



# 超対称性粒子と暗黒物質

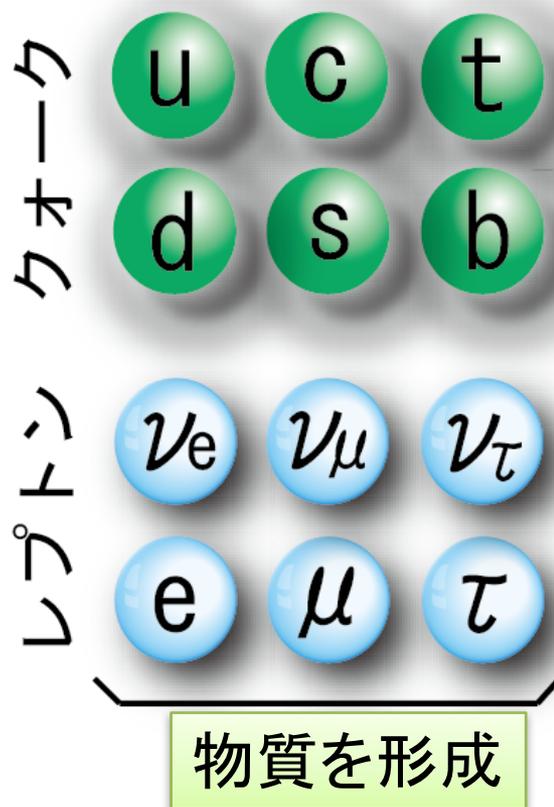
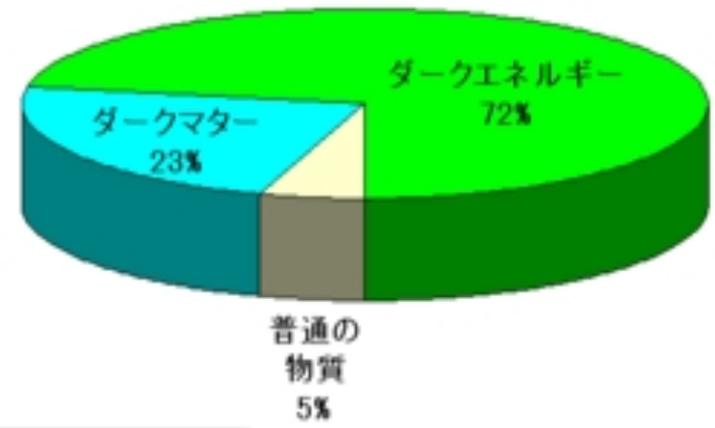
あさい

ヒッグス粒子が発見で、  
標準理論が完成  
3つのセクター: 物質・力・真空場

問題点その1

# 標準理論

## 宇宙の成分表



ゲージ粒子



力を伝える(3つの力)

ヒッグス粒子



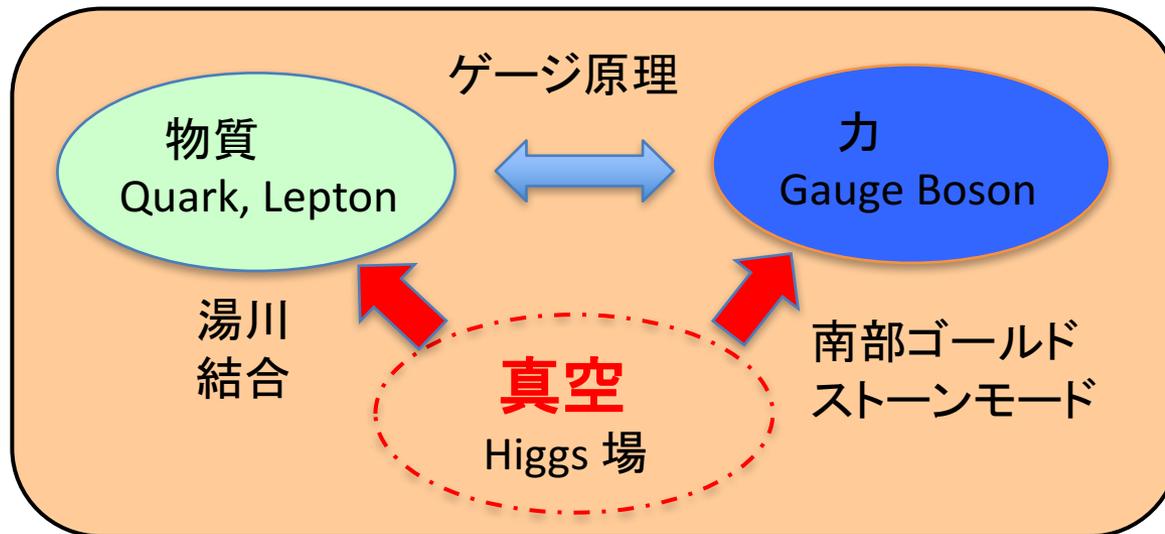
問題点  
その3

2012年発見

問題点その2

3つ(4つ)も力があるのは気持ちわるいな。。

# ヒッグス場は、これまでのモノとは違う



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。  
“真空の場”（真空が相転移したり、、）

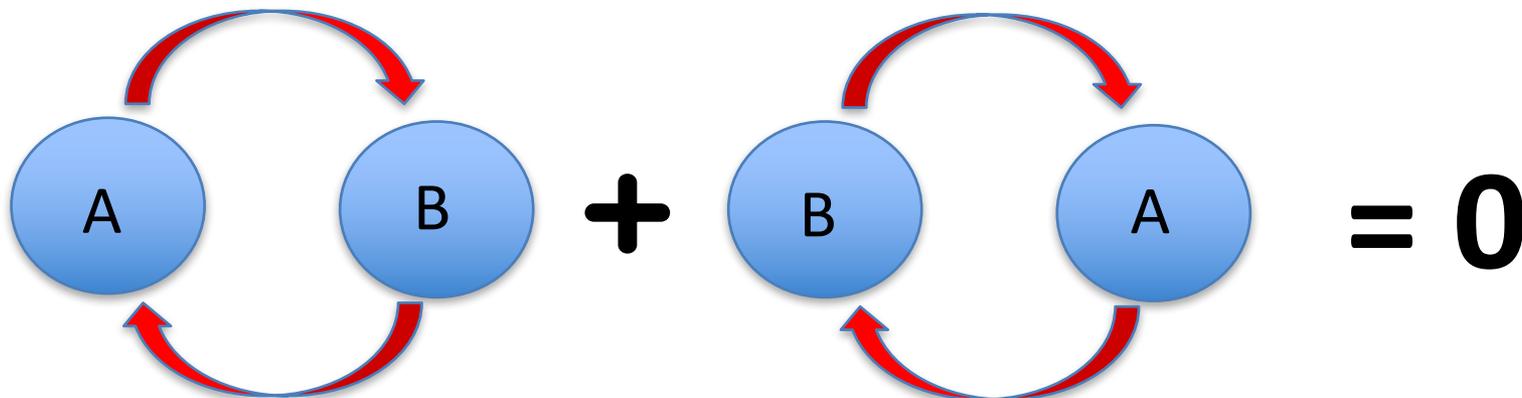
素粒子：物質 スピン $1/2$

：力 スピン 1

真空：宇宙全体にひろがっている スピン 0

物質と力の違いは何？

電子などは、2回して元に戻る



フェルミ粒子(半整数スピン) 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。

ボーズ粒子(整数スピン) 360度でもとの状態に戻る。(我々の感性)

**素粒子のスピン:空間の表裏がみえるか**

**見えないかの違い**

**違いが分かる→物質 わからない奴が→力**

# 素粒子のスピン

スピン: 角運動量と同じ性質

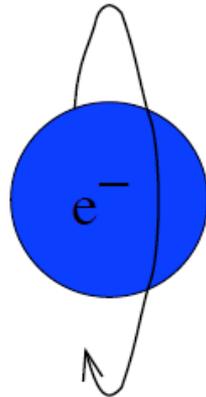
量子力学の保存量:

**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  
回転対称性を示している。**

Spin



角運動量: 空間回転対称性の性質:

$\theta$ 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。

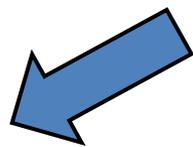
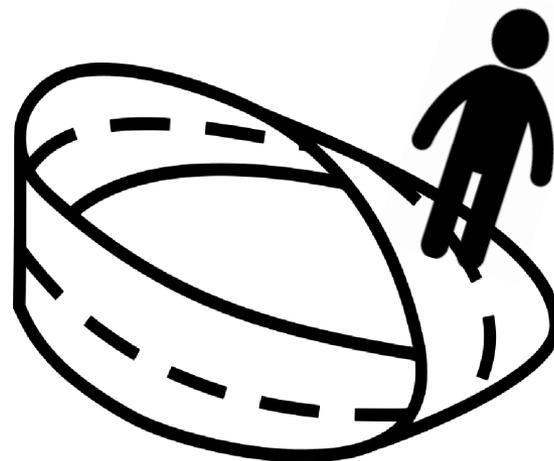
-> フェルミ粒子から見ると 空間720度あるような世界に見える。  
**素粒子にしか見えない何かの空間があって、それも見ている。**

# 2回転してもとに戻る例

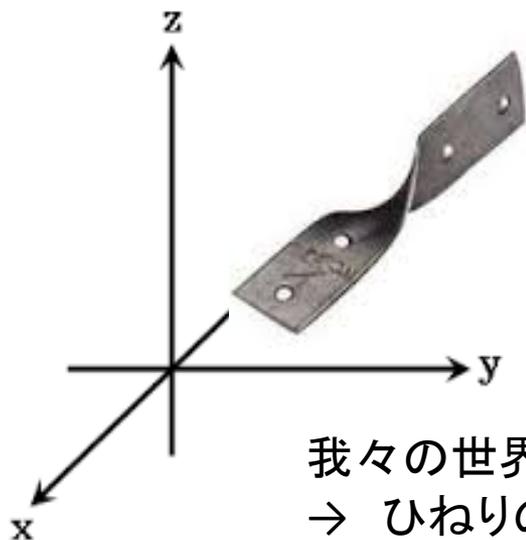
メビウスの輪



3次元世界に住んでいるんですが  
まあ、2次元に1つ次元を下げて  
考えてみる。ただの平面でなく、  
このメビウスの輪の上に  
住んでいる人を考えてみる

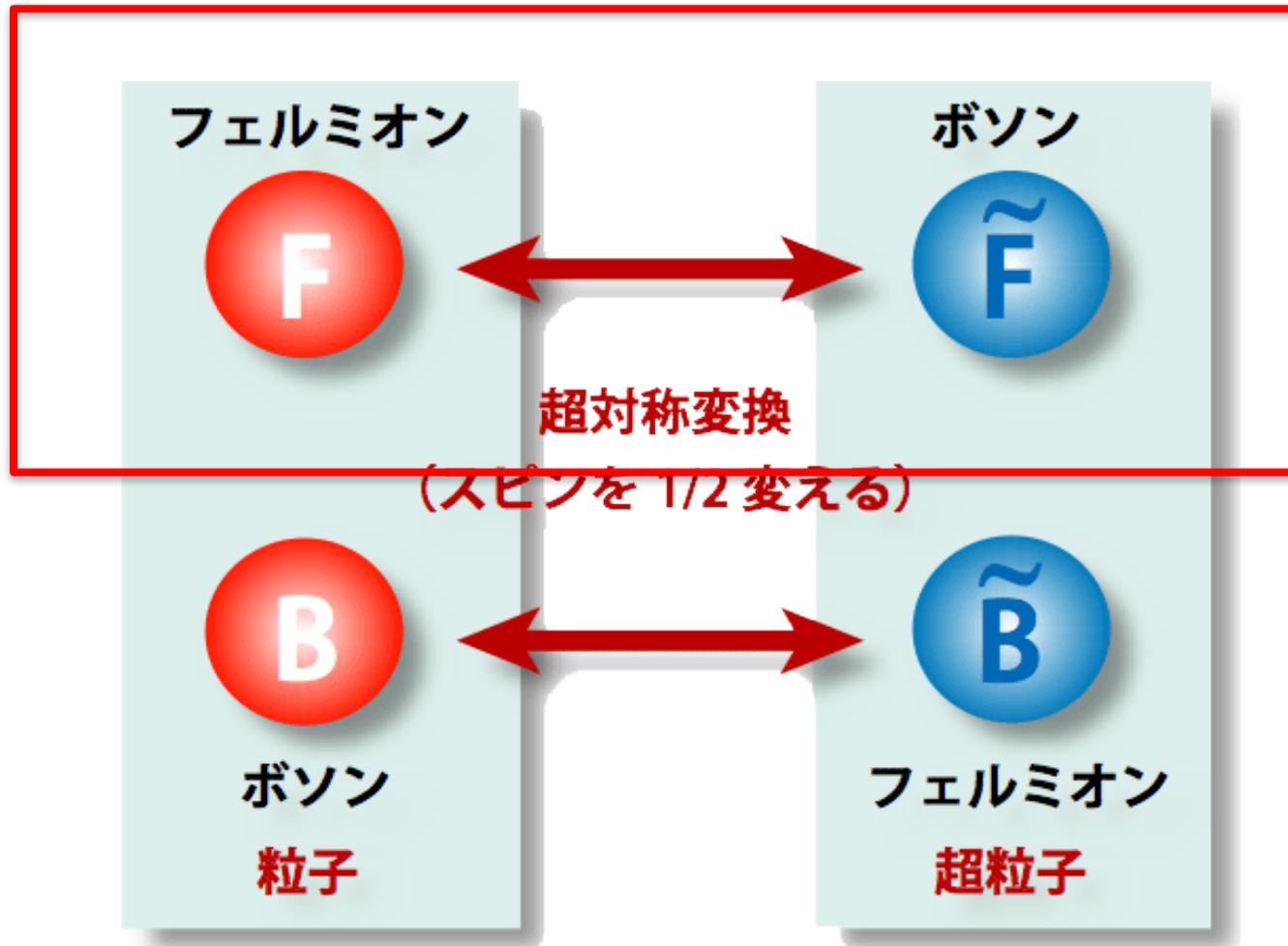


普通の2次元に裏と表の自由度があるので、  
2次元+表裏の空間に見える。



我々の世界は3次元+ ひねりの入った世界  
→ ひねりの次元(フェルミオン次元)が加わった世界

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係した**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:  $\gamma$

弱い力荷: W, Z

色荷: グルオン

**スピンに関して**

**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！！)

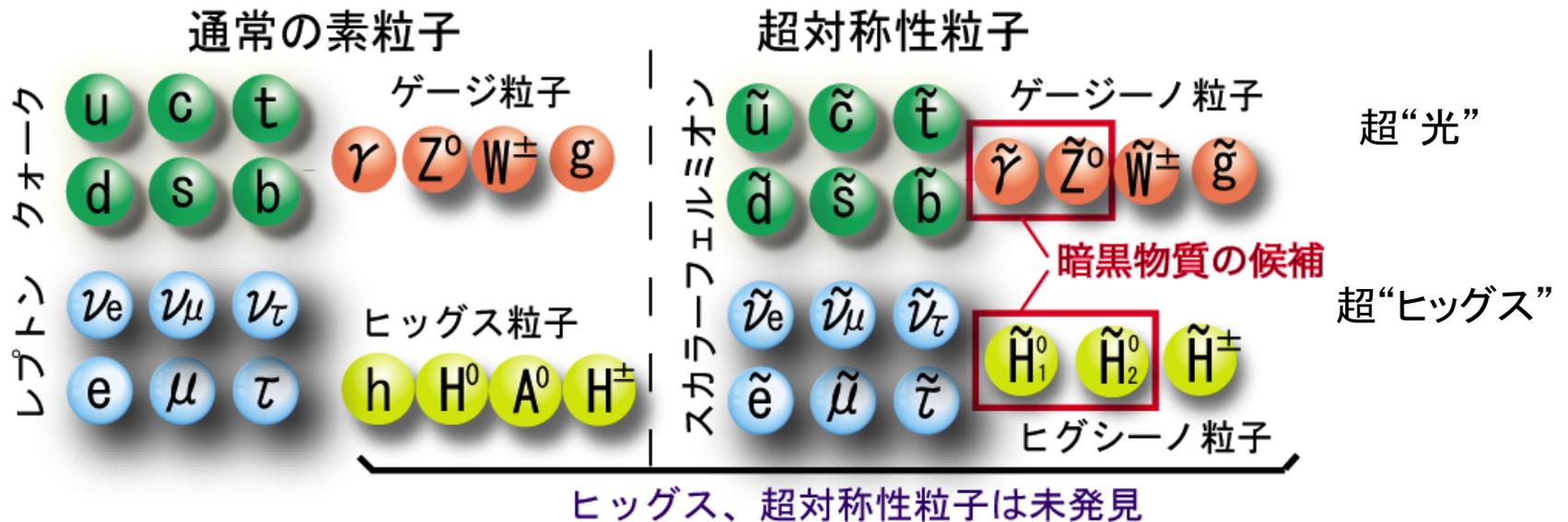
(ちょっと難しいけど、二回超対称変換すると)

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

# “超” 対称性

物質—力  
力—物質 の統一

スピン: 素粒子から空間がどう見えているか?  
“時空”と“素粒子” をむすびつける “すごい”規則 なので “超”対称性



- 超対称性の利点
- 宇宙の暗黒物質の解明:
  - 力の大統一
  - 小さい宇宙(素粒子)が見ている時空

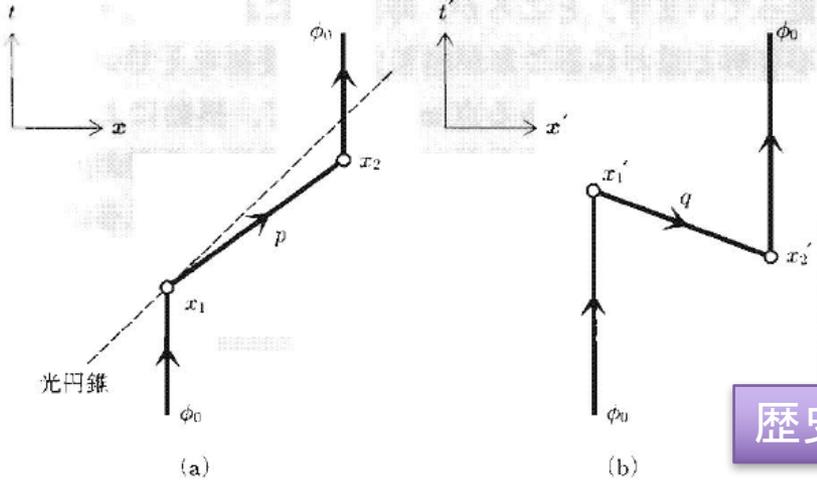
# (1) 歴史に学ぶ

新しい対称性  
⇔ 新粒子

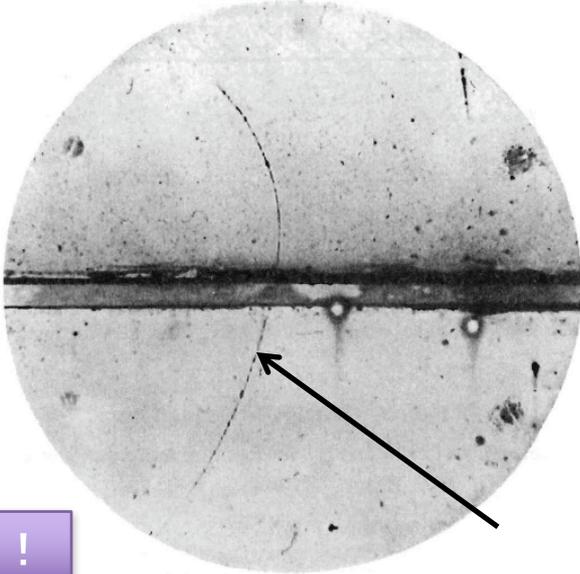
「特殊相対論」と「量子力学」を両立させると、時間の対称性が必要となり、反粒子が出てきた。(1928 Dirac)  
反粒子は時間に逆行する粒子

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



歴史は繰り返す?!



e<sup>+</sup>下から上へ

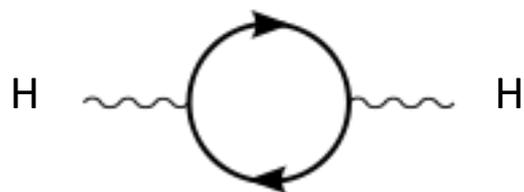
時空にして、反物質が出て 時空+フェルオン次元にして、SUSY粒子が出てくる?

## (2) ヒッグス粒子が軽い理由

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar \quad \Delta t \cdot \Delta E \geq \hbar$$

$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

大きく $\Delta E$ がずれるても短い間ならいい。



トップ・反トップ

ヒッグス粒子を重くする効果

ヒッグス粒子は  
むちゃくちゃ重くないといけな  
いでも 125 GeV ???

