

信じよ  
さらば救われん  
DM,H,g-2,GUT



やっぱりSUSY講座

ヒッグス粒子が発見で、  
標準理論が完成

問題点その1

## 標準理論

クォーク

|   |   |   |
|---|---|---|
| u | c | t |
| d | s | b |

ゲージ粒子

|          |       |         |   |
|----------|-------|---------|---|
| $\gamma$ | $Z^0$ | $W^\pm$ | g |
|----------|-------|---------|---|

力を伝える(3つの力)

レプトン

|         |           |            |
|---------|-----------|------------|
| $\nu_e$ | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ |
| e       | $\mu$     | $\tau$     |

ヒッグス粒子

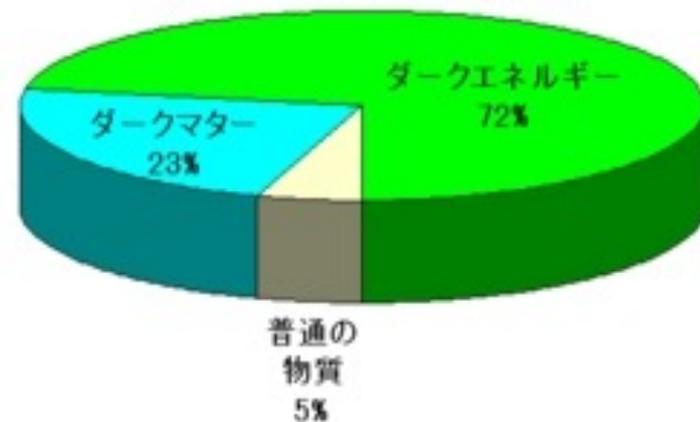
H

問題点  
その3

物質を形成

2012年発見

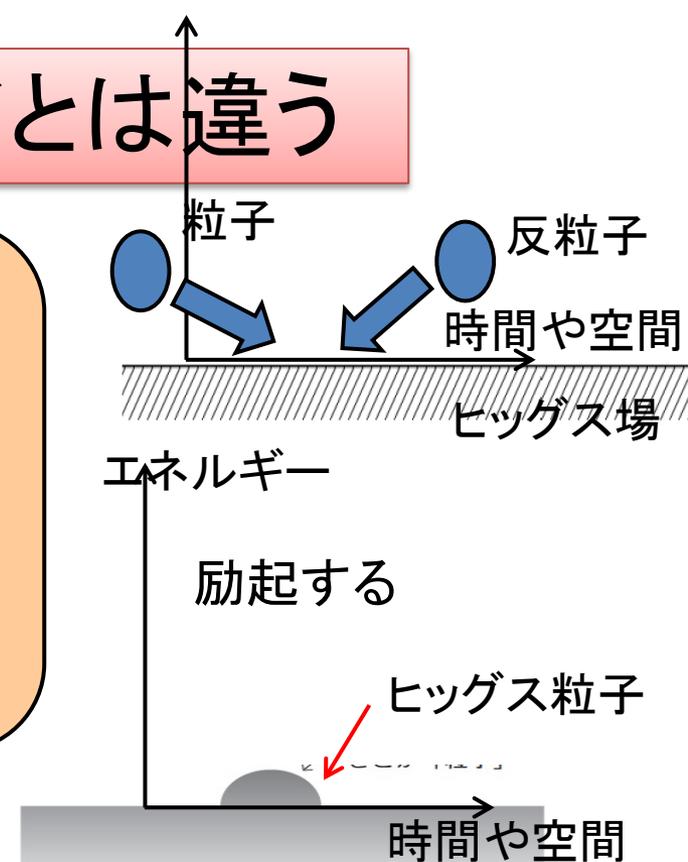
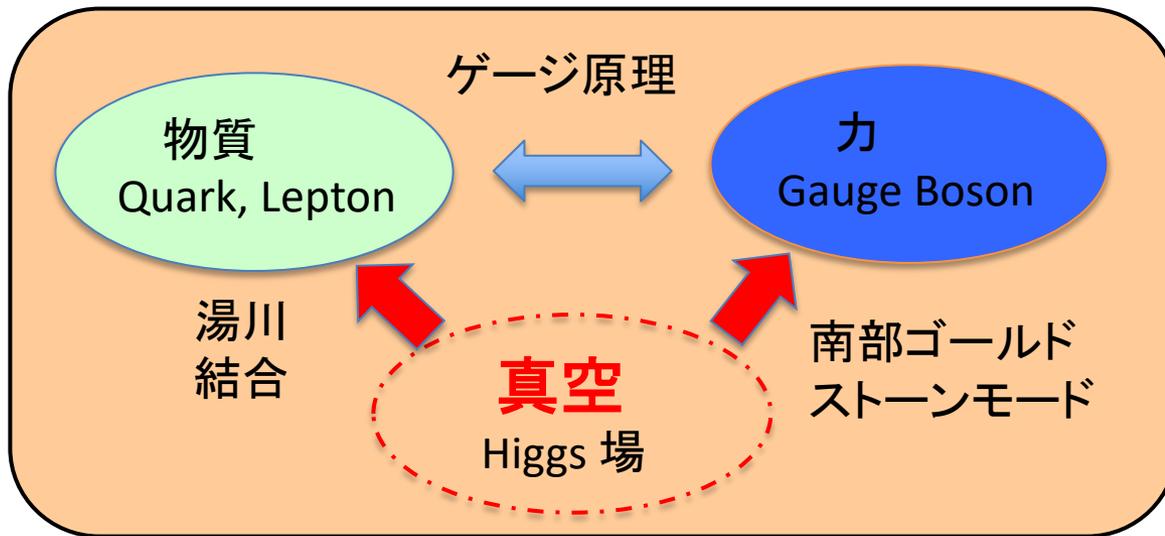
## 宇宙の成分表



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



真空にエネルギーを与えると、ヒッグス粒子  
→ 真空にヒッグス場が隠れてた。

“真空の場”

(真空の状態が相転移→ インフレーション)

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  $0$

スピン  $0$ は

(はじめての例)

無茶苦茶

不安定 存在できない

# 素粒子のスピンって？

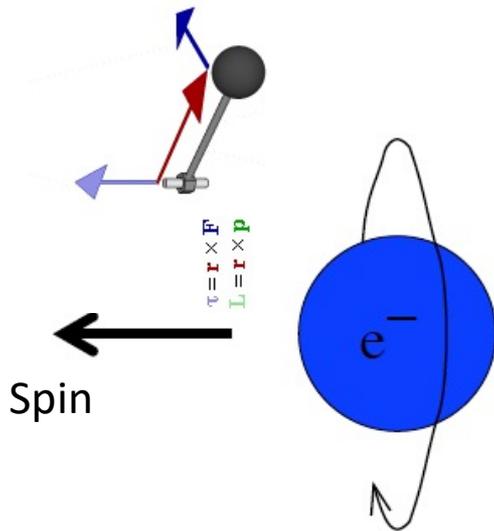
スピン: 角運動量と同じ性質

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。**



角運動量 L は 回転演算  $\exp(-iL\theta)$  に対応

$\theta$ 回転すると、 $S\theta$ 回転する。  $U(\theta)=\exp\{-i\theta S\}$

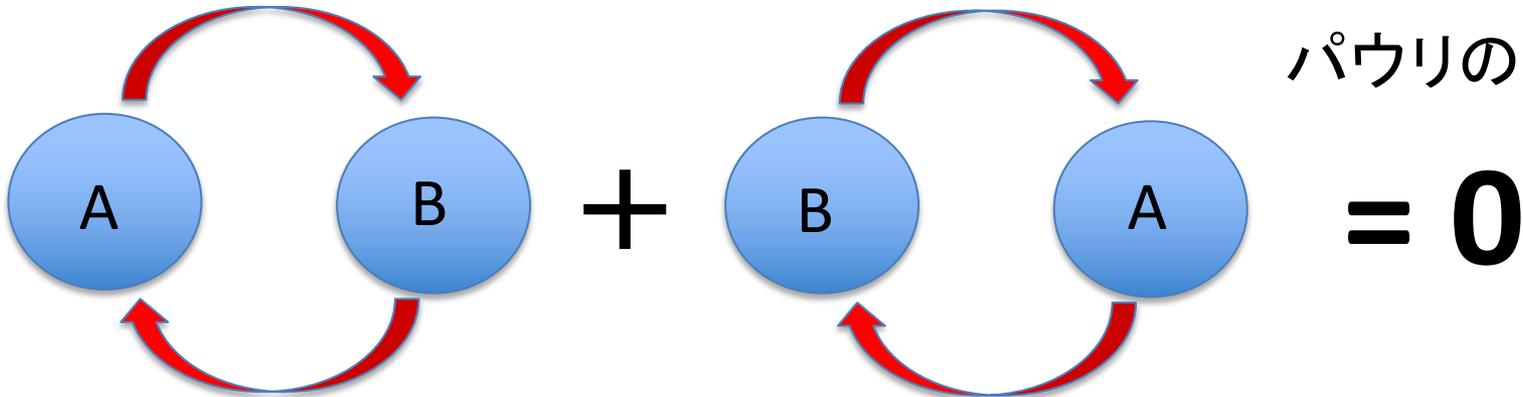
偶数倍: ボーズ粒子 360度でもとの状態に戻る。

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。**

「ほんとかよ～」と思う君

# 電子などは、2回して元に戻る



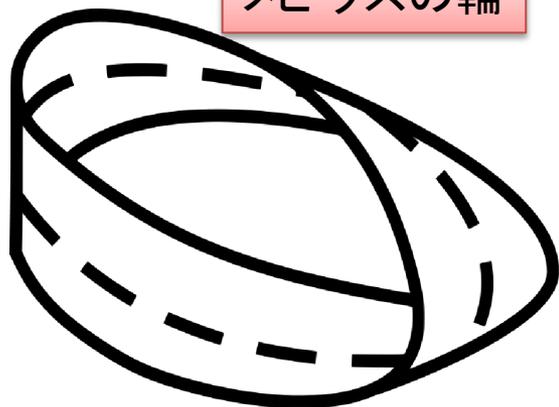
フェルミ粒子 (半整数スピン)  $U(\theta) = \exp\{-i\theta \frac{1}{2}\} = \cos(1/2 \theta) + i\sin(1/2\theta)$   
360度回しても符号が逆:  
720度回してはじめてもとの状態に戻る。

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)

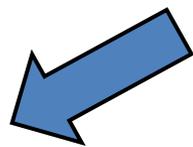
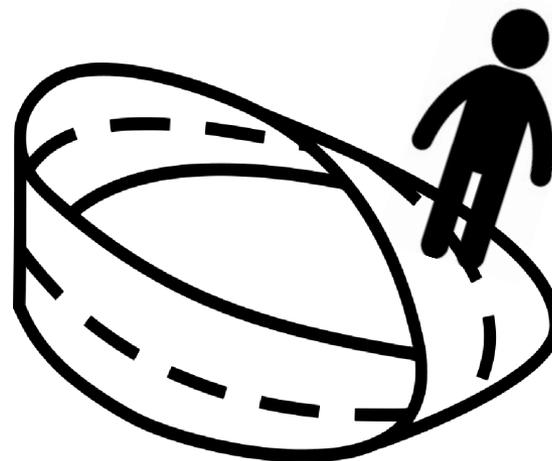
**素粒子のスピン:**  
空間の表裏がみえるか      見えないかの違い  
(フェルミオン 物質)      (ボソン 力)

# 2回転してもとに戻る例

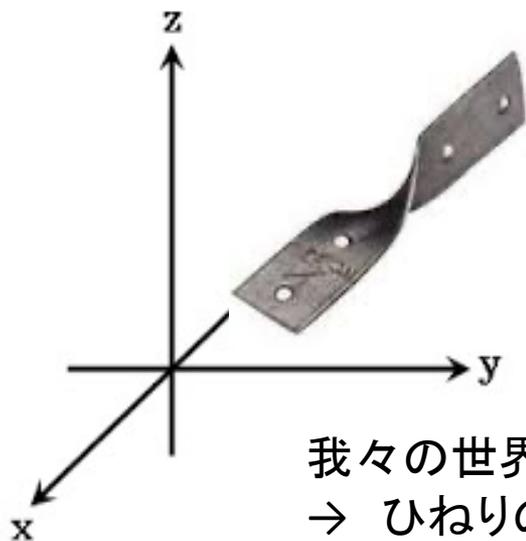
メビウスの輪



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

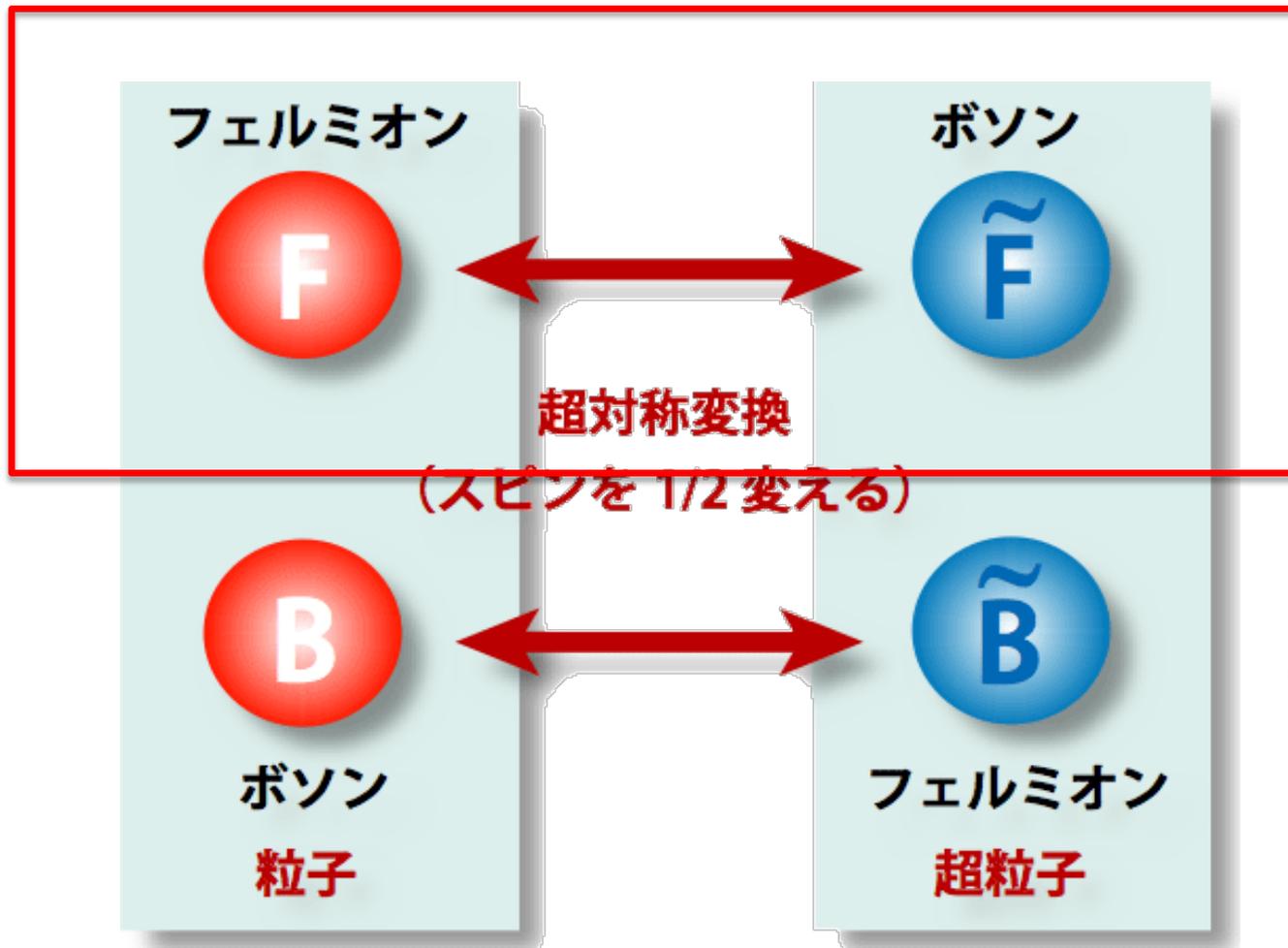


普通の2次元に裏と表の自由度があるので、  
2次元+表裏の空間に見える。



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

...

$$\{Q_\alpha, (Q_\beta)^\dagger\} = P_\mu \gamma^\mu_{\alpha\beta}$$

量子重力理論  
は必ずSUSY

# 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

10個の保存量

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

保存量 電荷

**スピンに関して**

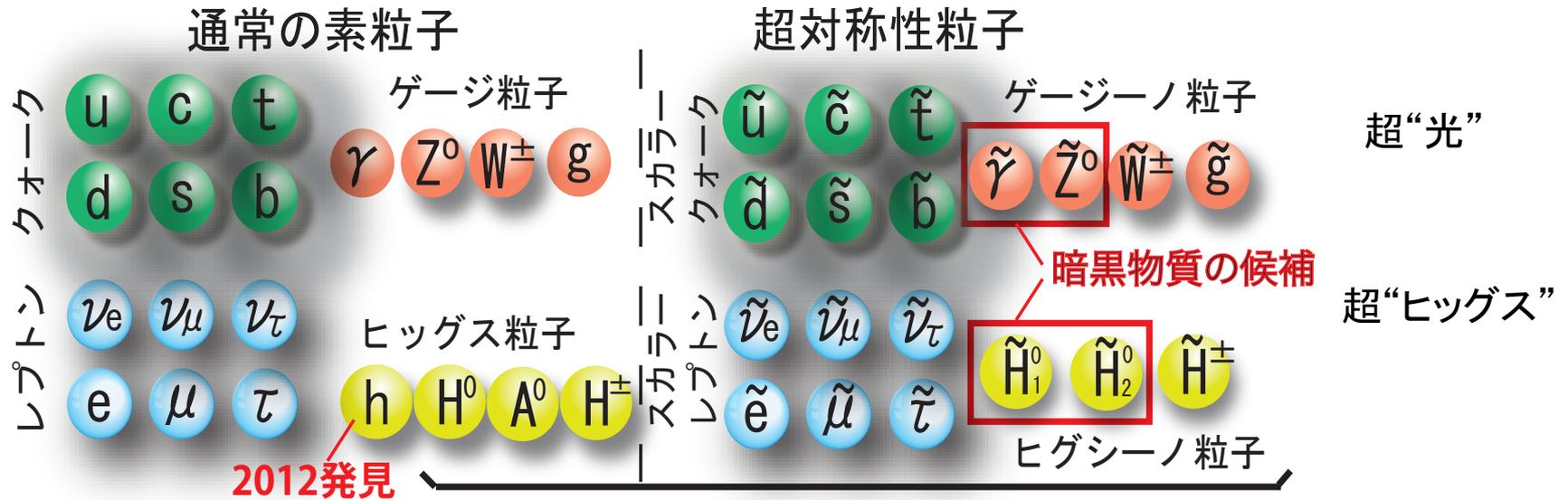
**素粒子だけがみているなんかの空間(フェルミオン次元)**

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！！)

# “超” 対称性



超対称性粒子は未発見

## 超対称性の利点

- 宇宙の暗黒物質の解明 (問題1)
- 力の大統一 (問題2)
- ヒッグス粒子が存在できる (問題3)
- 小さい宇宙(素粒子)が見ている時空

全部に答えてくれる  
唯一の性質

超対称性が破れているから 右側が見えていない?

# (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、

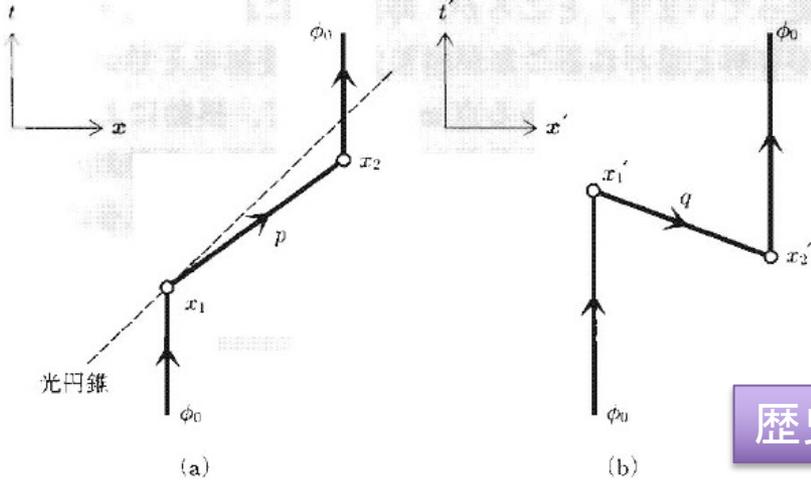
反粒子が出てきた。(1928 Dirac)

(基礎方程式参照)

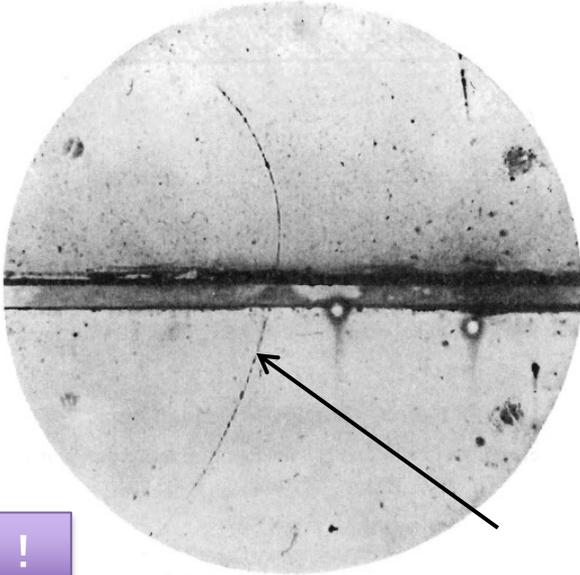
反粒子は時間に逆行する粒子

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?

