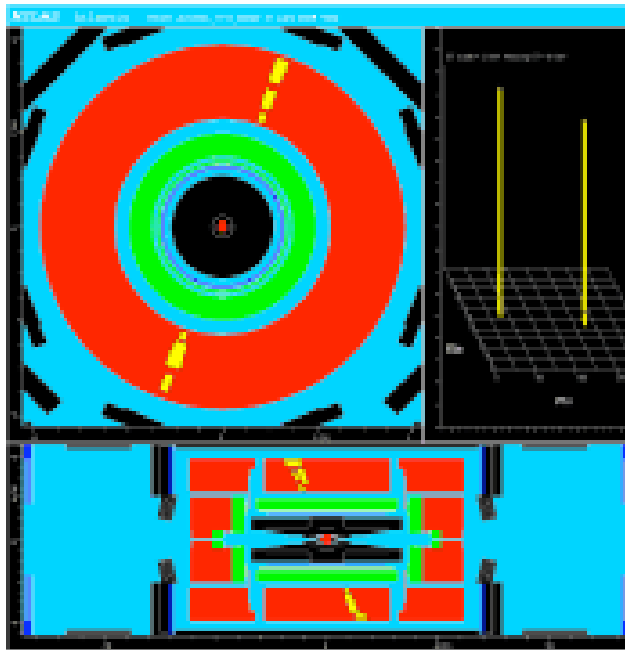


LHCが切り拓く 超対称性の世界



あと2年ではじまります。

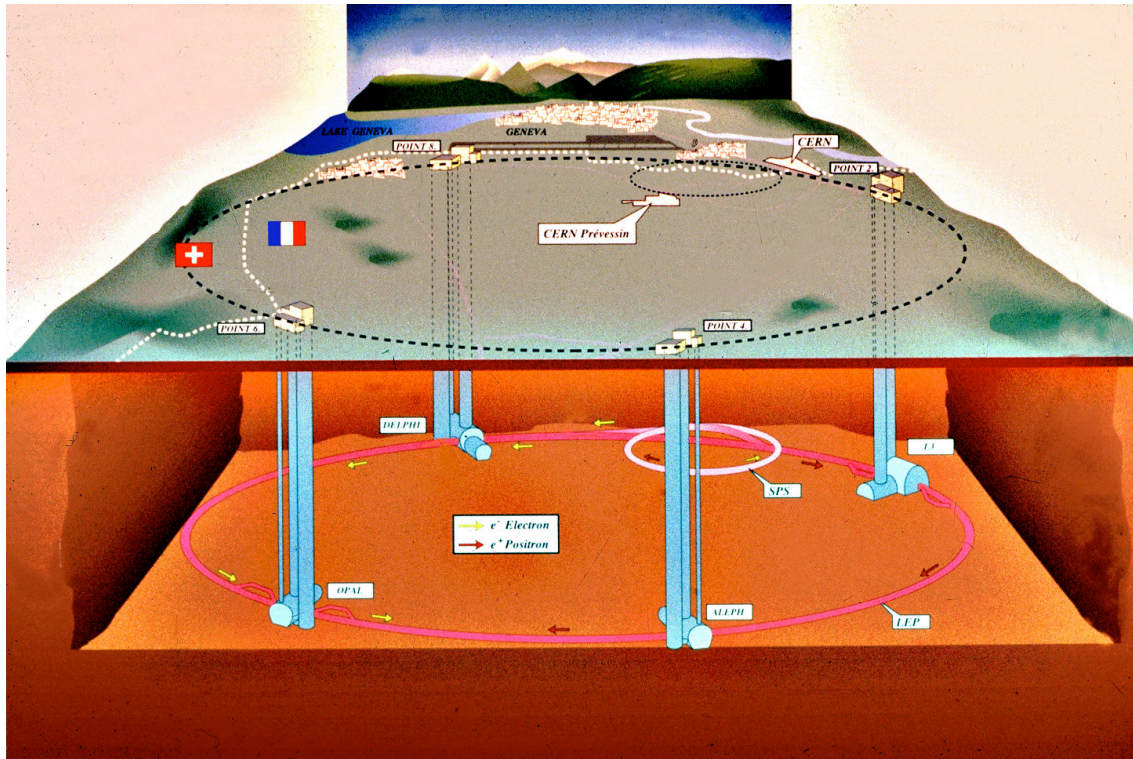
ATLAS EM カロリメータが稼働
← 宇宙線を捕らえた。

This is no drill(simulation),
this is real data!!

「1」 何故、TeVなのか？

この物語は15年前、1989年まで遡ります。

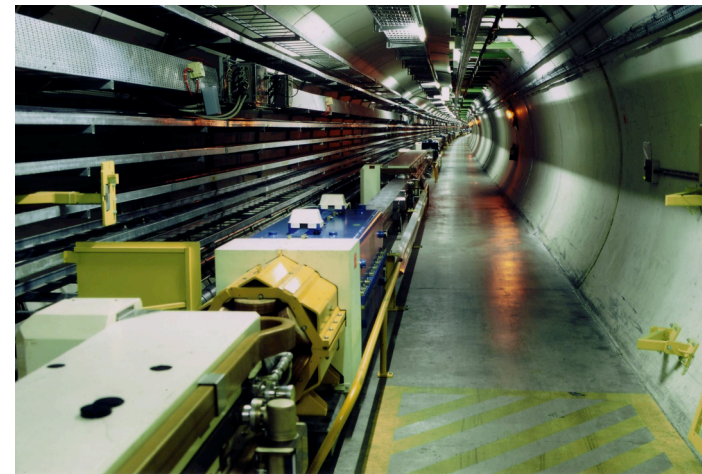
世界最高エネルギー e^+e^- LEP



電子と陽電子を加速して、逆方向に衝突させる。
重心系のエネルギーは、
91GeV(Mz: Zボソンの量産)から **最高 209GeV**
(勿論世界最高エネルギー)
(1989年実験開始—2000年終了)