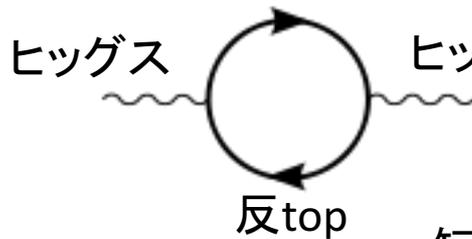
問題！！！！

何か新しい物理(標準理論を超えた)があることを示唆している

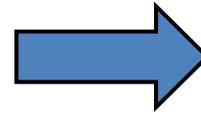
# 階層性問題

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

top

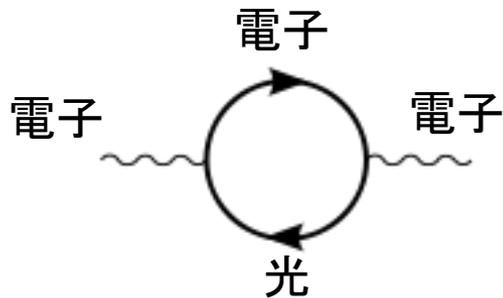


量子力学的な効果  
ヒッグス粒子の質量は  
もっと重くなるはず



安定させる  
新しい物理法則

短い距離まで適用: 不確定性大きい運動量まで可



これも同じように効くはず??

でも電子は511KeV

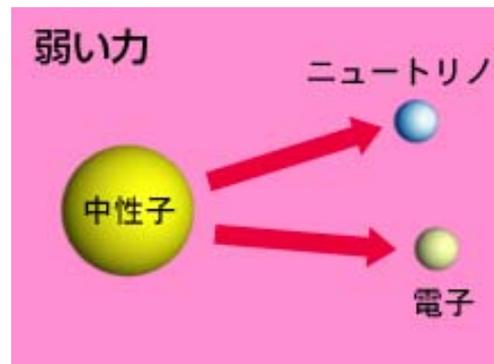
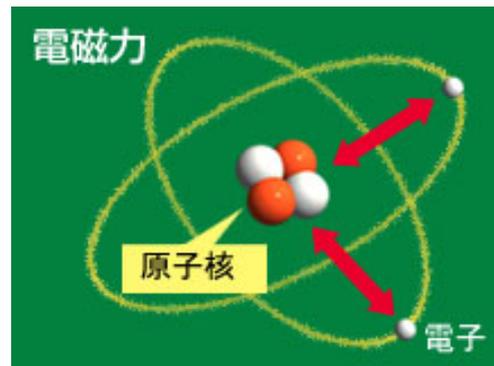
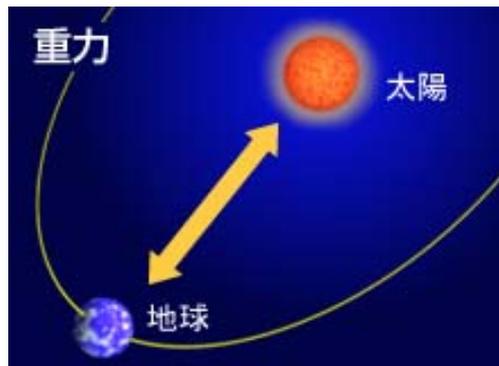
電子に、カイラル対称性と言う性質があつて  
この発散は、logになって繰り込める。

光も、同様にゲージ対称性

- S=1/2 フェルミオン カイラル対称性 (masslessになる)
- S=1 ゲージ粒子 ゲージ対称性(massless)
- S=0 スカラーに対応する対称性がないこと問題

# (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

電磁気力  
電荷保存

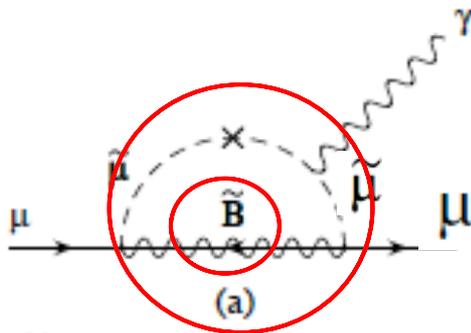
弱い力  
弱電荷保存  
真空がもってるので  
一見保存しない  
(ヒッグス場)

強い力  
色電荷

重力以外は  
素粒子の内部対称性に  
起因している。

# 結合定数は定数でない: 量子的な効果で変化する

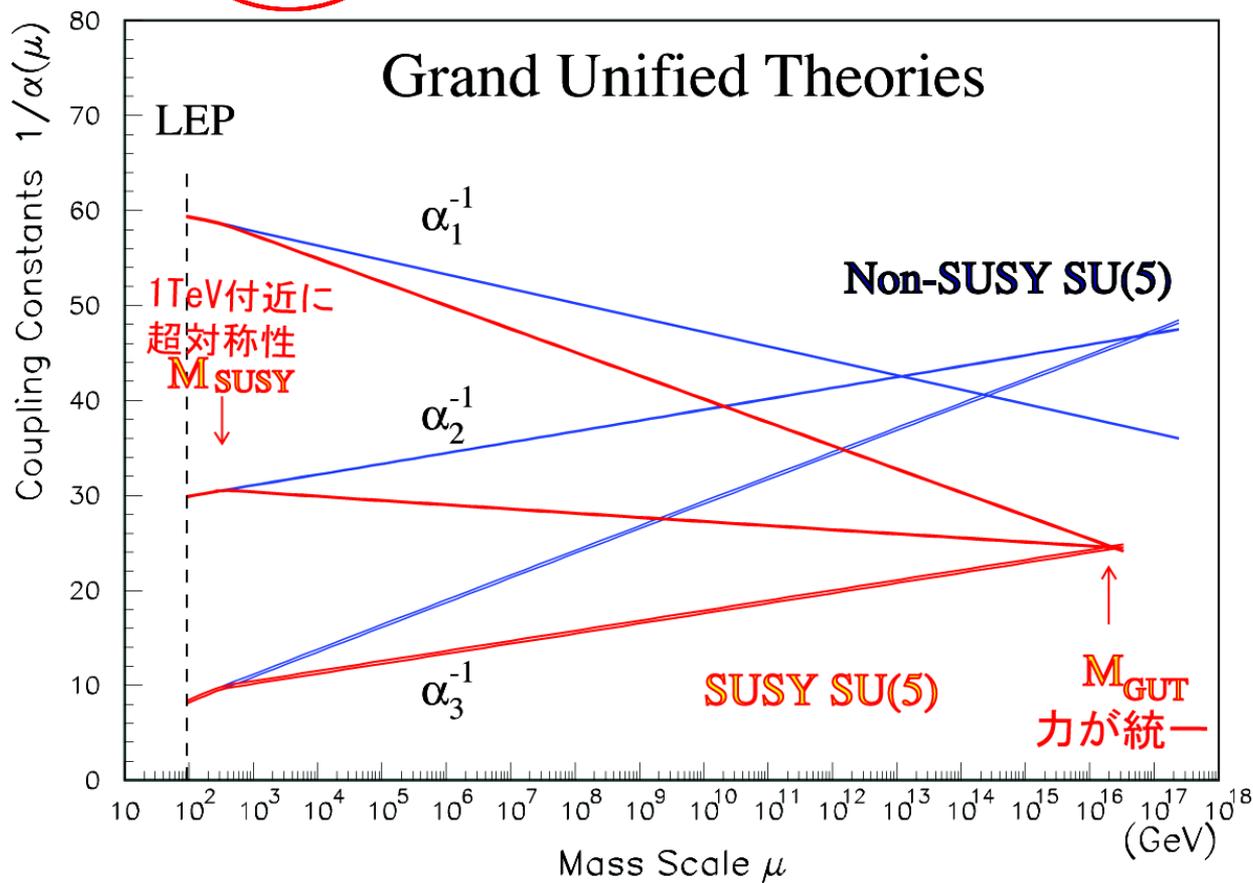
Mass scale  $\mu \sim 1/R$ (見るスケール)



新しい粒子があると  
結合定数の変化が  
変わる

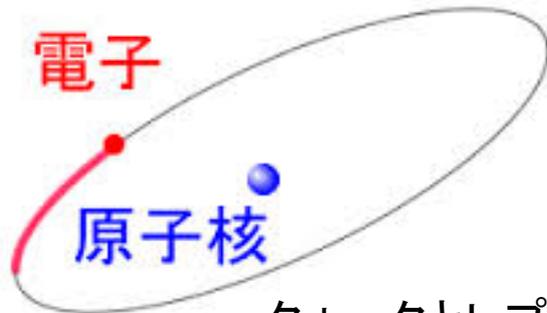
超対称性粒子が **1-10TeV付近**にあると、  
3つの力は  **$2 \cdot 10^{16}$  GeV**で一つの力に  
なることが示唆された。

**→ 力の大統一 (GUT)**





# 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	<i>u</i> アップ	<i>c</i> チャーム	<i>t</i> トップ
	<i>d</i> ダウン	<i>s</i> ストレンジ	<i>b</i> ボトム
レプトン	$\nu_e$ eニュートリノ	$\nu_\mu$ μニュートリノ	$\nu_\tau$ τニュートリノ
	<i>e</i> 電子	$\mu$ ミューオン	$\tau$ タウ

電磁気力  
弱い力  
強い力

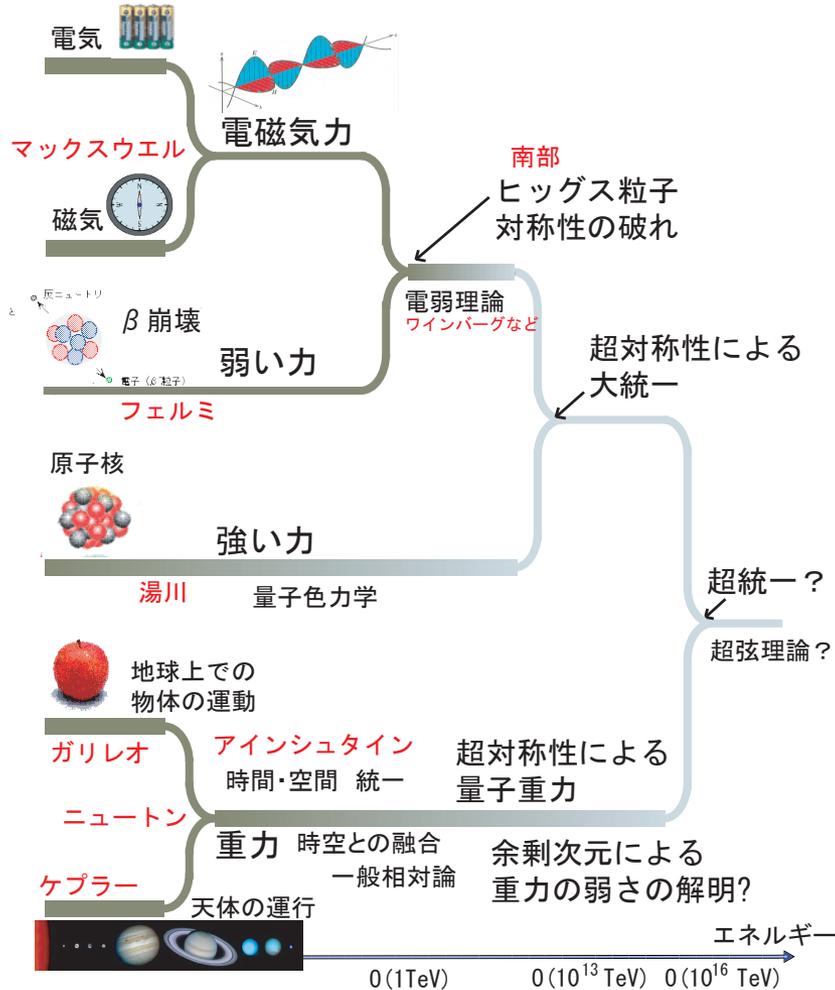
電磁気力  
弱い力

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

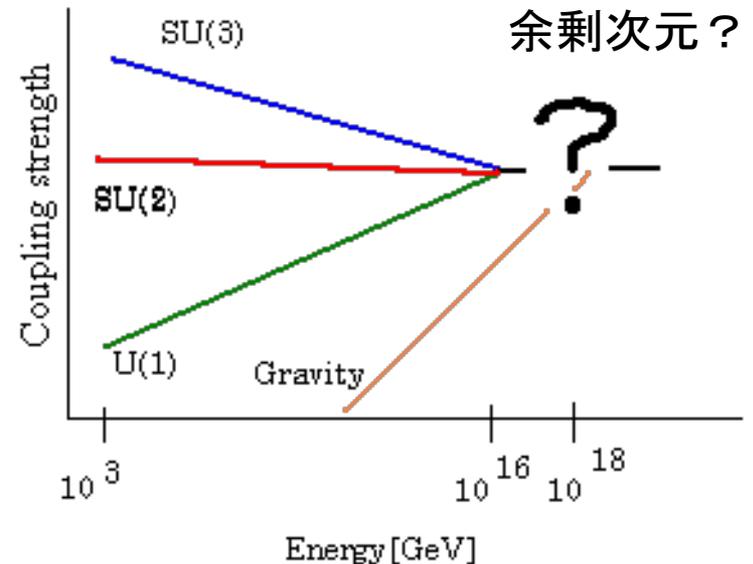
# 重力まで統一出来るか？（超統一）

## 物理学の大まかな歴史と「統一」



## 二つの謎解きが必要

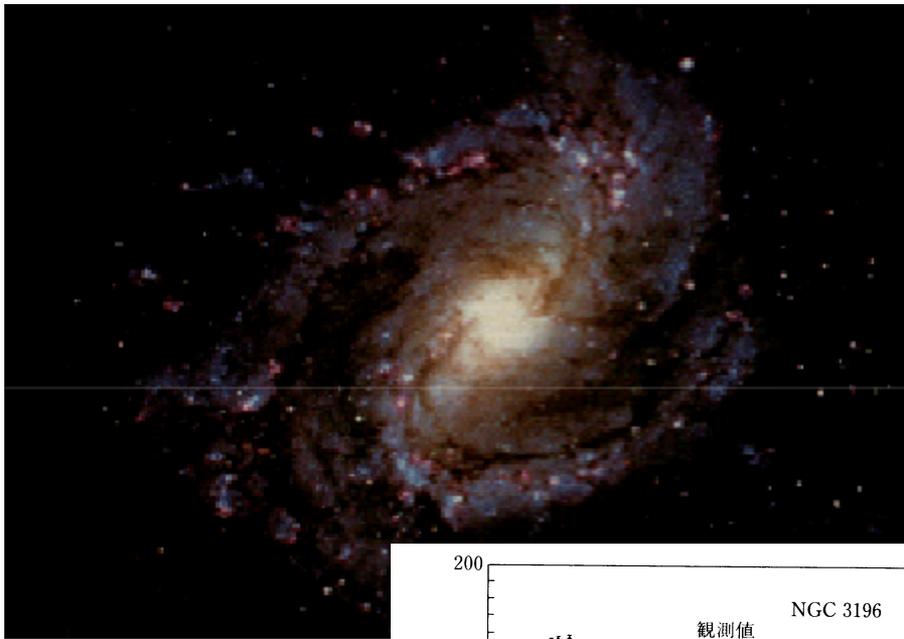
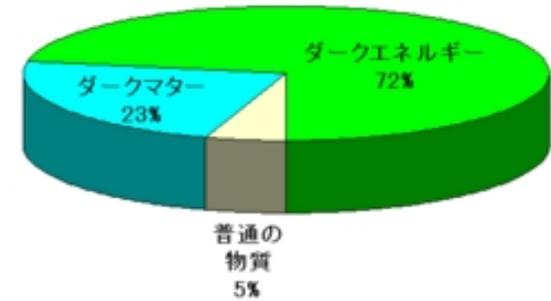
- 1) 重力 実空間(A)の対称性  
残り3つは、内部空間(B)の対称性  
A+Bへ拡張  
量子論+一般相対論 融合  
=> **鍵が“SUSY”**
- 2) 重力だけムチャクチャ弱い 10<sup>-40</sup>



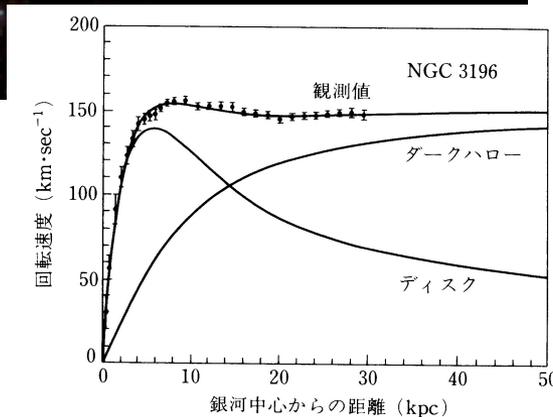
# (4) 暗黒物質の解明

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



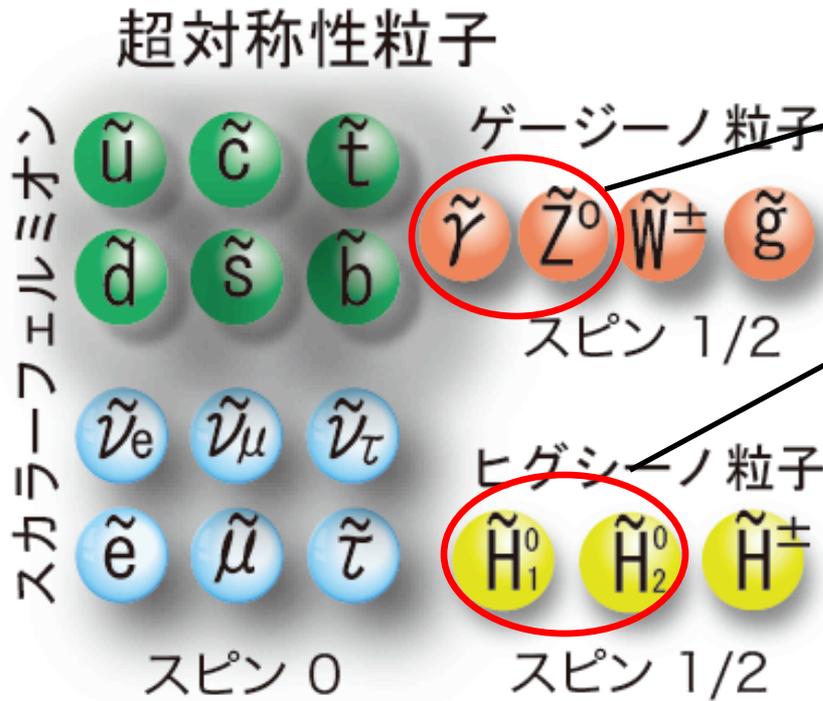
21.11cm波  
HのHFSで  
計っている



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(ビリアル定理、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)



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)

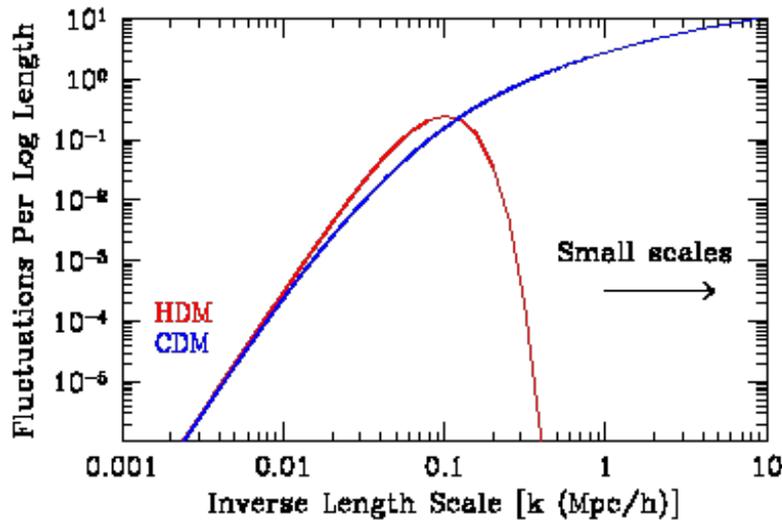
$$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$$

一番軽い状態は安定  
 質量 0(100-1000 GeV)  
 非相対論的でよい候補



$\tilde{G}$  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

# 冷たい暗黒物質



上の3つは重いので  
速度は遅い 光速の $10^{-3,4}$   
グラビティーノは  
軽いので光速になってしまう。  
広い領域を飛び交う 熱平衡  
銀河の種をつぶしてしまう

出来たエネルギー(温度)  $\sim$  質量 速度  $\beta \ll 1 \rightarrow$  Cold DM

出来たエネルギー(温度)  $\gg$  質量 速度  $\beta = 1 \rightarrow$  Hot DM

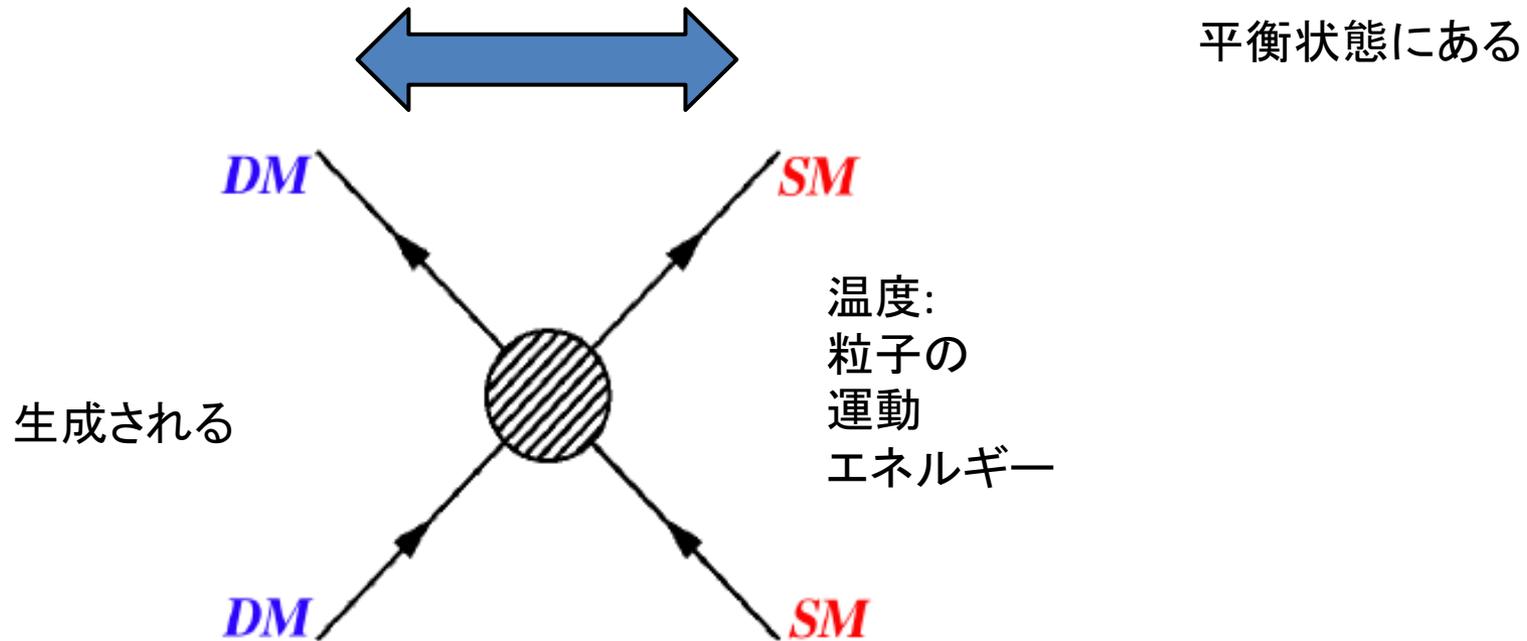
濃いとこと薄いところ  $\rightarrow$  これが銀河の種

光速で伝わるDMがいるとムラをならしてしまふ。銀河が出来なくなってしまう

$\beta = 10^{-3}$  程度 (WIMP “Massive” の理由で ニュートリノやGravitino  
がDMにならない理由)

# 暗黒物質と初期宇宙

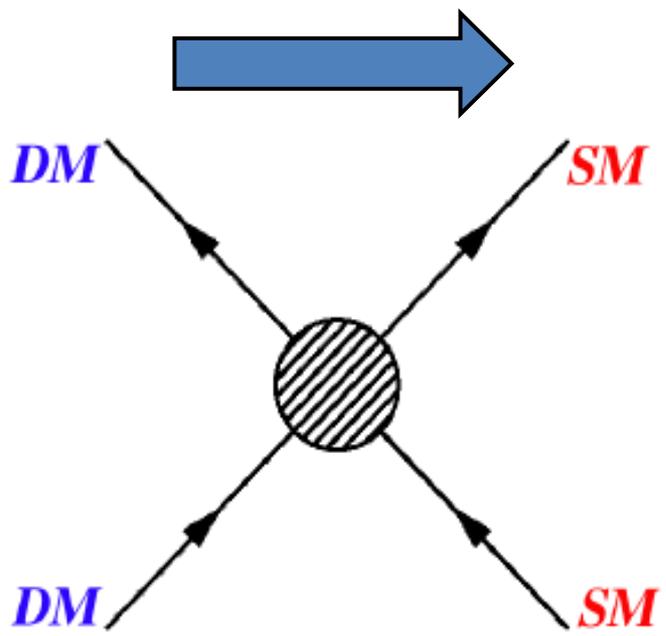
宇宙の温度  $T >$  暗黒物質の質量



# 暗黒物質と初期宇宙 2

宇宙の温度  $T <$  暗黒物質の質量

生成がとまり  
衝突で  
消えて  
なくなるだけ



宇宙に残っている  
割合

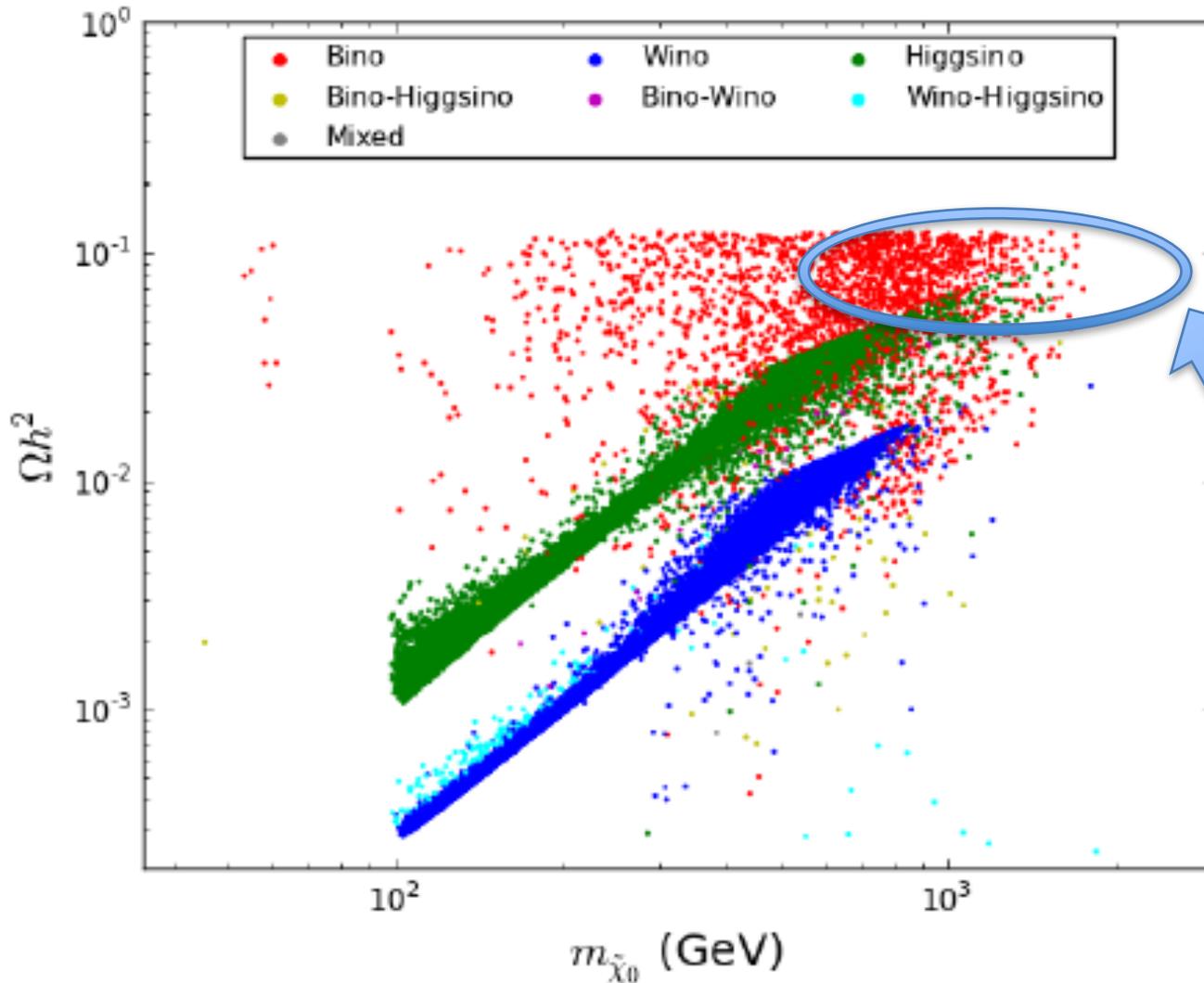
密度 × 質量

-----  
消えて無くなる反応

- 1) 重いと残りすぎ
- 2) 反応しやすいと消える

暗黒物質になる為には  $\Omega=0.2$ 程度：  
もっとゆるめると  $\Omega < 1$  (overcloseしない)

少なすぎていいけど、多すぎると駄目



1TeV くらい  
Higgsの  
10倍くらい  
の重さの  
超対称性

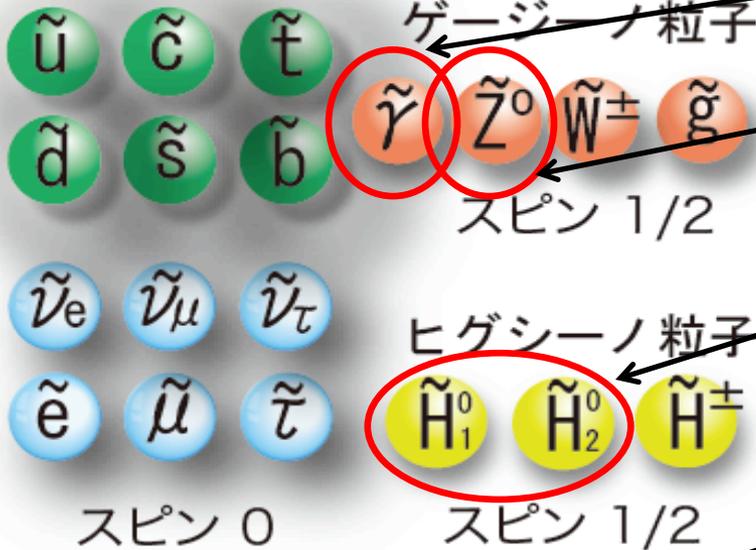
# ダークマター候補

残りすぎるとまずい  
だいたいの質量

現在

超対称性粒子

スカラーフェルミオン



重力伝搬  $M \sim 100 \text{ GeV}$  ~~X~~

アノマリー伝搬  $M \sim 1000-3000 \text{ GeV}$

何でもモデル+ヒグシーノが軽  
 $M \sim 500-1000 \text{ GeV}$

ゲージ伝搬  $M \sim eV$  ~~X~~

0.5- a few TeV  
重い暗黒物質がいい。



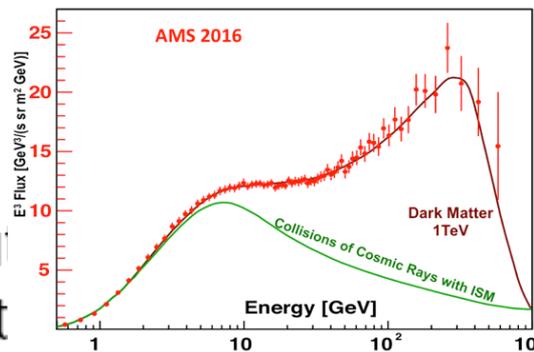
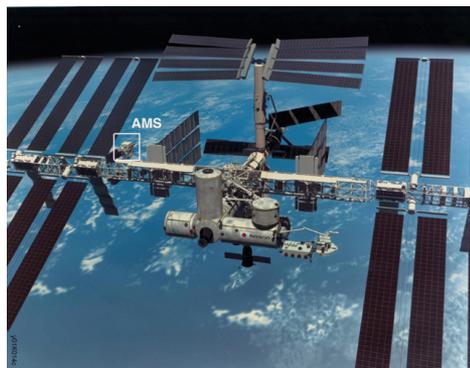
自然さだけがすこし  
不自然

Higgs 125GeV (相性いい)  
GUT 相性いい  
EDMやFCNが未発見

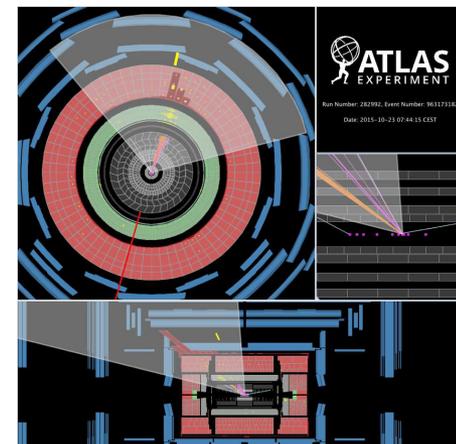
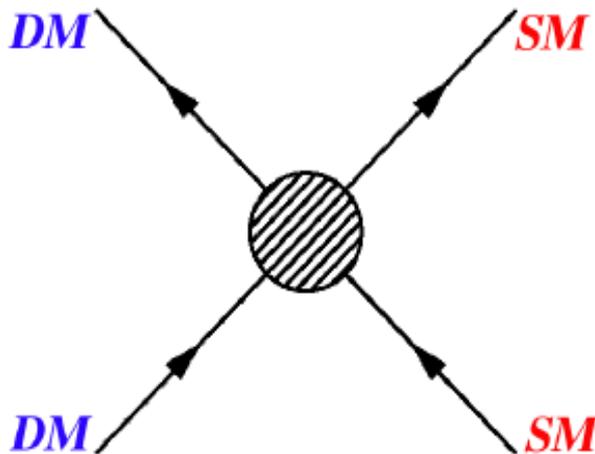
時間と空間  
自由に回転

# 暗黒物質を探す3つの方法

## XMASS-I



direct detection ↑



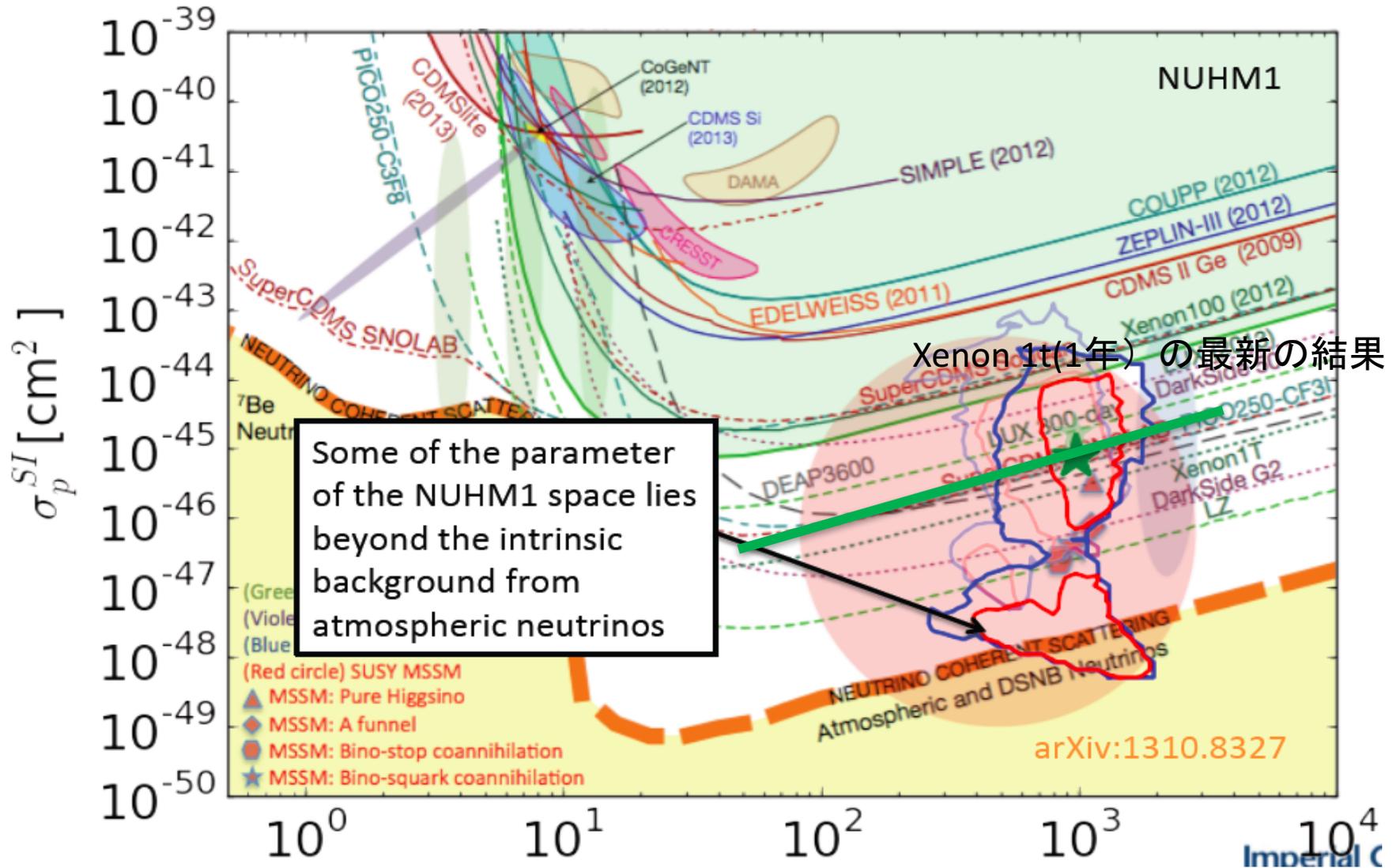
太陽系付近 0.3陽子/cc  
の暗黒物質

production at colliders ←

# 現在の状況

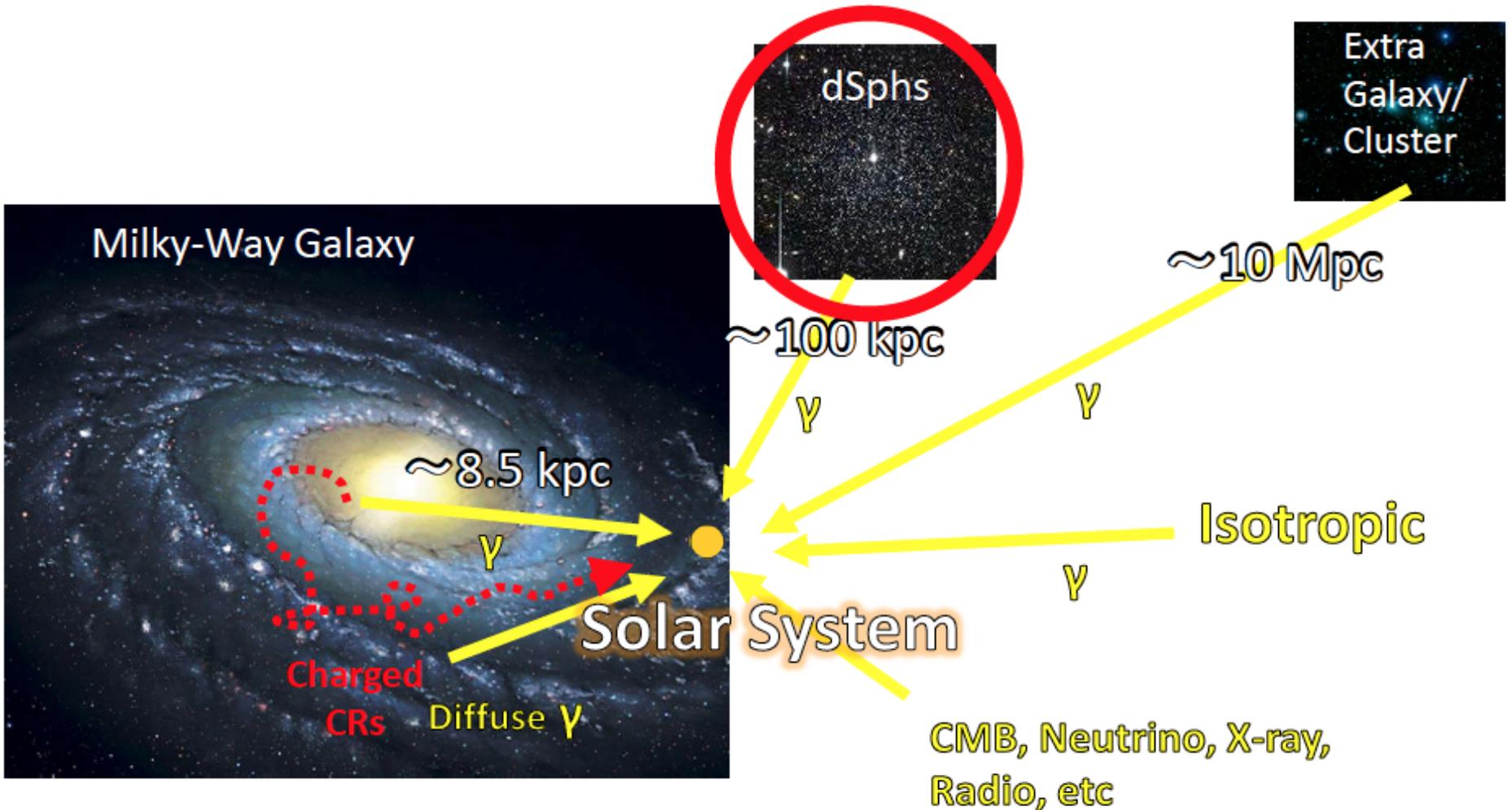
★: 今のLHCのいろいろな結果の  
Best fit  
赤 1σ 青 2σ

1TeV



# DM+DM → 普通の粒子

$$\text{反応レート} \sim \rho^2 \sigma \langle v \rangle dN/dE \text{ Br}(XX \rightarrow YY)$$



ガンマ線from銀河中心 or 電波 from 矮小銀河



# SUSY

# @





Higgs mass(125GeV)

No FCNC

$B_s \rightarrow \mu\mu$  is consistent with SM  
no EDM of electron/neutron



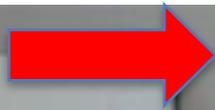
scalar mass

$m_0$

$\sim 10-100$  TeV

**Keep a faith,**  
But scalar is  
heavy

GUT  
DM



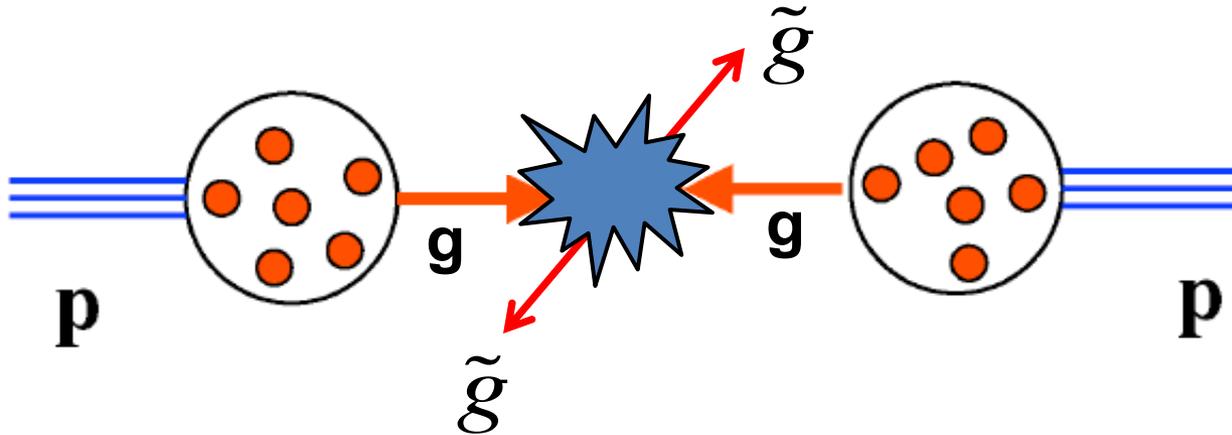
Still light!!

