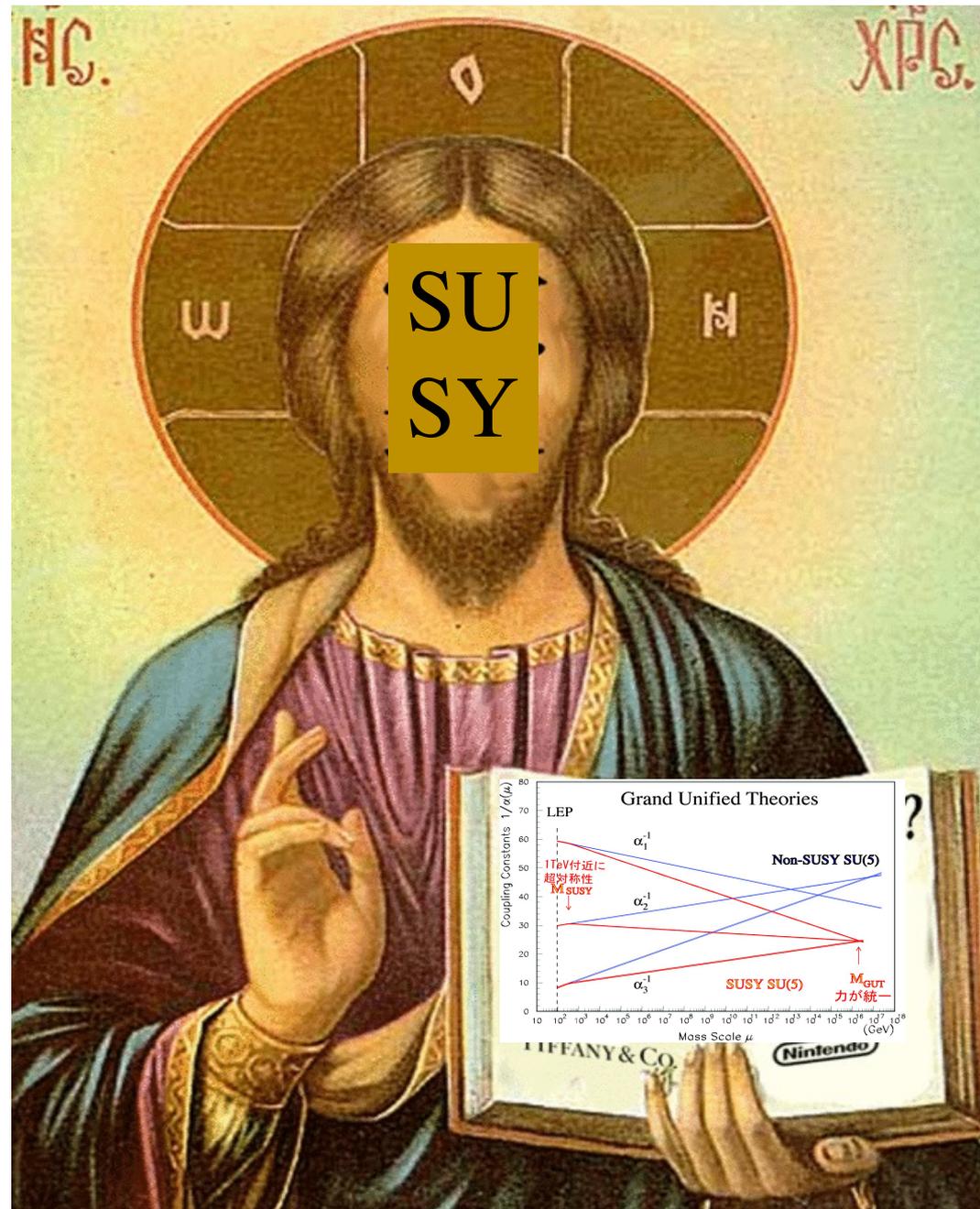


信仰の訳

- 信仰の訳(1)階層性問題
- 信仰の訳(2)ヒッグスの質量
- 信仰の訳(3) 大統一
- 信仰の訳(4) 暗黒物質
- 信仰の訳(5) 重力との融合
- チャート式 信仰のすすめ



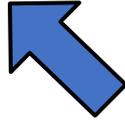
信仰の訳 (1) 「階層性問題」

信仰の訳 (2) なぜヒッグスは軽いまま？

最小の長さの単位 プランクスケール

質量 m の粒子のシュバルツシルド半径 $2G_N m$
質量 m の粒子のコンプトン波長 $2\pi/m$
 π を気にせず 同じとすると

$$l_p = \frac{1}{M_p} = \sqrt{G_N} = 10^{-35} m$$



「ヒッグス粒子が軽すぎる」
を偉そうに言うと

これが長さの最小単位
これより近いともうブラックホール

重力がべらぼうに弱いことを反映している

自然界には二つの大きく隔たったスケール存在している。

プランク・スケール：重力を長さの最小単位

($10^{-35} m$ 逆数取ると ($10^{19} GeV$))

電弱スケール：真空が縮退しているエネルギースケール

$v=246 GeV$ ざっくり ヒッグスの質量

長さ $10^{-17} m$

2つ全く違うものがあるのは物理の精神に反する！！
(階層性問題:標準モデルの 最大の問題点)

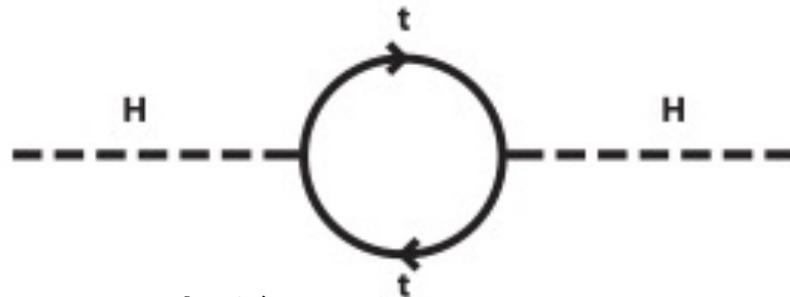
問題の本質は 「そもそも論」 にある

階層性問題は**二つの問題**である

- (1) そもそも、何故こんなに違う二つのスケールが存在するのか？
- (2) 「神の見えざる手」で2つスケールを作っても、ヒッグスの質量は 大きくなるはず

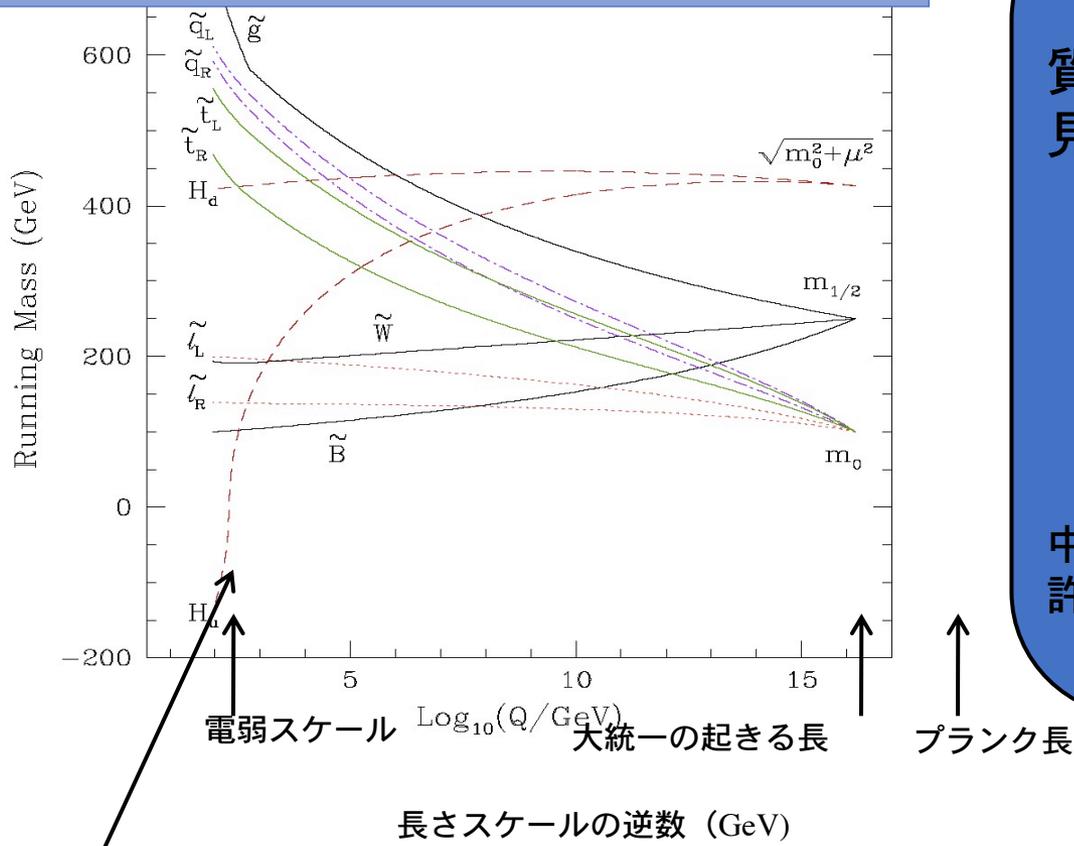
$$\Delta m^2 \approx \int_0^{cutoff} p dp \approx (cutoff)^2 \approx M_p^2 = 10^{38} GeV$$

$$c\Delta t \Delta E \sim c h/2\pi \sim 200 MeV fm$$



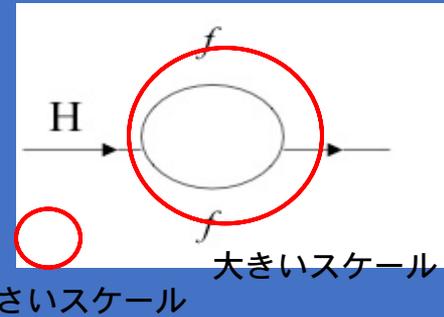
これが
長さ プランクスケールまで
小さくなれる

(1) 神の見えざる手が見える



繰り込み群

質量、結合強度も量子補正で見るスケールで違う



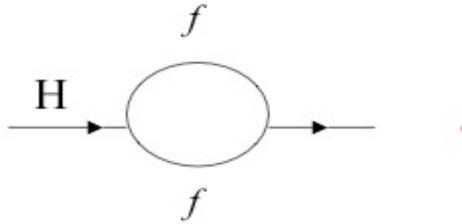
中を飛ぶ量子的粒子の許される運動量がスケールで変化
登場人物決めと後は計算するだけ

トップクォークの質量が重い(ヒッグス粒子の湯川結合定数 $Y_t \sim 1$)とヒッグス場の質量²が 電弱スケール(10^{-17}m)で負になり、自発的に対称性をやぶり、電弱スケールを作りだすことができる。