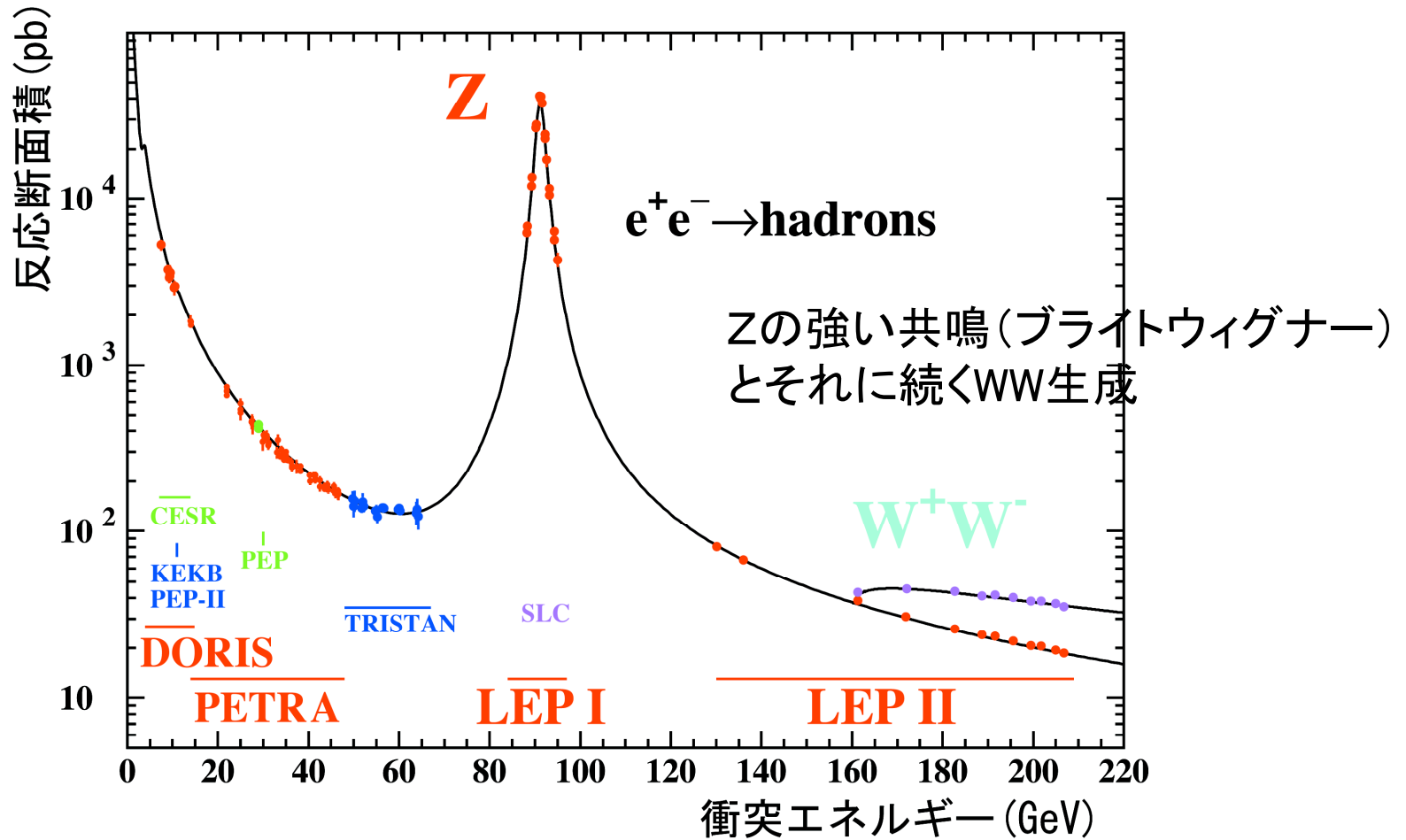


電子・陽電子を加速するための
超伝導加速管



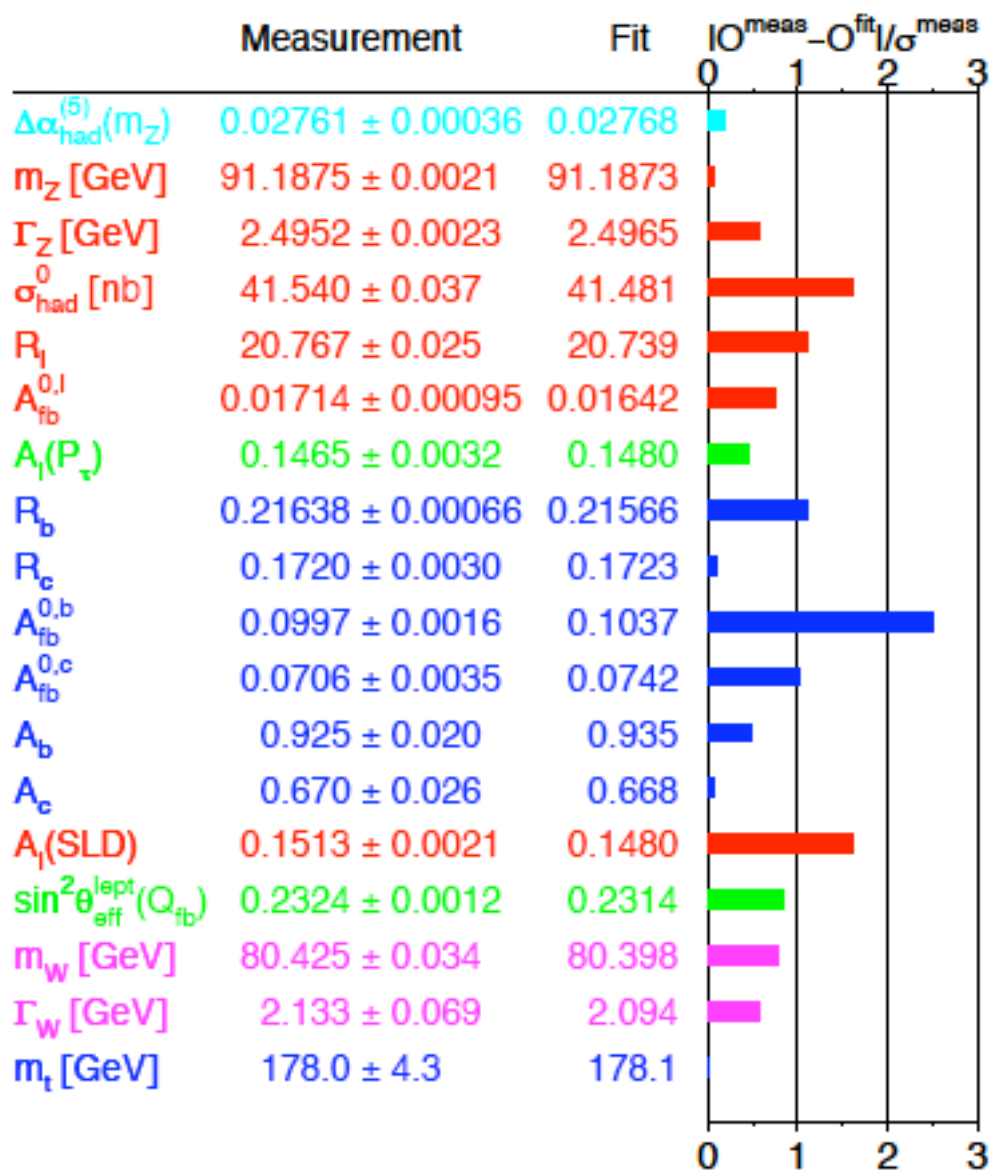
曲げる為の磁石

今LHCトンネルとよばれているが
昔はLEPトンネルと呼ばれていた



電弱相互作用(EW) ~ 100 GeV での素粒子の研究を 誤差(0.1%)
の高い精度で行った。 10^{-3} の精度で標準理論の精密検証

Winter 2004



1989–2000年

LEP,SLD実験で大量のZ/W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。ゲージ原理の確立

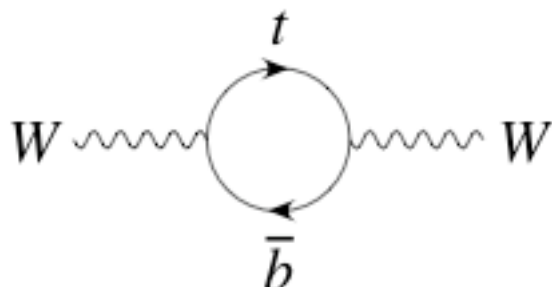
(1) 0.1%の高い精度なので一次のloopを通して、直接見えない粒子

(top/higgs/SUSY)の性質も測定出来る。

Top >> Higgs ~ SUSY

(2) 3つの力の結合定数を精密測定 -> SUSYとあいまって統一の可能性を示した。

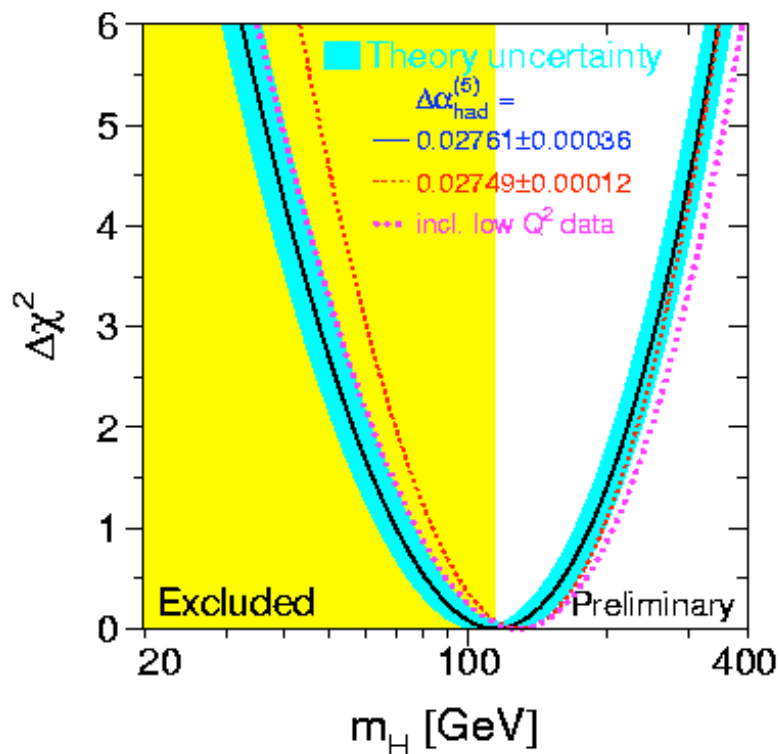
(1) 見えない粒子の効果



$$\delta M_W \propto G_F m_t^2$$



$$\delta M_W \propto \ln\left(\frac{M_h}{M_W}\right)$$

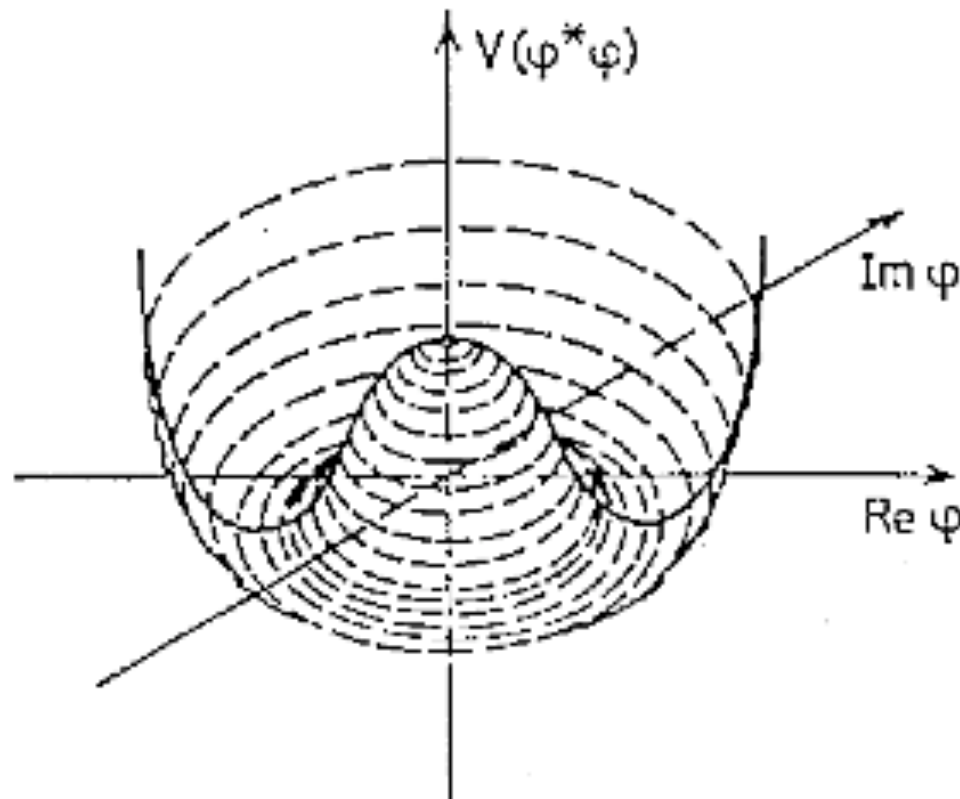


重い（無限）場合はだめ。
 軽いHiggs粒子の存在を間接証明:
 260GeV(95%CL) より軽い
 この軽いHiggsがLHCで、約1年で
 確実に発見出来る

- > EW breaking シナリオ確立
 Higgs機構
 自発的対称性の破れのenergy
 scale $O(100\text{GeV})$ が存在する。
- > 電弱スケールが持ち込まれた。

LHCで

ヒッグス粒子の直接証拠を得る。
その性質を調べる。

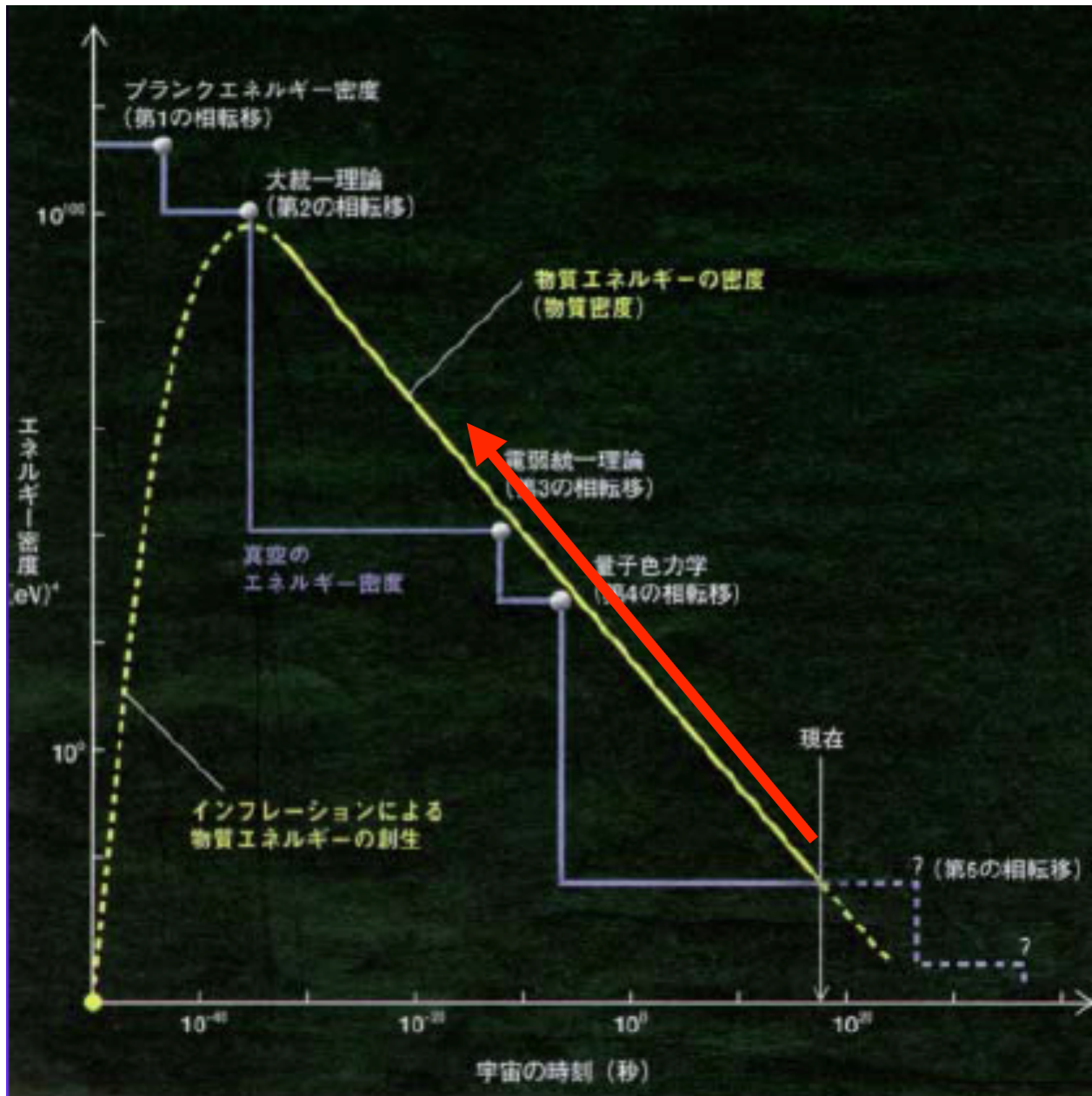


接線方向自由度は、NGBは、Gauge場の縦波
垂直方向は、ヒッグスの質量：形が質量

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

1. 「**質量の起源**」の解明
2. 対称性の破れによる相転移の証拠——>**宇宙史**の根幹シナリオを直接証明
——> 図



量子重力?

佐藤勝さんより

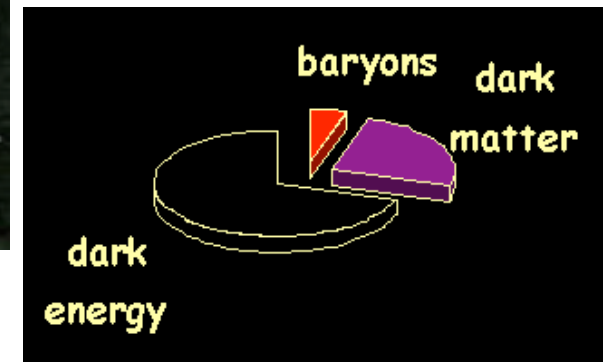
SU5 or SO10 or ?
GUT

ここは?

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

カイラル対称性
 π 中間子

Dark Energy 70%!?

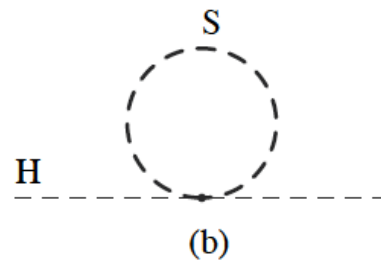
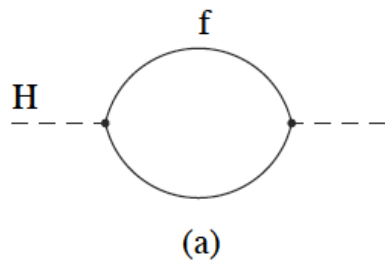


こうやって、LEPで、EW($O(100\text{GeV})$)のスケールがあることを見た。(最終確認はLHCでHiggs発見とその研究 10%程度で結合も)
 ここで 我々は、**新しく、より深淵な問題**にぶつかる。

(甲)より高いエネルギー、より高い対称性の物理(10^{16}GeV)から、
 14桁も小さいエネルギースケールが自然に導出できるか？

階層問題:

(乙)たとえ、”神の手”で、問題(甲)を無事を解決しても



さっき使った手
 「高次補正」で
 すぐにcut offの
 大きさ程度の補正量
 になってしまう。

$$\Lambda_{\text{cutoff}}^2 - \Lambda'_{\text{cutoff}}{}^2 = O(100\text{GeV})^2 \rightarrow \text{Fine tuning 問題}$$

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 $\sim \Lambda_{\text{cutoff}}$ これを解決する2つの相対する考え方:

2-1 超対称性

Fermion/Bosonを交換する対称性

(B) 補正符号が逆でキャンセル



(A) $Y_t \sim 1$ \rightarrow 輻射補正で
 (SUSY 2-10)

(C) GUTの可能性

(D) 暗黒物質(DM)の
 よい候補

(E) LEPなど精密測定が示唆

(F) 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 spin=2 - 1

2-2 “大きな”余次元

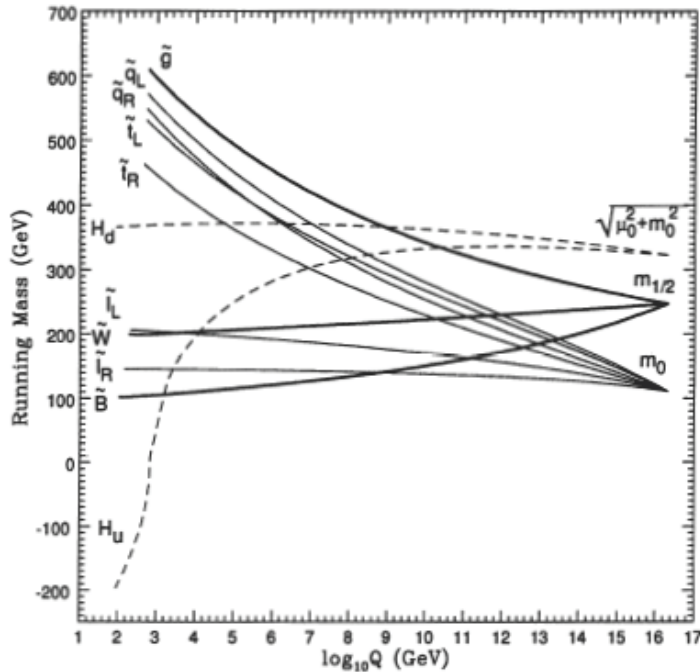
高いエネルギースケールは
 幻影。LEPでみた
 EWだけが本当のエネルギー
 スケールで、重力は余計な
 次元の効果で小さく見ている
 だけ。

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

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。

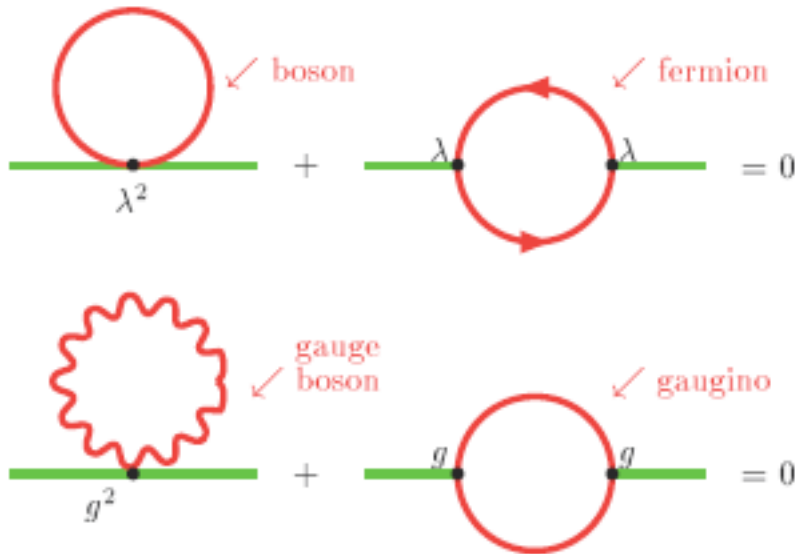
\rightarrow これは9月にでも

(A)



O(1TeV) のSUSYがあれば、 $Y_t=1$ と結びついて自然にEWが 10^{14} 桁下に作ることが出来る。
(詳しくは SUSY2-8)

(B)

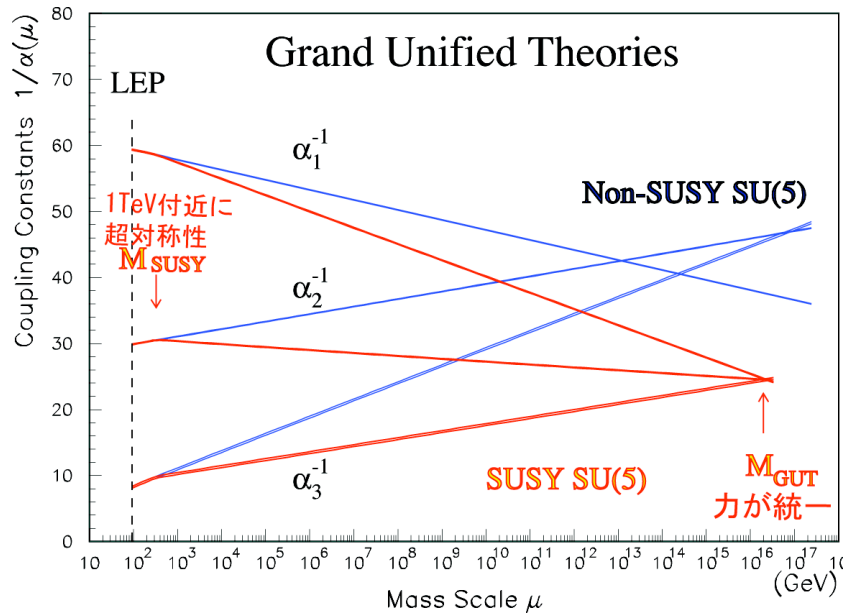


1 - 10%程度のtuningで輻射補正を安定させようとおもったら

$$\Lambda_{\text{SUSY}}^2 - \Lambda'_{\text{susy}}{}^2 = O(100\text{GeV})^2$$

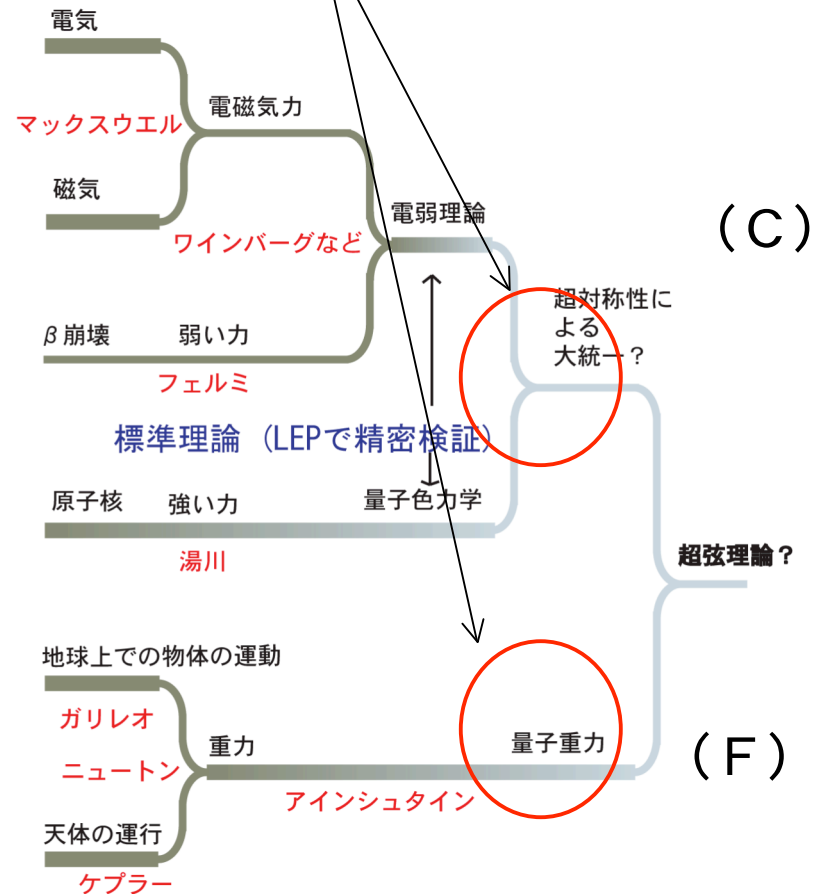
$$\Lambda_{\text{SUSY}} \sim O(1\text{TeV}) \text{ のSUSY}$$

