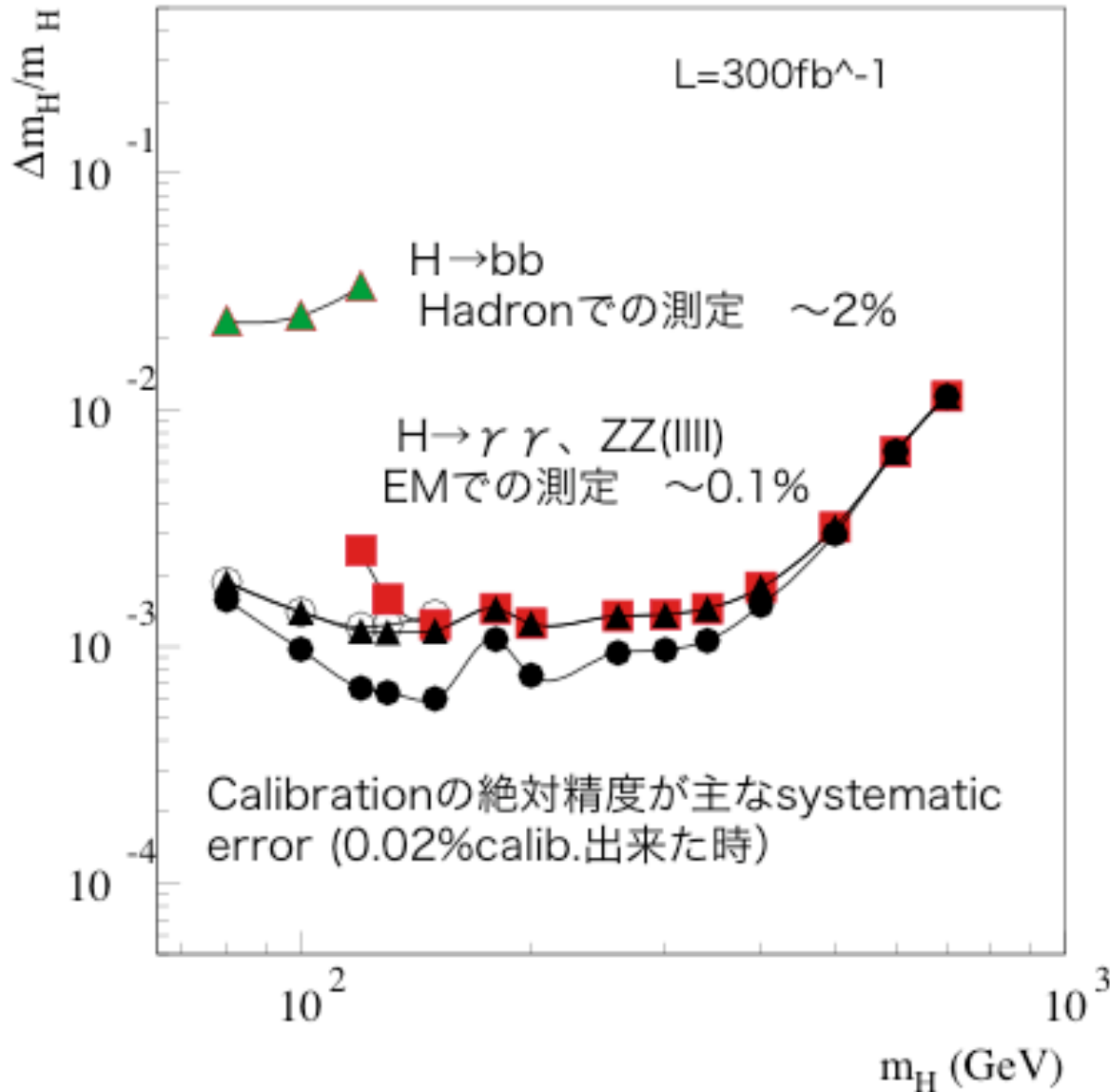


- 軽い場合 VBF・ $\tau\tau$
- GF+VBF $\gamma\gamma$
- 重い場合 VBF・WW
- 200 GeV以下の時は複数のモードで観測可能
- 200 GeVより重いと $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$ で 20σ 以上

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

黄色($H \rightarrow \gamma\gamma$)がもっとよくなっている。(7σ @ $L=30\text{fb}^{-1}$ ほど)

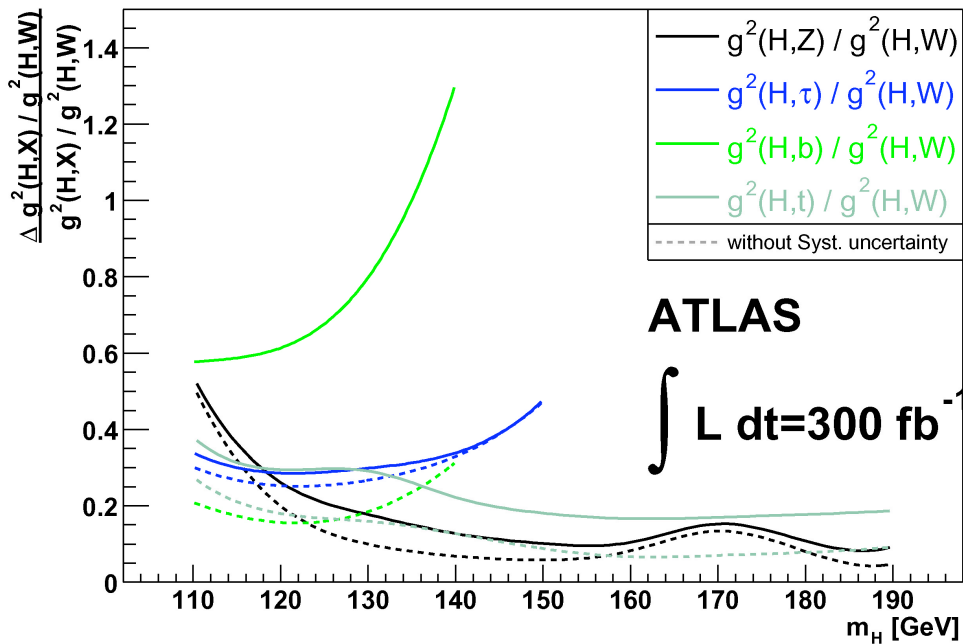
質量の測定精度



- 測定精度0.1%
Calib 絶対精度
が主な誤差.

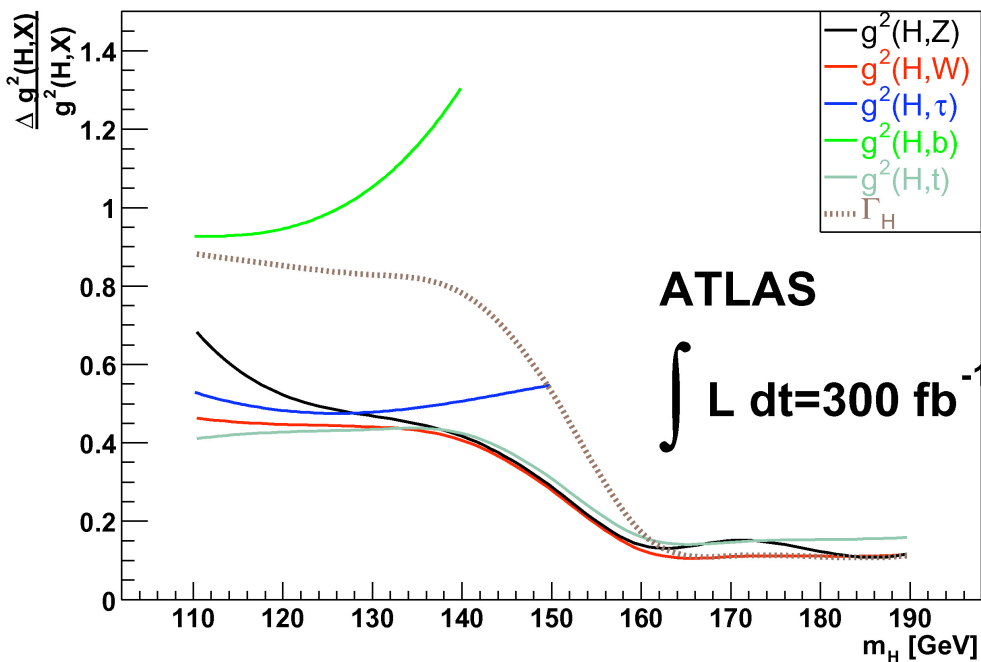
Higgsのmass $\sqrt{2\lambda v}$

V=246GeV
λ：4次の係数で
外側の壁の傾き



結合定数の比の測定精度 (HWW規格化)

- Y_t, Y_τ は10-15%程度
- Y_b は30-40%程度
(VBF bb必要)
- G_z は、5-10%程度で測定可能

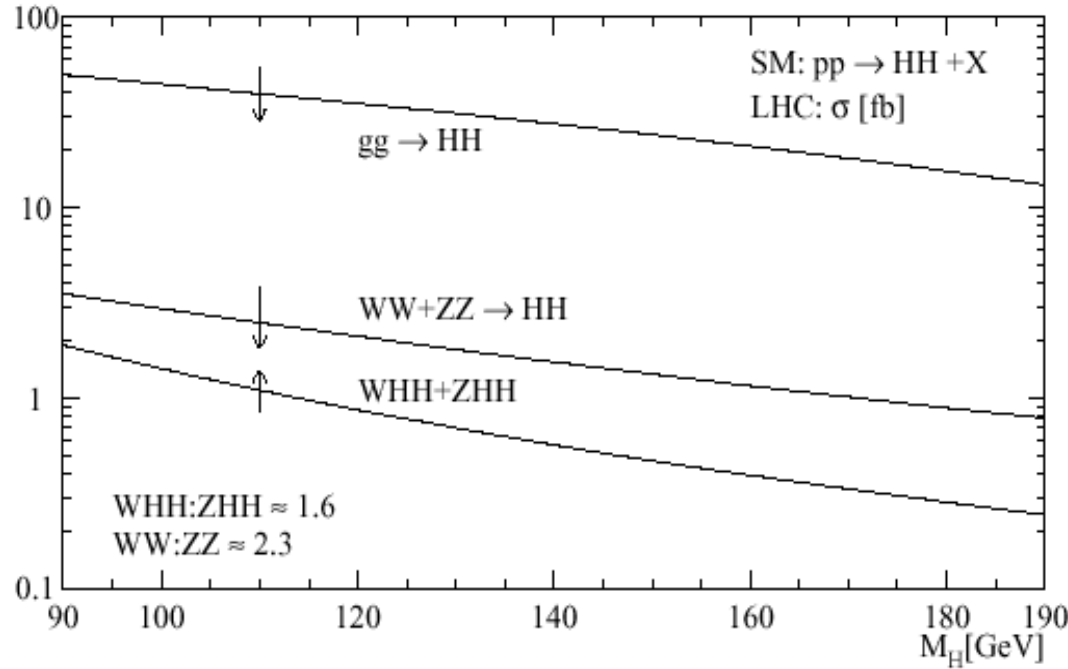


結合定数の絶対測定の精度

- $Y_t, Y_\tau, g_{ZZH}, g_{WWH}$ は、20%程度の精度で決まる。
- y_b は50%近い
($m_H = 115-140 \text{ GeV}$)

Higgs Self-couplings

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



$\sigma \times \text{Br}$ が小さい
High Luminosityが
必要
—>SLHC

For 6000 fb^{-1} (SLHC)