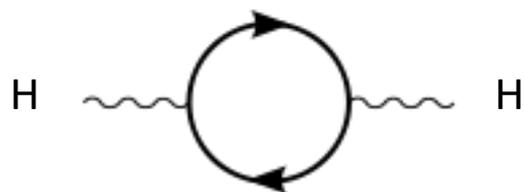
## (2) ヒッグス粒子が軽い理由

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

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

大きく $\Delta E$ がずれるても短い間ならいい。

どうということ？



トップ・反トップ

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 ???

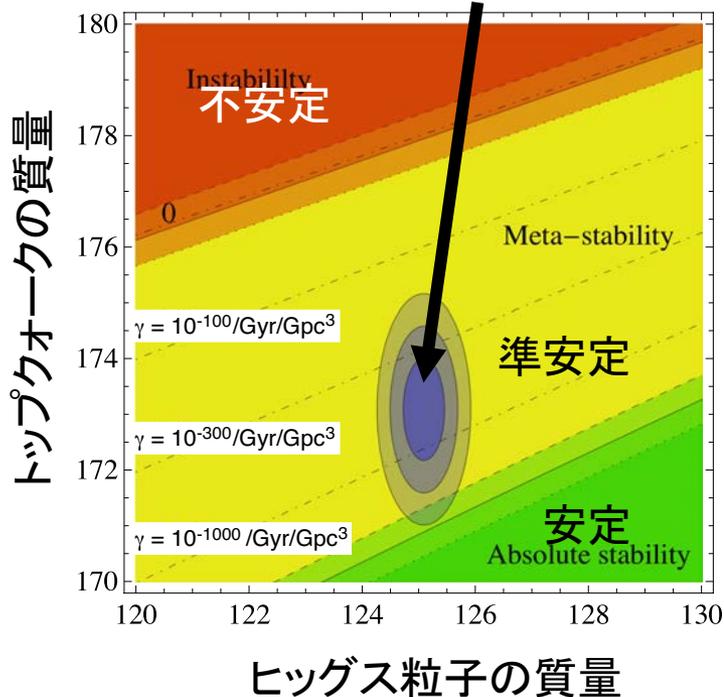
ヒッグス粒子を重くする効果

問題！！！！

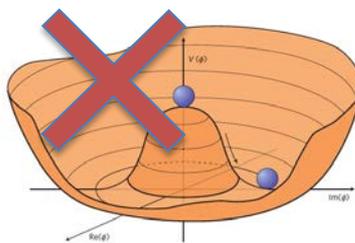
何か新しい物理(標準理論を超えた)があることを示唆している

# 最近の我々の「ヒッグス粒子」研究で分かったこと

我々の宇宙(真空)は



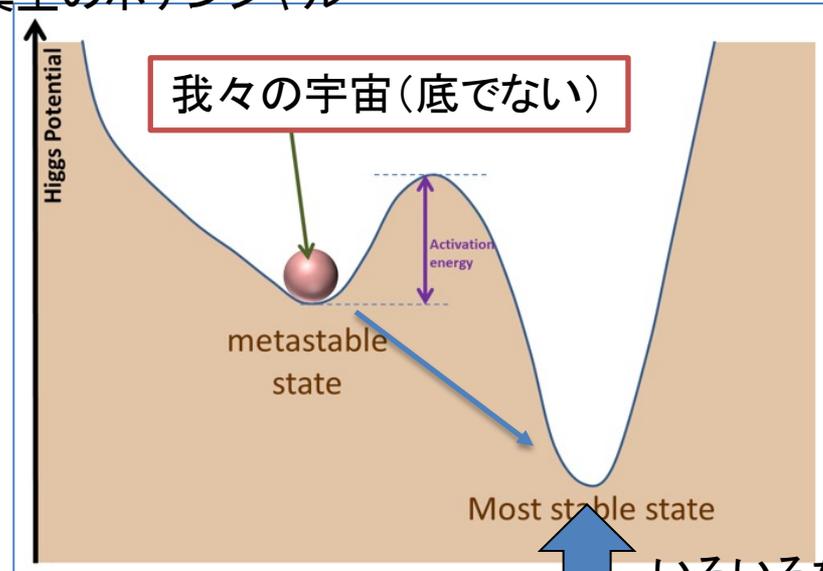
準安定: 宇宙はある日、  
大きな変化(相転移)で消えてしま  
う!!!



こんな簡単な話  
ではなかった

イメージ

真空のポテンシャル



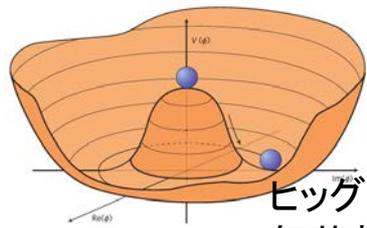
本当の底の存在の示唆

より高いエネルギーでの新現象の示唆

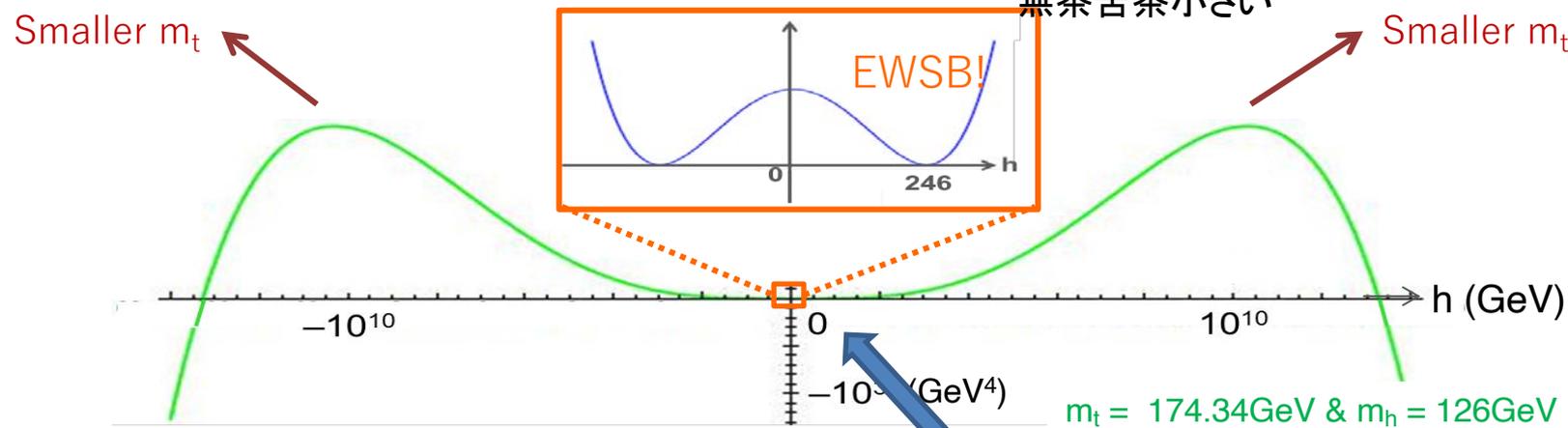
↑  
いろいろな  
ヒッグスのエネルギー

実は、すご〜く  
不思議なポテンシャル

この3つが  
研究の柱



ヒッグスの形  
無茶苦茶小さい



- 違い: 10桁 ~ 16桁
- 小さなスケールを生み出し、
  - 安定させる何かアイデアが必要

この  
スケール?  
 $10^{16} \sim 10^{19}$  GeV

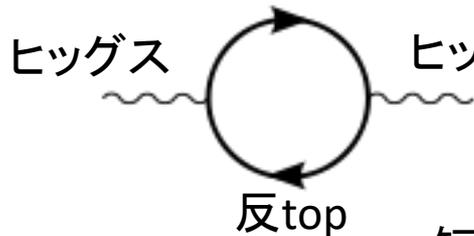
### 階層性問題

|                  |                            |                  |
|------------------|----------------------------|------------------|
| 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 |

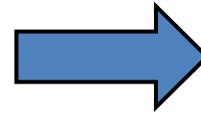
# 階層性問題

|                  |                                  |                          |
|------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 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

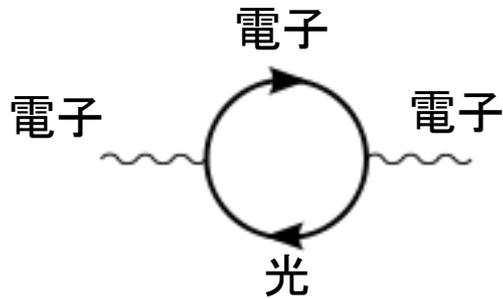


**量子力学的な効果**  
 ヒッグス粒子の質量は  
 もっと重くなるはず



**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

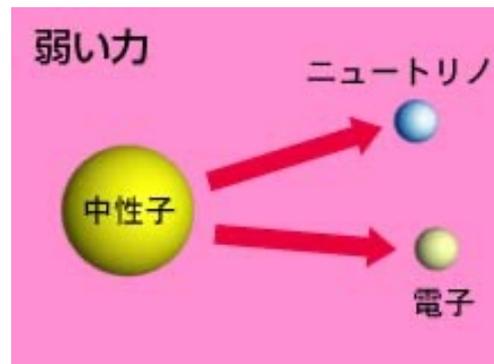
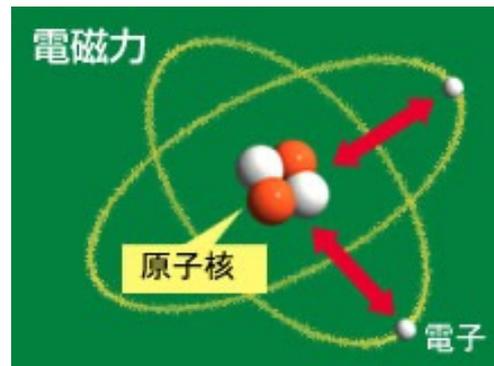
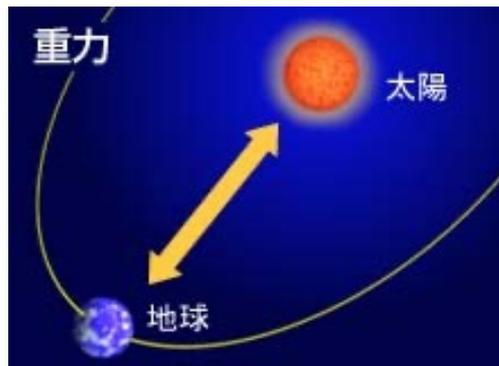


これも同じように効くはず??  
 でも電子は511KeV  
 電子に、カイラル対称性と言う性質があって  
 この発散は、logになって繰り込める。  
 光も、同様にゲージ対称性

- 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

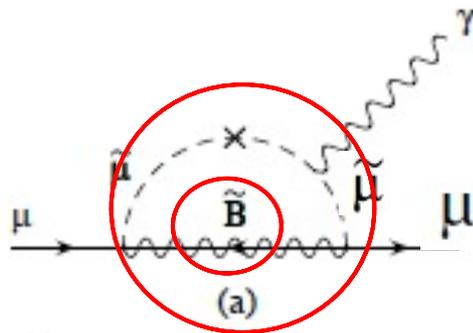
弱い力  
弱電荷保存  
真空がもってるので  
一見保存しない  
(ヒッグス場)

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

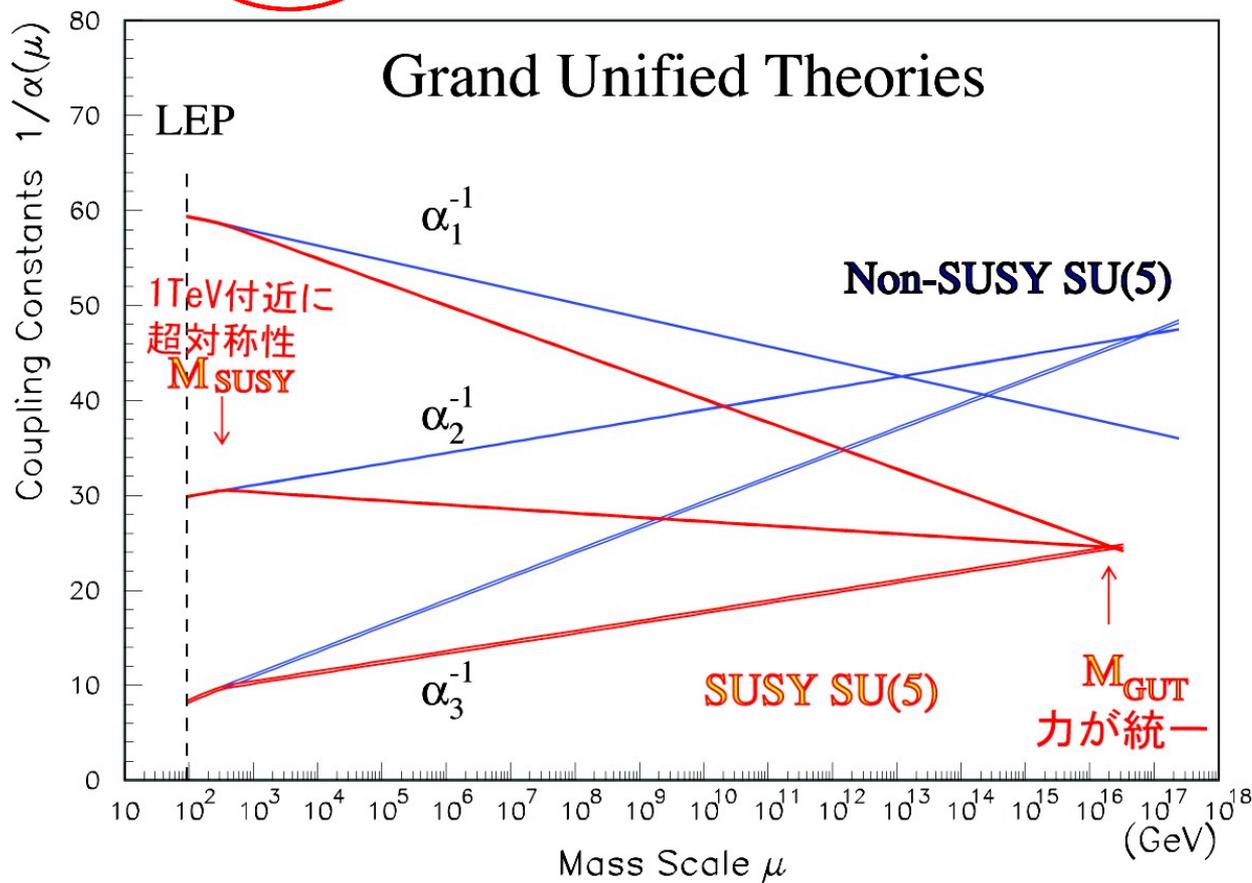
Mass scale  $\mu \sim 1/R$ (見るスケール)



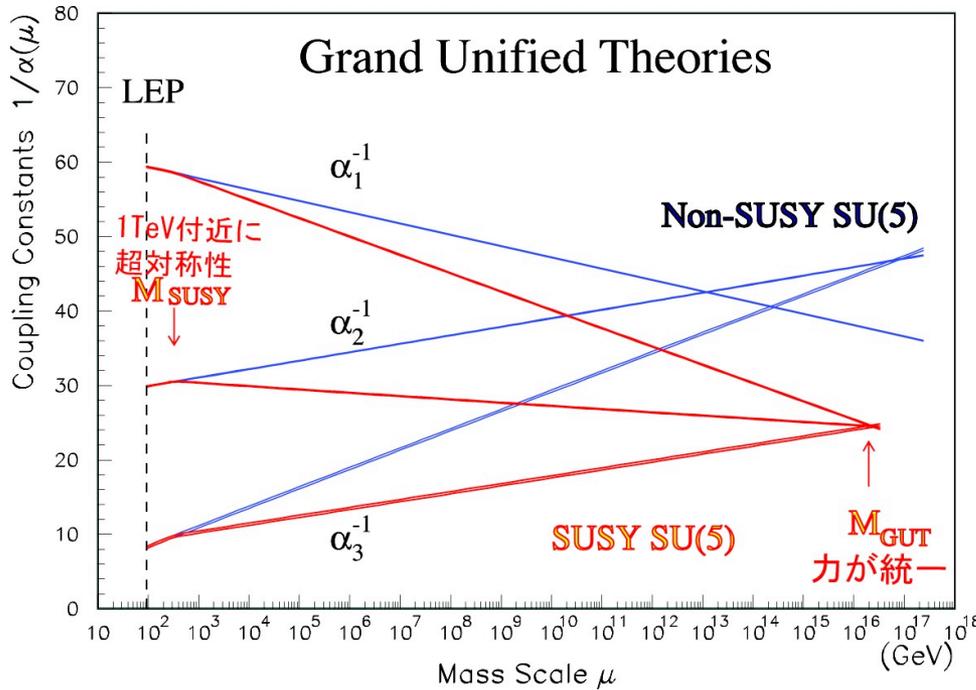
新しい粒子があると  
結合定数の変化が  
変わる

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)**

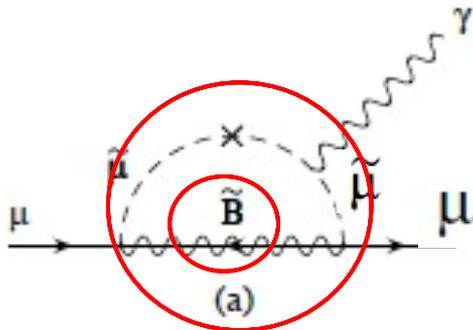


# 繰り込みの“結合定数”の例



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)

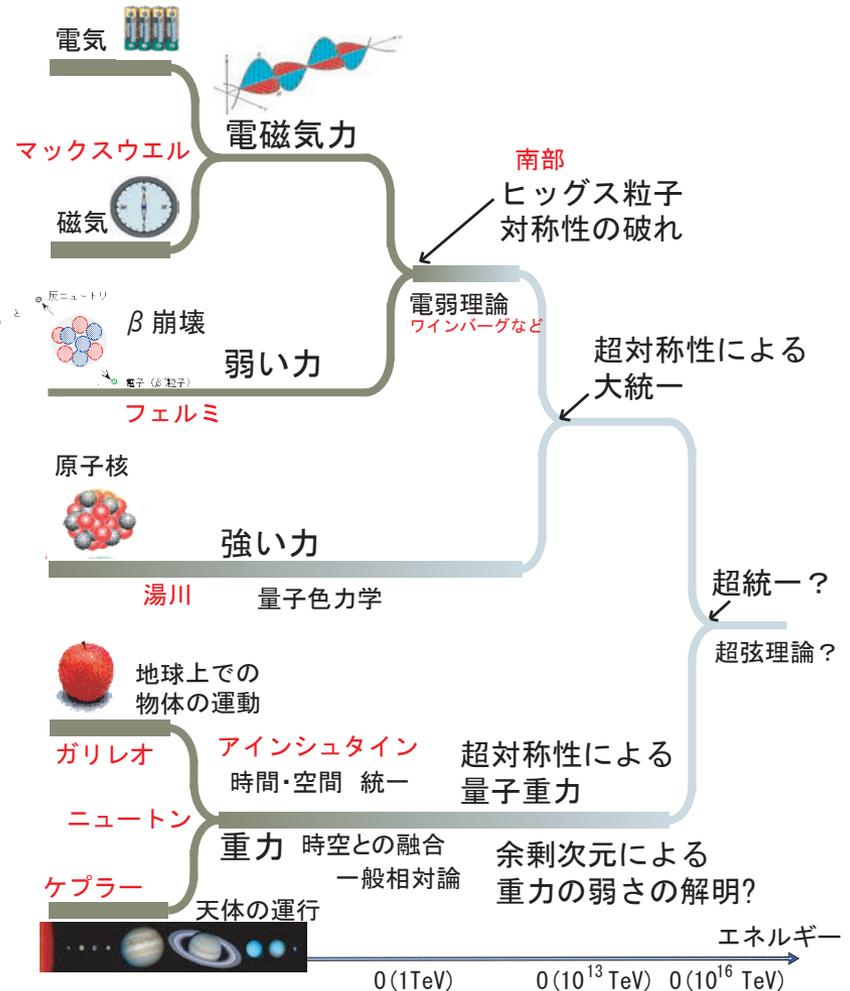


新しい粒子があると  
結合定数の変化が  
変わる

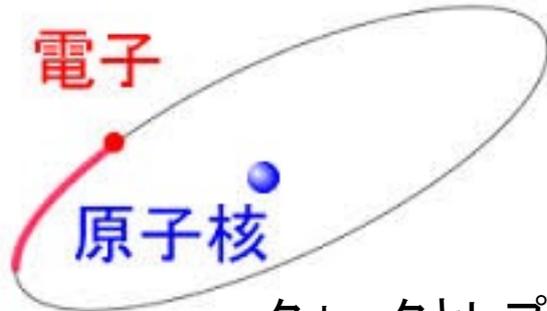
超対称性粒子が **1TeV付近**にあると、  
3つの力は  **$2 \cdot 10^{16}$  GeV**で一つの力に  
なることが示唆された。