Planck scaleが本質で $Y_t=1$ から自発的対称性の破れで Higgs場が凝縮することを予言

自然に $M_{pl} \rightarrow EW$ が出てくる

(2) 相殺する



30桁以上の調整が必要
Fine tuning!!!!
不自然だ!!

$$M^2(\text{裸のHiggs質量}) = \text{○△○} \dots \dots \dots (38 \text{ 桁})$$

$$\Delta M^2(\text{量子的な補正}) = - \text{○△○} \dots \dots \dots (38 \text{ 桁})$$

$$m^2(\text{観測されるHiggs質量}) = \text{○△○△} (4 \text{ 桁})$$

超対称性があると、スピン1/2ずれた粒子が存在し、
発散を“**必ず相殺する**”。

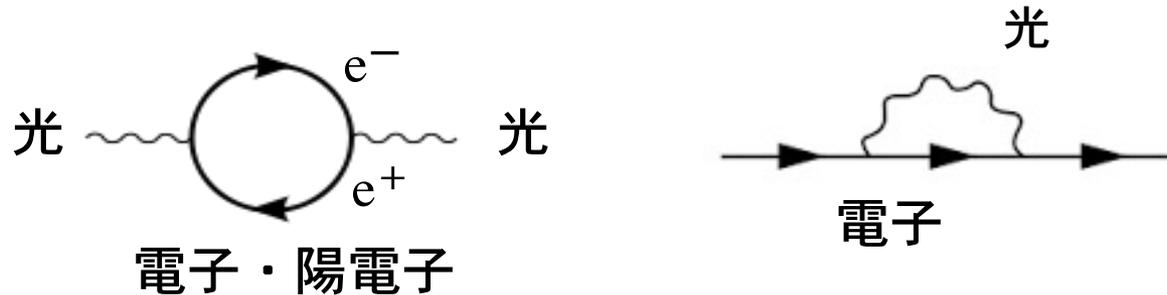


spin 1/2 の量子効果は必ずマイナスになる。720度回転対称
spin 0や1 の量子効果は必ずプラス
この対称性で**発散を消す**。

Spinと空間の関係

(反論！！) 光や電子だって軽いじゃん！

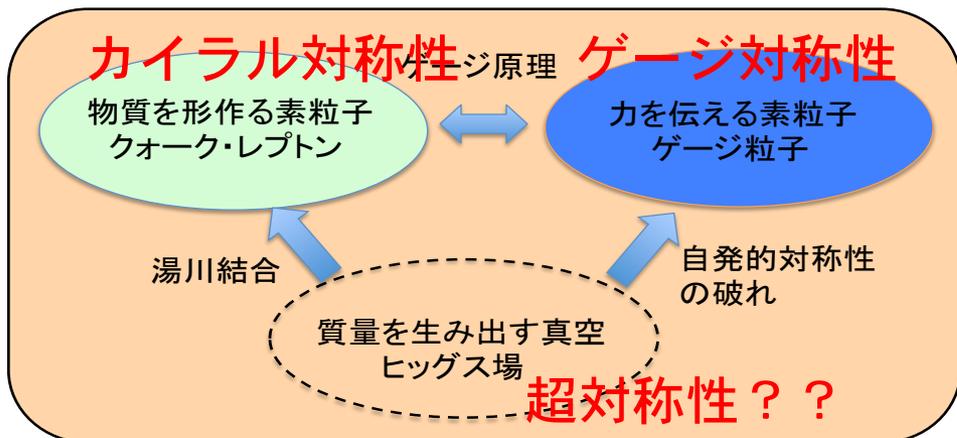
光や電子について、この問題を解決したのが朝永先生



光や電子も、同様の貢献でも、軽い！



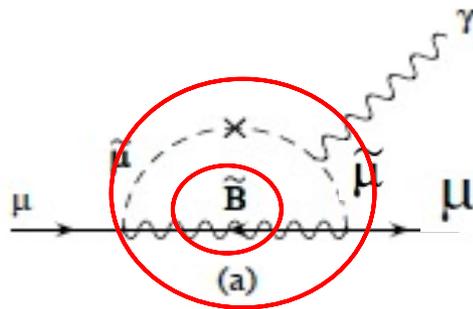
ゲージ対称性、カイラル対称性 → 質量をゼロにする対称性があるので
量子的な効果は、抑制される。(繰り込み可能)



ヒッグス粒子は、第三極：
何か新しい対称性が
あることを示唆している。
その第一候補が
「超対称性」

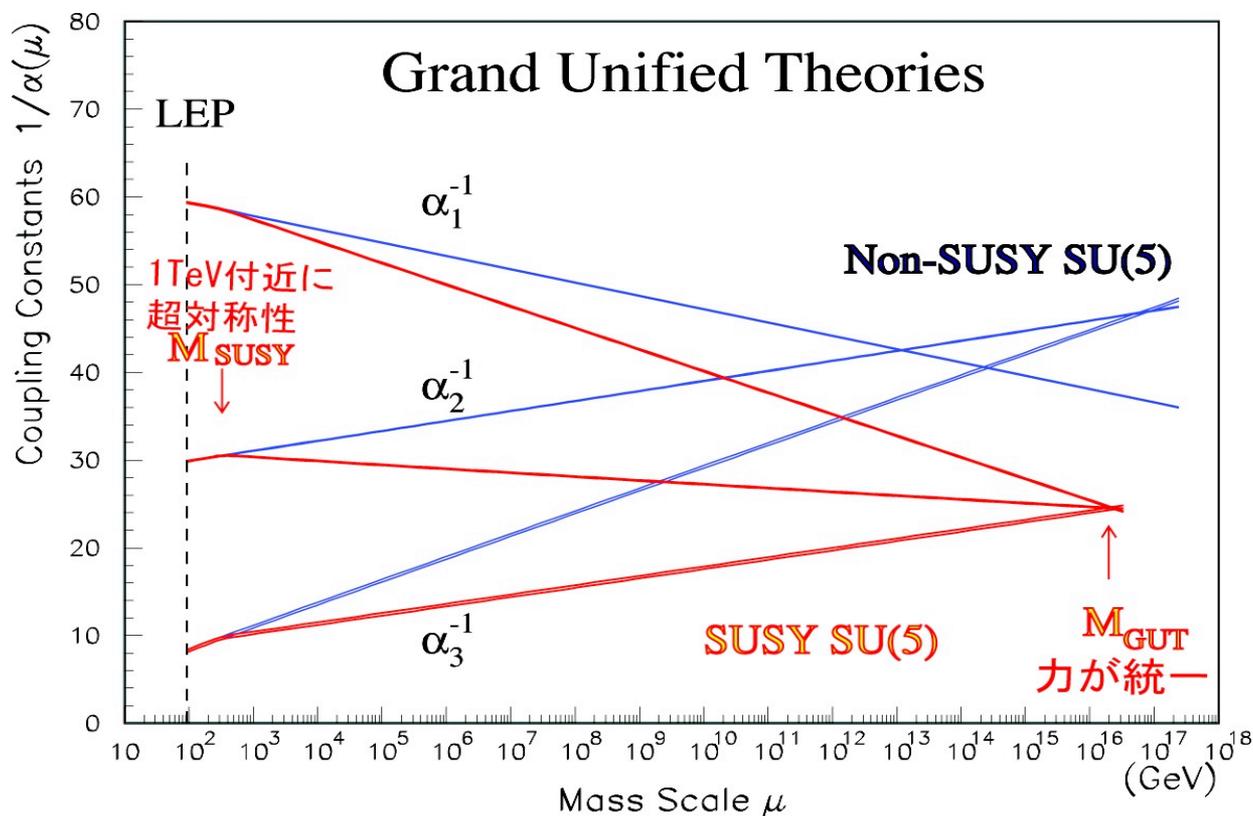
信仰の訳 (3) 力の大統一

Mass scale $\mu \sim 1/R$ (見るスケール)



新しい粒子があると
結合定数の変化が
変わる

超対称性粒子が
1-10TeV付近にあると、
3つの力は **$2 \cdot 10^{16}$ GeV**で
一つの力に
なることが示唆された。
→力の大統一 (GUT)

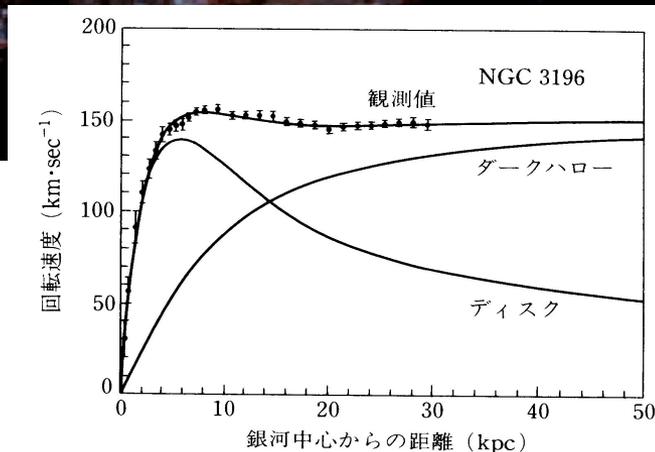
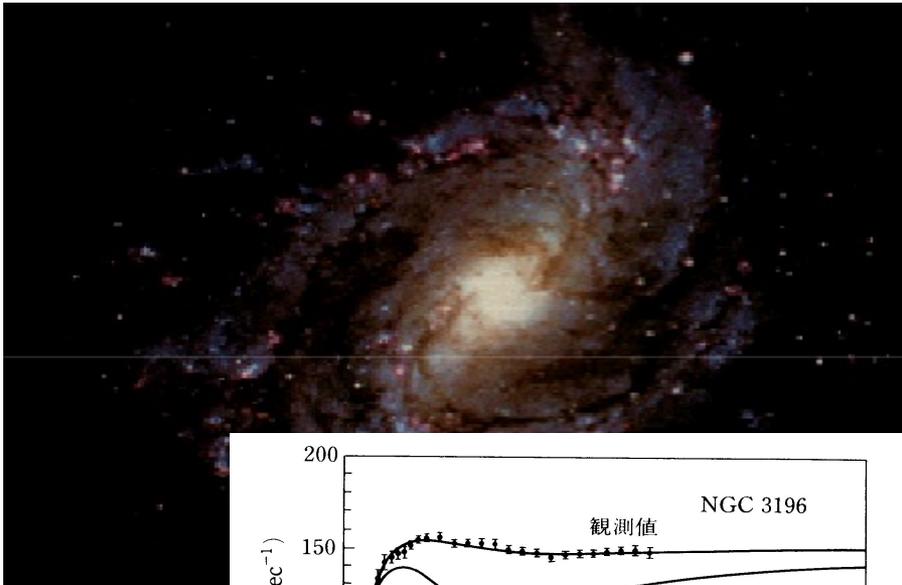
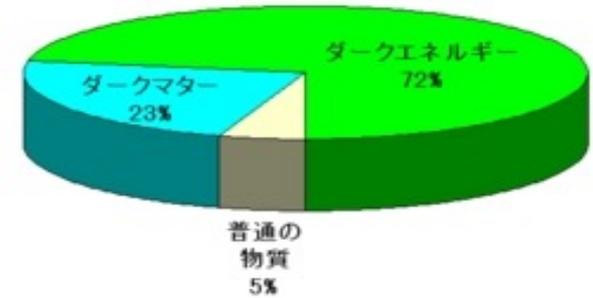