(C) 超対称性による力の大統一 (GUT)

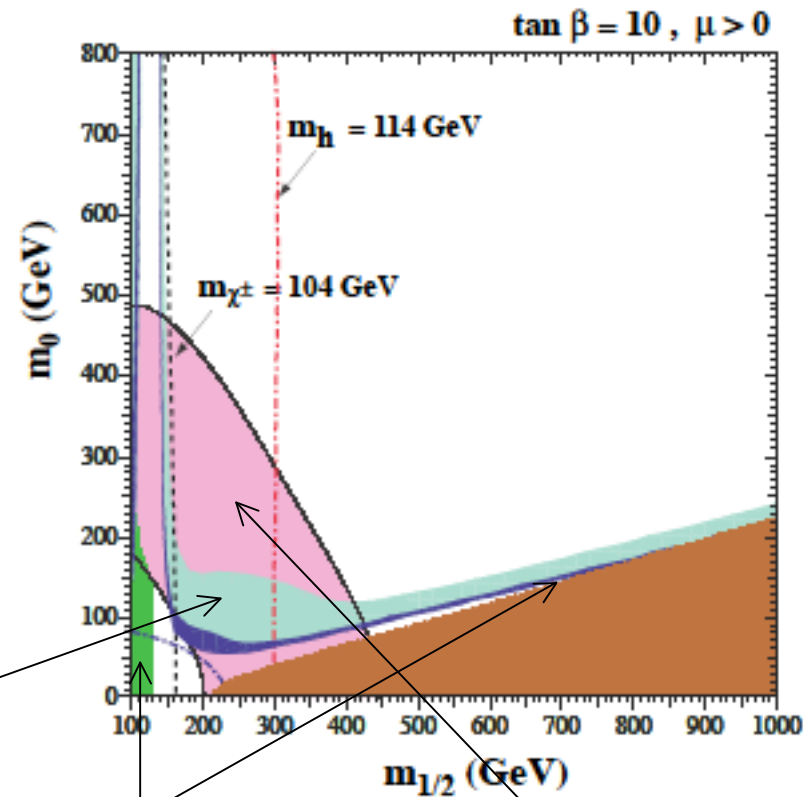


3つの力（電磁気力、弱い力、強い力）の強さを精密に測定。（@LEP）
 登場人物を入れると、その力が高いエネルギーで、どう振る舞うか予想出来る。（繰り込み群方程式）
SUSY O(1TeV) 付近にあると、3つの力は 10^{16}GeV で一つの力になる可能性が示された。
 ——> **力の大統一！！**

超対称性は、 で重要な働きをする。



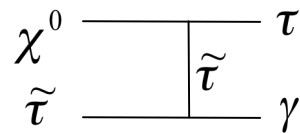
(D) Dark Matter の良い候補



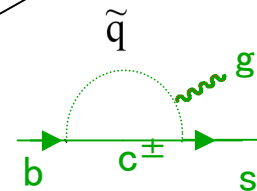
$$\Omega_{CDM} h^2 = 0.113^{+0.016}_{-0.018}$$

宇宙のDMを自然に説明する領域も
SUSY O(1TeV)

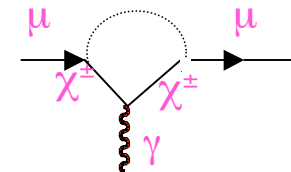
詳しくは
 COSM 15章



Co-annihilation
 でちょうど良い
 Ω_{CDM}

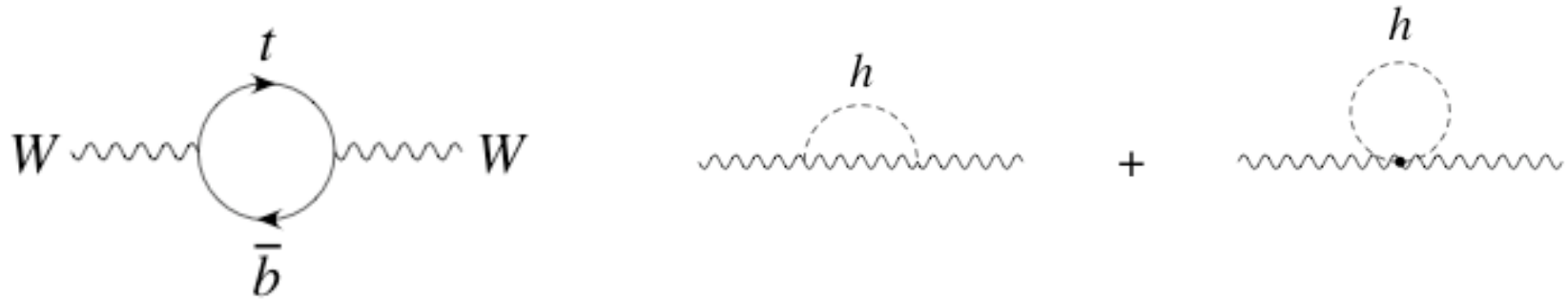


がないので駄目

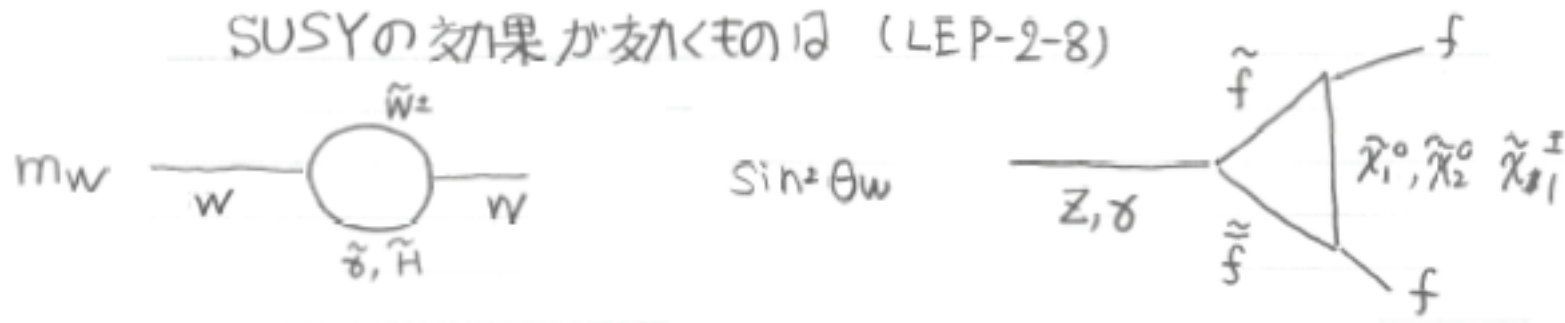


が見えた?

(E) LEPの精密測定で見えないSUSY粒子の弱いながらも。

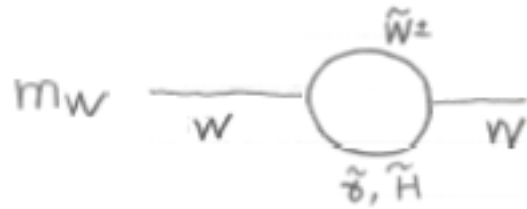


こういう高次の効果をみた。SUSYがあれば、

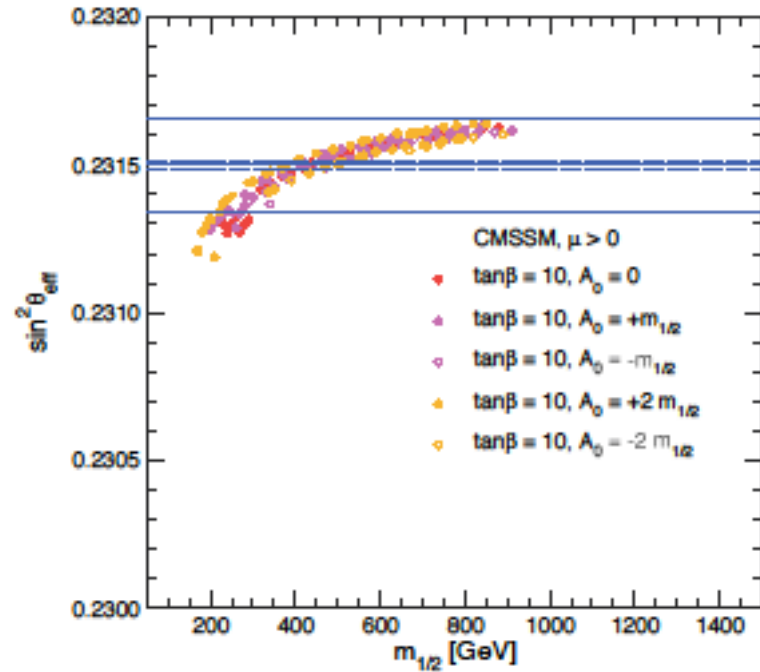
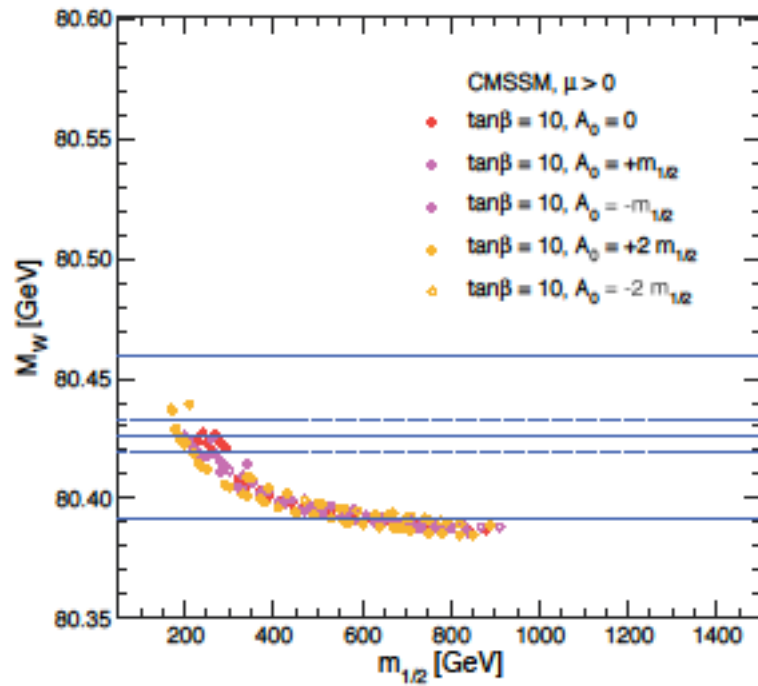
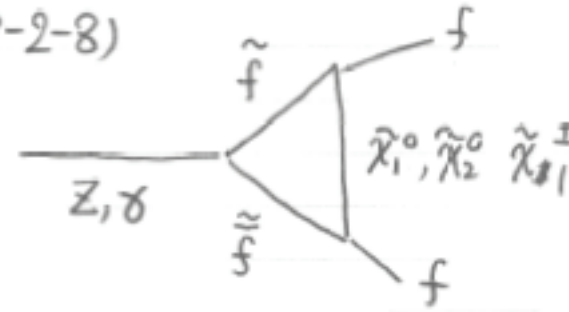


などの補正がある。Self-Energyへの補正、vertexへの補正
 終状態を選べば様々なSUSY粒子の間接効果
 MSUSY->無限大で見えなくなる(decoupling)

SUSYの効果が大きいものは (LEP-2-8)



$\sin^2 \theta_w$

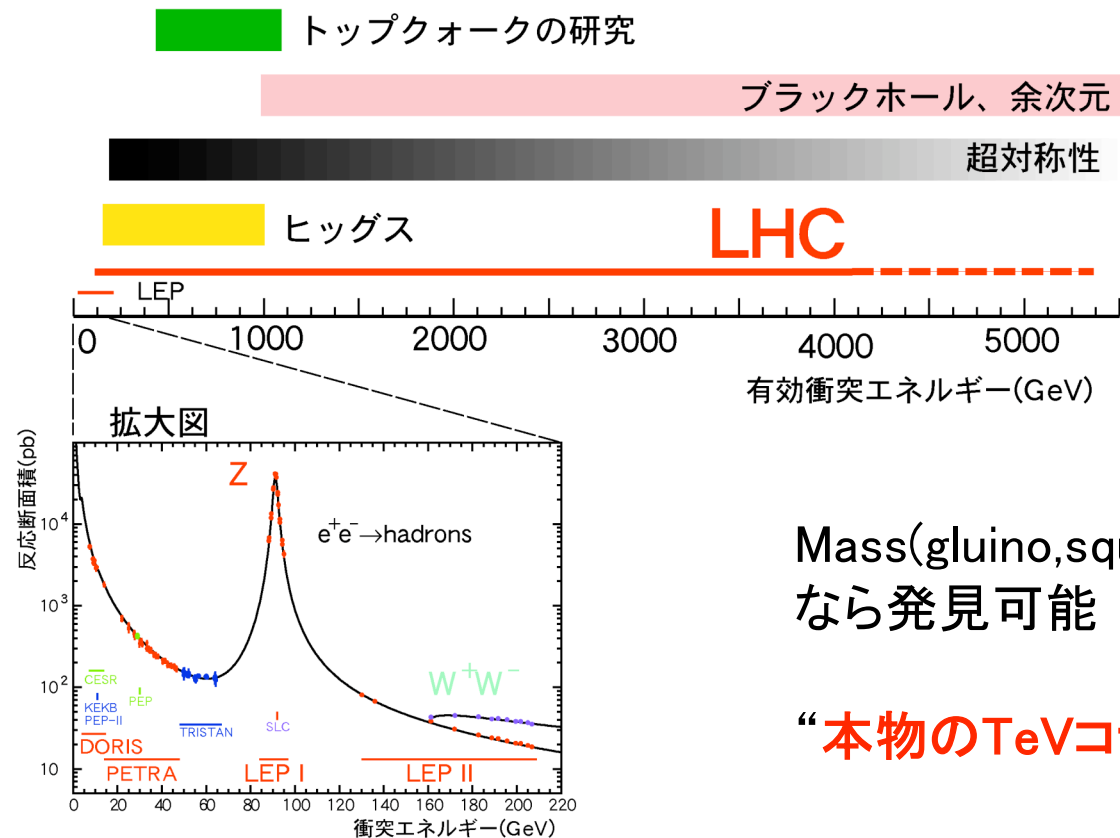


LEPの測定も **O(1TeV)のSUSY**がある方がデータをよく再現する

(F) 原理主義者が愛するもの

(A)–(E) 私の様なノンポリ でも $O(1\text{TeV})$ づくし

「これらに答えを出してくれ、21世紀の物理を切り拓くのがLHCの役目」
? 本当に出せるの? (エネルギーの足りない?)