## →力の大統一(GUT)

物理学の大まかな歴史と「統一」



# 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                | チャーム                      | トップ                         |
|      | ダウン                | ストレンジ                     | ボトム                         |
| レプトン | $\nu_e$<br>eニュートリノ | $\nu_\mu$<br>$\mu$ ニュートリノ | $\nu_\tau$<br>$\tau$ ニュートリノ |
|      | $e$<br>電子          | $\mu$<br>ミューオン            | $\tau$<br>タウ                |

電磁気力  
弱い力  
強い力

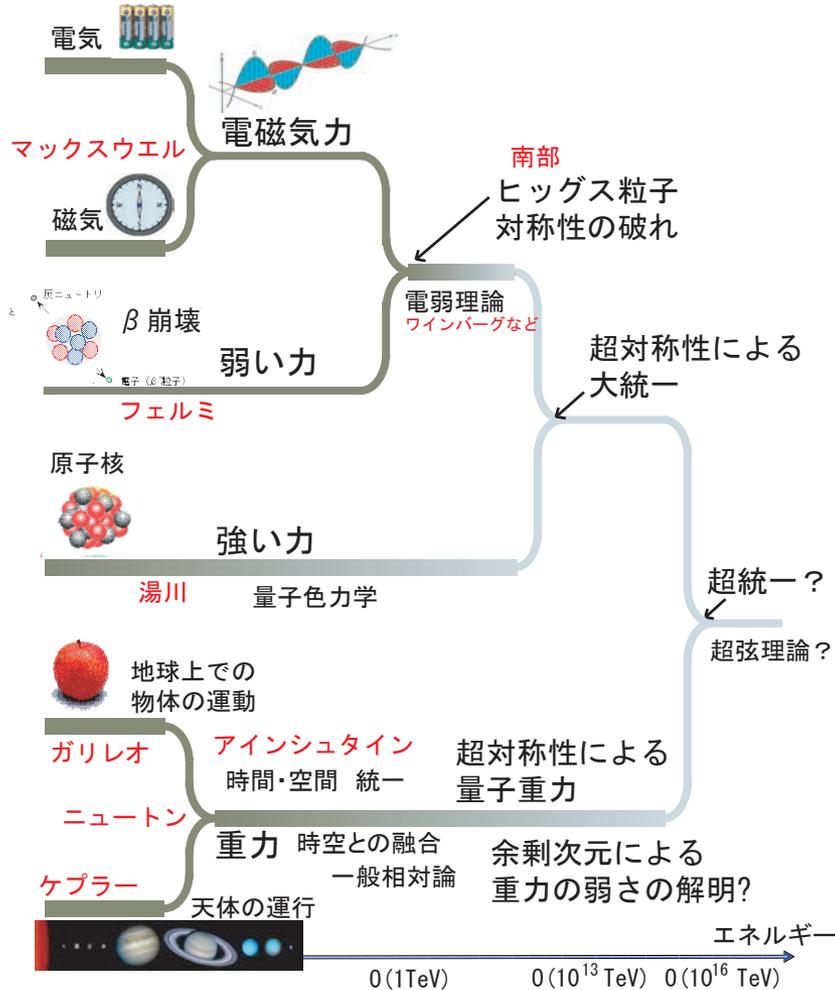
電磁気力  
弱い力

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

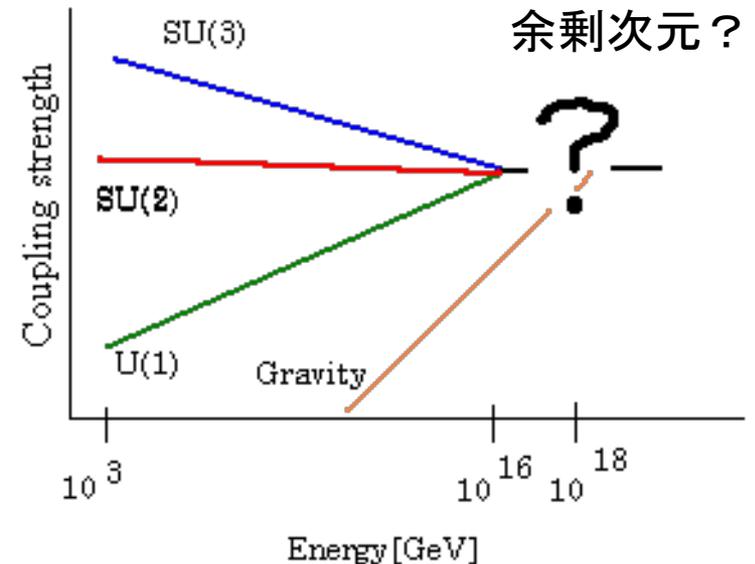
# 重力まで統一出来るか？（超統一）

## 物理学の大まかな歴史と「統一」



## 二つの謎解きが必要

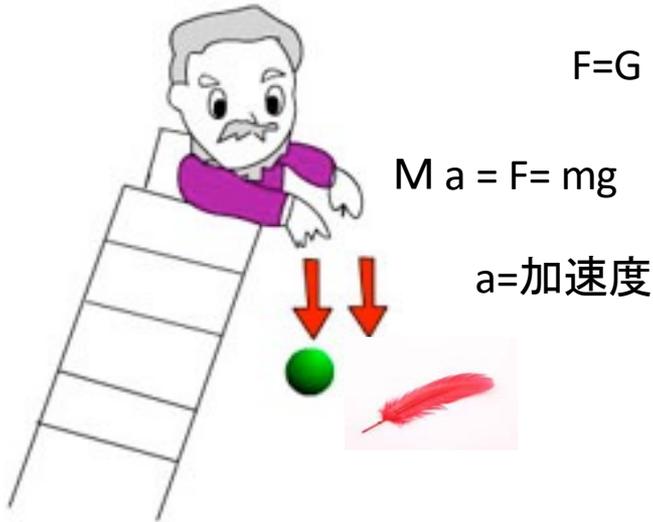
- 1) 重力 実空間(A)の対称性  
残り3つは、内部空間(B)の対称性  
A+Bへ拡張  
量子論+一般相対論 融合  
=> 鍵が“SUSY”
- 2) 重力だけムチャクチャ弱い 10<sup>-40</sup>



# 重力は時空が曲がっている効果

皆の知ってる  
重力は  
見かけの効果

$F = G \frac{Mm}{r^2}$  (ニュートン方程式) 間違い

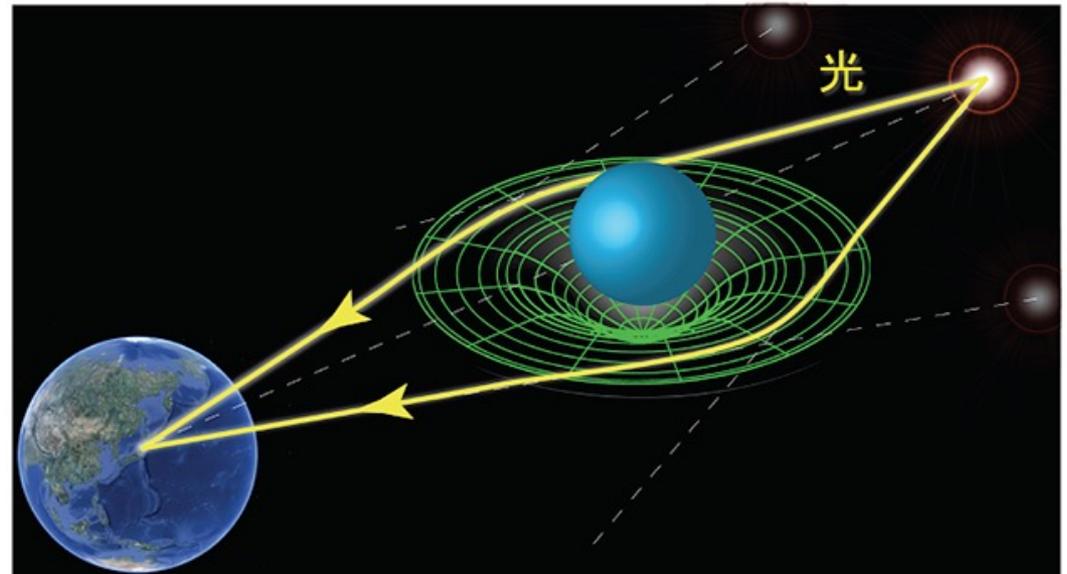


加速度は 物質によらない。  
重さのない 光さえ 曲がる(加速度をうける)。

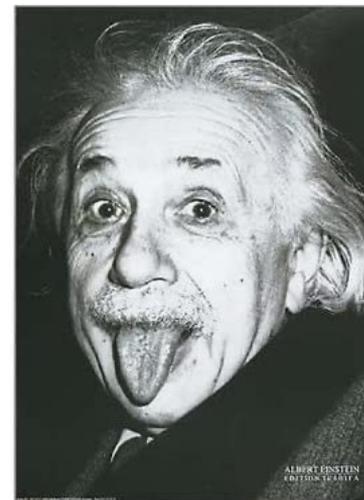
**重力: 時空の曲がる効果の見かけ**  
**時間空間自体が曲がったり動く(重力波)**

宇宙スケールで起きる重力場による光の幾何曲率効果

平面と球の直線の違い



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



アイシュタイン  
方程式を書き直そう

→ ミクロな世界は違う時空  
等価原理 ×

→ ミクロな場のエネルギー ×

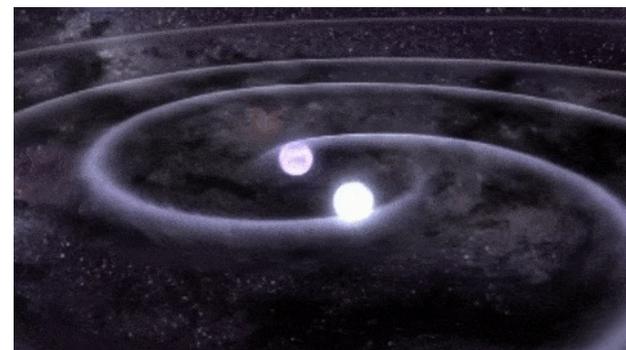
ミクロな場：宇宙全体（マクロ）の広がっている。  
真空のエネルギー： インフレーションのタネ？



1cm<sup>3</sup>のなかに  
水素原子10<sup>44</sup>個分  
のエネルギーの  
変なものが  
つまっている

→ 何が時空をまげるの？

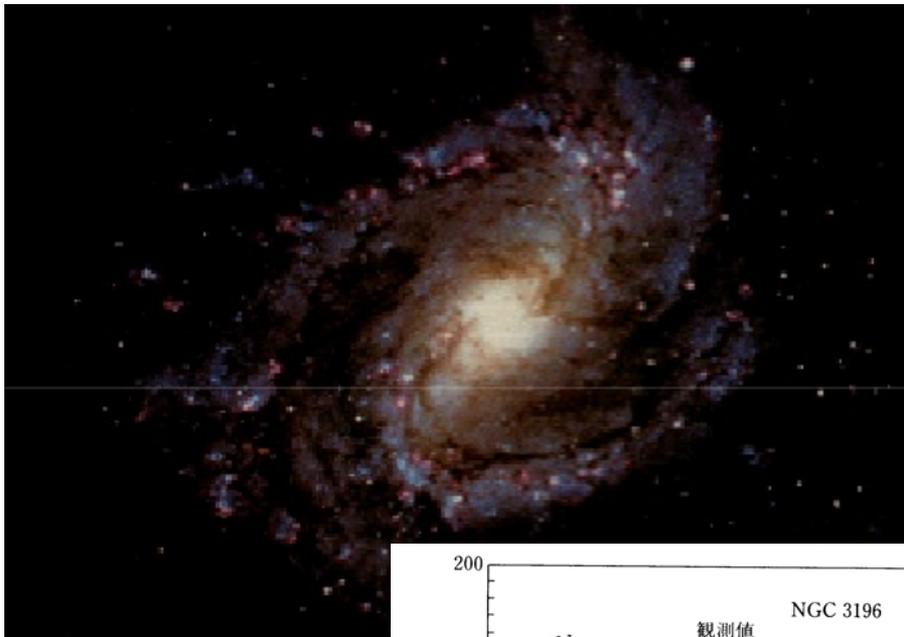
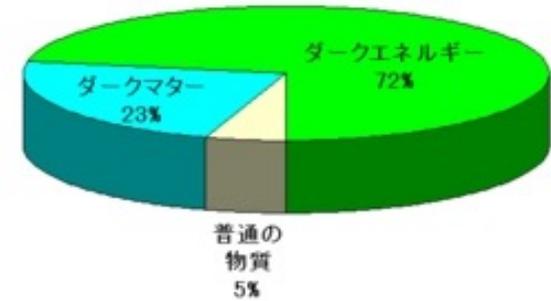
これが本当の重力  
Graviton?



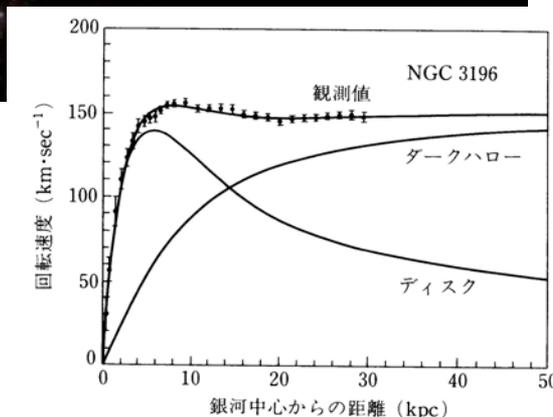
# (4) 暗黒物質の解明

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



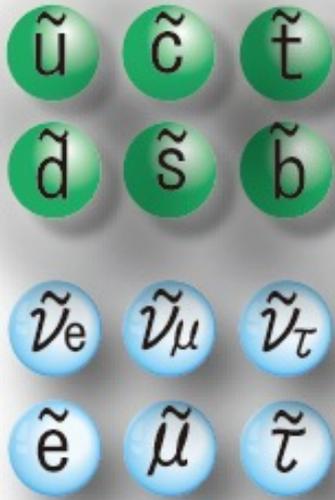
暗黒物質が  
暗黒である  
smoking gun

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)

## 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

## ヒグシノ粒子



スピン 1/2

Bino (光のパートナー)  
Wino (Z粒子のパートナー)  
Higgsino (ヒッグス場の  
パートナー 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

