

Endingと言うことなので、

LHCのその後

$L \sim 300\text{fb}^{-1}$ 2013,4年頃を想定

1. Higgs の性質研究と 電弱の破れの理解
2. 超対称性粒子の研究と破れの理解
3. その他のモデル
4. 纏め

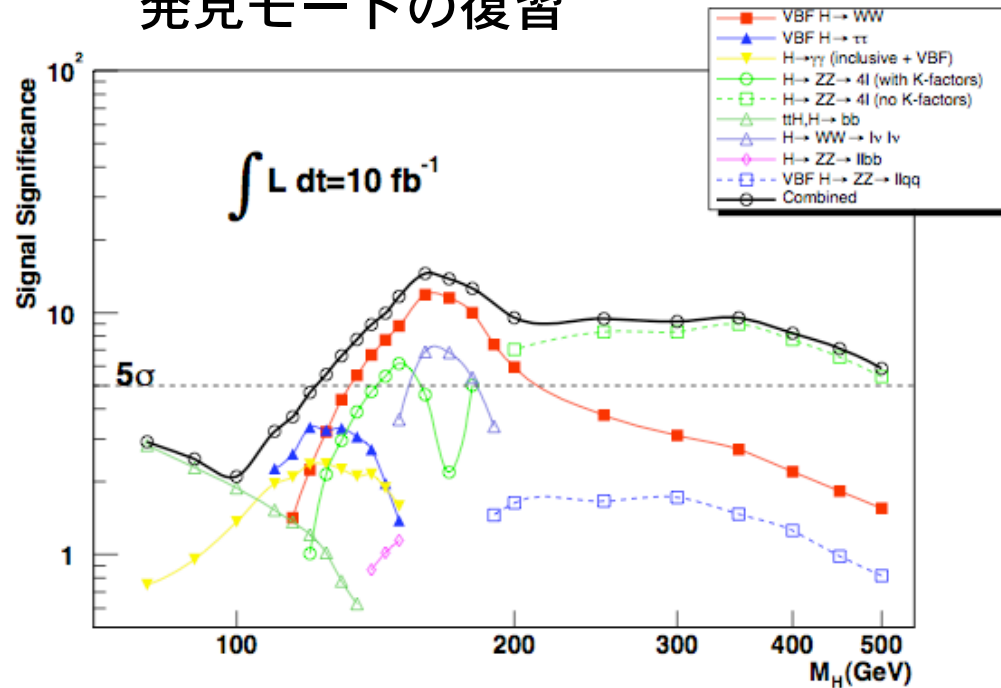
[1] Higgs機構のcriticalなテストが可能

Higgsの発見(2008,9年)

->LHCの次のタスクは、

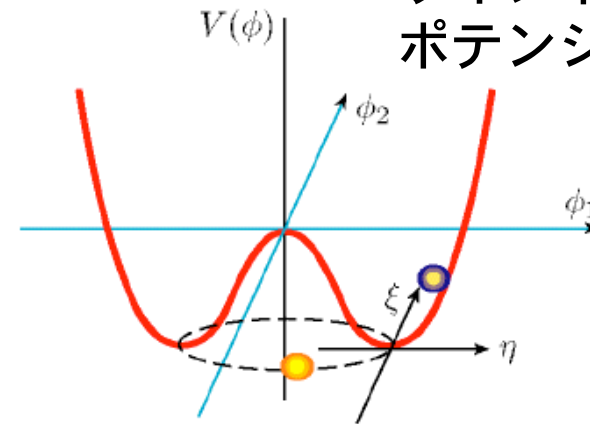
電弱破れの理解
質量起源の理解

発見モードの復習



軽い所(<140GeV) $H \rightarrow \gamma\gamma$
 VBF $H \rightarrow \tau\tau$
 重い所(>130GeV) $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
 VBF $H \rightarrow WW$

ワインボトルのポテンシャル



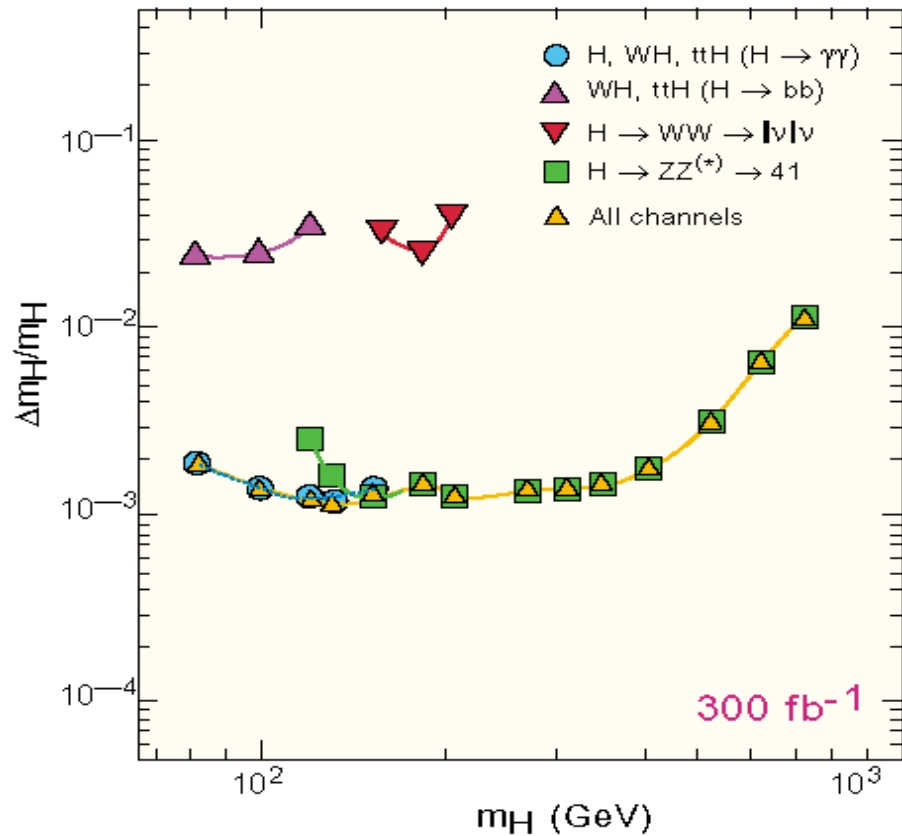
このPotentialの形:
 $\langle v \rangle, \lambda$ を決める。

質量が結合定数に比例?
 検証

まず、Higgsの質量測定

$$m = \sqrt{2\lambda v} \quad (\text{4次の係数と真空期待})$$

Precision on SM Higgs mass



不変質量のpeakから正確な測定

$H \rightarrow \gamma\gamma$ ($m(H) < 140 \text{ GeV}$)

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow llll$ ($m(H) > 130 \text{ GeV}$)