信仰の訳（4）暗黒物質

銀河の回転カーブや、銀河団の銀河固有運動、重カレンズ効果などいろいろな観測データでどの階層にも、暗黒物質の存在を示唆

（光らない・非相対論的・バリオンでない）などの要請がある。

宇宙の成分表



弾丸銀河団：銀河団衝突

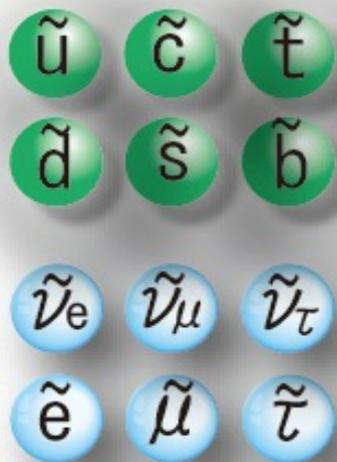
青:質量分布(ピリアル定理、重カレンズ)

赤: X線 (熱いgas)

どれが暗黒物質？（モデルに依存する）

超対称性粒子

スカラーフエルミオン



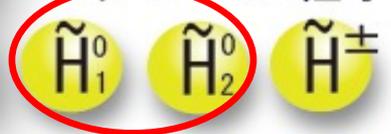
スピン 0

ゲージノ粒子



スピン 1/2

ヒグシノ粒子



スピン 1/2

Bino (U1 : 光もパートナー)
Wino (SU2 の中性成分
Z 粒子のパートナー)

Higgsino (2つの中性成分)

4つの状態は似ている
弱い力しか感じない。

混合する：
(ニュートラリーノ)

$$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$$

一番軽い状態は安定
質量 $O(100-1000 \text{ GeV})$

非相対論的でよい候補
暗黒物質のよい候補に
なるモデルもある。

あんまり宇宙と相性よくない



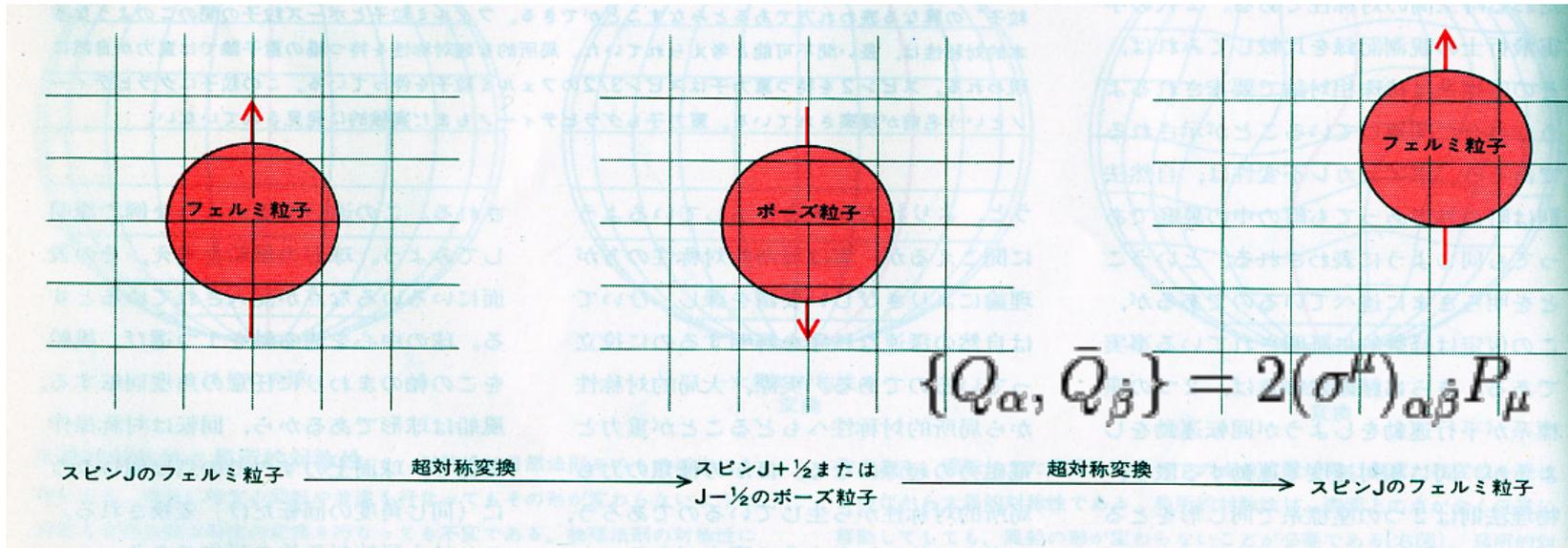
スピン 3/2

\tilde{G}

信仰の訳 (5) 重力を考えると超になる

重力が自動でとりこまれる

量子重力理論やヒモ理論は
かならず「超」がついている



超対称性は、“拡張した”時空の対称性：（時空＋粒子の統）
スピン1/2の粒子がある。これを超対称性変換するとスピン0の粒子になる
またもう一度、変換するともとのスピン1/2にもどる。
このとき、少し平行移動します（微小なローレンツ変換）

微小なローレンツ変換に対して理論不変 = 重力の理論（一般相対論）

ヒッグス粒子発見後のフローチャート

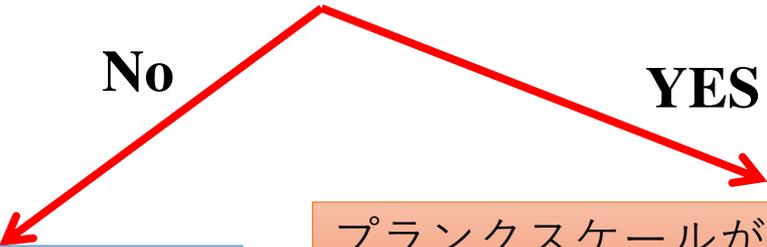


真空場（ヒッグス場）が本当に、“エレメンタリー”スカラーか？

No

YES

$$\Delta m^2 \approx \int_0^{cutoff} p dp \approx (cutoff)^2 \approx M_p^2 = 10^{38} GeV$$



合成粒子だと
1-10TeV付近に新しいカ
テクニカラー的な展開
WW散乱に異常

プランクスケールが本質か、それとも電弱スケール？

プランクスケール

電弱スケール

原理主義者

そこにヒッグス
がいる。重力なんか
しらない

新しい対称性が不可欠
超対称性
スピンと時空に対する対称性

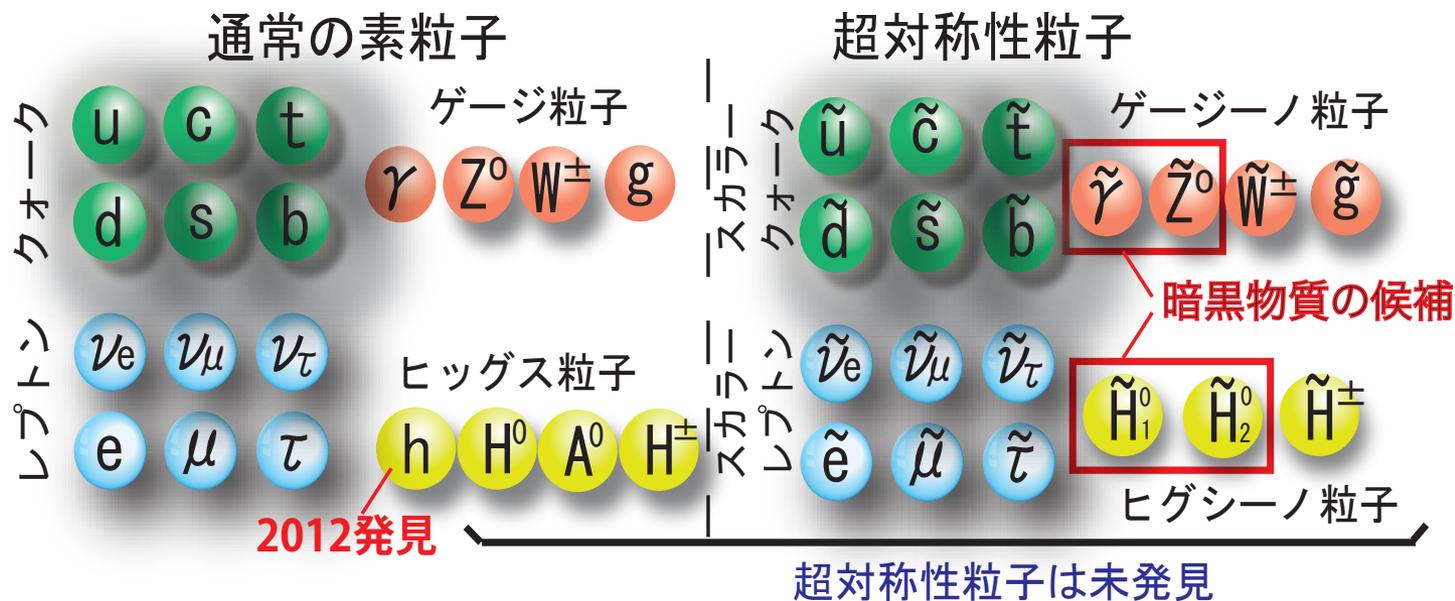
1-10TeV 違う振る舞いの
物質をいれて
ヒッグス場を安定
1) 余剰次元
2) 別の物質（変なtop）