$m_{1/2}, \mu \sim 1-10$ TeV



SUSY is  
dead

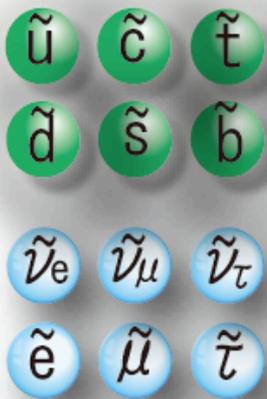
# LHCでの超対称性粒子の生成



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

スカラーフェルミオン



スピン 0

ゲージノ粒子



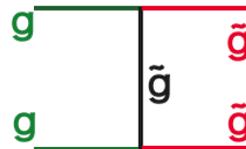
スピン 1/2

ヒグシーノ粒子

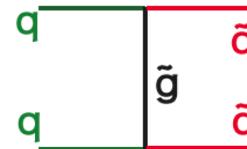


スピン 1/2

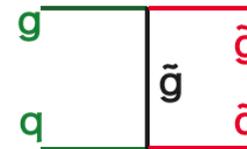
$g\bar{g}$  prod.



$q\bar{q}$  prod.



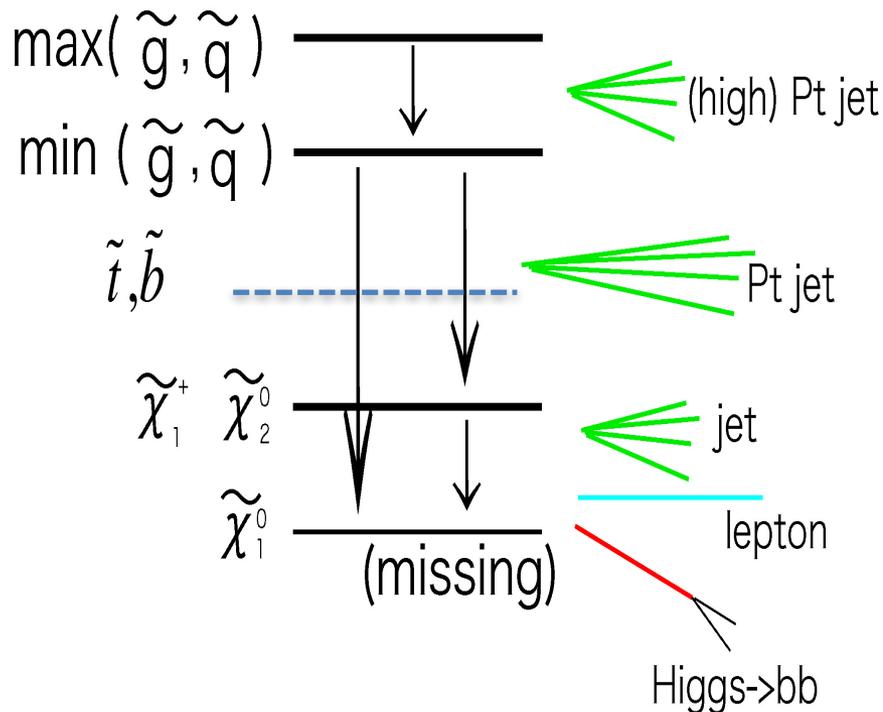
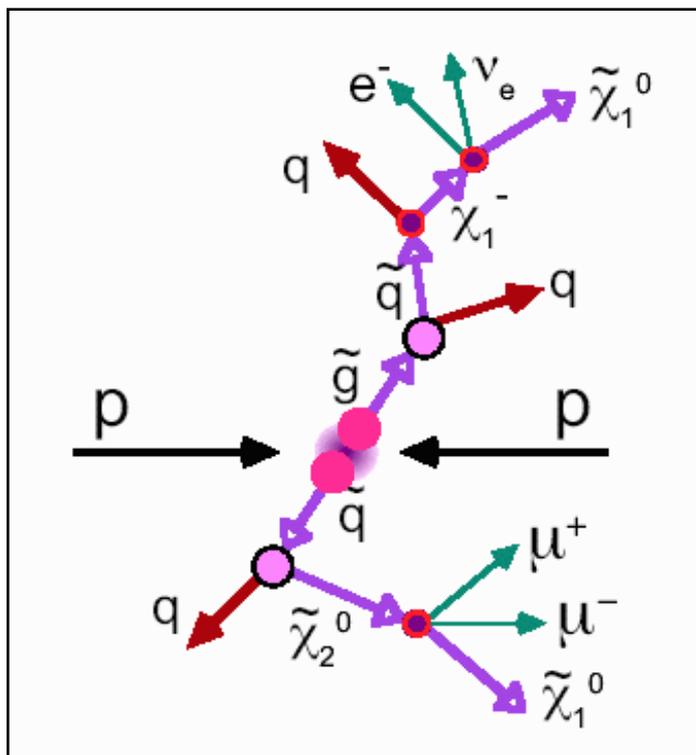
$q\bar{q}$  prod.



ペアーで出来る

# 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（多段崩壊: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  
LHCはDark Matter 工場(factory)



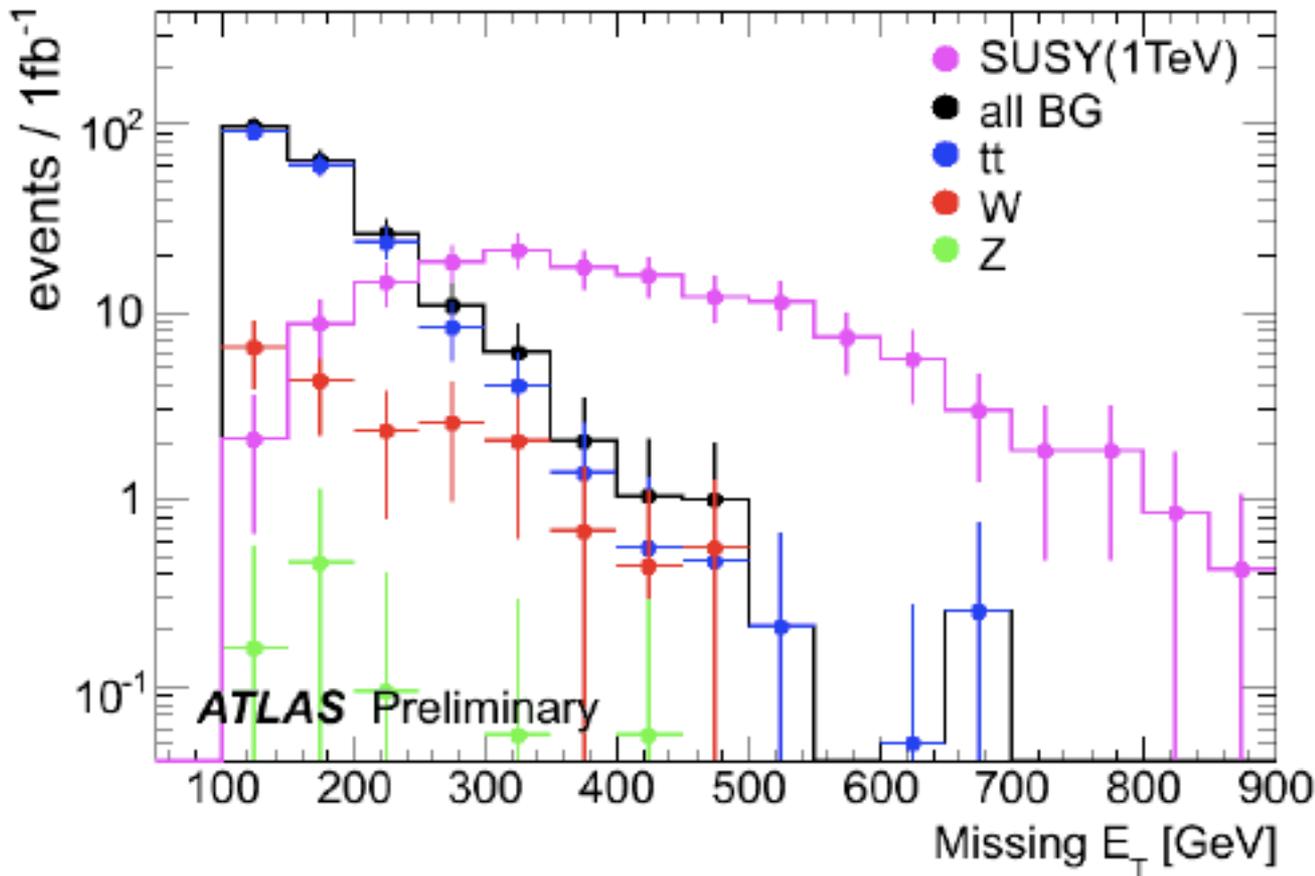
# アンバランスさのはかり方

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

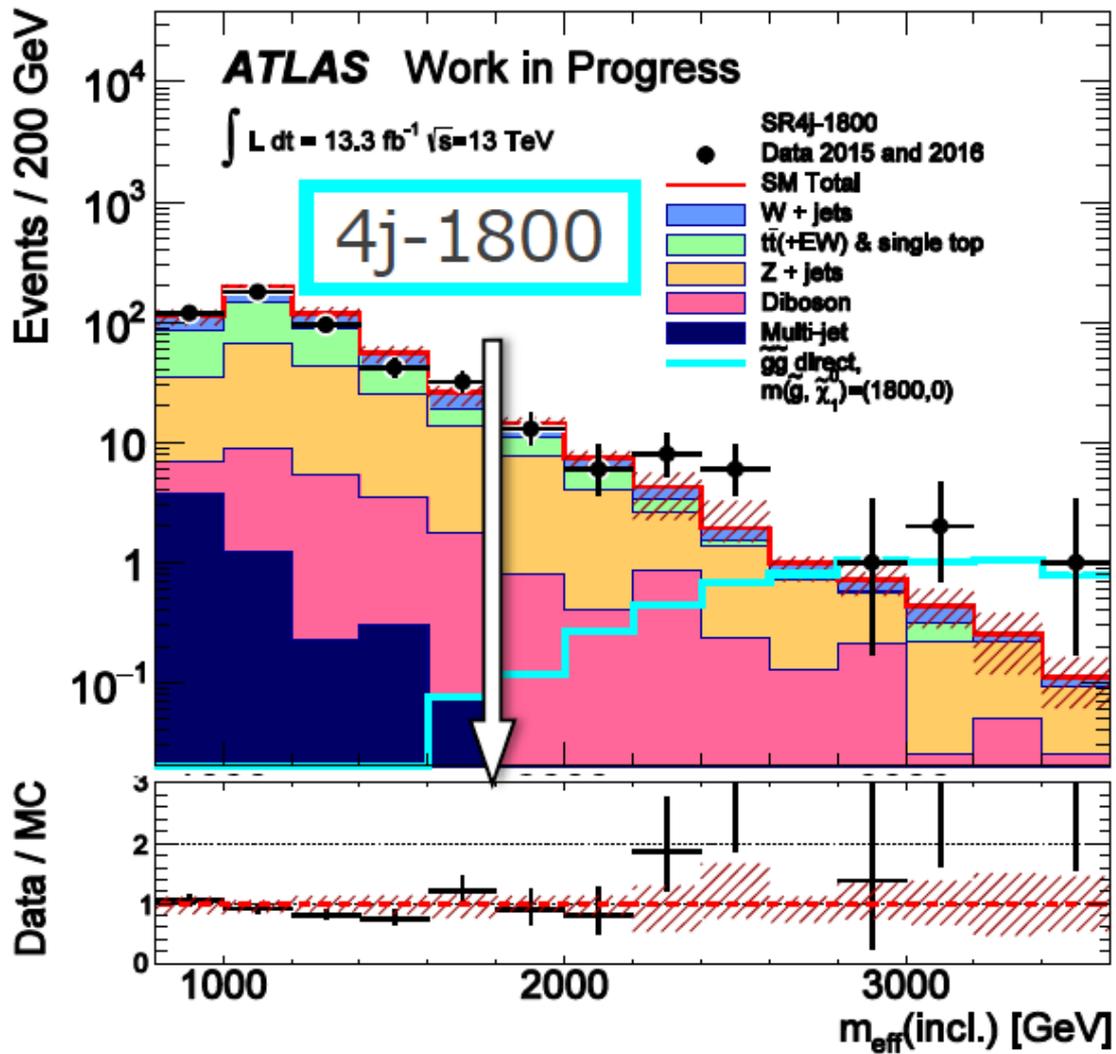
$$\sum \vec{P}_T = \vec{0}$$

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



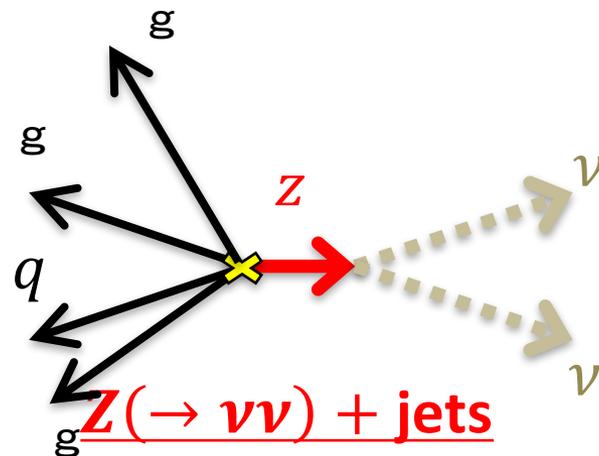
ここら辺が  
今後  
増えていくか  
どうかは鍵

ジェットの運動量 + 消失エネルギーの和

超対称性信号は大きな値になる。

主なバックグラウンド

Z( $\rightarrow$ vv) + ジェット や W( $\rightarrow$ lv) + ジェット



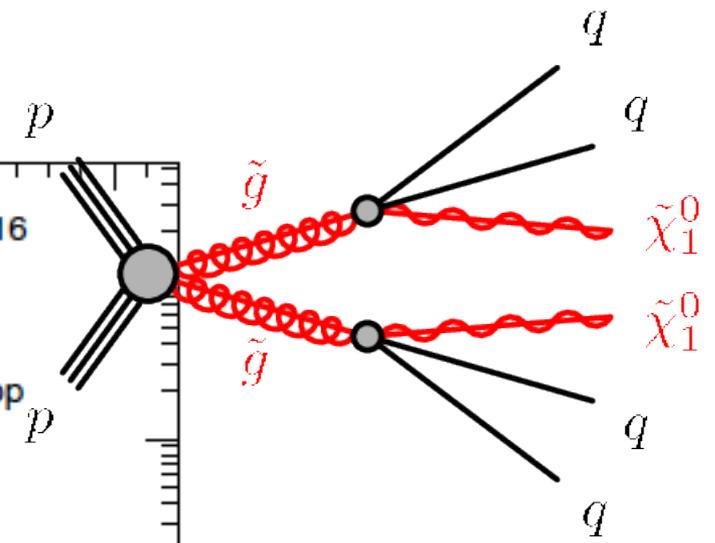
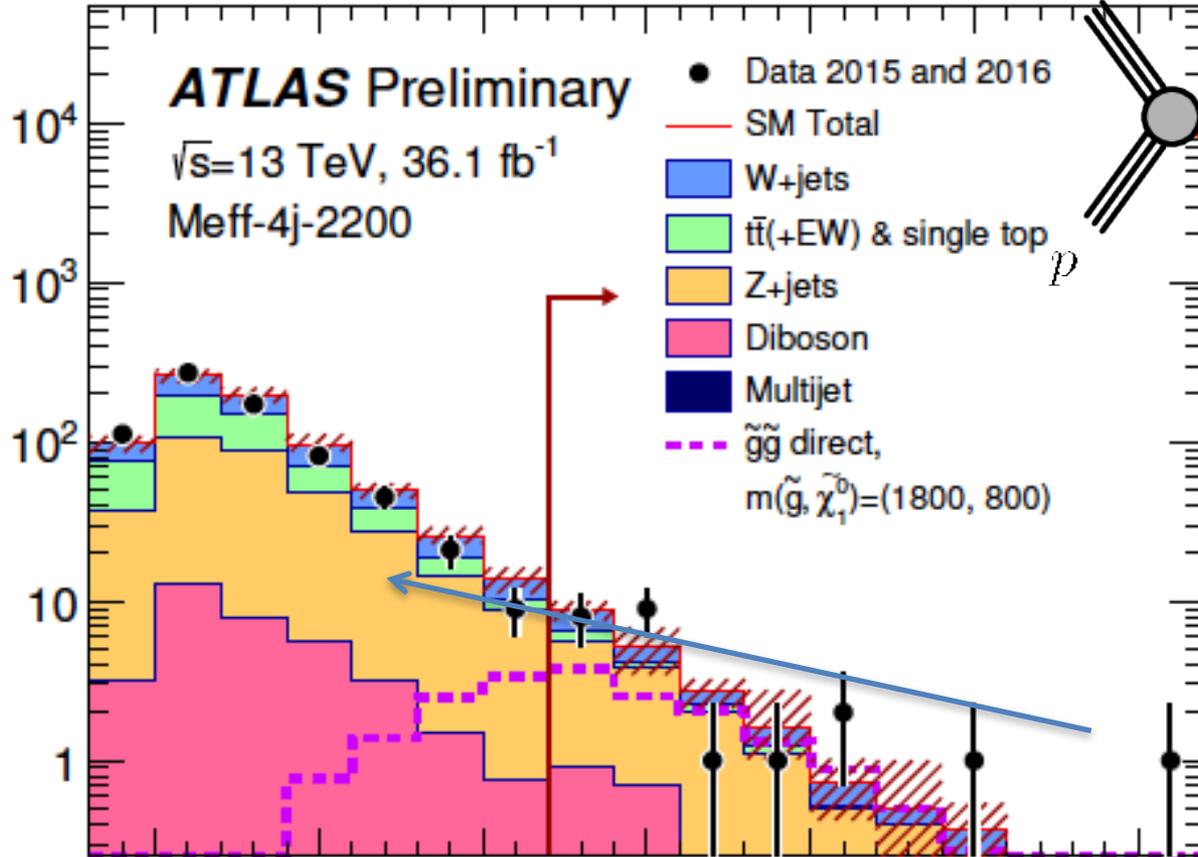
Events / 200 GeV

**ATLAS Preliminary**

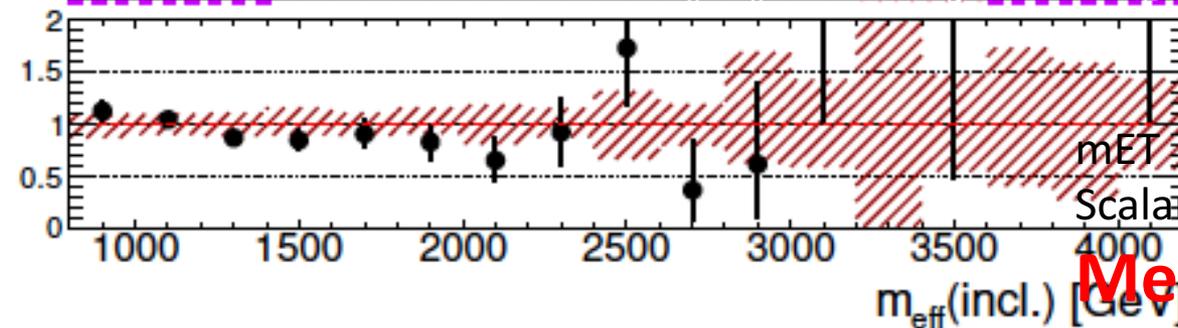
$\sqrt{s}=13$  TeV,  $36.1$  fb $^{-1}$

$M_{eff}$ -4j-2200

- Data 2015 and 2016
- SM Total
- W+jets
- $t\bar{t}$ (+EW) & single top
- Z+jets
- Diboson
- Multijet
- - -  $\tilde{g}\tilde{g}$  direct,  $m(\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0)=(1800, 800)$



