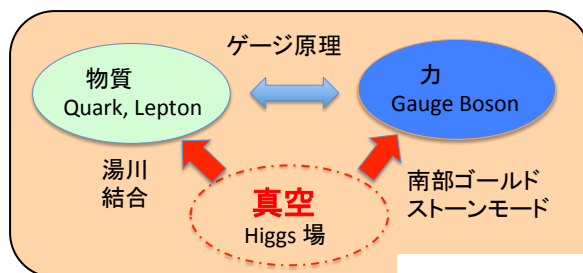




超対称性粒子を探せ 素粒子と時空

あさい

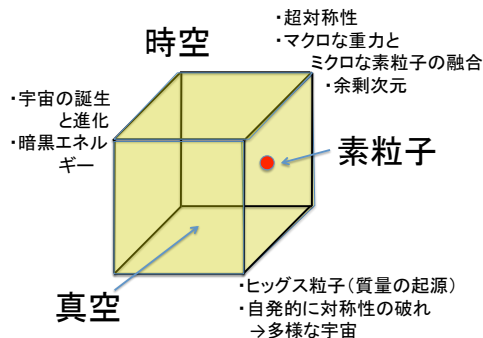
ヒッグス発見が意味する今後の素粒子研究



ヒッグス粒子がすごいのではなくて
ヒッグス場が見つかったこと。
素粒子: 物質 fermion
: 力 S=1 Boson
全く新しいカテゴリー
真空: 宇宙全体にひろがっている

もうひとつのカテゴリー: 時空

一般相対性理論と量子論の融合



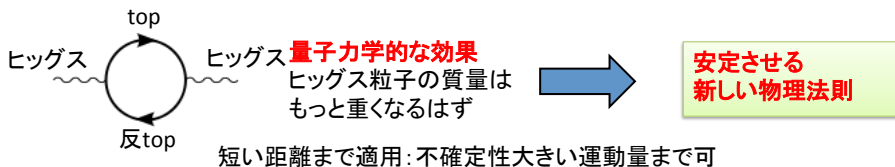
お品書き

1. 今そこにある危機 階層問題
 スピンとは
 超対称性とは
2. 信仰の罫
3. やぶれたSUSY
4. 探してみた @ 8TeV
5. Higgs massが意味すること
6. 14TeVでの作戦方針

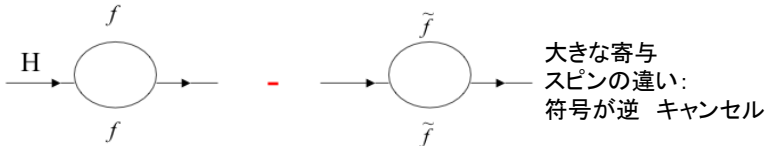
階層性問題

Light Higgs Bosonの存在 ~ すぐそこに 新物理がある

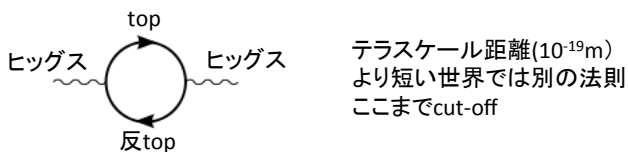
ヒッグス粒子のエネルギースケール $O(100)$ GeV 長さ: 10^{-17} m
 量子重力や力の統一 (GUT) $O(10^{16}-10^{19})$ GeV 長さ: 10^{-34} m



軽くさせる方法 I (超対称性)

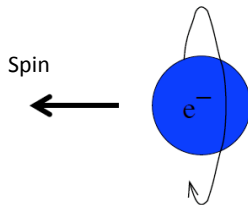


軽くさせる方法 II (GUTはすぐそこ) 余剰次元 など



素粒子のスピンの

粒子の持っている“固有の性質”:(起源不明)
 スピン $\frac{1}{2} \hbar$ の奇数倍と偶数倍
 スピン:角運動量と同じ性質



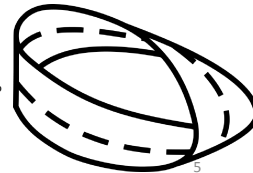
量子力学の保存量:
角運動量Lではなく L+Sが保存量
 保存量 \Leftrightarrow 対称性 (古典Lは空間の回転対称性)

L+S は、古典的な時空に何かを加えた空間の回転対称対称性を示している。

角運動量: 空間回転対称性の性質:

θ 回転すると、 $S\theta$ 回転する。 $U(\theta)=\exp\{-i\theta S\}$ 角運動量Lは回転の演算子

偶数倍: ボーズ粒子 360度でもとの状態に戻る。
 奇数倍: フェルミ粒子 360度回しても符号が逆:
 720度回してはじめてもとの状態に戻る。



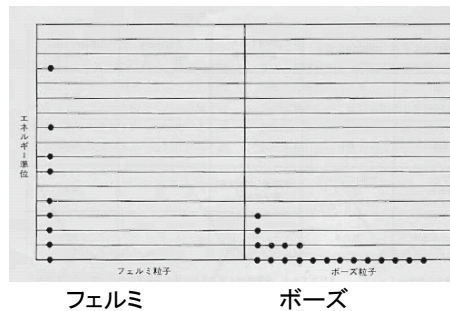
-> フェルミ粒子から見ると 空間720度あるような世界に見える。
素粒子にしか見えない何かの空間があって、それも見ている。

統計性 (Fermi Bose): スピンで決まっている

同種粒子の入れ替え: AとB BとAに入れ替える。
 $A \rightarrow B$ 180度 $B \rightarrow A$ 180度 二つ合わせて 360度の回転

フェルミ粒子:
符号が逆になる。
 加えると波動関数ゼロ (**パウリ排他律**)
 物質が固い理由 (物質世界の秩序)

ボーズ粒子:
同じ状態に入れる
 (超流動,超伝導、レーザー)
 生成消滅自由 n を決めると
 位相が決まらない
 力を伝える性質

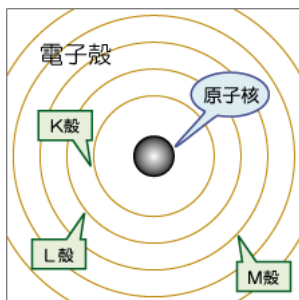


スピンの役割が区別

Spin	粒子	やくわり
0	ヒッグス	真空中に凝縮: ゲージ対称性をやぶる
1/2	フェルミオン	物質を構成する。(排他律でつぶれない)
1	ゲージ粒子	力を伝搬: 源
2	重力子	重力(時空)を伝える。

6

化学やこの世界の多様性は“フェルオン”の性質



同じ状態には入れない。
 一→
 入る数が決まっているから
 最外殻の電子数が決まり
 化学的性質が決まっている。

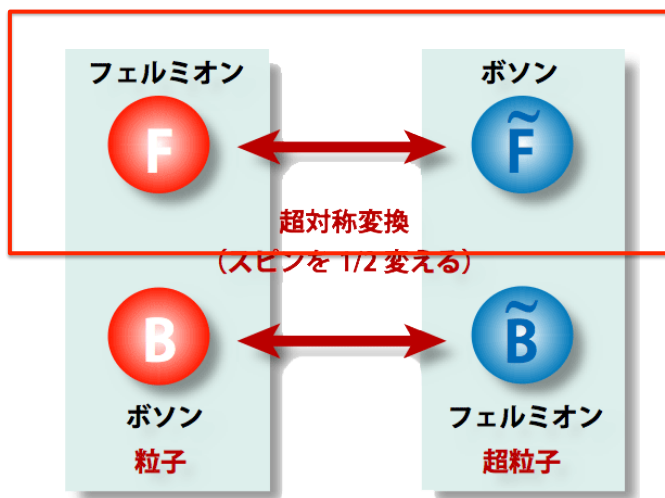
統計性

電子殻名	K殻	L殻	M殻	N殻	...
電子の収容数	2	8	18	32	$2n^2$

2コはspinの違い: 全部K核に縮退してたら
 多彩な化学反応はおきない

7

この統計性の区別をなくそう！！ 超対称性
 時空+スピン空間 スピン空間の見え方の違う組を
 セットにして考える。



2回超対称性
 変換すると
 元にもどるけど
 ...

何故 “ちょー” 対称性なのか？

A: 実空間(時空)にある対称性: **ローレンツ対称性**

空間や時間 並進対称性 エネルギー・運動量保存
回転対称性 角運動量保存

B: 仮想空間にある対称性: ゲージ対称性など、粒子の固有性質
粒子の固有性質に関連した**仮想空間の回転対称性(位相)**
位相の取り方の自由 → 力 (ゲージ場: 位相の帳尻あわせ)

電荷: γ
弱い力荷: W, Z
色荷: グルオン

スピンの関係して
素粒子だけがみているなんかの空間(フェルミオン次元)

L+S Aの実空間+Bのスピン空間 の中で回転対称になっている。
スピン: A+B両方に関係している

このA、B二つに跨る対称性であるので“超”対称性 (空間-粒子 不可分!!)

(ちょっと難しいけど、二回超対称変換すると)

$$\{Q_\alpha, \bar{Q}_\beta\} = 2(\sigma^\mu)_{\alpha\beta} P_\mu$$

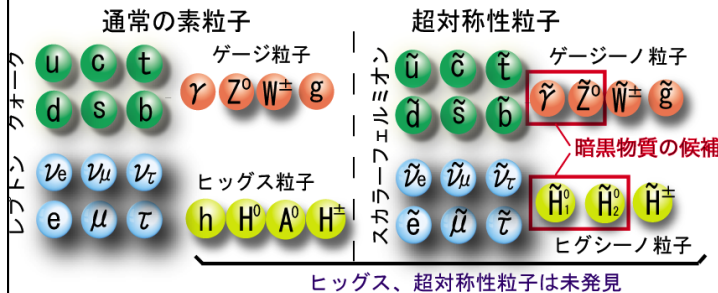
SUSY: 超対称性粒子のテーブル

Ordinary Particles		SUSY Particles	
S=1/2	charged lepton: e, μ , τ neutrino: ν_e, ν_μ, ν_τ 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: $\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}$ $\tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{b}$
S=1	photon: γ (B^0 and W^0) Weak Boson: W^\pm, Z gluon: g	S=1/2	Bino: \tilde{B}^0 Wino: $\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$ gluino: \tilde{g}
S=0	Higgs: h, H, A, H^\pm 2HD = $2 \times 2 \times 2 - 3 = 5$ Higgs	S=1/2	Higgsino: $\tilde{H}^0_1, \tilde{H}^0_2, \tilde{H}^\pm$ 8 DOF = 4 majoran fermion
S=2	Graviton: G	S=3/2	gravitino: \tilde{G}

L-Rは別々。
u_R - su_R (自由1)
u_L - su_L,
massless Vector (自由2)
- spin 1/2 fermion
(自由度 4->2 マヨラナ)

Gauge Boson 2DOF
= Majorana Fermion

2 Higgs doublet (b^a) (d^c)
8 DOF 3DOF
→ W/Z mass 5Higgs





信仰の訳

(1) 歴史に学ぶ

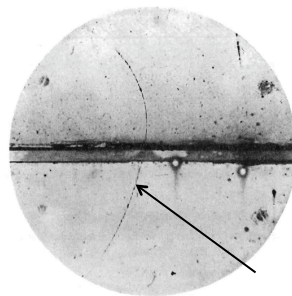
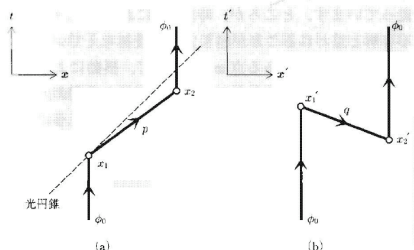
「特殊相対論」と「量子力学」を両立させると、時間の対称性が必要となり、反粒子が出てきた。(1928 Dirac)

反粒子は時間に逆行する粒子

(反粒子 : <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~asai/work/kouenkai20140607Final.pdf>)

反粒子は「時間についての対称性」から自然に出てくる
一見粒子の数が倍になったように見えるが、
そうではなくて、見え方の問題

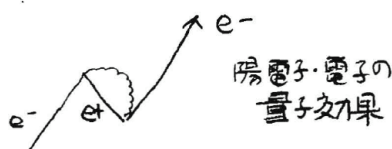
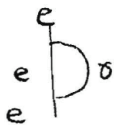
1932 アンダーソン：
陽電子発見



電子のまわりには、絶えず光が出たり入ったり(不確定性が許す範囲)
 電子の質量に対する補正になる。(輻射補正) これが発散してしまう。

$$r_0 = \alpha m_e^{-1} \quad \text{古典電子半径 (ここが cut off だ)}$$

$\frac{1}{1\text{fm}}$ 原子核の大きさ程度



すぐに無限大になってしまう。
 この効果が m_e と同じになる距離。
 (1fm以上飛ぶような光は駄目)
 これより小さいスケールでは適用
 出来ない。

$$\rightarrow \frac{\alpha}{4\pi m_e} \ln \frac{1^2}{m_e^2}$$

反粒子を含む図形で相殺し、
 有限な予言(くりこみ可能)

反粒子の登場で粒子数が増えたのではなく、対称性が高まった。
 自然が綺麗になる例がある。大事なのは対称性！！
 歴史は繰り返す？！

時空にして、反物質が出て 時空+フェルオン次元にして、SUSY粒子が出てくる？

(2) 「階層性問題」を解く

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 $l_p = 1/M_p = \sqrt{G_N} = 10^{-35} \text{ m}$ これが長さの最小単位
これより近いとうブラックホール
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。

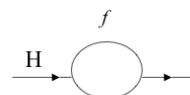
プランク・スケール: 時空(重力)から来た長さの最小単位
 (10^{-35} m 逆数取ると (10^{19} GeV))

電弱スケール: 真空が縮退しているエネルギースケール $v=246 \text{ GeV}$
 この中を伝わると質量をもつ。
 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)

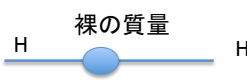
階層性問題は二つの問題である

- (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、
 ヒッグスの質量はすぐに不安定になる。
 (発散を含む図形が多数存在)

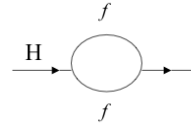


はじめに話したのは(2)

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



裸の質量

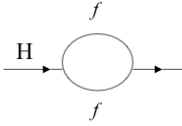
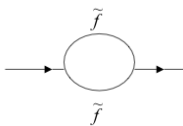


30桁以上の調整が必要
Fine tuning!!!!

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

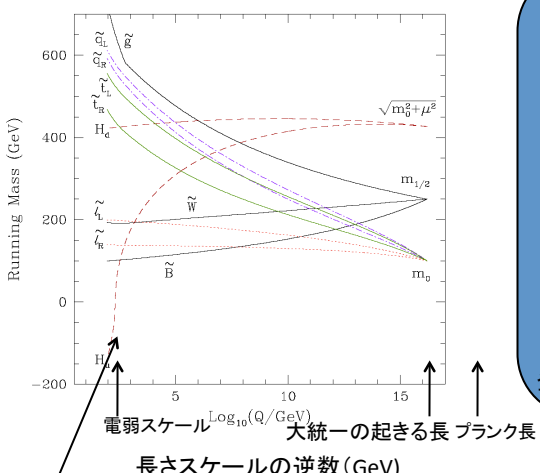
$m^2(\text{観測されるHiggs質量}) = \text{○}\Delta\text{○}\Delta (4\text{桁})$
不自然だ!!