- 1) 軽いヒッグス
- 2) 暗黒物質
- 3) GUT
- 4) 超重力への一歩

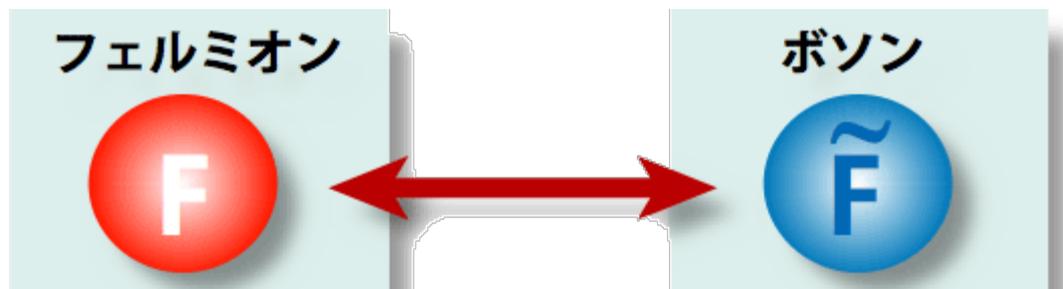
何故重力が
弱い？
余剰次元

- 1) 軽いヒッグス
- 2) 暗黒物質？

“超” 対称性



スピンの違う相方がいる世界



これがセット (1つの粒子)
見え方が違うだけ

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: $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$ scalar quark: u, c, 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 : W^+, \tilde{W}^0 gluino: \tilde{g}
S=0	Higgs: h, H, A, H^\pm	S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}^0_1, \tilde{H}^0_2, \tilde{H}^\pm$
S=2	Graviton: G	S=3/2	gravitino: \tilde{G}

自由度

e_L (弱い電荷持った電子)

\tilde{e}_L スカラー Left-handed electron

e_R (弱い電荷のない電子)

\tilde{e}_R スカラー Right-handed electron

B, Z, gは、縦波 2

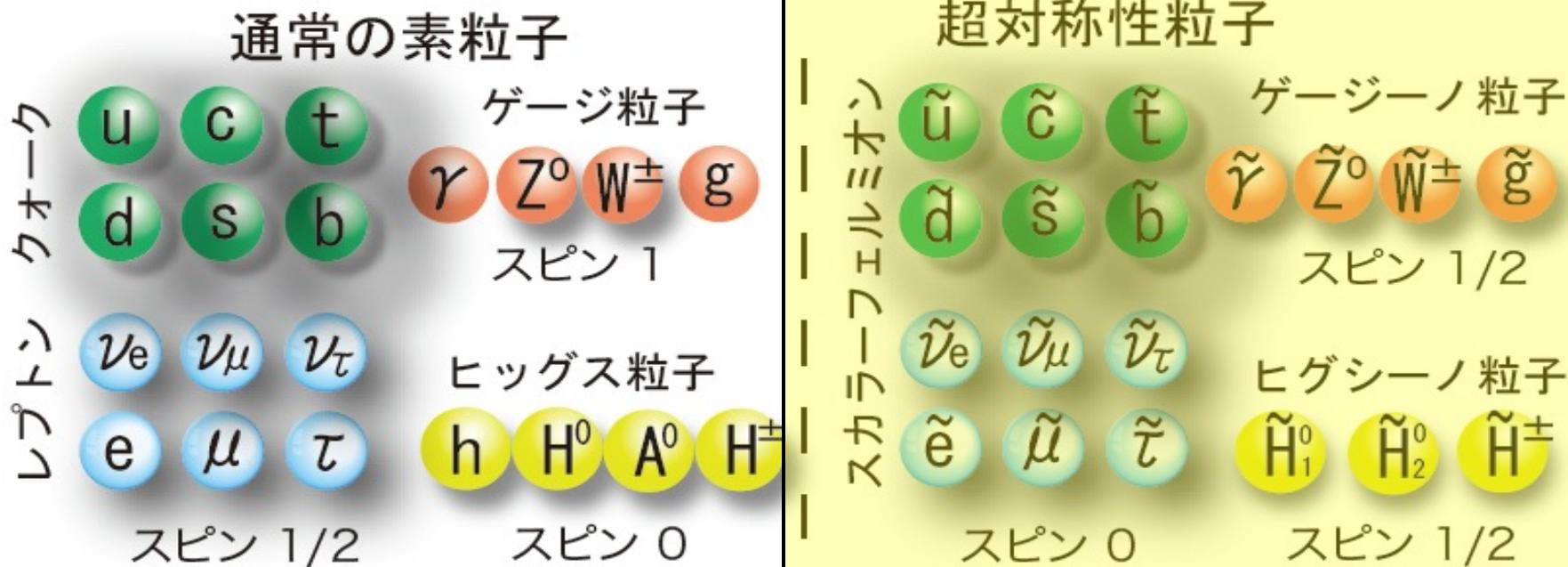
Dirac X \rightarrow マヨラナでない駄目

(u,d)1 (u,d)2 2つのHiggs doublet

A photograph of a hole torn in a piece of brown cardboard. The hole is roughly rectangular with jagged, irregular edges. The word "SUSY" is printed in a large, bold, black, sans-serif font in the center of the hole. The background behind the hole is a plain, light-colored surface.

SUSY

2. 何故見えない???



超対称性は完全な対称性ではない。

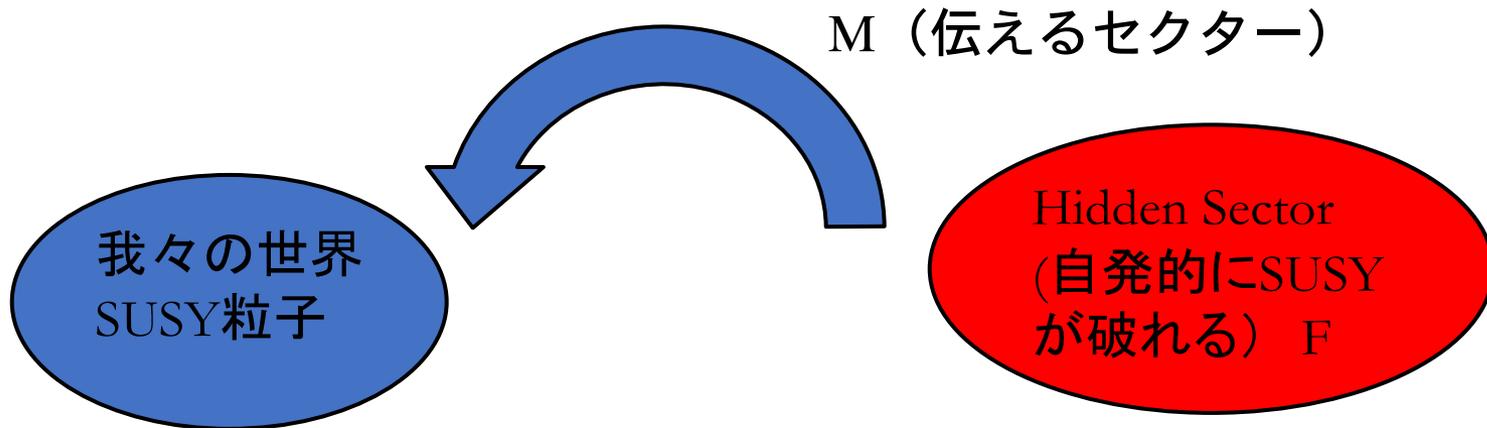
自発的に対称性がやぶれて、その破れが我々の世界に伝わってくる。

いつもの論法： 粒子が悪くない。真空が悪い。

結果 右側が重くなっている。

SUSYを破る場 (Hidden sector)があって、その効果が伝わっている。

$$m_{susy} = \langle F \rangle / M_{mediation}$$



- (1) Gravity Mediation: (重力だけ感じる 粒子 ϕ) が伝える。
重力結合の強さ $G_N \sim M_{Pl}(10^{19}\text{GeV})$ で抑えられる。 $\langle F \rangle = (10^{11}\text{GeV})^2$
- (2) Gauge Mediation: (両方のセクターの電荷をもつメッセンジャー粒子) が伝える。 結合は 普通のカ (ゲージ結合) の結合
- (3) Anomaly Mediation 量子効果で伝わる。

アノマリー：古典的にある対称性 量子論になった時連続性が失われるから、対称性が破れることを言う。

$$m_{susy} = \langle F \rangle / M_{mediation}$$

	SUGRA	GMSB	AMSB
伝えている機構	Planck scaleの物理 あるsingletを手でいれる。 $M=M_{pl}, \sqrt{F}=10^{11}$ GeV	破る場とSM場の両方の電荷をもつセクター (メッセンジャー) $M=10-1000$ TeV, $\sqrt{F}=10^{5-9}$	重力場自体 手で何か加える必要はない $M=M_{pl}, \sqrt{F}=10^{13}$ GeV
LSPとDM	Bino $\sim O(100)$ GeVならOK	Gravitino $\sim O(eV-KeV)$ Hot? X	Wino $\sim O(1)$ TeV OK
FCNC	1TeVなら m_0 縮退を仮定 かなり厳しい	OK ゲージ結合なのでフレバーに寄らない	m_0 を手で入れないとタキオン、 $m_0 \gg 1$ TeVならFCNC OK
Gravitino	1TeV reheating X 軽いSugraは、まずい	< 1 GeV たくさん出来るがDM ○	10-1000TeV ($\sim m_0$?) reheating 程度 ○
パラメーター	$m_0, m_{1/2}, \text{sign}(\mu), \tan\beta, A$	$\Lambda, M, n, \tan\beta, \text{sign}(\mu), C_{gra}$ NLSPが鍵	$m_{3/2} (m_0), \tan\beta, \text{sign}(\mu)$

FCNC $b \rightarrow s\gamma$ (Z) $s \rightarrow d\gamma$ (Z) KK mixing

電子や中性子のEDM

scalar partの効果がそのまま

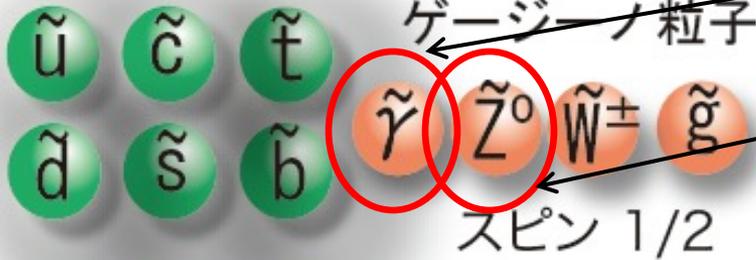
ダークマター

残りすぎるとまずい

超対称性粒子

SUGRA $M \sim 100-200 \text{ GeV}$

スカラーフェルミオン

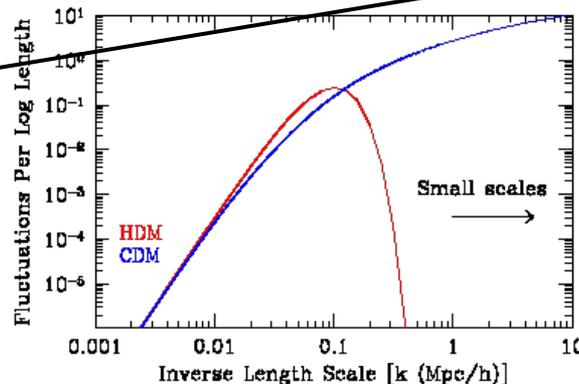


AMSB $M \sim 2-3 \text{ TeV}$

μ のスケール?



μ が $500-1000 \text{ GeV}$
Higgsino DM
mixed DM

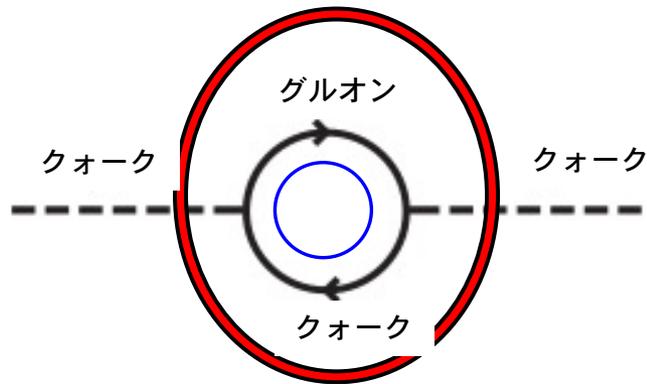


上の3つは重いので
非相対論的 $\beta \sim 10^{-3-4}$
グラビティーノは
軽いので相対論的 $\beta \sim 1$
広い領域を飛び交う 熱平衡
銀河の種をつぶしてしまう



SUSY

質量もみるエネルギー領域で変化



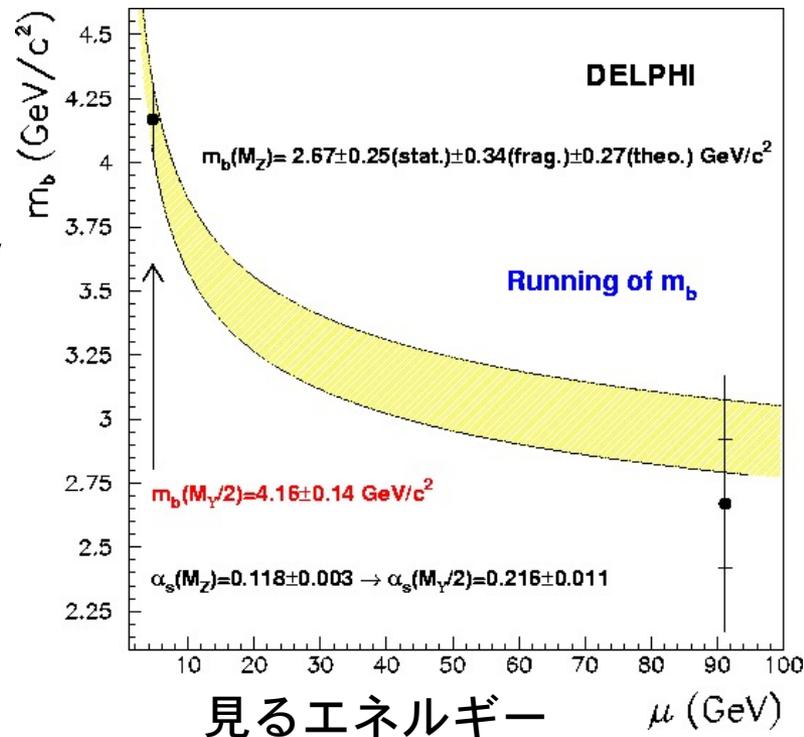
結合定数のことを思い出してください)

高いエネルギーで観測 (青い○)
 この円より小さい領域の量子効果だけ
 例えば、絵の量子効果は含まれない。
 低いエネルギーで観測 (赤い○)
 絵の量子効果は含まれる

実験データ

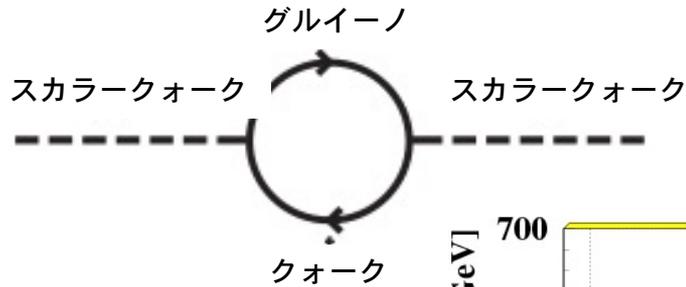


ボトムの
質量



GUTでの質量(input)とLHCでの質量

重い：強い



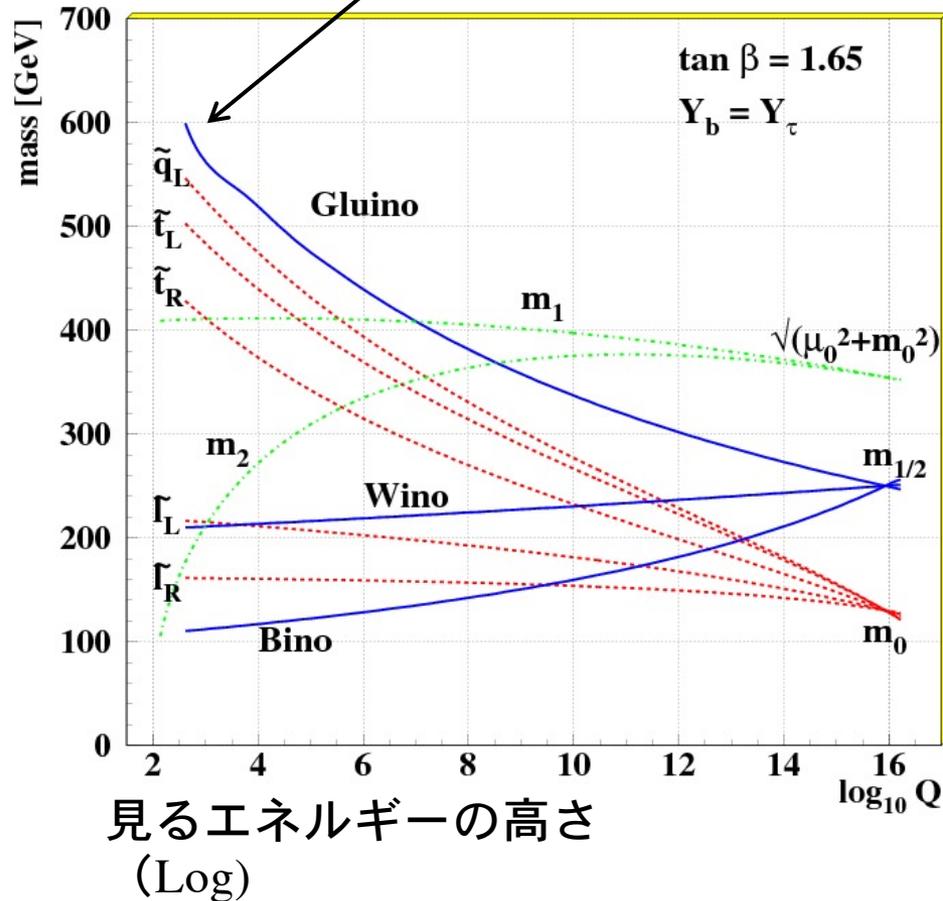
LHCの
エネルギー

大統一
のエネルギー

スカラークォーク
グルイーノ

スカラー
レプトン

ウィーノ
ビーノ



変化は
どんな粒子が
どう結合して
いるか？
モデルによる

sfermion & gluino 性質

LとR : SU(2)に対する電荷を持っているか
 SU(3) : 強い力 一番重くなる効果
 SU(2) : 少し太る L > R
 U(1) : 効果が小さい

共通@GUT Running effect
 ↓ ↓
 Mass@EW 結合が強い程重くなる

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$\begin{pmatrix} L \\ R \end{pmatrix}$ L-R

tanβが大きいと, τが大切

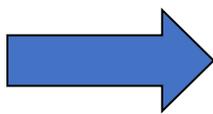
1TeV scaleだともうすこし係数小さくなります

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)

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



Mass eigenstate

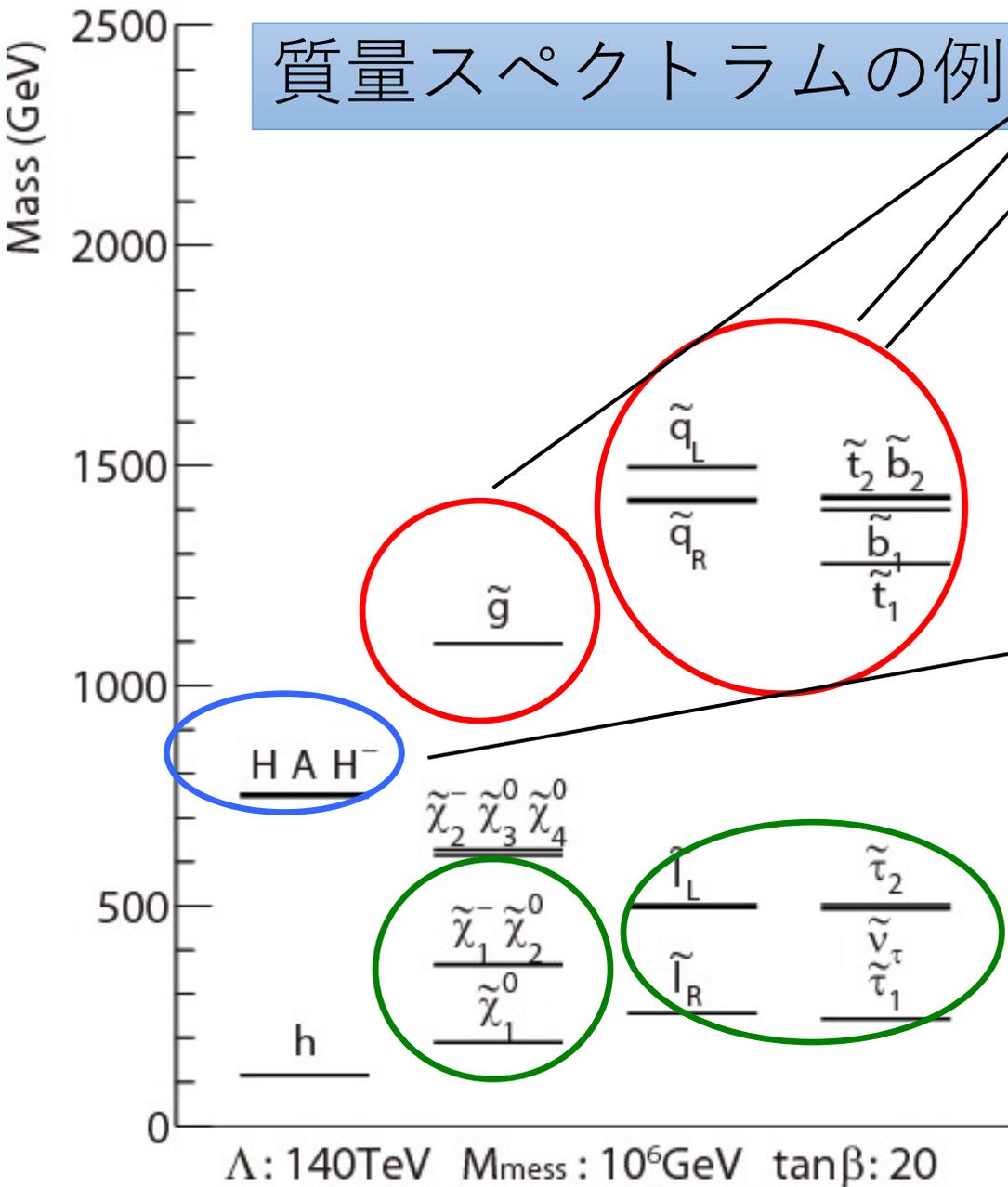
$$\begin{pmatrix}
 \tilde{\chi}_1^0 \\
 \tilde{\chi}_2^0 \\
 \tilde{\chi}_3^0 \\
 \tilde{\chi}_4^0
 \end{pmatrix}$$

- $\tilde{\chi}_1^0$ がLSP(Lightest stable particle) -> DM
- 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。

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

質量スペクトラムの例



スカラー クォーク 1-100TeV
 グルイーン は 重い
 第3世代のスカラートップ
 クォークは、他より少し
 軽い

重いヒッグス粒子
 も 1 TeV-100TeV ?

スカラー レプトン

チャージーノ
 ニュートラリーノ
 (Bino/Wino/Higgsino)

AMSBモデルの特徴

$$\textcircled{1} m_a = \frac{\beta g}{g} m_{3/2}$$

$$M_1 : M_2 : M_3 = 3 : 1 : 7$$

→ winoがLSPになる

基本パラメータ

$$m_{3/2} = 10-100 \text{ TeV}$$

$\tan \beta$

$|\mu|$

$m_{3/2} * \alpha_{EW} \sim \text{TeV}$ (しっっかりした話)

$m_0 \sim m_{3/2} \sim 10-100 \text{ TeV}$ (これはあまり. M_0 がないとタキオン)

1. WinoがLSP
2. スカラーが重い
3. アノマリーは、必ずある。これは小さいので他の機構があれば、そっちの効果が大きい。何も伝搬の機構がないとき、効く。

The Old Testament

Light SUSY



Before LHC, people believed SUSY is light ($\sim 1 \text{ TeV}$)

Natural (自然な) SUSY

スカラー
トップクォーク
に対する制限

軽いSUSY(<1TeV)を信じた3つの訳

(1) 一番強い条件 量子的な効果をキャンセルする 階層性問題
信仰の訳 (2)



$$m(H)^2 = m^2(\text{裸}) - \Delta M^2(\text{top}) + \Delta M^2(\text{scalar top})$$

Scalar top の質量
1000 GeV 10,000 GeV

$$M^2(\text{裸のHiggs質量}) = \text{O} \Delta \text{O} \dots \dots \dots (6 \text{桁}) \quad (8 \text{桁})$$

$$\Delta M^2(\text{量子的な補正}) = - \text{O} \Delta \text{O} \dots \dots \dots (6 \text{桁}) \quad (8 \text{桁})$$

$$m^2(\text{観測されるHiggs質量}) = \text{O} \Delta \text{O} \Delta (4 \text{桁})$$

Higgs mass ~ 125 GeV
top mass ~ 173 GeV

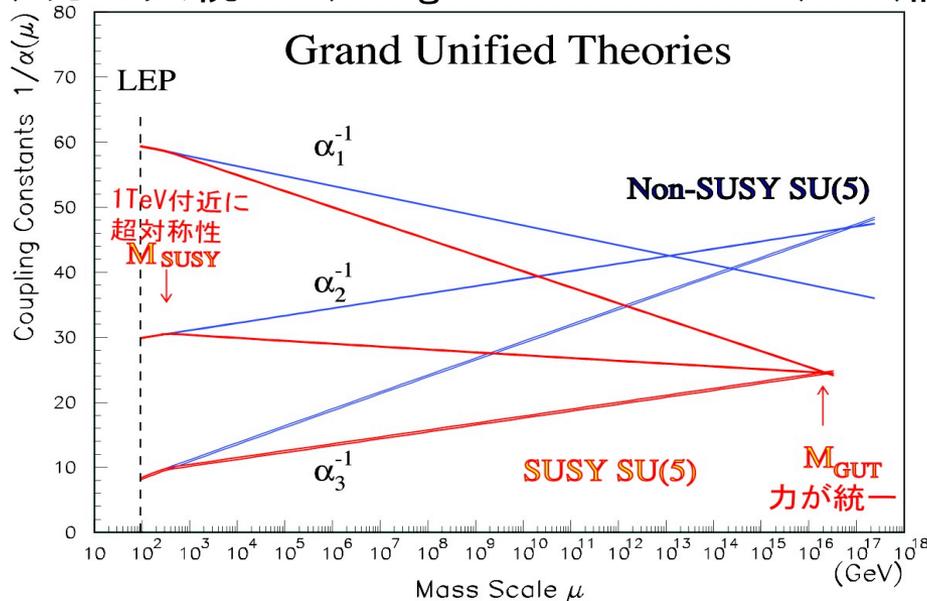
1% 程度の調整は “自然” だろう
でも 0.01% の調整は不自然
(ちょっと恣意的)

Natural (自然な) SUSY

軽いSUSY(<1TeV)を信じた3つの訳

(2) 暗黒物質 (Bino < 500GeV / Wino \sim O(1)TeV /
Higgsino mass \sim O(100-1000GeV))
一番軽い超対称性粒子に関する制限 (信仰の訳4)

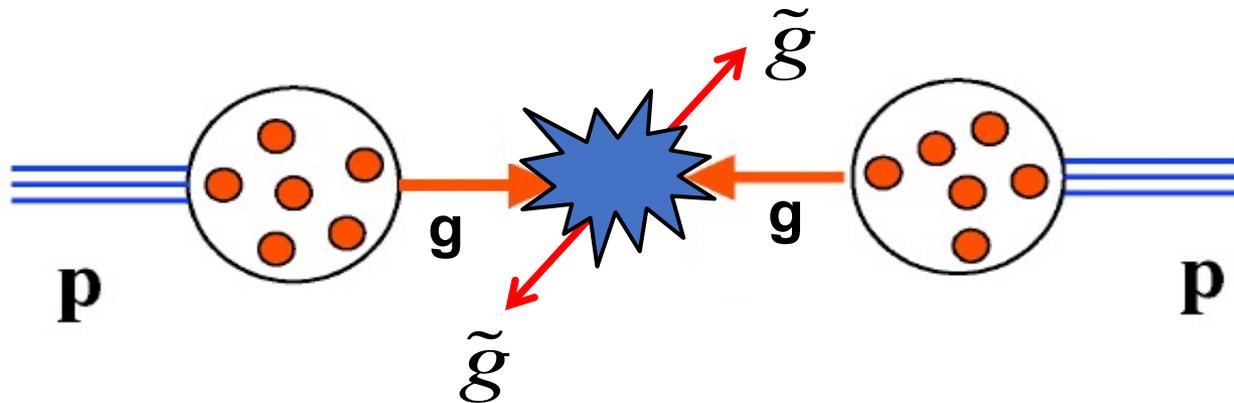
(3) 力の大統一 (Gaugino \sim 1-10TeV) (信仰の訳3)



ゲージノ
(スピン1/2)
に対する制限

- (1) 較べて弱い条件
- (2) スピン0に対するものと違う

LHCでの超対称性粒子の生成



陽子の中のグルーオンやクォーク同士が反応して色を持った スカラー・クォークやグルーノを作る。

超対称性粒子

ゲージノ粒子

スピンの 1/2

ヒグシーノ粒子

スピンの 1/2

スカラーフェルミオン

スピンの 0

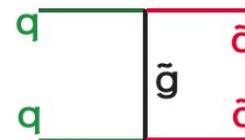
\tilde{u} \tilde{c} \tilde{t}
 \tilde{d} \tilde{s} \tilde{b}
 $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\nu}_\tau$
 \tilde{e} $\tilde{\mu}$ $\tilde{\tau}$

$\tilde{\gamma}$ \tilde{Z}^0 \tilde{W}^\pm \tilde{g}
 \tilde{H}_1^0 \tilde{H}_2^0 \tilde{H}^\pm

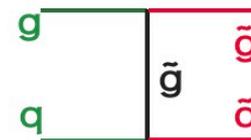
$\tilde{g}\tilde{g}$ prod.



$\tilde{q}\tilde{q}$ prod.



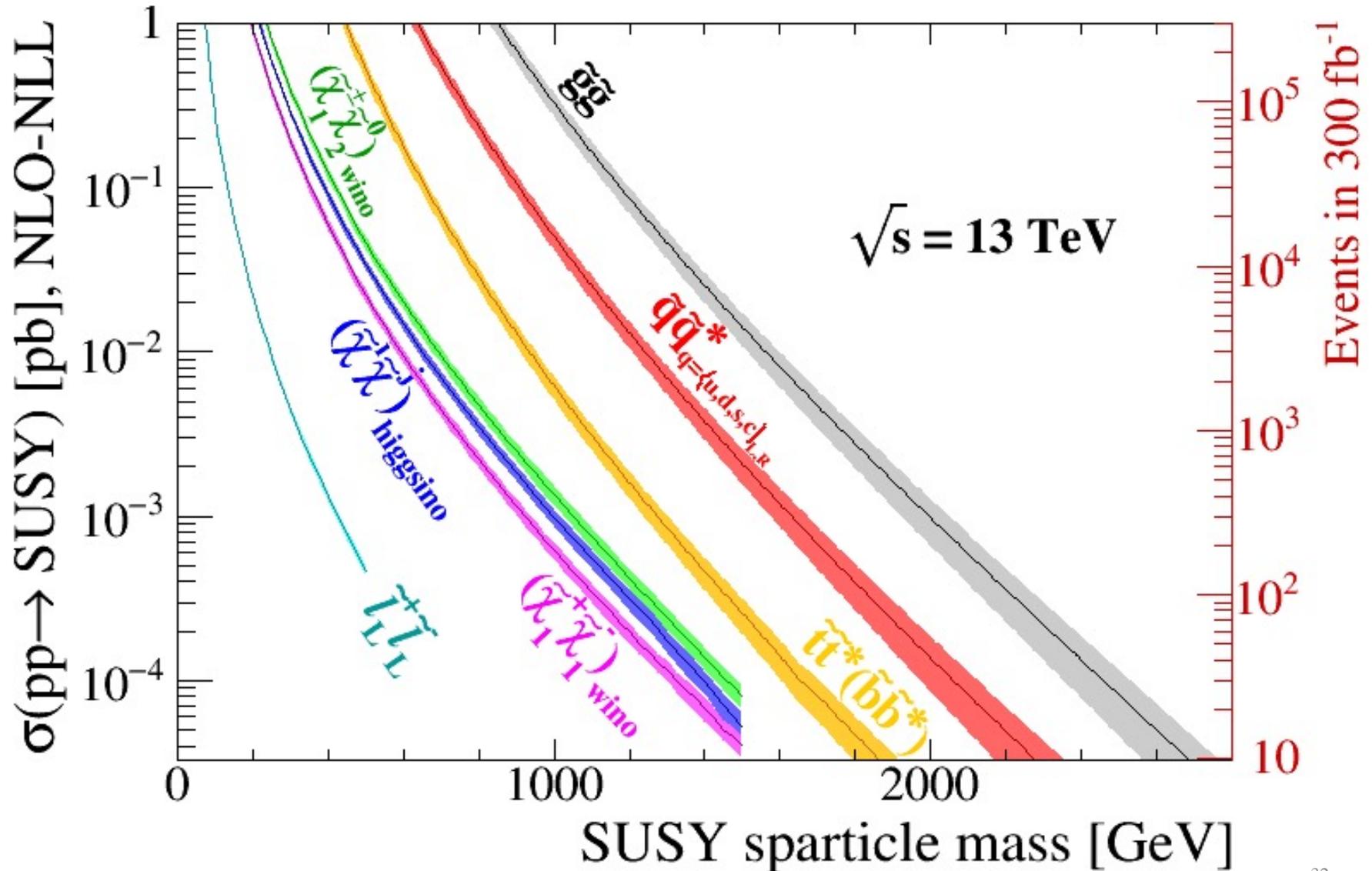
$\tilde{q}\tilde{g}$ prod.



ペアーで出来る

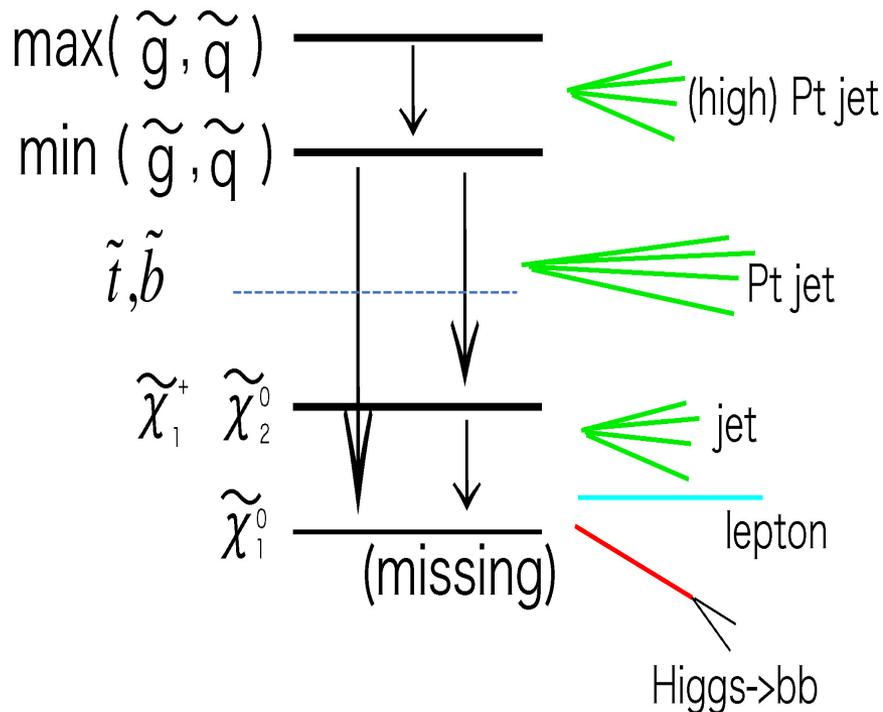
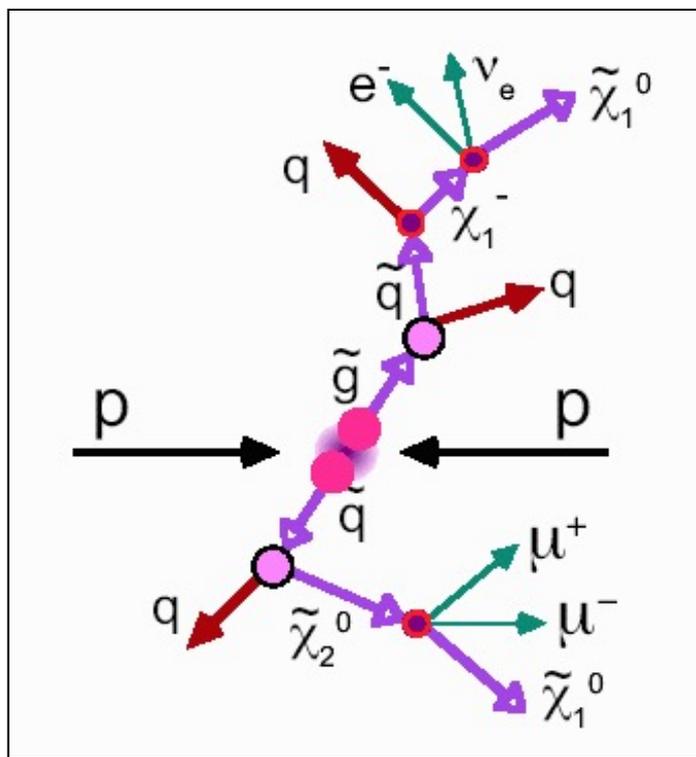
Glauino 1fb (2TeV) squark 0.1fb(2TeV)

LPCC SUSY Cross Section WG



超対称性粒子の崩壊

生成されたグルイーノやスカラークォークはどんどん崩壊し (カスケード)
標準モデルの粒子複数と一番軽い超対称性粒子になる。



- 特徴は、
- 1) たくさんの粒子 +
 - 2) 見えない粒子 (暗黒物質) によるアンバランスさ

SUGRA

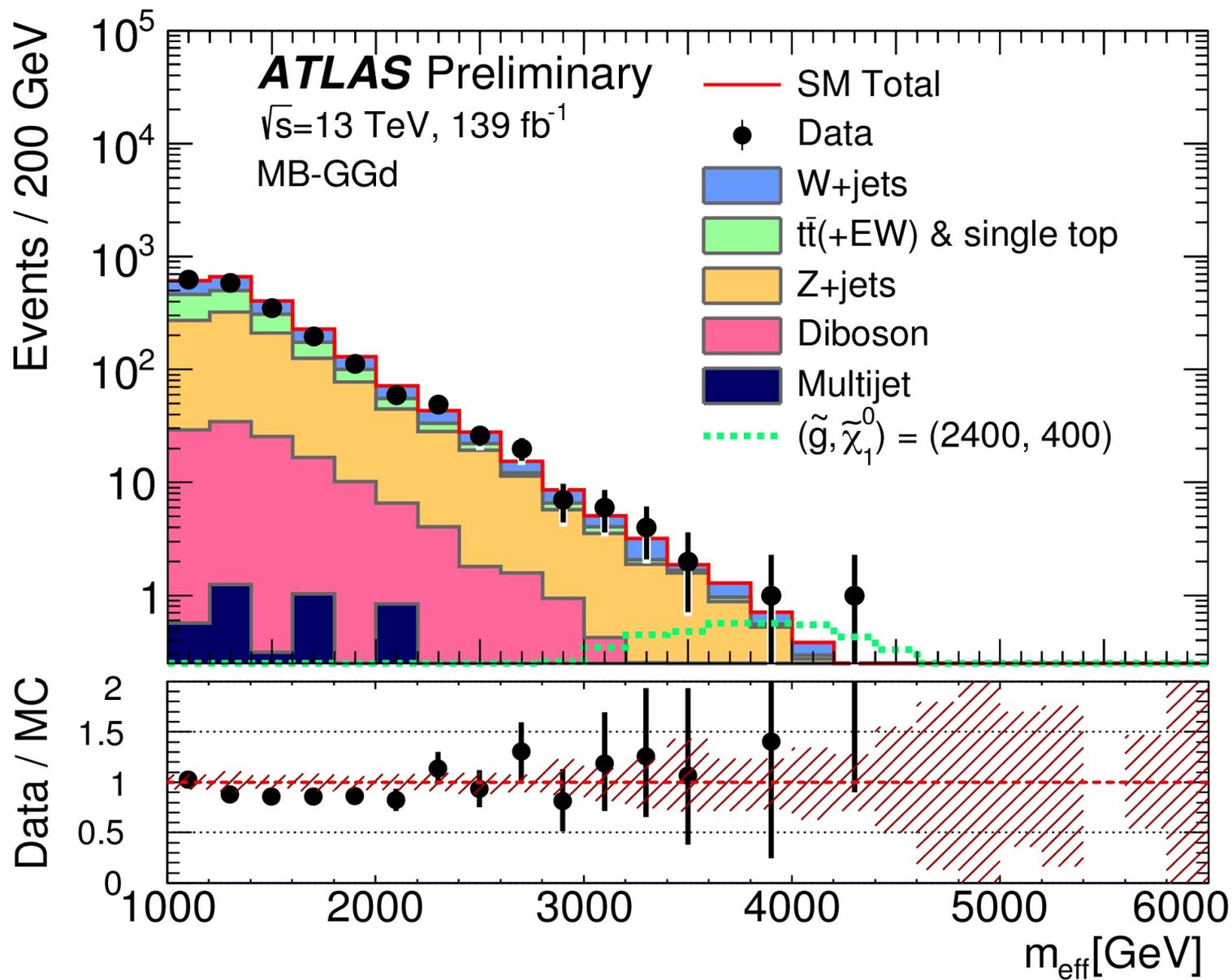
\tilde{g}, \tilde{q} のdecay table

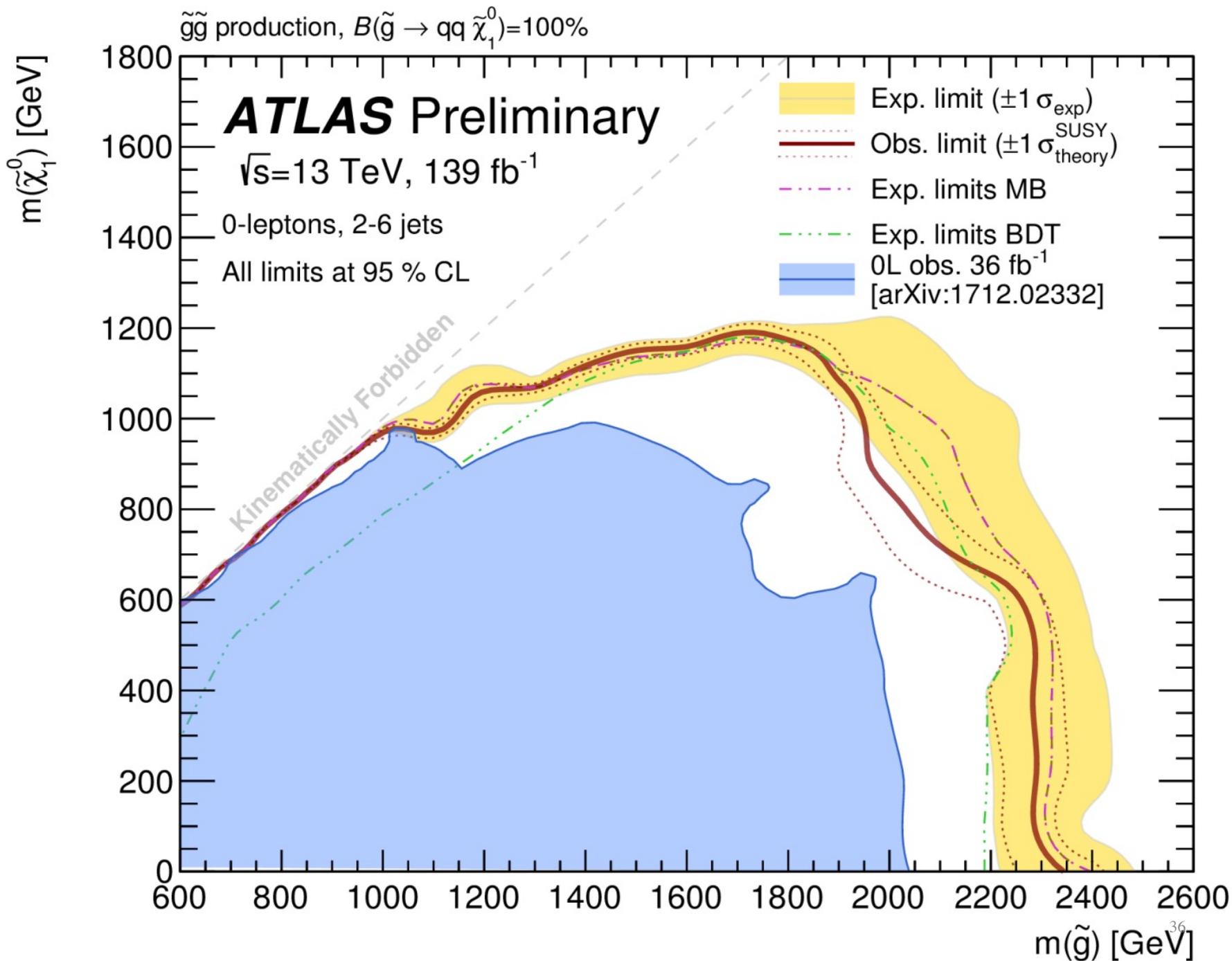
	$m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) \approx m(\tilde{q})$	$m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$
\tilde{g}	$q\bar{q}\tilde{B}^0 (\approx 1)$ $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{W}^0 (\approx 2)$ $q\bar{q}\tilde{W}^\pm (\approx 4)$	$\tilde{g} \rightarrow t\bar{t}_1$ $\tilde{g} \rightarrow b\bar{b}_1$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

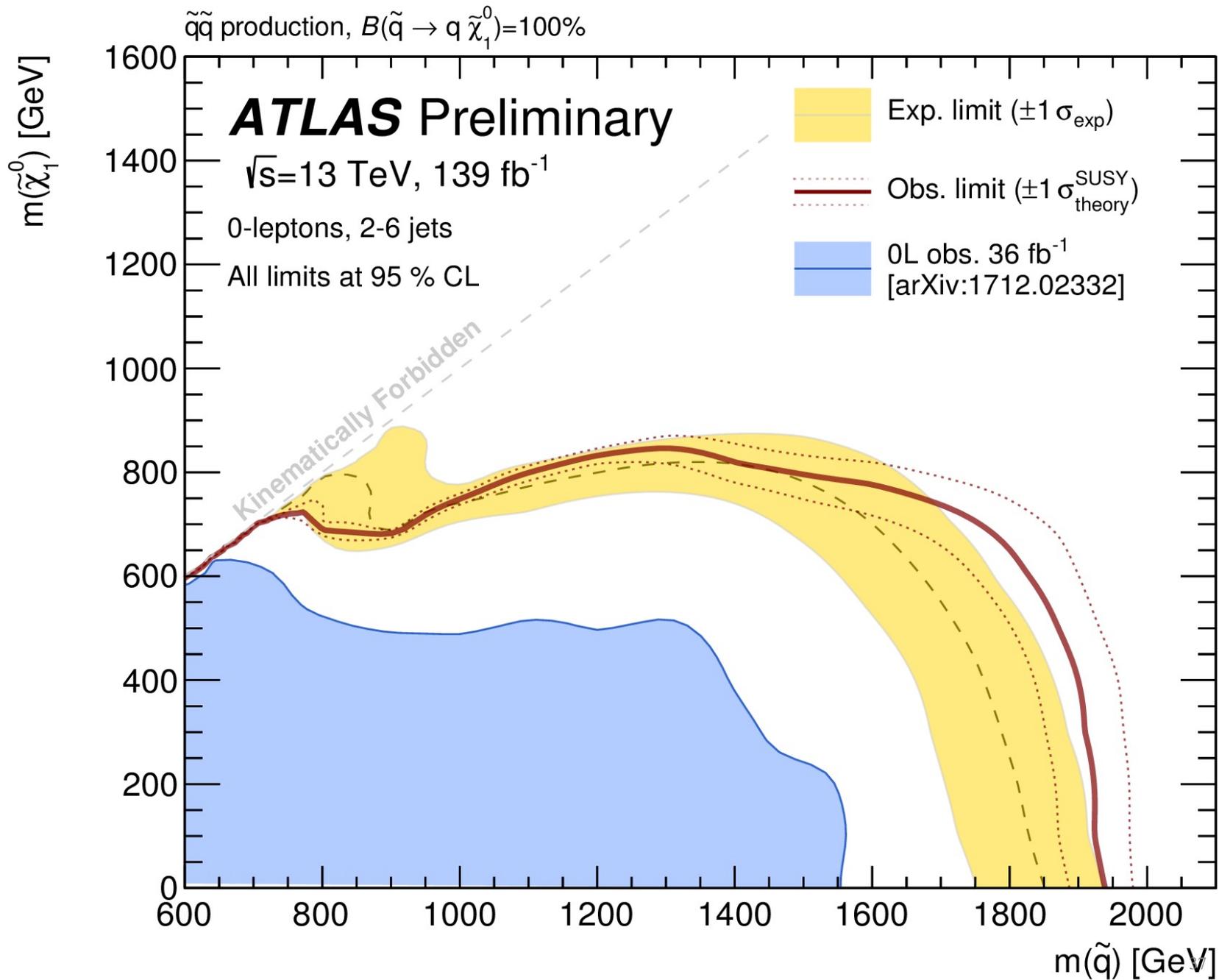
Strong interaction

EW interaction

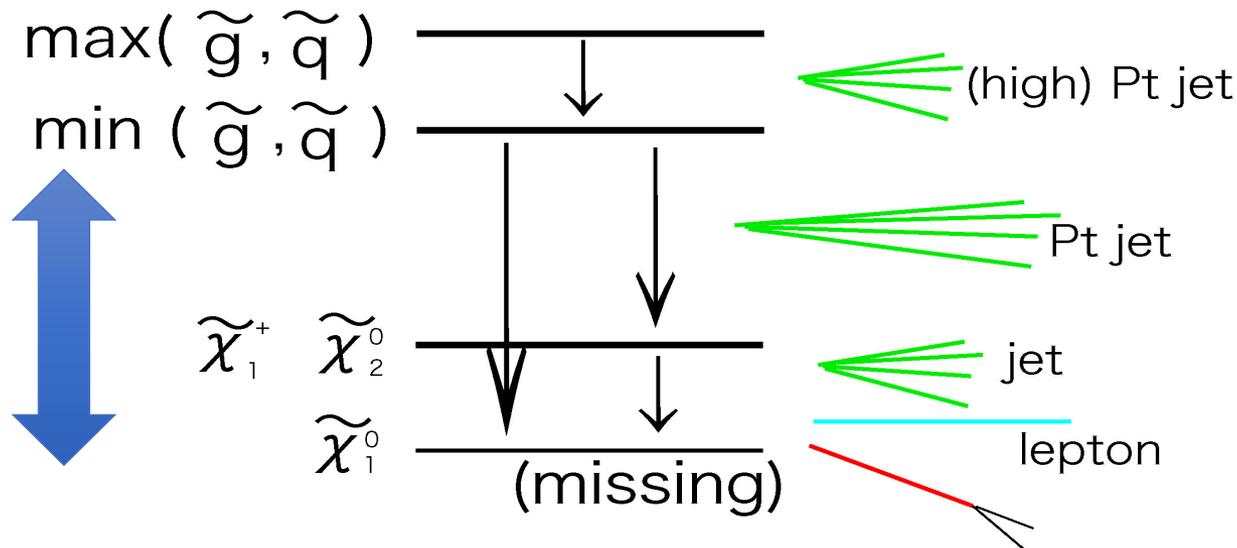
Massの関係やB,Wと χ の関係、第3世代などが、モデル依存



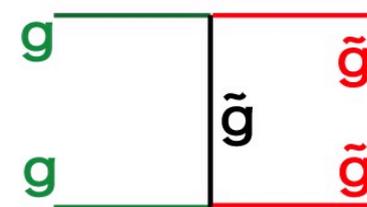




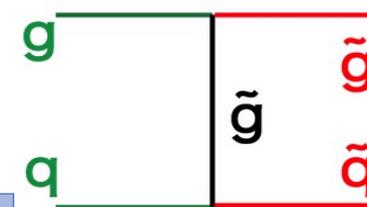
実はあんまりモデルによらない



$\tilde{g}\tilde{g}$ 対生成



$\tilde{q}\tilde{g}$ 随伴生成



この質量差 小さい、
出てくる奴が けちくさくなってLHCでは駄目

グルイーノ、スカラークォーク
> **~ 2 TeV**

Natural SUSY (<1TeV) が なかなか厳しい状況