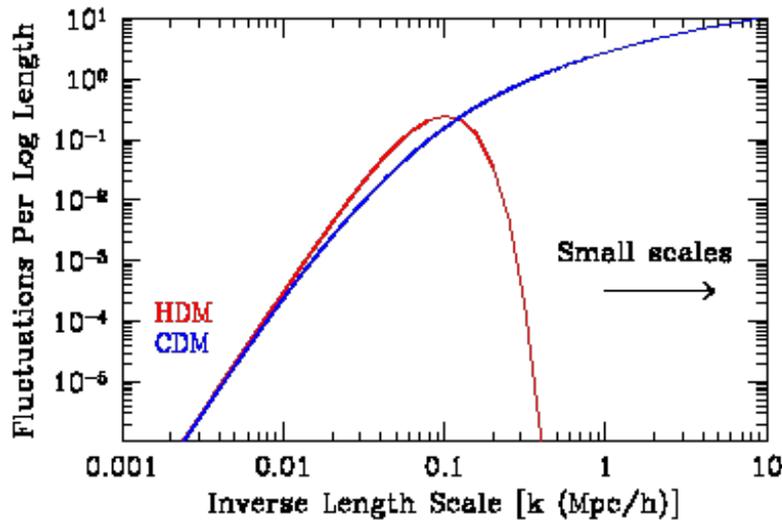


スピン 3/2



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

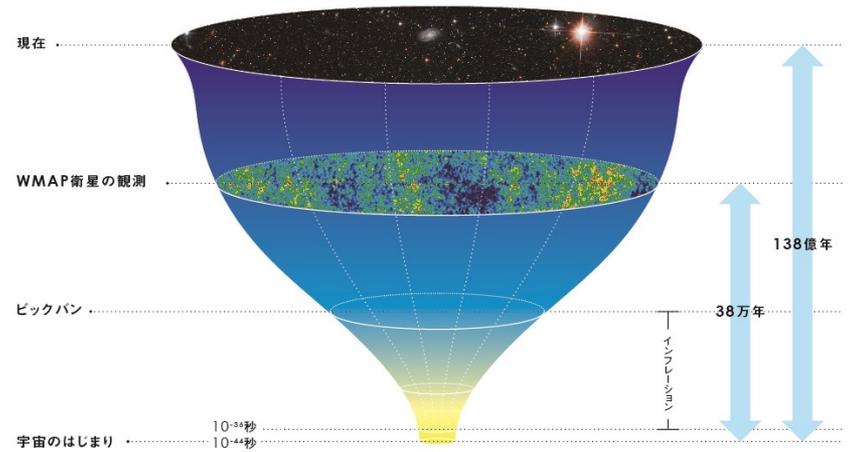
濃いとこと薄いところ  $\rightarrow$  これが銀河の種

光速で伝わるDMがいるとムラをならしてしまう。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

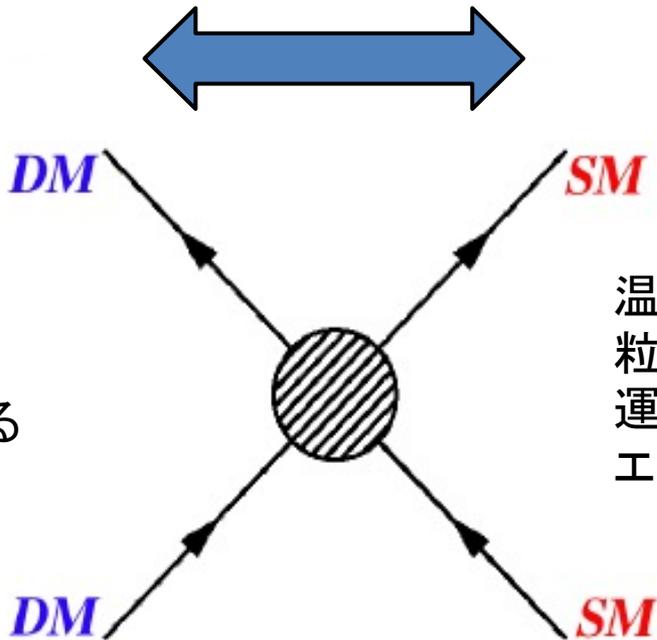
宇宙の温度  $T >$  暗黒物質の質量



平衡状態にある

$10^{-12}$ 秒 から  $10^{-11}$ 秒  
くらいまでは

生成される



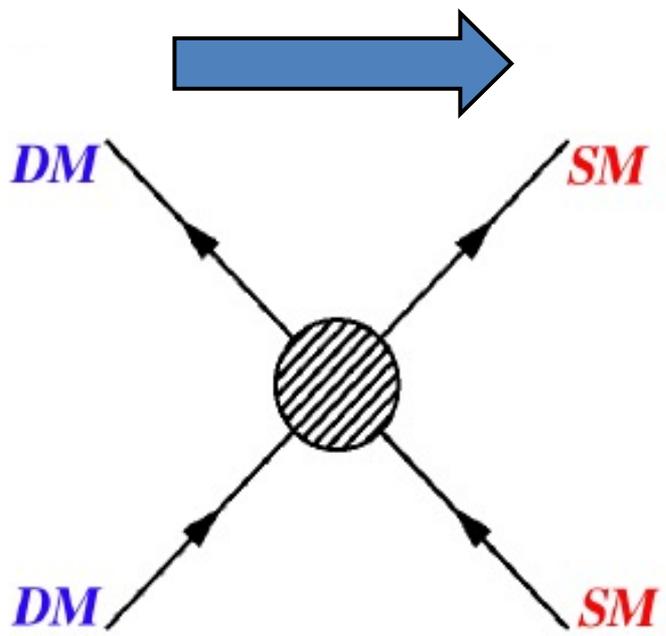
温度:  
粒子の  
運動  
エネルギー

超対称性粒子  
普通の粒子も  
同じ数だけあった

# 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

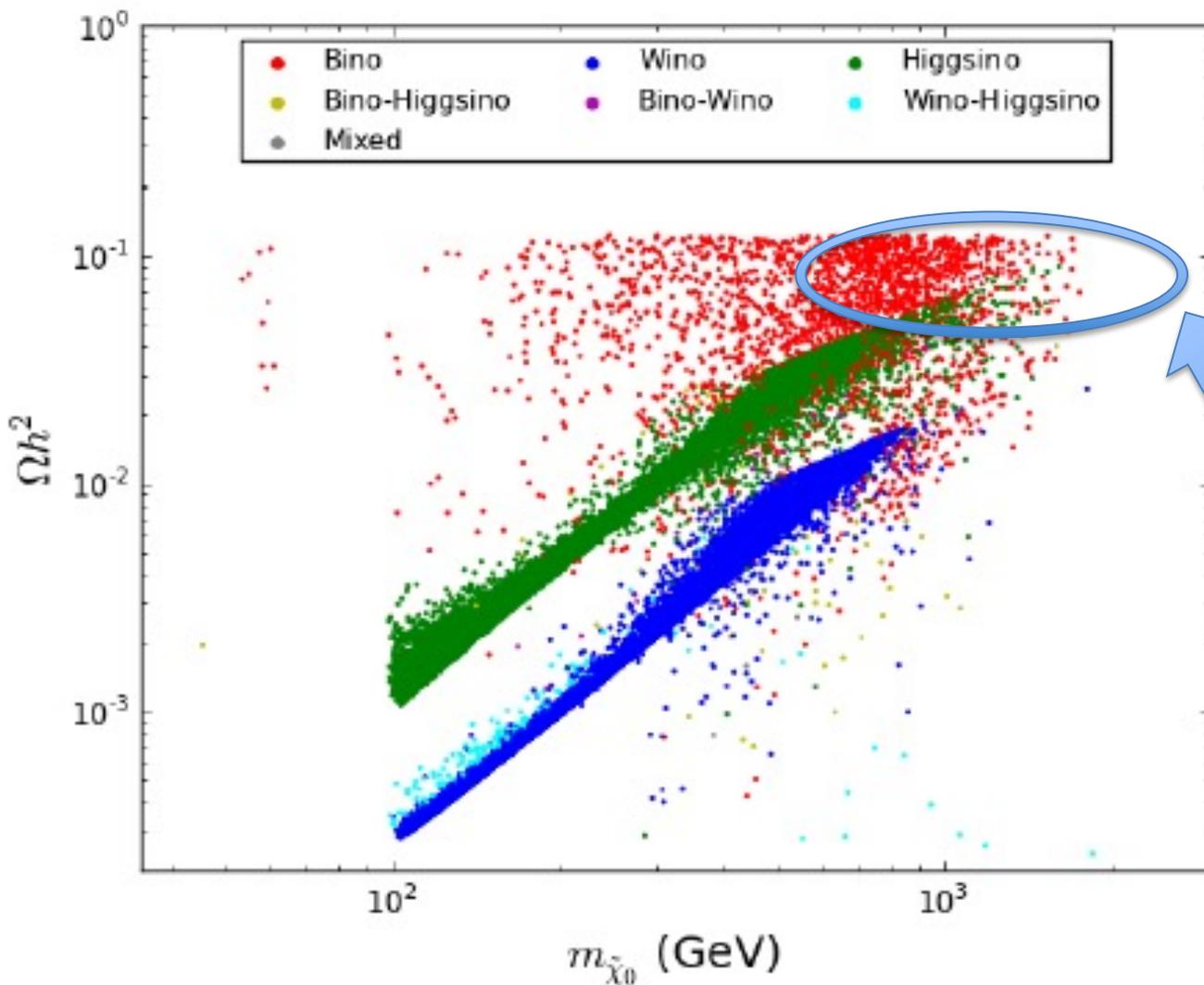
密度 × 質量

-----  
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



0.2 - a few  
TeVくらい  
Higgsの  
1-10倍くらい  
の重さの  
超対称性

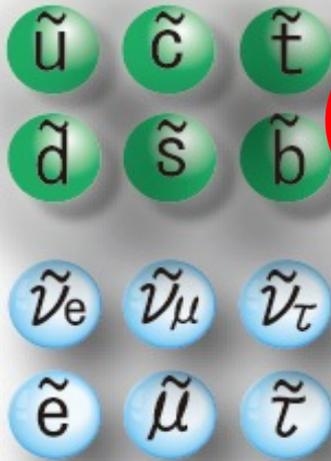
# ダークマター候補

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



ゲージノ粒子



スピン 1/2

ヒグシーノ粒子



スピン 1/2

スピン 0



スピン 3/2

重力伝搬  $M \sim 100 \text{ GeV}$

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  $M \sim eV$

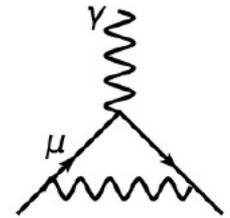
0.2- a few TeV  
重い暗黒物質がいい。

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

自然さだけがすこし  
不自然

# あらたなる証拠 g-2

$$a_\mu(\text{SM}) = 0.00116591810(43) \rightarrow 368 \text{ ppb}$$

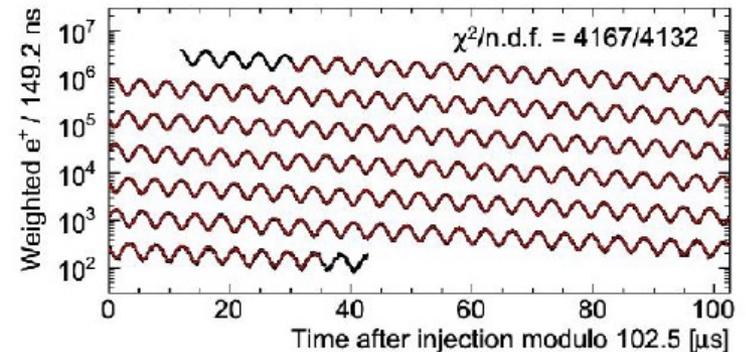
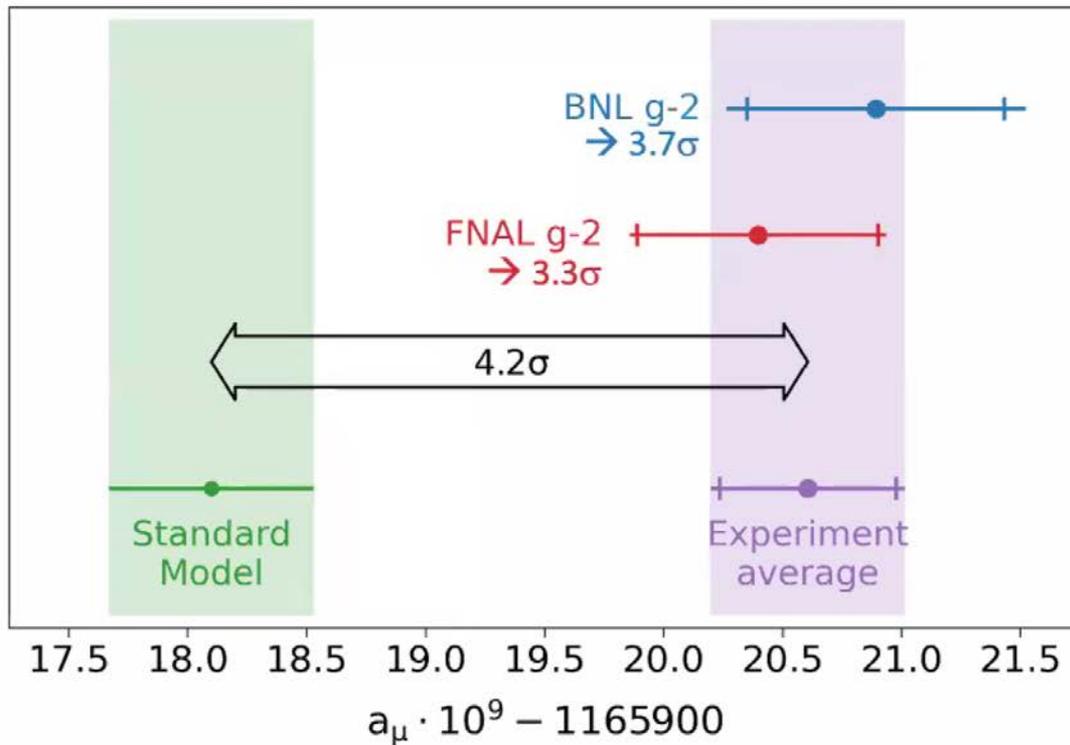


光とミュオンの結合の仕方  
正確にきまる  
(量子的な補正で少しずれる  
→ 計算できる)

Individual tensions with SM

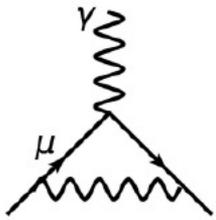
– BNL:  $3.7\sigma$

– FNAL:  $3.3\sigma$



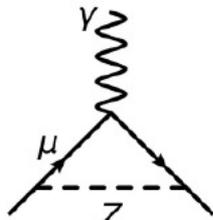
$$a_\mu(\text{Exp}) - a_\mu(\text{SM}) = 0.00000000251(59) \rightarrow 4.2\sigma$$

# Theory



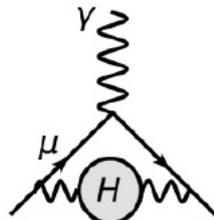
QED

Analytic



EW

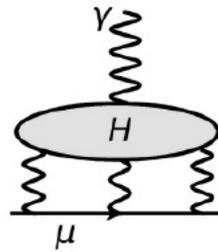
Analytic



Hadronic vacuum polarization (HVP)

Phenomenological

Lattice

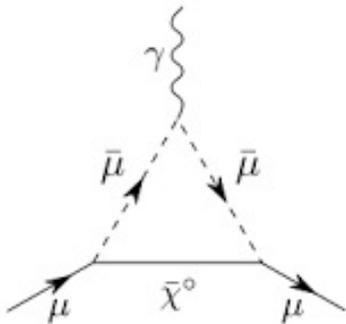


Hadronic light by-light (HLbL)

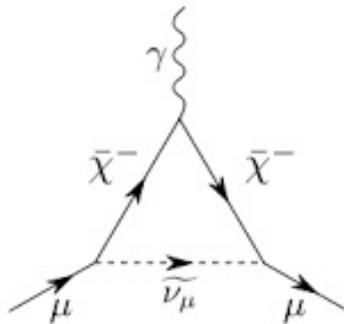
Pheno.

Lattice

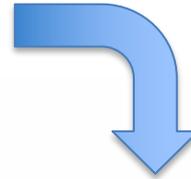
超対称性粒子が  
量子補正で利いている？



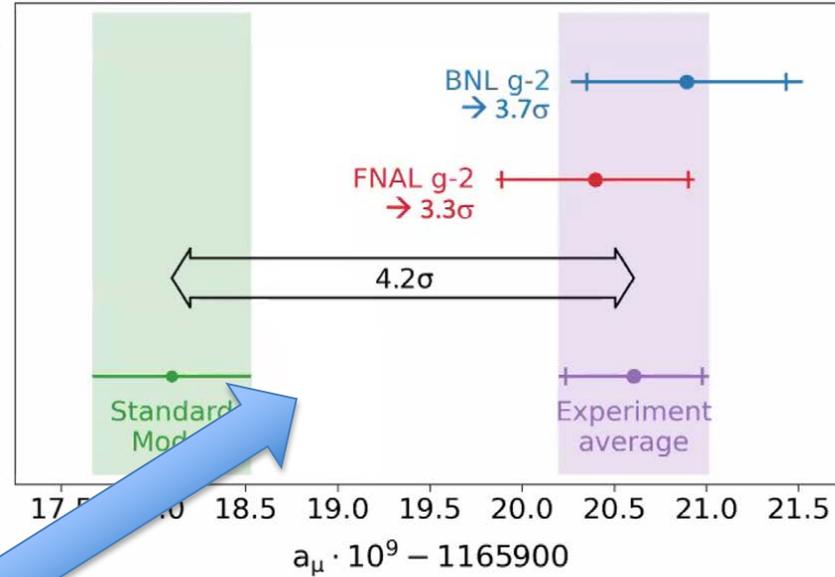
Smuon / neutralino が  
軽いタイプ



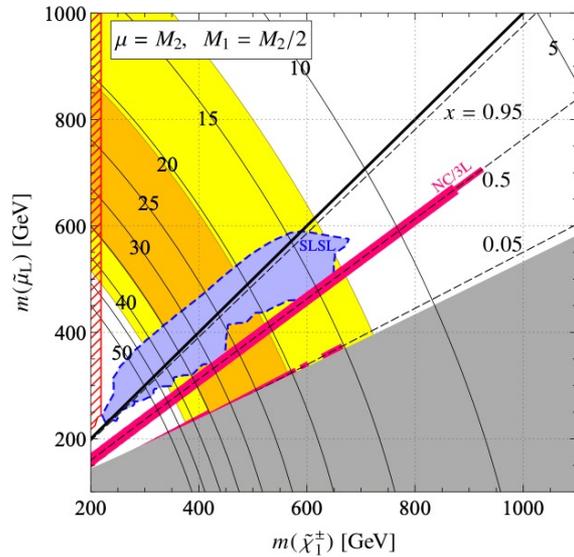
chargino が  
軽いタイプ



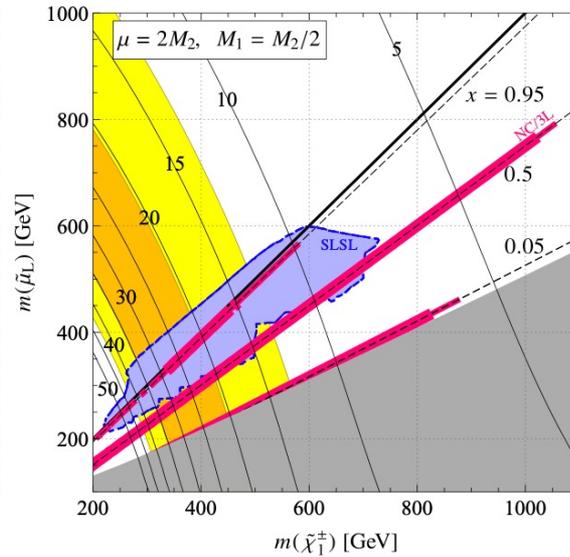
$$a_\mu(\text{SM}) = 0.00116591810(43) \rightarrow \dots$$



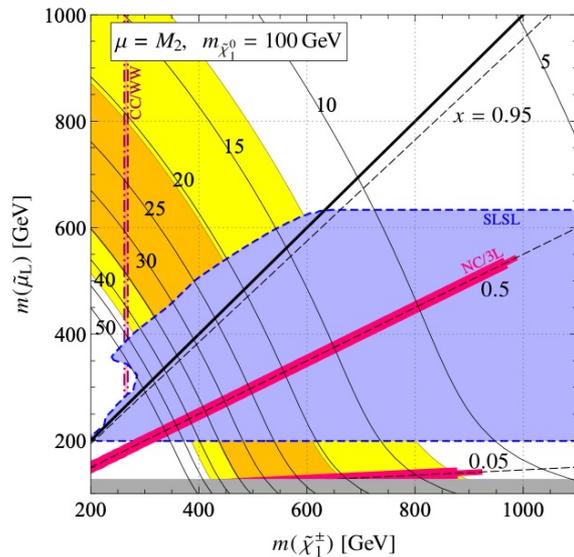
$$a_\mu(\text{Exp}) - a_\mu(\text{SM}) = 0.0000000025$$



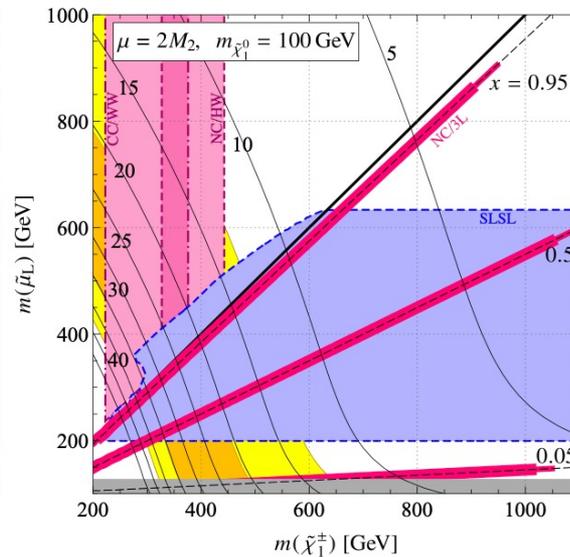
(A)  $\mu = M_2, M_1 = M_2/2$



(B)  $\mu = 2M_2, M_1 = M_2/2$

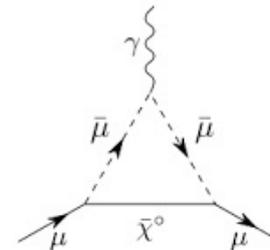


(C)  $\mu = M_2, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 100 \text{ GeV}$

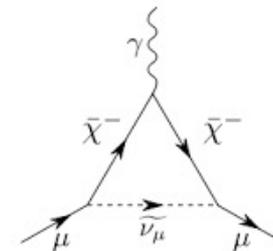


(D)  $\mu = 2M_2, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 100 \text{ GeV}$

- 1) Smuon 200-300 GeV  
Bino-Like DM  
 $\Delta M \sim 50 \text{ GeV}$   
Co annihilation



- 2) Chargino 350-500 GeV  
Neutralino  $\Delta M < 100 \text{ GeV}$   
Co annihilation