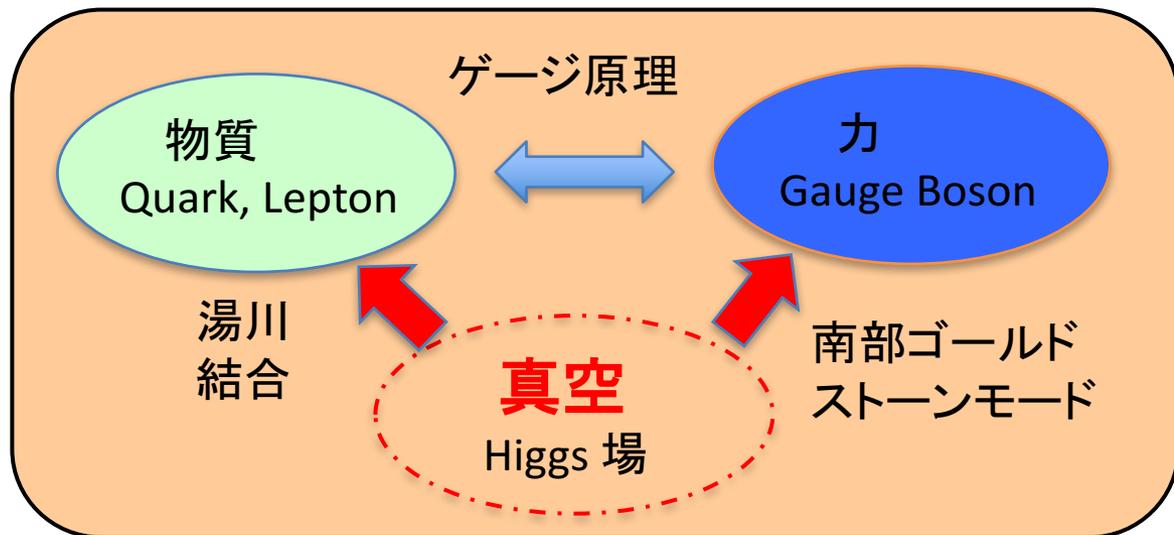
Data / MC



標準理論のバックグラウンド  
ニュートリノを含むもの

$$M_{eff} = m_{ET} + \sum P_T(\text{jet})$$

# 何故このパスなのか？ global viewがある



時空と素粒子  
の関係をつける  
唯一の対称性  
SUSY

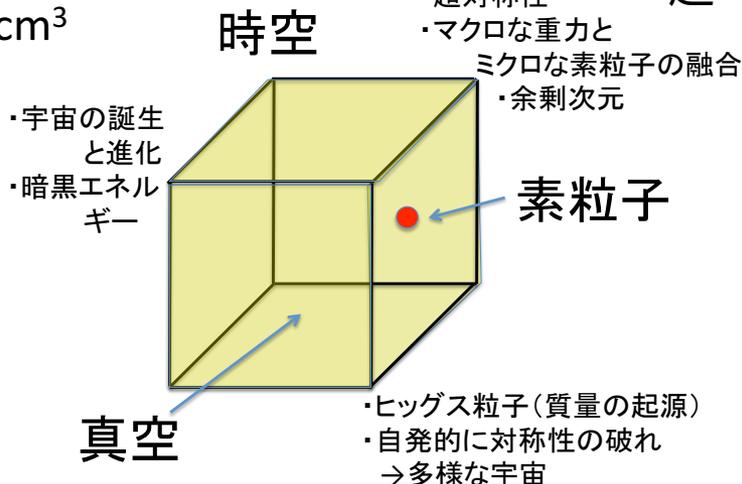
超ひも理論  
すべての理論は  
"超"

ヒッグス場  $10^{50}$ 個 水素原子相当 /cm<sup>3</sup>

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$\Lambda$ の観測値(60桁)ちがう

一般相対性理論と量子論の融合



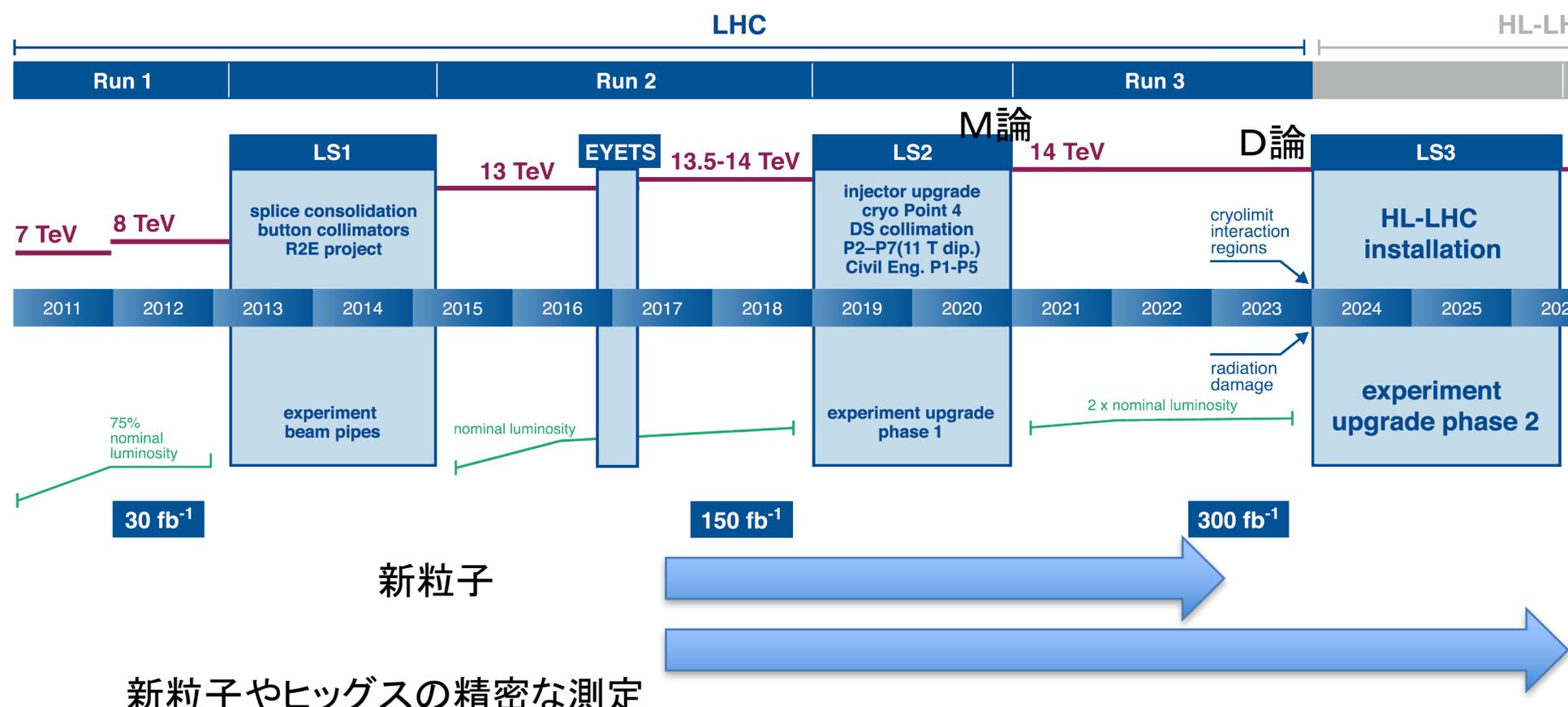
→ SUSY 探索@LHC ・ 重いDM探索 ・ ミクロな重力研究

# LHC Perspective

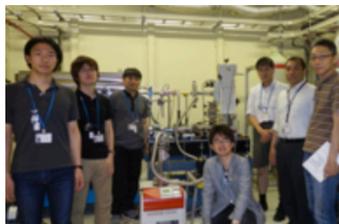
2017,18 13.5-14TeV  
L~30-50 fb<sup>-1</sup> /year

Today

## LHC / HL-LHC Plan



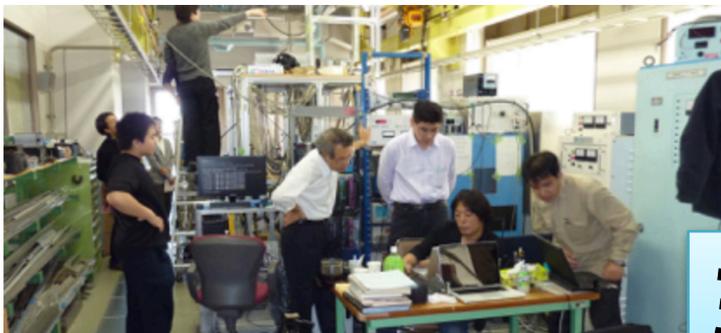
# Tabletop Experiments



テーブルトップサイズの小規模実験で、標準理論を超えた物理現象を探索します。

計画の立案から検出器のデザイン、測定、解析に至るまでを一貫して行い、新しい結果を学術誌に発表していきます。

真空・時空を  
LHC以外で探ろう  
とやっています



## ミクロな重力研究

小規模実験で探る標準理論を超えた物理の探索

[English page](#)

2018年度大学院入学ガイダンス資料

浅井研資料 (LHC+Tabletop)、Tabletop実験資料

宣伝パンフレット [ポジトロニウムを用いた素粒子物理学実験](#)  
[光を用いた素粒子物理学実験](#)

祝・総長賞



おまけ

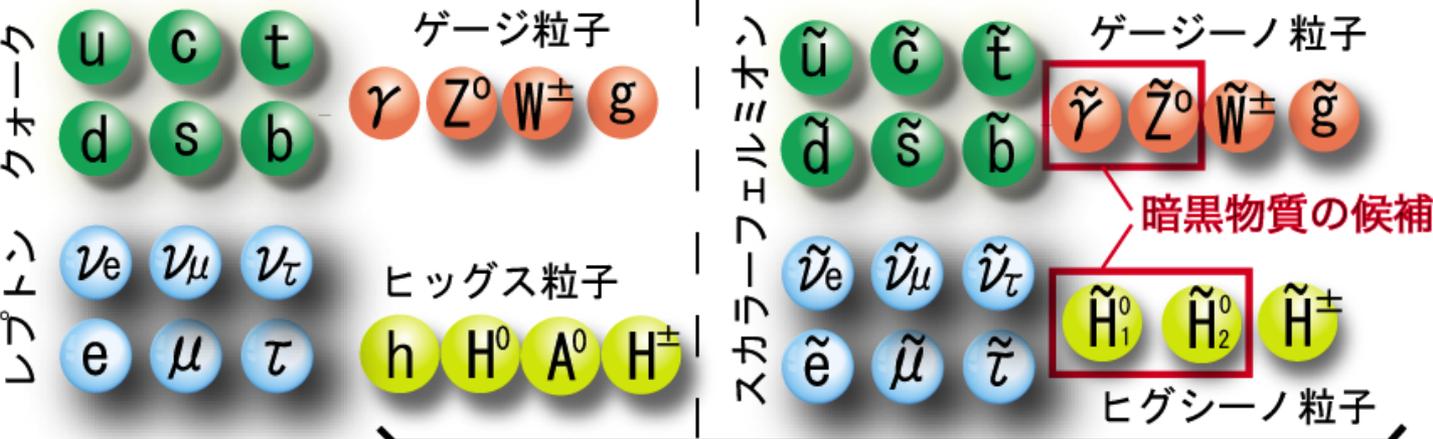
# SUSY: 超対称性粒子のテーブル

Ordinary Particles		SUSY Particles	
S=1/2	charged lepton: e, $\mu$ , $\tau$ neutrino: $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ quark: u, c, t d, s, b	<b>S=0</b>	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: $\gamma$ ( $B^0$ and $W^0$ ) Weak Boson: $W^\pm, Z$ gluon: g	<b>S=1/2</b>	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	<b>S=1/2</b>	Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$ 8 DOF = 4 Majorana fermion
S=2	Graviton: G	<b>S=3/2</b>	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- $\rightarrow$ 2 マヨラナ)  
  
 Gauge Boson 2DOF  
 = Majorana Fermion  
  
 2 Higgs doublet ( $b^a$ ) ( $d^c$ )  
 8 DOF 3DOF  
 $\rightarrow$  W/Z mass 5Higgs

## 通常の素粒子

## 超対称性粒子

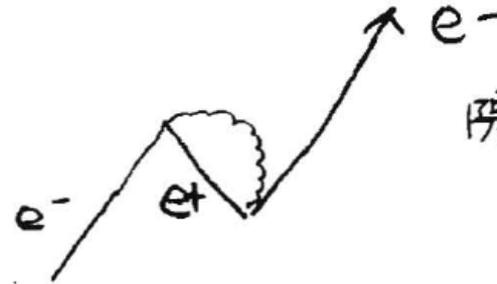
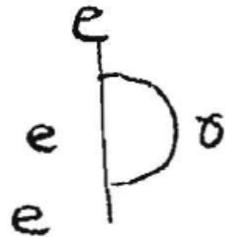


ヒッグス、超対称性粒子は未発見

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。

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

$\frac{1 \text{ fm}}{\quad}$  原子核の大きさ程度



陽電子・電子の  
量子効果

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。

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

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。大事なものは対称性！！

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  $2\pi/m$

$\pi$ を気にせず 同じとすると

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

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: 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  $v=246 GeV$

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)

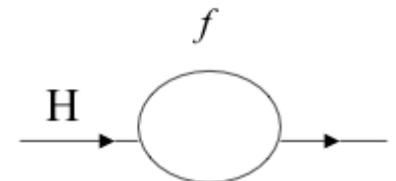
階層性問題は**二つの問題である**

(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、

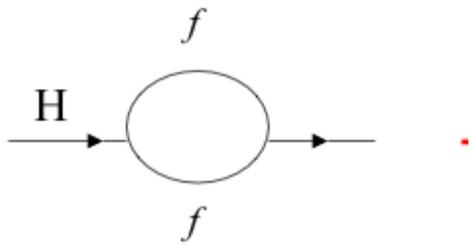
ヒッグスの質量はすぐに不安定になる。

(発散を含む図形が多数存在)



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

はじめに話したのは(2)



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

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

---


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

30桁以上の調整が必要  
Fine tuning!!!!

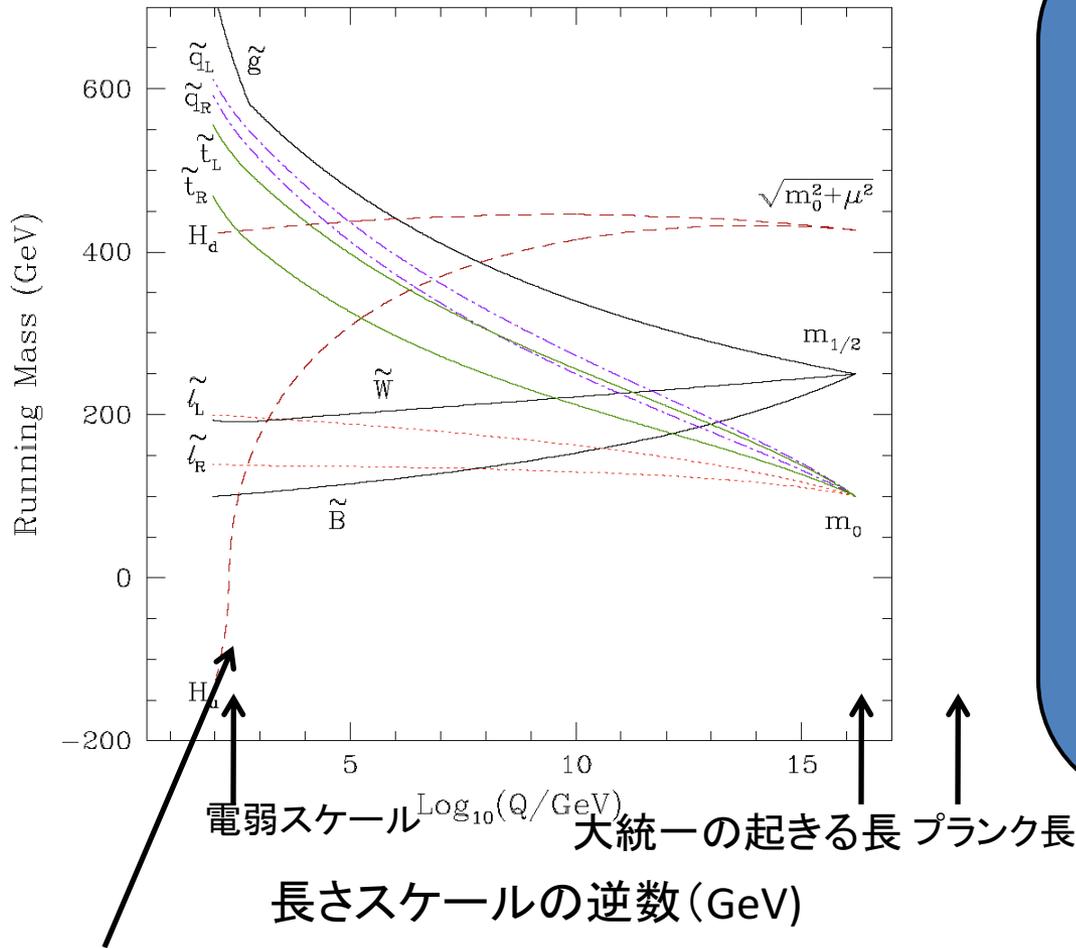
**不自然だ！！**

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:



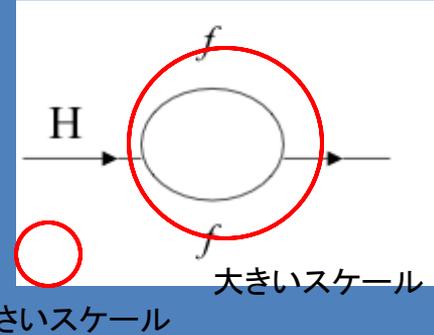
統計性の違う粒子を入れる対称性で**発散を消す。(階層問題(2)を解決)**  
(spin 1/2 のループは必ずマイナスになるのは、720度回転対称)

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)**



## 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

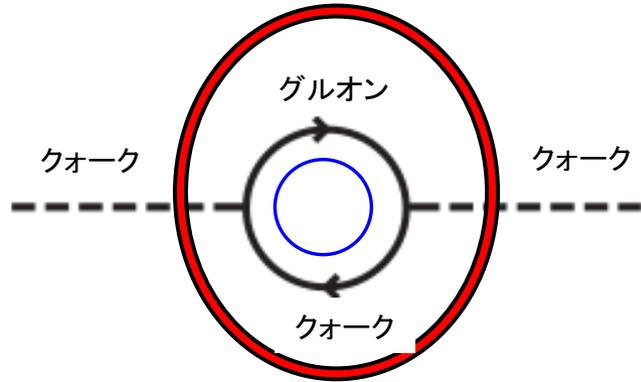
トップクォークの質量が重い(ヒッグス粒子との結合定数 $\sim 1$ )と言う性質を使うと、ヒッグス場の質量 $^2$ が電弱スケール( $10^{-17}\text{m}$ )で負になり、自発的に対称性をやぶり、 $-(246\text{GeV})^2$ を作りだすことができる。

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(1)も出てくる 一度に二つの階層性問題を同時に解決

# 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(次頁)

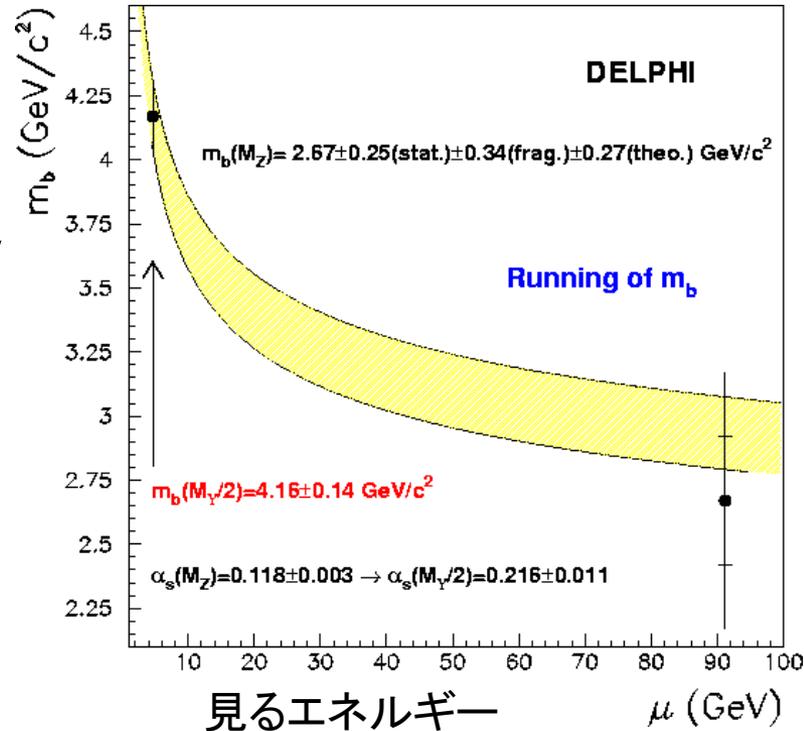


高いエネルギーで観測(青い○)  
 この円より小さい領域の量子効果だけ  
 例えば、絵の量子効果は含まれない。  
 低いエネルギーで観測(赤い○)  
 絵の量子効果は含まれる

実験データ

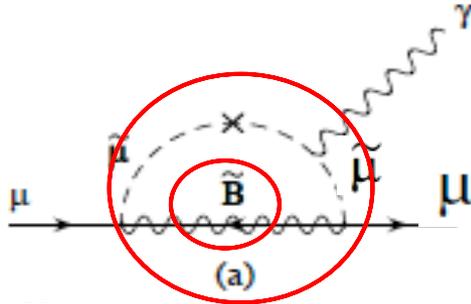


ボトムの  
質量



# 結合定数は定数でない: 量子的な効果で変化する

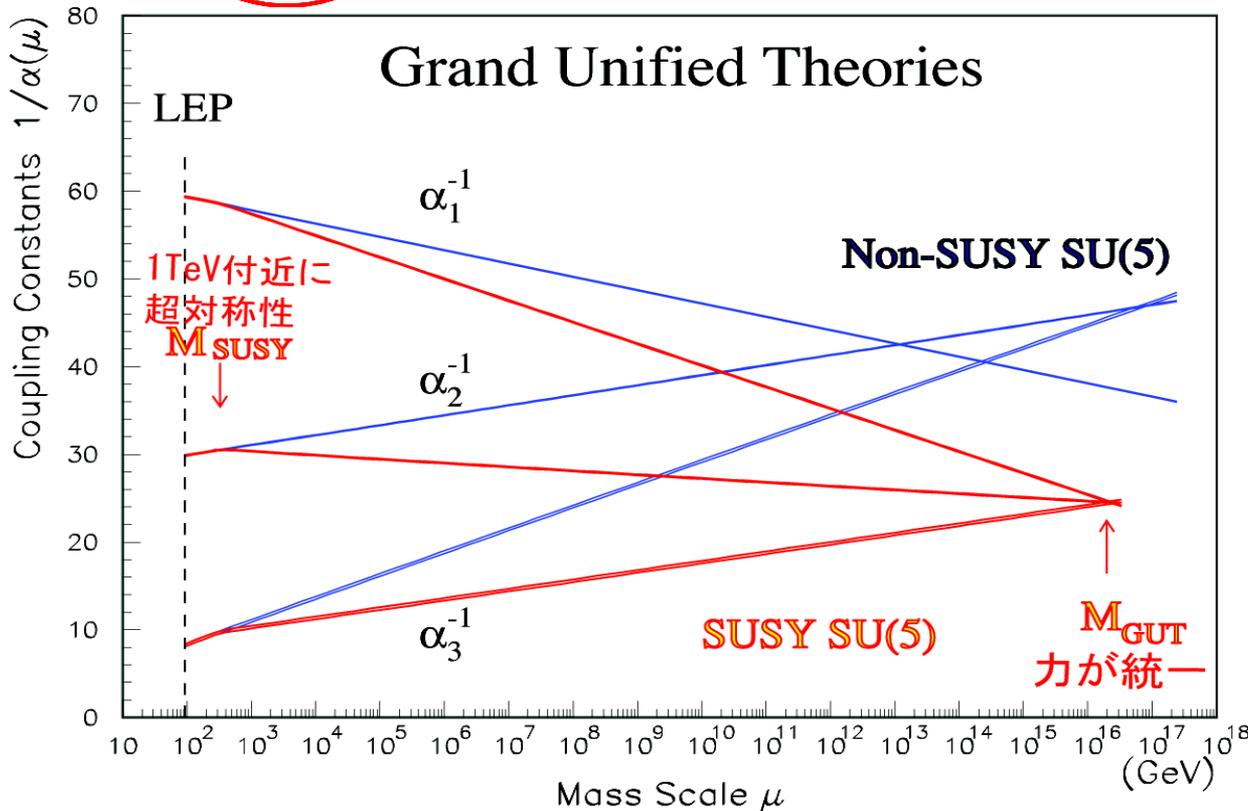
Mass scale  $\mu \sim 1/R$ (見るスケール)



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)**

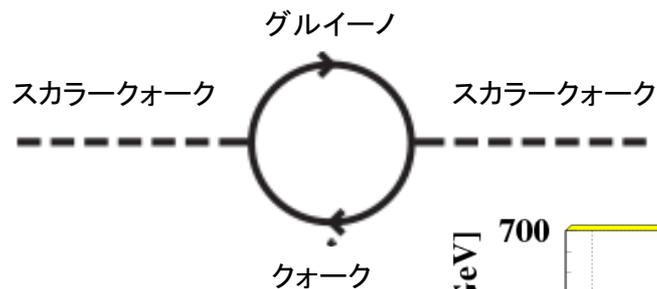


# 4. 強い力(カラー)は太る

RBG



重い:強い



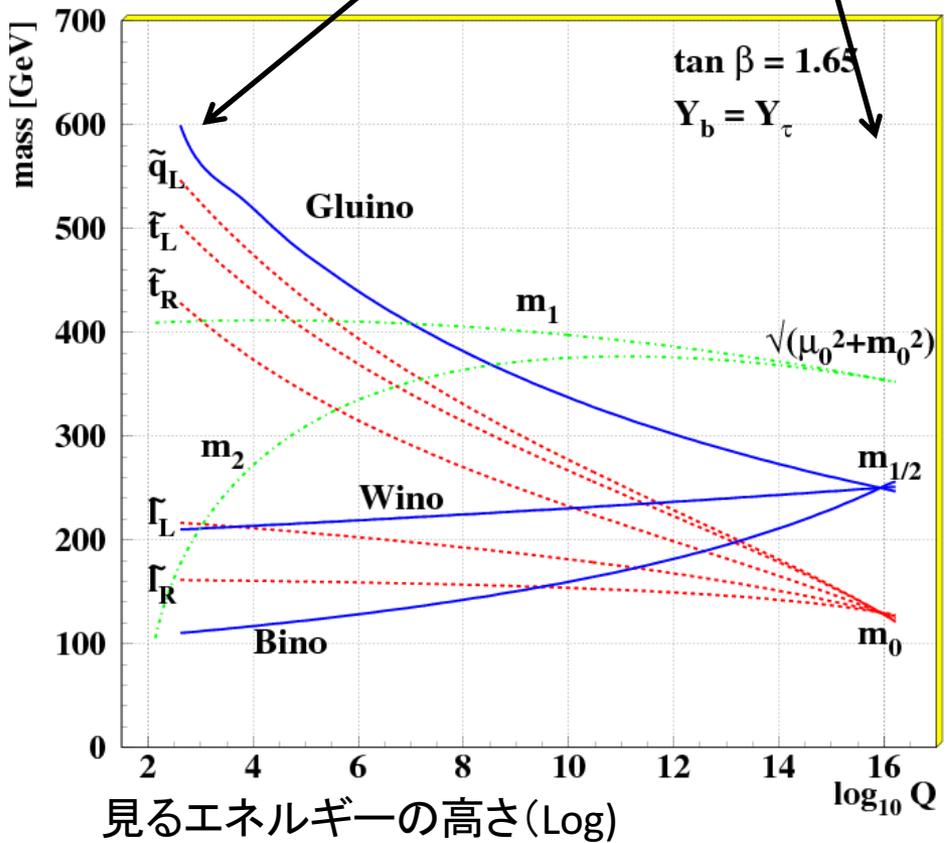
LHCの  
エネルギー

大統一  
のエネルギー



スカラークォーク  
グルイーノ

質量

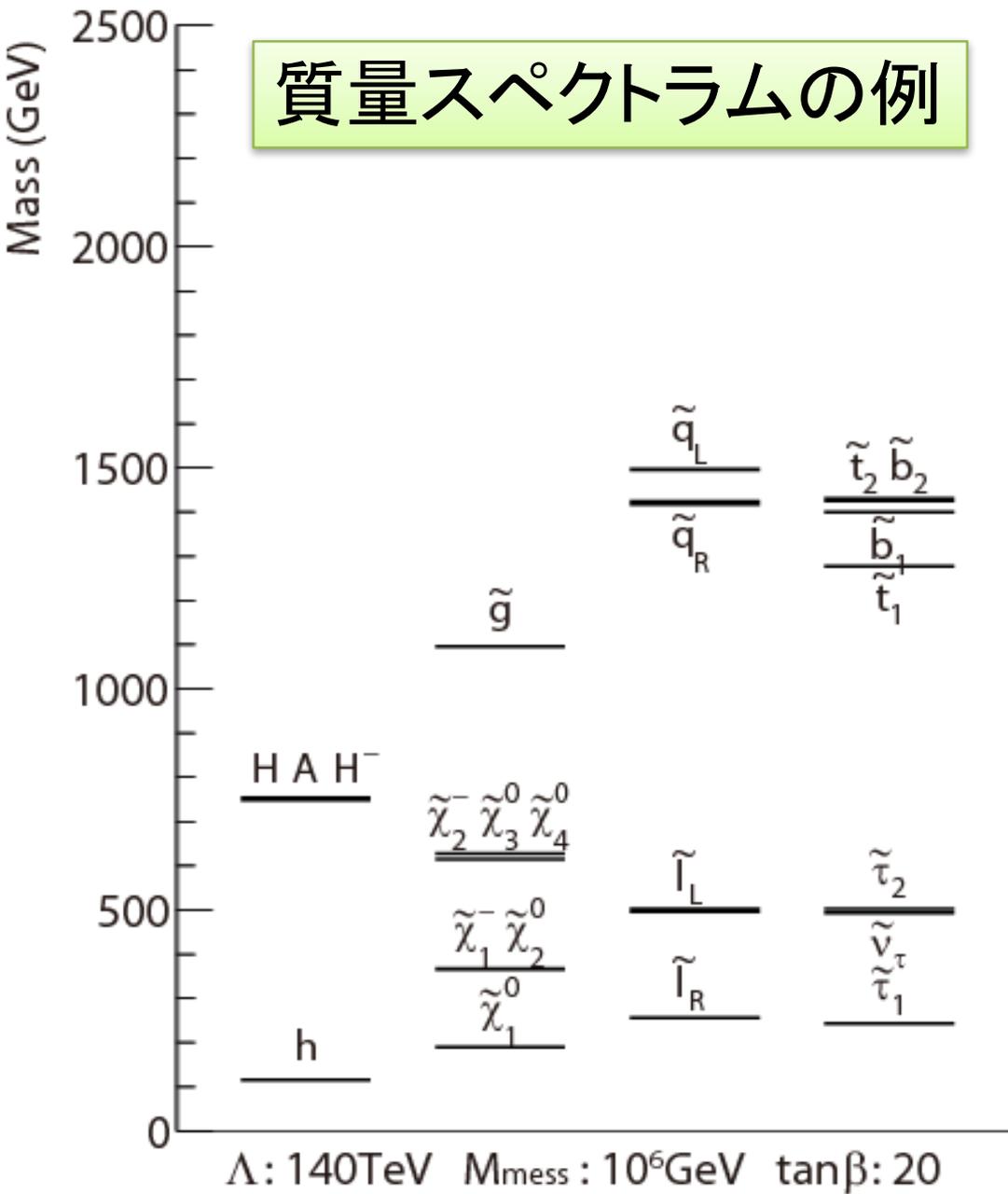


スカラー  
レプトン

ウィーノ  
ビーノ

どのくらい  
太るか？  
モデルによる

# 質量スペクトラムの例



スカラー クォーク

グルイーノ

色あり  
強い力



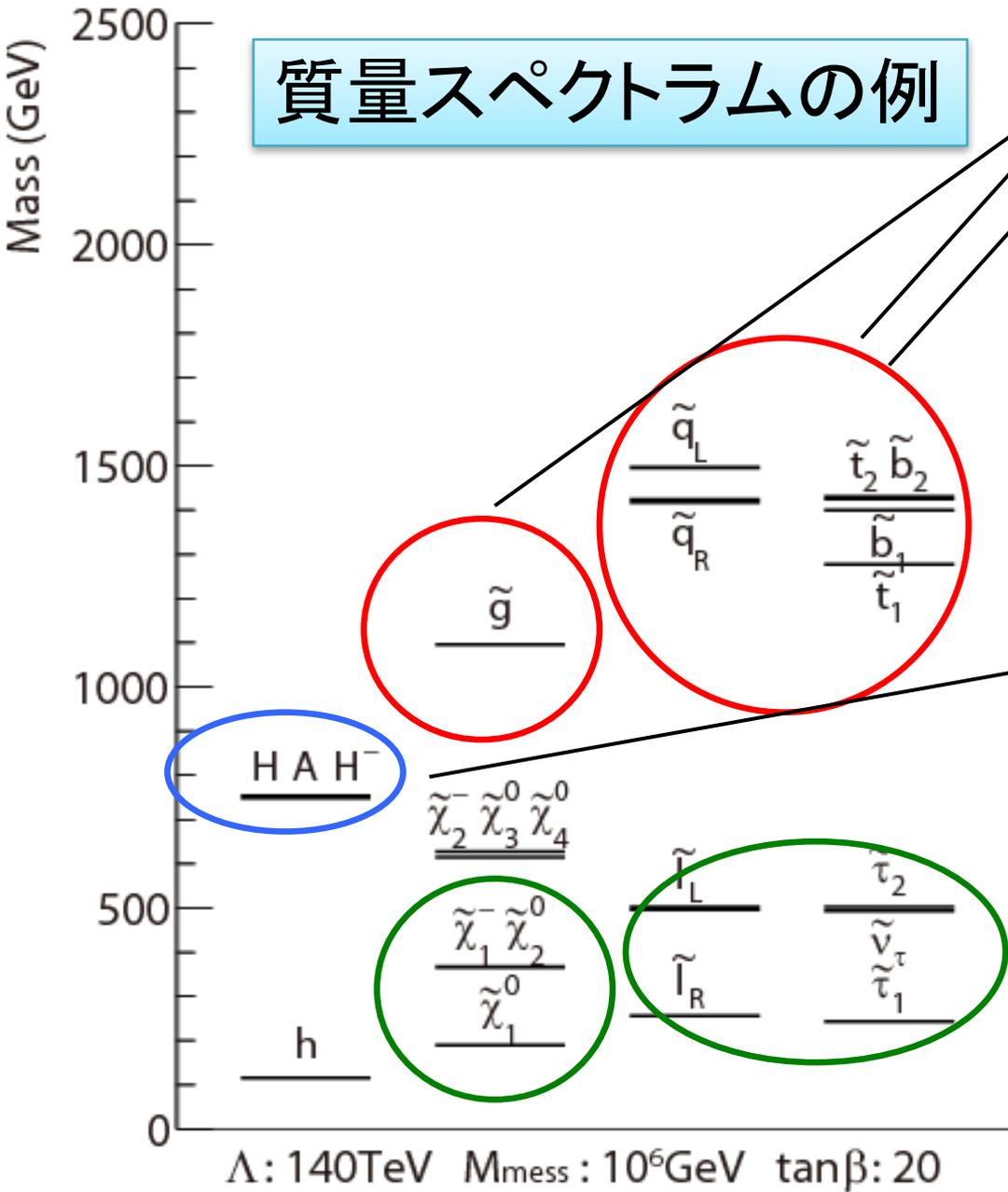
スカラー レプトン

チャージーノ  
ニュートラリーノ

色無し  
電弱力



# 質量スペクトラムの例



スカラー クォーク 1-10TeV  
 グルイーノ は 重い

- 1) どちらが重いかは 自由
- 2) 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 1TeV-10TeV?

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)

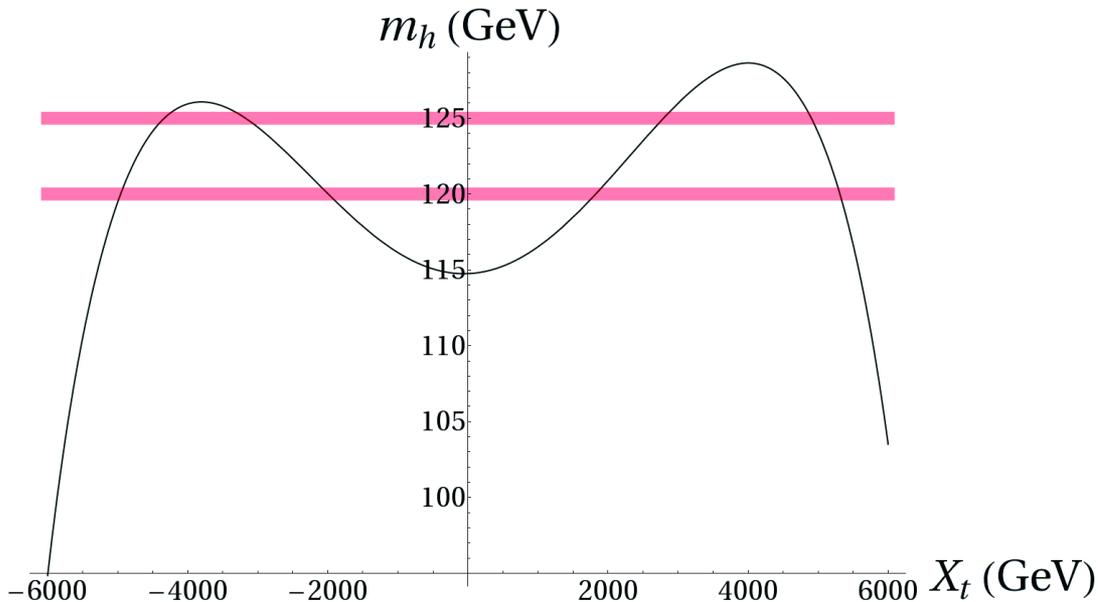
# Impact of Higgs Mass to SUSY mass scale (1)

MSSM

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta$$

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

$M_S = v(\text{stop}_1 \cdot \text{stop}_2)$  if  $M_S = m_t$  cancel out  
 At determine mixing  $\text{stop}_R$  and  $\text{stop}_L$



- 1) Higgs mass is Not free parameter in SUSY model  
 Basically lighter than 91GeV
- 2) It becomes heavy due to Radiative correction  
 (Stop loop vs top loop)  
 Top mass / Stop mass
- 3) stop – stop – Higgs  
 Tri-linear coupling  $A_t$   
 $A_t \sim \sqrt{6} M_S$

## 3 Possibilities

- 1) Heavy scalar mass
- 2) Full mixing  
 (disfavor by EDM)
- 3) NMSSM  
 (Additional singlet)

# Impact of Higgs Mass to SUSY mass scale (2)

Heavy Scalar scenario:

Higgs mass strongly depends on Higgsino mass, and  $\tan\beta$

Heavy Higgs means heavy stop

squark mass= 10—100 TeV

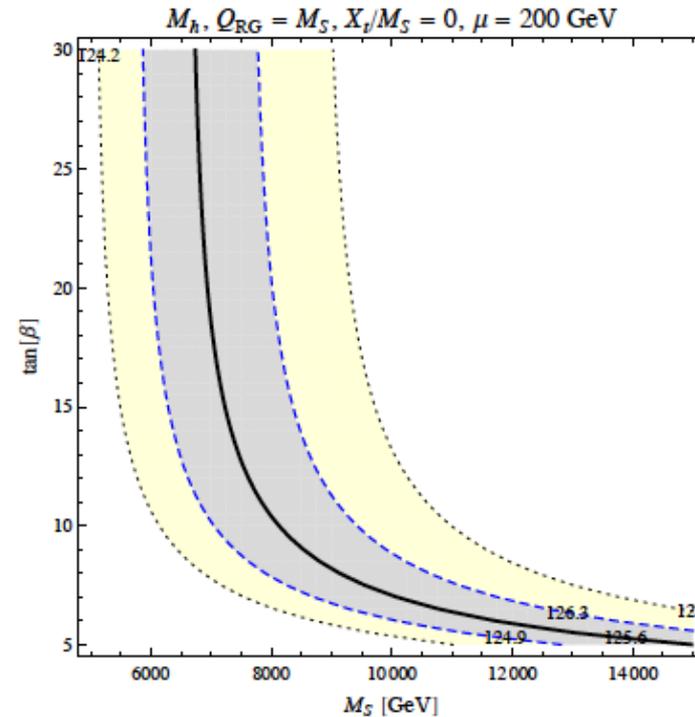
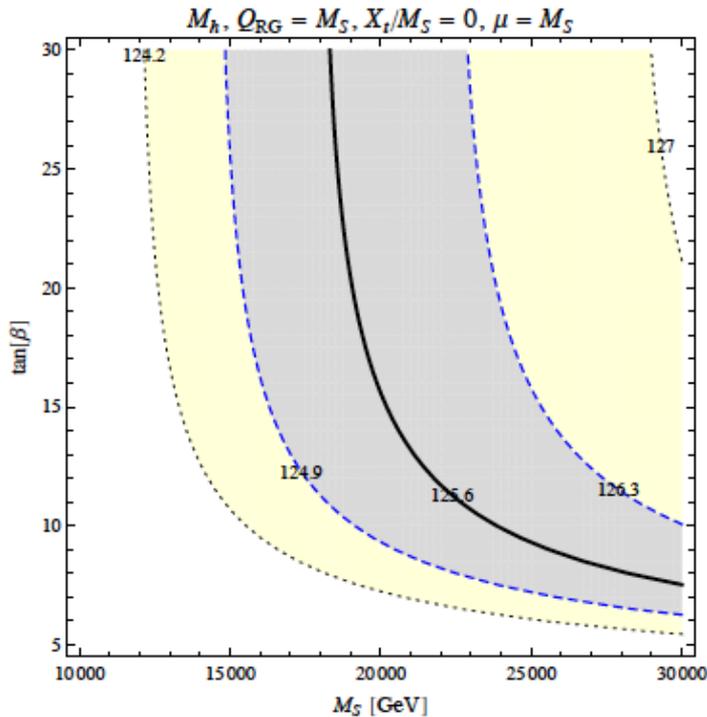
Higgsino is heavy

MSSM

$$m_h^2 \simeq m_Z^2 \cos^2 2\beta$$

$$+ \frac{3m_t^4}{4\pi^2 v^2} \left[ \log \left( \frac{M_S^2}{m_t^2} \right) \right]$$

Higgsino is light



squark mass vs  $\tan\beta$       Gray band shows Higgs mass=125.6 +/- 0.7 GeV  
 Now mass 125.1 GeV so close to lower dotted line.

From P. Draper et al.  
 eprint 1312.5743

- Light SUSY scenario ( $< 1\text{TeV}$ ) is disfavored by direct searches
- $125.1\text{GeV}$  Higgs mass suggests Heavy scalar mass ( $10\text{-}100\text{ TeV}$ ) in Minimum SUSY model
- no EDM is also found, it means also heavy scalar mass.
- Also no new physics was found in FCNC (flavor physics)

信仰の理由 2)-4) について考え直す

理由 4 Dark Matter (~~Bino  $\sim 100\text{GeV}$  / Wino  $\sim 1\text{TeV}$  / Higgsino mass  $\sim O(100\text{-}1000\text{GeV})$  )~~

Direct search at LHC excludes the Bino DM scenario.

理由 2 ~~Naturalness of Higgs mass (within 1% tuning)~~

~~Cancel to diverge Higgs mass (Scalar quark mass, stop mass  $<$  a few TeV)~~

Both Higgs mass and null result of EDM, FCNC suggest heavy scalar mass upto  $10\text{-}100\text{TeV}$  (Higgs Boson mass tuning is  $10^{-5}$ )

理由 3 Unify three Forces (Gaugino  $\sim 1\text{-}10\text{TeV}$  )

# Heavy Scalar mass is also suggested by null result of EDM

EDM is an alternative approaches to explore SUSY particles:  
**Assuming maximal CP violation** in SUSY sfermion section;

CP phase  $\phi$  is in L-R mixing(Higgs)  $\mu=|\mu|\exp(i\phi)$   
 and A(Tri-linear) term  $A_f=|A_f|\exp(i\phi)$  (Full mixing enhance EDM)

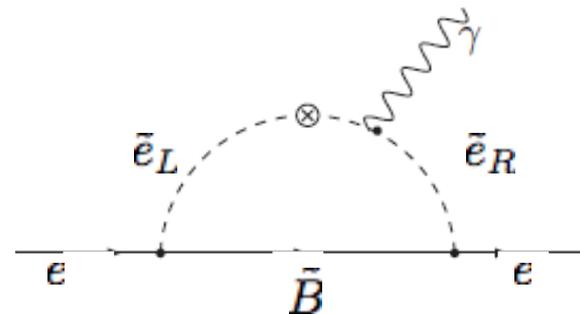
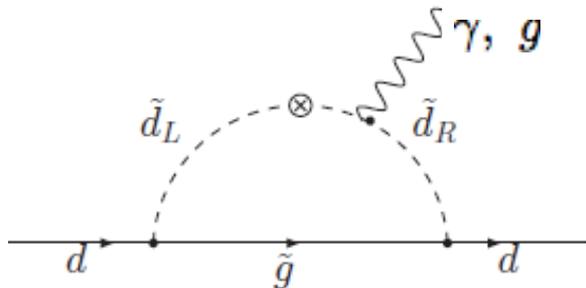
No reason why  $\phi=0 \sim O(1)$  parameter  $\rightarrow$  SUSY has many CP violated term.  
 If  $\phi=0$  (Min. CP violation) then, SM CP violated phase will contribute.

Very roughly

$$d_e \sim 3 \cdot 10^{-27} \sin\phi \text{ (Ms)}^{-2} \tan\beta$$

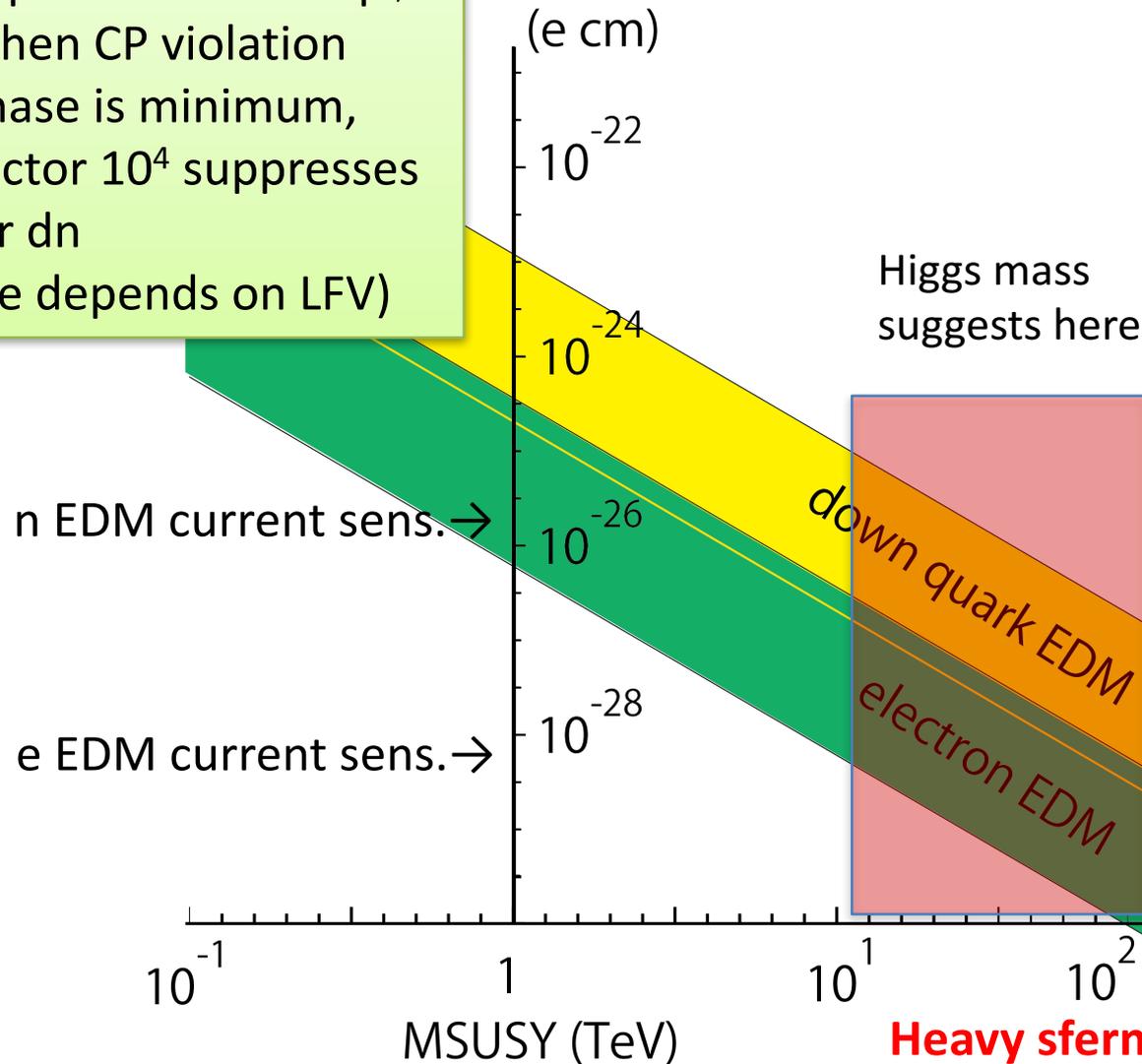
$$d_n \sim 3 \cdot 10^{-26} \sin\phi \text{ (Ms)}^{-2} \tan\beta$$

Suppressed by scalar mass<sup>2</sup>  
 enhanced by  $\tan\beta$  for down type



Maximum CP violation is assumed  
 Band width shows the dependence of  $\tan\beta$ ;  
 When CP violation phase is minimum,  
 Factor  $10^4$  suppresses for  $d_n$   
 ( $d_e$  depends on LFV)

$10^{-30}$  for eEDM  
 $10^{-28}$  for nEDM  
 Promising to hunt SUSY signal



Half part of region is already excluded.  
 But need some margin for unknown mixing

← Prediction? (n EDM)

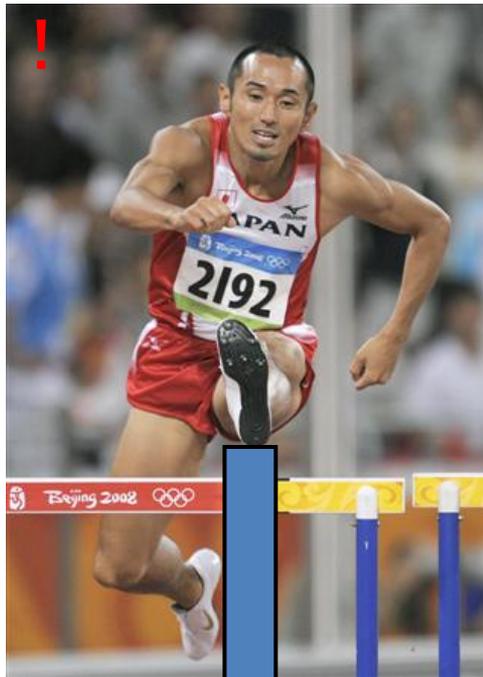
← Prediction? (e EDM)

# 3つ目のトピックス：余剰次元

4つの力のうち、重力が弱すぎる。他の力と比較して $10^{-40}$

?

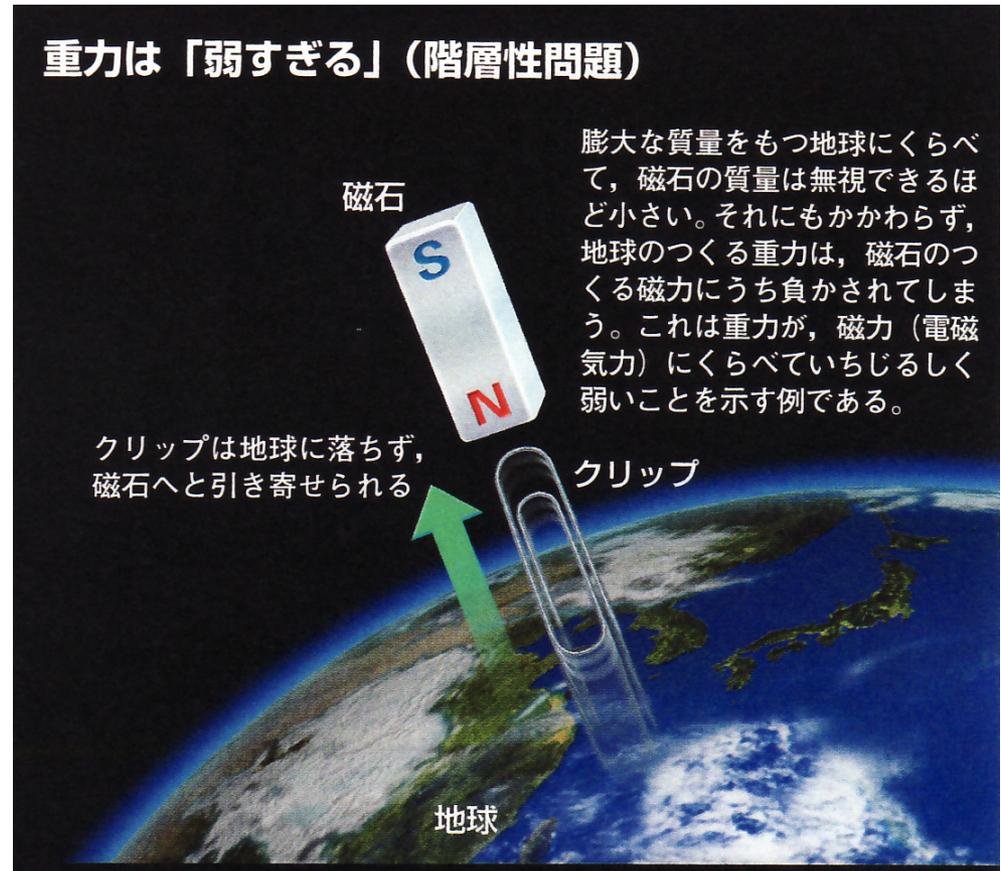
!



重力を感じる

相手が地球だから感じる  
地球の重さ $6 * 10^{24}$  kg

## 重力は「弱すぎる」(階層性問題)



膨大な質量をもつ地球にくらべて、磁石の質量は無視できるほど小さい。それにもかかわらず、地球のつくる重力は、磁石のつくる磁力にうち負かされてしまう。これは重力が、磁力（電磁気力）にくらべていちじるしく弱いことを示す例である。

クリップは地球に落ちず、磁石へと引き寄せられる

クリップ

地球

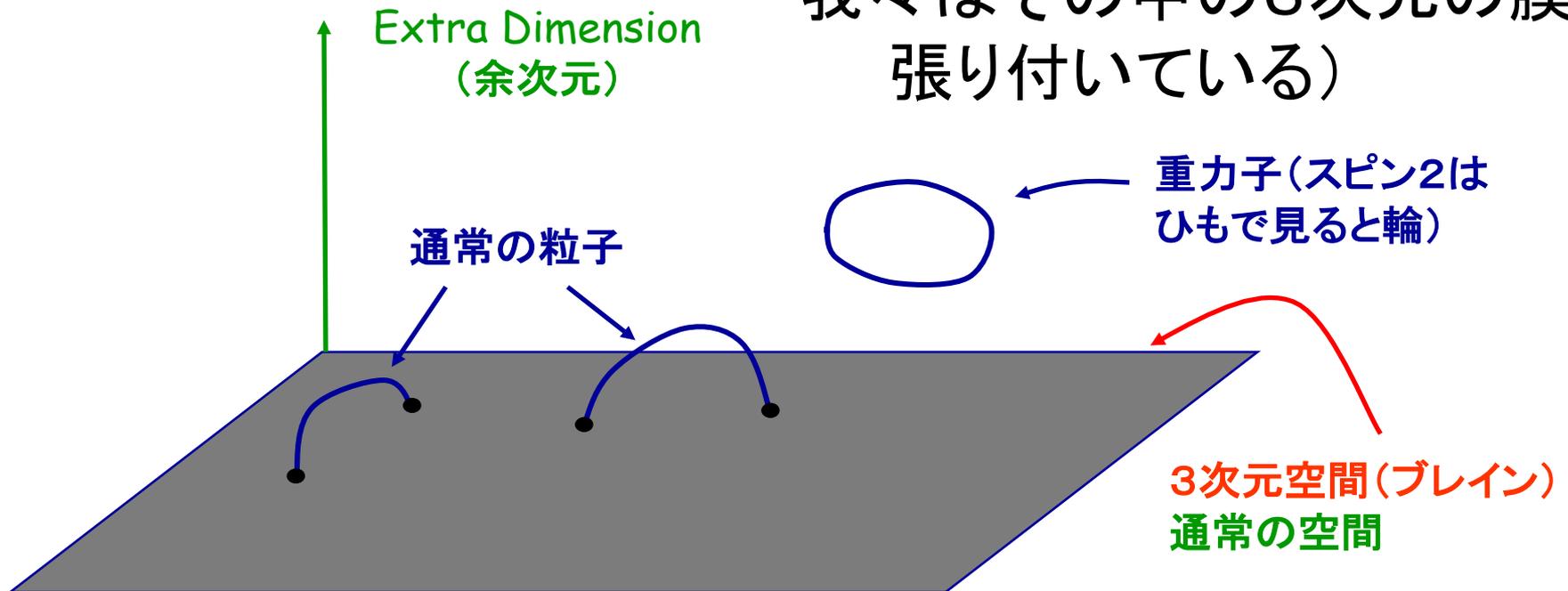
でもケチな磁石にもまけてしまう。

# その解として有力な「余剰次元とブレイン理論」

膜に張り付いた人生

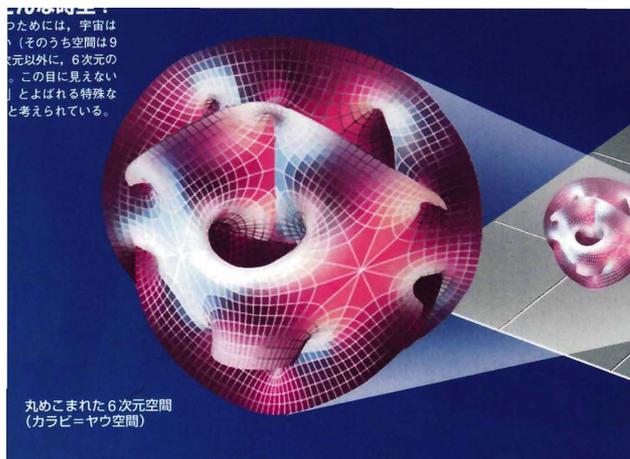
(空間は9次元(ヒモ理論))

我々はその中の3次元の膜に  
張り付いている)



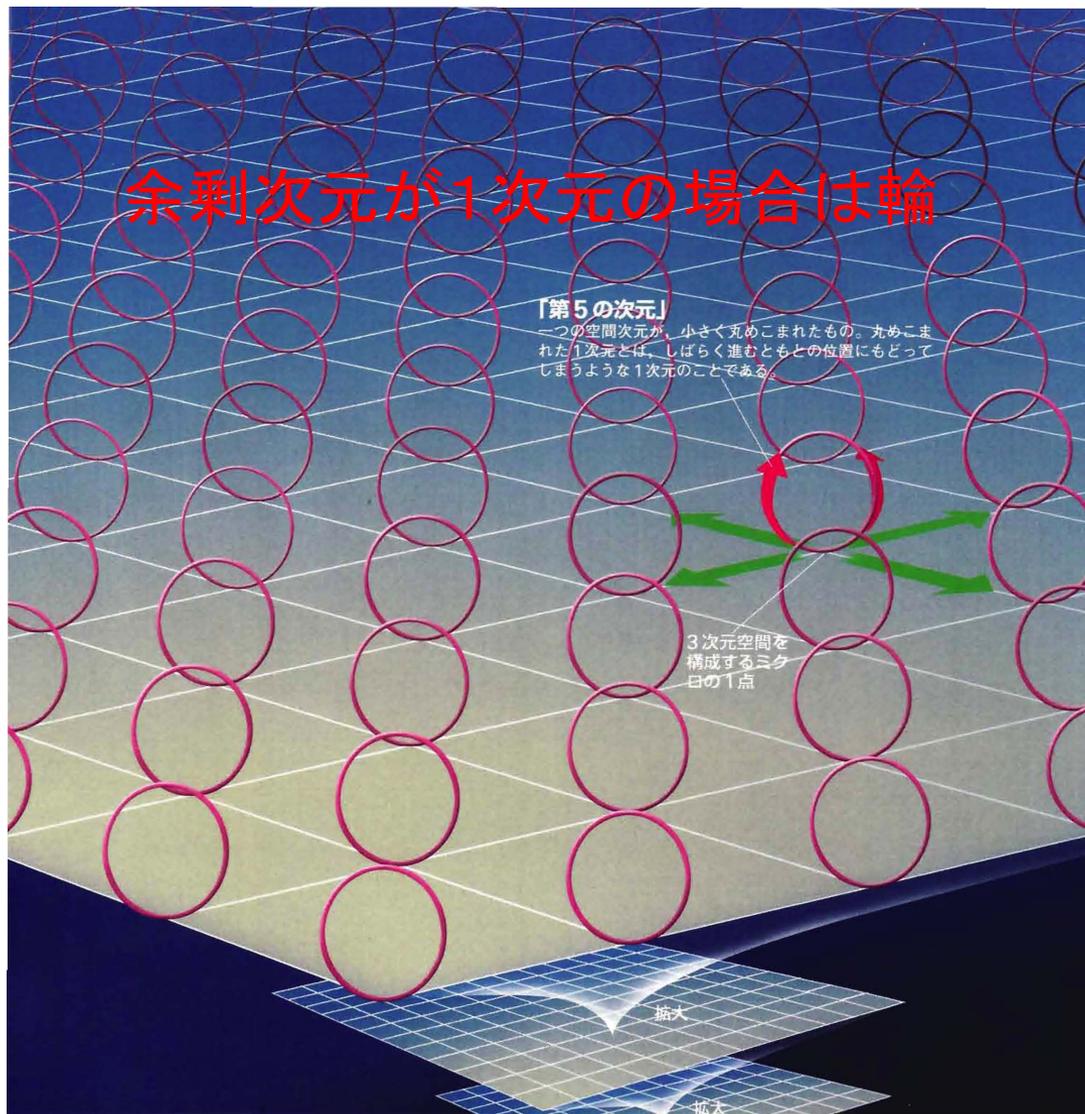
重力子は、広い空間を自由に行き来して、我々は3次元の膜にはりついている。  
重力子がこの膜に来たときだけ感じる → 重力が弱くみえる。

余剰次元は  
コンパクトに縮まっていて  
みえない。



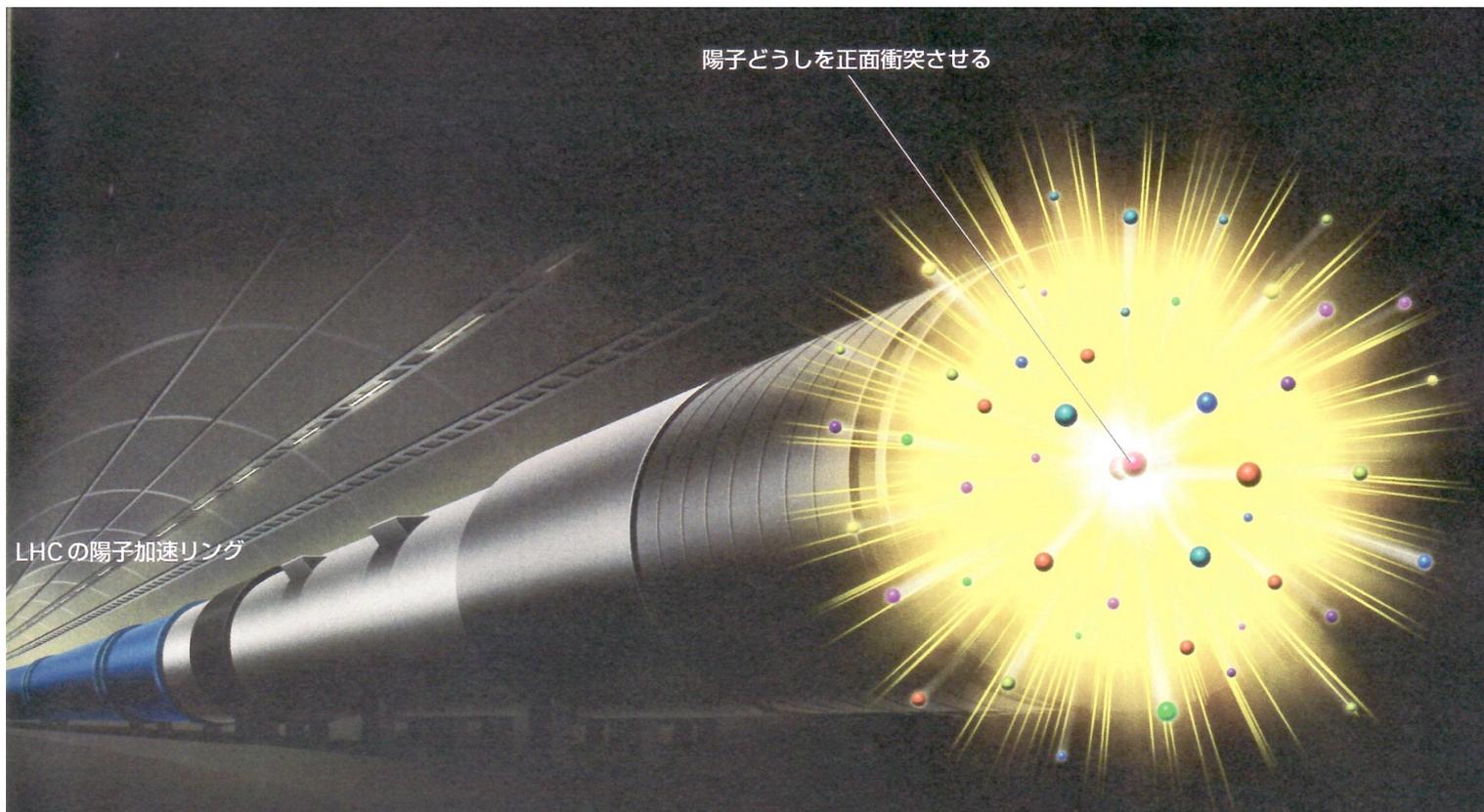
余剰次元が6次元の  
場合はふしぎな形

この大きさが不明  
 $10^{-35}\text{m}$  くらいかもしれないし  $10^{-19}\text{m}$   
と大きいかもしれない

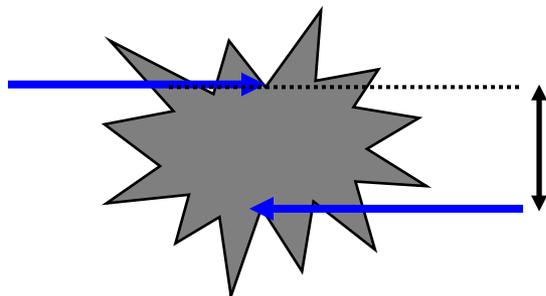


$10^{-35}\text{m}$ だと ヒッグス粒子が不安定  
 $10^{-19}\text{m}$ 程度だと 安定

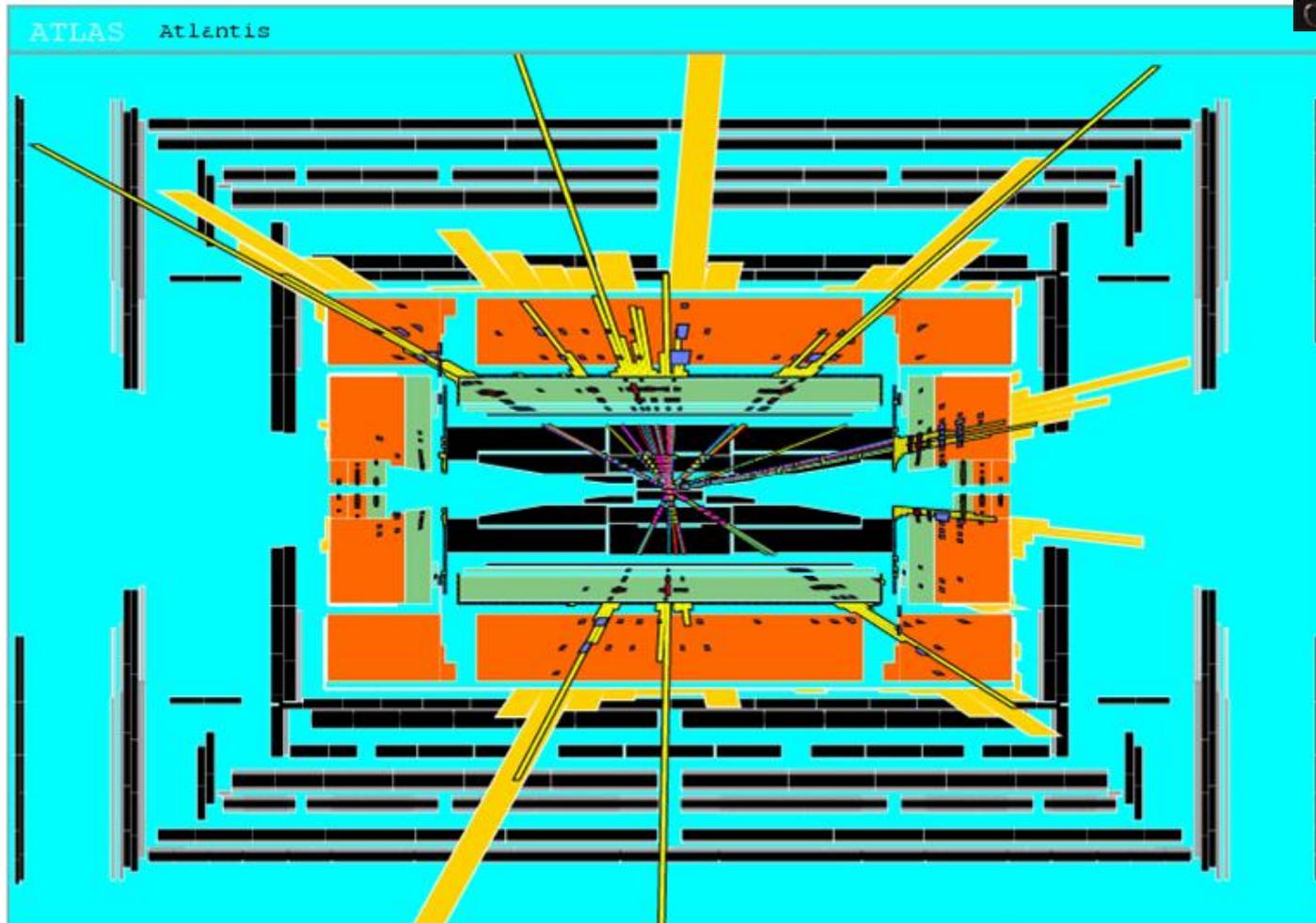
もし、**大きさが $10^{-19}\text{m}$**  だとLHCで効果が見える。  
この距離まで近づくと、次元数が大きくなり 重力が強い力となる。



陽子の中のクォークが反対側の陽子のクォークとぶつかる距離が  
ブラックホールの地平線の大きさ  
( $R_s$ シュバルツシルド半径)小さいと  
 $d < R_s$  吸い込まれてブラックホールになる。



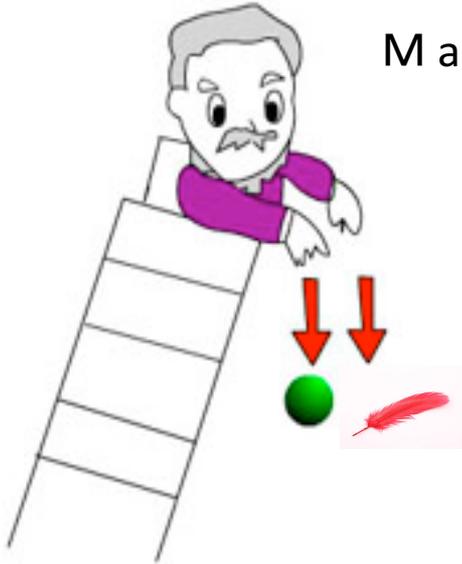
ブラックホールはすぐにホーキング輻射(蒸発)する。  
地球を飲み込む心配はない。  
蒸発で出てきた粒子が下の様に発見される。



エネルギー  
の高い粒子  
がいっぱい  
発生する事象  
(計算機で予想  
したもの)

# 質量と重さ(重力)

相対論的質量の意味

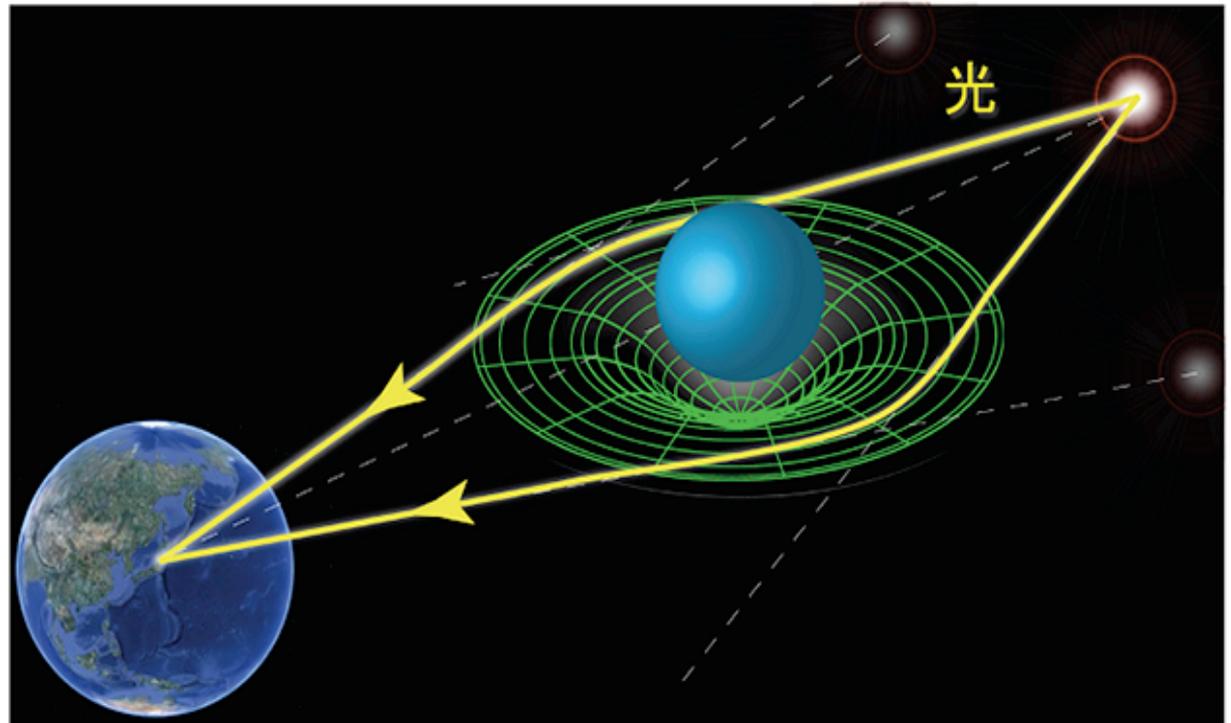


$$M a = F = mg$$

a=加速度

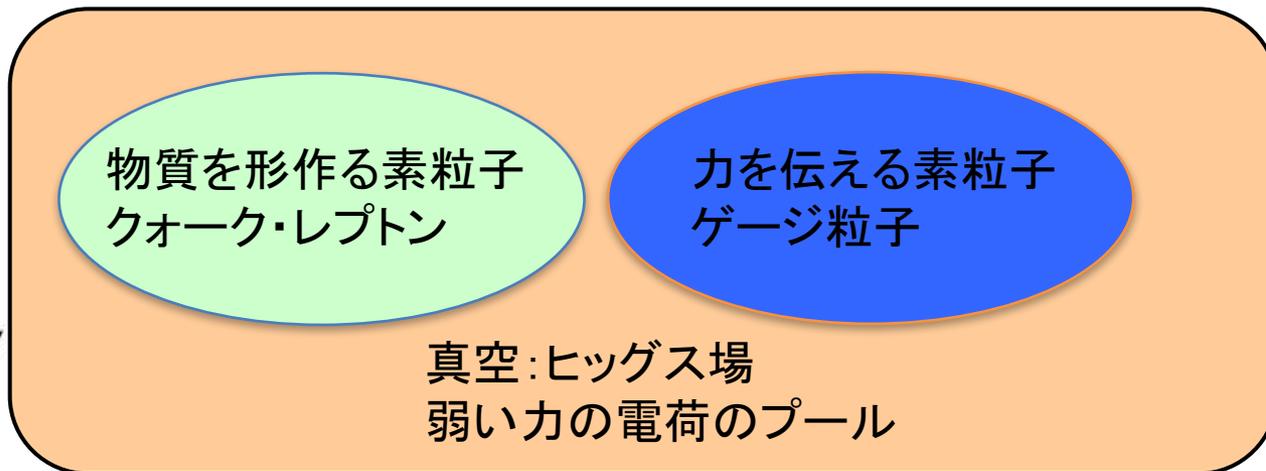
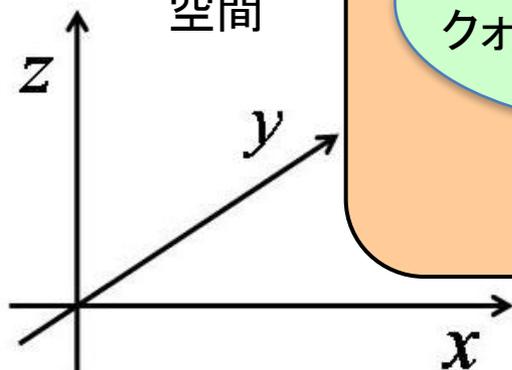
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

宇宙スケールで起きる重力場による光の幾何曲率効果



重力は見かけのちから？  
消すことができる。

4次元時空 + SPIN  
空間



アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

3つのターム

X線の大型干渉計

1) 曲率 R

R: スピンで同じか? (Cold Atomを使って  $10^{-7}$ )

R: 1つしかないか? (double metric) 等価原理の破れ

R: 連続か? ローレンツ不変の破れ (Planck scale level?)

R: 量子もつれの意味

PsのBEC

2) 宇宙項  $\Lambda$

これが大問題

## 2) 宇宙項 $\Lambda$

$$\begin{aligned}\Lambda_{\text{observed}} &= (10^{-3} \text{ eV})^4 && 10^{60} \\ \Lambda_{\text{Higgs}} &= (10^{12} \text{ eV})^4 && \\ \Lambda_{\text{GUT}} &= (10^{25} \text{ eV})^4 && 10^{112}\end{aligned}$$

人間原理？

真空の時にナイーブに meV の場を入れて探したが、変な話。  
その場は、マクロに効く、他のすべての場は効かないのか？

Higgs 場がある  
 $10^{-3}$  fm 立方体に  
陽子 1000 個が  
詰まっているエネルギー相当。  
この場が何故効かない？

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

## 3) エネルギー・ 運動量テンソル $T$

ヒッグス場  
や仮想電子の場は  
 $T_{\mu\nu}$ ??  
ミクロには  
何が  $T$  を作るのか？

光の場は  $T$  を作るのか？  
 $T$  は光の何に比例するのか？  
Ads/CFT 対応 から  
3次元の重力場 =  
2次元の場理論 ?  
エントロピー？

ミクロな真空や場 と マクロな時空 のインターフェース  
一般相対性理論と量子力学の融合：

# Serious Problem exists since the vacuum is NOT empty.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Vacuum is NOT empty and has “energy”,  
so it contributes  
to Einstein equation as  
a cosmological constant

Anthropic  
principle???

called as  
Dark Energy →

$$\Lambda_{\text{observed}} = (10^{-3} \text{ eV})^4$$

$$\Lambda_{\text{Higgs}} = (10^{12} \text{ eV})^4$$

$$\Lambda_{\text{GUT}} = (10^{25} \text{ eV})^4$$

at least

$10^{60}$

different

$10^{112}$

ゼロ点  
振動だって  
×

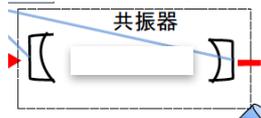
*Why these vacuum energies are NOT observed in Macro space-time?*

New interface between Micro vacuum and  
Macro Space-time is necessary :

Investigate Structure of vacuum and quantum theory for space-time.

# 光の場は重力を生むか？

1MJのCavity r=1cm



ハイパワー+位相がそろったレーザー



マクロな重力方程式  
重力ポテンシャル

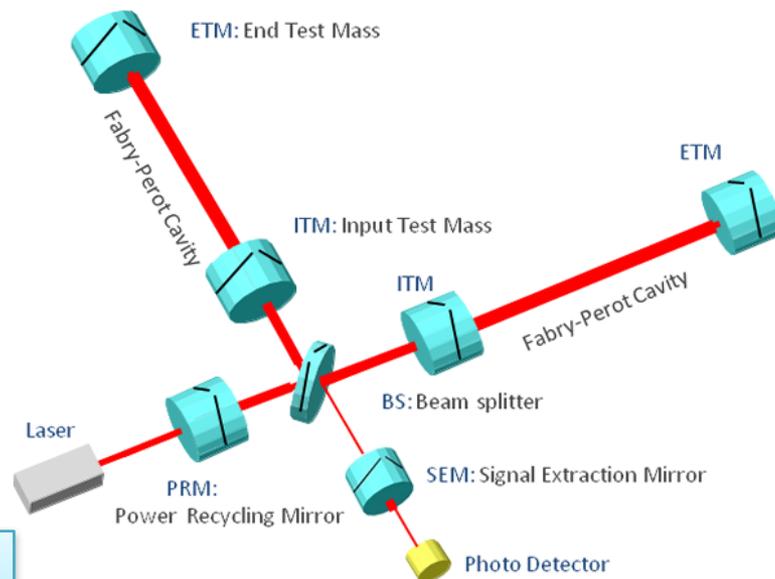
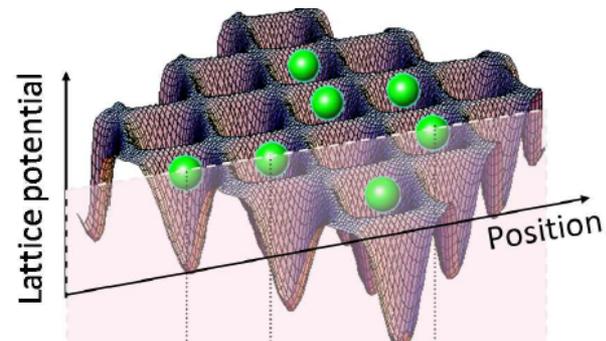
$$(E/r) / (M(\text{地球})/R) = 10^{-24}$$

香取先生の精度  $10^{-18}$  の時計を使って

Mach-Zehnder  
干渉計(重力波)

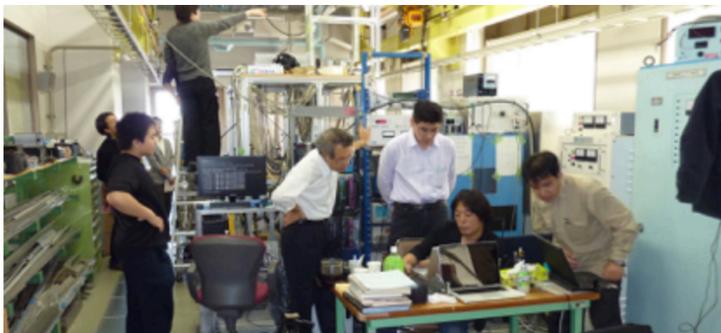
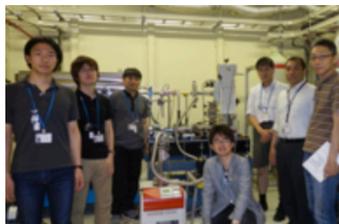
10-24 ?

UltraCold  
中性子干渉計 ?



光の High Power と High Precision の両方の側面が必要

# Tabletop Experiments



テーブルトップサイズの小規模実験で、標準理論を超えた物理現象を探索します。

計画の立案から検出器のデザイン、測定、解析に至るまでを一貫して行い、新しい結果を学術誌に発表していきます。

真空・時空を  
LHC以外で探ろう  
とやっています

小規模実験で探る標準理論を超えた物理の探索

[English page](#)

2018年度大学院入学ガイダンス資料

浅井研資料 (LHC+Tabletop)、Tabletop実験資料

宣伝パンフレット [ポジトロニウムを用いた素粒子物理学実験](#)  
[光を用いた素粒子物理学実験](#)

祝・総長賞