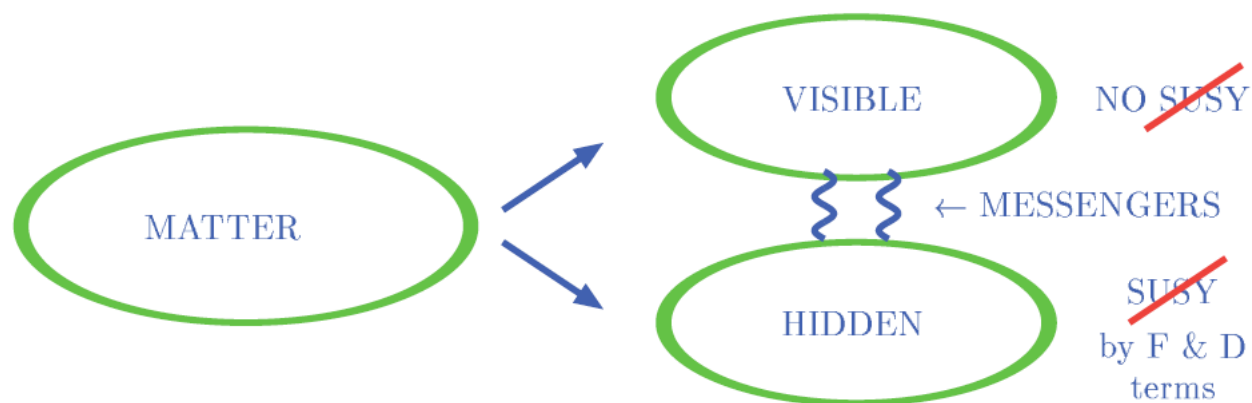


Mass(gluino,squark) < 2.5TeV
なら発見可能

“本物のTeVコライダー”

「2」 SUSYの (破れの) モデル

詳しくは、LHCの為のSUSY講座 2, 3章参照



SUSYは破れた対称性: 破れの起源を「Hidden Sector」におしつける。
これをどう我々の世界に伝搬させるか？

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 [±]	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}

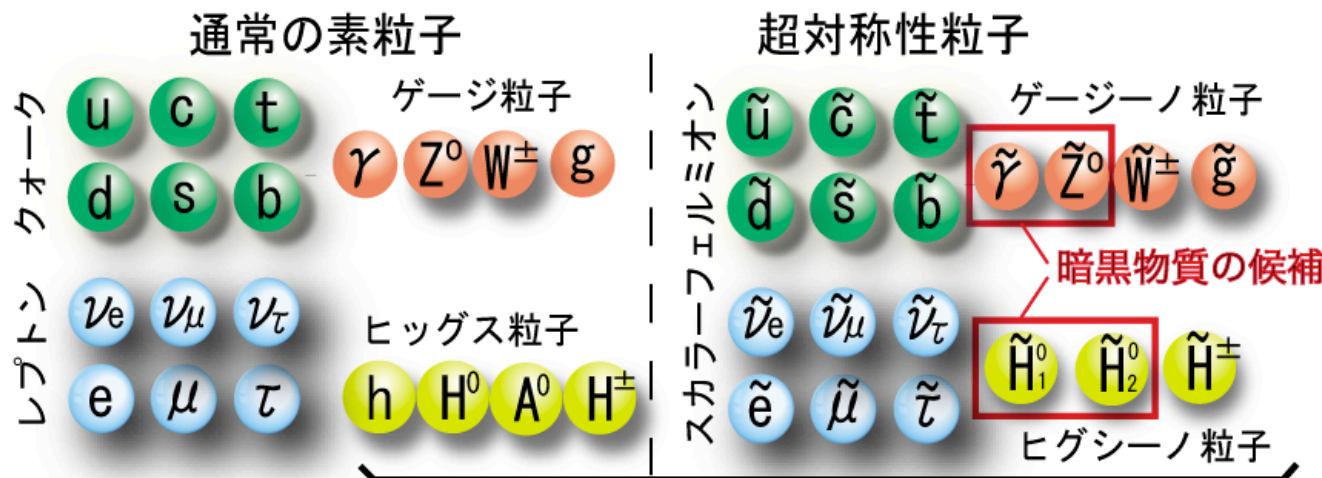
Spin 1/2違う
粒子を予言

素粒子:

f_L, f_R は別粒子

それぞれ、右巻きと
左巻きに対応する

Scalar 粒子がいます。



ヒッグス、超対称性粒子は未発見

1930 anderson

Positronの発見
(反物質の発見)

-> カイラル対称性が導入・理解

-> 繰り込み可能な
QED

(歴史は繰り返す)

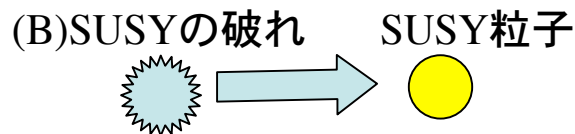
SUSYの破れ（3種類）とDMの候補（3種類）

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}
S=0	Axion: a	S=1/2	Axino: \tilde{a}

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



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くない。
(warm, slow decay BBNにおいたする)

(A) 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)

(C) アノマリー

PQ

3. Axion/Axino

10^{-5} ~ 10^{-6} eV (Cold DM)
KeV-GeV (Warm-Cold)

Minimal Super Gravity model:

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}

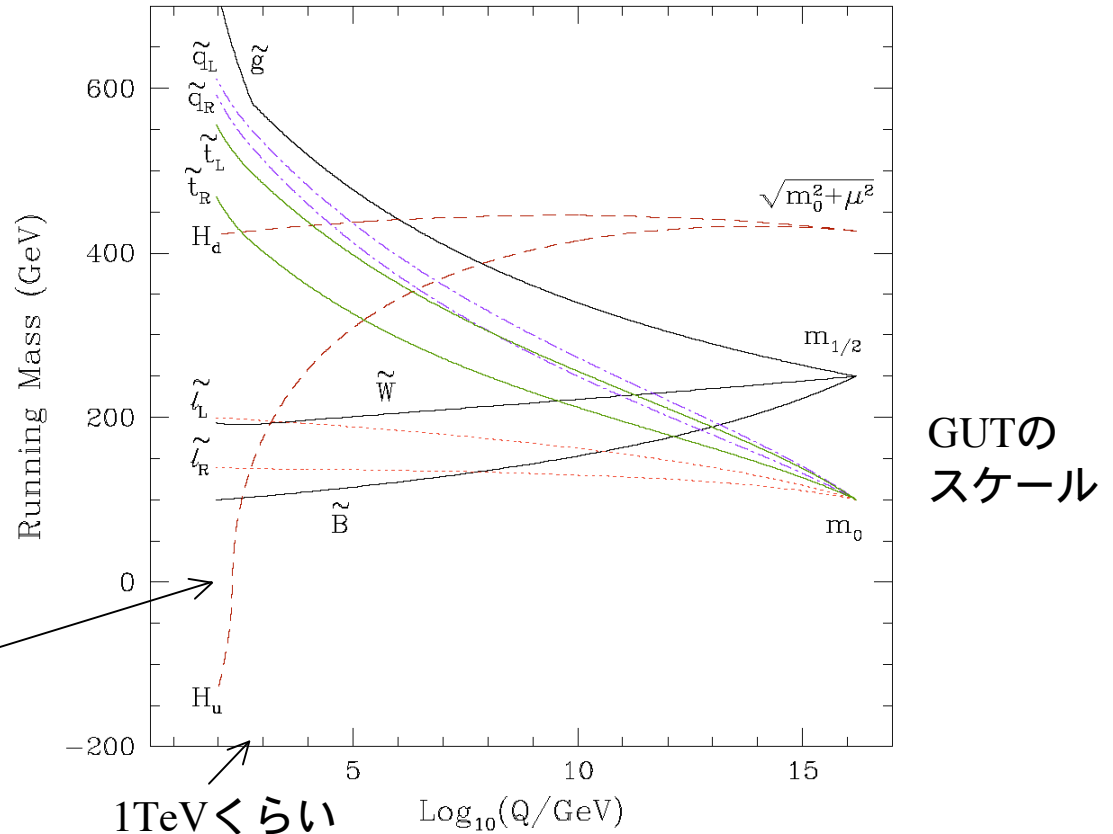
$M_1 : M_2 : M_3 =$
 $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 =$
 $0.4 m_{1/2} : 0.8 m_{1/2} : 2.8 m_{1/2}$
 @Mz

自然にマイナスになる。
 これが自発的対称性の破れ
 ヒッグス機構

4個のパラメター(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



その他の粒子の性質

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

• 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

μ と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) \rightarrow 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)。。

chargino/neutralinoの性質はこれらの大小関係が鍵となる。(GUT $M_1:M_2$ higgsino mass) どうかわるは？
Decayの所で

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

SUSYの破れ(2)

一般にパラメータはC P位相も入れて124ある。”もっともらしい仮定”を入れて、自由度を減らす。

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}

(3) ★ MSSM

(この言葉は、人によって全然定義が違います。)

A: μ をfreeにする (CMSSM) higgs まで?

B: SO10 likeにして、 m_0 を表現ごとにわけける

C:

$M_1, M_2, M_3, \mu, \tan\beta$ (5個 NaiveなGUTでない)

$M_{slep_L}, M_{slep_R}, M_{squ_L}, M_{squ_R}$ (4個 縮退)

第3世代 $3(t, b, \tau) * 2(L, R) - 1(\text{top mass})$ (5個)

A, A_t, A_b, A_τ (4個)