0.1%程度の精度 $M(H) < 400 \text{ GeV}$

この精度は、
検出器の絶対calibrationの精度
が主なsystematic error

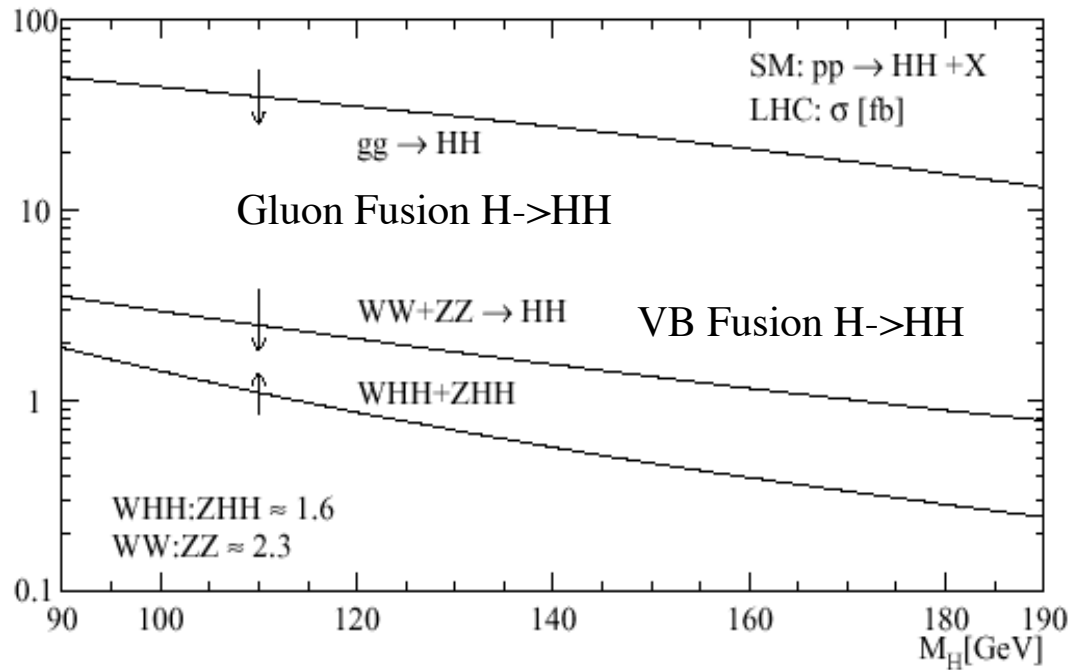
重くなるとHiggsの自然幅が
効いてくる為、精度悪化：

$\Gamma = 50 \text{ GeV}$ for 500 GeV

λをHiggs-Higgs結合定数から調べる

Higgs Self-couplings

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



σが小さい：10fb程度 (10^{-3})
Need very High Luminosity
→ SLHC

For **6000 fb⁻¹** (SLHC)
 $\Delta\lambda \sim 19\%$ for 170 GeV M_H

4点結合は無理

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

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

物質質量の起源 Higgs: W/ZやFermionとの結合定数

Higgsとfermion/Bosonの結合定数とモードの関係

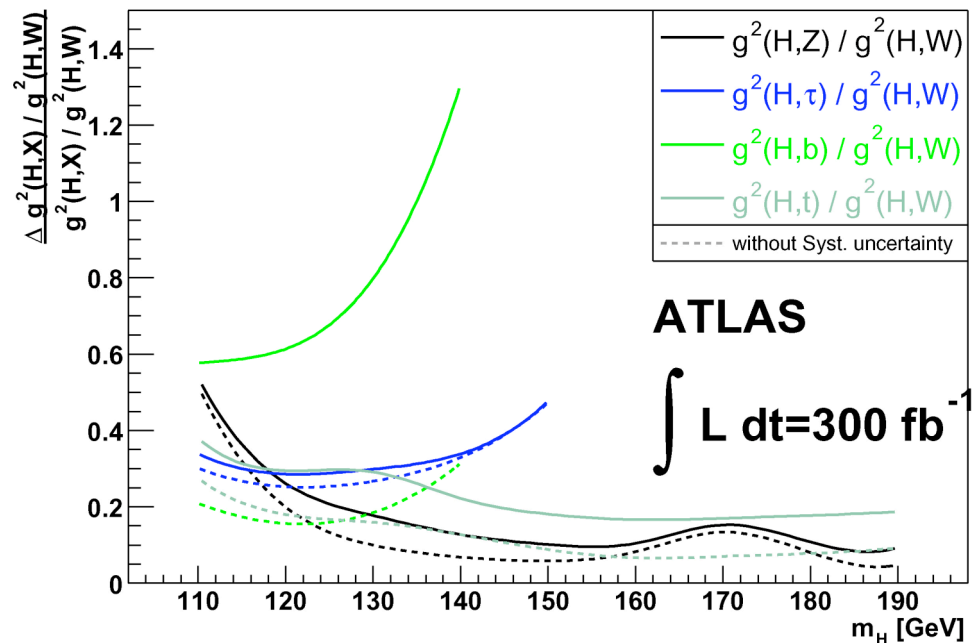
Decay modes (H < 150 GeV)

Production modes	Decay modes				
	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg→H	×	×	$Y_t/G_W Y_t$	×	Y_t/G_Z
VBF	×	$G_{WZ} Y_{\tau}$	$G_{WZ}/G_W Y_t$	$G_{WZ} G_W$	$G_{WZ} G_Z$
ttH	$Y_t Y_b$	$Y_t Y_{\tau}$	-----	----	-----
WH	×	×	-----	----	-----

Relative coupling
(Normalized to g(WH))

軽い所 (< 140 GeV)
fermionとの結合は測定可能：
W/Zとの結合はVBFから

重い所 (> 140 GeV)
W/Zへの崩壊が主
fermionとの結合は難しい
Topとの結合はGF loopから



物質質量の起源 Higgs: W/ZやFermionとの結合定数

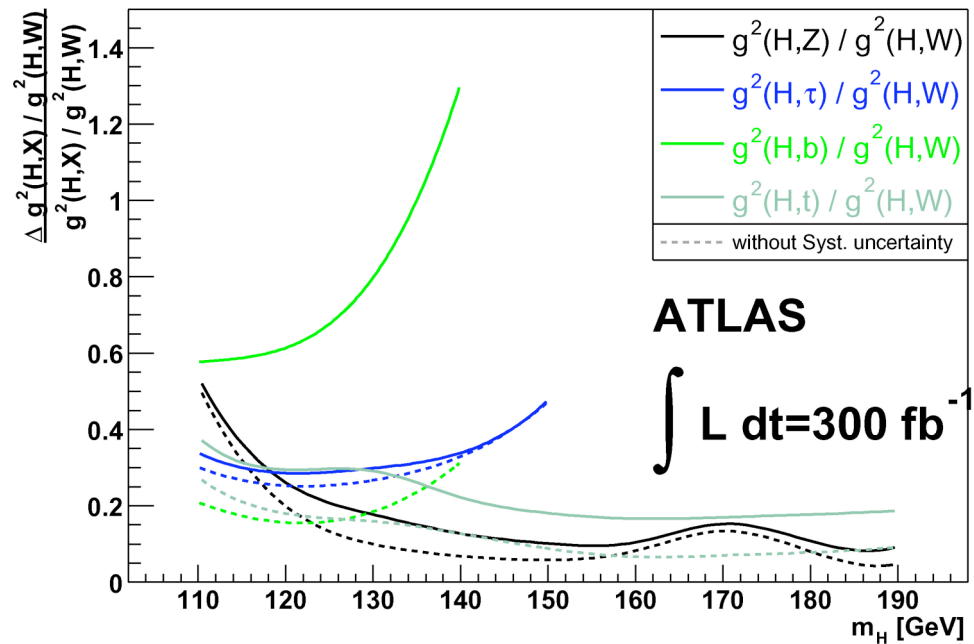
Higgsとfermion/Bosonの結合定数とモードの関係

Decay modes (H < 150 GeV)

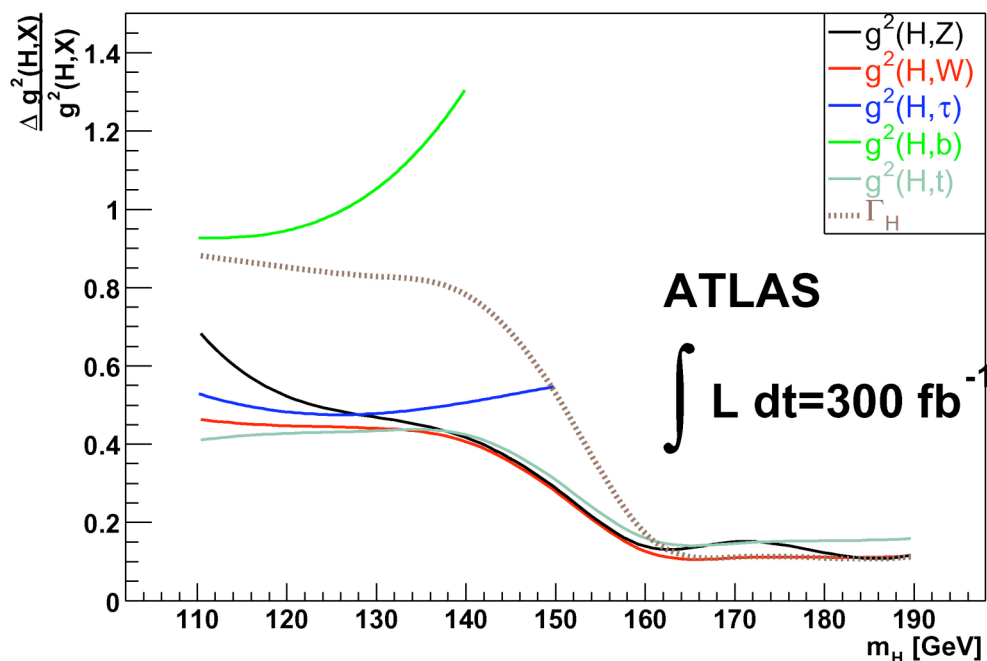
Production modes	Decay modes				
	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg→H	×	×	$Y_t/G_W Y_t$	×	Y_t/G_Z
VBF	×	$G_W Y_{\tau}$	$G_W/G_W Y_t$	$G_W G_W$	$G_W G_Z$
ttH	$Y_t Y_b$	$Y_t Y_{\tau}$	-----	---	-----
WH	×	×	-----	---	-----

Relative coupling
(Normalized to $g(WH)$)