# SUSY

# @



# 狙う候補

wino < 3TeV

いままで  
これがメイン

Glauino < 20TeV

Higgsino 0.5-1000 GeV

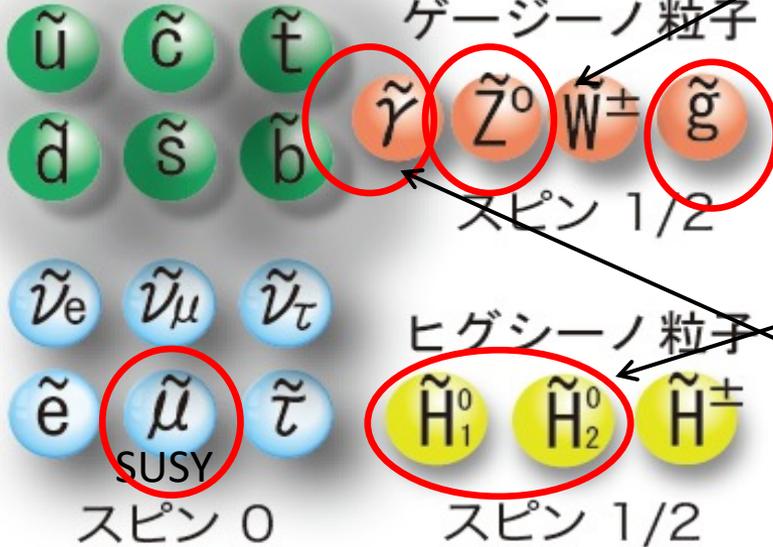
Bino 200 -300 GeV

超対称性粒子

ゲージノ粒子

ヒグシーノ粒子

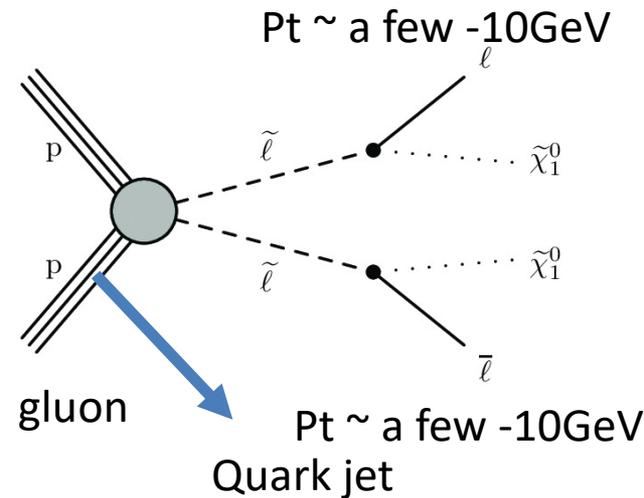
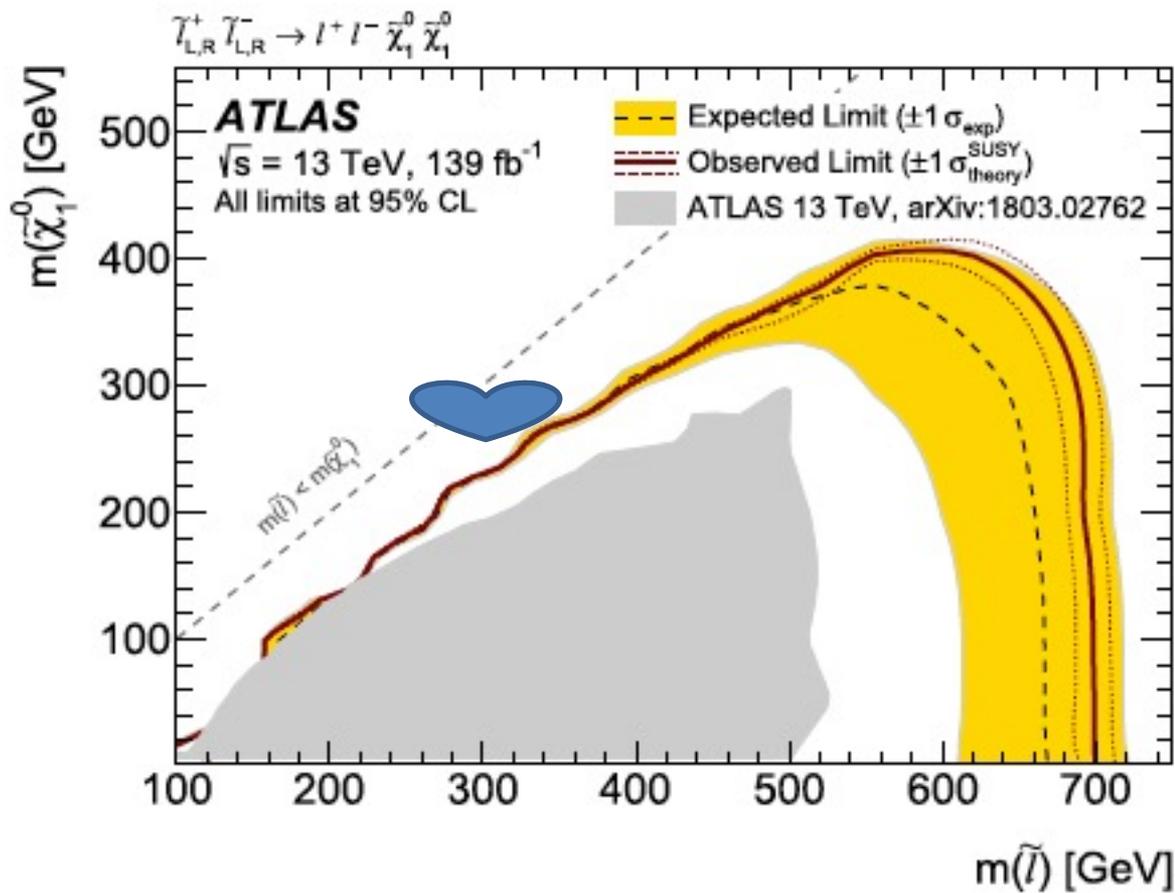
スカラーフェルミオン



スカラー レプトン  
200 -300 GeV

いまからは、これを  
探そう！！！！

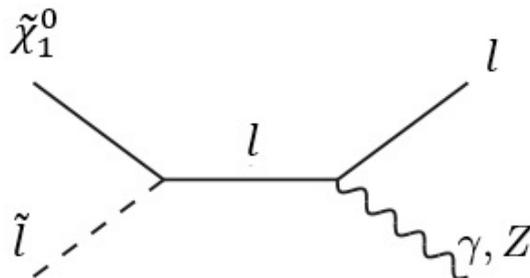
探して無かったの？

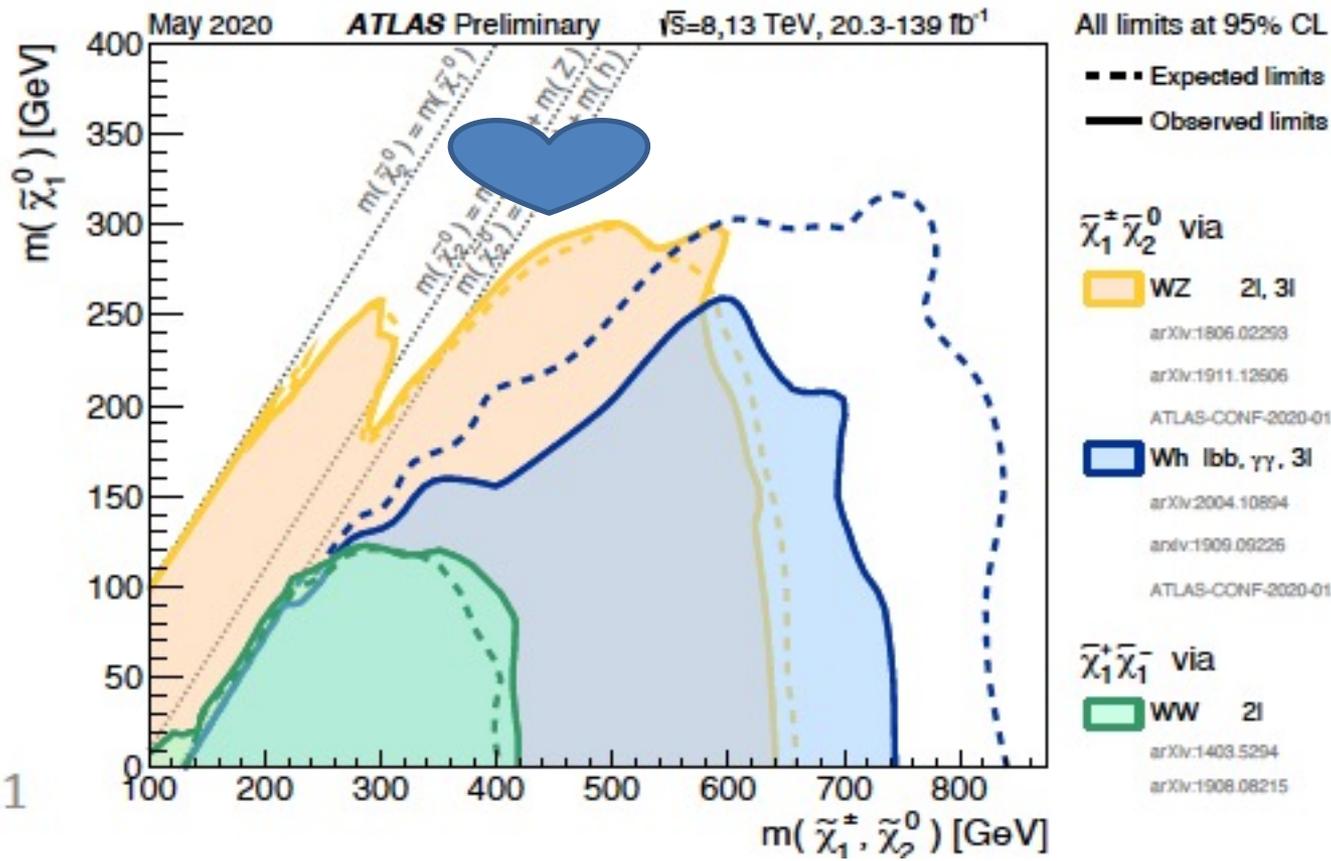


(c)  $\tilde{l}\tilde{l}$  production

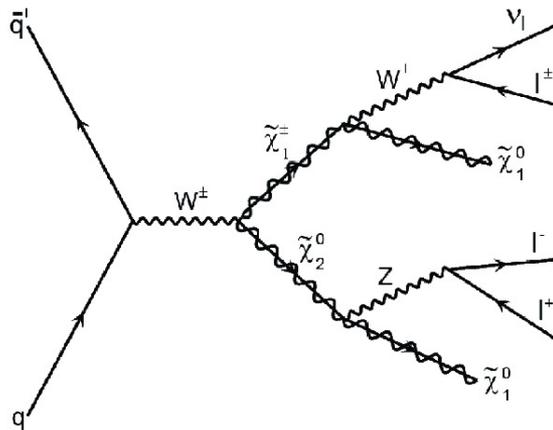
こんな反応で、ちょうど  
いい暗黒物質の密度になる

こんなニッチなところ？

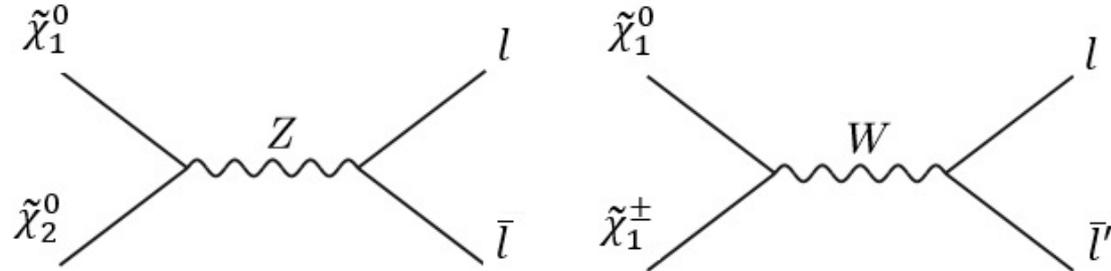




/11



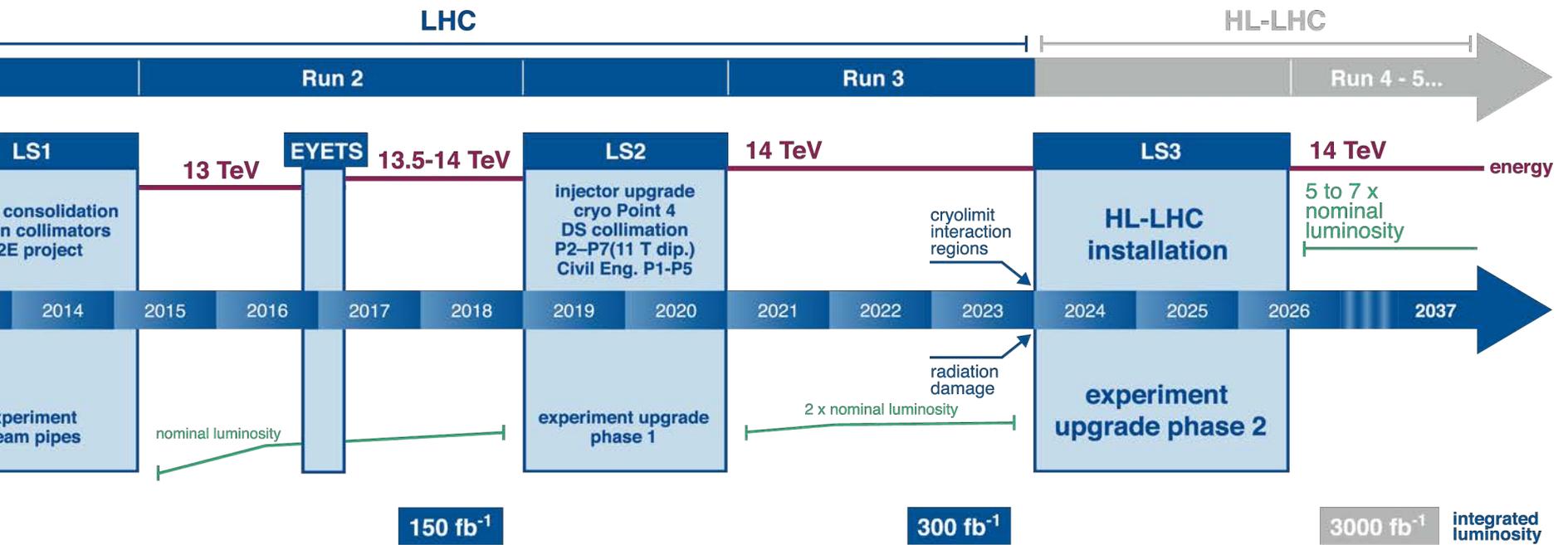
こんなニッチなところ？



# LHC Perspective

2017,18 13.5-14TeV  
 $L \sim 30-50 \text{ fb}^{-1} / \text{year}$

## LHC / HL-LHC Plan



データがたくさん必要

# 最新素粒子解説 (アドバンストコース) 素粒子よろず物語 (LHC

毎週 水曜日 17:00-18:30 オンラインで開催予定

同じ ZOOM

初回 5月12日予定 (以下の予定は暫定です)

5/12 予定

- 1 標準理論と今のエクセス [PDF \(更新予定\)](#)
2. ヒッグス機構とその発見の意味 [PDF \(更新予定\)](#) [書き物](#)

5/19 予定

3. 超対称性 旧約聖書 (Before Higgs) [PDF\(更新予定\)](#)

5/26 予定

- 4 超対称性 新約聖書 (After Higgs) [PDF \(更新予定\)](#) [書き物](#)

- 5 緊急議論 g-2をうけてLHC・ILC・FCCで どうする？

6/2 予定

- 6 真空を探る 非加速器 [PDF \(更新予定\)](#)

5/?? 予定

5. 暗黒物質 (非加速器) PDF

6/9 予定

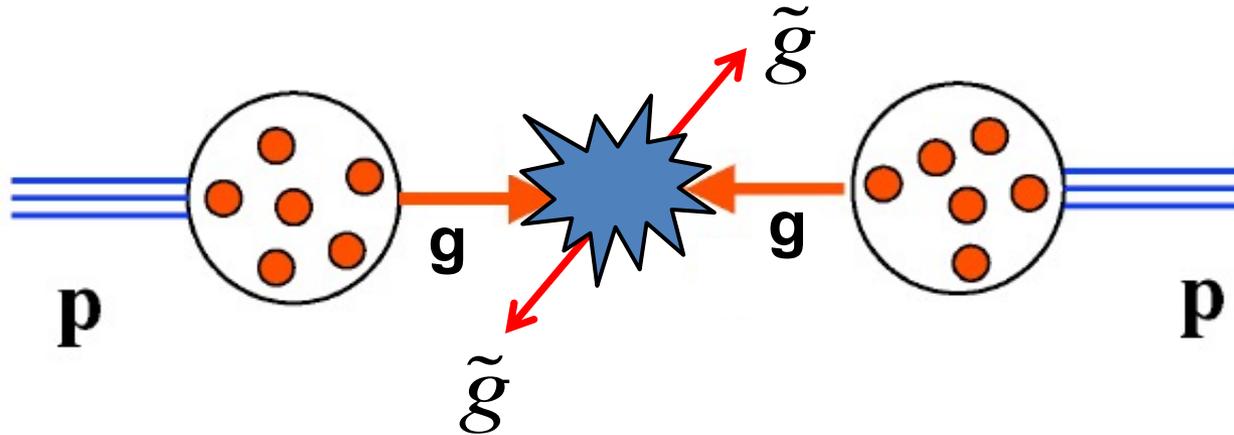
6. 時空：余剰次元とミニブラックホール [PDF\(更新予定\)](#)

6/16 ?

偽物ブラックホールの物理

おまけ

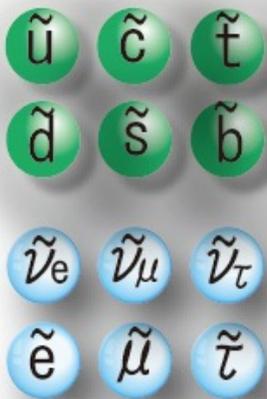
# LHCでの超対称性粒子の生成



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.



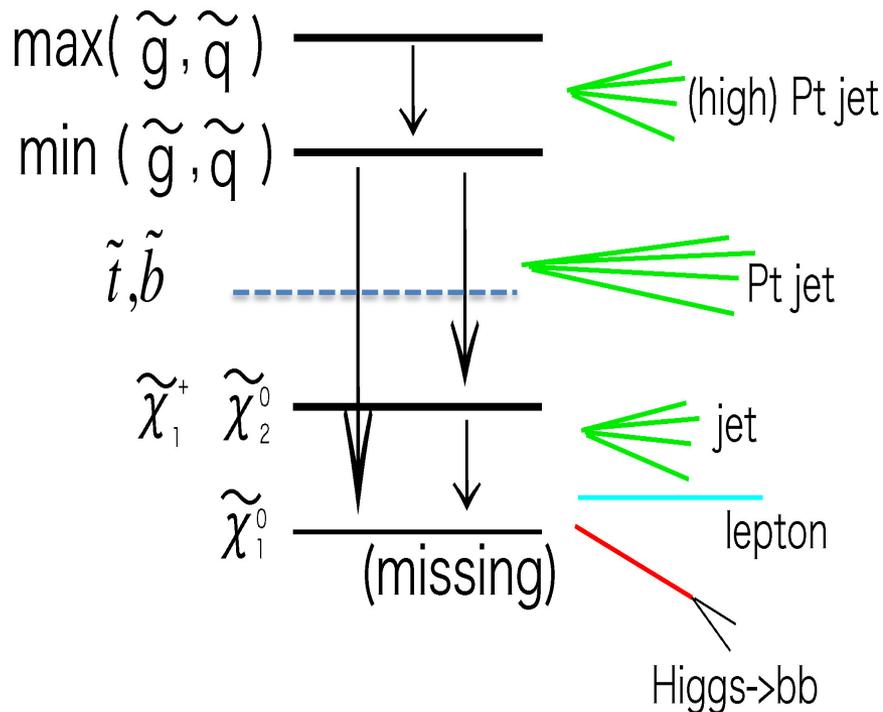
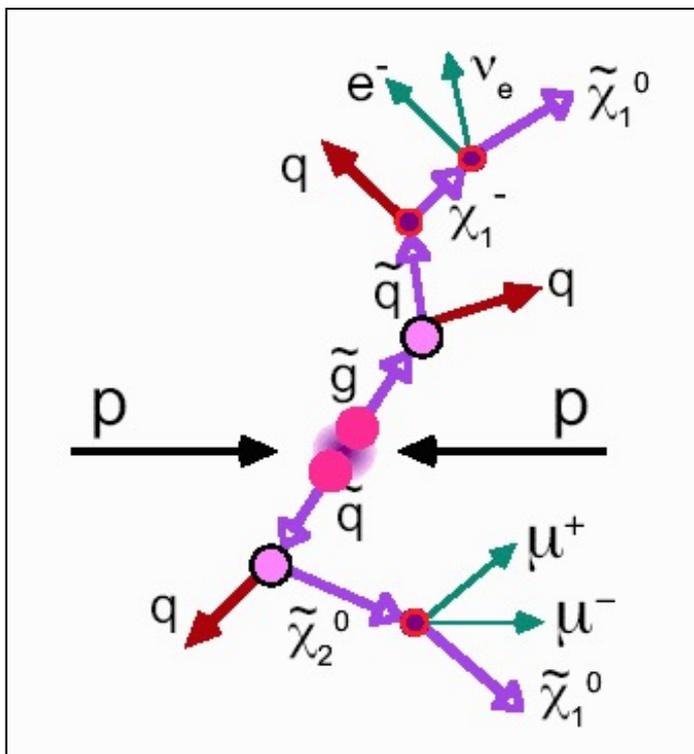
$q\bar{q}$  prod.