超対称性があると、スピン1/2ずれた(統計性が逆)粒子が存在し、発散を“必ず相殺する”。
 反粒子の時と同じ理屈:


-


統計性の違う粒子を入れる対称性で**発散を消す。(階層問題(2)を解決)**
 (spin 1/2 のループは必ずマイナスになるのは、720度回転対称)

更に、超対称性のすごいところは、トップクォークが重いと言う事実から、**プランク・スケールから、電弱スケールを自動的に導出できる。**
 (階層問題(1)の「神の見えざる手」も種明かしできる)

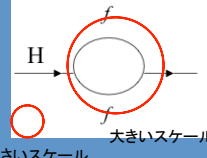


長さスケールの逆数 (GeV)

電弱スケール 大統一の起きる長 プランク長

繰り込み群

質量、結合強度も量子補正で見えるスケールで違う



小さいスケール 大きいスケール

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(ヒッグス粒子との結合定数~1)と言う性質を使うと、ヒッグス場の質量²が 電弱スケール(10⁻¹⁷m)で負になり、自発的に対称性をやぶり、-(246GeV)²を作りだすことができる。

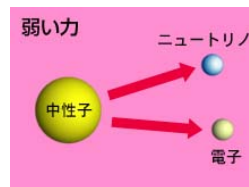
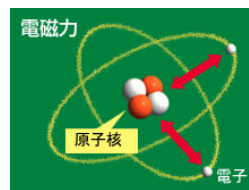
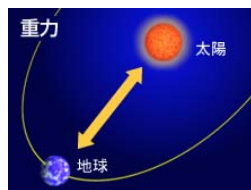
Planck scaleが本質でYt=1 から 自発的対称性の破れでHiggs場が凝縮することを予言

自然に(1)も出てくる 一度に二つの階層性問題を同時に解決

16

(3) 力の大統一 (Grand Unification)

4つの力が存在している。



重力:
時空の対称性 A

電磁気力
電荷保存 B

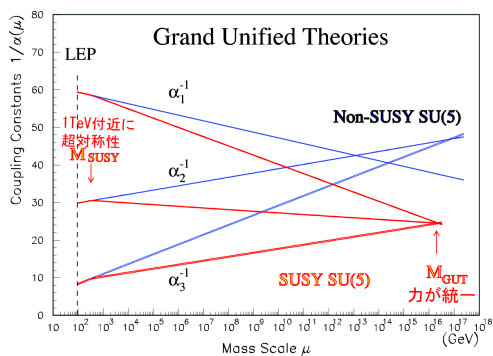
弱い力
弱電荷保存 B
真空もってるので
一見保存しない
(ヒッグス場)

強い力
色電荷 B

重力以外は
素粒子の内部対称性に
起因している。

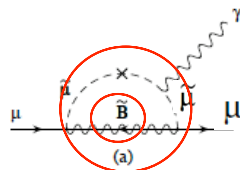
17

繰り込みの“結合定数”の例



3つの力(電磁気力、弱い力、強い力)の強さを測定:
高いエネルギー(小さな距離)での力の強さを計算

Mass scale $\mu \sim 1/R$ (見るスケール)

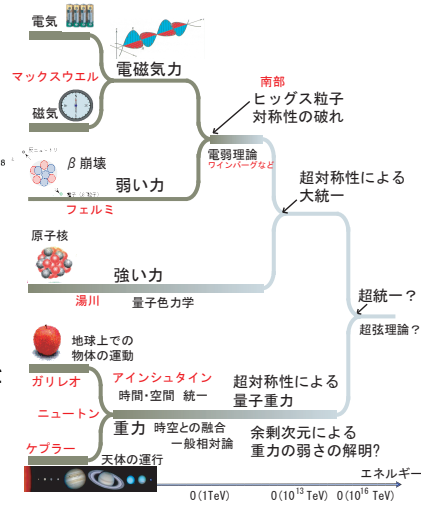


新しい粒子があると
結合定数の変化が
変わる

超対称性粒子が1TeV付近にあると、
3つの力は 2×10^{16} GeV で一つの力に
なることが示唆された。

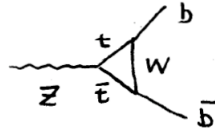
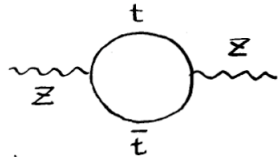
→ 力の大統一 (GUT)

物理学の大まかな歴史と「統一」

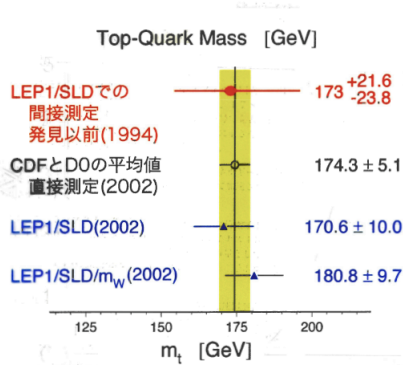


「また夢みたいなことを」と思われるかと思いますが、

(論より証拠)トップ・クォークの予言をしていた。重くて直接見えていなくても



このような効果を及ぼす

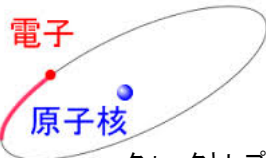


Z粒子の性質(質量・結合)を高い精度で調べることで、トップクォークの存在やその質量を正確に予言

1994年に発見: 直接測った質量と一致:

存在している(と思われる)粒子の性質さえ分かっていたら、高い予言能力がある。

大統一(GUT)を疑う君への福音書



水素原子の電荷 ゼロ

クォークとレプトンの電荷の単位が一致 (標準モデルでは起きない)

クォークとレプトンはつながっている。何か同じものの別表現

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ (u)	チャーム (c)	トップ (t)
	ダウン (d)	ストレンジ (s)	ボトム (b)
レプトン	eニュートリノ (ν _e)	μニュートリノ (ν _μ)	τニュートリノ (ν _τ)
	電子 (e)	ミューオン (μ)	タウ (τ)

電磁気力
弱い力
強い力

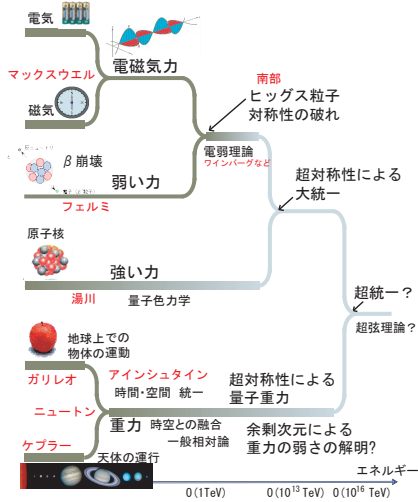
電磁気力
弱い力

一つのカクォークとレプトンも同じになる

非常に高いエネルギーでないとまずい陽子崩壊

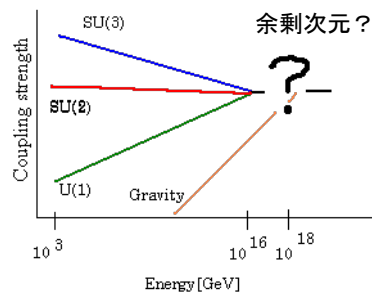
重力まで統一出来るか？（超統一）

物理学の大まかな歴史と「統一」



二つの謎解きが必要

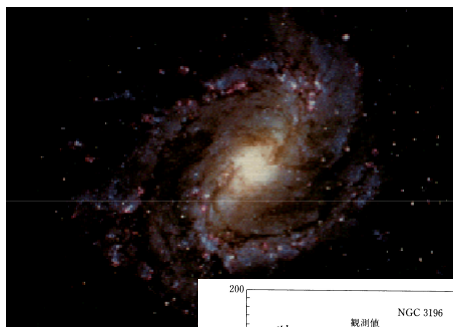
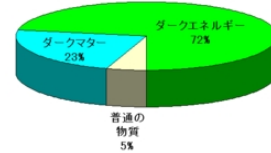
- 1) 重力 実空間(A)の対称性
残り3つは、内部空間(B)の対称性
A+Bへ拡張
量子論+一般相対論 融合
=> 鍵が "SUSY"
- 2) 重力だけムチャクチャ弱い 10^{-40}



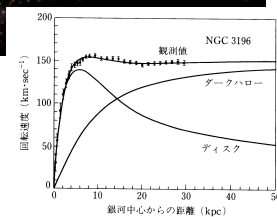
(4) 暗黒物質の解明

銀河の回転カーブや、銀河団の衝突など
いろいろな観測データで
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



21.11cm波
HのHFSで
計っている



暗黒物質が
暗黒である
smoking gun

弾丸銀河団：銀河団衝突
青：質量分布(ピリアル定理、重力レンズ)
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

ゲージーノ粒子

スピク 1/2

スピク 0

スピク 1/2

スピク 3/2

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)

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

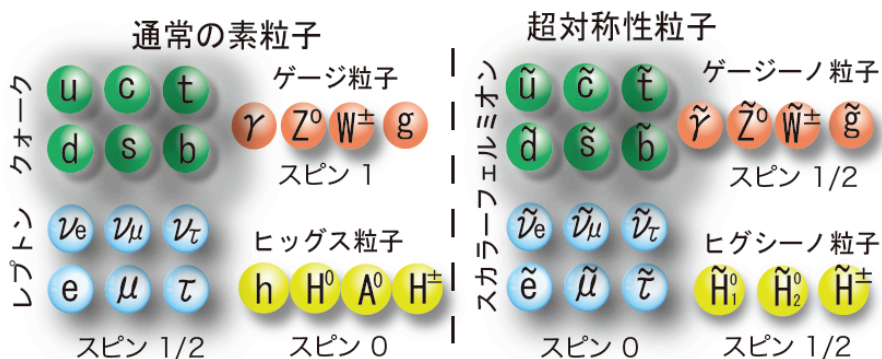
一番軽い状態は安定
質量 O(100-1000 GeV)
非相対論的でない候補

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

23



何故見えない???

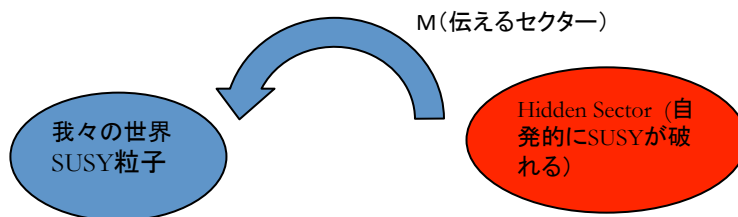


完全な対称性ではない。(実験で、ある程度より重いことが分かっている)
 色を持った超対称性粒子は a few ~several 10 TeVくらいの質量をもっている。
 もってない超対称性粒子は 0.1~several 10TeV 程度

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。

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 $G_N \sim 1/M_{Pl}^2 (10^{19} \text{GeV})$ 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 量子力学になった時破れることを言う。
 連続性が失われるから

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

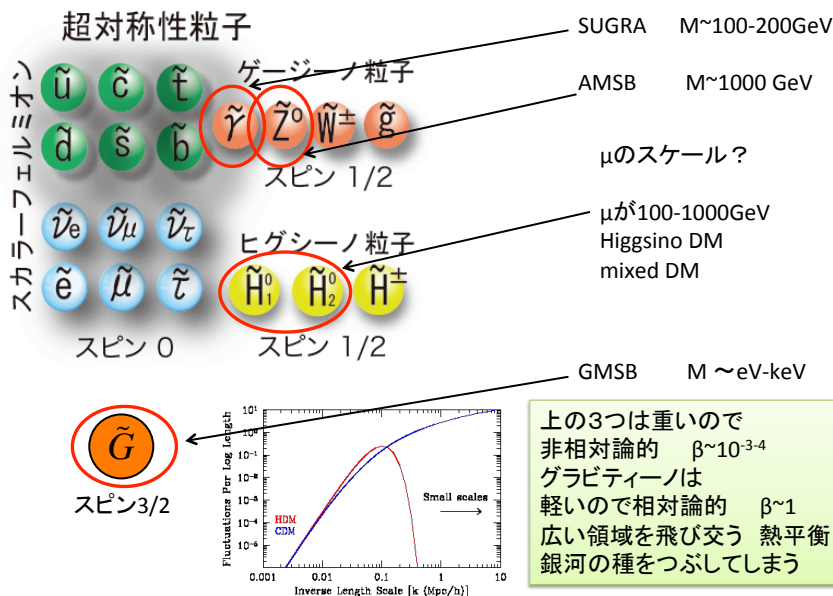
	SUGRA	GMSB	AMSB
伝えている機構	Planck scaleの物理 あるsingletを手でいれる。 $M=M_{pl}, \sqrt{F}=10^{11}$ GeV	破る場とSM場の両方の 電荷をもつセクター (メッセンジャー) $M=10-1000\text{TeV}, \sqrt{F}=10^{5-9}$	重力場自体 手で何か加える必要はない $M=M_{pl}, \sqrt{F}=10^{13}$ GeV
LSP	Bino $\sim O(100\text{GeV})$ ならOK	Gravitino $\sim O(\text{eV-keV})$ Hot ? X	Wino ~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

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

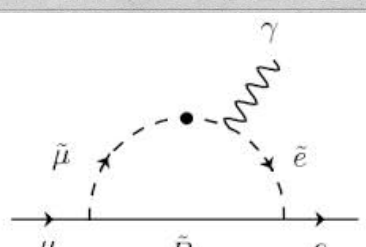
残りすぎるとまずい



$\kappa\bar{\kappa}$ mixing $\begin{array}{c} a \xrightarrow{\tilde{g}} \bar{a}s \\ \tilde{g} \\ \bar{s} \xleftarrow{\tilde{g}} \bar{a} \end{array}$

tree 干渉項 $\alpha_s^2 \frac{(\Delta\tilde{m})^2}{m_{\tilde{g}}^2} \leq 10^{-12} \text{ GeV}^{-2}$

$m_{\tilde{g}} = 1 \text{ TeV}$ 時 $\frac{\Delta\tilde{m}}{m_{\tilde{g}}} \leq 10^{-2} \rightarrow 1\% \text{ 程度一致してOK}$
 マツイ



スカラー クォークは、縮退してるか、重い
 同様に、スカラーレプトンも

29

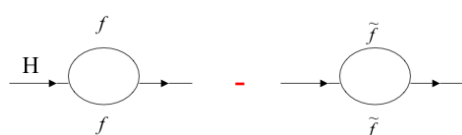
Natural (自然な) SUSY

軽いSUSY(<1TeV)を信じた訳

(1) Naturalness Higgs 質量 の2次発散を“自然に”
 Scalar quark mass, stop mass < 1TeV (信仰の理由2) (信仰の理由4)

(2) Dark Matter (Bino ~100GeV / Wino ~1TeV / Higgsino mass ~O(100-1000GeV))

(3) GUT Unify Forces (Gaugino ~ 1-10TeV) (信仰の理由3)



なぜ1%なのか？
 ここらへんのさじ加減は
 人によって違う

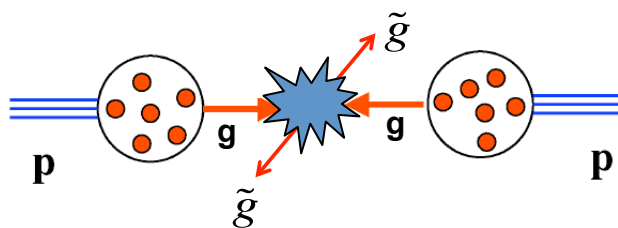
scalar top mass ~ 1 TeV
 1%程度の調整でOK

1%ぐらいは、まあなんとか自然

$M_H^2 = M_0^2 - \Delta M(\text{top})^2 + \Delta M(\text{stop})^2$
 Higgs mass ~ 0.1TeV
 top mass ~ 0.1TeV
 Stop mass ~ 1 TeV



LHCでの超対称性粒子の生成

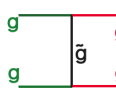


陽子の中のグルーオンやクォーク同士が反応して
スカラー・クォークやグルーノを作る。

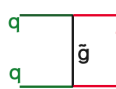
超対称性粒子

- ゲージノ粒子
スピンの 1/2
- \tilde{u} \tilde{c} \tilde{t}
 - \tilde{d} \tilde{s} \tilde{b}
 - $\tilde{\gamma}$ \tilde{Z}^0 \tilde{W}^\pm \tilde{g}
- ヒグシノ粒子
スピンの 0
- $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\nu}_\tau$
 - \tilde{e} $\tilde{\mu}$ $\tilde{\tau}$
 - \tilde{H}^0 \tilde{H}_2^0 \tilde{H}^\pm
- スカラーフェルミオン

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



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

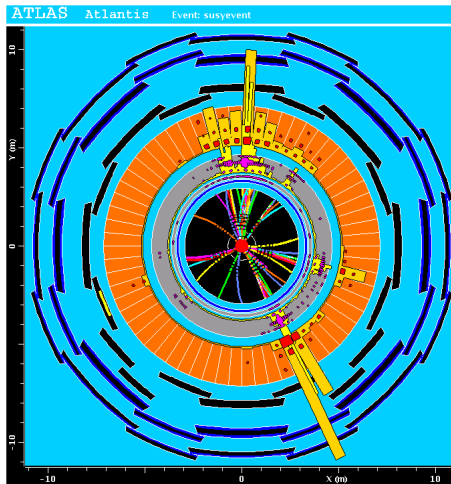
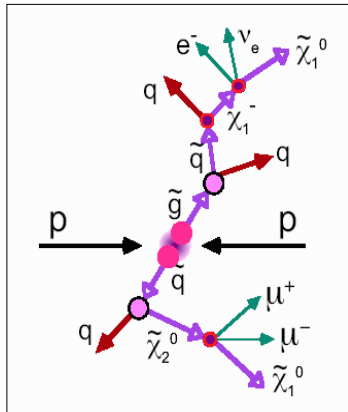


$\tilde{q}\tilde{g}$ prod.



ペアで出来る

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標準モデルの粒子複数と一番軽い超対称性粒子2個になる。



特徴は、見えない粒子(暗黒物質)によるアンバランスさ
LHCはDark Matter 工場(factory)

(予想図)

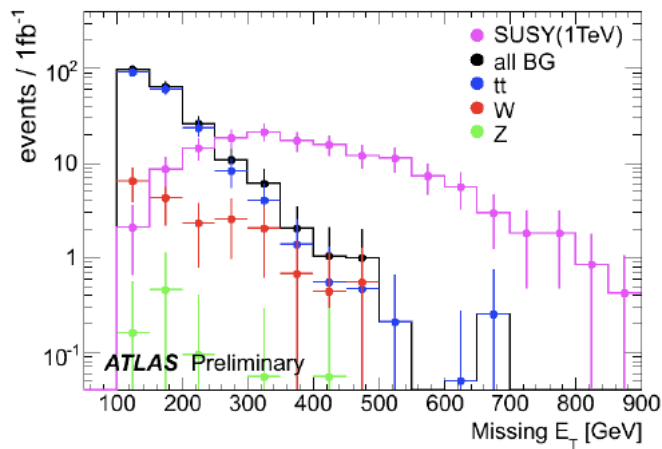
33

アンバランスさのはかり方

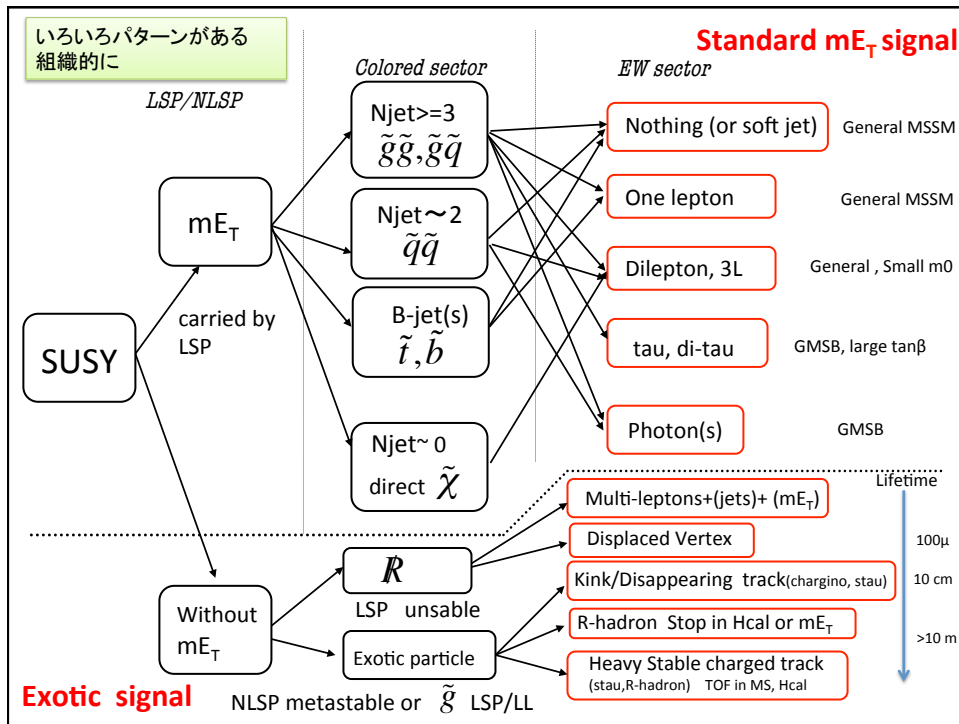
ビーム軸に垂直な面(Transverse平面)に出て来た粒子の運動量を射影:

バランスしている $\sum \vec{P}_T = \vec{0}$

バランスしていない $\sum \vec{P}_T = -\sum \vec{P}_T(\text{neutralino}) \neq 0$

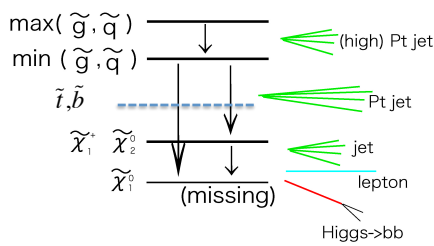


SUSY signal
Mass=1TeV



有力なチャンネル @ 8TeV

LHCでのSUSY事象模式図: m_{E_T} が超対称性の一つの特徴



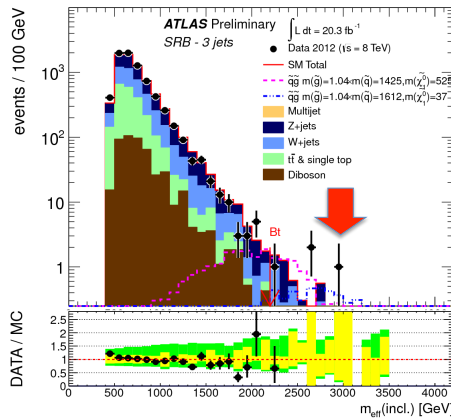
multi leptons
 $E_T + \text{High } P_T \text{ jets} + \text{b-jets}$
T-jets

High PT jetはカラーから主に
おまけの部分はEW

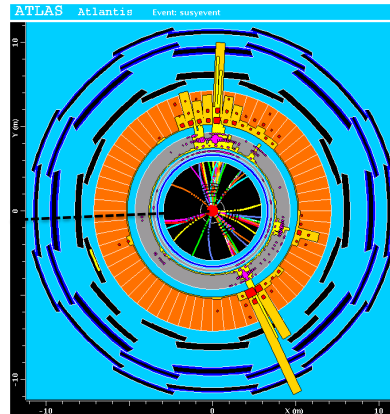
Jet multi (high Pt)	Additional obj.	Favored Model	Dominant SM ba
High Multiplicity $N_j \geq 3, 4$	No lepton	SUGRA, AMSB Large m_0	QCD(light & bb/c $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}\tau\nu)$ Z(\rightarrow nunu) and W
	One lepton	SUGRA, AMSB small m_0	$t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}\ell\nu)$ W(\rightarrow lnu)+jets
	Dilepton, 3L	SUGRA, GMSB, RPV	OS: $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b}\ell\ell)$ SS, 3L ZW, ZZ t
	Tau	Large $\tan\beta$, GMSB ($N_m > 1$)	W (\rightarrow taunu) $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}\tau\nu)$
	b	SUGRA, stop	$t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b}q\bar{q}\tau\nu)$
Low Multiplicity $N_j \sim 1, 2$	No lepton	GMSB ($N_m = 1$) $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$	Almost BG Free $t\bar{t} (\rightarrow b\bar{b}e)$
	One lepton	squark production	Z(\rightarrow nunu) W(\rightarrow taunu)
No jet $N_j = 0$	Dilepton, 3L	Direct $\tilde{\chi}$	WW, WZ, ZZ WZ main for 3L

0 Lepton mode

At least 3 (high PT > 160,130,60GeV) Jets & Large mET(>475GeV) & mET is not direct to jet



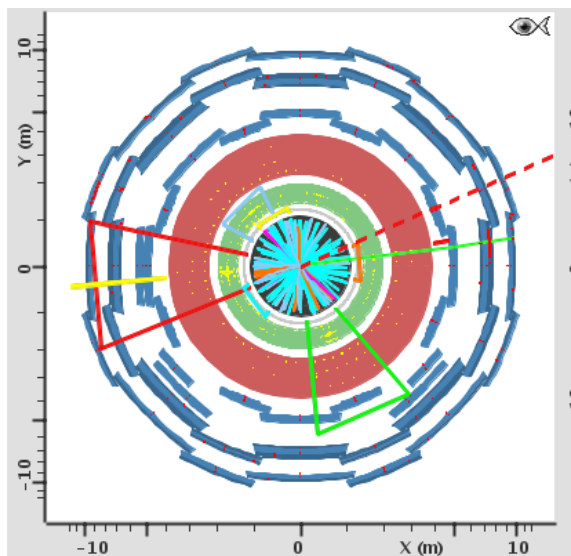
M_{eff} = mET + ΣP_T (jet)



M_{eff} > 2200 GeV (mET/M_{eff} > 0.4)
Data 4
BG 2.4 ± 1.4 (Z 0.2 W 1.6 t 0.6)

1 candidate in high M_{eff} region

Candidate event (Hardest)

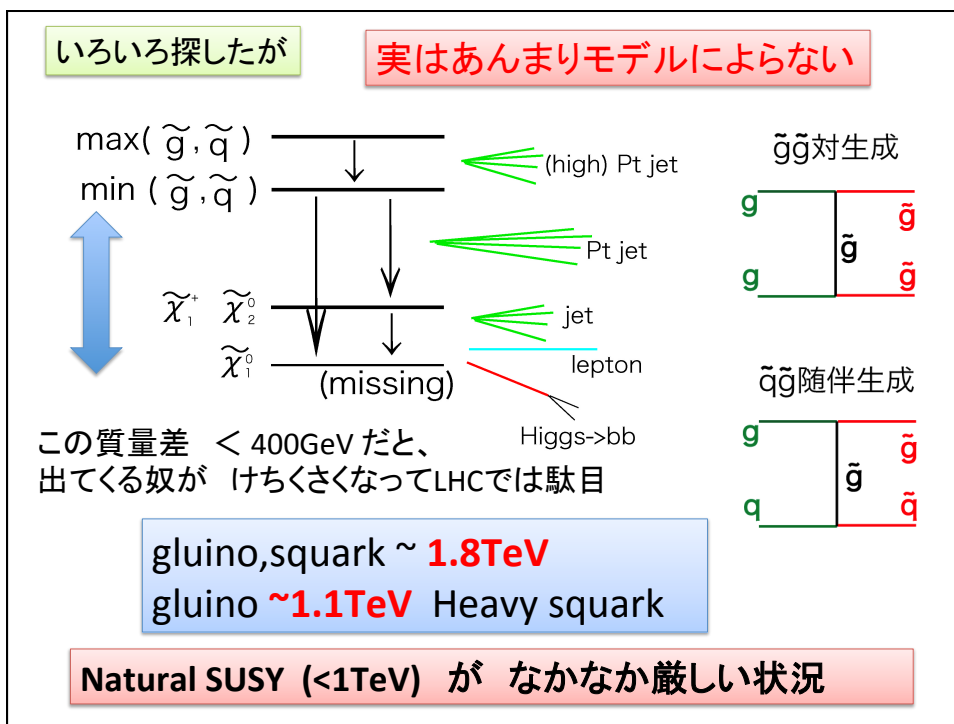
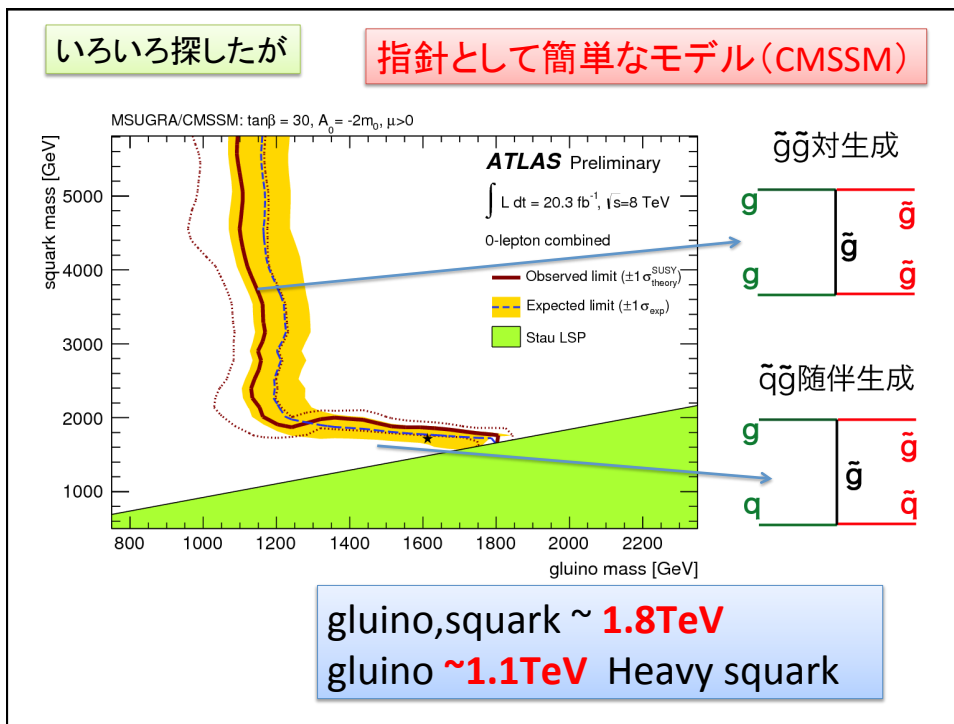


M_{eff}(4j) = 2992 GeV
MET = 1170 GeV phi=0.4

2 high PT (>150GeV) Jets
p_T=1335 GeV eta=0.96 phi=3.05
p_T=530 GeV eta=-1.26 phi=-1.17
p_T=112 GeV eta=-0.38 phi=2.34
p_T=21 GeV eta=0.13 phi=0.07

Good SUSY candidate,
W+jets バックグラウンドの
可能性もある

3,4番目のjet のPTを
注意している



8月号

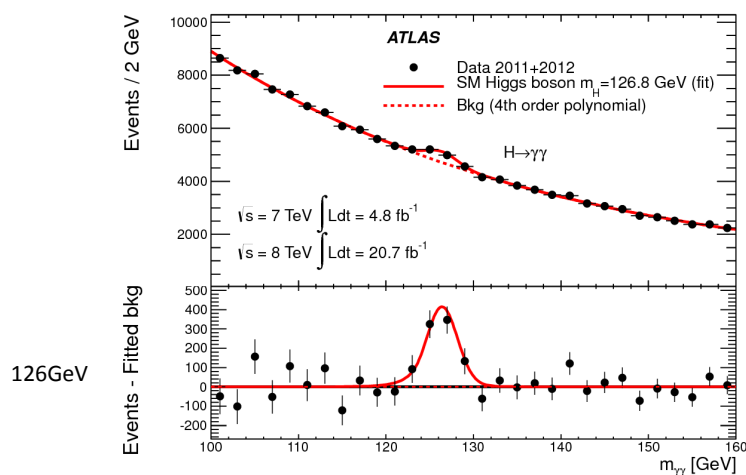
素粒子物理学
特集：素粒子論の危機

産つぶちの超対称性理論 J. リッケン/M. シュピロビュリュ
問われる究極理論への道筋 中島林彦/協力：浅井祥仁

研究倫理
STAP細胞の正体 古田 彰/詫摩雅子
ES細胞だった？

LHC14TeVが
素粒子研究の今後を
決める重要な実験

Higgs mass の意味すること SUSY探索の結果が意味すること



超対称性のあるときのヒッグス粒子の質量

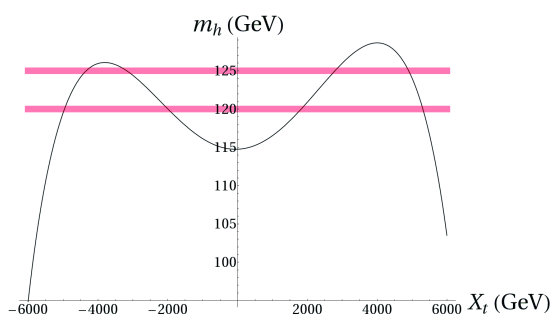
MSSM ヒッグスの質量

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3m_t^4}{4\pi^2 v^2} \left[\log \left(\frac{M_S^2}{m_t^2} \right) + \frac{A_t^2}{M_S^2} \left(1 - \frac{A_t^2}{12M_S^2} \right) \right]$$

- 1) $M_Z(91\text{GeV})$ より軽い
- 2) 量子補正で 少し重くなる
- 3) stop-stop-Higgs 3点結合のつよさ A_t

重くするには

- 1) $\tan\beta$ が大きい
- 2) SUSY scalar massが重い
- 3) A_t がfullにmixしている
- 4) NMSSMにしてオマケつける

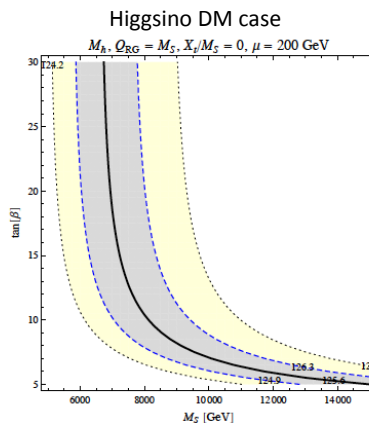
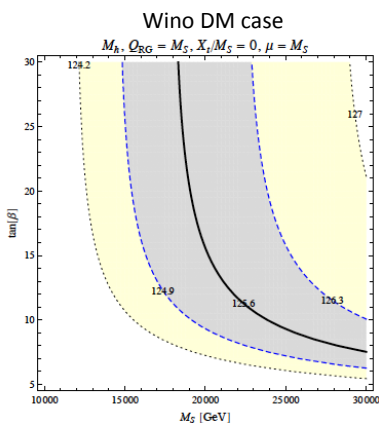


ヒッグス粒子の質量が意味すること

MSSM ヒッグスの質量

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3m_t^4}{4\pi^2 v^2} \left[\log \left(\frac{M_S^2}{m_t^2} \right) + \frac{A_t^2}{M_S^2} \left(1 - \frac{A_t^2}{12M_S^2} \right) \right]$$

一般に (A_t が大きい場合)
SUSY のスケールは
Scalar mass scale



squark mass vs $\tan\beta$ Gray band Higgs mass=125.6 +/- 0.7 GeV

From P. Draper et al.
eprint 1312.5743

これまで不都合な真実に目をつぶっていた

フレーバー物理からくる制限 DMがexclude

	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) $M=10-1000\text{TeV}, \sqrt{F}=10^{5-9}$	重力場自体 $M=M_{pl}, \sqrt{F}=10^{13}$ GeV
LSP	Bino $\sim O(100\text{GeV})$ ならOK	Gravitino $\sim O(\text{eV-KeV})$ Hot ? X	Wino ~ 1000 GeV OK
FCNC	1TeVなら m_0 縮退を仮定 かなり厳しい	OK	m_0 を手で入れないとタキオン、 $m_0 \gg 1\text{TeV}$ ならFCNC OK
Gravitino	1TeV reheating X 軽いSugraは、まずい	$<1\text{GeV}$ たくさん出来るがDM ○	10-1000TeV ($\sim m_0$) reheating 程度 ○
パラメーター	$m_0, m_{1/2},$ sign(μ), $\tan\beta$, A	Λ, M, n $\tan\beta$, sign(μ), Cgra NLSPが鍵	$m_{3/2}$ (m_0) $\tan\beta$, sign(μ)

FCNC $b \rightarrow s\gamma$ (Z) $s \rightarrow d\gamma$ (Z) KK mixing scalar partの効果がそのまま
電子や中性子のEDM

宗教改革

軽いSUSY($<1\text{TeV}$)を信じ

(1) Naturalness Higgs 質量 の2次発散
Scalar quark mass, stop mass

(2) Dark Matter

(3) GUT

*** 125.6GeV Higgs**
*** Light SUSYは難しいそう**
*** フレーバー、EDM, 宇宙観測**
1TeV以下のSUSYを信じた訳をもう一度
考えなおそう

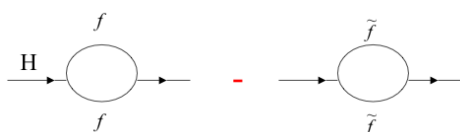
scalar top mass $\sim 1\text{TeV}$
1%程度の調整でOK

1%ぐらいは、まあなんとか自然

宗教改革

軽いSUSY(<1TeV)を信じた訳

- (1) Naturalness Higgs 質量 の2次発散を“自然に”
~~Scalar quark mass, stop mass < 1TeV~~ (信仰の理由2) (信仰の理由4)
- (2) Dark Matter (~~Bino ~ 100GeV~~ /Wino ~ 1TeV /Higgsino mass ~ O(100-1000GeV))
- (3) GUT Unify Forces (Gaugino ~ 1-10TeV) (信仰の理由3)



ある人曰く
 30桁以上のtuningなので
 5桁は、「グリーンにのせた」
 ある人曰く
 もともと1%なんて人間の
 勝手な都合

scalar top mass ~ 10-100 TeV
 10⁻⁵ 程度の調整でOK

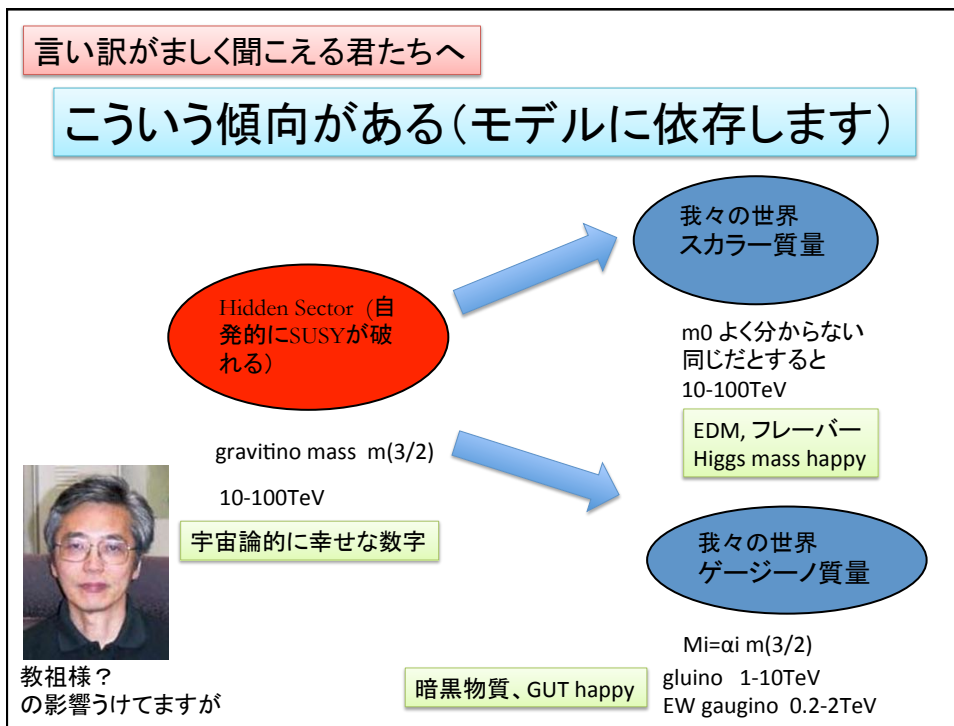
戦略的撤退

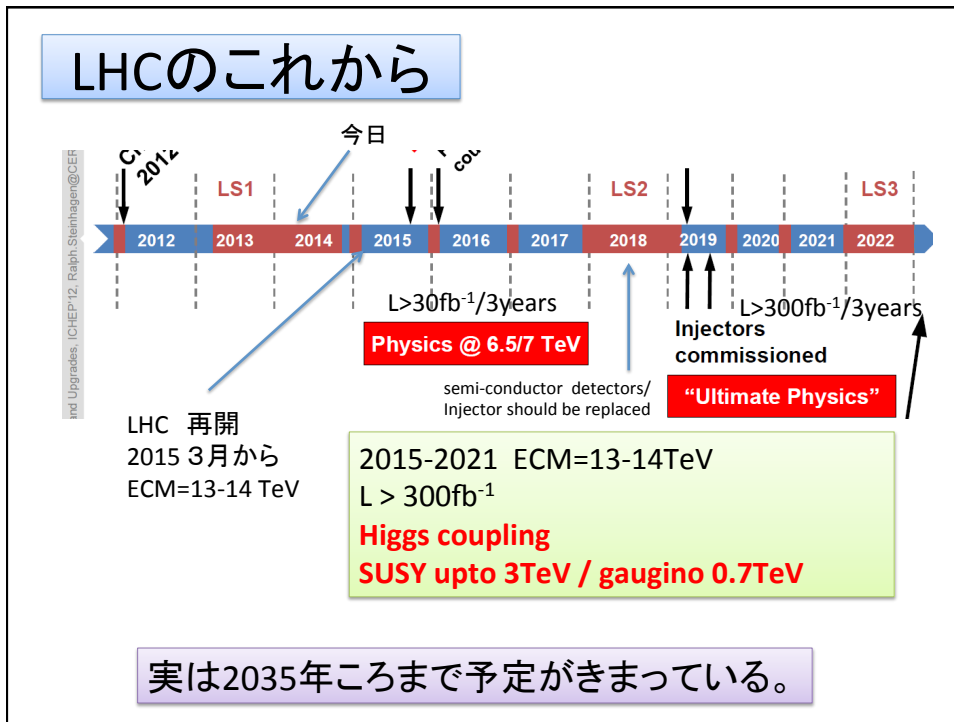
Higgs mass, フレーバー物理の結果(FCNC,EDM), LHC SUSY 探索の結果 3つを尊重

- (1) Dark Matter (~~Bino ~ 100GeV~~ /Wino ~ 1TeV /Higgsino mass ~ O(100-1000GeV)) (信仰の理由4)
- (2) GUT Unify Forces (Gaugino ~ 1-10TeV) (信仰の理由3)

ナチュラルネスを**部分的に**
 放棄するとかえって
 見通しが良くなった。







作戦案 松コース

Higgs mass, フレーバー物理の結果(FCNC,EDM), LHC SUSY 探索の結果 3つを尊重

(1) Dark Matter (Bino ~~→ 100 GeV~~ / Wino ~ 1TeV / Higgsino mass ~ O(100-1000GeV)) (信仰の理由4)

(2) GUT Unify Forces (Gaugino ~ 1-10TeV) (信仰の理由3)

超対称性粒子

ゲージノ粒子

スカラーフェルミオン

ヒグシノ粒子

gluino 1-10TeV

**EW gaugino several 100 GeV
- a few TeV**

Scalar Particle 10-100TeV

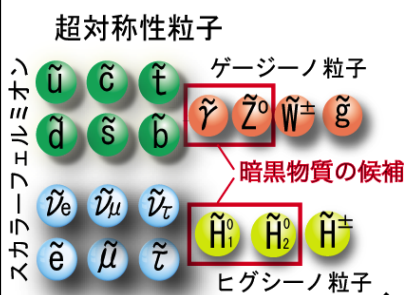
赤字の所に
ヤマを張ろうか?

ス、超対称性粒子は未発見

作戦案 竹コース

**Higgs mass, ~~フレーバ~~物理の結果(FCNC,EDM),
LHC SUSY 探索の結果 2つを尊重**

やっぱりNaturalness (信仰の理由4)
 (1) Dark Matter (Bino ~~~100GeV~~ /Wino ~1TeV /Higgsino mass ~O(100-1000GeV))
 (2) GUT Unify Forces (Gaugino ~ 1-10TeV) (信仰の理由3)



gluino a few TeV
 EW gaugino < 1 TeV
 scalar top < 1TeV (L-R mixing 大)
 Higgsino LSP
 additional がある可能性
 variationが多い

従来通り

ス、超対称性粒子は未発見

これからの5年で素粒子未来が拓かれる



作戦案 松コース その他

Higgs mass, フレーバー物理の結果(FCNC,EDM), LHC SUSY 探索の結果 3つを尊重

(信仰の理由4)

(1) Dark Matter (Bino $\sim 100\text{GeV}$ /Wino $\sim 1\text{TeV}$ /Higgsino mass $\sim O(100-1000\text{GeV})$)

(2) GUT Unify Forces (Gaugino $\sim 1-10\text{TeV}$) (信仰の理由3)

超対称性粒子

ゲージノ粒子

暗黒物質の候補

ヒグシーノ粒子

スカラーもあきらめない

電子 EDM 10^{-30} ecm 程度まで
あと2桁 中性子は3桁?

陽子崩壊 $P \rightarrow K\nu$ 10^{35} 年
あと 1~2桁

ヒッグス、超対称性粒子は未発見

作戦案 松コース その他

Higgs mass, フレーバー物理の結果(FCNC,EDM), LHC SUSY 探索の結果 3つを尊重

(信仰の理由4)

(1) Dark Matter (Bino $\sim 100\text{GeV}$ /Wino $\sim 1\text{TeV}$ /Higgsino mass $\sim O(100-1000\text{GeV})$)

(2) GUT Unify Forces (Gaugino $\sim 1-10\text{TeV}$) (信仰の理由3)

超対称性粒子

ゲージノ粒子

暗黒物質の候補

ヒグシーノ粒子

暗黒物質 TeV近い

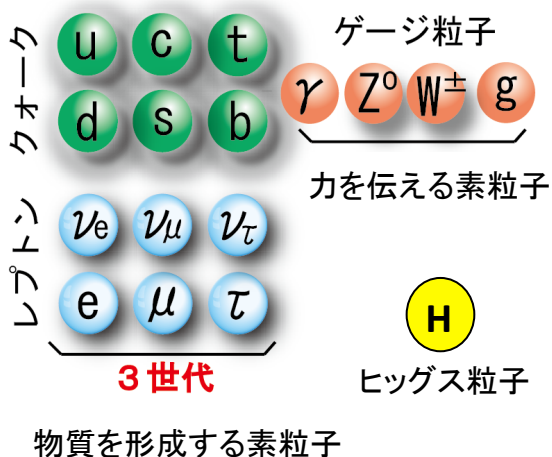
暗黒物質の直接観測

ヒッグス、超対称性粒子は未発見

おまけ

素粒子物理学の理解＝標準理論 (SM)

標準理論

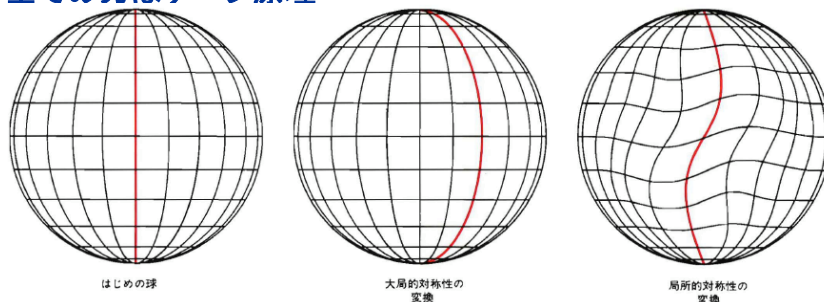


電磁量子力学(QED)
電弱統一理論(EW)
量子色力学(QCD)

- 物質
クォーク、レプトン
フェルミオン (spin 1/2)
3世代ある。
 - 力を伝搬するのは
ベクトルボソン (spin 1)
電磁気力: γ
弱い力: W^\pm, Z^0
強い力: g (8つグルオン)
 - ヒッグス粒子 質量の起源
- ゲージ原理**

質量はヤバイ(1)

全ての力はゲージ原理



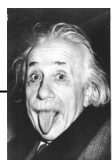
宇宙全体で位相の取り方が同じというのは、相対論を考えると変時空の各点で任意にとって良い(ゲージ原理)
位相差は観測出来るので物理法則は無茶苦茶になる。

この歪みを直す “位相の帳尻あわせ”粒子 ∞遠まで届かないとヤバイ

ゲージ粒子に質量(m)があると、
 $\exp(-m*r)$ で弱くなる(マクスナー効果)

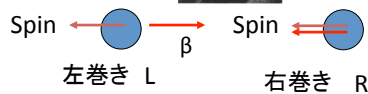
質量はヤバイ(2)

フェルミオンの質量もまずい

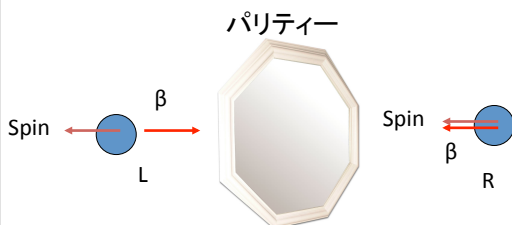


光速で追い越す
Lorentz変換

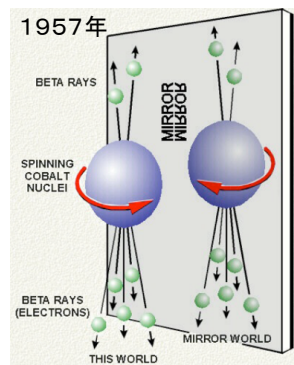
$$m \bar{f}_L f_R \text{ Dirac粒子の質量}$$




“質量” L-R mixing parameter



パリティの破れ: LとRは別の粒子
弱い力の電荷が違う!!!



BEH機構



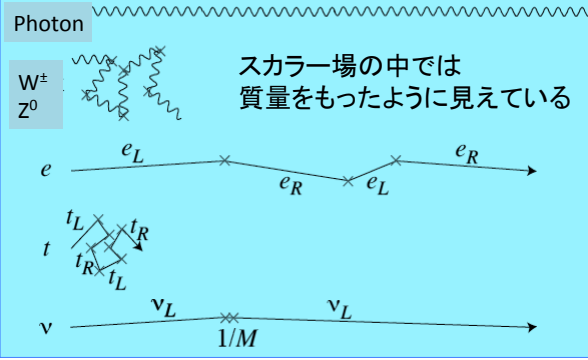
南部先生
超伝導 BCS理論の基底状態の
不自然さ(クーパー対)

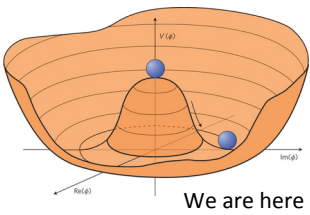
宇宙全体に適用

Photon

W^\pm
 Z^0

スカラー場の中では
質量をもったように見えている





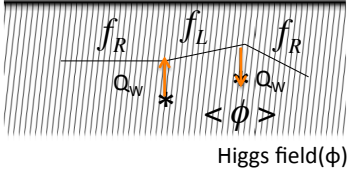
We are here

弱い力の電荷をもった
変なスカラー場(ヒッグス場)
に満ちている

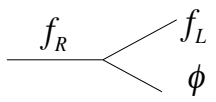
物性研究と素粒子研究が結びついた大きな成果

ヒッグス場での振る舞い

Fermion



Higgs field(ϕ)



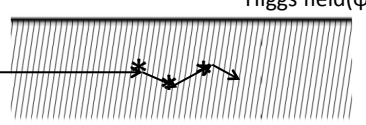
$y\phi\bar{f}_L f_R \rightarrow m_f \bar{f}_L f_R$

ちがう機構で
質量を獲得

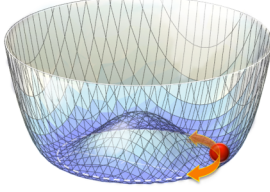
湯川結合を仮定し、その結合の強さ \sim mass
場と弱い力の電荷をexchange
かなり 強引な設定

電子 $y \sim 10^{-5}$
トップ $y \sim 1$

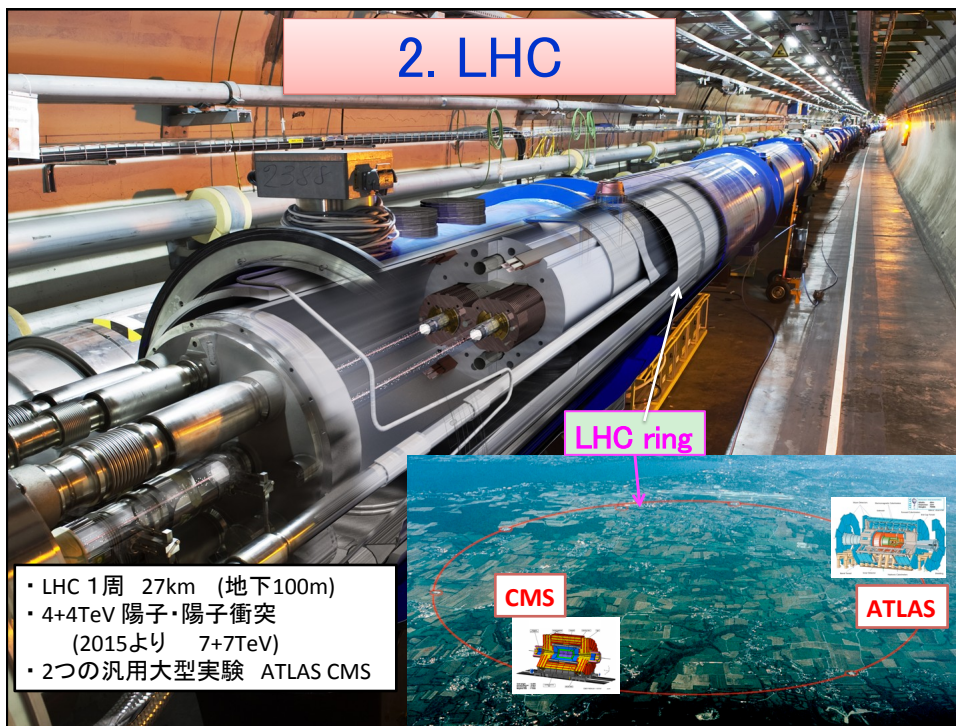
$W^\pm Z^0$



Higgs field(ϕ)



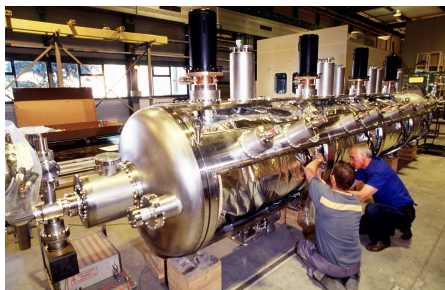
南部ゴールドストーンモードを励起 (energy gapなし)
これが縦波成分になって、質量になる。



LHC 陽子・陽子衝突型

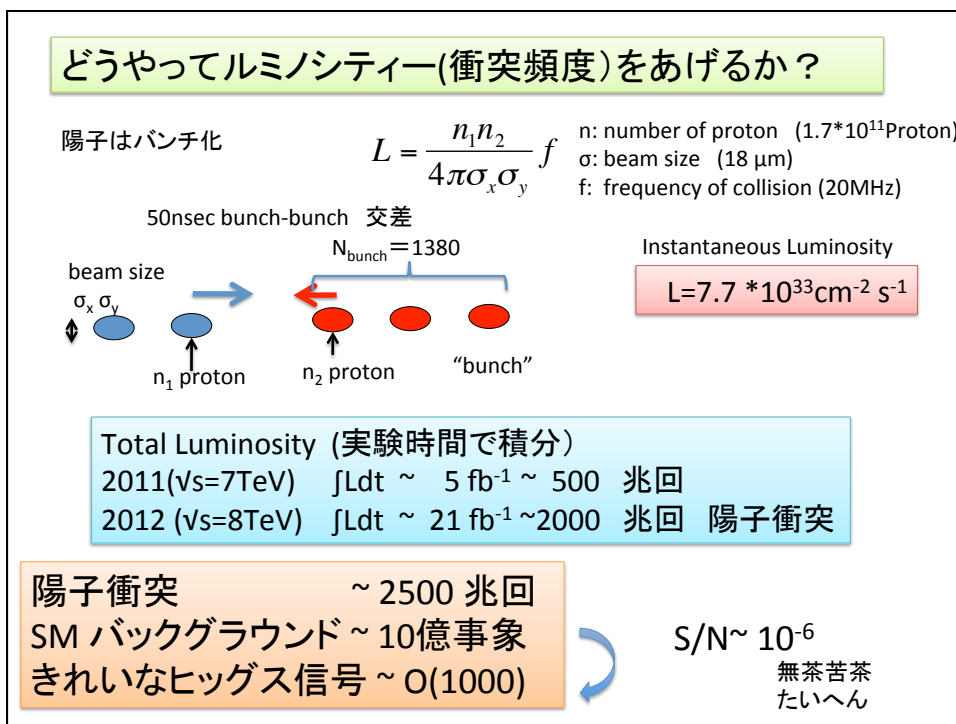
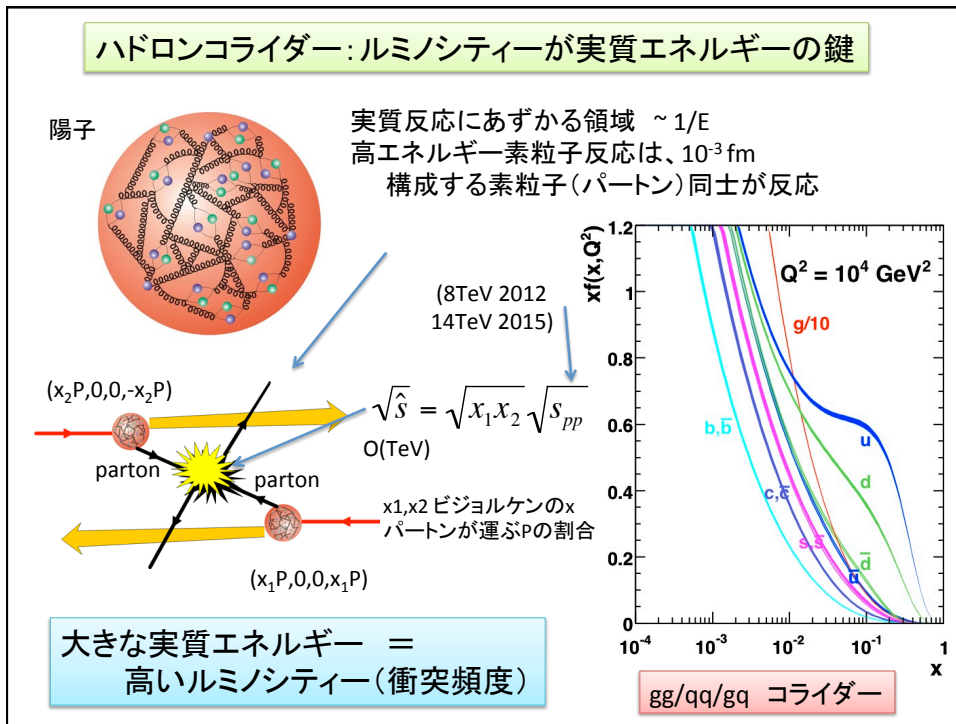
5MeV/mの加速勾配
超伝導加速空洞を8カ所
16MeV/周

8.3Tの強力な超伝導dipole マグネット
NbTi (1.9k He 700kL)



key technology
曲げる為の磁石 →

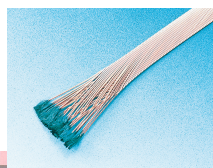
7TeV=11 erg= 10^{-6} J (ハエ 10mg が 秒速50cm(時速2km)で飛ぶ運動エネルギー γ factor = 7450
加速器全体に蓄えられているエネルギー 約 300MJ



LHC加速器と日本の貢献



陽子ビームを絞る
四重極磁石の開発・製作
(KEKと米国フェルミ研究所
共同開発)



LHC完成式典(2008/10/21)

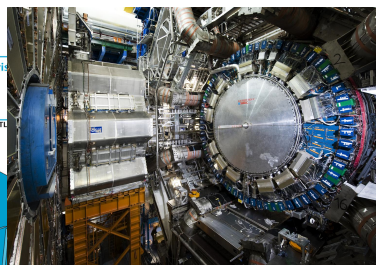
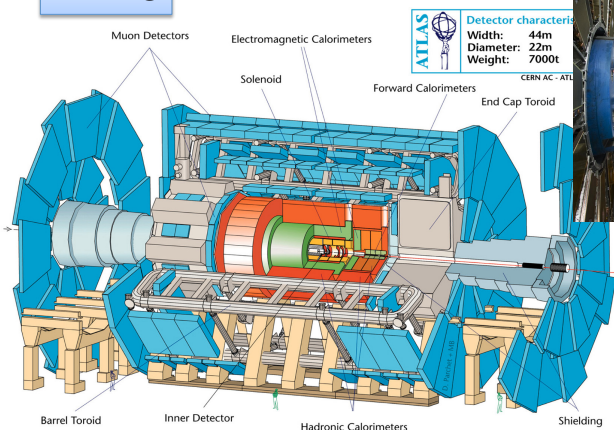


日本がLHCへの協力を表明(1995/6/23)

資金面/技術
(超伝導線材,
冷却システム
など)

There are two general purpose detectors:

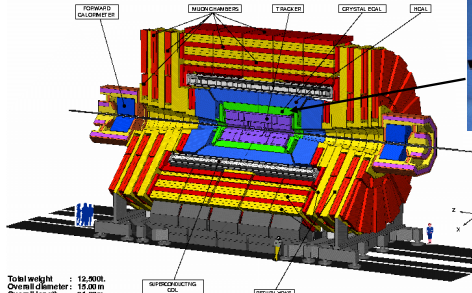
ATLAS



Resolution
(Pt=100GeV)

e, γ 1.5%
Muon 2-3%
Jets 8%

- **Large Detectors** since momentum resolution of tracking is $\delta P/P \sim 1/(BL^2)$
- **balance of performance** resolution are good but not specially good for all.
- Accordion Shape of L.Ar calorimeters are used. (**Longitudinal information** & Rad. hard)
- muon system is Large & air-core (less multiple scattering) & toroidal magnet (gain forward)



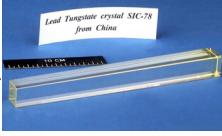
CMS

Labels in diagram: FORWARD CALORIMETER, MICHAMBERS, TRACKER, CENTRAL CAL., SOL., APPROXIMATING COIL, RETURN YOKE

Technical specs:
 Total weight : 12,500t
 Overall diameter : 15.00m
 Overall length : 21.62m
 Magnetic field : 4 Tesla

Reference: CMS-PARA-001-11/07/97

PbWO₄



Lead Tungstate crystal SiC-78 from China

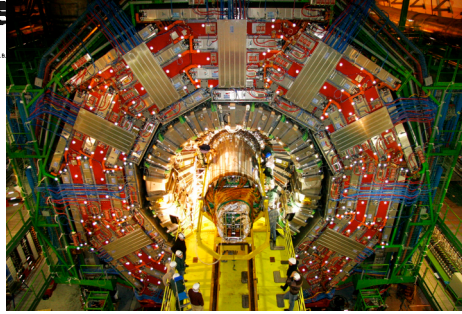
Resolution (Pt=100GeV)

e, γ 0.9% !!

Muon 2-3%

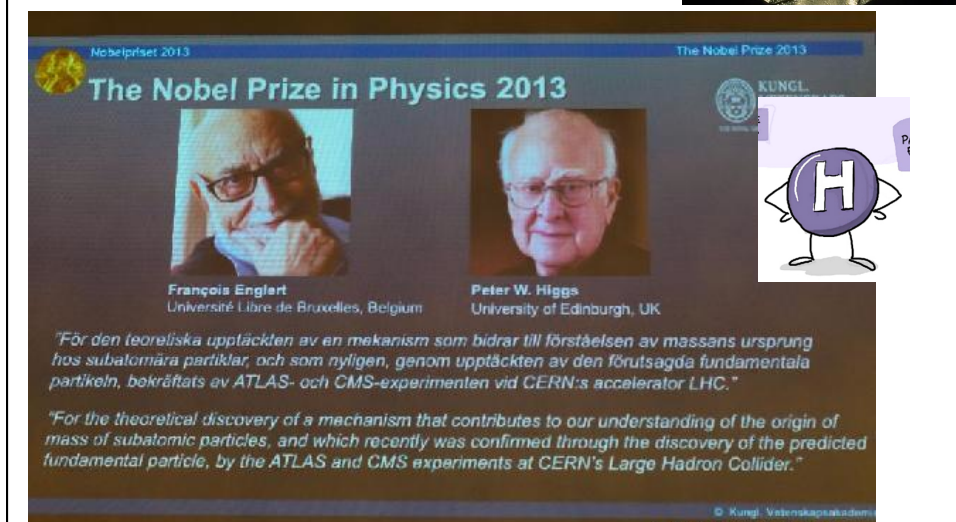
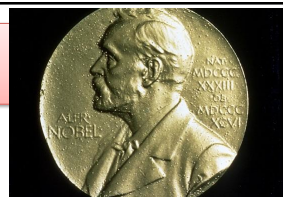
Jets 12%

- **compact** H=15m L=22m (about half of ATLAS)
W=12,500ton (twice of ATLAS)
- Unbalanced performance
 PbWO₄ scintillator
 excellent energy resolution
- **4T Very strong solenoid magnet**
 since momentum resolution of tracking
 $\delta P/P \sim 1/(BL^2)$
- Magnet is outside of calorimeters → thin hadron calorimeter No good jet energy resolution

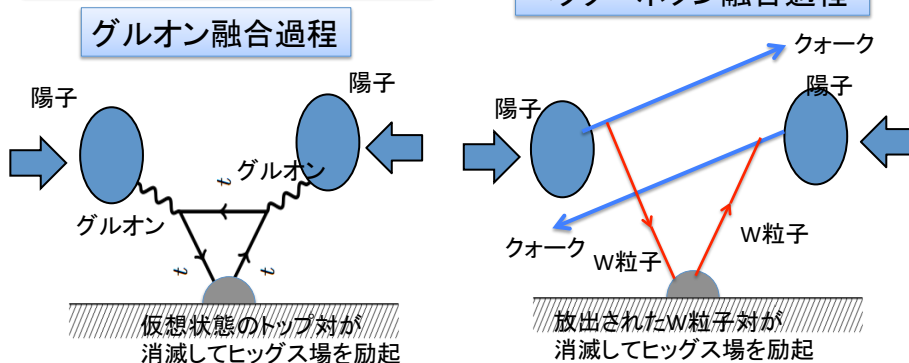


	ATLAS	CMS
characteristic	Accordion-type L.Ar EM cal. Fine segment muon detec. with Toroidal Magnet	PbWO4 EM scintillator has excellent energy resolution 4T Solenoid magnet
Tracker	B=2T Large L → $\delta \sim 1/BL^2$ TRT continuous (kink, disappear)	B=4T Strong B Only Si (semiconductor)
EM cal.	LAr+Pb 10%/SQRT(E) Fine segment + Layer	Scintillator 3%/SQRT(E) Excellent E not fine segmet
Hadron Cal	Thick Iron + scintillator 50%/SQRT(E)	Thin brass + scintillator 100%/SQRT(E) shower escape
muon	Air core toroidal multiple-scatter is suppressed low PT muon is detectable. complicated magnetic field	Return yoke of solenoid Strong Magnetic field good resolution, multiple scattering
Trigger	3 layer Hard + Local Soft + Full Reconst	2 layer Hard + Full Reconst
Physics	Jet resolution exotic track for LL particles B-physics	e/γ physics simple calibration

3. ヒッグス発見への道



ヒッグス粒子を作る

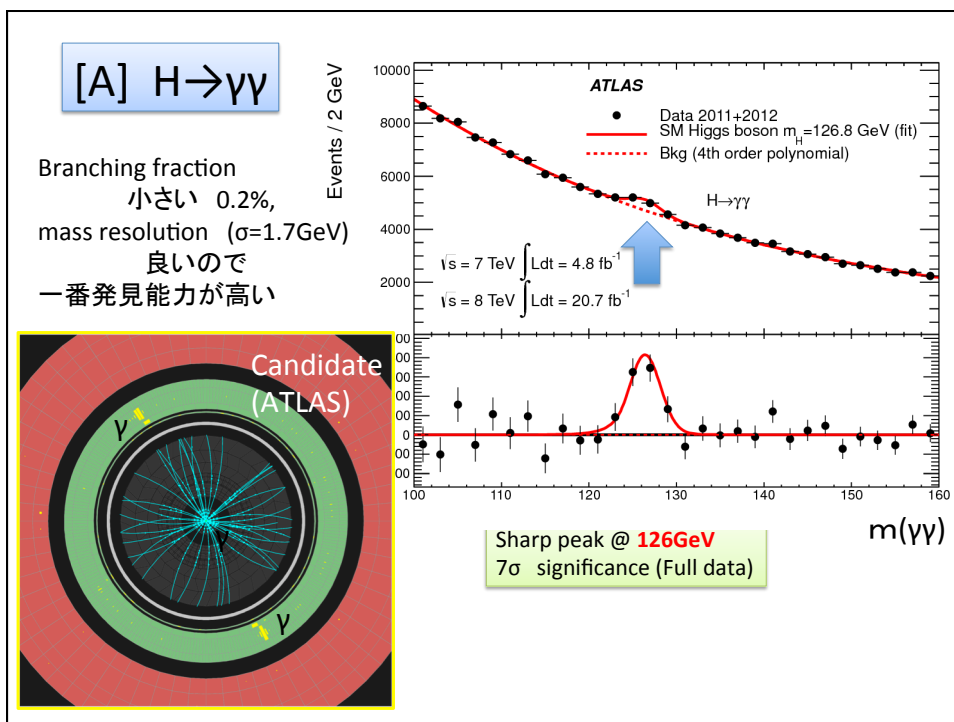
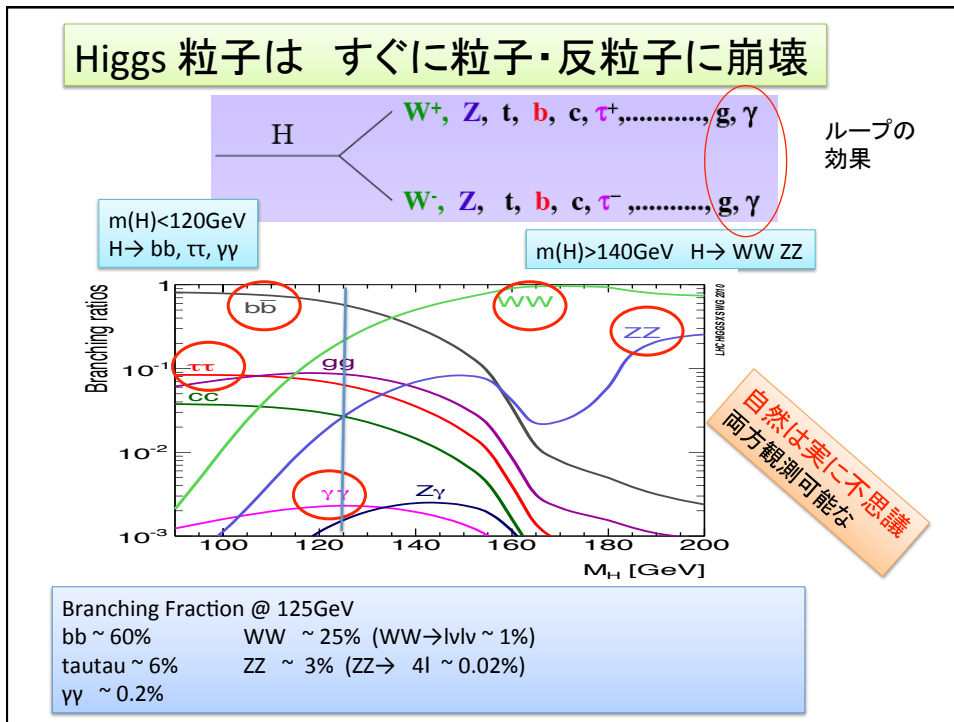


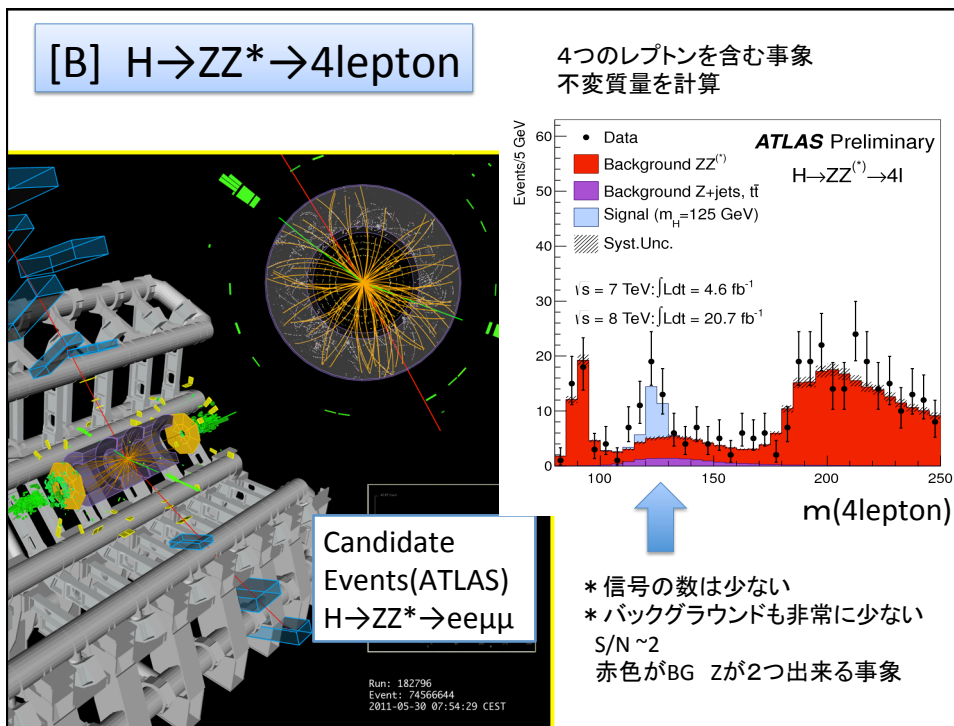
フェルミオンとの結合を
使って作っている。

Higgs (M=125 GeV)
GF $\sigma \sim 20$ pb
VBF $\sigma \sim 2$ pb

フェルミオンとの結合を
使って作っている

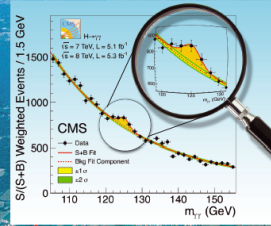
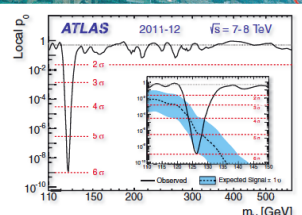
真空: ヒッグス粒子の生成 = 真空がヒッグス場に満たされている





**2012年 7月4日 ヒッグス粒子
(と考えられる新粒子) 発見!**

First observations of a new particle
in the search for the Standard
Model Higgs boson at the LHC

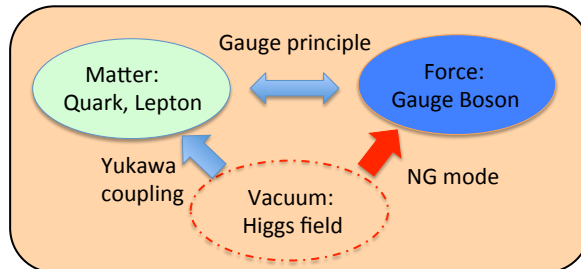



実際
論文のタイトルは

「LHCでの標準モデル
ヒッグス探索で、
新粒子が見つかった」
と言う
まどろっこしいタイトル

Higgs
と考えられる
Particle

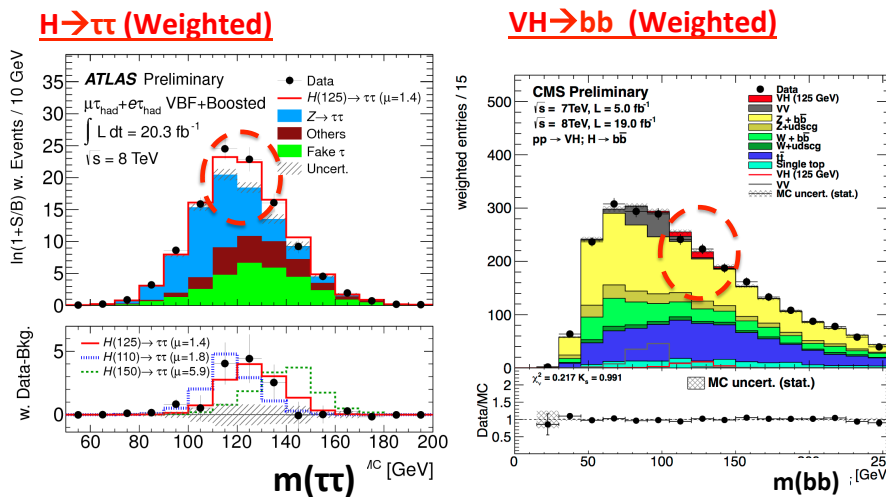
何故「と思われる」なのか？ 歯切れが悪いな～



- check List
- (1) Coupling to Gauge Boson $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ, WW$
 - (2) Coupling to Fermion $H \rightarrow bb, \text{tautau}, (t\bar{t})$
 - (3) Higgs spin 0 Parity +

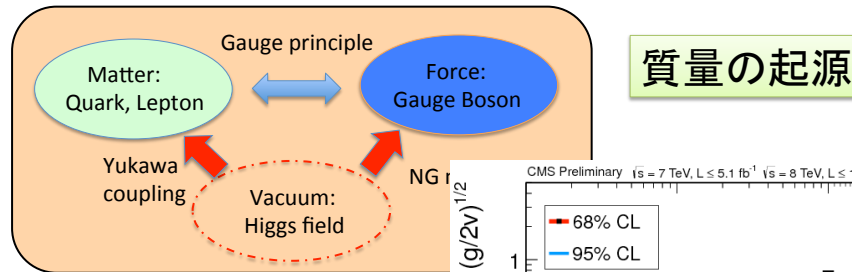
2012年 7月 $5 + 6 \text{ fb}^{-1}$
 2012年 12月まで $5 + 21 \text{ fb}^{-1}$ 最終的に 2.5倍のデータ量

[C] $H \rightarrow \tau\tau, bb$ (coupling to fermion)



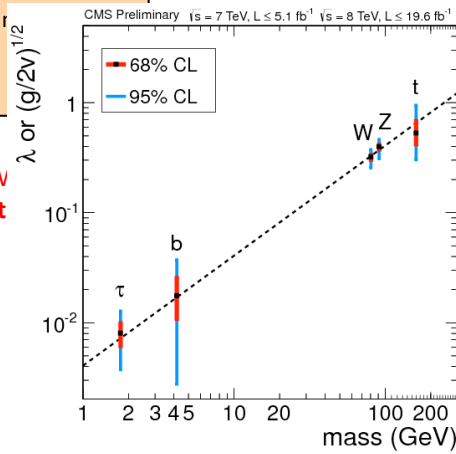
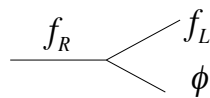
Energy resolution ($\sigma \sim 10 \text{ GeV}$)が悪いので、バックグラウンドとの分離が難しい
 感度を高める方法を開発して、
 $H \rightarrow bb$ and $\tau\tau$ (significance 4σ 程度) の evidence

湯川結合がある！ しかも質量に比例してる

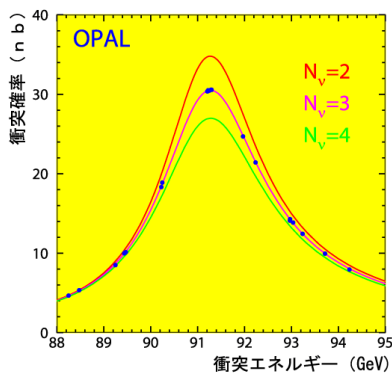


- (1) Coupling to Gauge Boson $H \rightarrow \gamma\gamma, ZZ, \nu\nu$
- (2) Coupling to Fermion $H \rightarrow bb, \tau\tau$
- (3) Higgs is spin 0 Parity +

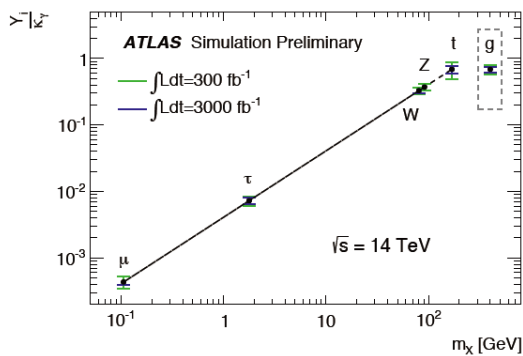
真空は弱い力の
バッファーに
なっている。



世代の起源？



3世代までしかないことは
実験で確認
Z粒子が何種類の
ニュートリノ対に崩壊するか？

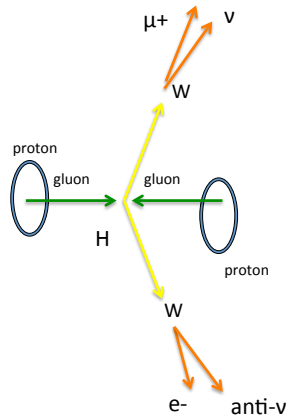


現段階で、1, 2世代は、3世代にくらべて、
湯川結合が著しく小さいことは判明
 $H \rightarrow \mu\mu$ も2022年頃には測定

世代の違いを生んでいるのは
Yukawa結合の強さだけ

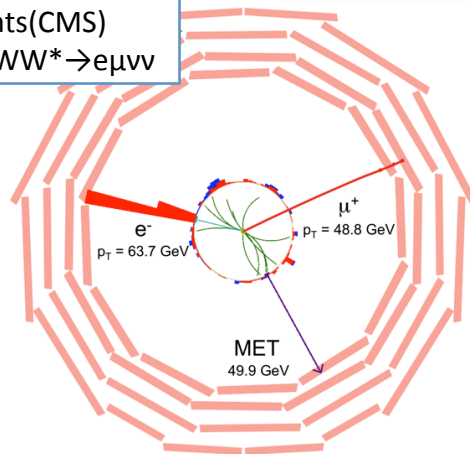
これからの
課題 1

[D] $H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ (スピン)

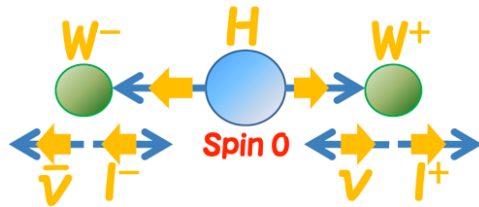


Candidate Events(CMS)
 $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\mu\nu\nu$

二つのレプトンのなす角が鍵

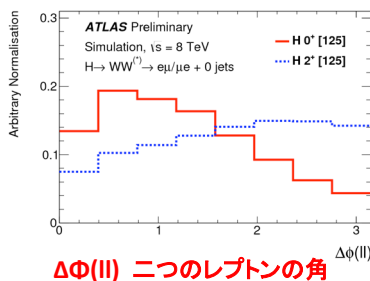


ニュートリノ2つは観測できないのでアンバランス(MET)になる。
 $MET = -\sum P(\text{visible})$



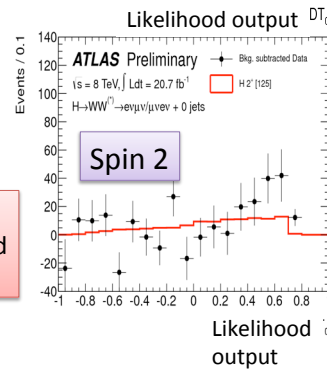
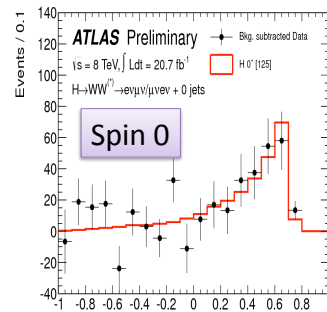
左巻きだけ

Spin2だと一方が逆になってレプトンの角度相関が反対



$\Delta\phi(\ell\ell)$ 二つのレプトンの角

Spin 0 Agree
 Spin 2 excluded with 99.9%CL

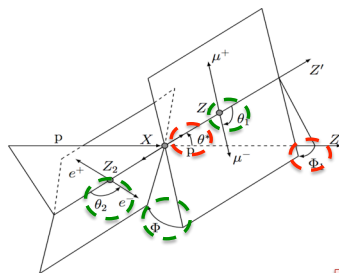


[E] Parity $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\text{lepton}$

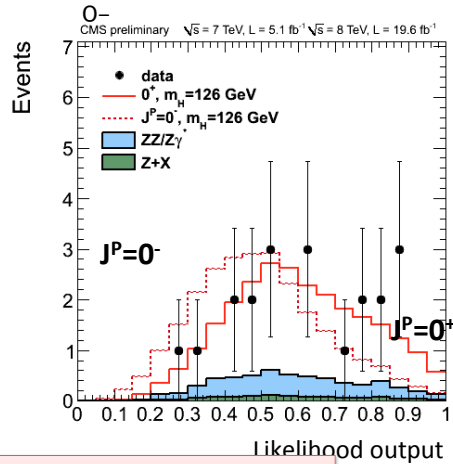
$$A = v^{-1} \epsilon_1^{*\mu} \epsilon_2^{*\nu} \left(a_1 g_{\mu\nu} m_H^2 + a_2 q_\mu q_\nu + a_3 \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\alpha q_2^\beta \right) = A_1 + A_2 + A_3,$$

SM Higgs

Polarization Vector(ϵ) of Z boson
 symmetric for Parity +
 asymmetric for Parity -
 momentum 比例 scalar gravity

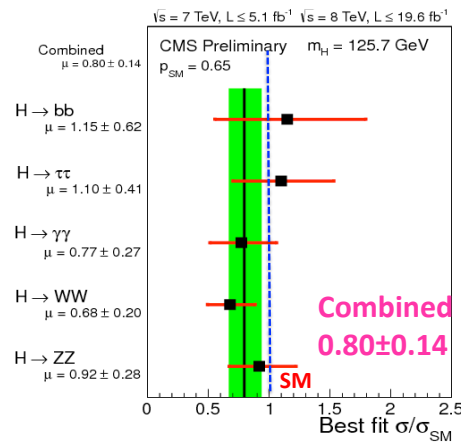
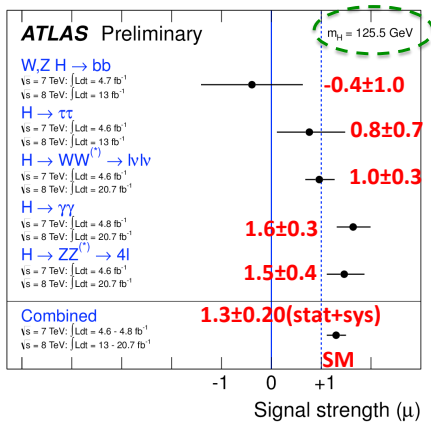


Polarization vector
 decay plane of dilepton ($Z \rightarrow ll$)

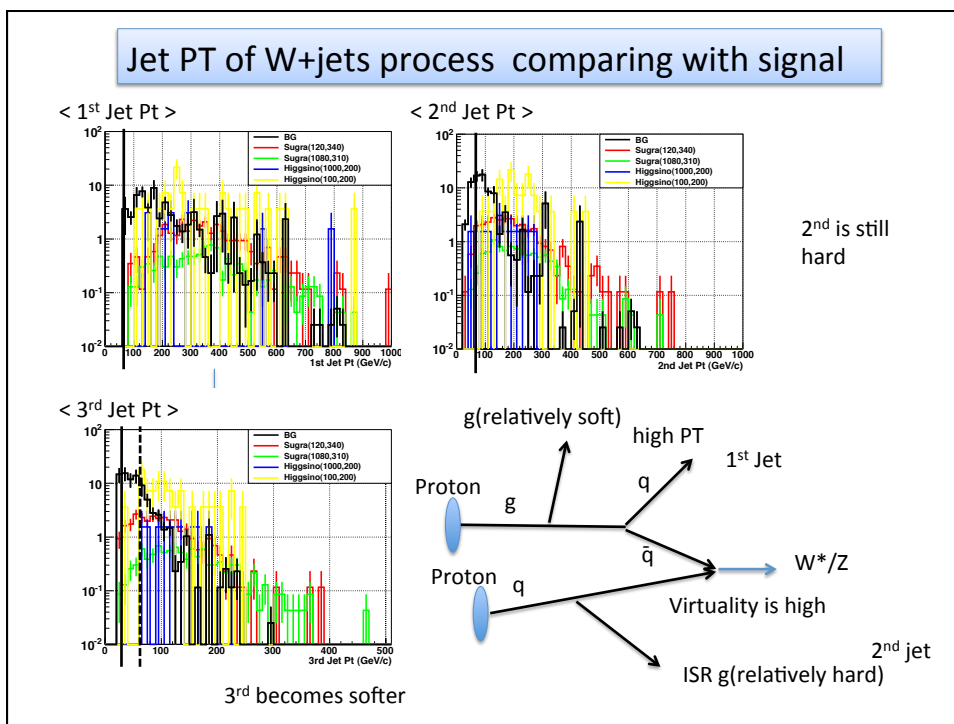
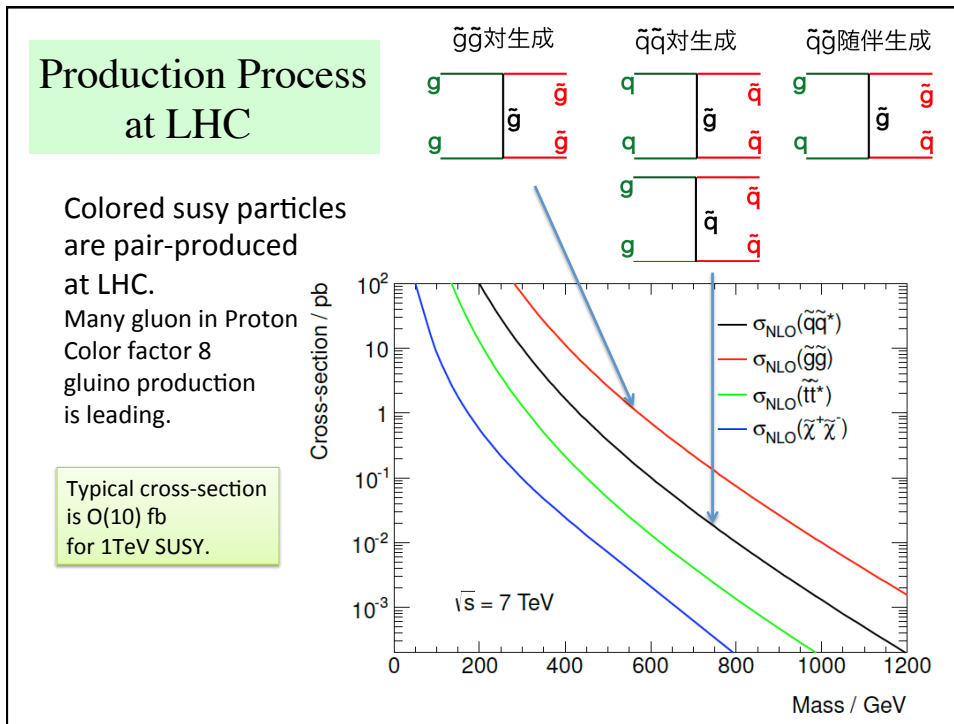


Data favor Spin 0+
 excludes Spin 0- with 99.8 %CL

Signal strength ATLAS vs CMS

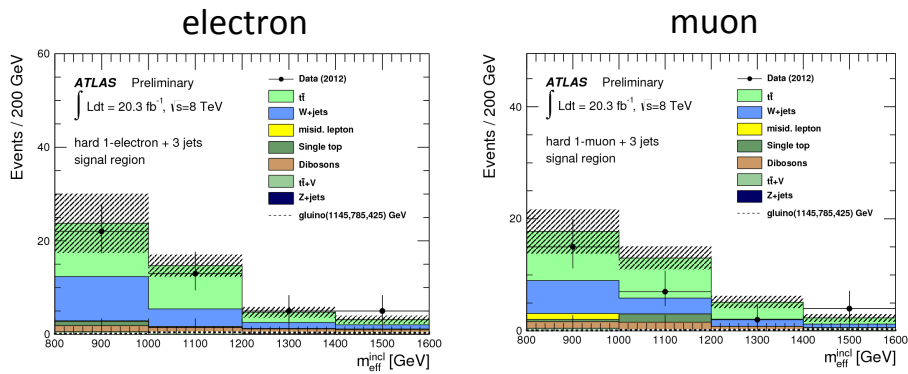


Coupling Strength are consistent with SM Higgs.
 But error is still 20%



One lepton Mode

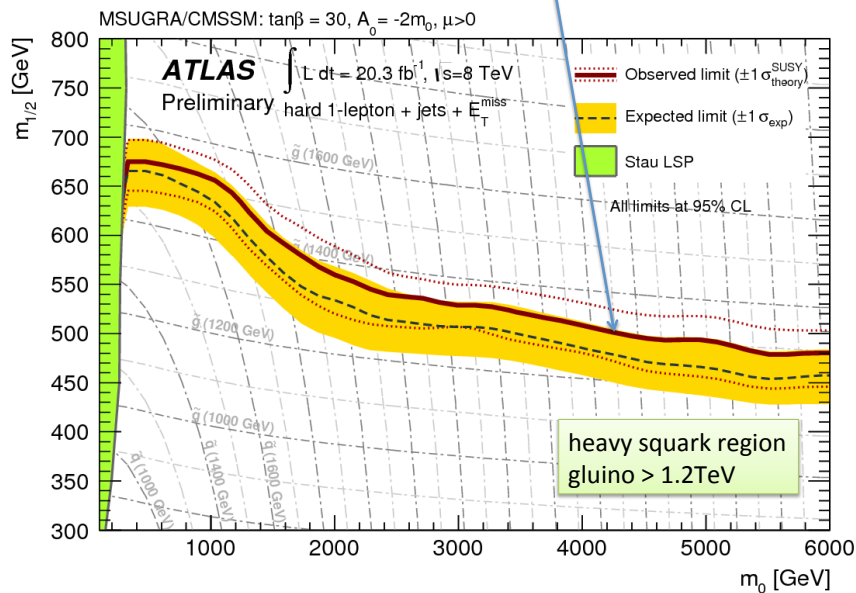
Electron ($PT > 25 \text{ GeV}$) or muon ($PT > 25 \text{ GeV}$) is required for trigger/ BG suppression
 At least 3 jets ($PT > 80 \text{ GeV}$) MET $> 500 \text{ GeV}$ MT $> 150 \text{ GeV}$ Meff $> 1400 \text{ GeV}$



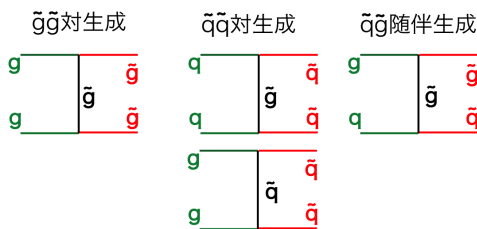
tt is dominant background processes; (One lepton is complementary for no lepton)
 Different topology and different BG processes.

No excess was found in data @ 8TeV ($L=5.8 \text{ fb}^{-1}$)

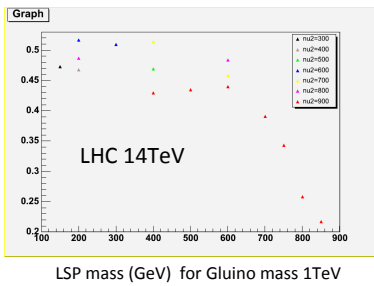
Similar sensitivity for no-lepton and one-lepton modes in many standard SUSY models
 One lepton mode covers "heavy squark mass region" effectively.



These results does not depend strongly on SUSY models



Production process is just strong interaction. cross-section depends on gluino, squark mass. Not depends on detail of SUSY models



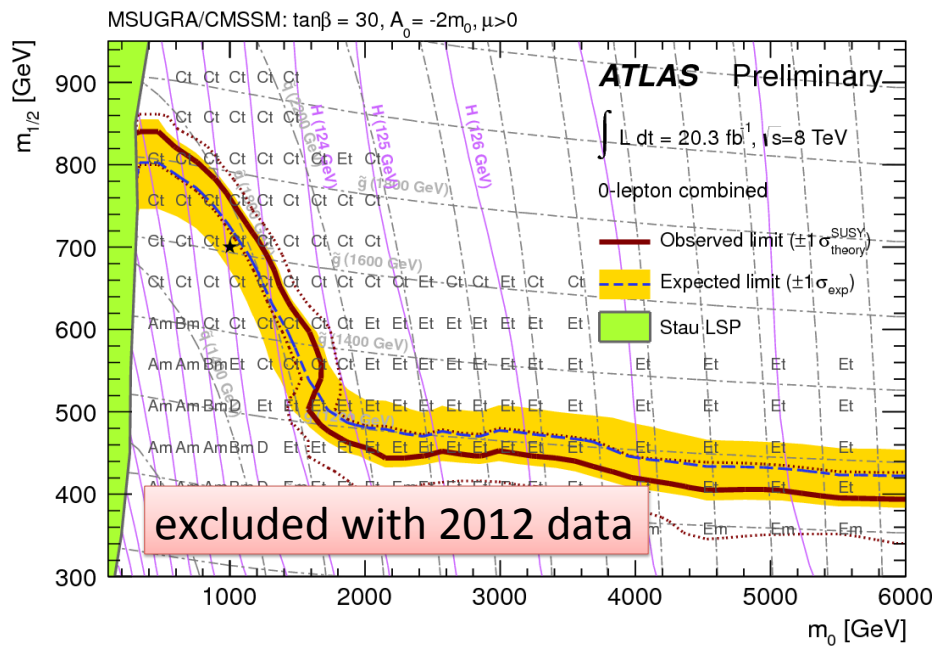
Distribution does not strongly depend on the the other SUSY parameters.

Main difference comes from the mass difference between LSP and the produced colored mass. ΔM

mass difference between LSP and colored mass is crucial: $\Delta M < 300\text{GeV} \rightarrow$ No sensitivity

No SUSY found @ LHC (1) heavy colored (2) degenerate (3) No MET (4) NoSUSY (@ TeV scale)

Interesting SUSY parameters predicted by Higgs 125.5GeV will be covered

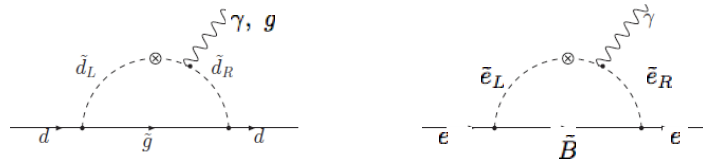


5. Impact to EDM & Summary

EDM/DM are alternative approaches to explore SUSY particles: **Assuming maximal CP violation** in SUSY sfermion section;

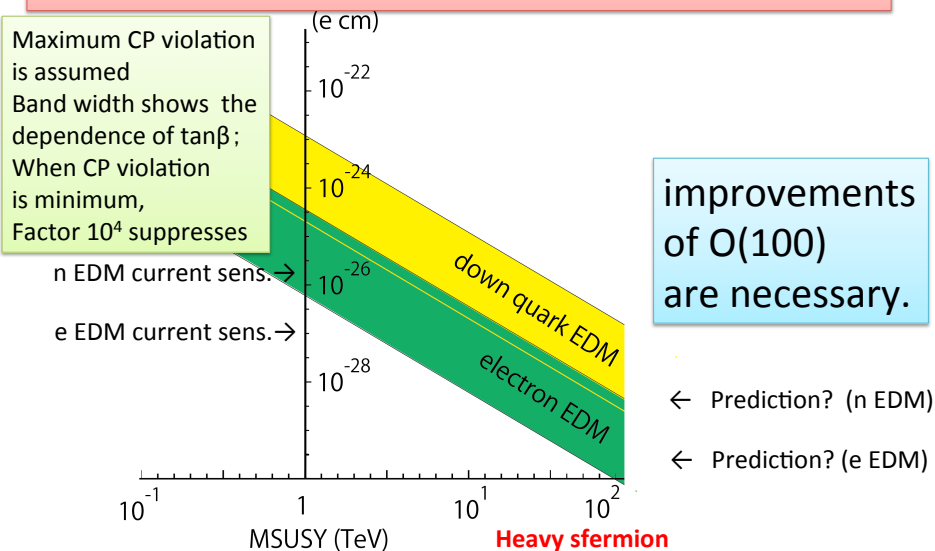
$$d_e/e \sim 0.6 \times 10^{-26} \text{cm} \left(\frac{M_{SUSY}}{1\text{TeV}} \right)^{-2} \tan \beta$$

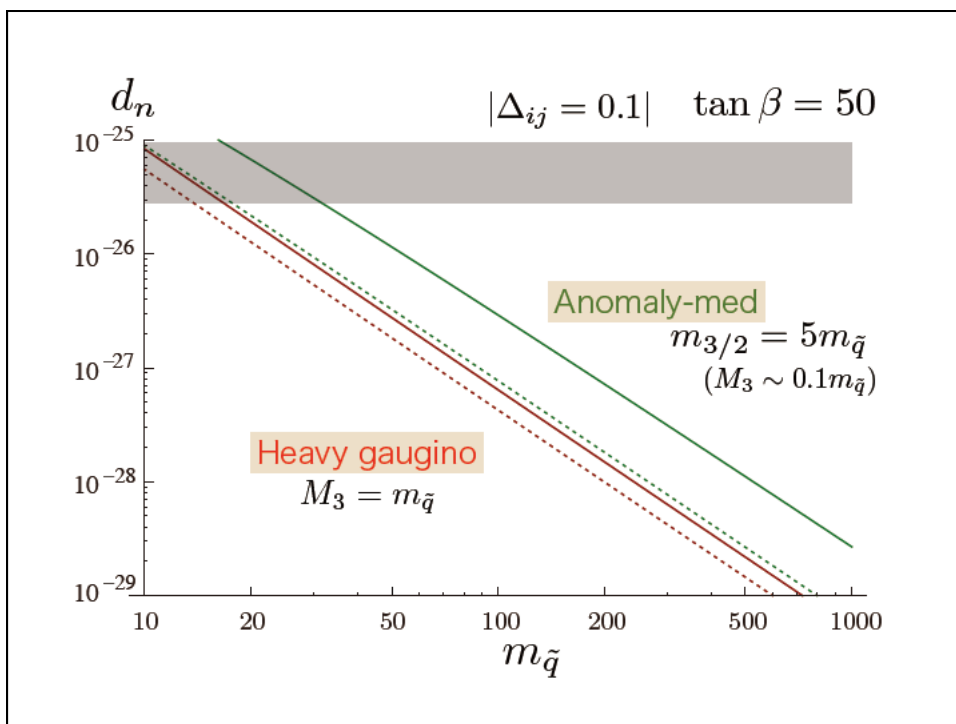
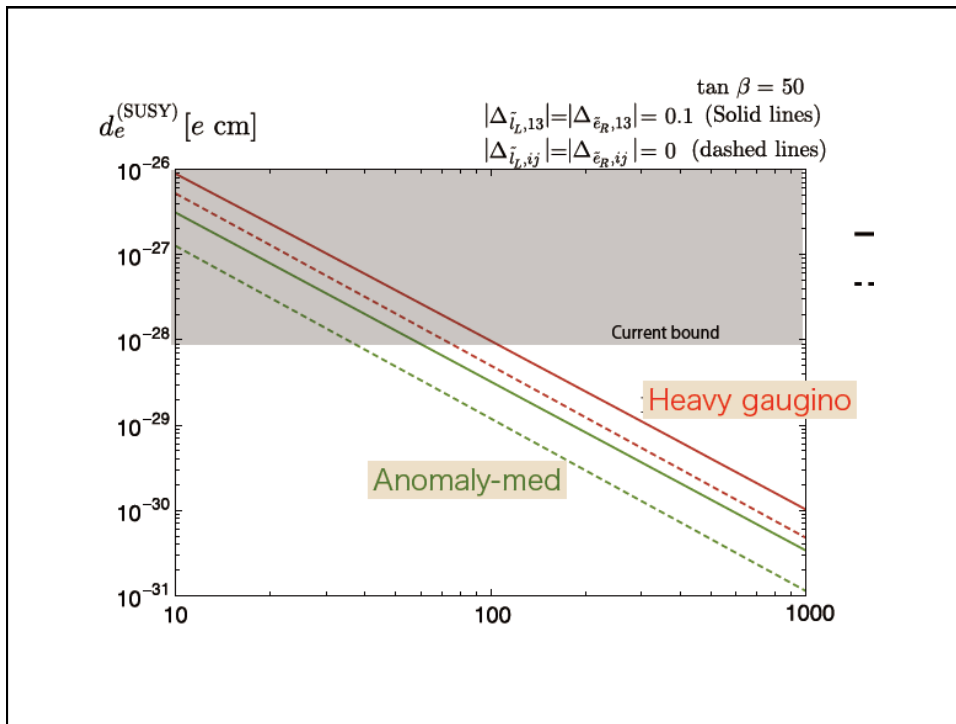
$$d_d/e \sim d_d^c \sim 2 \times 10^{-25} \text{cm} \left(\frac{M_{SUSY}}{1\text{TeV}} \right)^{-2} \tan \beta$$

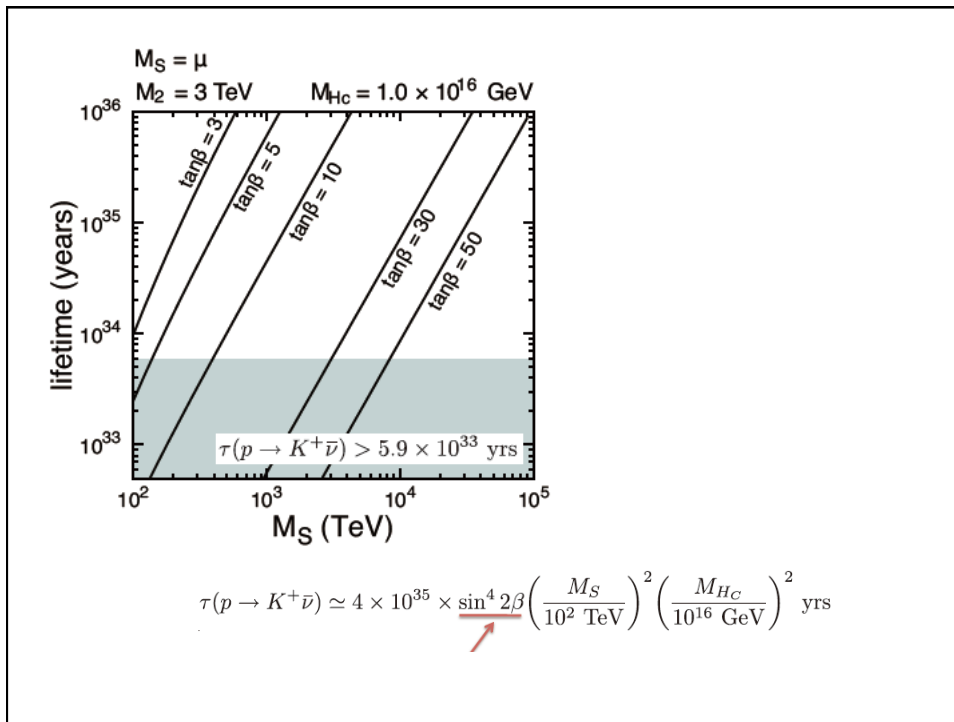


From J.Hisano

Summary: From outputs of LHC







SUSY with Exotic signature

Motivation no MET signature should be covered

(1) AMSB Wino LSP chargino life $\tau = 1-10 \text{ cm}$	Wino $\Omega \ll 1$
(2) GMSB stau NLSP stable in detector or decay in ID	Gravitino DM
(3) SPLIT SUSY ($m_0 > 1000 \text{ TeV}$) gluino \rightarrow R-hadron	
(4) R-parity violation If coupling is small displaced vertex	

Signatures

(A) Heavy charged particles (GMSB stau, R-hadron)

(A1) dE/dx energy loss in the semiconductor, $\tau \gg$ detector size

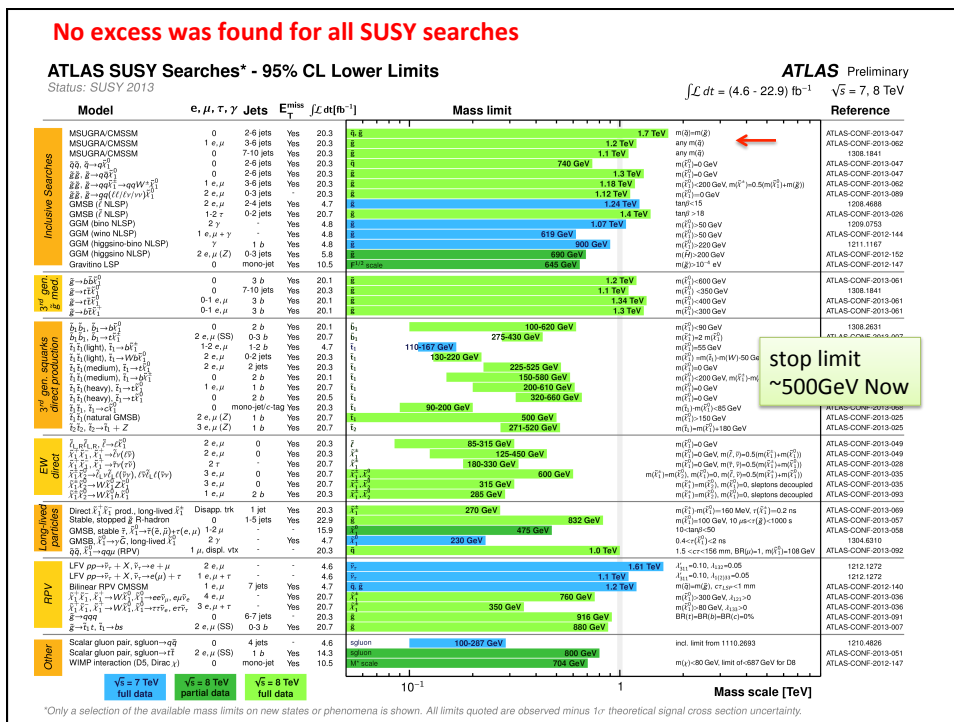
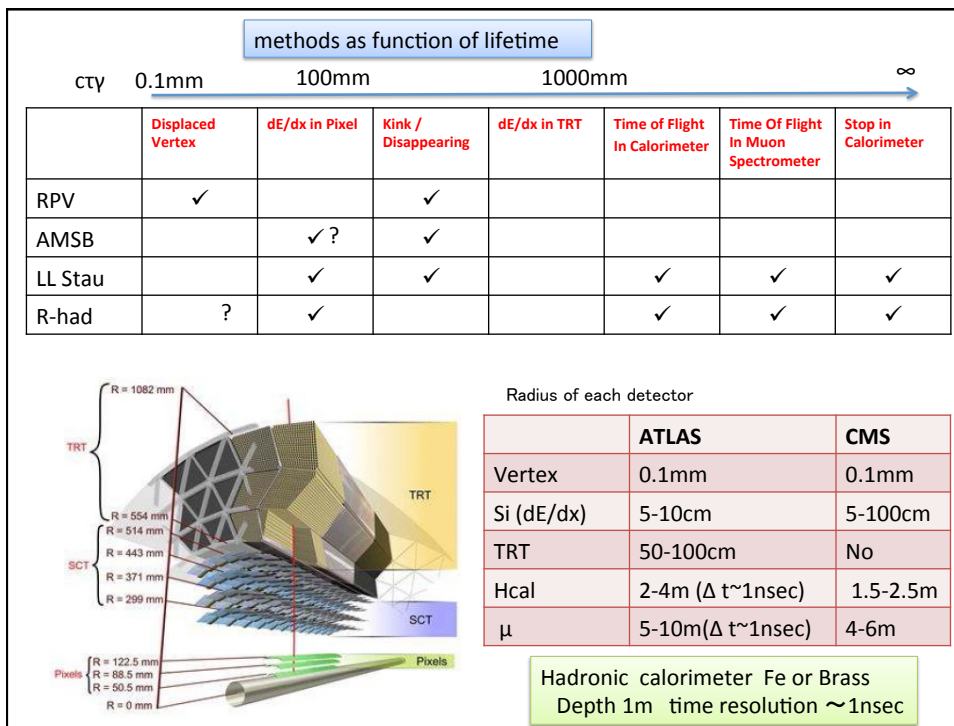
(A2) TOF information in Cal. or muon system ($\beta < 1$)

(B) Decay in flight (AMSB wino, GMSB stau)

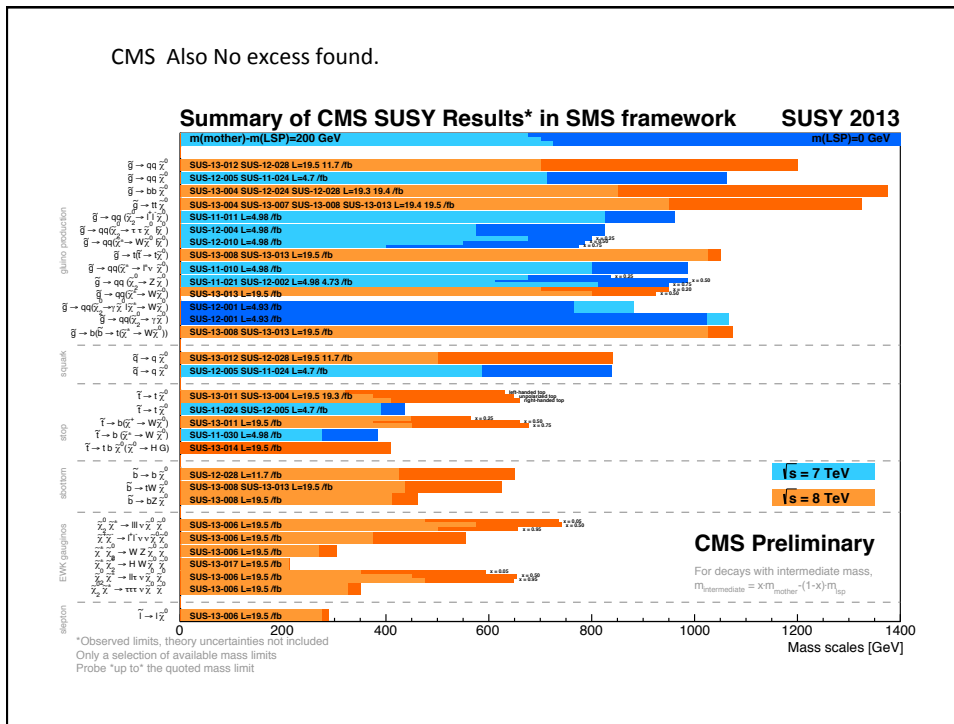
(B1) Kink/Disappearing track in the continuous tracking system (ATLAS)

(B2) neutralino decay with long-life displaced vertex is found

(C) stau and R-hadron(both neutral and charged) stop in the dense material (Hadron calorimeter) dedicated trigger is necessary to catch decay.



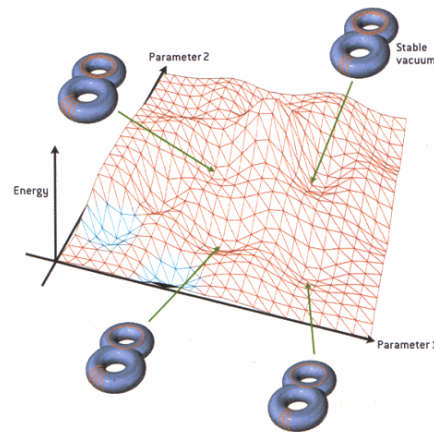
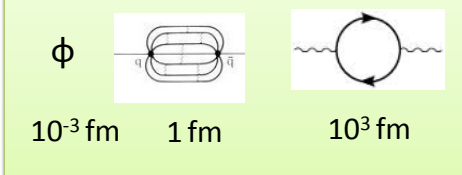
CMS Also No excess found.



4. Application; Vacuum is not empty

Even in the simple Standard Model, Vacuum has 3 structures.

- Higgs : Weak charge field is filled.
- QCD: Quark condensation
- QED: Virtual electron effects



"The Landscape" (Picture from Scientific American)

"Vacuum" has more complicated structures.

For example, ➔

String-theorist provide $\sim O(10^{50})$ vacua: It's called "Landscape"

But

Many additional vacuum fields may exist. Expected from cosmology, experimental results.

For example;
Dark energy (scalar field?),
PQ symmetry (Global U(1)),
Additional U(1) gauge,
GUT....

"The Landscape" (Picture from *Scientific American*)

String-theorist provide $\sim O(10^{50})$ vacua:
It's called "**Landscape**"

How to probe these vacuum structures using Photons ?

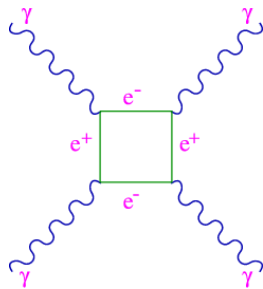
Photon has an induced effective coupling to vacuum fields.

example X

Dark Energy ?? (meV?)	Microwave
Dilaton/Axion??	Visible
Additional U(1)??	X-ray
QED (electron loop)	γ-ray
QCD (quark condensation)	energy
Higgs field	
GUT?? (Colored Higgs? Inflaton?)	

- target physics depends on a photon energy, From microwave to high energy γ-ray , various light sources are useful to cover
 - * Resonance for s-channel scalar
 - * Enhance of scatter of t-channel
 - * Box diagram (QED)
 - * Produce new particle
- Extremely high power is a key technology.

Example: QED: Schwinger Limit



coupling α^4
electron loop $(\omega/m)^6$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{139\alpha^4}{(180\pi)^2 m^2} \left(\frac{\omega}{m}\right)^6 (3 + \cos^2 \theta)^2$$

$\sigma = 1.8 \times 10^{-27}$ fb using visible light

Current upper-limit using laser is worse by a factor 10^{18}

(D. Bernard et al. E.P.J D10 141 (2000))

Our new experiment using FEL X-ray(10KeV)
in progress.

σ can be enhanced by factor 10^{24}