18個程度のパラメータ

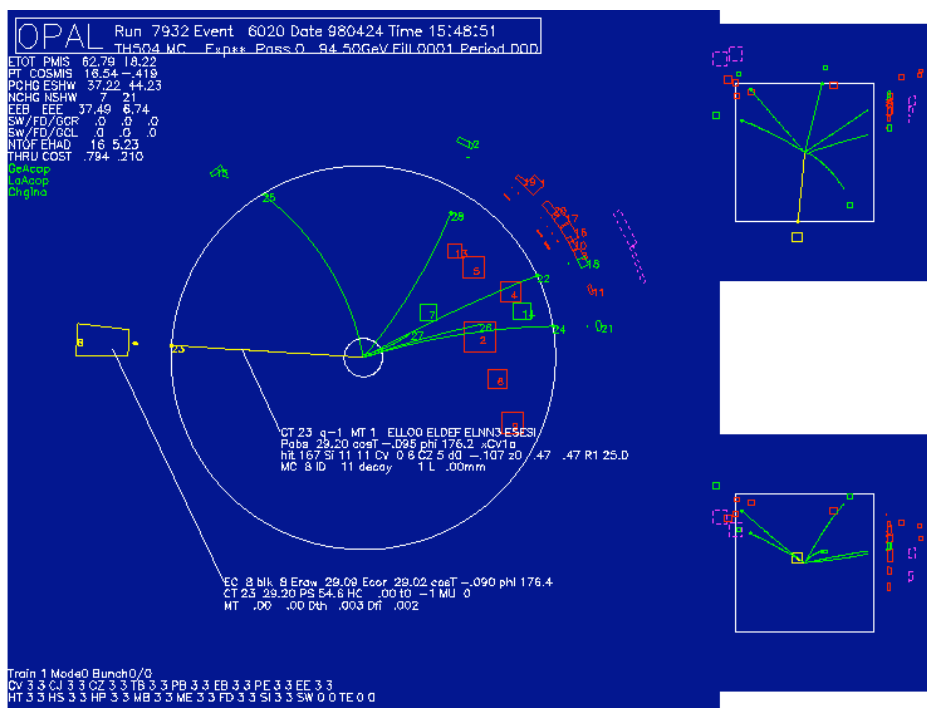
第1, 2世代は縮退しているFCNCの制限

LSPはneutralino_1 などの制限

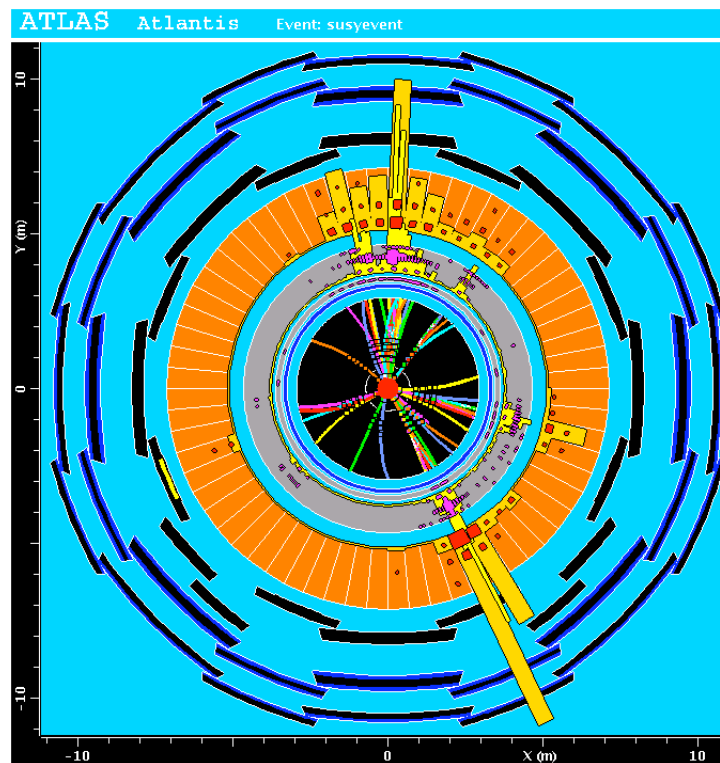
R-parityの破れたモデルの研究もあるけど、今は仮定する。

「3」 LHCでの超対称性事象 (SuperGravity) の特徴

「LHCの為のSUSY講座 5, 6, 7章」参照



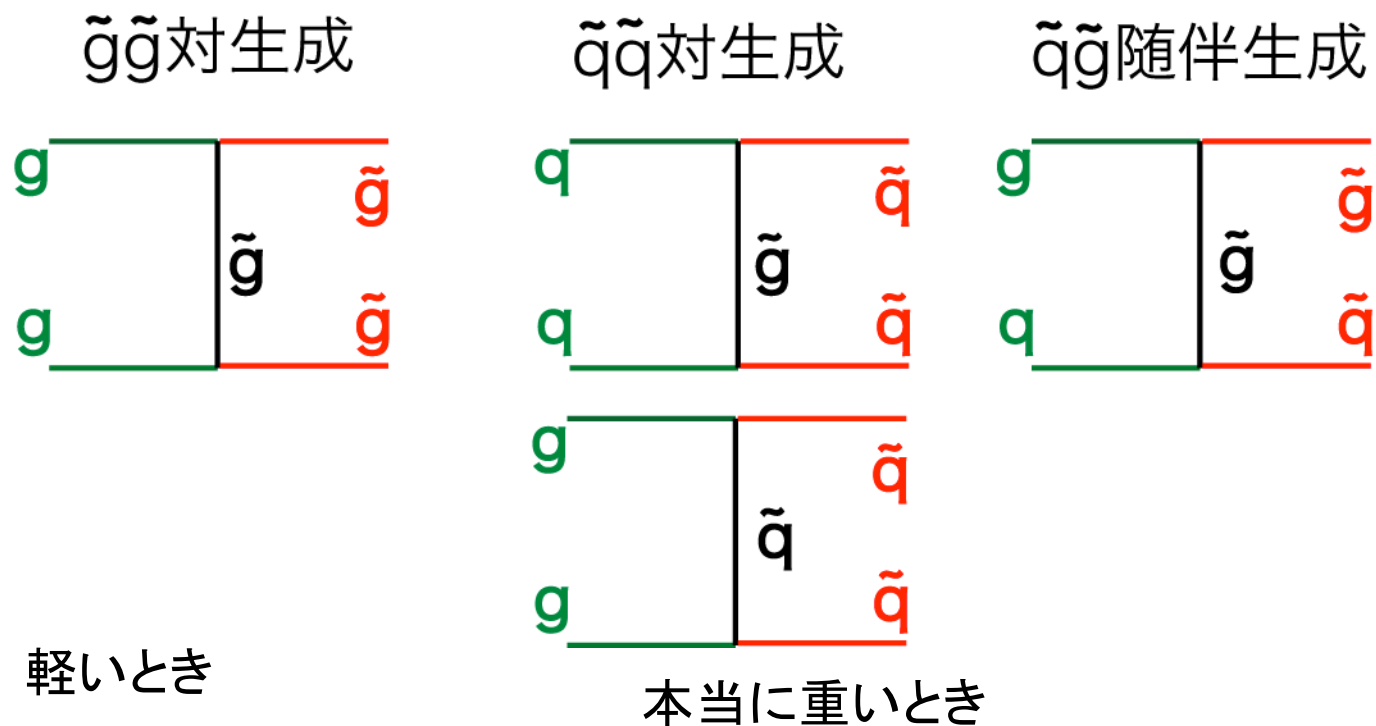
OPALで期待されたSUSY事象



ATLASで期待されているSUSY事象

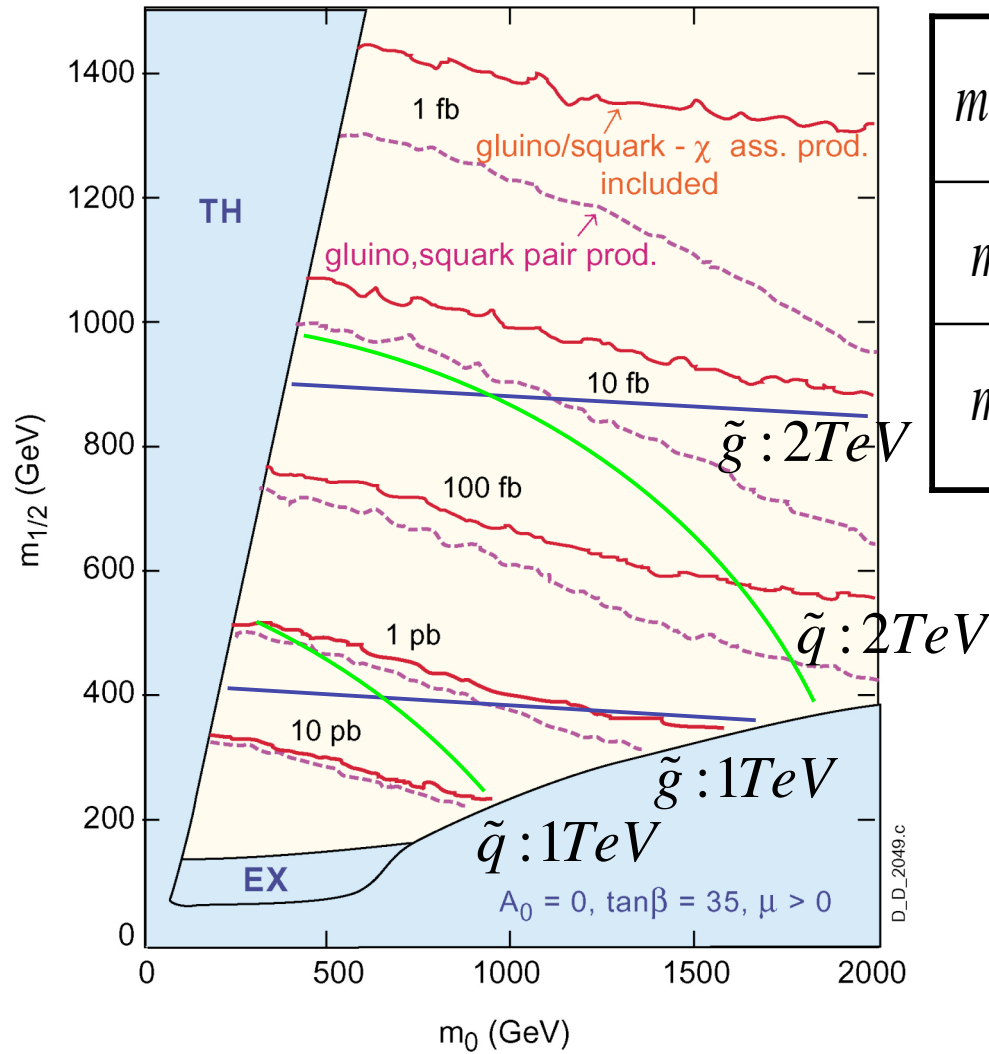
LHCでのSUSY粒子の生成過程

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。



結合は α_s mass を決めれば一意にきまる。

$(\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q})$ 生成断面積 at LHC



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

- **大きな生成断面積**
- **ただの強い相互作用:**
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。

\tilde{g}, \tilde{q} のdecay table

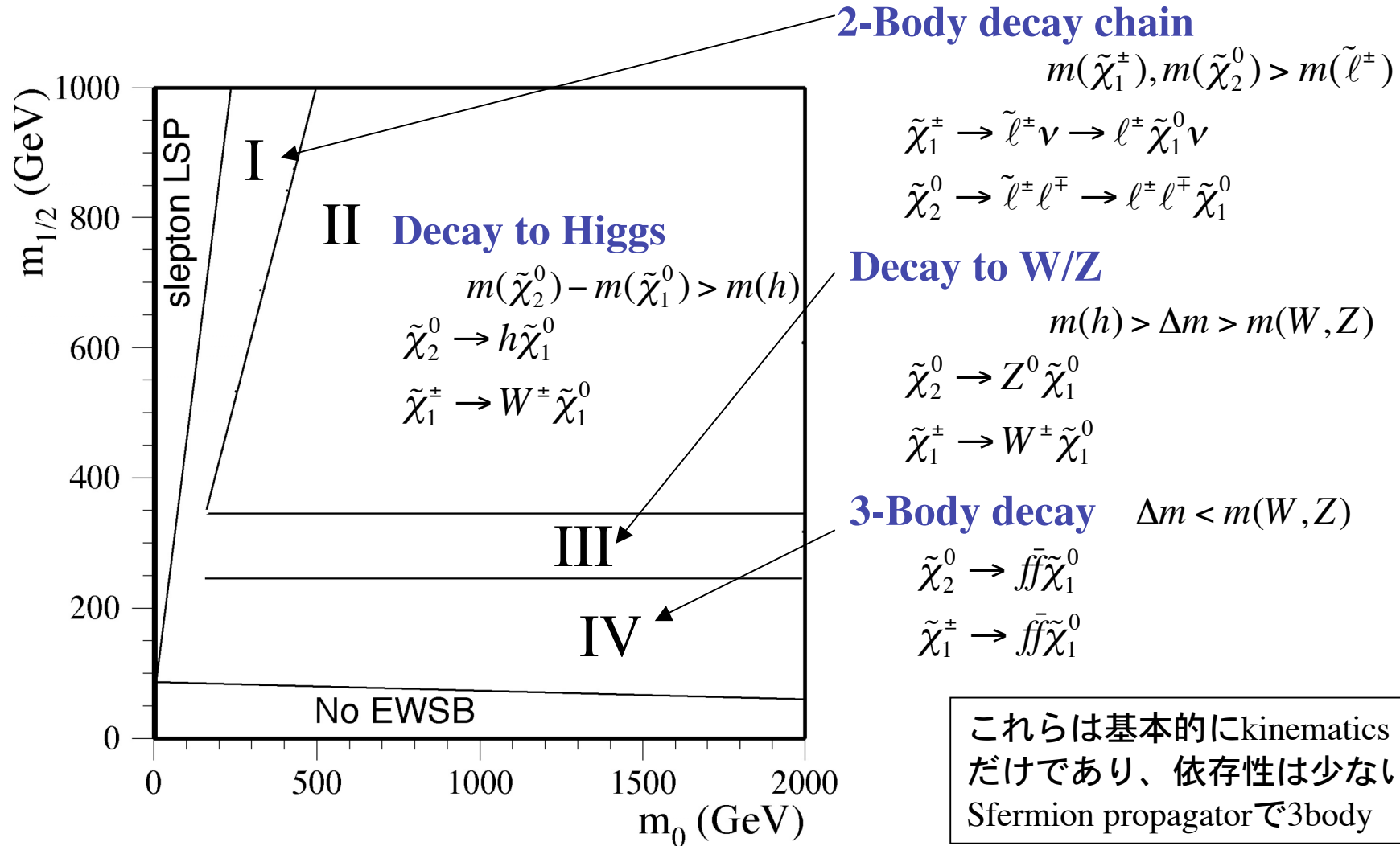
	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 3)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 1)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 2)$	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}_1$ $\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}_1$	$\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$
\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、

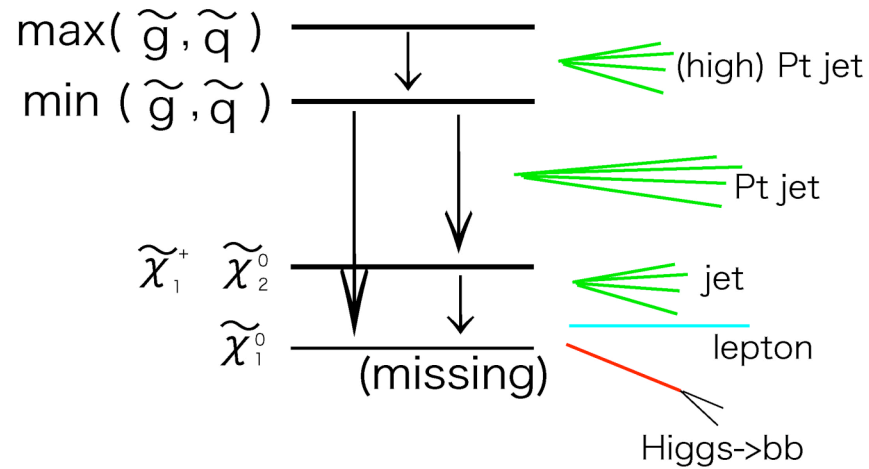
$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ の崩壊モードについて



これらは基本的にkinematics
 だけであり、依存性は少ない。
 Sfermion propagatorで3body

$\tan\beta \gg 1$ 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。

非常に大雑把に言うと

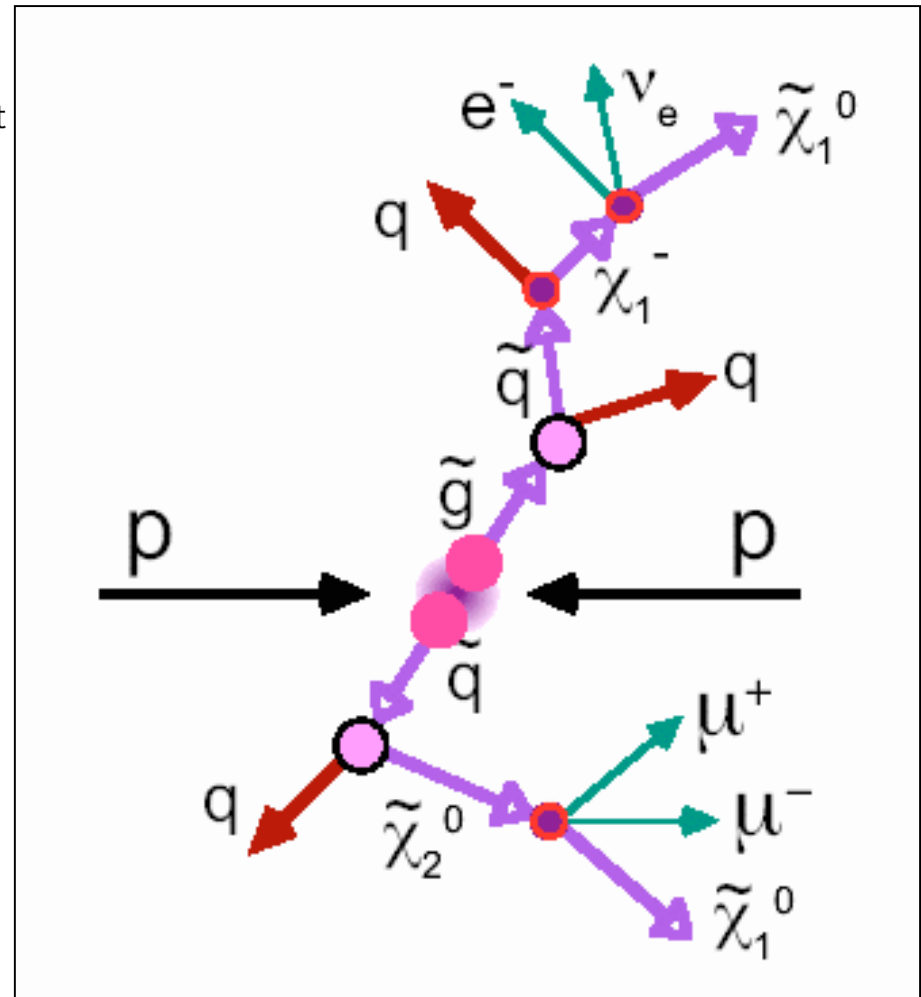


期待されるevent topologyは、

multi E_T + High P_T jets + b-jets	leptons τ -jets
--	----------------------

- BGは、 tt, QCD, Z+njets, W+njets
- Missing E_T の測定、
high Pt jetの較正がkeyになる。

カスケード事象



「4」 SUSY発見能力

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

発見Key は 4つ

- (1) Missing E_T
- (2) High P_T jet
- (3) Lepton
- (4) Background

No lepton mode:

大きなmissing E_T
大きな P_T jet 複数

One lepton mode:

High P_T lepton
大きなmissing E_T
大きな P_T jet 複数

詳しくは
「LHCの為のSUSY講座」8章

これからの研究課題
同じく8章と11章

ATLAS Level-1 Trigger (KHz)

Selection	High- p_T Thresholds	$2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
MU20	(20)	0.8	4.0
2MU6		0.2	1.0
EM25I	(30)	12.0	22.0
2EM15I	(20)	4.0	5.0
J200	(290)	0.2	0.2
3J90	(130)	0.2	0.2
4J65	(90)	0.2	0.2
J60 + xE60	(100+100)	0.4	0.5
TAU25 + xE30	(60+60)	2.0	1.0
MU10 + EM15I		0.1	0.4
Others (pre-scales, calibration, ?)		5.0	5.0
Total		~ 25	~ 40