ペアーで出来る

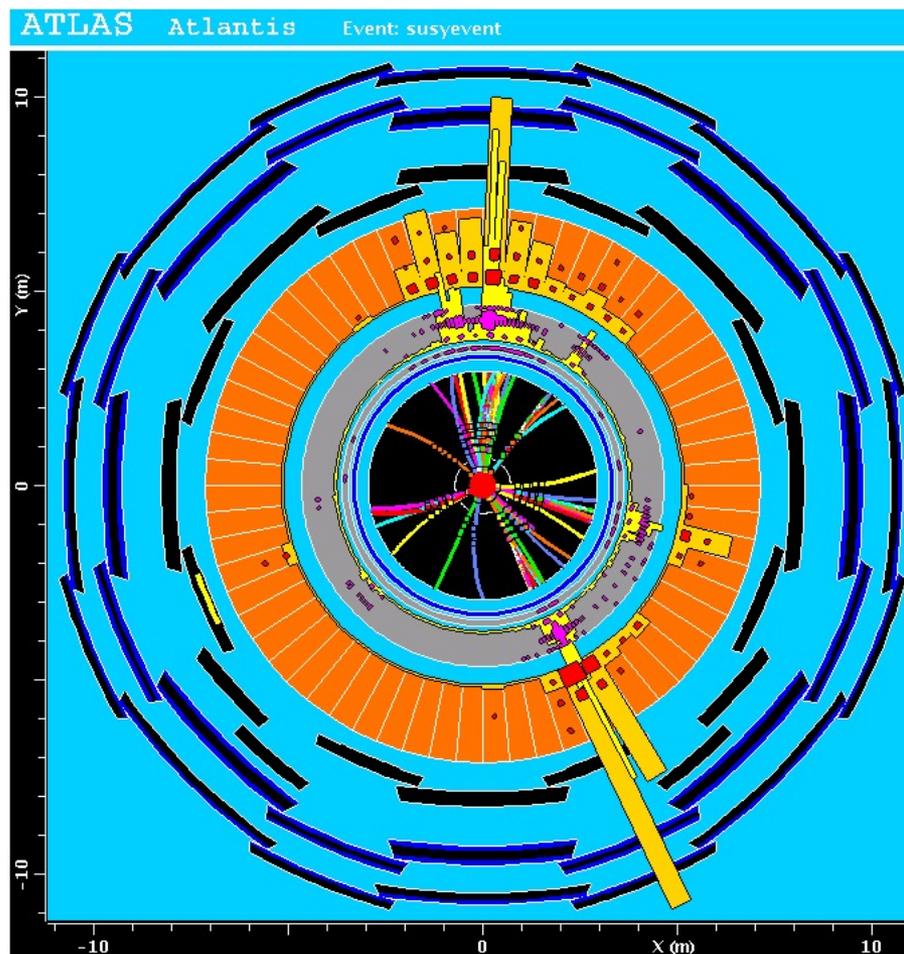
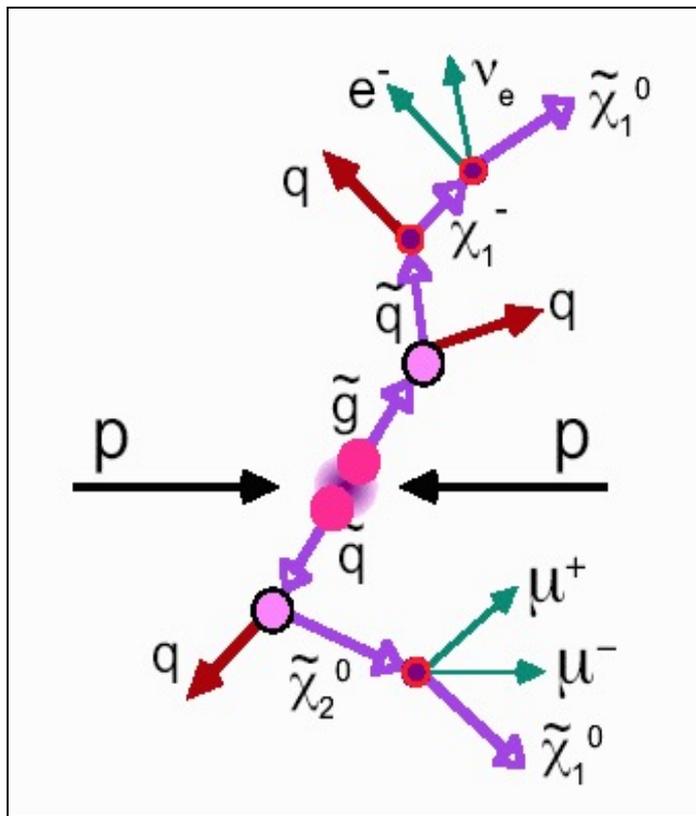
# 超対称性粒子の崩壊

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。



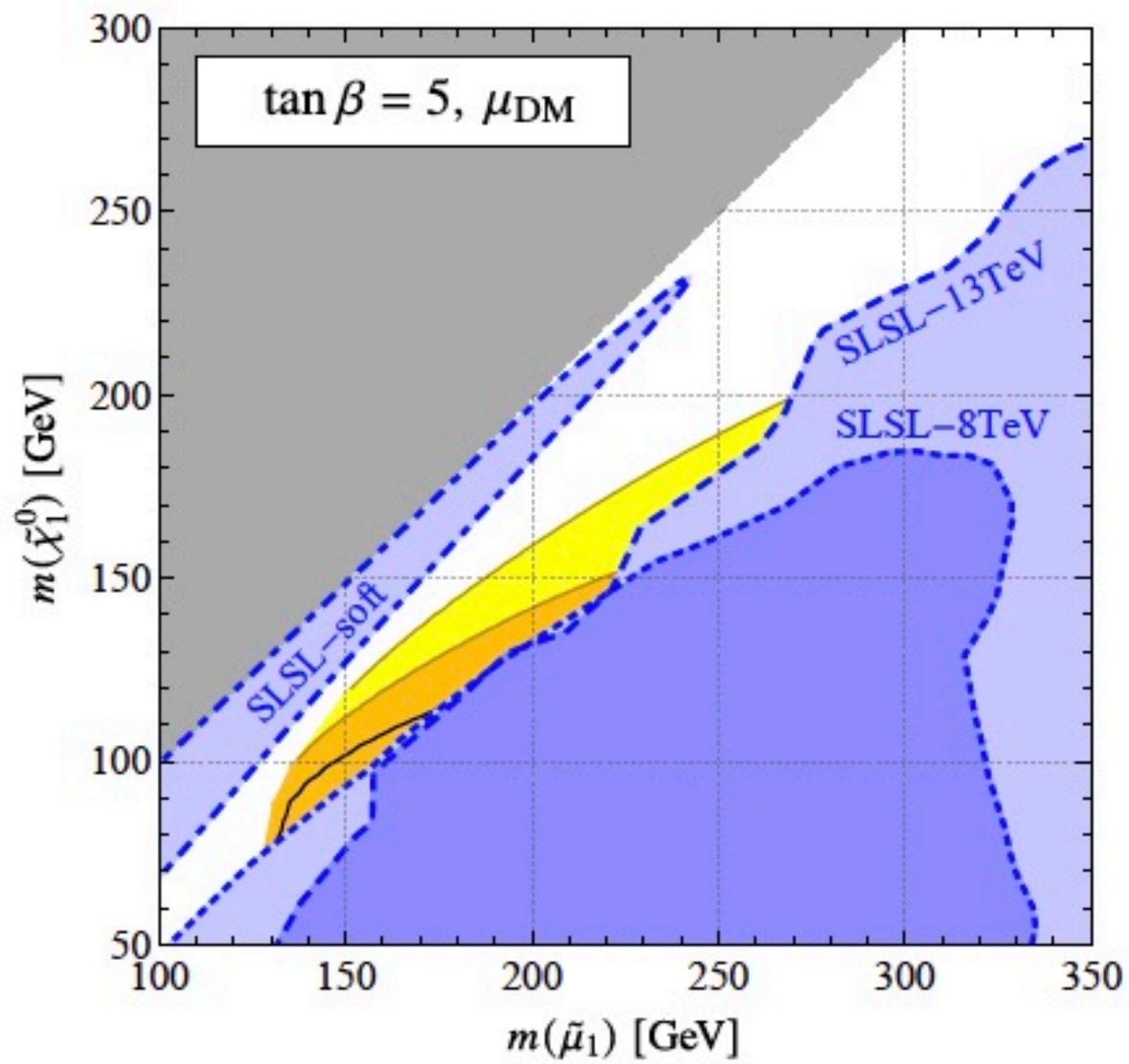
特徴は、1) たくさんの粒子 + 2) 見えない粒子(暗黒物質)によるアンバランスさ  
LHCはDark Matter 工場(factory)

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。



(予想図)

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)



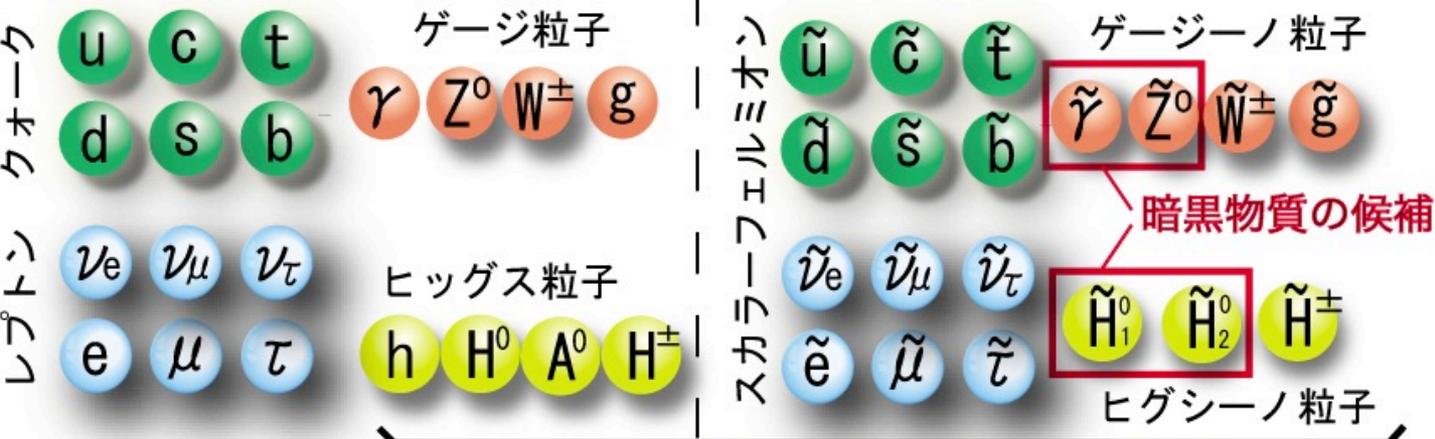
# SUSY: 超対称性粒子のテーブル

| Ordinary Particles |  | SUSY Particles |  |
|--------------------|--|----------------|--|
| S=1/2              | charged lepton: e, $\mu$ , $\tau$<br>neutrino: $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$<br>quark: u, c, t<br>d, s, b | <b>S=0</b>     | charged scalar lepton: $\tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}$<br>scalar neutrino: $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$<br>scalar quark: $\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}$<br>d, s, b |
| S=1                | photon: $\gamma$ ( $B^0$ and $W^0$ )<br>Weak Boson: $W^\pm, Z$<br>gluon: g                             | <b>S=1/2</b>   | Bino: $\tilde{B}^0$<br>Wino: $\tilde{W}^\pm, \tilde{W}^0$<br>gluino: $\tilde{g}$   |
| S=0                | Higgs: h, H, A, $H^\pm$<br>2HD = $2 \times 2 \times 2 - 3 = 5$ Higgs                                   | <b>S=1/2</b>   | Higgsino: $\tilde{H}_1^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$<br>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

## (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**

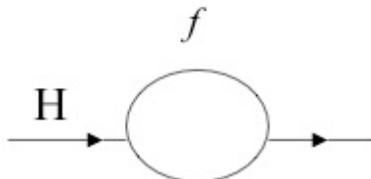
(1) そもそも、何故こんなに違う二つのスケールが存在するのか？

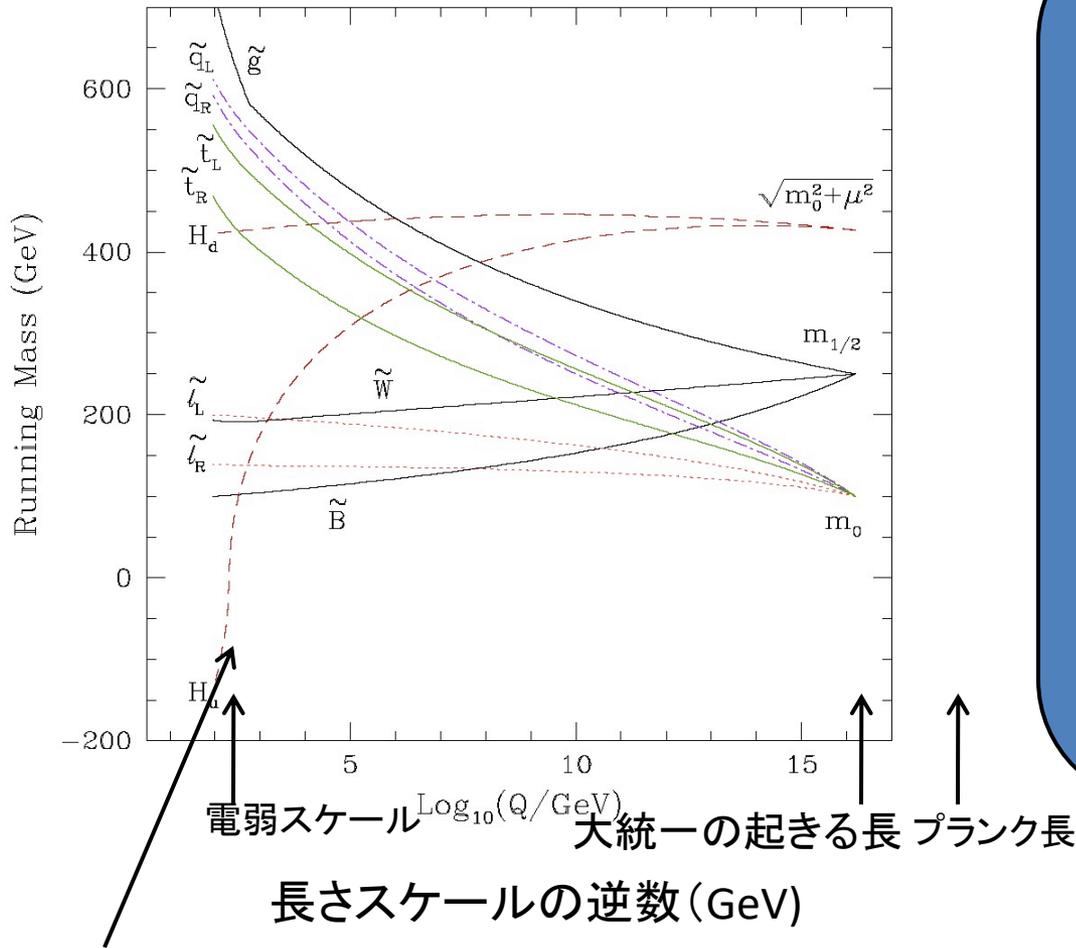
(2) 「神の見えざる手」で2つスケールを作っても、

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)

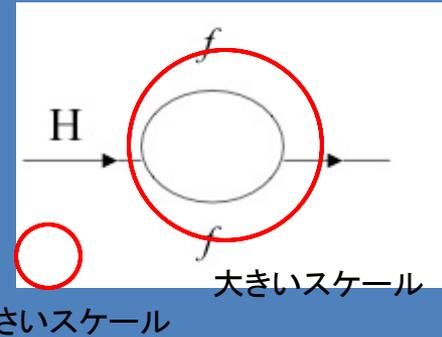
はじめに話したのは(2)


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



## 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

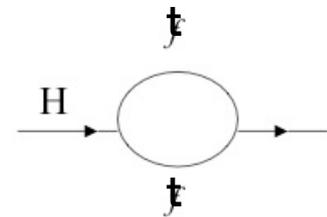


中を飛ぶ量子的粒子の許される運動量がスケールで変化  
登場人物決めと後は計算するだけ

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( $10^{-17}m$ )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。

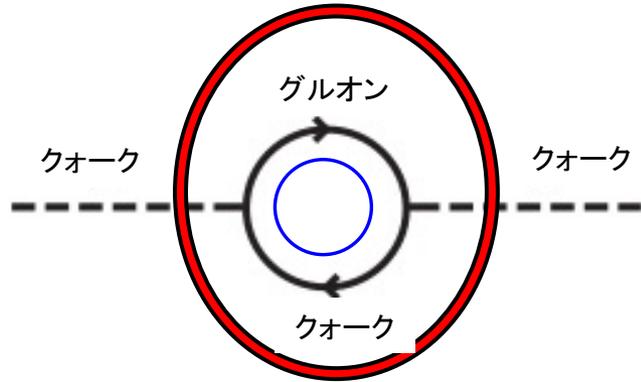
Planck scaleが本質で $Y_t=1$  から自発的対称性の破れでHiggs場が凝縮することを予言

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)

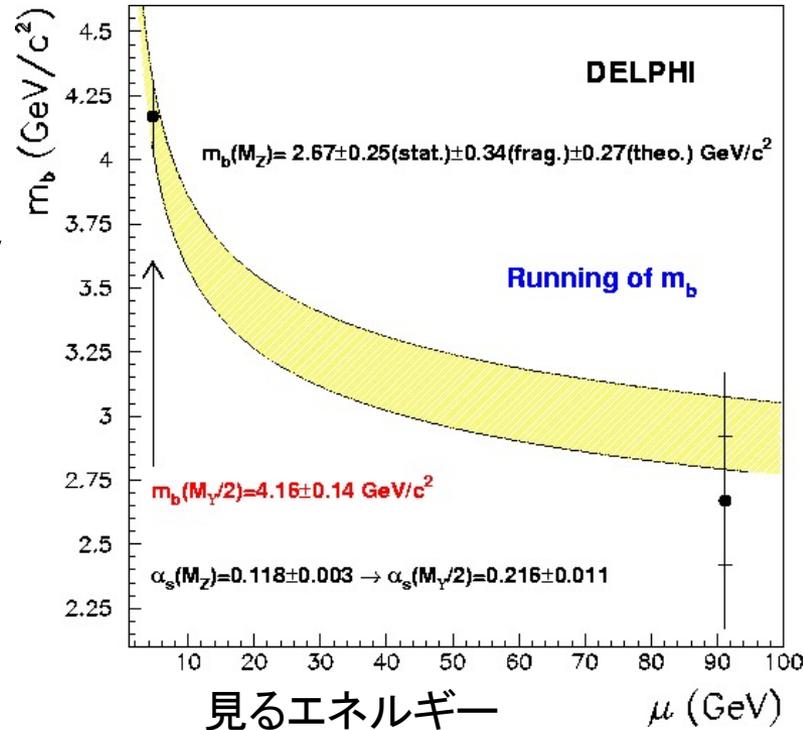


高いエネルギーで観測(青い○)  
 この円より小さい領域の量子効果だけ  
 例えば、絵の量子効果は含まれない。  
 低いエネルギーで観測(赤い○)  
 絵の量子効果は含まれる

実験データ

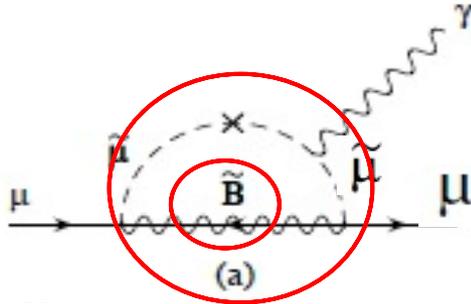


ボトムの  
質量



# 結合定数は定数でない: 量子的な効果で変化する

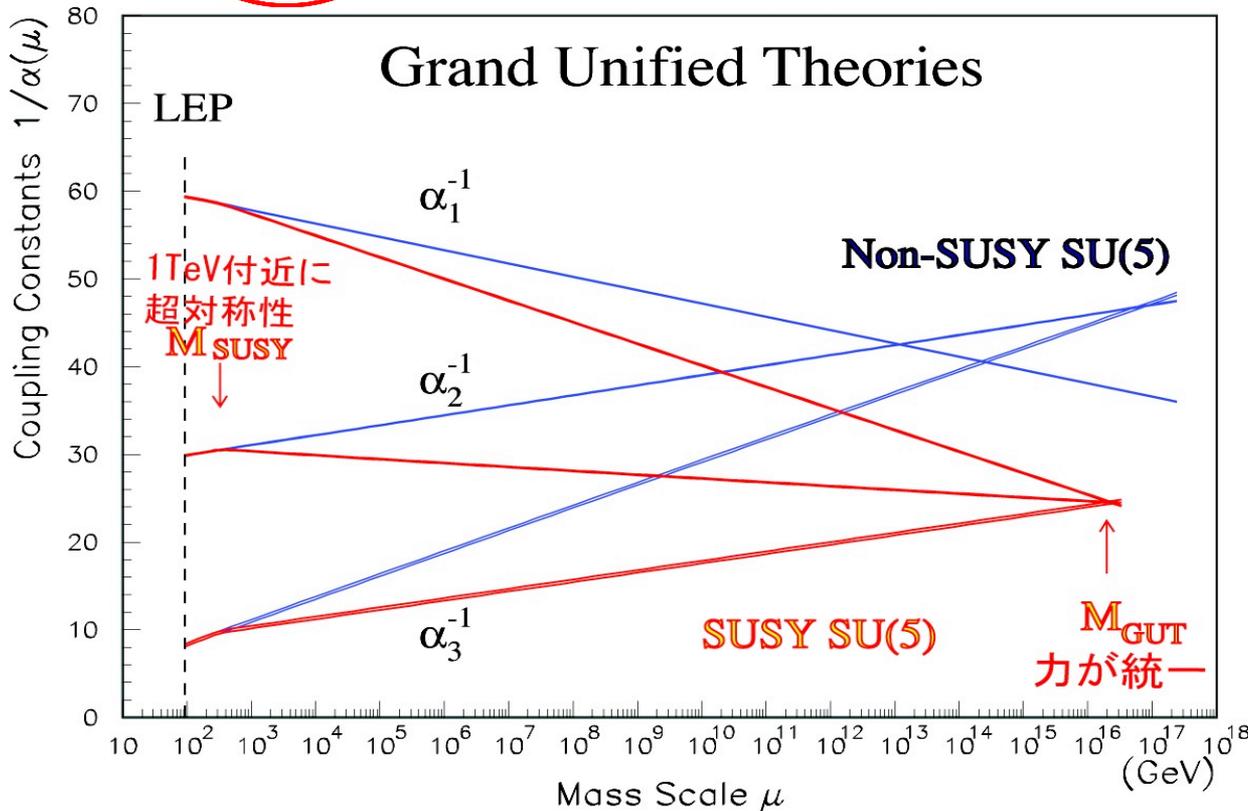
Mass scale  $\mu \sim 1/R$ (見るスケール)