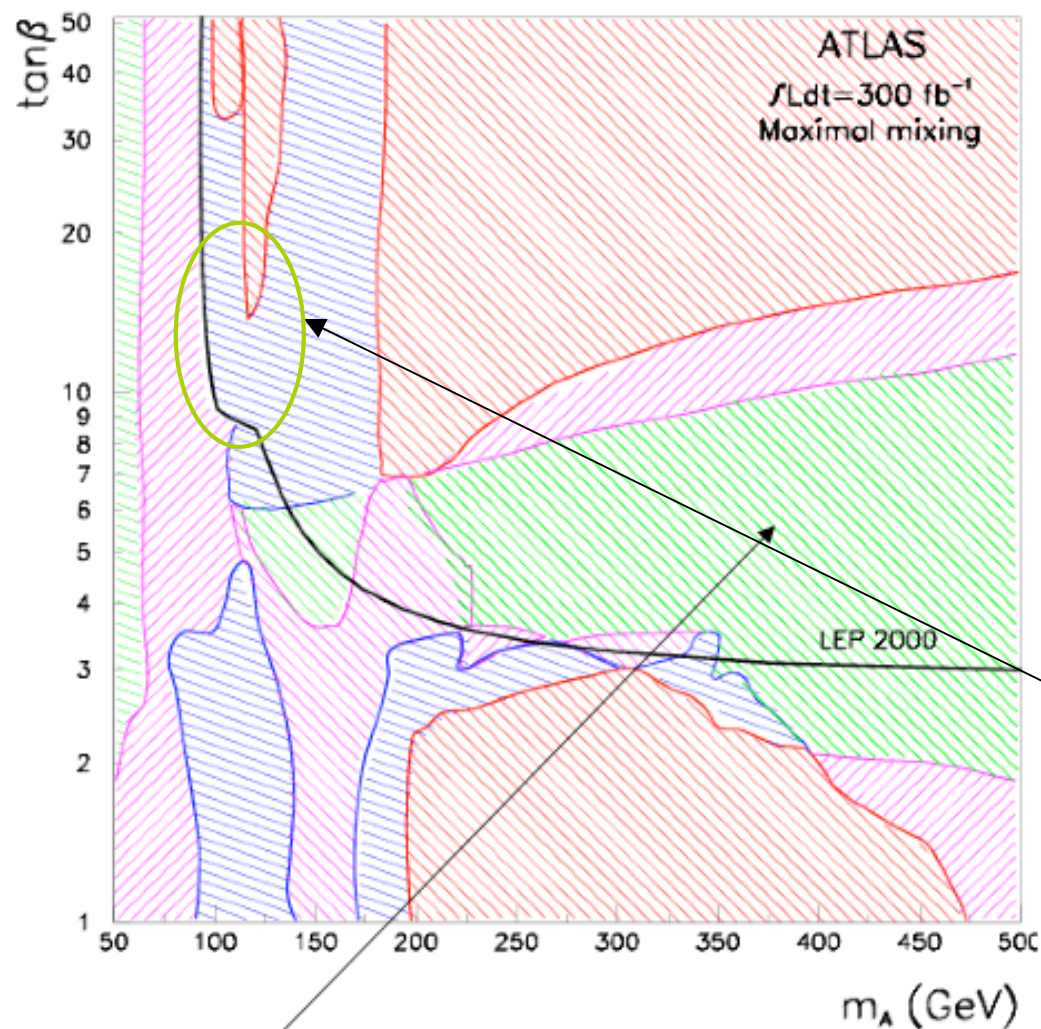
$\Delta\lambda \sim 19\%$ for $170 \text{ GeV } M_H$

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

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

MSSM Higgsの発見能力



・ h, H^0, A^0, H^{\pm} の4種類

・Tree levelで $\tan \beta$ と M_A の
2 parameterで記述

・ $\tan \beta$ が大きいと bbH/A の
結合が大きくなる。

$H/A \rightarrow \tau \tau \cdot \mu \mu \cdot bb$

・ $\tan \beta > 10$ で $gb \rightarrow tH^-$ で
charged Higgs が観測可能

→MSSM Higgsも必ず
 $L=30\text{fb}^{-1}$ のrunで発見可能

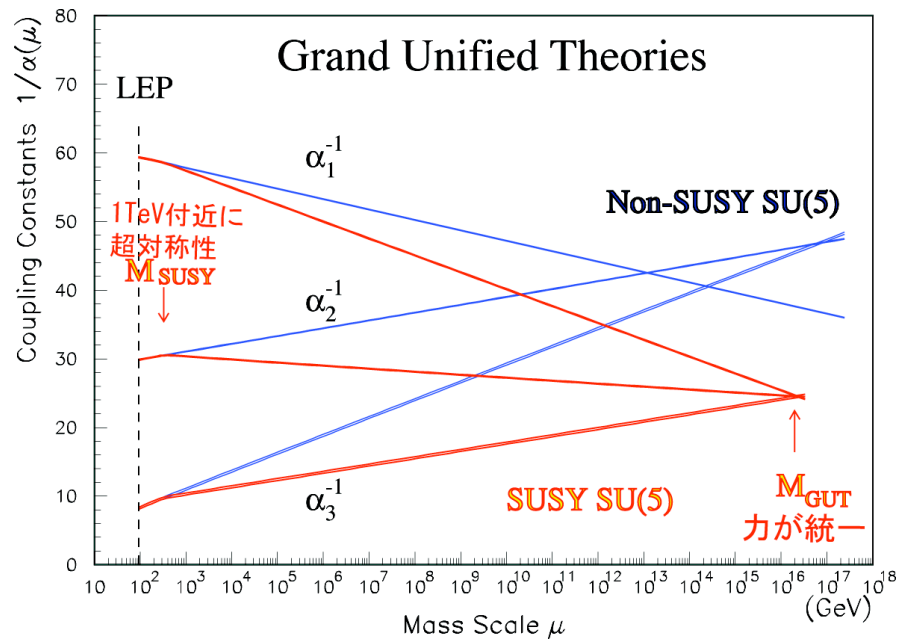
ここら辺以外は1年でOK
($t \rightarrow H^+ b$ がcover)

- 4 Higgs observable
- 3 Higgs observable
- 2 Higgs observable
- 1 Higgs observable

この緑の部分は、 H_{SM} に似た性質の h が観測されるだけ。

5. TeV領域の新しい物理の探索 超対称性粒子の発見

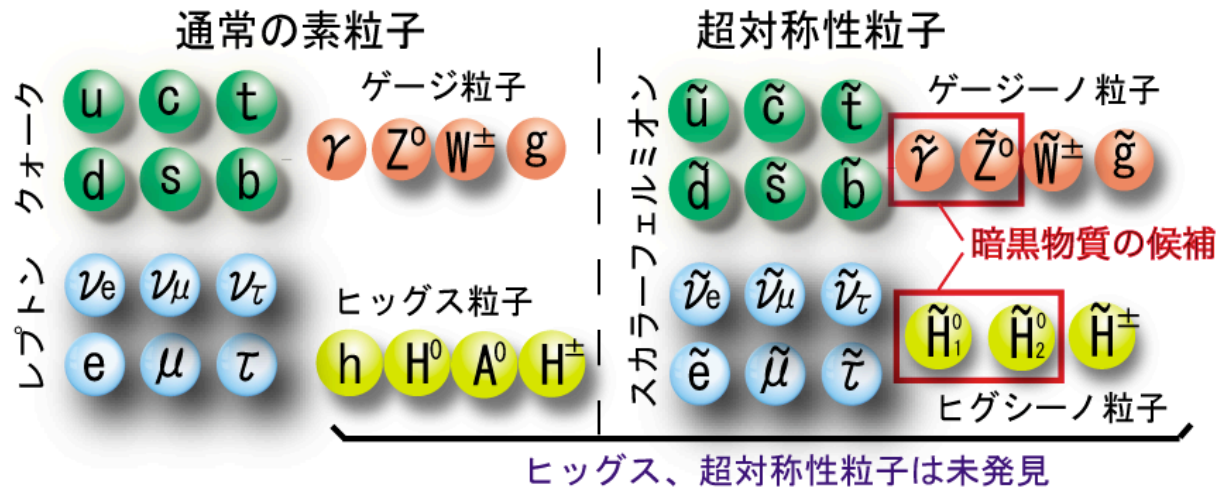
GUT, Dark Matterなど御利益



フェルミオンとボソンを交換する変換 (超対称性変換)

通常の粒子		超対称性粒子	
S=1/2	charged lepton: e, μ , τ neutrino: ν , ν , ν quark: u, c, t d, s, b	S=0	charged scalar lepton: \tilde{e} , $\tilde{\mu}$, $\tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}$, $\tilde{\nu}$, $\tilde{\nu}$ scalar quark: \tilde{u} , \tilde{c} , \tilde{t} \tilde{d} , \tilde{s} , \tilde{b}
S=1	photon : γ (B^0 and W^0) Weak Boson : W^+ , Z gluon: g	S=1/2	Bino : \tilde{B}^0 Wino : \tilde{W}^+ , \tilde{W}^0 gluino: \tilde{g}
S=0	Higgs: h, H, A, H^\pm	S=1/2	Higgsino: \tilde{H}_1^0 , \tilde{H}_2^0 , \tilde{H}^\pm
S=2	Graviton: G	S=3/2	gravitino: \tilde{G}

Spinが1/2だけ異なる超対称性粒子が存在すると
 (1) 階層問題
 (2) GUT
 (3) 時空の対称
 (4) DM問題
 などを自然に解決してくれる。



(歴史の教訓：
 電子 \leftrightarrow 陽電子が
 QEDを救った：
 二匹目のどじょう)

見えていないー>何らかの理由で重くなっている (SUSYが破れている)

SUSYの破れ（2種類）とDMの候補

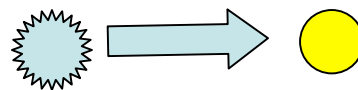
通常の粒子		超対称性粒子	
S=1/2	charged lepton: e, μ , τ neutrino: ν , ν , ν quark: u, d, c, s, t, b	S=0	charged scalar lepton: \tilde{e} , $\tilde{\mu}$, $\tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}$, $\tilde{\nu}$, $\tilde{\nu}$ scalar quark: \tilde{u} , \tilde{d} , \tilde{c} , \tilde{s} , \tilde{t} , \tilde{b}
S=1	photon: γ (B^0 and W^0) Weak Boson: W^+ , Z gluon: g	S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 Wino: \tilde{W}^+ , \tilde{W}^0 gluino: \tilde{g}
S=0	Higgs: h, H, A, H^{\pm}	S=1/2	Higgsino: \tilde{H}^0 , \tilde{H}^0_2 , \tilde{H}^{\pm}
S=2	Graviton: G	S=3/2	gravitino: \tilde{G}

1. Neutralino

4つの状態は混合する。
そのうち一番軽い状態は
安定で良いDMの候補
質量: $O(10)$ - $O(100)$ GeV
非相対論的な Cold DM

2. Gravitino

SUSYの破れ → SUSY粒子



ゲージ相互作用を通して伝わる場合：
 \tilde{G} が軽いまま(<1GeV Warm DM)

(Gauge mediation)

宇宙論的にはあまり面白い。

(warm, slow decay BBNにおいたする)

SUSYの破れ → SUSY粒子



重力を介して、伝わる場合：
 \tilde{G} が重くなる。

(Gravity mediation)

mSUGRAの簡単な纏め



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



一般的な傾向

→ 次の頁

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

・ $\tilde{\chi}_1^0$ 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)

$$\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \approx \tilde{B}^0, \tilde{\chi}_2^0 \approx \tilde{W}^0, \tilde{\chi}_1^\pm \approx \tilde{W}^\pm, \tilde{\chi}_{3,4}^0, \tilde{\chi}_2^\pm \approx \tilde{H}$$

・第3世代の \tilde{f} は軽い。(Yukawa+LR mixingの効果)



LHCでの主なSUSY生成過程は、($\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q}$) である。

生成断面積は、これらのmass以外にはモデル依存性が小さい。

ただのstrong interaction

$\tilde{\chi}^0, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{l}$ らは、 \tilde{g}, \tilde{q} の崩壊過程で出てくる

(多段cascade崩壊) LEP, Tevatronとの大きな違い

SUSYの破れ(model parameterの整理)

一般にパラメータはC P位相も入れて約120以上ある。”もっともらしい仮定”を入れて、自由度を減らす。加速器物理に一番インパクト(影響)のある条件を調べて、効果を調べるのが大切。

S=0	charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$ scalar neutrino: $\tilde{\nu}, \tilde{\nu}, \tilde{\nu}$ scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{c}, \tilde{s}, \tilde{t}, \tilde{b}$
S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 (M_1) Wino: \tilde{W}^+, \tilde{W}^0 (M_2) gluino: \tilde{g} (M_3)
S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$ (μ)
S=3/2	gravitino: \tilde{G}

$$M_1 : M_2 : M_3 =$$

$$\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 =$$

$$0.4 m_{1/2} : 0.8 m_{1/2} : 2.8 m_{1/2}$$

Higgsino mass ($|\mu| > 0.8m_{1/2}$ (Wino))
($m_0 \gg m_{1/2}$ の場合以外)

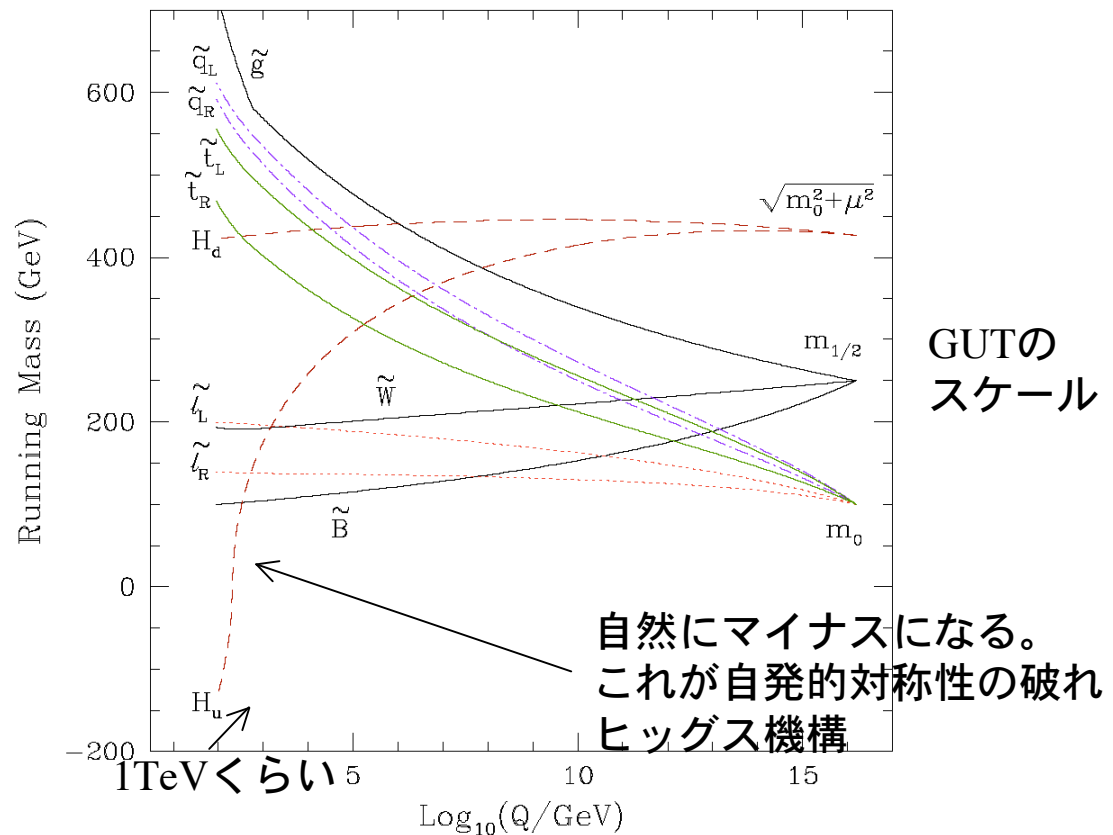
$$\tilde{\chi}_1^0 \approx \tilde{B}^0, \tilde{\chi}_2^0 \approx \tilde{W}^0,$$

$$\tilde{\chi}_1^\pm \approx \tilde{W}^\pm, \tilde{\chi}_{3,4}^0, \tilde{\chi}_2^\pm \approx \tilde{H}$$

4.5個のパラメータ(mSugra) :

$m_0, m_{1/2}, \tan\beta, A_0, \text{sign}(\mu)$
(mass @GUT) (VEV) (scalar 3点) (Higgsino mass)

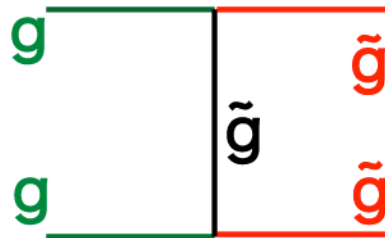
GUT scale(2×10^{16} GeV)で、共通の質量、3点結合
ヒッグスセクターもsfermion, gauginoと同じ



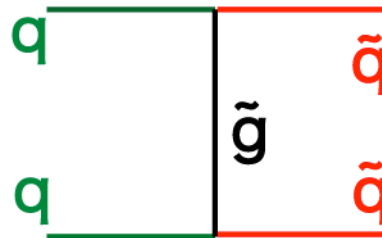
LHCでのSUSY粒子の生成過程

陽子は、クォークとグルオンで構成されている。クォークとグルオンから生成されるので $(\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q})$ が、主要な生成過程である。

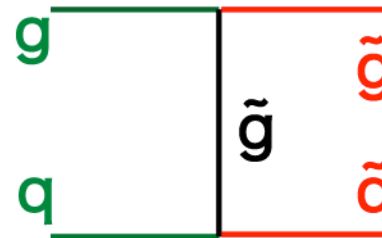
$\tilde{g}\tilde{g}$ 対生成



$\tilde{q}\tilde{q}$ 対生成



$\tilde{q}\tilde{g}$ 随伴生成



- **大きな**生成断面積
- **ただの強い相互作用:** g mass以外は SUSY parameter に**強く依存しない**。
- High x のpdfが大切
- K-factor 1.4 SUSY NLO の計算もすすんでいる。

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

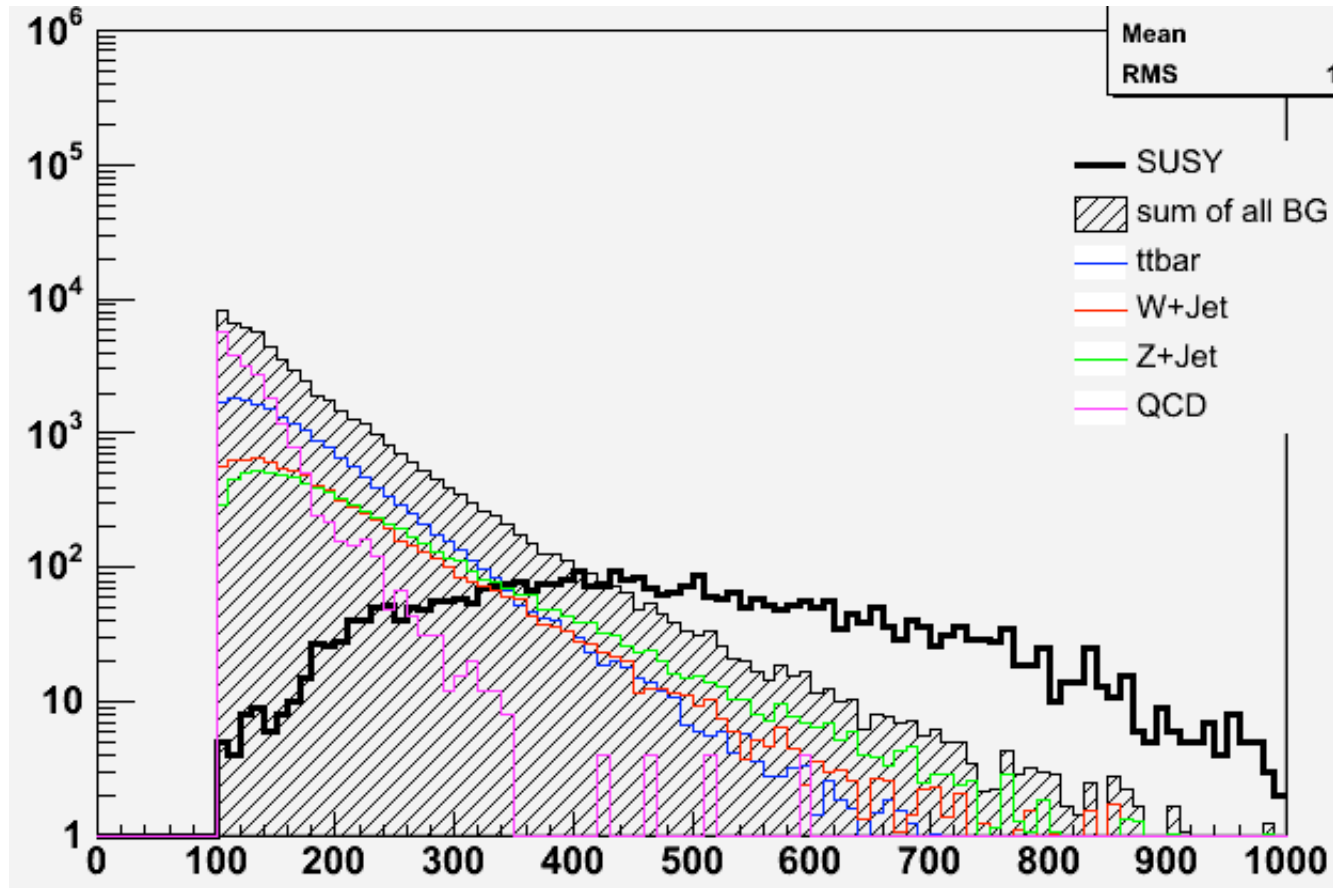
\tilde{g}, \tilde{q} のdecay table

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

Strong interaction

EW interaction

こち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世代などが依存、



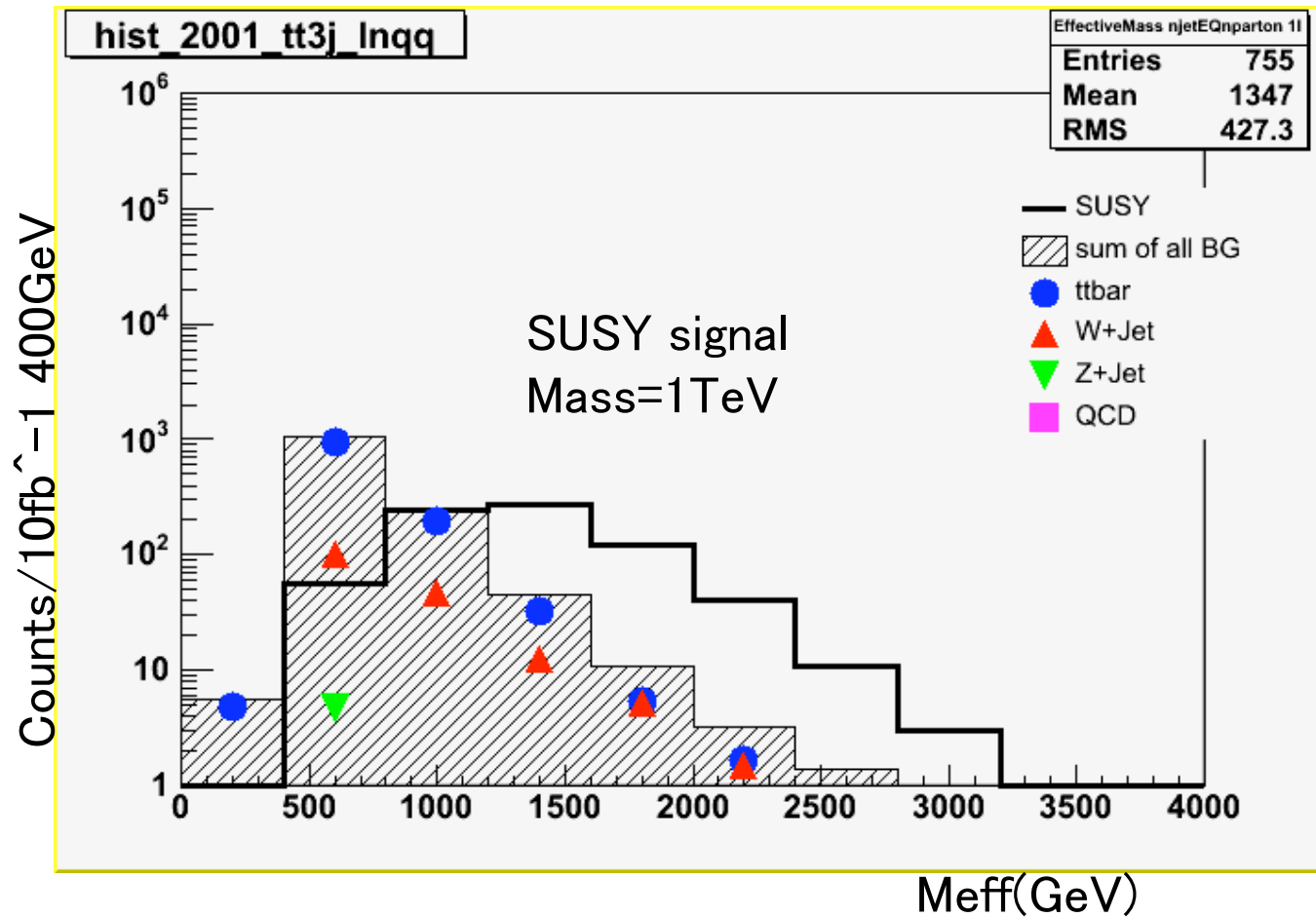
Missing Et (GeV)

For $m_{Et} > 700 \text{ GeV}$ 綺麗なexcessが観測される。(1TeVのSUSY)
 このmissing Et はColored particles mass とNeutralinoの質量差を強く反映

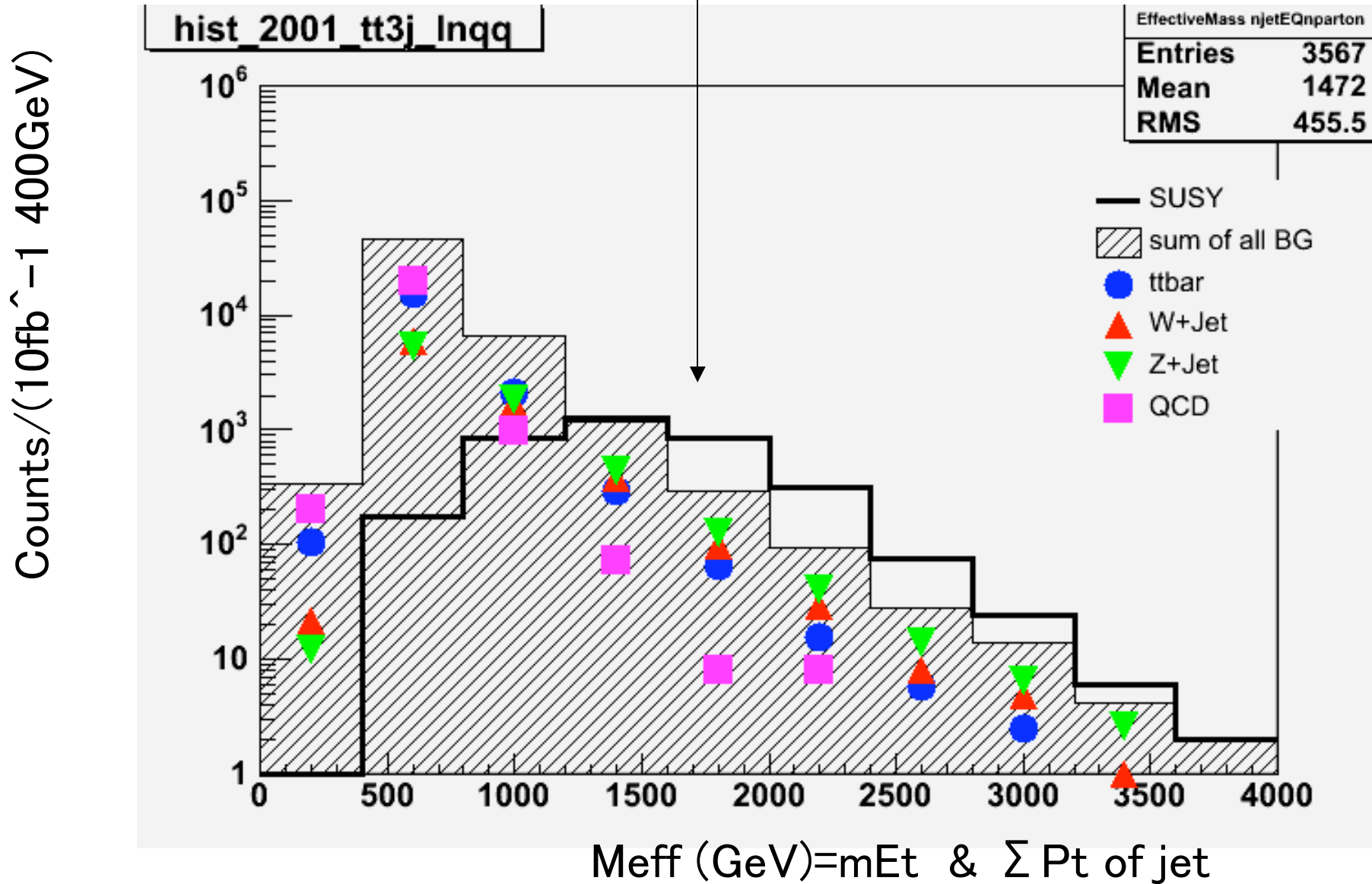
Missing ETの研究がSUSY研究の鍵

One lepton mode : $tt + N \text{ jets}$ ●
 : $W + N \text{ jets}$ ▲

レプトンを要求するとBGが落とせる → excessが綺麗に見える

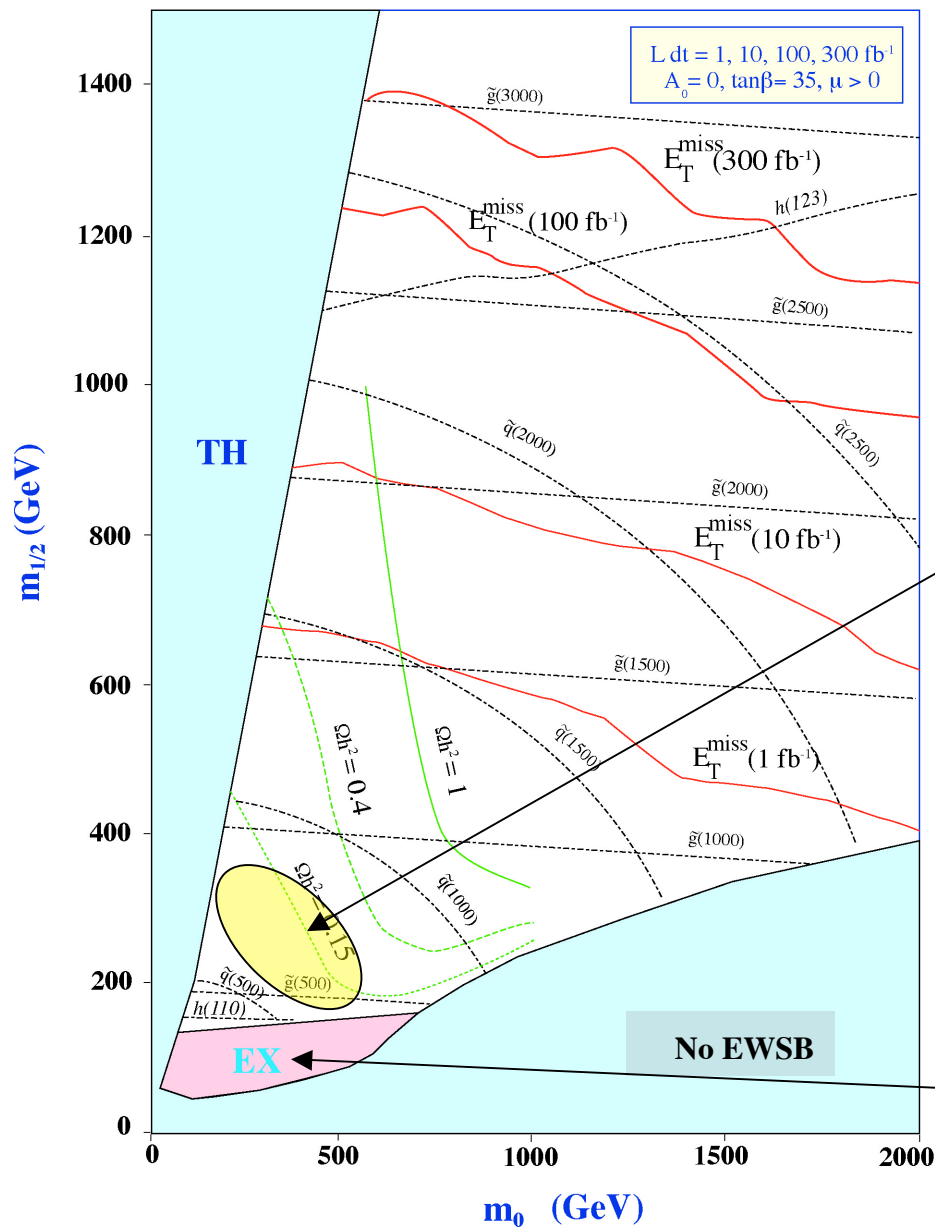


この位置がSUSY粒子の質量スケールと強く関係している



mSUGRAの発見能力

SLHC(L=3000fb⁻¹)で
約3.5TeVまで



L=300fb⁻¹ で約**2.5TeV**まで

Cold DMとして面白い領域は
2007年(0.1fb⁻¹)

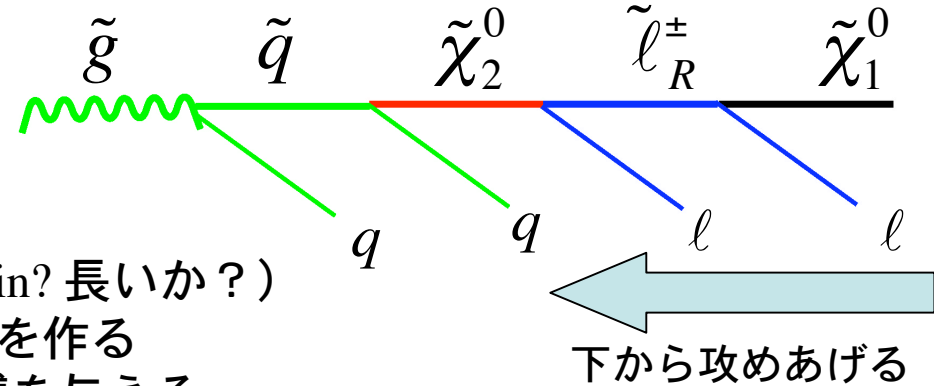
2009年(L=10fb⁻¹)で、約**2TeV**まで

2008年(L=1fb⁻¹)で
まで5σ可能
GUT: $\tilde{\chi}_1^\pm$ 約500GeVに相当
する。LEP-IIの5倍

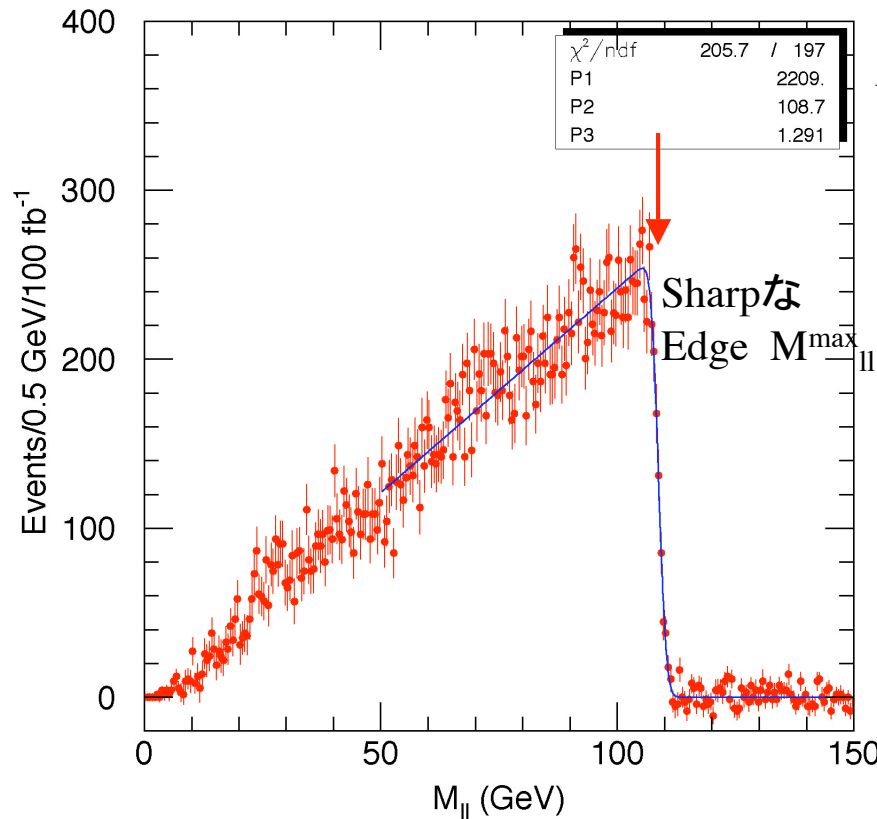
$\tilde{g}, \tilde{q} \sim 1.5\text{TeV}$

DD_2101

質量の再構成に関して



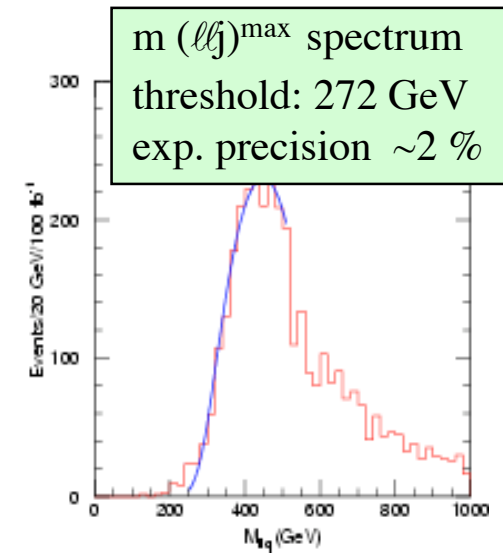
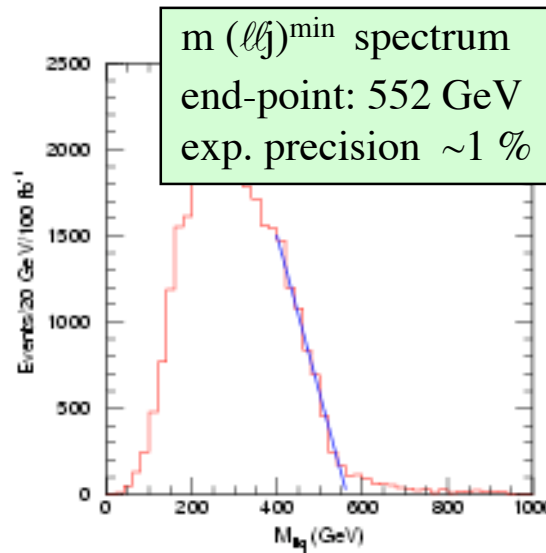
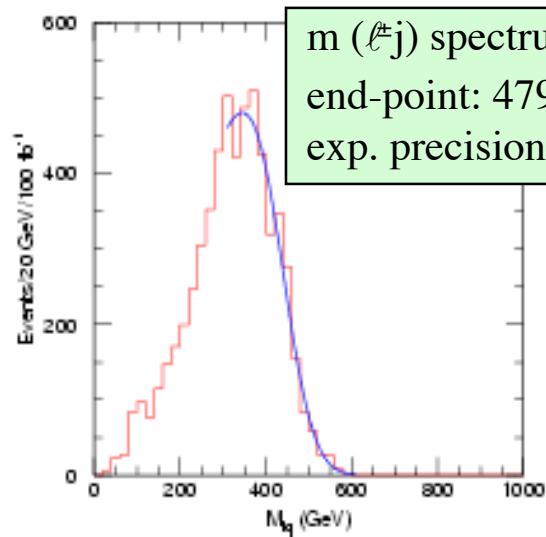
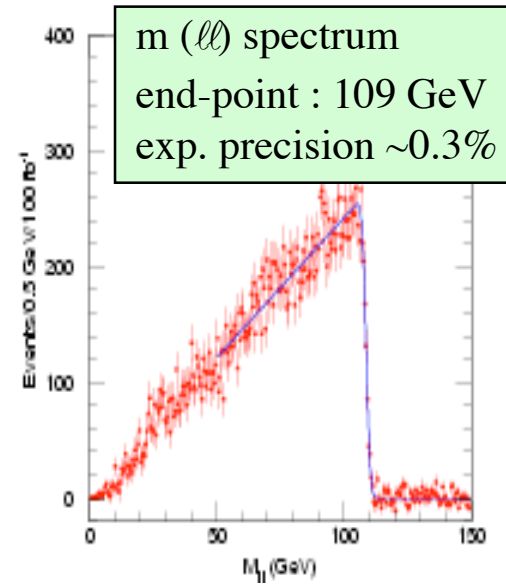
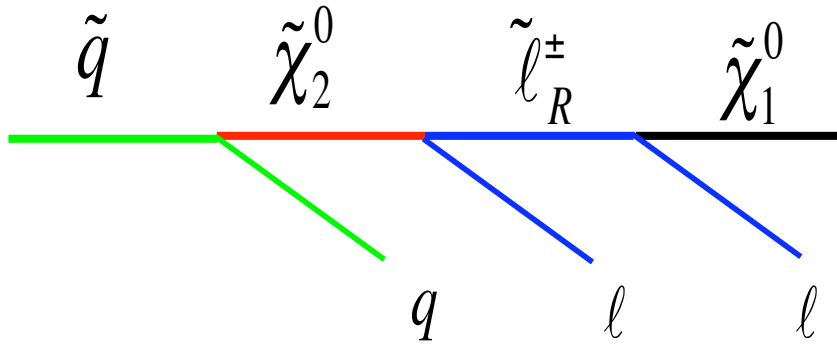
1. 適切なdecay chainを選ぶ (**key point!**)
(綺麗か? 他のSUSY Decay chain? 長いか?)
2. mass や P_T などのkinematic distributionを作る
3. Edgeやendpointからmassの関係に束縛を与える



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

- 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。
- 2body decay chainが最低 3 連発した場合は model independentに決めることができる。(次のページ)
- $\tan\beta$ が大きいと段数が増えたり、 τ 、 b が多くなる。
- 発見と違って、model依存性が強い。
- Br測定は難しい

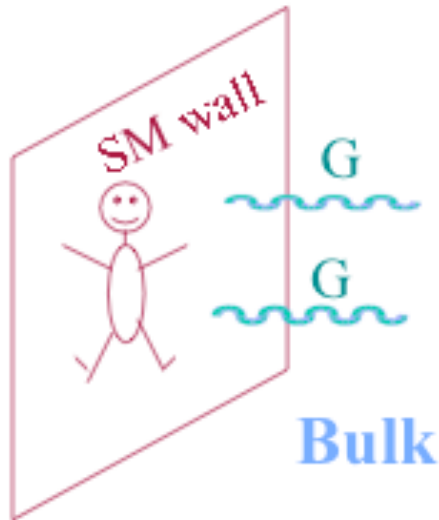
登場人物 4 人



4未知数 vs 4条件 → model independentにmassが決まる。(3-12%程度 for 700-800 GeV squark, gluino)

6. TeV scale の余次元 (Black Hole や カルツァクライン)

メンブレン：
Gauge bosonは
膜の中にいる
重力は、閉弦で
バルクに飛び出せる

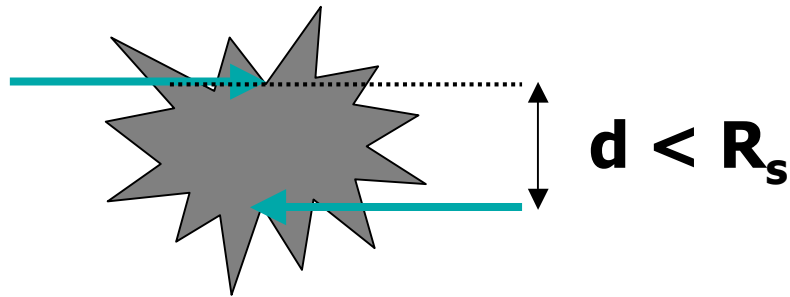


If gravity propagates
in $4 + n$ dimensions,
a gravity scale $M_D \approx 1 \text{ TeV}$ is possible
→ hierarchy problem solved

$$\left. \begin{aligned}
 V_4(r) &\sim \frac{1}{M_{\text{Pl}}^2} \frac{1}{r} \\
 V_{4+n}(r) &\sim \frac{1}{M_D^{n+2} R^n} \frac{1}{r}
 \end{aligned} \right\} \text{at large distance} \quad \longrightarrow \quad \boxed{M_{\text{Pl}}^2 \approx M_D^{n+2} R^n}$$

n, R = number and size of extra-dimensions

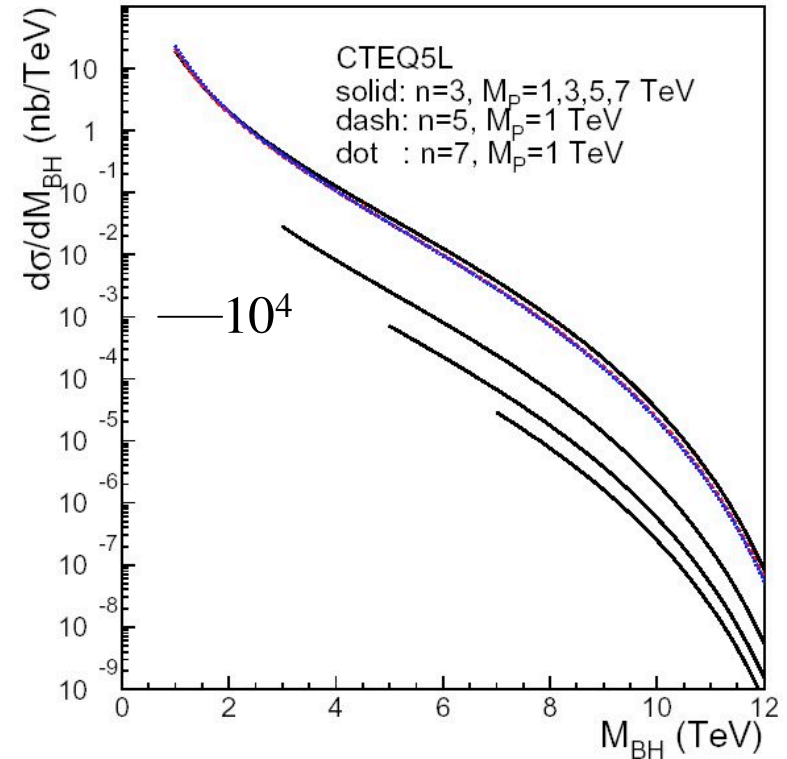
M_p (Planck scale $\sim \text{TeV}$)
 隠れた次元 n



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)

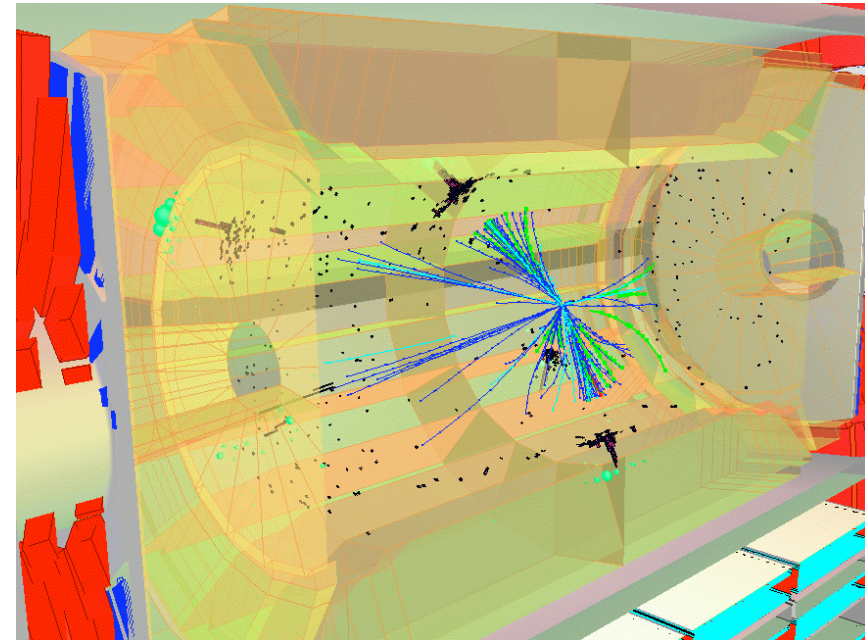
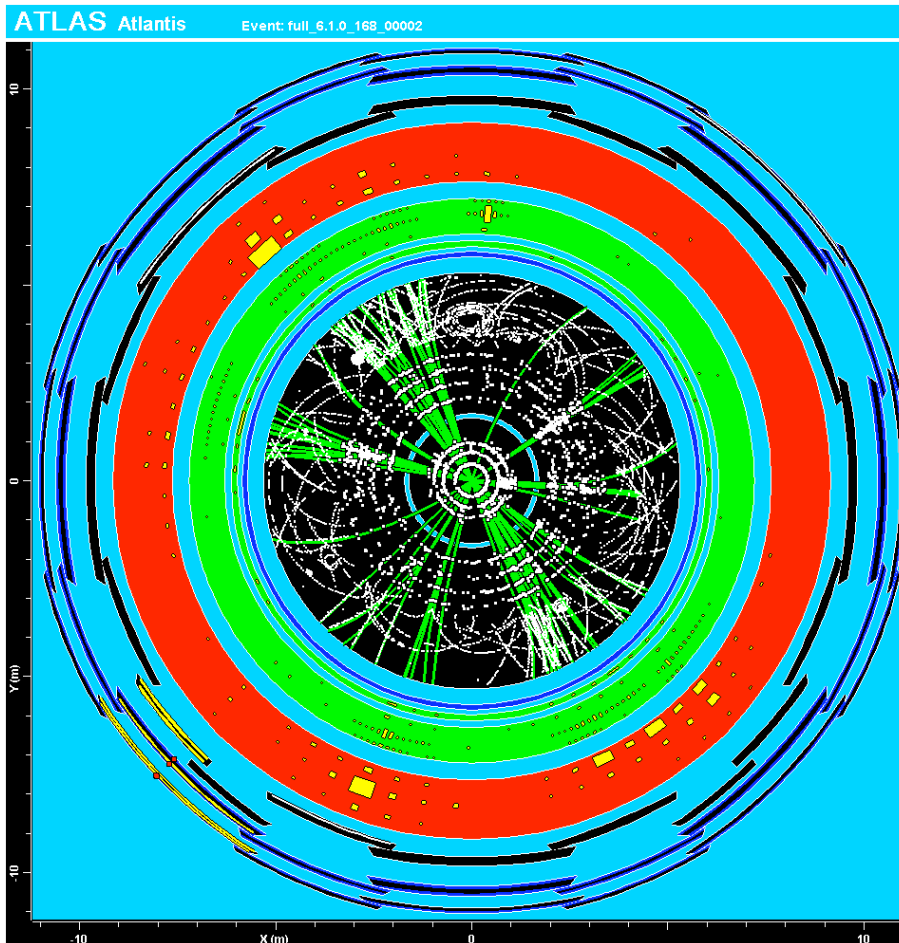
$$R_s = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[\frac{M_{BH}}{M_P} \left(\frac{8\Gamma(\frac{n+3}{2})}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$



出来たBHは、Hawking Radiation
 で蒸発。



たくさんの粒子が出てくる。



$M_{pl}=1\text{TeV}, n=2 \quad M_{BH}=6.3\text{TeV}$

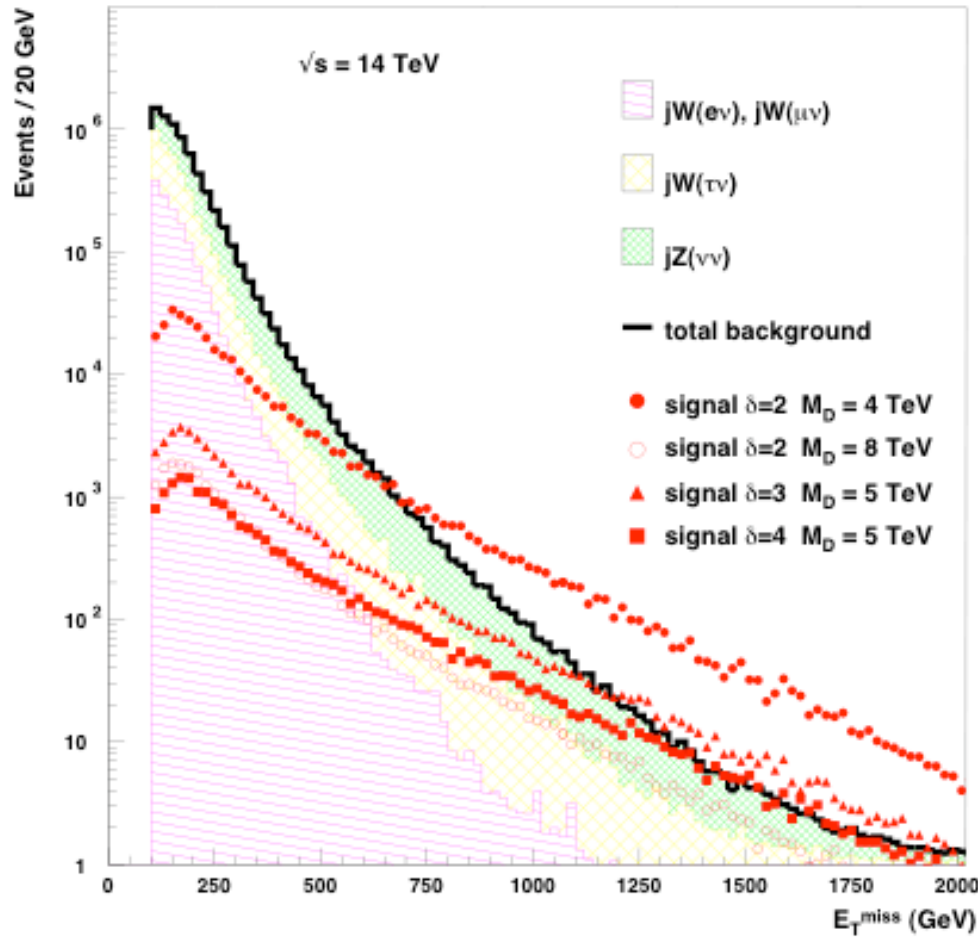
(Energetic 数100GeV のjet, photon, lepton がザクザクいて、まるいeventが特徴)

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

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)

E_T distribution



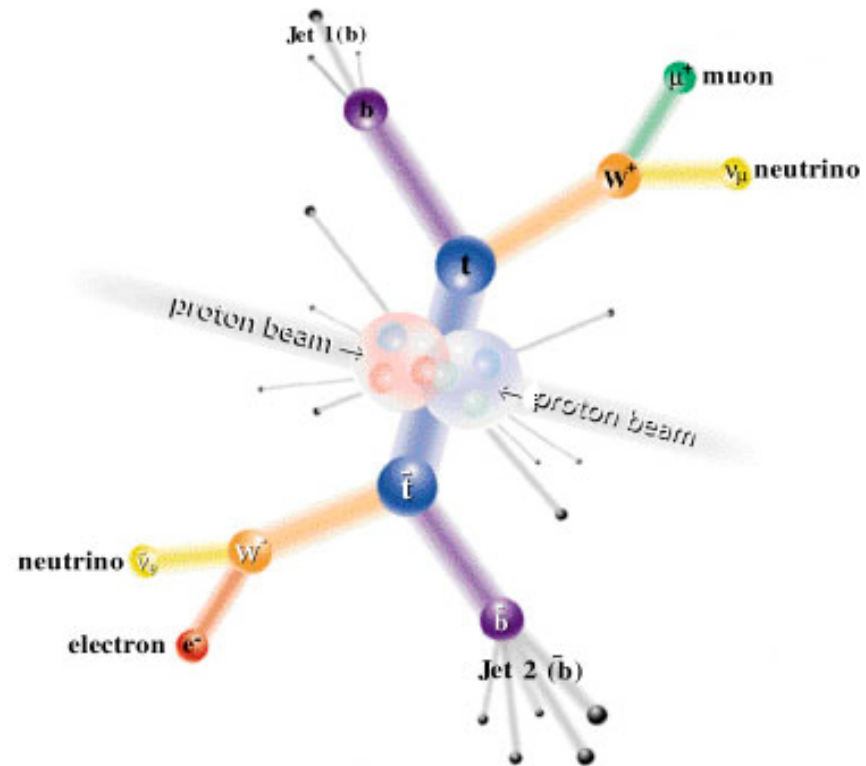
Events for HL, 100 fb^{-1}

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	$\mathcal{S}_{max} = S/\sqrt{B}$
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

7. Top & B-Physics



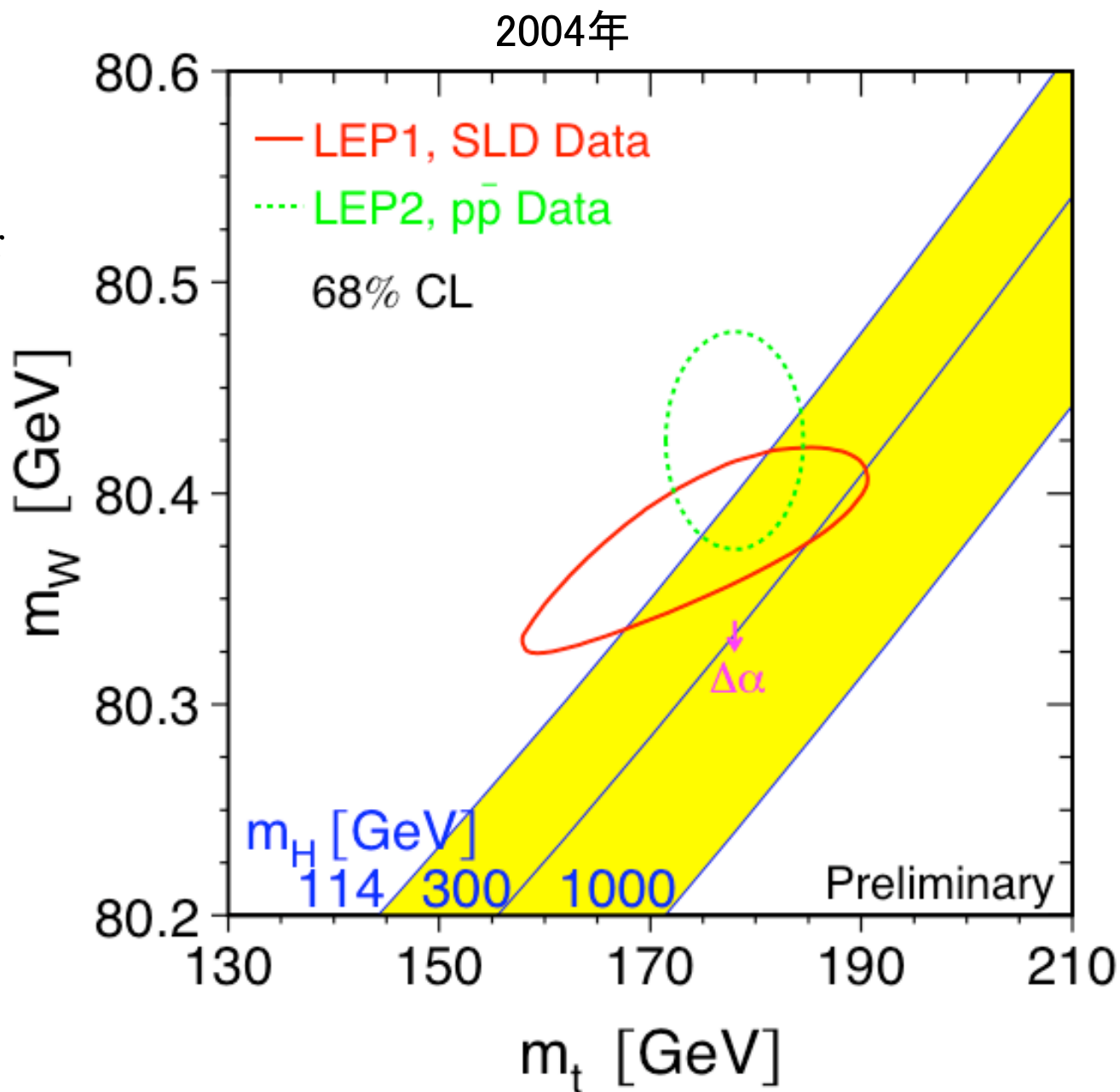
Topの質量測定

- 10^7 tt/10fb⁻¹
非常に豊富な統計
- EWの重要なparameter

$$\Delta m_t = 1 \text{ GeV}$$

$$\Leftrightarrow \Delta \sin^2 \vartheta_{\text{eff}} = 3 \times 10^{-5}$$

$$\Leftrightarrow \Delta m_W = 6 \text{ MeV}$$



Topの質量測定

- 10^7 tt/10fb⁻¹
非常に豊富な統計
- EWの重要なparameter

$$\Delta m_t = 1 \text{ GeV}$$

$$\Leftrightarrow \Delta \sin^2 \vartheta_{\text{eff}} = 3 \times 10^{-5}$$

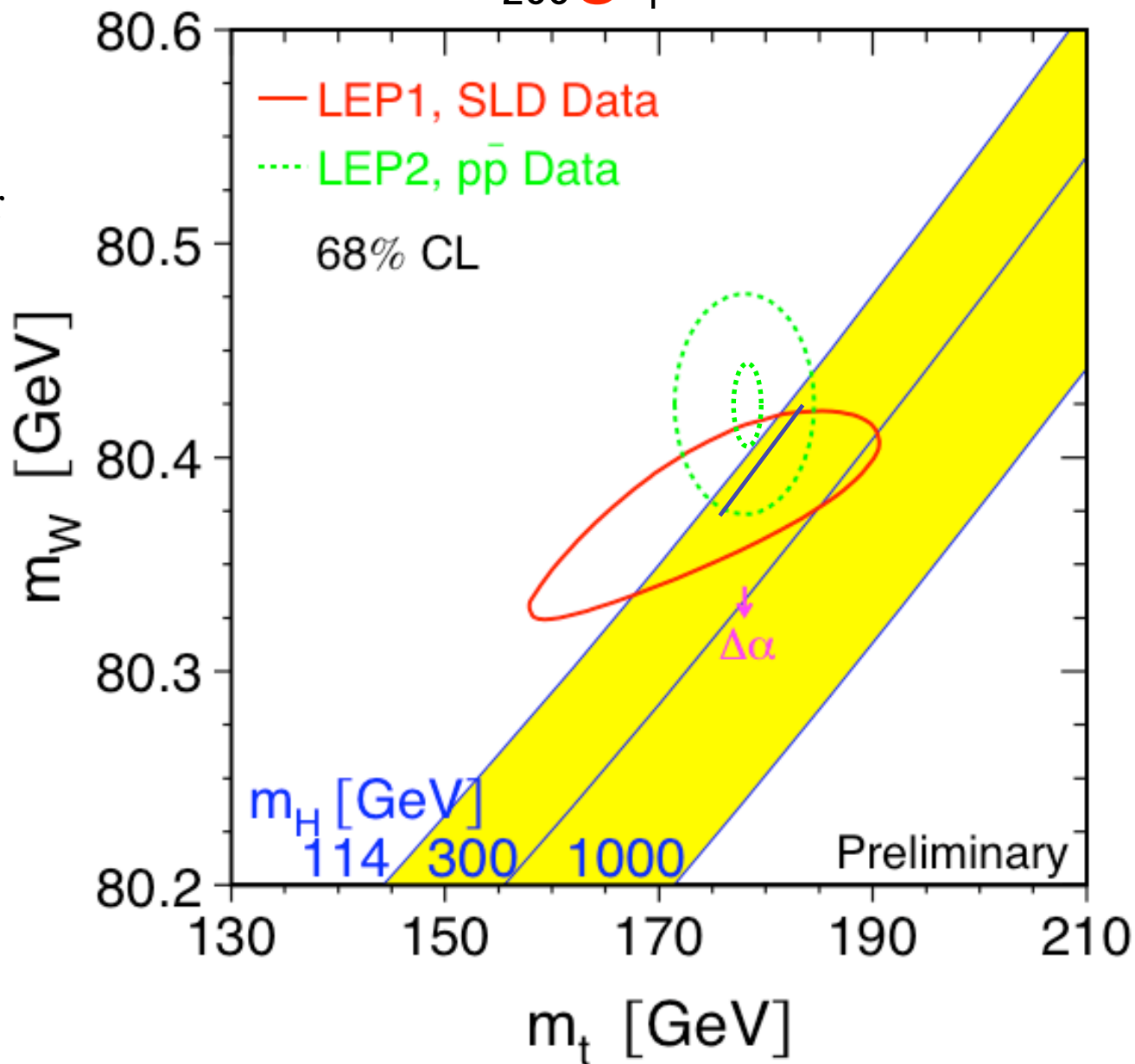
$$\Leftrightarrow \Delta m_W = 6 \text{ MeV}$$

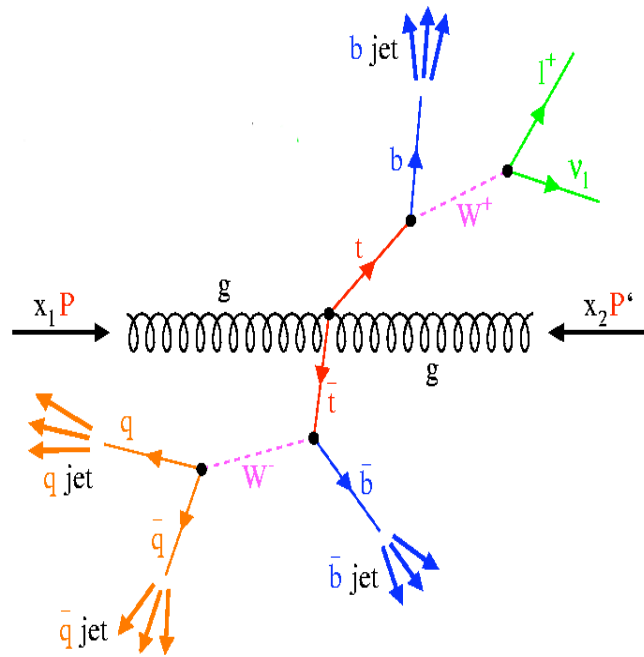
$$\delta M_t = 1 \text{ GeV}$$

$$\delta M_W = 15 \text{ MeV}$$

Higgs発見

2009年





Semi-leptonic decay channel

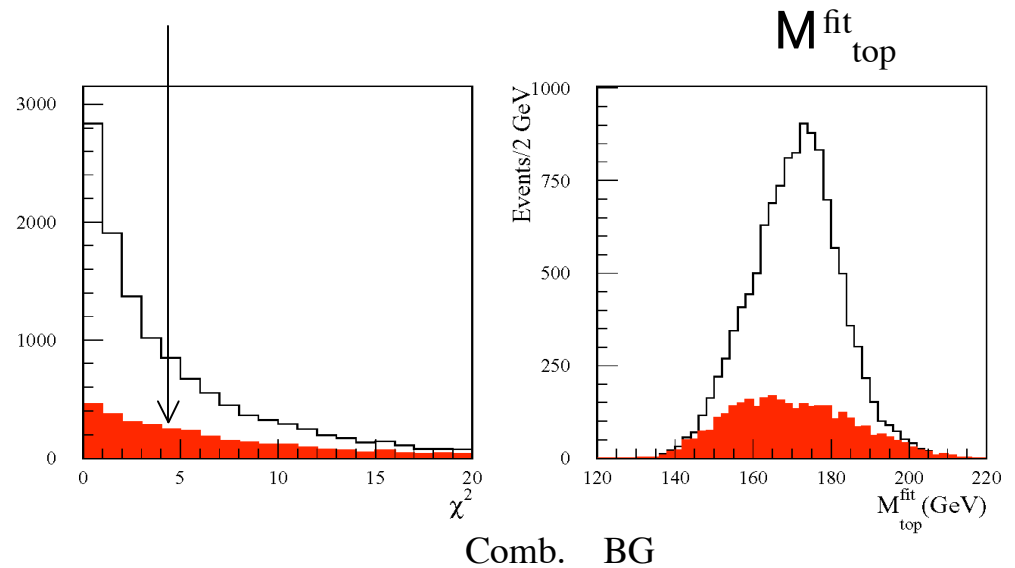
- $Br \sim 2 * 0.7 * 0.2 = 0.28$
- Jetの組み合わせの不定性小さい

Kinematic fitを以下の条件でかけて
 M_{top}^{fit} と χ^2 を求める。

$$m_{jj} = M_W^{PDG}, m_{lv} = M_W^{PDG}$$

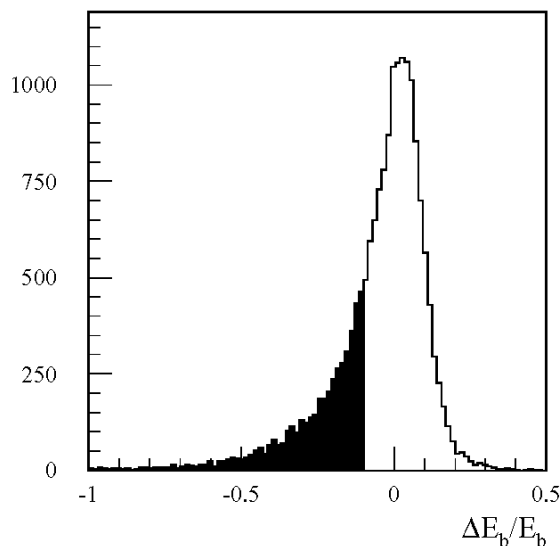
$$m_{jjb} = m_{lvb} = M_{top}^{fit}$$

$\chi^2 < 4$ がちゃんと出来た条件

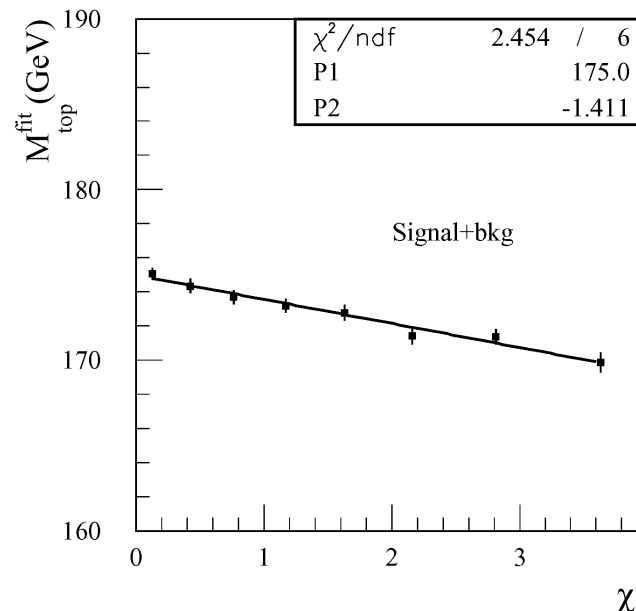


このまま M_{top} を fit でだすと、
以前同様に FSR の systematic error
が大きい (1.3 GeV)

χ^2 の悪い event を調べてみると
hard な FSR や ν を出している。
結果として Energy が低くなっている。



χ^2 の bin ごとに slice してそれぞれ
 M_{top} を fit する。十二分な統計がある
のでそれぞれの点でも十分な統計精度



$\chi^2 \rightarrow 0$ が M_{top} FSR の出方によらない。

Error Source	$\Delta m(\text{GeV})$
統計 (10fb ⁻¹)	0.1
q calibration 不定	0.2
ISR	0.1
FSR	0.5
b fragmentation	0.1
b calibration 不定(1%)	0.7 (まだ)
組み合わせ	0.1
合計	0.9 !!!!

0.9 GeV
の精度

B-physics at ATLAS/LHCb

(1) $B_d \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K_S^0(\pi^+\pi^-)$ を用いた $\sin 2\beta$ の測定

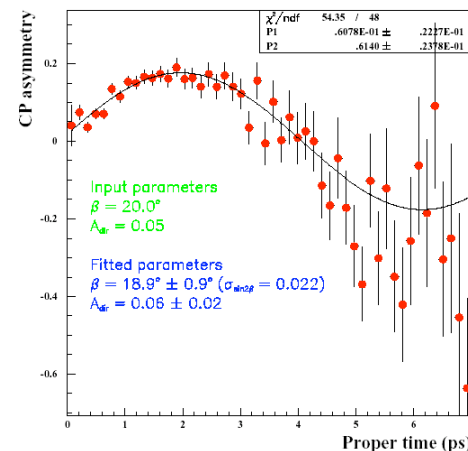
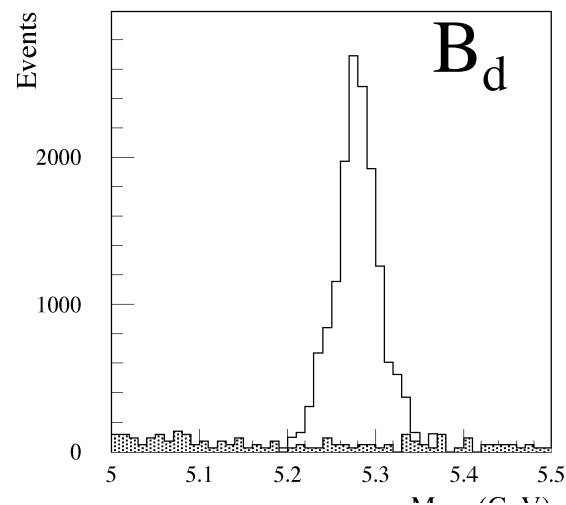
HLT:Pt>6GeV以上の2 μ 約10Hzで収集

- K_S^0 が再構成出来て、 B_d が再構成出来る。
S/B=32と非常に高い。
- 反対側のflavour tagは、semi-leptonic decayの Leptonをtagする方法($\epsilon D^2=0.7\%$)とleading π を使う方法($\epsilon D^2=2.4\%$)でtagする。
• 250k event/30fb⁻¹ と統計も高い

→ $\Delta\sin 2\beta=0.016$ (stat.) ± 0.005 (sys.)
2%の精度で $\sin 2\beta$ が測定可能

(約3年の測定)

上には上が、
LHCbは、B-physicsに特化した検出器：
low Pt trigger, RICH:K, π ,e, μ 分離
119kevent/2fb⁻¹ で、2%の測定を行う。



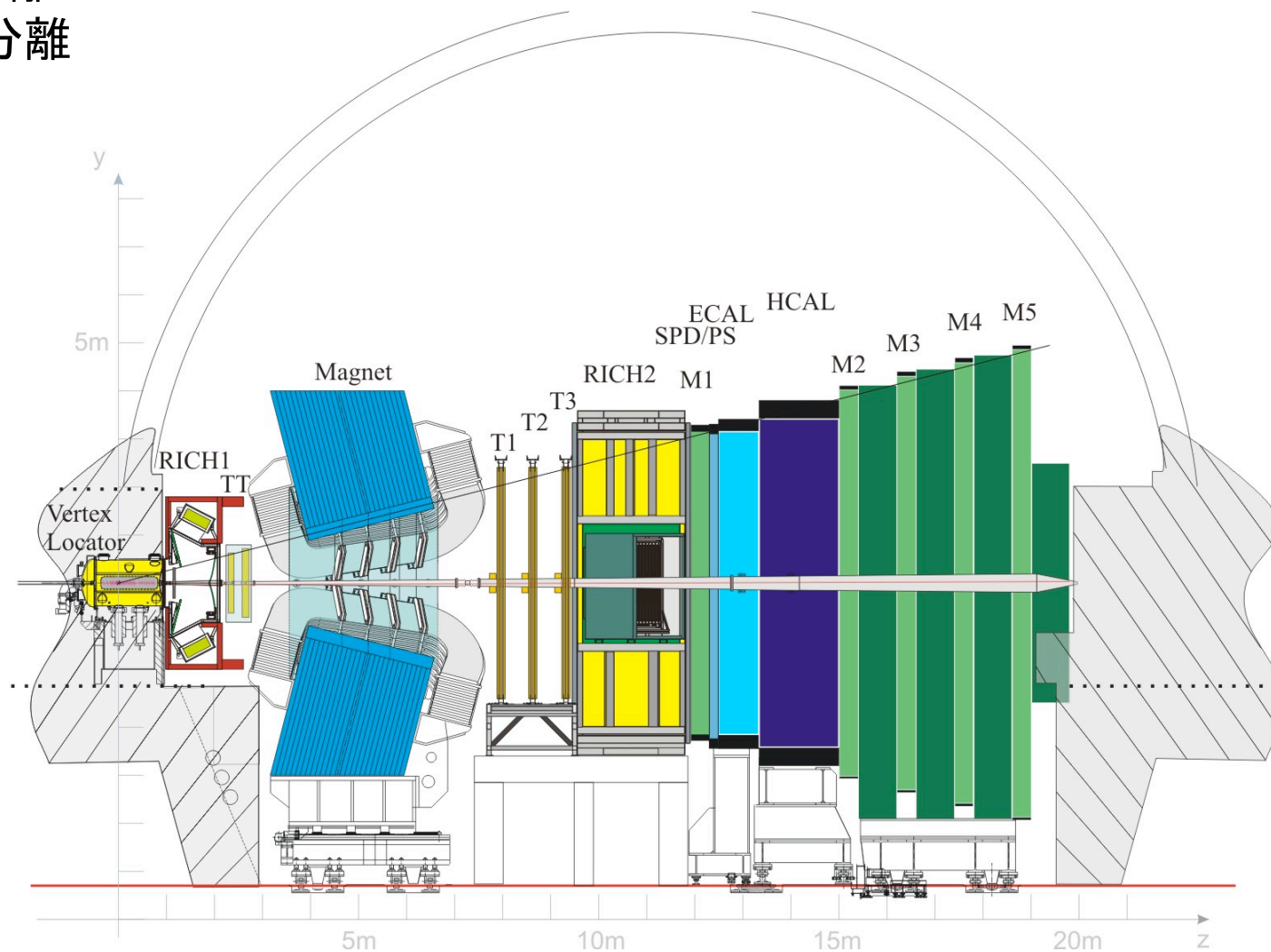
A $gg \rightarrow bb$ $500 \mu b$ の極めて大きな生成断面積

前方が多い:

LHCb前方に特化して

RICH K, π, μ 分離

特殊な磁場で分離



(2) Physics of B_s meson

Δm_s from $B_s \rightarrow D_s p$ and $B_s \rightarrow D_s a_1$

·30ps⁻¹まで検出可能(LHCb 58ps⁻¹)

·0.05ps⁻¹の精度で測定可能 $\Delta m_s \sim 12\text{ps}^{-1}$

(3) Rare decay $\text{Br} \sim 10^{-9}$

	Signal $B_s \rightarrow \mu\mu$	Signal $B_d \rightarrow \mu\mu$	BG
ATLAS	92	14	660

纏め

LHC実験は、2007年実験開始に向けてすすんでいる。
二つの大きな目的

- 質量の起源であるHiggsは、2008-2009 (10fb^{-1}) で 5σ 発見可能
質量の測定精度 0.1% 結合定数の比は、5 – 15 %程度で測定
- SUSYもすぐに発見可能。mSugra 2008年 2TeVまで発見可能
DMの面白いところなど 2007年に (? !)
Massの測定も可能(いいdecay chainがあれば、model independentだが、)
- 数TeVまでの余次元がある場合も発見可能

2007年に、TeV領域の新しい物理が切り拓かれる。