L1は問題なさそう。

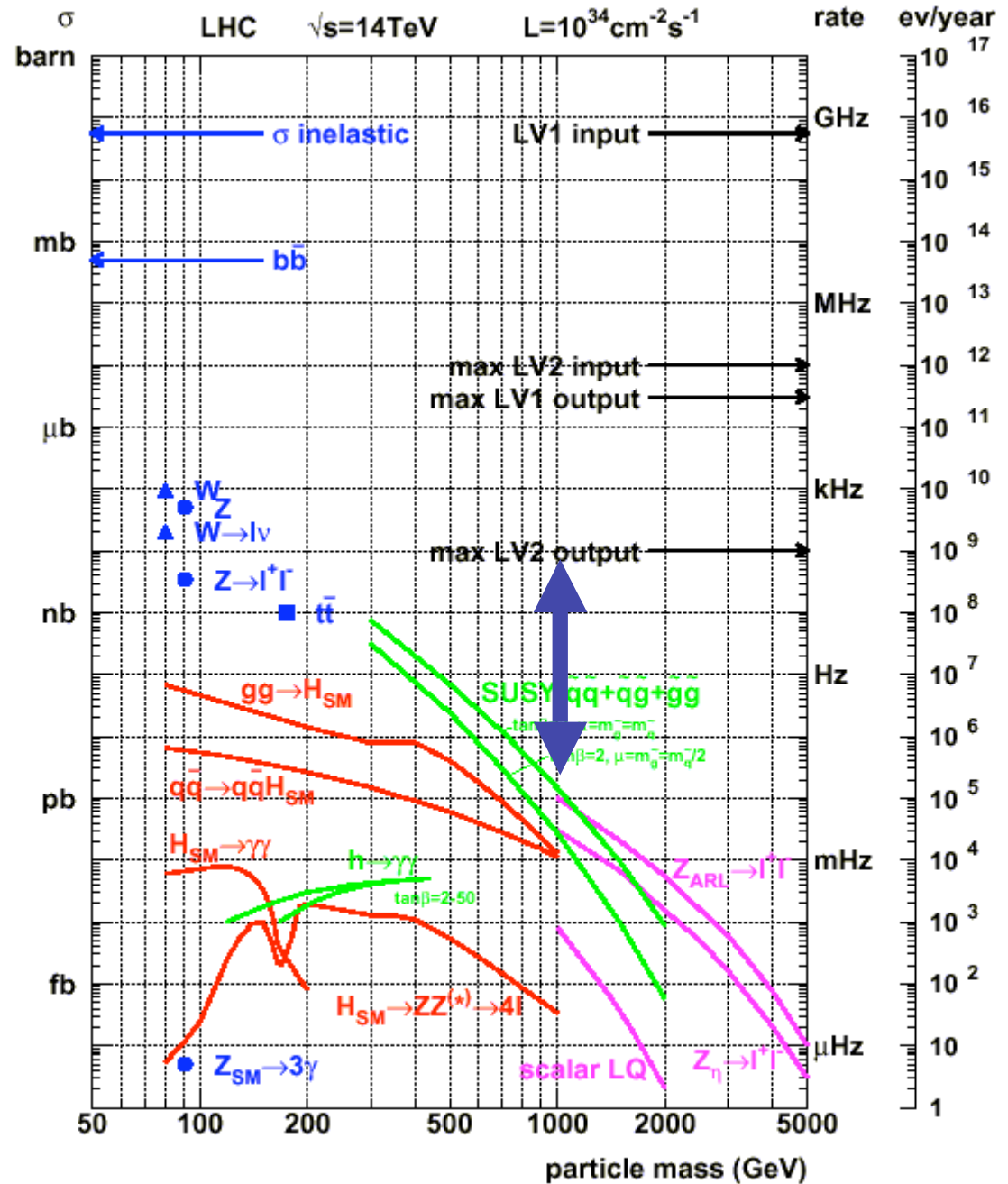
ATLAS High Level Trigger (Hz)

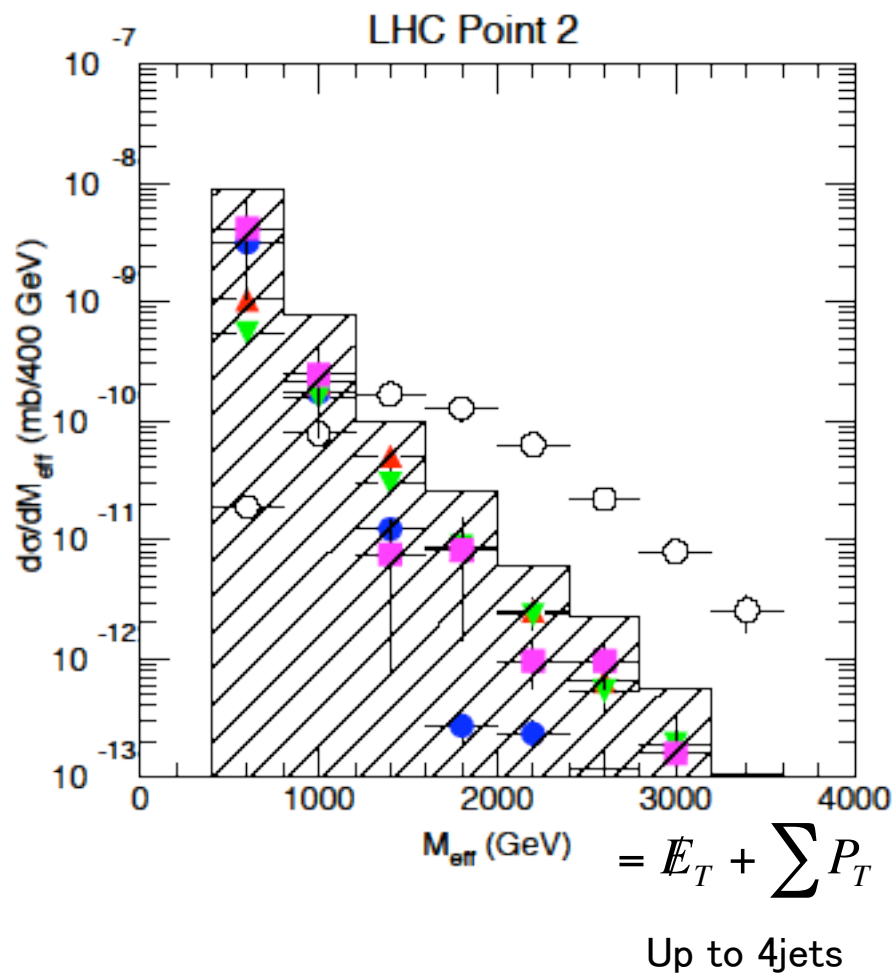
Selection	$2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Rates (Hz)
Electron	e25i, 2e15i	~40
Photon	γ 60i, 2 γ 20i	~40
Muon	μ 20i, 2 μ 10	~40
Jets	j400, 3j165, 4j110	~25
Jet & E_T^{miss}	j70 + xE70	~20
tau & E_T^{miss}	τ 35 + xE45	~5
b-physics	2 μ 6 with $m_B/m_{J/\psi}$	~10
Others	pre-scales, calibration,	~20
Total		~200

No lepton mode のredundancyがない。(8-2)

Z→ll, W→lvは
よいcalibration
Control sample
10⁷-10⁸ sample
が一年でたまる

あと、4桁 off-line
解析で落とす。



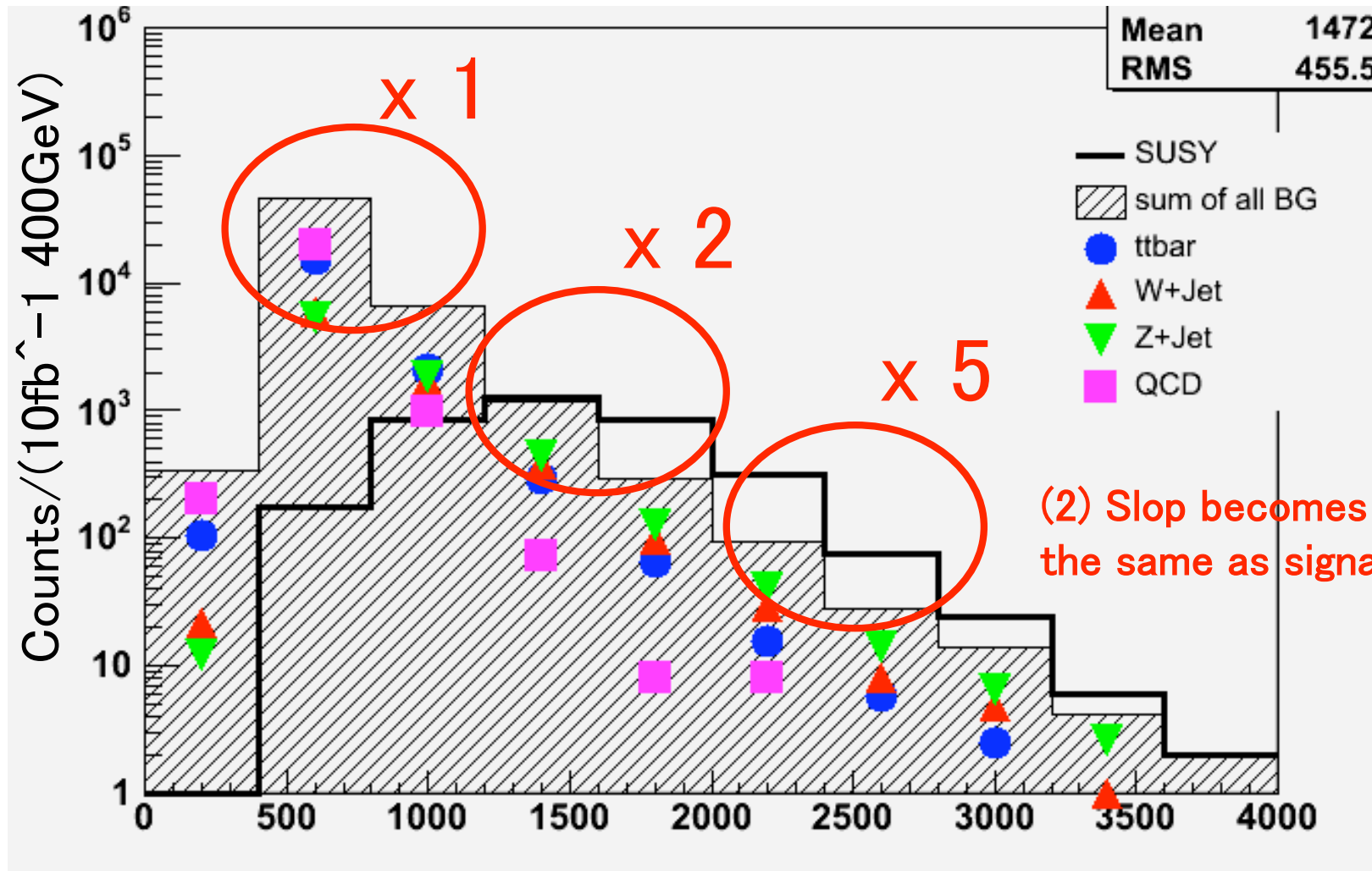


No lepton mode: $Z(\nu\nu, \tau\tau) + N \text{ jets}$ ▼
 $W(\tau\nu) + N \text{ jets}$ ▲
 $tt + N \text{ jets}$ ●
 QCD multi-jets ■
 (1.Fake-missing E_T
 2.heavy flavour の semileptonic decay)

最近に我々の研究で Backgroundにも多くの High Pt jet があることが判明して、2-5倍程度ふえることが判明して、
 No lepton mode:
 重いSUSY
 1.5-2TeV以上は少し吟味が必要。
 まだ、QCDは研究途中

古いversionですが、これはapproveされているので

(1) Background increases by factor 2-5 depending on Meff



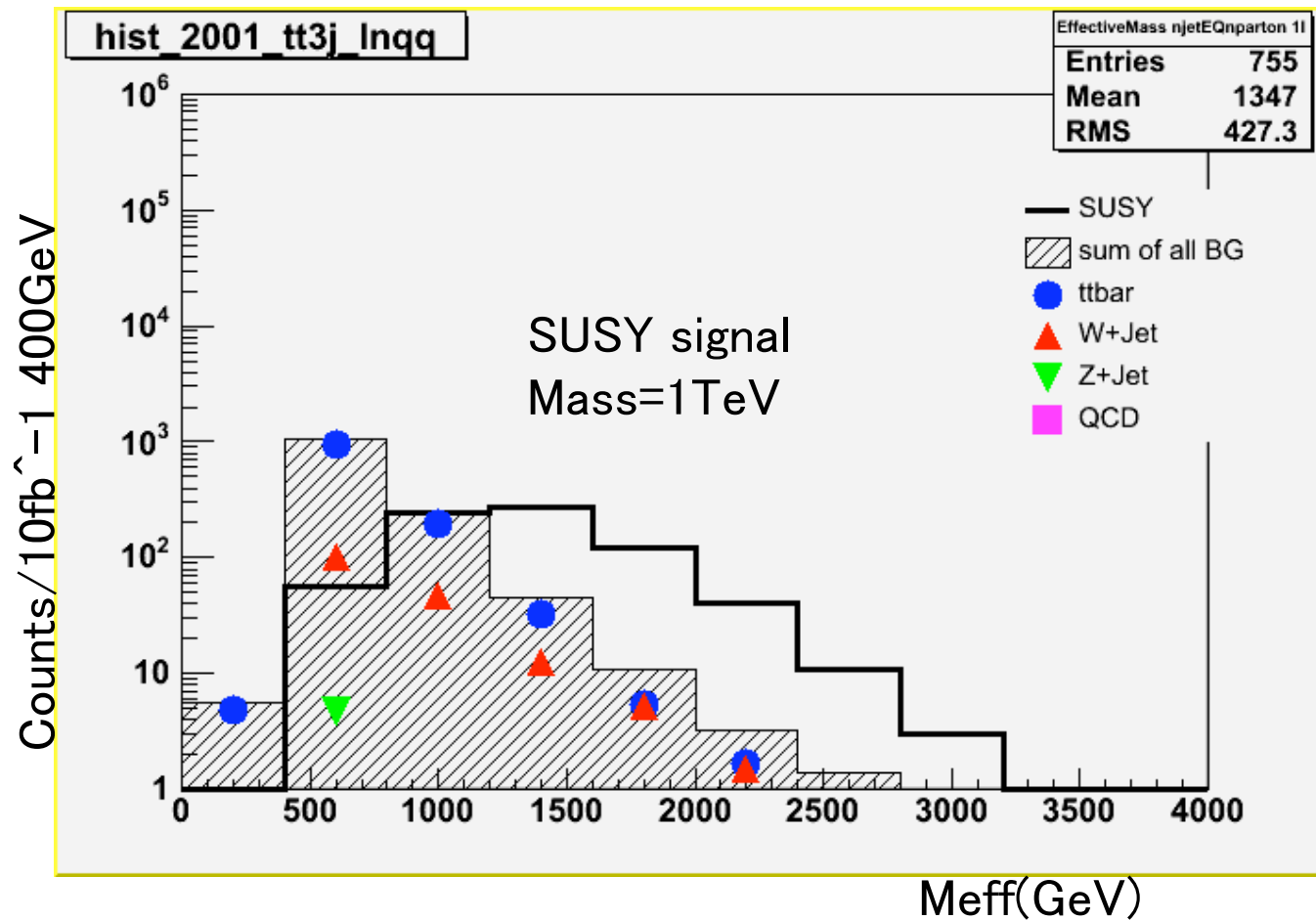
$M_{eff} \text{ (GeV)} = m_{Et} \text{ \& \ } \sum P_t \text{ of jet}$

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

Fakeレプトン $\sim 10^{-4}$

Signal is reduced to 20–40% of no lepton mode,
 Background suppress by about factor 20–30

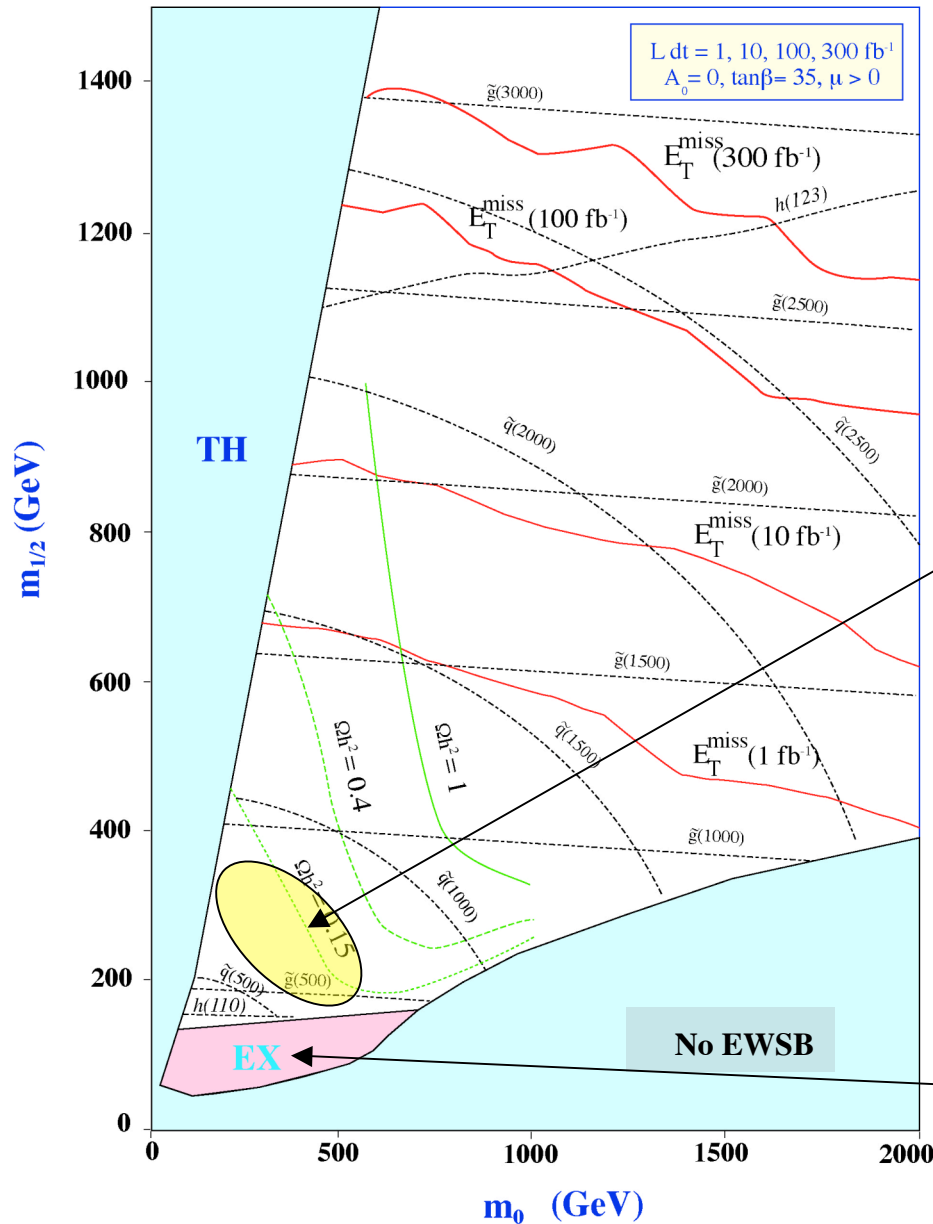
S/B is better than
 no lepton mode.



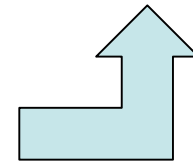
mSUGRAの発見能力

少し悪くなると思いますが

SLHC(L=3000fb⁻¹)で
約3.5TeVまで



L=300fb⁻¹ で約2.5TeVまで



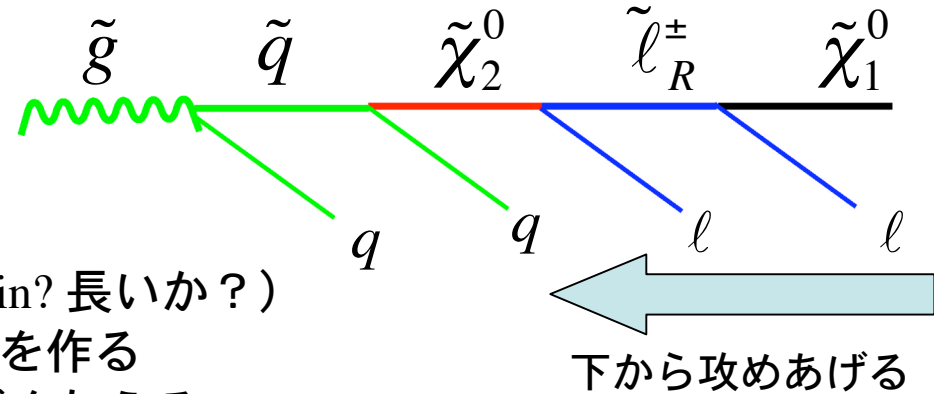
Cold DMとして面白い領域
実験データが示す領域は
ほぼ1週間-1ヶ月のrunで十分

約1年のrun(L=10fb⁻¹)で、約2TeVまで

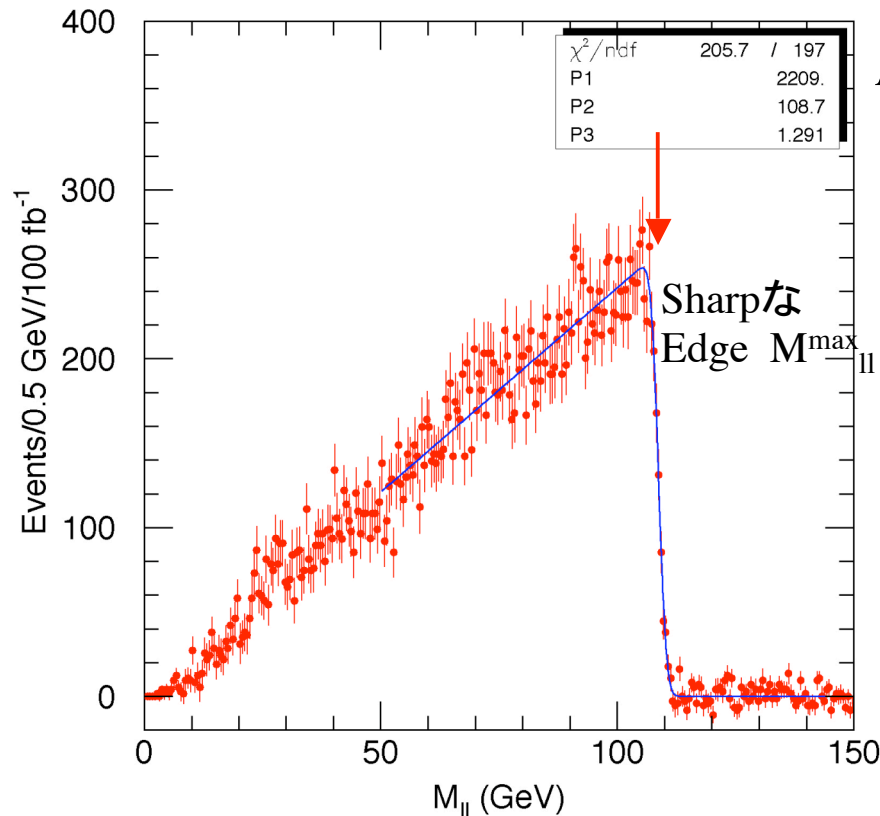
約1ヶ月のrun(L=1fb⁻¹)で $\tilde{g}, \tilde{q} \sim 1.5\text{TeV}$
 まで5 σ 可能
 GUT: $\tilde{\chi}_1^\pm$ 約500GeVに相当
 する。LEP-IIの5倍

2008年には発見が可能

質量の再構成に関して



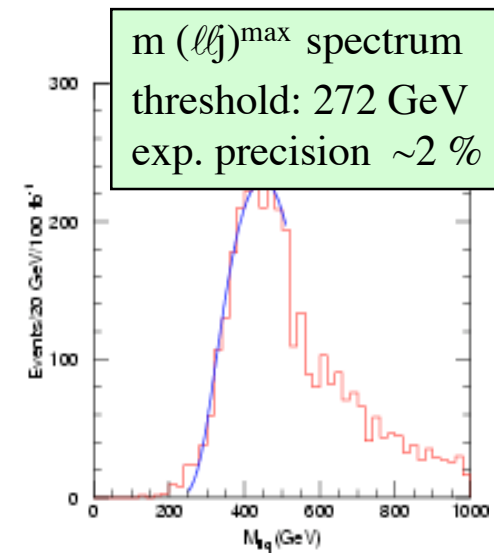
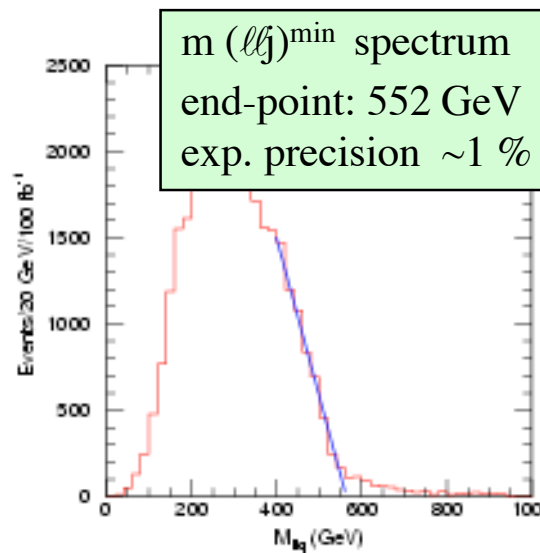
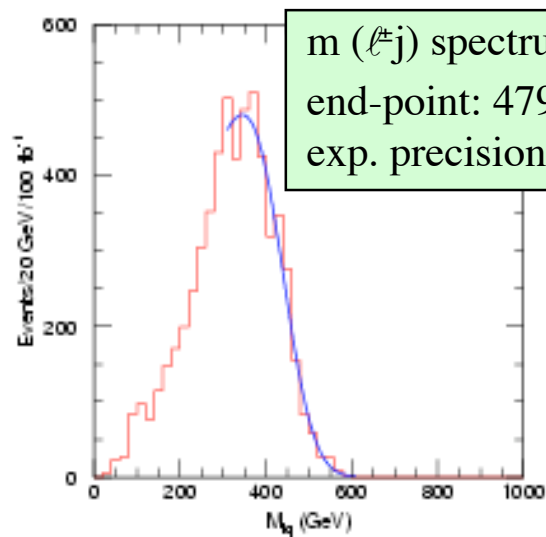
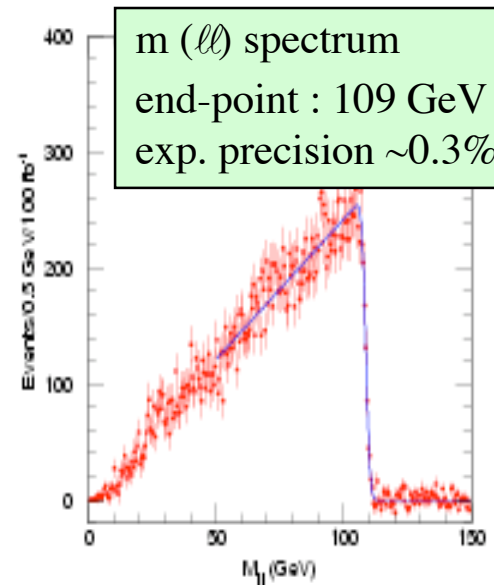
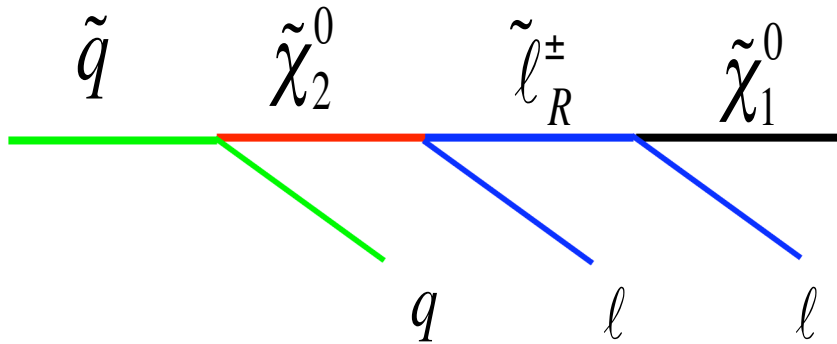
1. 適切なdecay chainを選ぶ (key point!)
(綺麗か? 他のSUSY Decay chain? 長いか?)
2. mass や P_T などのkinematic distributionを作る
3. Edgeやendpointからmassの関係に束縛を与える



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

- 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 \rightarrow model independentにmassが決まる。(3-12%程度 for 700-800 GeV squark, gluino)

まとめ

a few TeVまでにSUSYがある傍証がいっぱいあり、
LHCは、これを、ほぼカバー出来る。
1930年の反物質発見以来の大きな快挙であると同時にGUT/Planck
に一気に近づく。

実験開始まで2年： Commissioningまで1.5年です。
今までのモデル遊びはおわり。

今からは発見に向けて

- (1) 検出器の効果の評価 重要な3つの鍵
- (2) バックグラウンドの現実的な評価とデータを用いた外挿
- (3) それらの不定性を弁える
- (4) それでも残ったexcessをSUSY起源だと納得させる方法の研究

詳しくは 「LHCの為のSUSY講座」 8章
そのあとの測定は、9, 10章参照

3. SUSY発見に必要となる研究課題

2007, 8年に蓄積された $1-10\text{fb}^{-1}$ (予定: デザインの $1/100-1/10$) の積算ルミノシティで発見を行う。

(1) さっき話した様に原理的には、 $\text{mass } 1.5\text{TeV}(L=1\text{fb}^{-1})$ ---- $2\text{TeV}(10\text{fb}^{-1})$ まで発見が可能であるがかなり胡散臭い研究で これを現実的にする。
Backgroundの再評価と実験データを用いたバックグラウンド評価法に確立

(2) SUSYの鍵は、high Pt jet & missing E
この二つのcalibrationと systmstic 評価 TriggerもOK?

(1)(2)はexcessの確立

(3) 見えたexcessが、SUSYかどうか? の同定

Msugra? SUGRAの一派、GM(slepton LSP, gamma)

現在、Identificationの議論が全くない。(特にLuminosityが少ない時に)

「Lがたまって30-300 fb^{-1} endpointが見えて、mSUGRA仮定して、

mass計算して、、、」を議論している

そのまえの議論:

また、同定で大切になる ID (b, leptonなど) の開発とfakeの評価

(3) 原理の確立(への一歩)

(3-1) BGの再評価

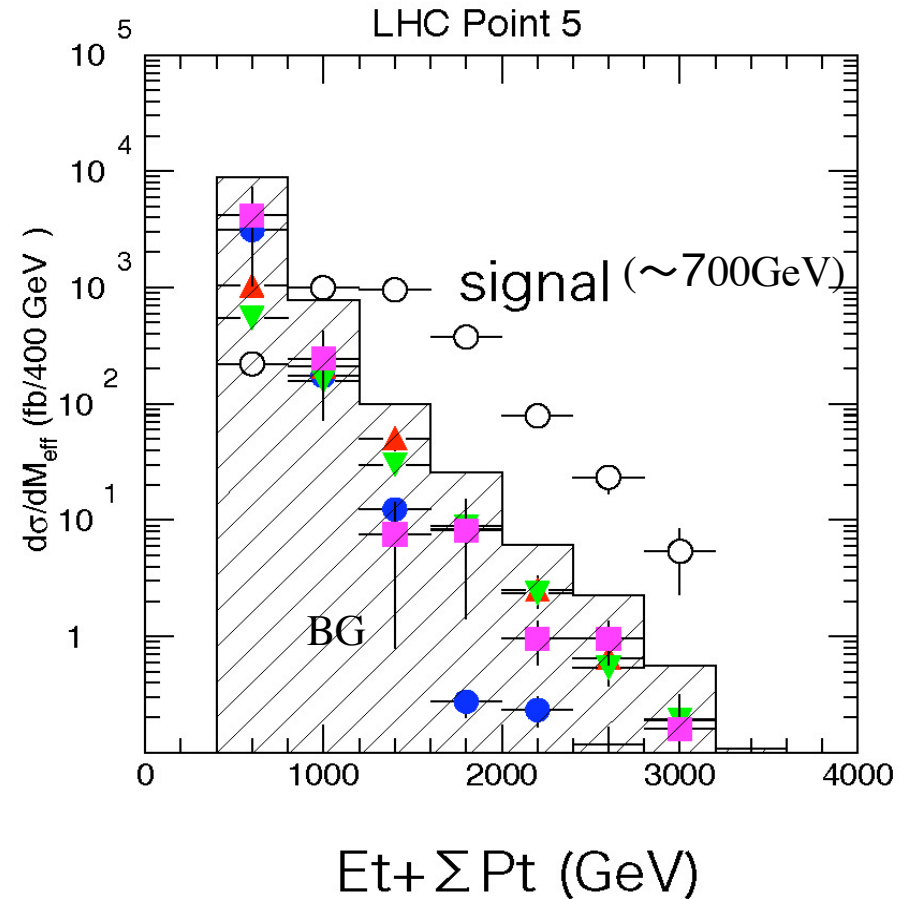
Large missing E_t の要求以外に、
High Pt 2 jetや4jetを要求して
BGを押さえている。

このHigh Pt jetをParton showerで
評価している。

(W/Z+1jetはN=1までME
N \geq 2からParton shower,
ttは、N \geq 1からPS)

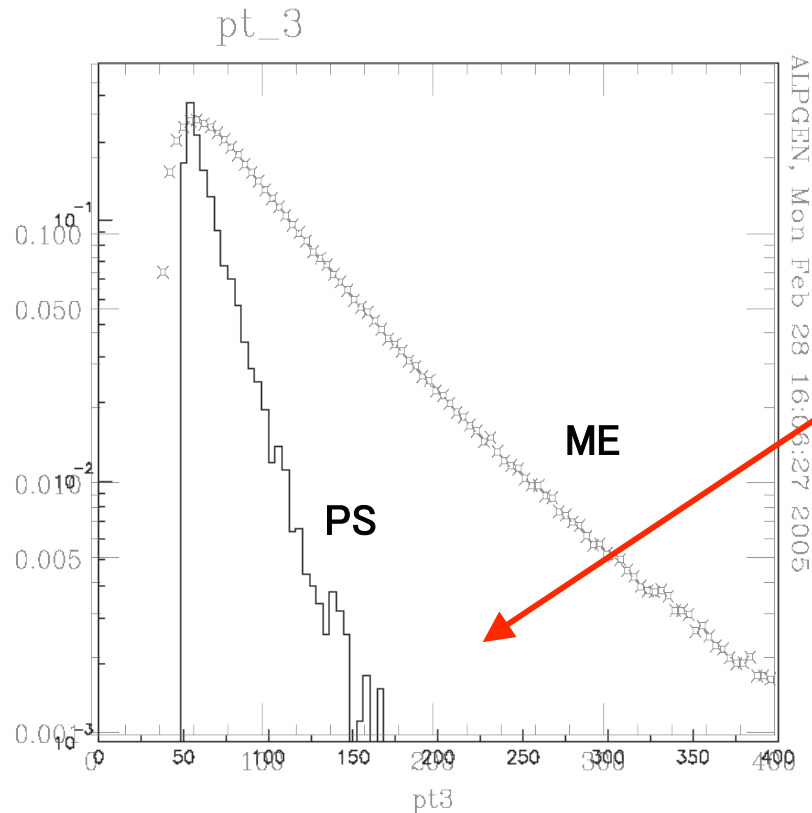
PSは、collinear 発散やSoft発散が
効く領域では有効だが、High Pt 領域
では不十分である。

BGももっとHigh Pt jetが出るはず。
結果 missingも大きくなる。



Ex: good separator $E_{t,\text{miss}} + P_t$ of 4jets
相対的に、 $E_t + \text{sum } P_t$ の高いところが高くなる。

Pt distributions of 3rd jet for Z+ Njets processes



Missing Et > 100GeV

At least one jet(parton) has pt > 100GeV

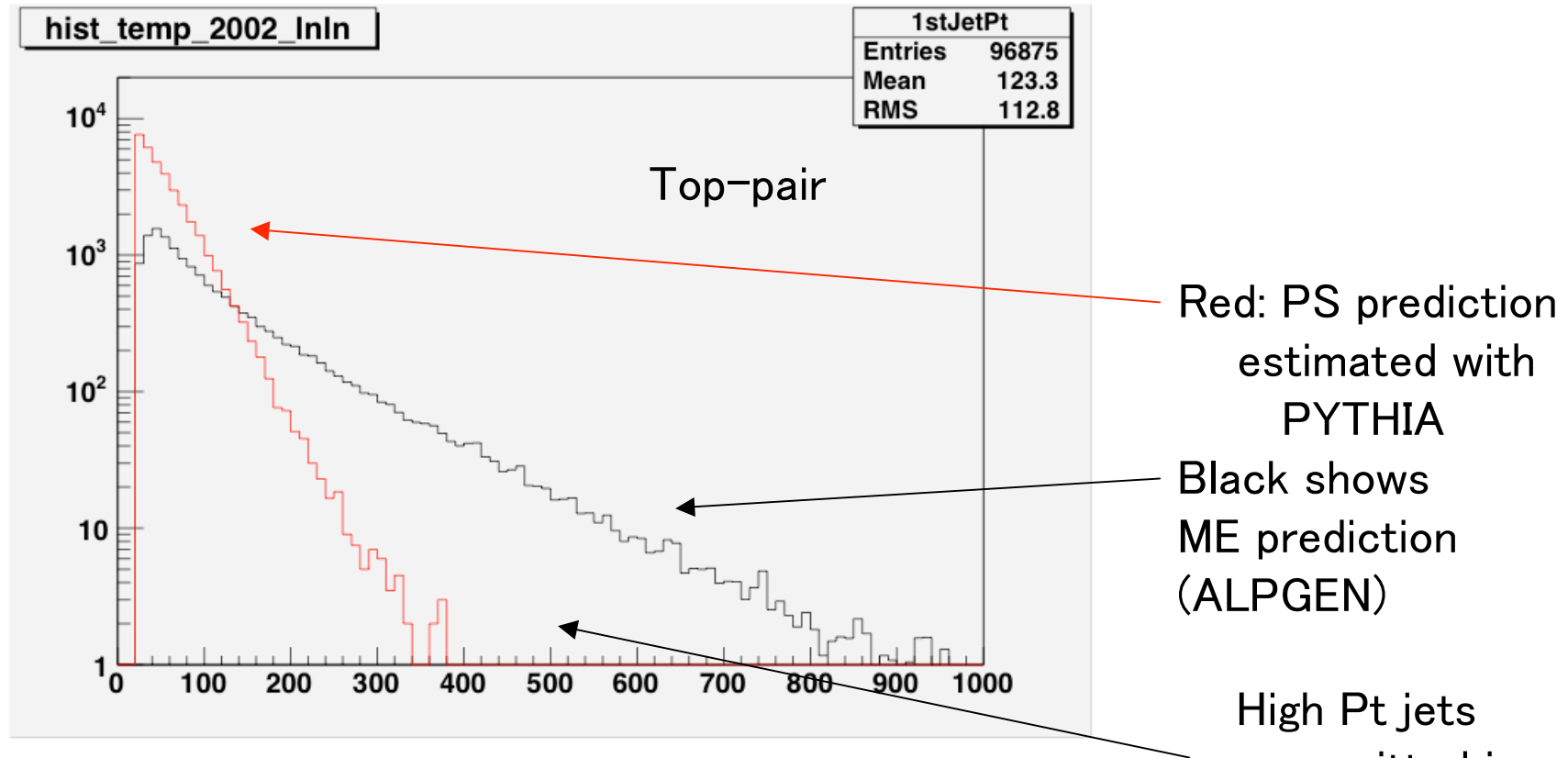
At least four jets(partons) have pt>50GeV

When the distributions are superimposed, You can see significant difference.

Hard jet is not emitted in Parton Show:
(It is famous problem.)

- Factor of more then 100 is different.
- The same problem is in 2nd,3rd,4th,,,, jets
- Jet contribution should be underestimated in current estimations.

The same problem is observed in the top-pair production.



The Pt distribution (GeV) of the highest Pt of the additional jets.

High Pt jets are emitted in tt production.

tt system is boosted

(3-2) Missing Et & jet energy scale の研究 (Full ネット)

SUSYの発見でkeyになるのが、missingの測定 と jet energy の測定

→jet の energy: “Jet”をどう作るか? Cone R=0.4 or 0.7

Ktアルゴリズム:

実験初期に安定して使えて、

十分Calibration 出来るか

Noise, Hot clusterに対応出来る様に、Kt?

Cone+QCD補正の方が?

→ Missing Et どう計算するか? Jets+C(cell of jet)+Lepton or -(CELL)+Lepton
(CMS) (ATLAS)

CELL単位でHadronとEMのcalibrationが必要 (e/h=1.2)

(Jetにすると overall にcalibrationできる。Size 依存がでる)

CELLでやると、Noise があるので、加える条件を THSを設定する

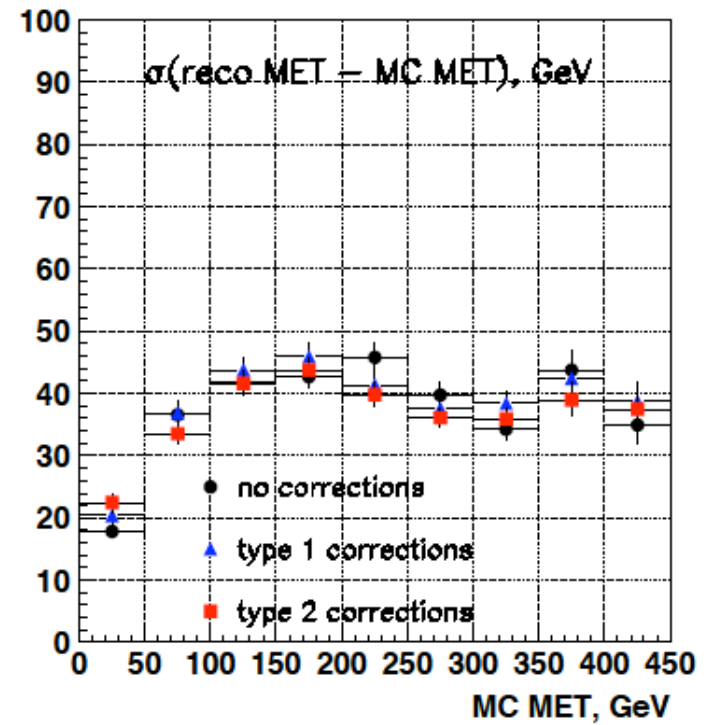
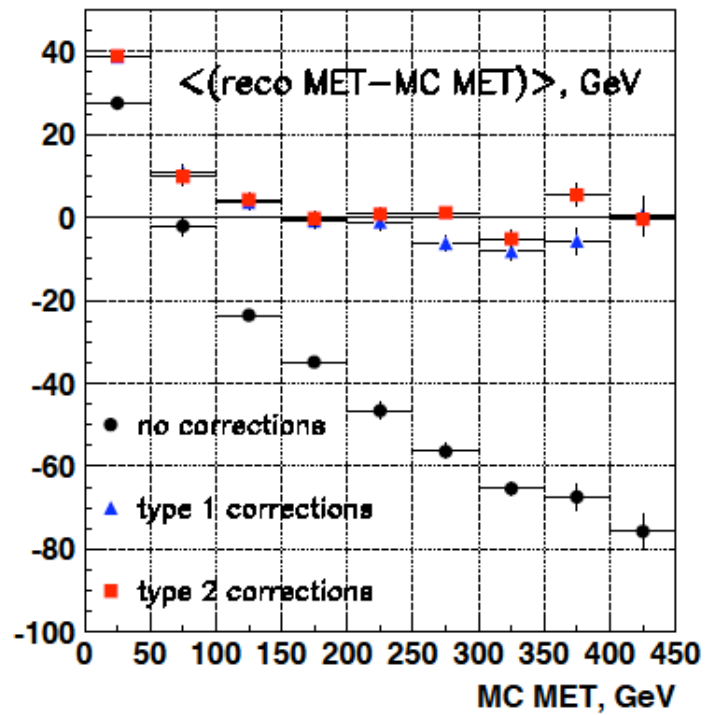
softな成分が逆に落ちてしまう。(前回のHiggs VBF tautau と同じなやみ)

→ topology で clusteringする? (流行になりつつある)

→ tracker? (私の勝手な想像1)

→ 縦(深さ)方向情報? (2)

勝手な意見ですが、SUSYは、JET基本のほうがいい?



CMSの研究 Jet+tower

Higgsはlow Etが効くから駄目だけど、SUSYはhigh Etだから、

Topological clustering (Noise 633 420 model)

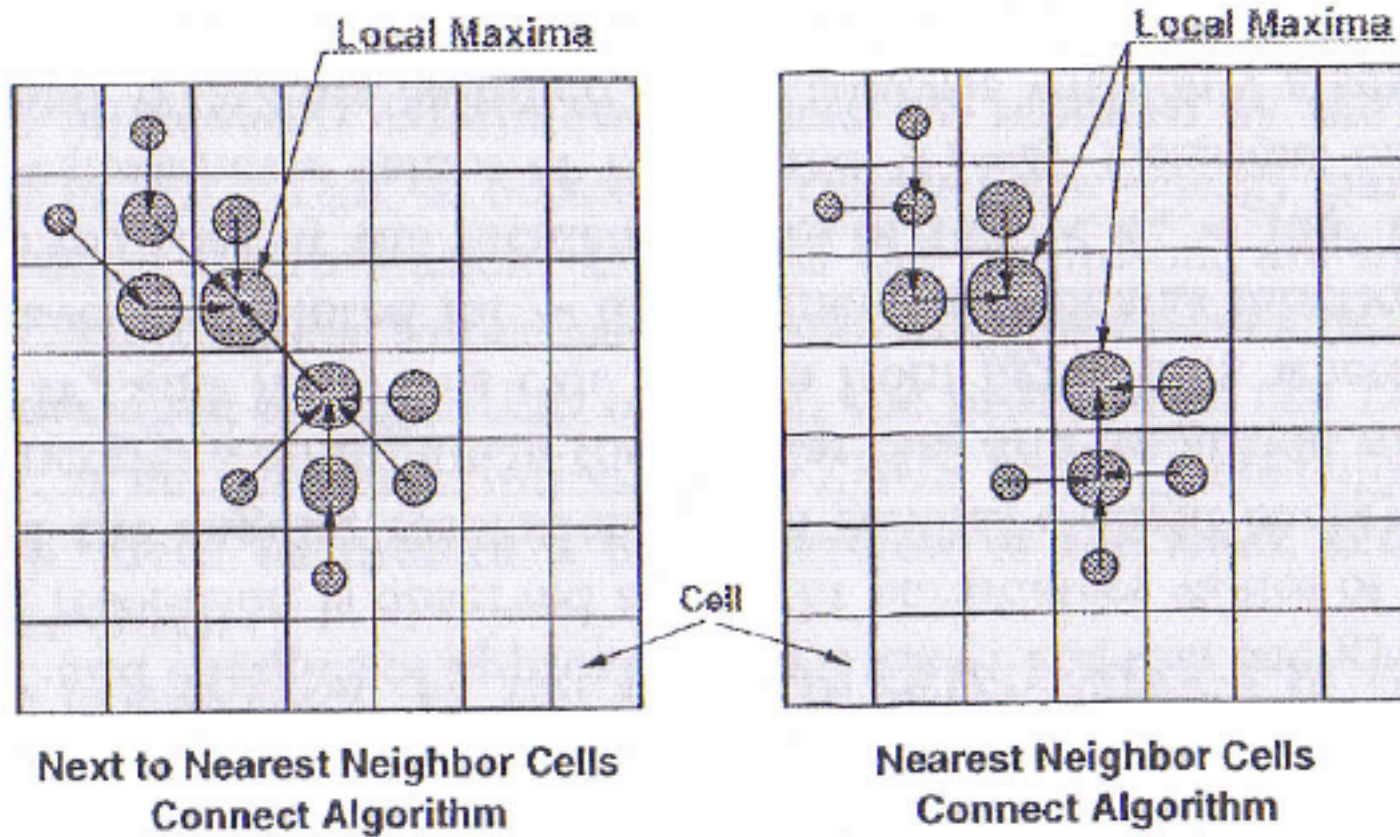


Figure 5.7: Schematic representation of the cell island clustering.