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。

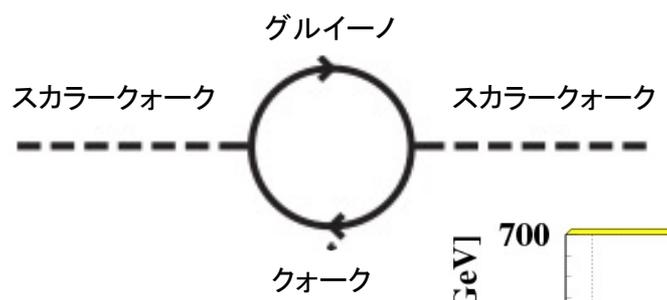
**→ 力の大統一 (GUT)**



# 4. 強い力(カラー)は太る



重い:強い



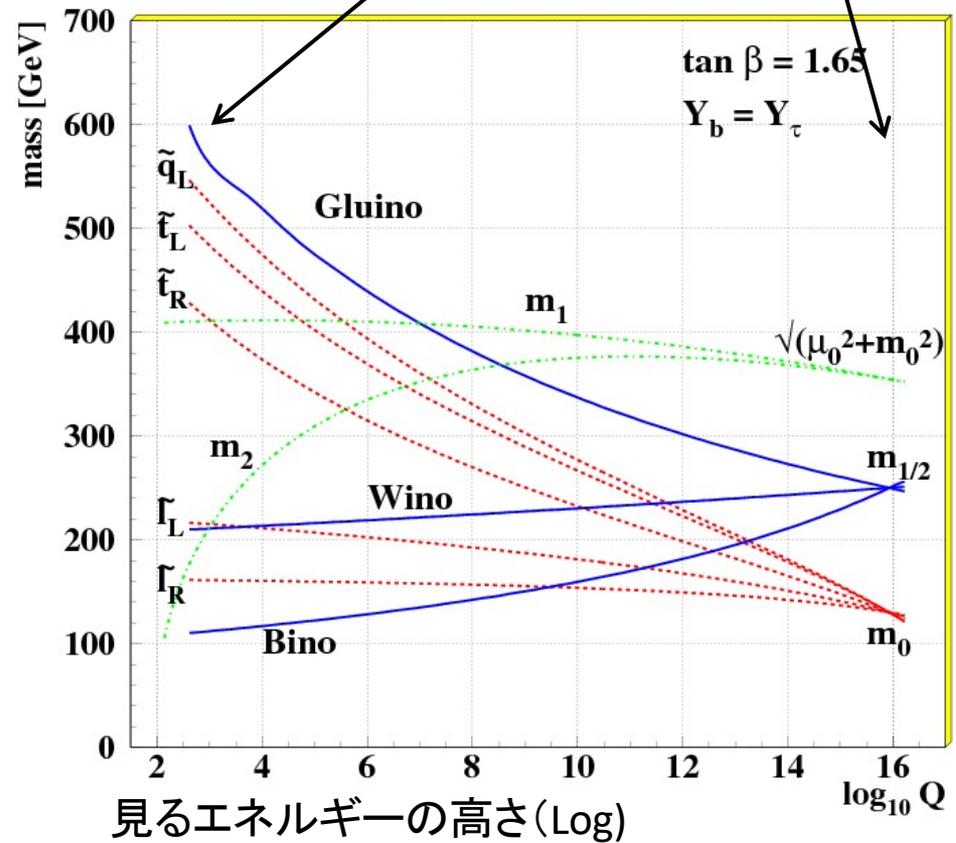
LHCの  
エネルギー

大統一  
のエネルギー



スカラークォーク  
グルイーノ

質量

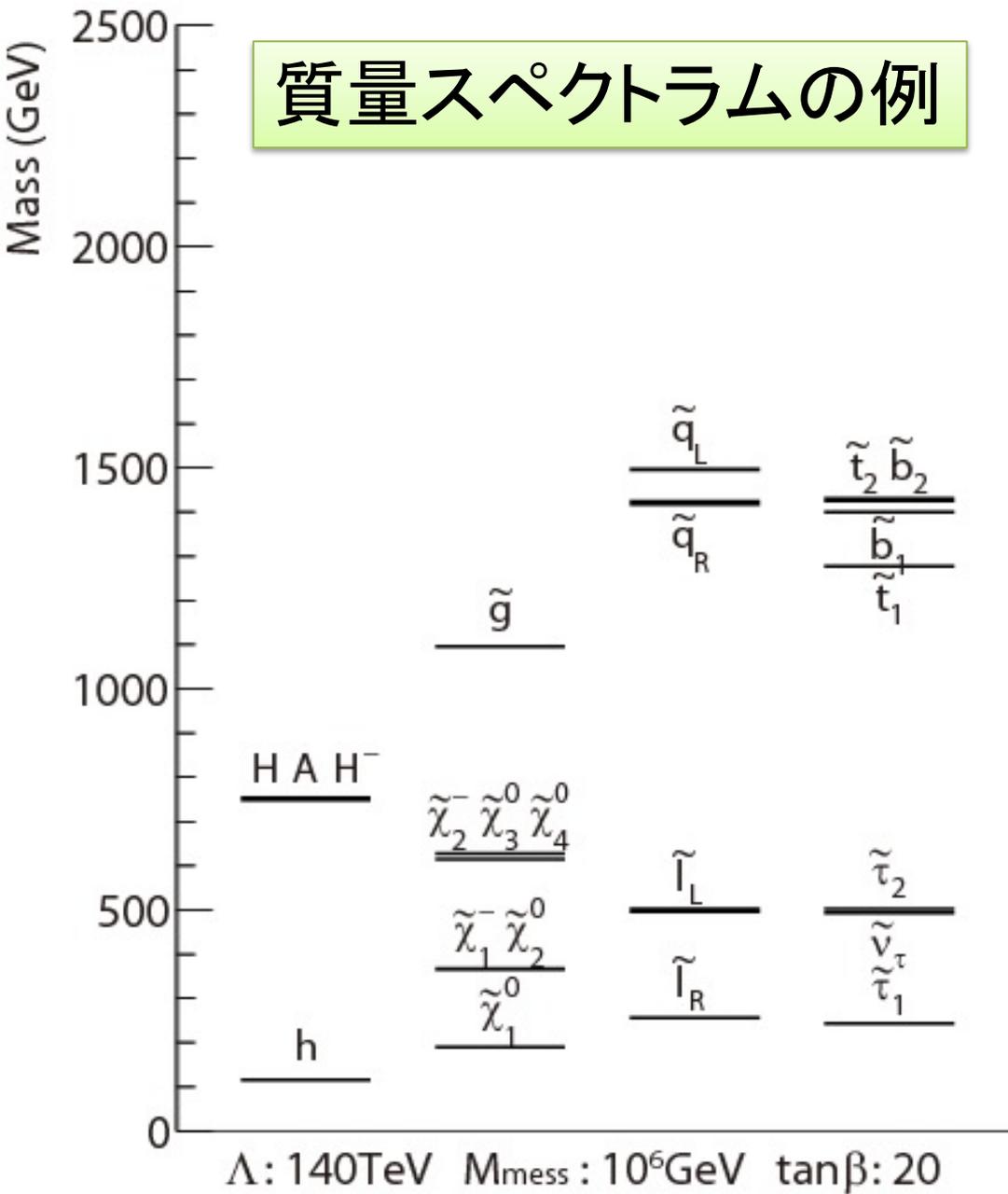


スカラー  
レプトン

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

色あり  
強い力

グルイーノ



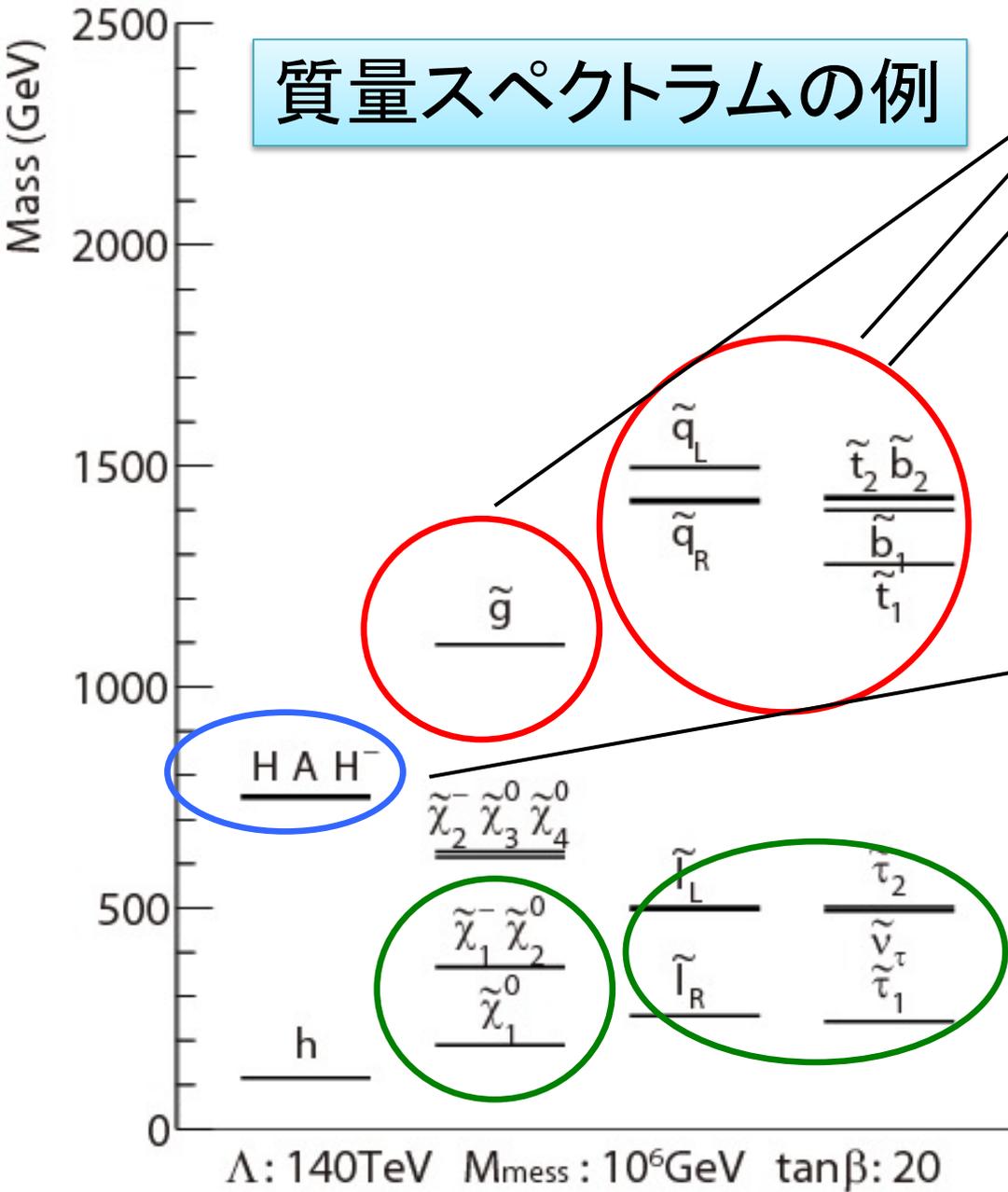
スカラー レプトン

色無し  
電弱力

チャージーノ  
ニュートラリーノ



# 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)

- 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)

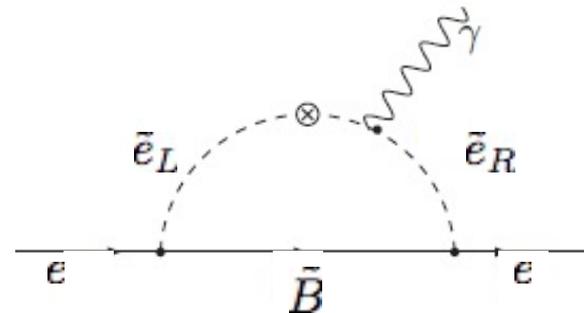
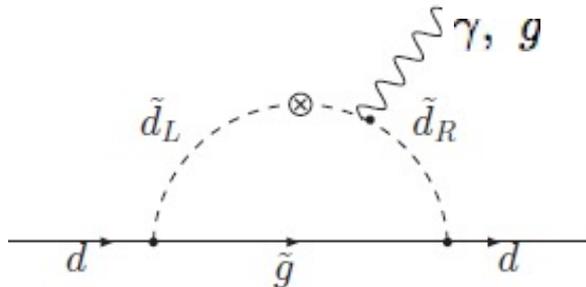
No reason why  $\phi=0 \sim O(1)$  parameter  $\rightarrow$  SUSY has many CP violated term.  
 If  $\phi=0$  (Min. CP violation) then, SM CP violated phase will contribute.

Very roughly

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

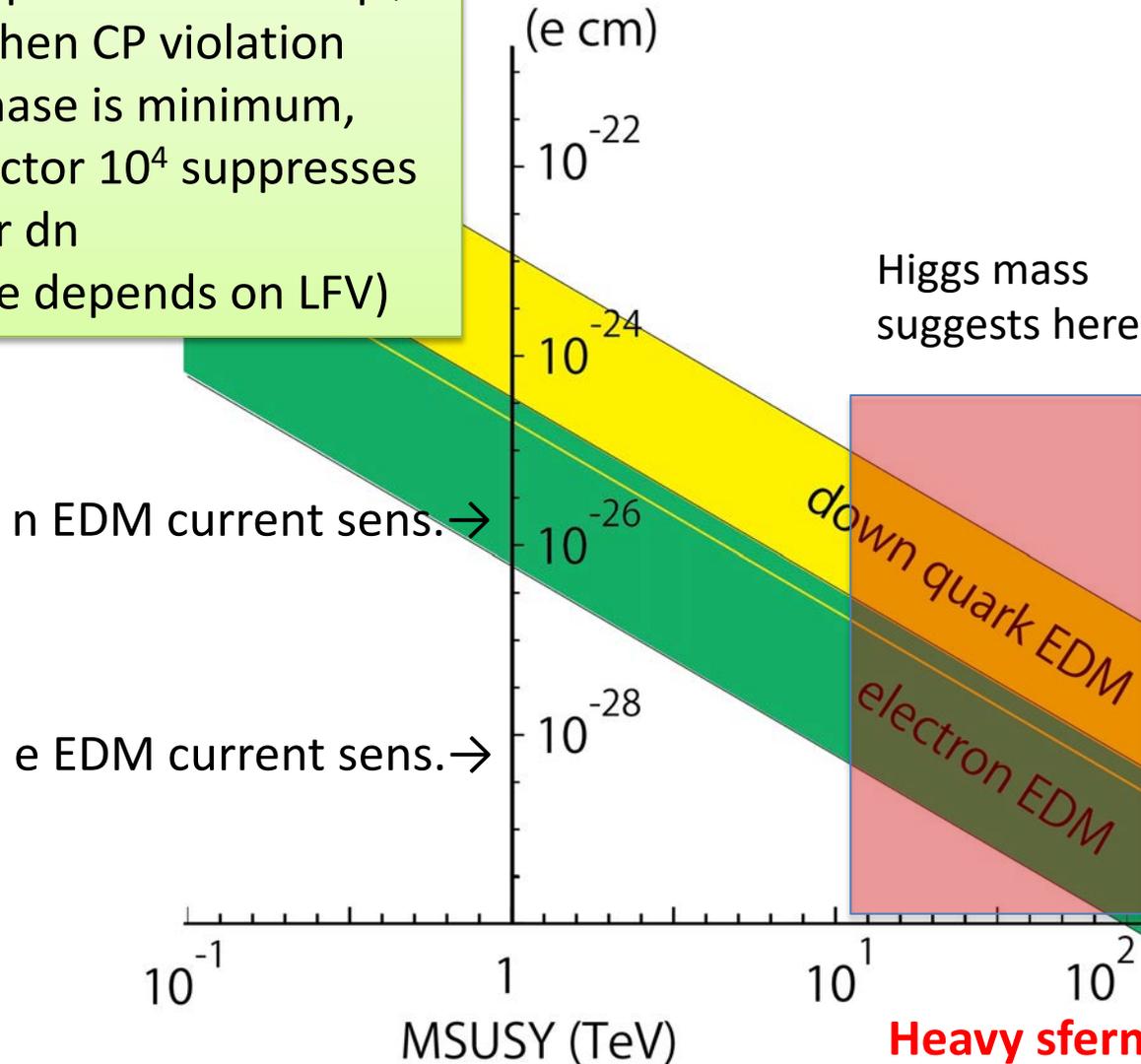
$$d_n \sim 3 \cdot 10^{-26} \sin\phi \text{ (Ms)}^{-2} \tan\beta$$

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 $10^{-40}$

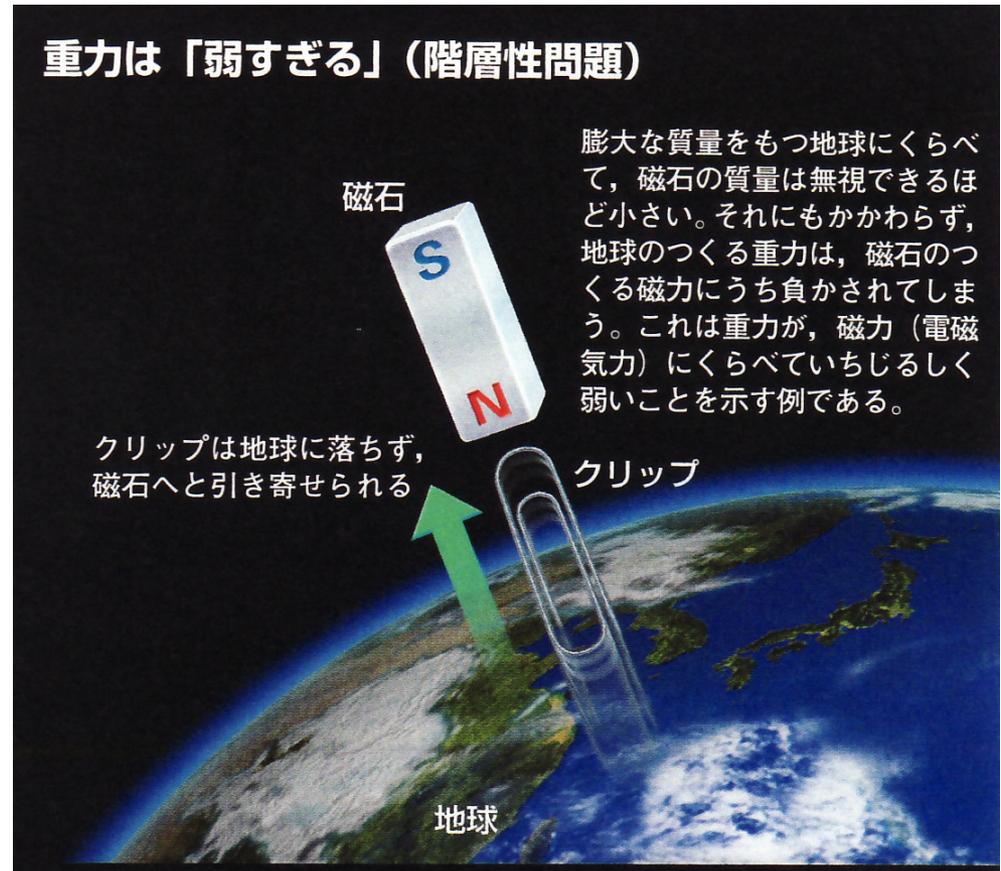
? !