- Y_t, Y_{τ} 10-15%
- Y_b 30-40%
- G_Z 5-10%



比ではなくて、絶対測定の精度

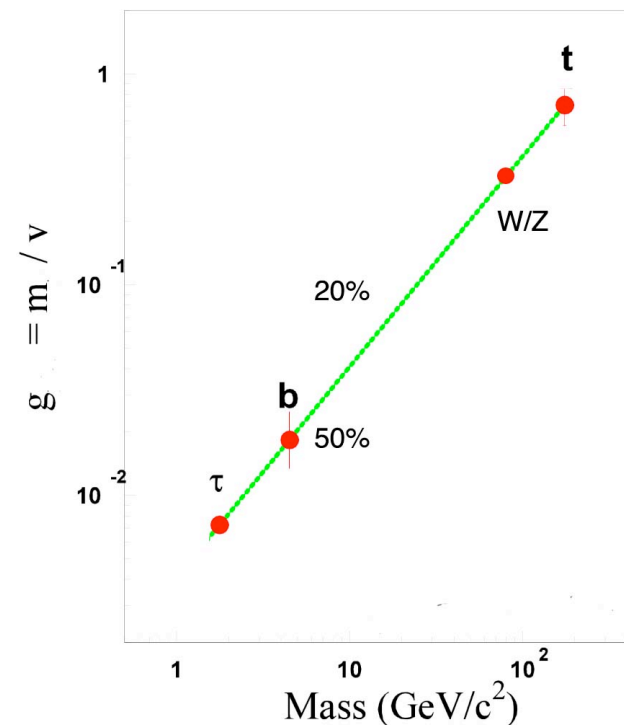


Br(H->tautau,tt,bb,ZZ and WW) は測定し、他のモードの分岐比はSMを仮定します。

測定精度は、(140GeV)

y_t, y_τ, g_{ZZH} and g_{WWH} 20%
 y_b 50%

質量と結合が比例していることをこの精度で示すことが可能



精度 20%程度で
質量起源の理解

ゲテモノ Higgsにも対応出来る：
Gauge bosonとしか結合しない時 ($H < 150\text{GeV}$)

Decay modes

Production modes

	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg→H	×	×	Discovery Mass 間接的 Y_t	×	140GeV以上 ならDiscovery mass
VBF	×	Discovery Y_τ	Discovery	130GeV以上 ならDiscovery	140GeV以上 ならDiscovery mass
ttH	Y_t	Y_t, Y_τ (高いL)	-----	-----	-----
WH	×	×	-----	-----	-----

× : BG too high -----: σ * Br too small

VBFがよく見える。(tautauはない) 一方 GF,ttHが押さえられる。

—> fermionのmass起源は別物

Higgsとは言えないですが

反対にfermionとしか結合しない時 ($H < 150\text{GeV}$)

Decay modes

Production modes

	bb	$\tau\tau$	$\gamma\gamma$	WW	ZZ
gg → H	×	×	Discovery Mass 間接的Yt	×	140GeV以上 ならDiscovery mass
VBF	×	Discovery Y _τ	Discovery	130GeV以上 ならDiscovery	140GeV以上 ならDiscovery mass
ttH	Y _t	Y _t Y _τ (高い止)	-----	-----	-----
WH	×	×	-----	-----	-----

× : BG too high -----: σ * Br too small

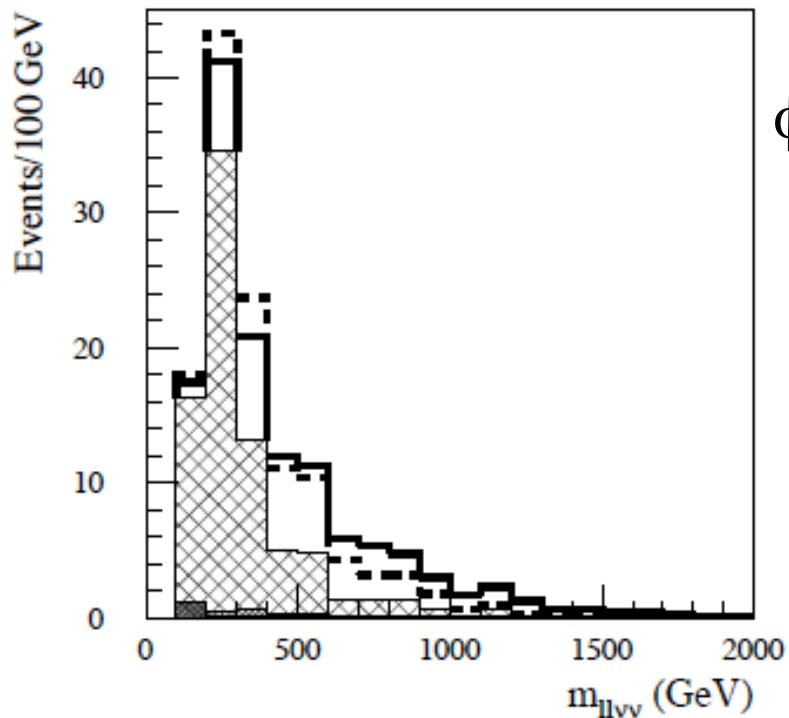
Luminosityがあれば、この様なゲテモノもOK

VBFが見えなくて、ttH, GF H → γ γ

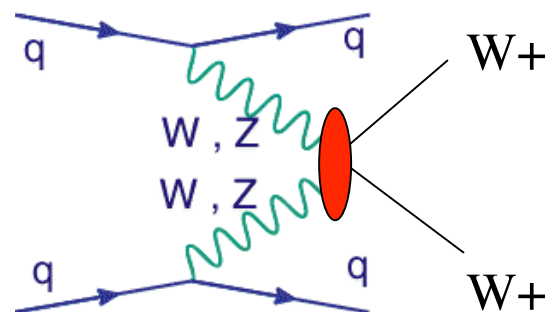
それでも何にも見えない時
Higgsがない：強結合EWSB

$$W_L W_L @ \sqrt{\hat{s}} \approx 1\text{TeV}$$

No high Pt jet in Central
Same sign dilepton + missing



いろいろな強結合モデルがあるが、一般的に
 $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$ が大きくなる

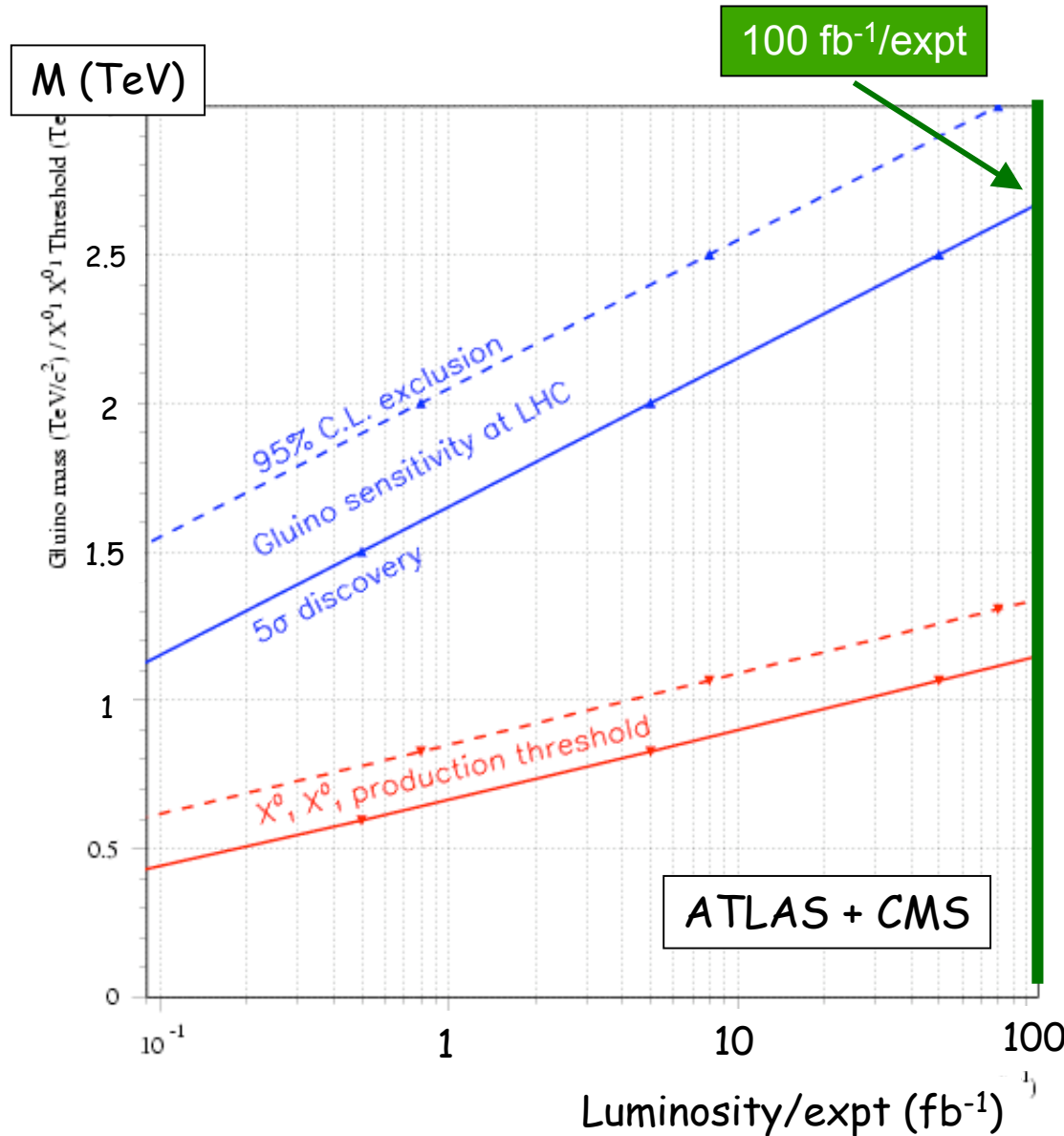


LHC $u \rightarrow d W^+$

もし、強結合シナリオだったら
「歴史は、やっぱり繰り返した」

BG: W Brem が両方で起きた、 $ZW \rightarrow 3\text{lepton}$

[2] SUSYについて:



With $L=100 \text{ fb}^{-1}$

\tilde{q}, \tilde{g} Up to 2.7 TeV

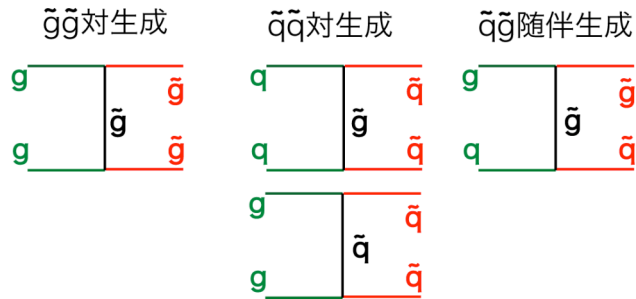
(3.1 TeV for 95% CL exclusion)

Naïve GUTの仮定すると
EW Gaugino $O(1 \text{ TeV})$

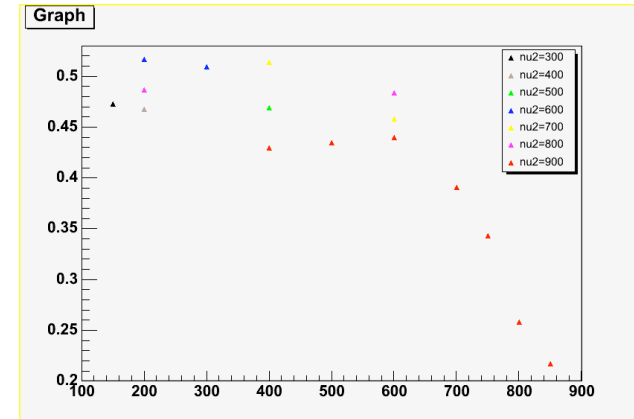
$$\begin{aligned} \tilde{g} &\approx 3000 \text{ GeV} \\ \tilde{\chi}_1^\pm &\approx 1000 \text{ GeV} \\ \tilde{\chi}_1^0 &\approx 500 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Naturalness を考えると
SUSYのcrucialな
テストが可能

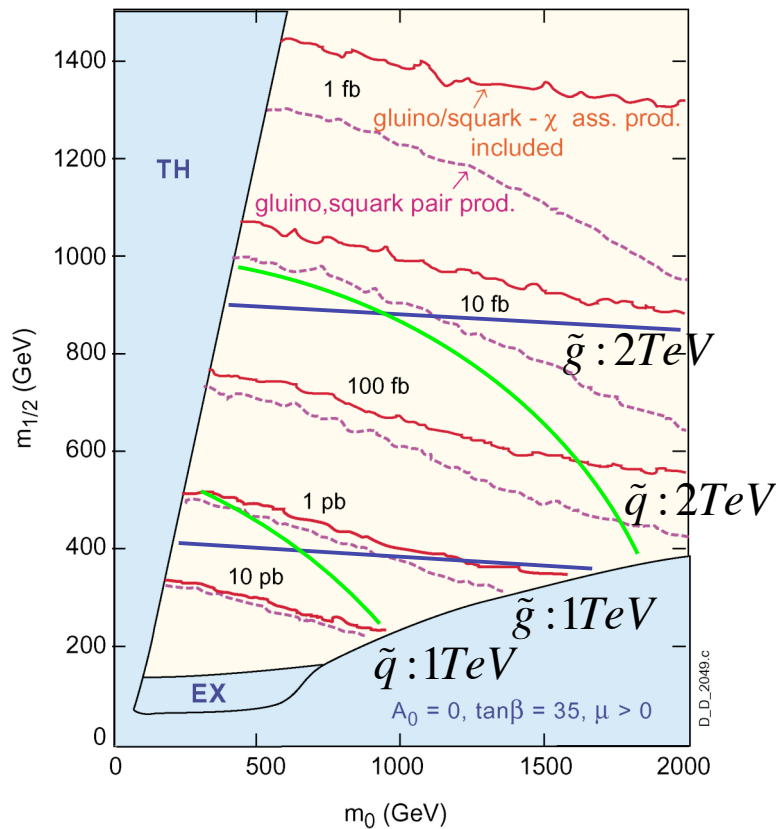
LHCの能力がモデルに著しく依存したSUSYしかカバーできないか？



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

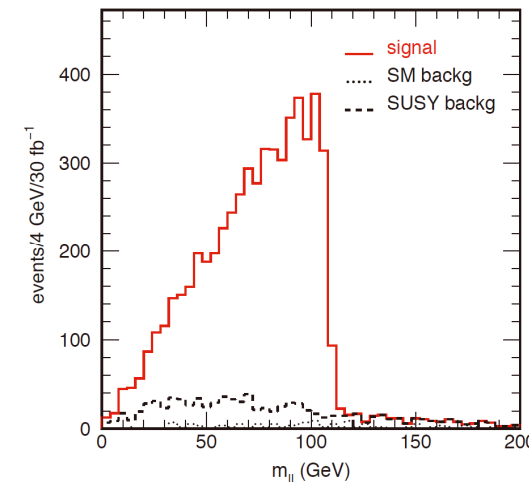
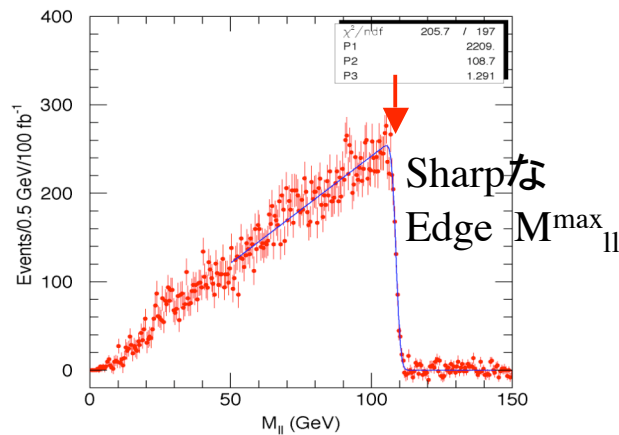
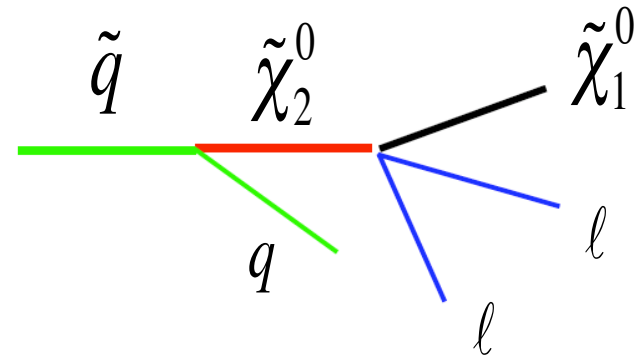
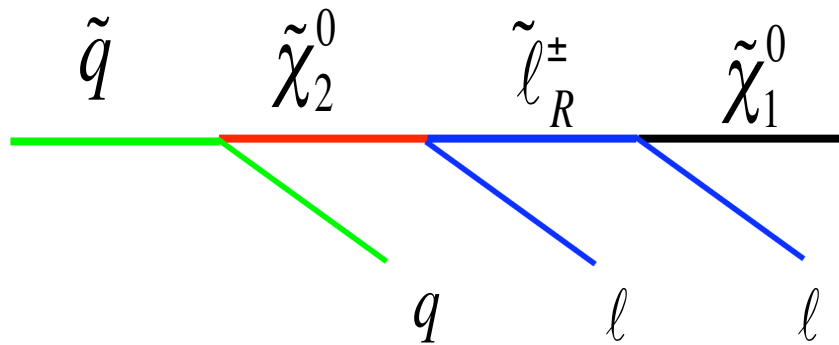


一方崩壊の違いによる
 Efficiencyの違いは小さい。
 効くのは、LSPとのmass differenceが主:
 $\Delta M(\text{coloured vs LSP})=400\text{GeV}$ くらいまでは安定
 300GeVくらいから急激に小さくなる。
 mET分布がきつくなる。

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。

質量の再構成に関して

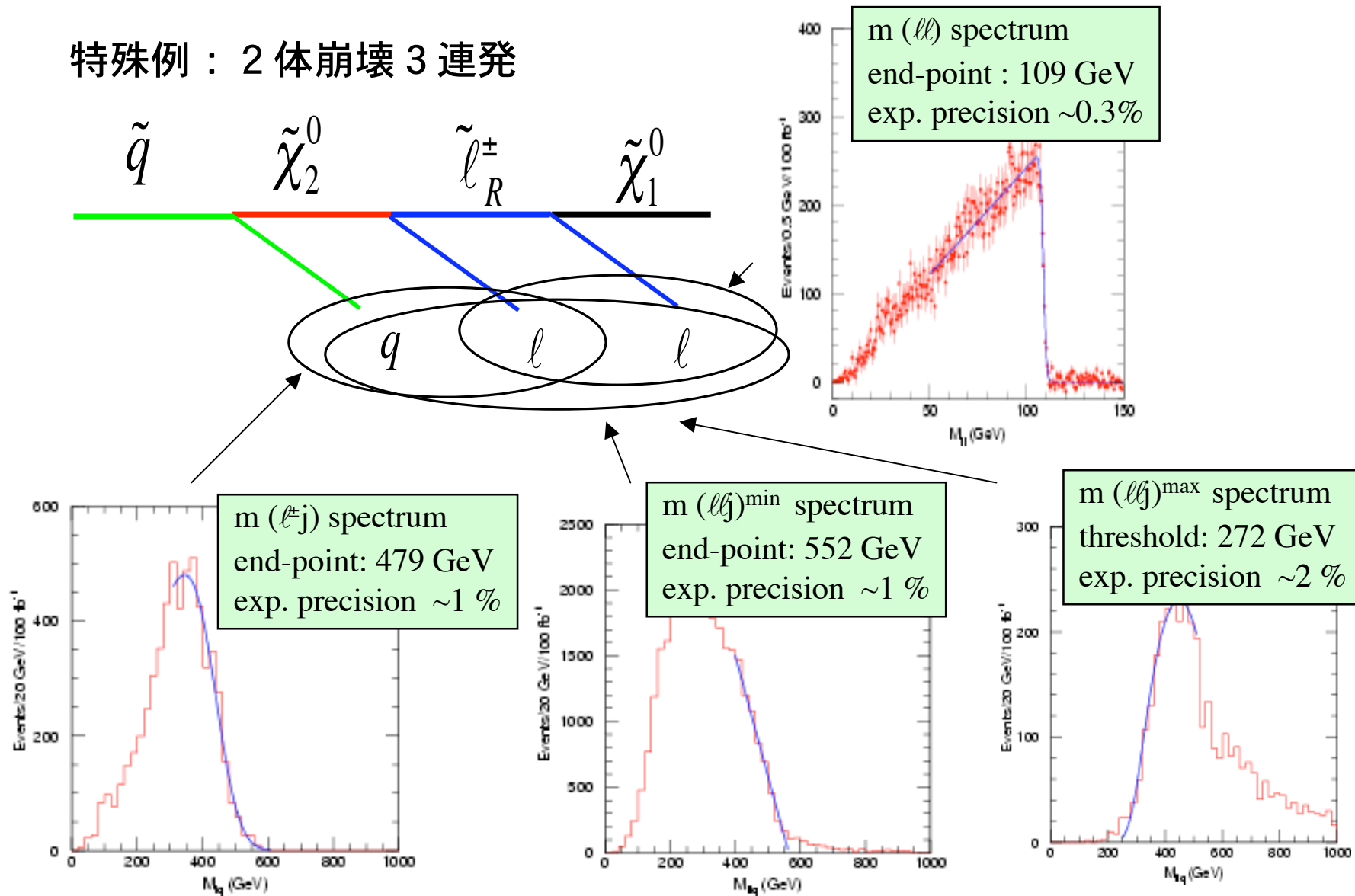
1. 適当なdecay chainを選ぶ (**key point!**)
(綺麗か? 他のSUSY Decay chainからのゴミ?)
2. mass や P_T などのkinematic distributionを作る
3. Edgeやendpointからmassの関係に束縛を与える -> 一般にmodelの助けをかりてmassを決定



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

$$M_{ll}^{\max} = m(\tilde{\chi}_2^0) - m(\tilde{\chi}_1^0)$$

特殊例：2体崩壊3連発



4未知数 4条件 \rightarrow model independentにmassが決まる。
 (3-12%程度 for 700-800 GeV squark, gluino) 1TeVくらいまで

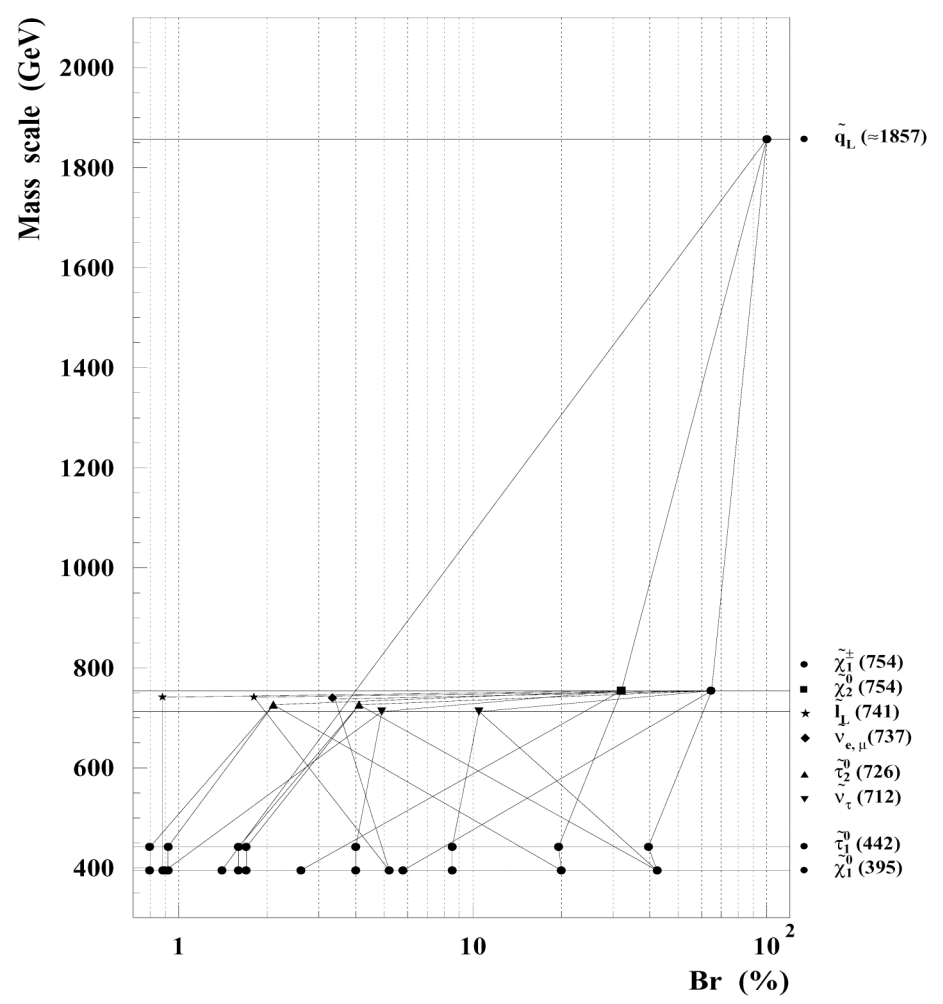
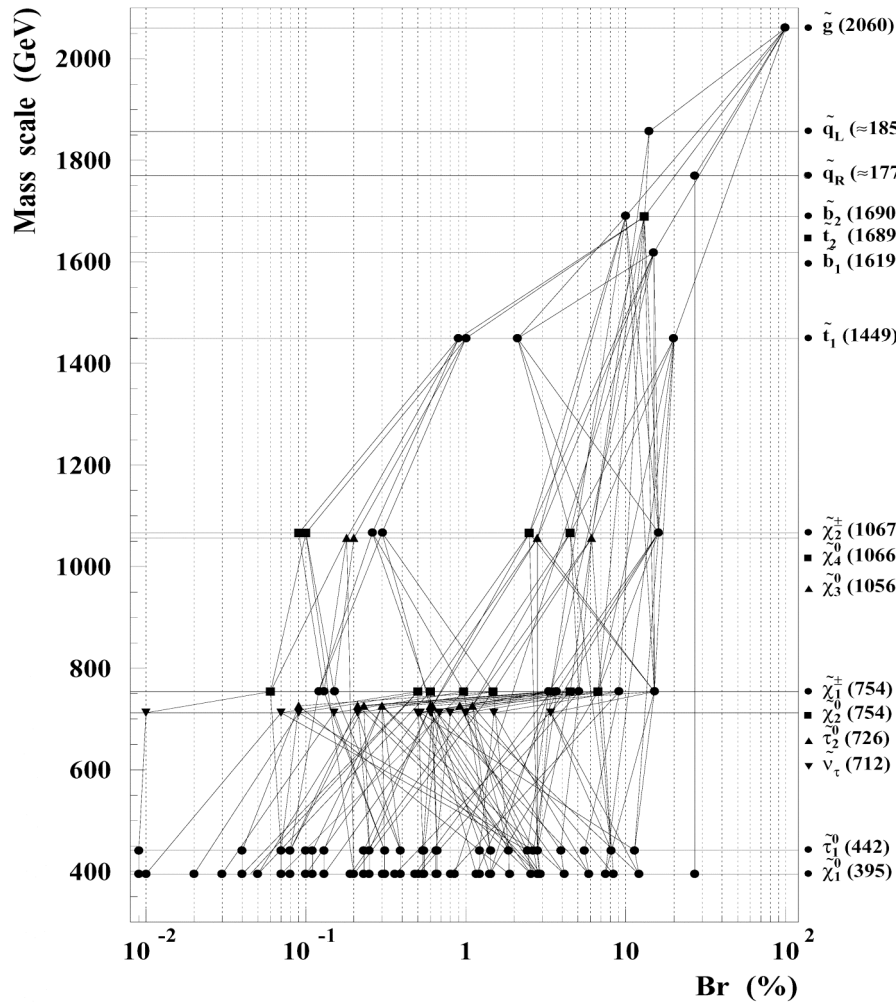
崩壊分岐比や結合定数の測定 -> ほぼ不可能

Decay Chain

gluino

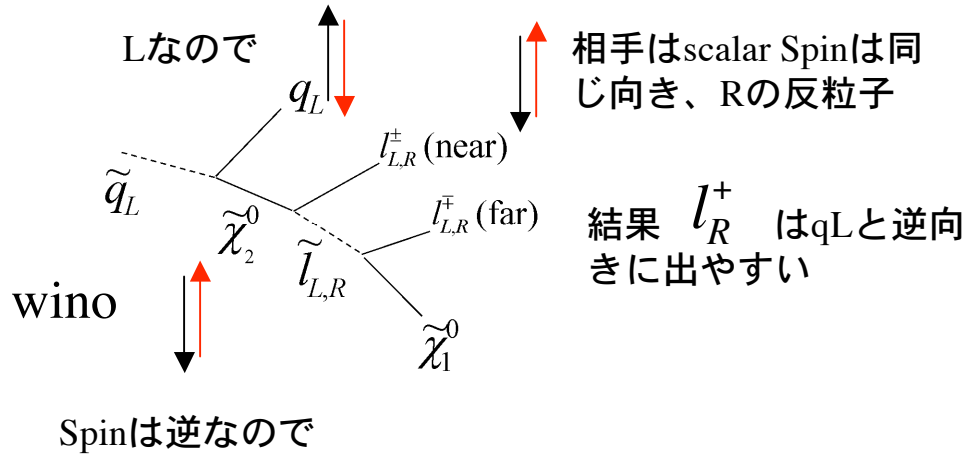
Squark_L

(tanβ=35)

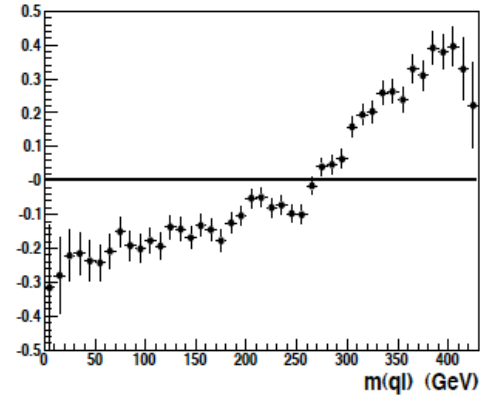


3rd Generation(stop,sbottom) が軽くなる Yukawa結合する higgsino成分へ 2段増える

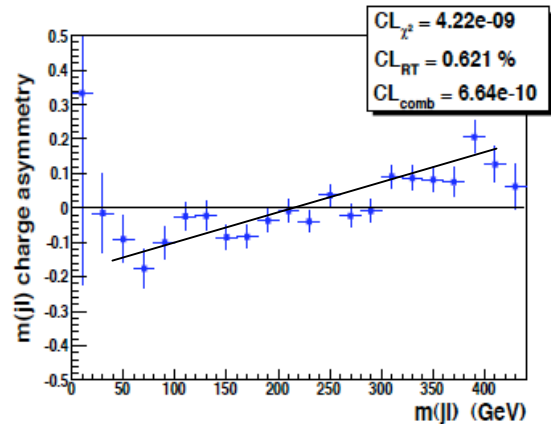
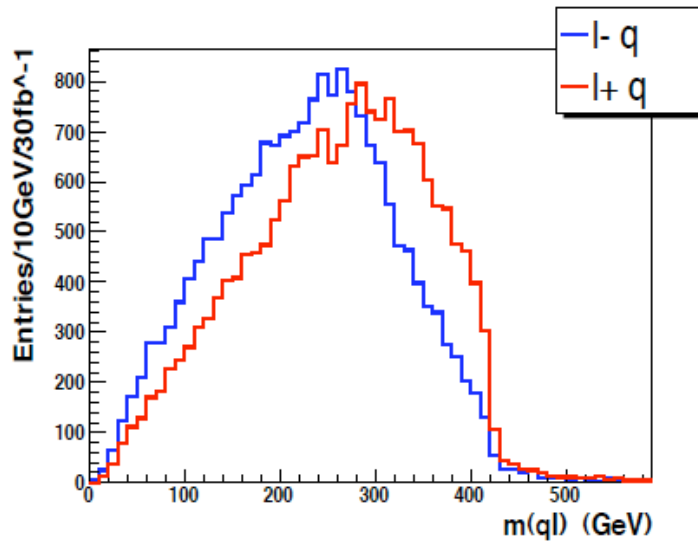
SUSYの証明 Spin測定($\tilde{\chi}_2^0$)



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



パートンレベル

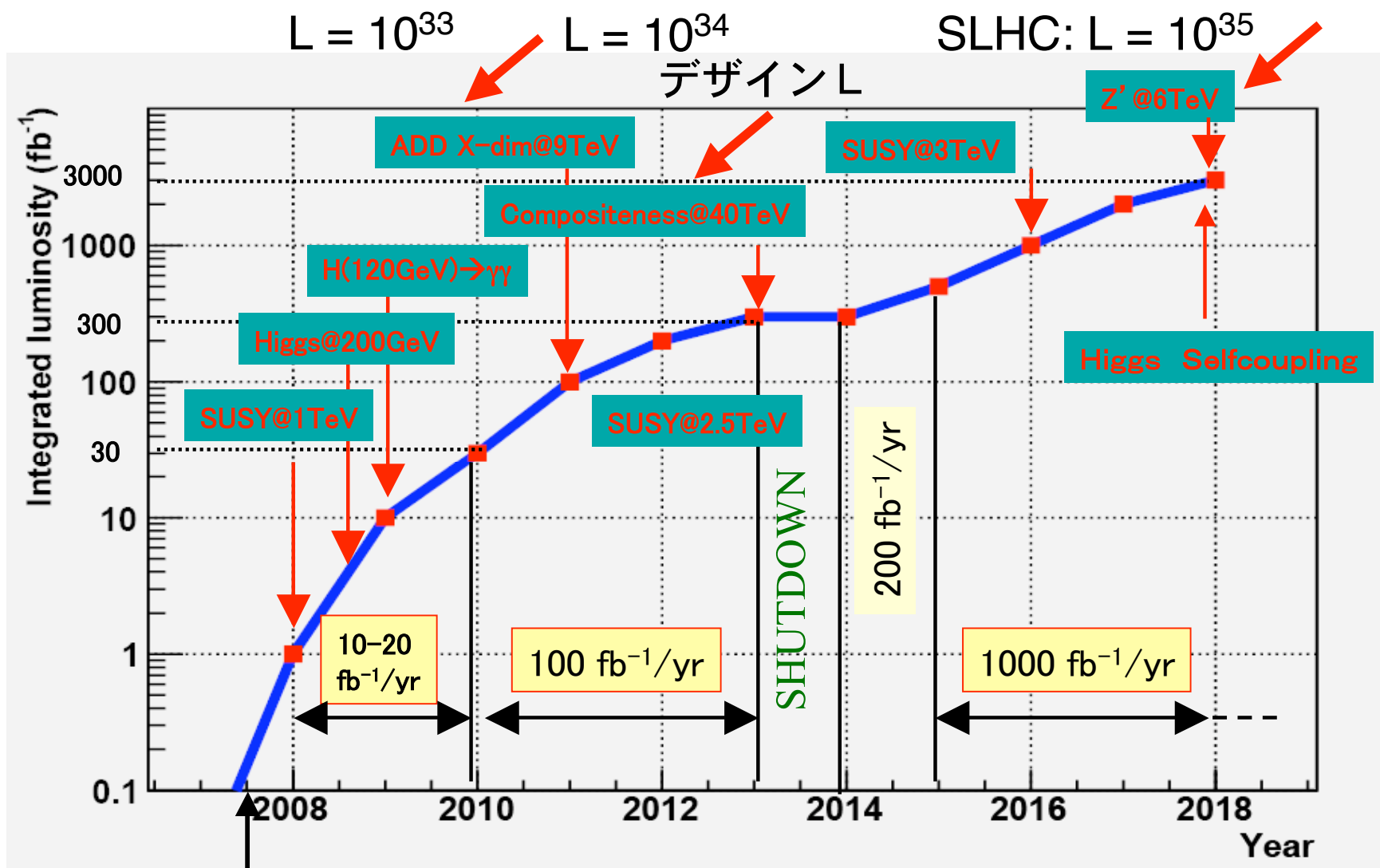


LHCはPPなので
 $N(\tilde{q}_L) > N(\tilde{q}_L)$

Fast Simulation

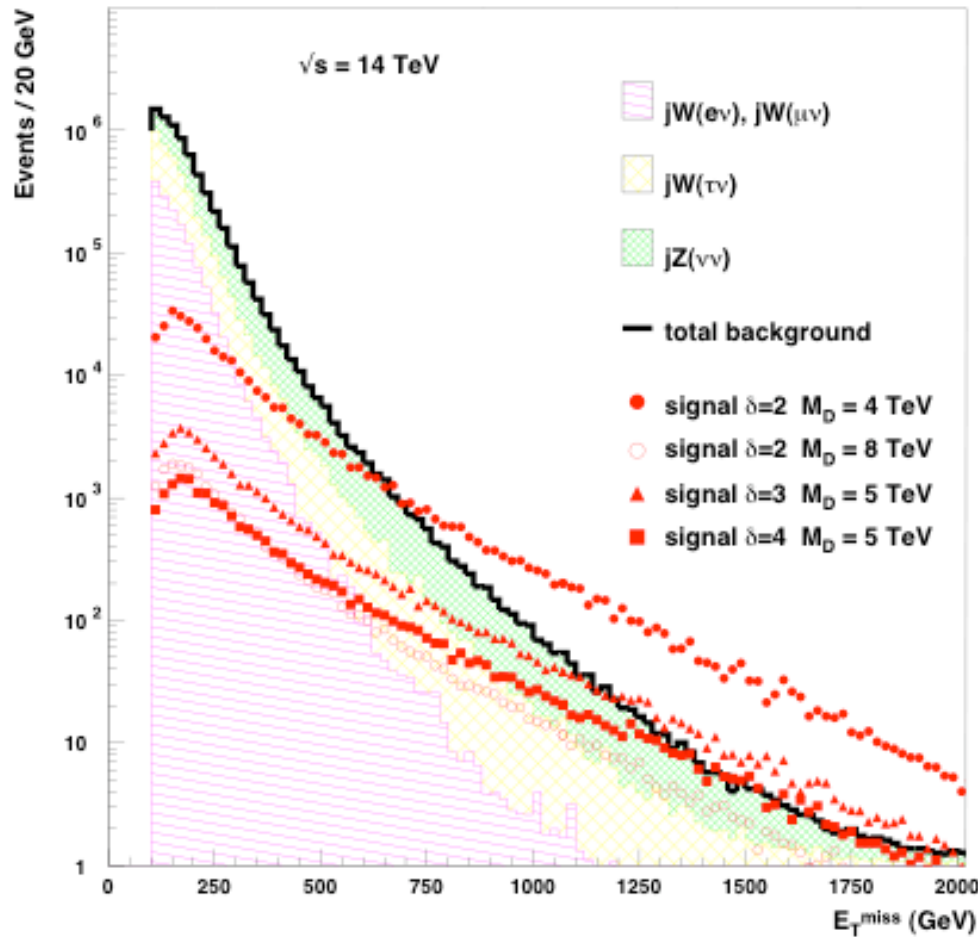
m_0 が小さい2body decay chainの時可能

[3] その他の新しい物理現象



KK gravitonグラビトンもグルオン並の結合 $gg \rightarrow gK$ (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

Top/Wの質量測定

- 10^8 tt 10^9 W(\rightarrow lnu)/100fb $^{-1}$
非常に豊富な統計
- EWの重要なparameter

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

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

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

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

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

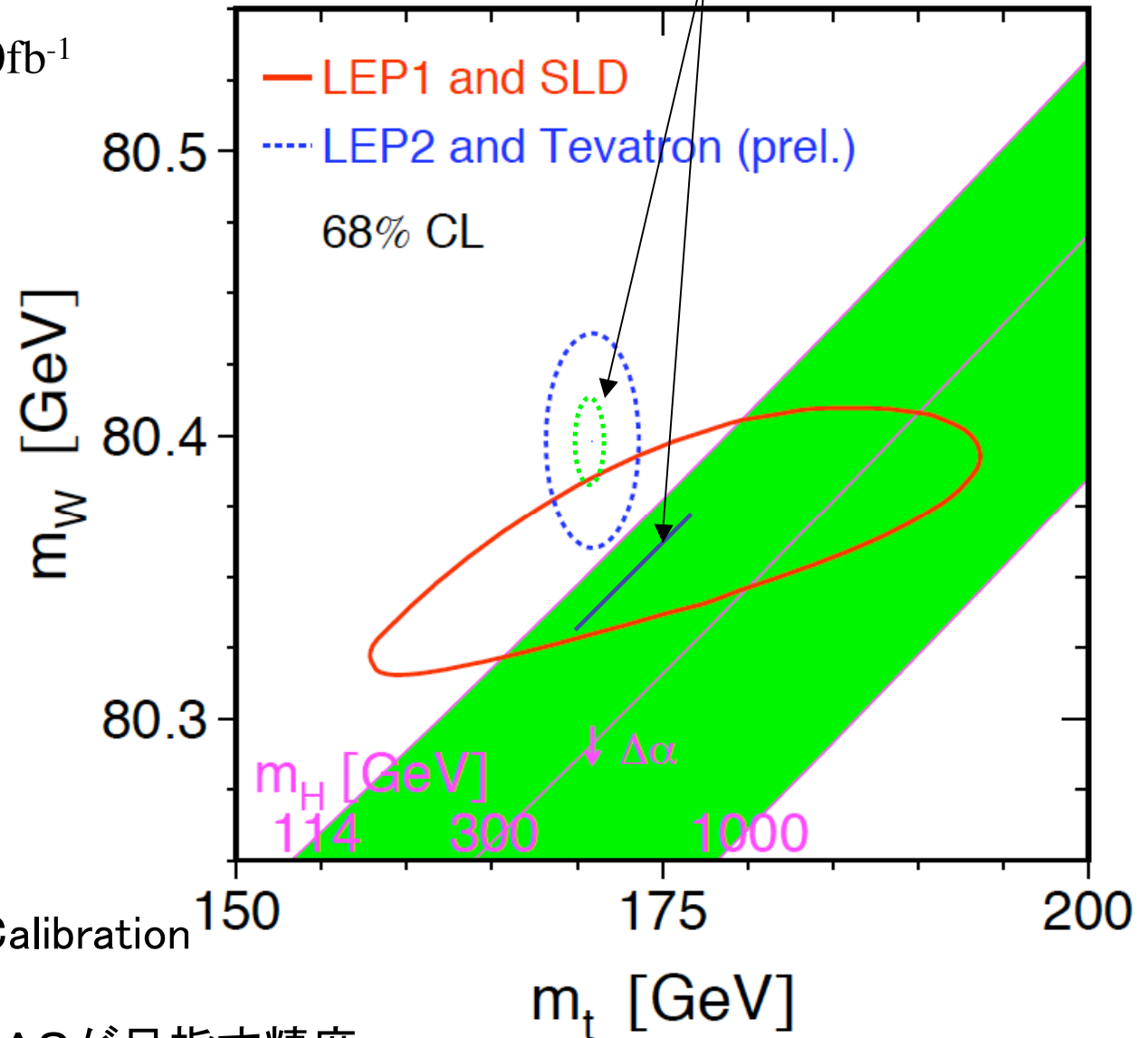
$$\delta M_H = 100\text{MeV}$$

一番鍵:絶対EスケールCalibration

EM, muon (0.02%)

Jet/B-jet (1%) ATLASが目指す精度

2007 & 201X年



ずれ ?? SUSY 輻射補正 consistent?

纏め LHCは、四半世紀ぶりに物理の新しいページを拓く

2010年頃は、

- (1) Higgsも見つかり
- (2) SUSYも見つかっている(a few TeVまで)
- (3) 「QGP」も（「なんらかの理由」で見つかったとは言わないかもしれなが）

そんな薔薇色の2010年頃を夢見る国際会議のお知らせ

特定領域科研費「ヒッグス粒子と超対称性の発見が切り拓く21世紀の素粒子物理学」による国際会議

「Supersymmetry in 2010s」

日時：6月20日（水）～22日（金）

場所：北海道大学

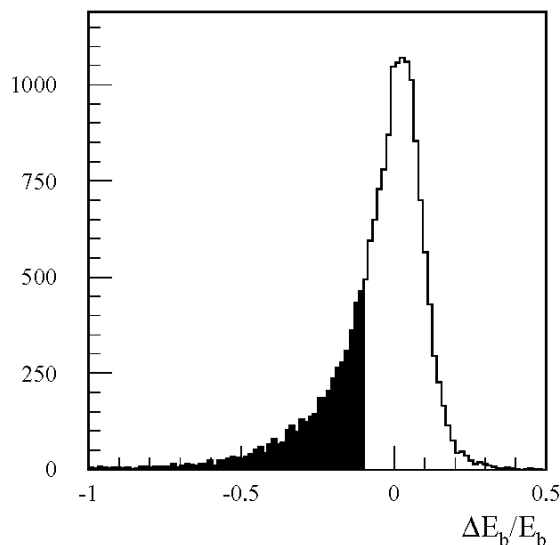
LHCで「超対称性」が発見されると、素粒子・宇宙物理学の分野での飛躍的な発展が期待されます。本会議の目的は、その発展を展望し、超対称性発見後（2010年以降）の物理を俯瞰するというもので、以下のsubjectを予定しています。

- (1) 最近の超対称性理論の展開
- (2) LHC・ATLAS実験での超対称性の早期発見に向けてストラテジーと準備
- (3) SUSY発見後の理論展開とILCでの超対称性研究
- (4) SUSY発見後のフレーバー物理
- (5) SUSY発見後のDark matter物理とアストロ・宇宙物理・ニュートリノ物理
- (6) Proton-decay/バリオン数への効果/EDMなど低エネルギー実験

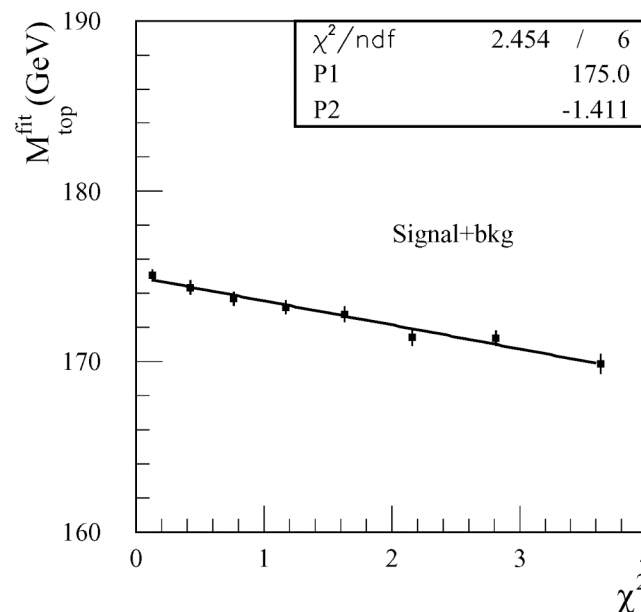
一般講演・ポスター講演の公募も行いますので、皆様奮ってご参加ください。詳しくは近いうちに、お知らせします。

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



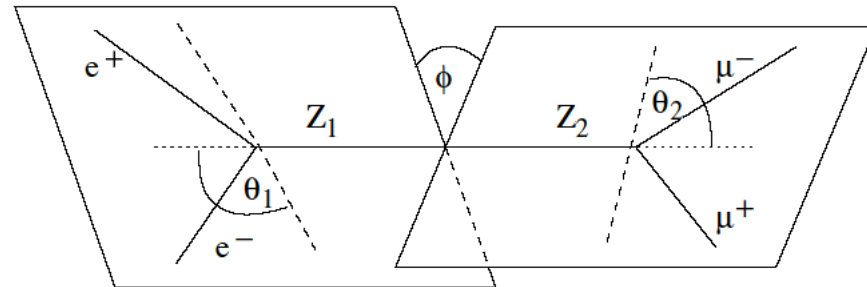
$\chi^2 \rightarrow 0$ が M_{top} FSR の出方によらない。

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 !!!!

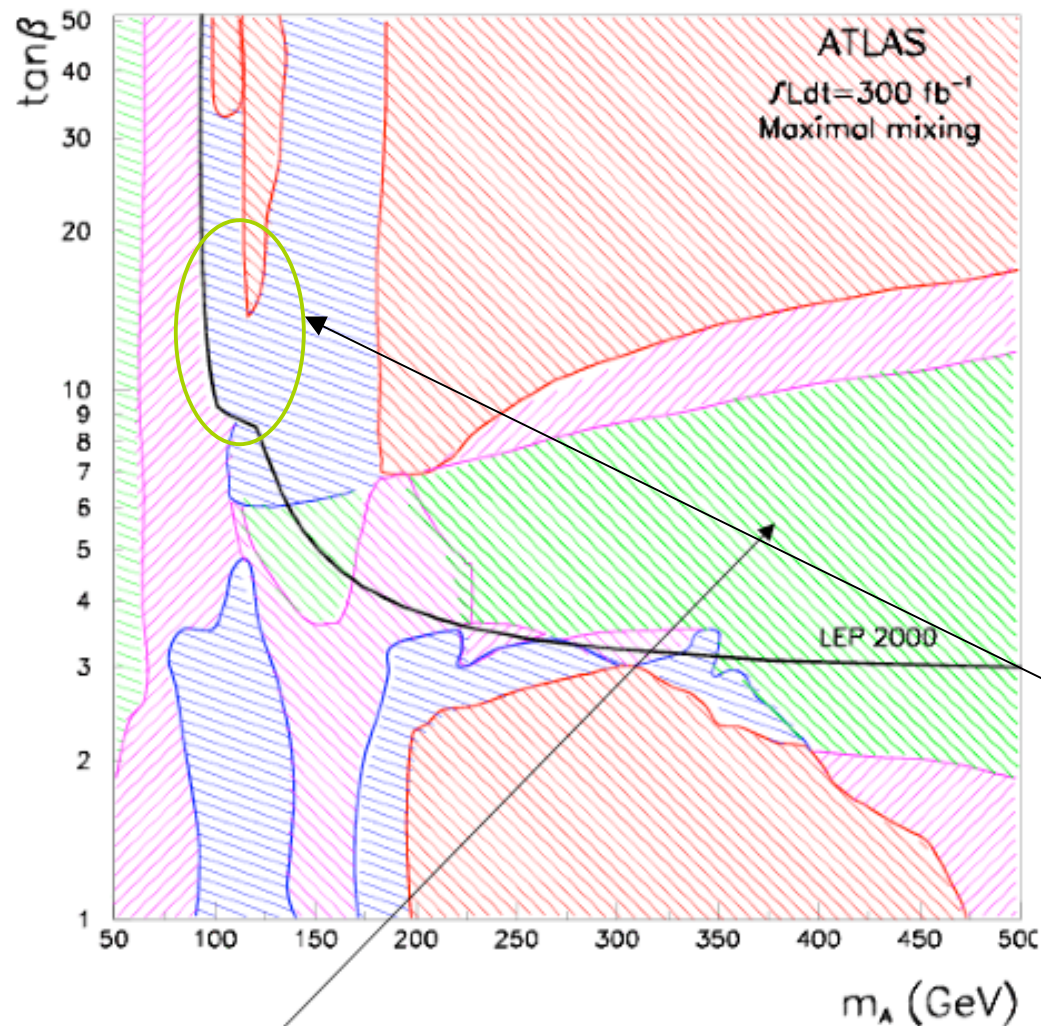
0.9 GeV
の精度

Spin of Higgs

$H \rightarrow \gamma\gamma$ indicate $S=0$ (or 2)
 $C=+1, P=+1$ (parapositronium)



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。