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)



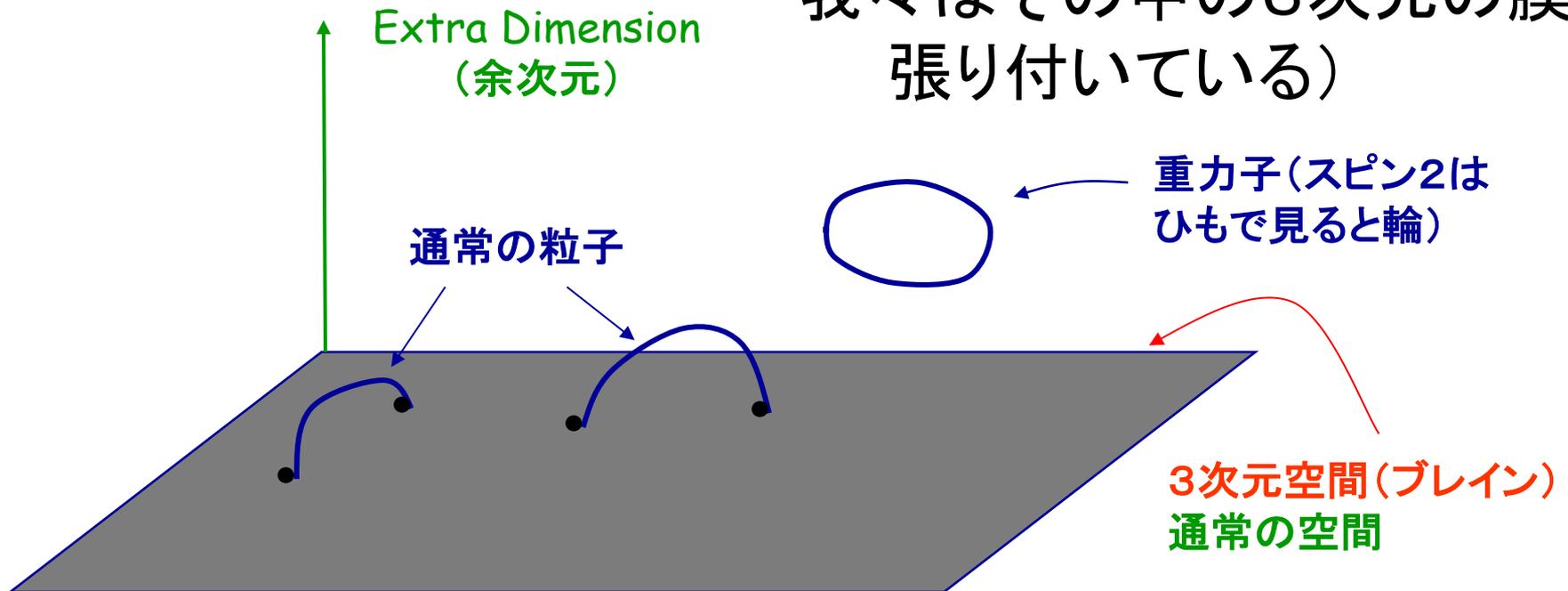
でもケチな磁石にもまけてしまう。

# 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

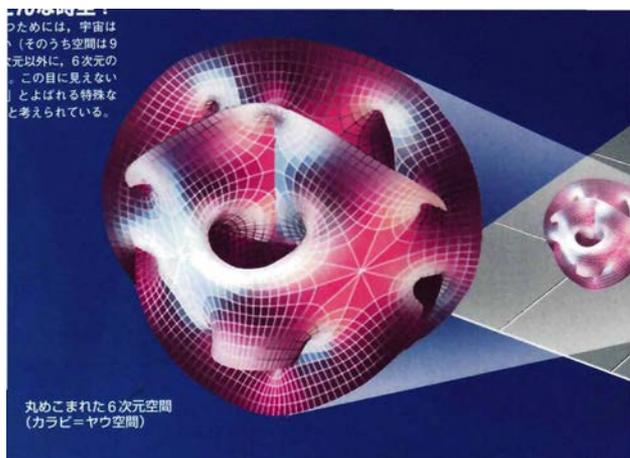
(空間は9次元(ヒモ理論))

我々はその中の3次元の膜に  
張り付いている)



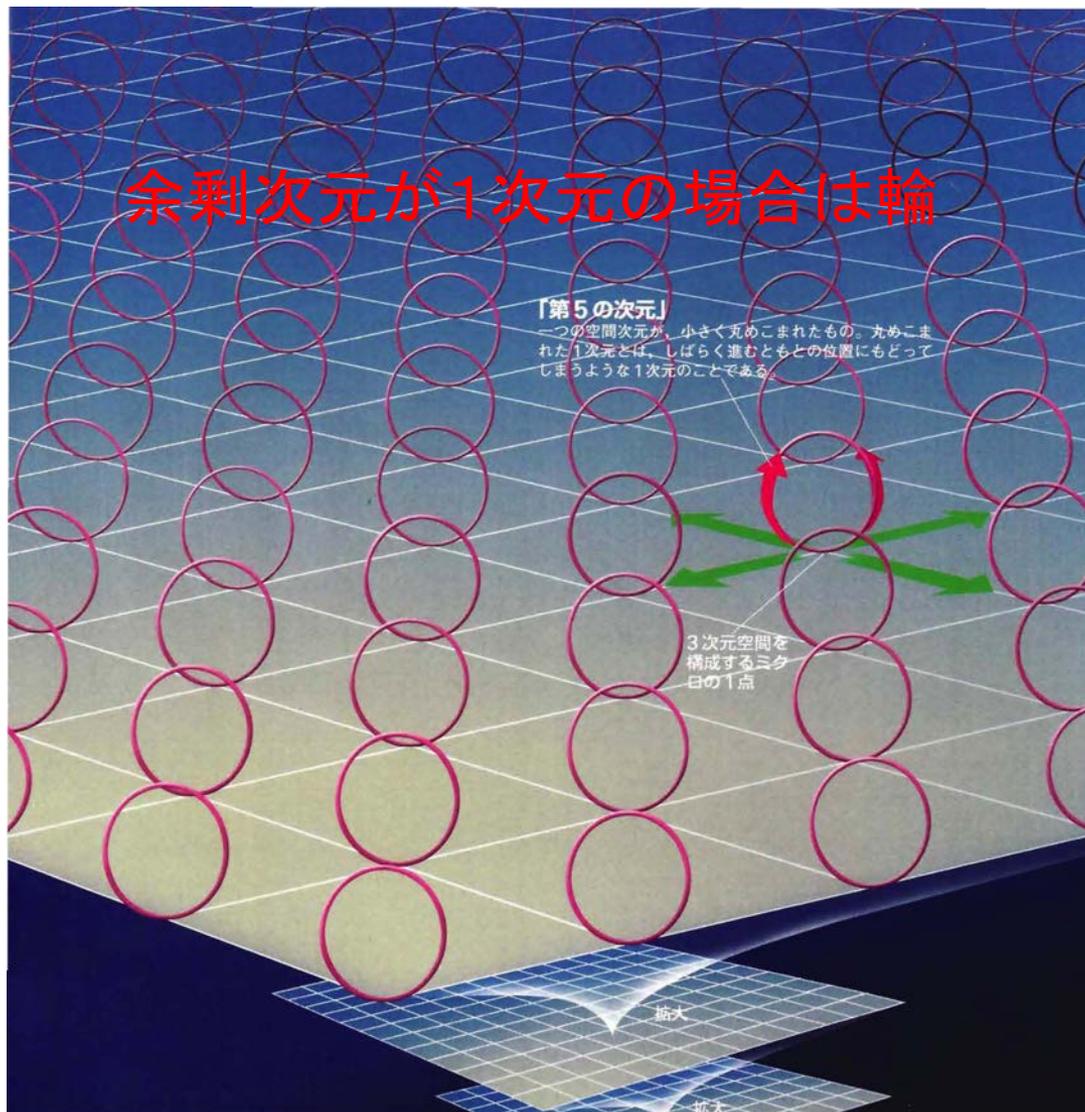
重力子は、広い空間を自由に行き来して、我々は3次元の膜にはりついている。  
重力子がこの膜に来たときだけ感じる → 重力が弱くみえる。

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

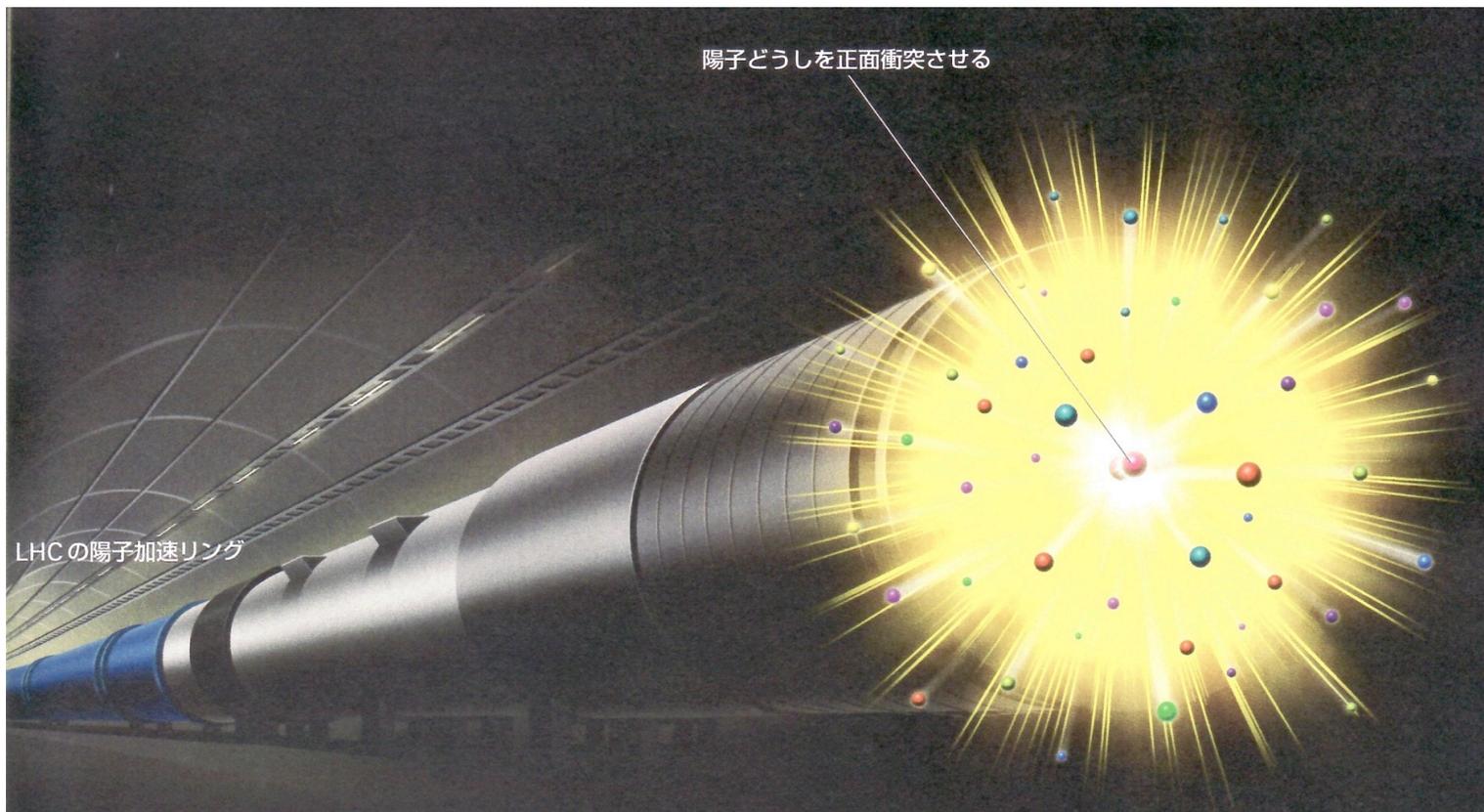
これの大きさが不明  
 $10^{-35}\text{m}$  くらいかもしれないし  $10^{-19}\text{m}$   
と大きいかもしれない



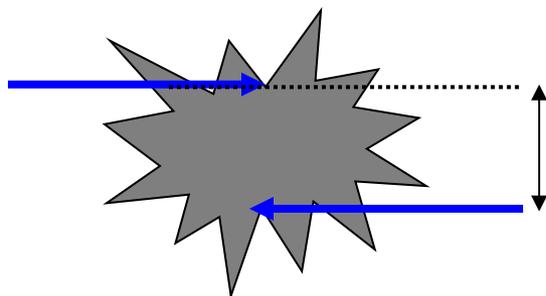
余剰次元が1次元の場合は輪

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

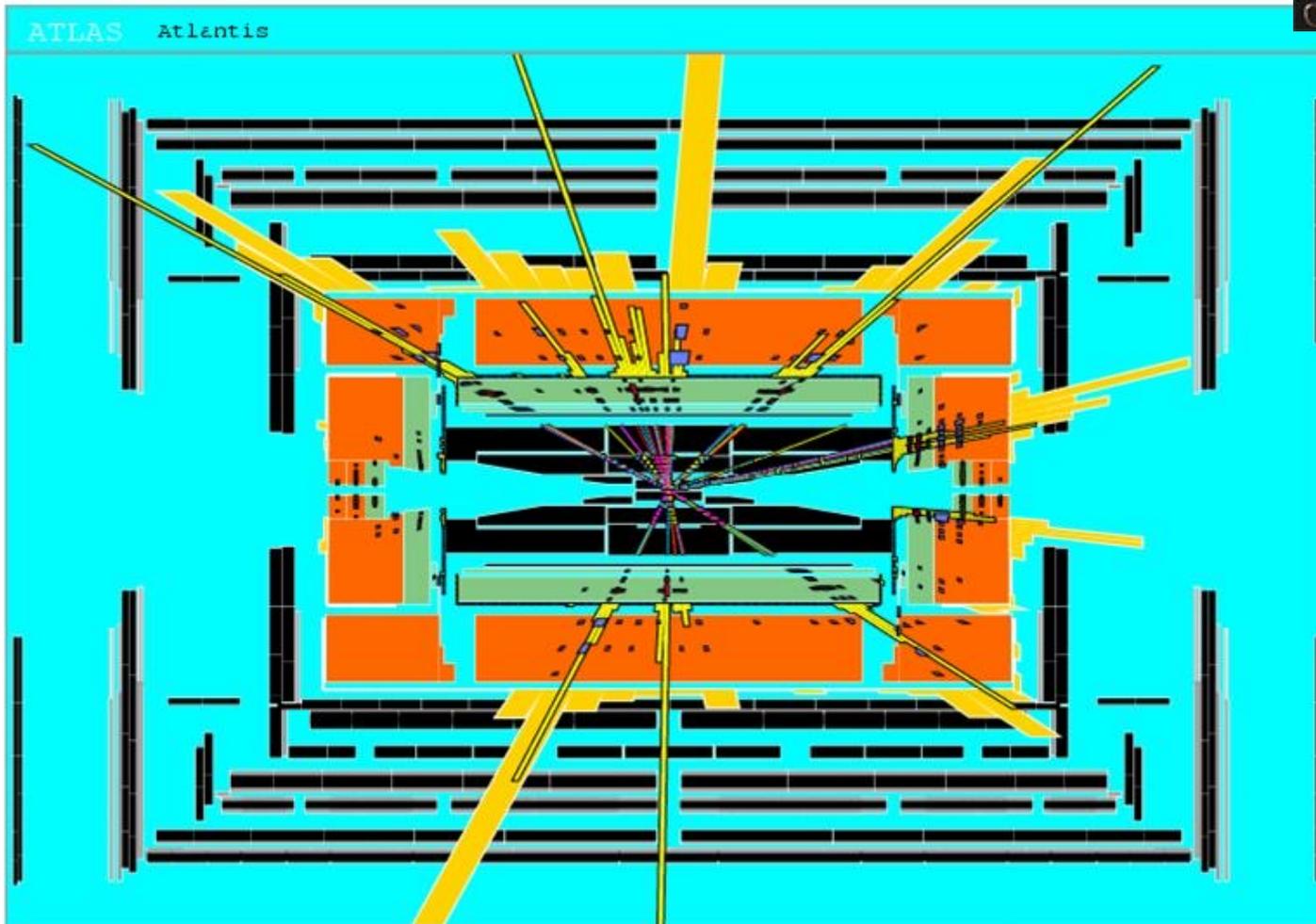
もし、大きさが $10^{-19}\text{m}$ だとLHCで効果が見える。  
この距離まで近づくと、次元数が大きくなり 重力が強い力となる。



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。



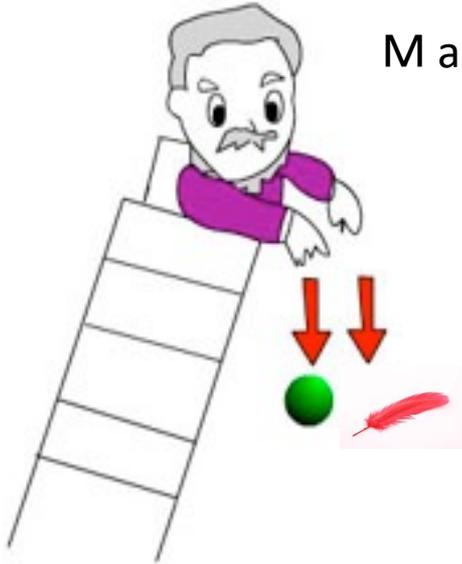
ブラックホールはすぐにホーキング輻射(蒸発)する。  
地球を飲み込む心配はない。  
蒸発で出てきた粒子が下の様に発見される。



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

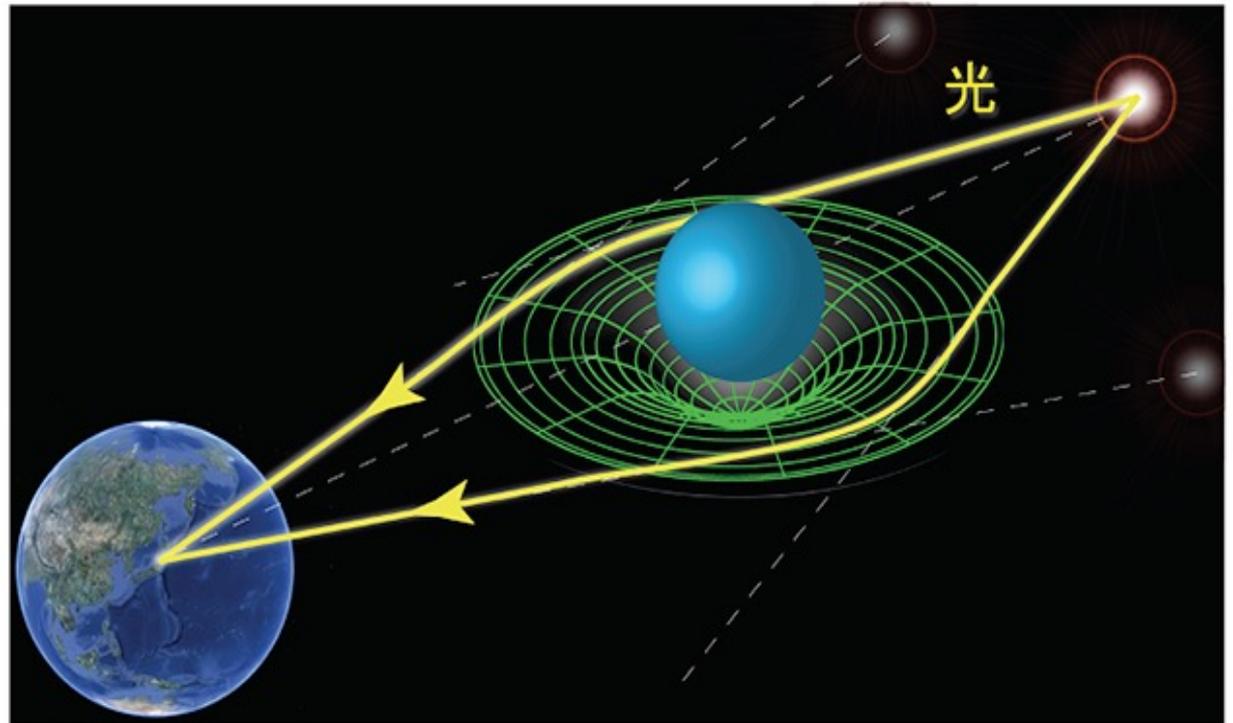


$$M a = F = mg$$

a=加速度

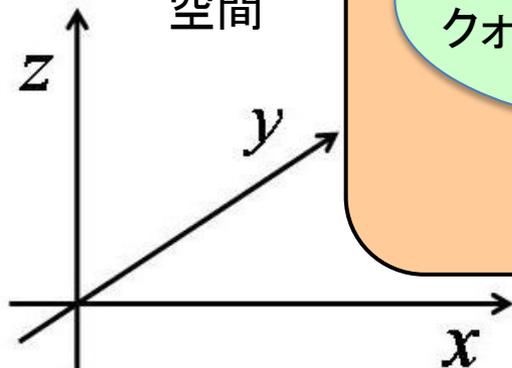
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

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



物質を形作る素粒子  
クォーク・レプトン

力を伝える素粒子  
ゲージ粒子

真空: ヒッグス場  
弱い力の電荷のプール

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

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

X線の大型干渉計

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: