

お品書き

1. 標準モデルの概略
2. 超対称性とその御利益
3. LHCで探る超対称性

おまけ:

質量起源とヒッグス粒子
余剰次元とブラックホール

1. 素粒子標準モデルの概略



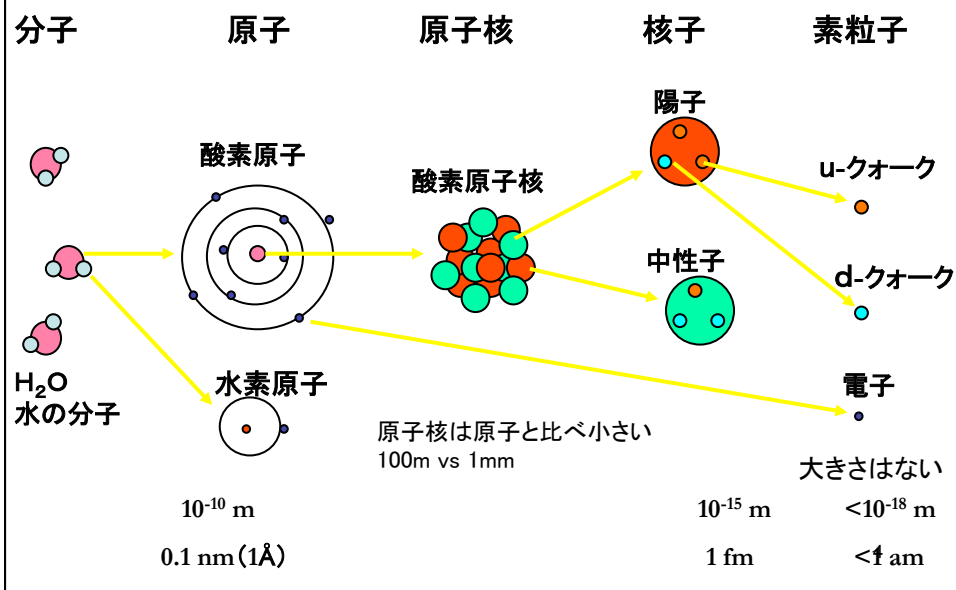
標準モデルの通信簿

実験値と予測値のずれ
を実験誤差で割った値
< 1σ (統計の範囲で一致)

3σ (偏差値 80 or 20)
99.5%程度 200個測れば
1つぐらいはOK

非常に高い精度で合格

物質の階層構造とそのスケール



I: 物質を形づくる素粒子

陽子や中性子を構成

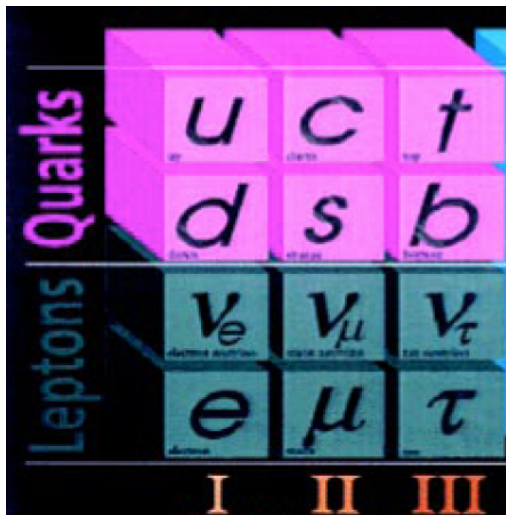
- u-クォーク

- d-クォーク

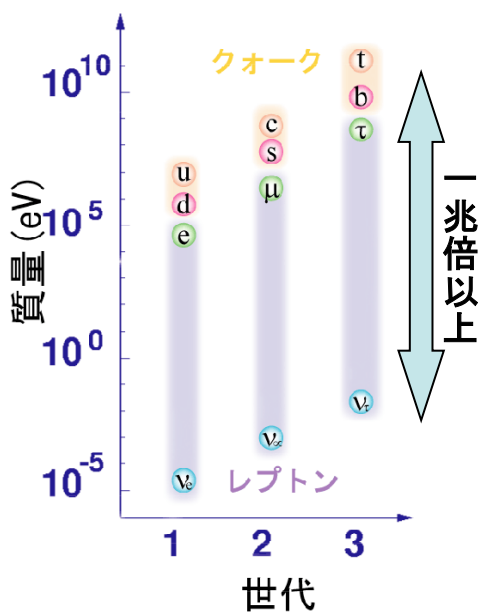
レプトン: (色を持っていない)

- 電子

- ニュートリノ



4つだけだったら簡単なのですが、この4つで構成されるセット(世代)が何故か3セットある。(実験事実)



世代:
性質は同じ:
質量が約100倍ずつ
重くなっている

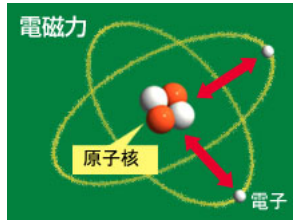
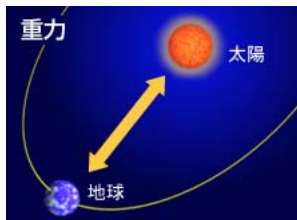
同じ世代でも質量の
大きさが全く異なる。
1兆倍以上もちがう
(νを除いても10倍)

世代の起源?
質量の起源?
何故こんなに
質量が違うか?
(重いトップクォークが鍵)

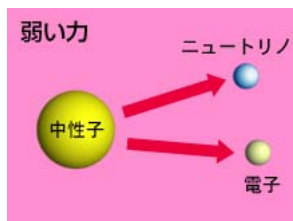
標準モデルは何も
答えてくれない

II:力を伝える素粒子

自然界の4つの力



体で
感じる
ことが
出来る



素粒子
の世界
でしか
効かない

原子核をまとめる力: 湯川先生が予言

(中性子は陽子に変わる:β崩壊)

7

力は粒子を交換することによって生ずる(湯川先生)

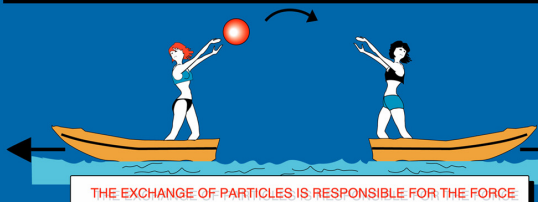
The forces in Nature



強い力
電気・磁気
弱い力
重力

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	~ 10 ⁻³	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	~ 10 ⁻⁵	BOSONS (Z ⁰ , W ⁺ , W ⁻ (HEAVY))	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	~ 10 ⁻³⁸	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES

グルーオン
光子
ウィークボソン
重力子



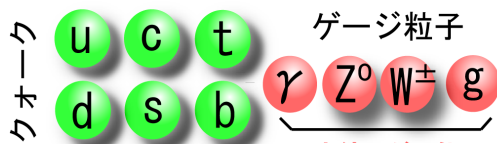
複数の力
異なる強さ
異なる質量

↓

統一的な
理解が必要

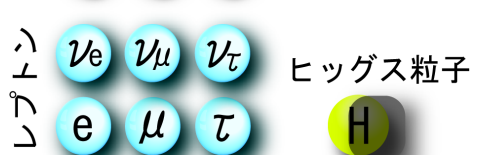
素粒子の標準モデル

現在の標準モデルに登場する素粒子



力を伝える粒子 (スピン1)
(重力は含まれない)

これらは、ゲージ対称性から出てくる(後述P.28)



何故、質量があるのか？(真空がヒッグス場に満たされている？)

3世代

間接証明

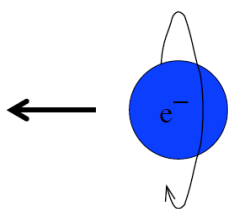
スピン0、質量の起源
唯一未発見

スピン1/2、物質を構成する基本粒子

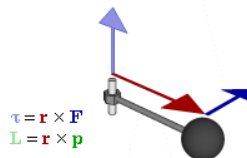
9

素粒子のスピン

スピン: 角運動量と同じ性質



素粒子はスピンをもっている。
スピンはよく「自転」に例えられる。
本当は、大きさのないもので自転はない。



粒子の持っている“固有の性質”: (起源不明)
スピン $\frac{1}{2}$ ($\frac{h}{2\pi}$) の奇数倍と整数倍

角運動量: 空間回転対称性の性質: (空間の等方性 - 角運動量保存)

$$\theta \text{ 回転すると, } S \theta \text{ 回転する。 } U(\theta) = \exp\{-i \theta S\} = \cos(\theta S) +$$

偶数倍: ボーズ粒子 360度でもとの状態に戻る。(我々の感性)

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720度あるような世界に見える (Spin1/2と言うこと)

360度回転に対する違いが粒子の性質を決定づける:

同種粒子の入れ替え: AとB BとAに入れ替える。

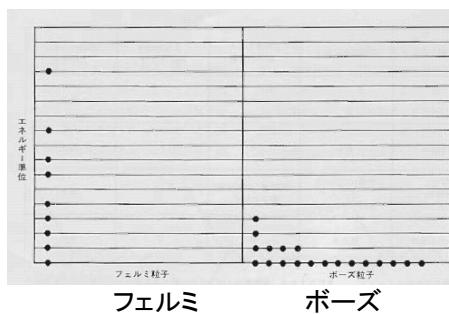
A->B 180度 B->A 180度 二つ合わせて 360度の回転

フェルミ粒子:

- 符号が逆になる。
- 加えるとゼロ 同じ状態に入れない
- 安定的(物質世界の秩序: 電子配列 P.12)

ボーズ粒子:

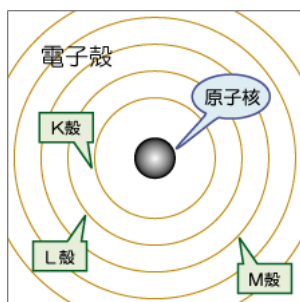
- 同じ状態に入れる(超流動)
- 生成消滅自由
- 力を伝える性質



統計性<-> スピン (質量が大きくない近似で一対一に対応)

- 力を伝える粒子は 偶数 $\frac{1}{2}$ スピン・ボーズ粒子
- 物質を構成している粒子は、奇数 $\frac{1}{2}$ スピン・フェルミ粒子

11

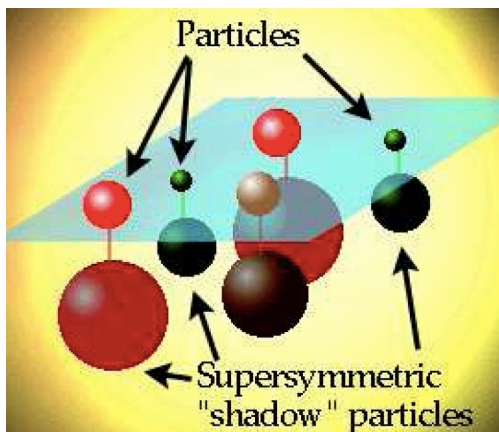


同じ状態には入れない。
 一>
 入る数が決まっているから
 性質が決まっている

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

12

2. 超対称性とその御利益

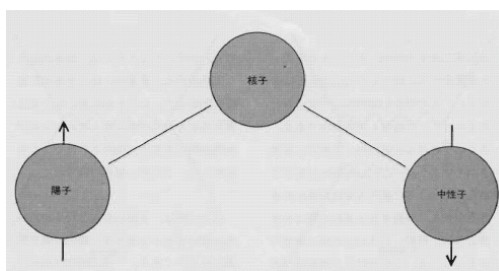


- 2-1 超対称性とは
- 2-2 超対称性粒子
- 2-3 御利益

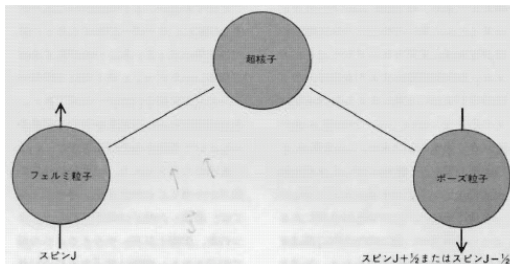
13

超対称性とは、粒子の固有性質である フェルミ粒子とボーズ粒子を統一的に扱う

似て非なるモノを同様に扱う例
 アイソ対称性 陽子・中性子
 は似ている
 アイソスピンと言う仮想空間
 ↑ 陽子 ↓ 中性子
 同時に扱う。
 二つを区別しない



超対称性
 フェルミ粒子ーボーズ粒子
 を同一に扱い、
 仮想空間(超空間)の中で
 ↑ フェルミ粒子
 ↓ ボーズ粒子と対応させる



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(内部)にある対称性: ゲージ対称性(後述P28)

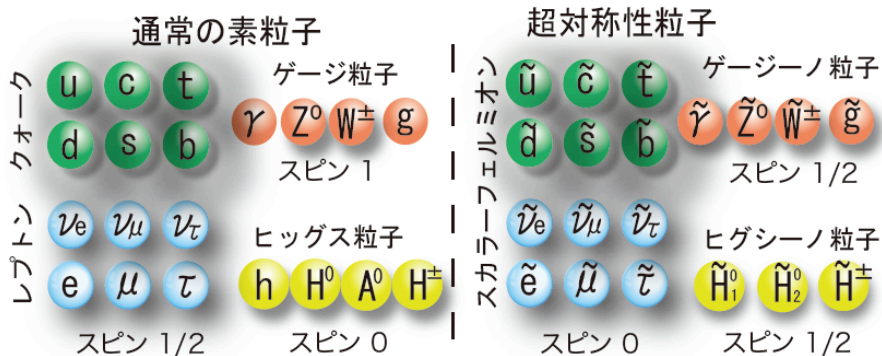
粒子の固有性質に関係した仮想空間の回転対称性 (-> 位相として観測)

電荷: 光の場
 弱い力荷: W,Zの場
 色荷(香?): グルオン
 エネルギー・運動量: 重力

このAB二つに“またがる対称性”であるので“超”対称性
 超空間の中で、フェルミ・ボーズ 内部対称性に対する不変
 結果・スピンという実空間の対称性に関係したモノ

2-2 超対称性粒子

スピンの1/2ずれた超対称性粒子が対になっている



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 1~数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 O(100)GeV程度

これ以外にも グラビトン(スピン2)–グラビティーノ(3/2)

2-3 御利益

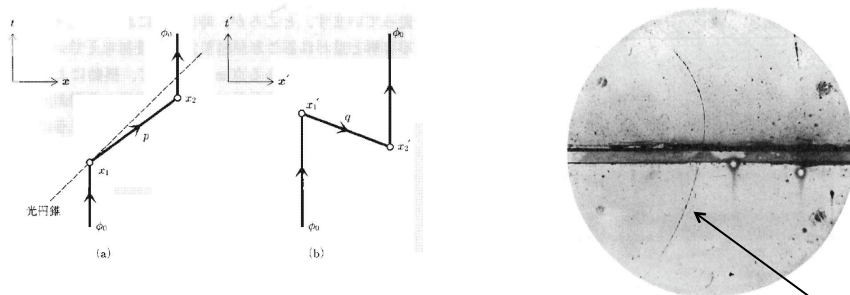
粒子の数を倍にしてまでも得られる御利益があるのか？

(1) 歴史に学ぶ

20世紀の2つの奇跡である「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」から要請される。 1932 アンダーソン：陽電子発見

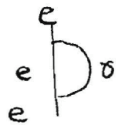


陽電子を入れることで、電子と光の物理学(量子電磁気学)が振る舞いの良い理論となった。P.18(悪い効果がキャンセルする)

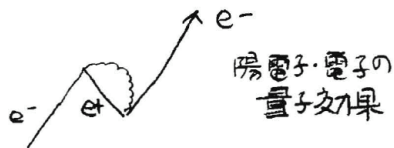
17

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

$\frac{1}{137}$ 原子核の大きさ程度



すぐに無限大の予言になる効果を



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

反粒子を含む図形で相殺し、有限な予言(くりこみ可能)

対称性を入れて、粒子が増えても、その対称性起源の相殺効果で、自然が綺麗になる例がある(反粒子)

歴史は繰り返す?!

18

(2) 「2匹目のドジョウ」 なるか？ 「階層性問題」を解く

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 (10^{-35} m 量子重力が無視できない(10^{19} GeV))

実験で確かめた W,Zボソンが存在するスケール (10^{-17} m

電弱スケール(100 GeV))

ヒッグスなどの粒子もこの電弱スケールにあると思われる。

(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？

(2) 神の見えざる手で、二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。

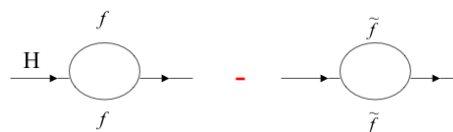
(発散を含む図形が多数存在)

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:

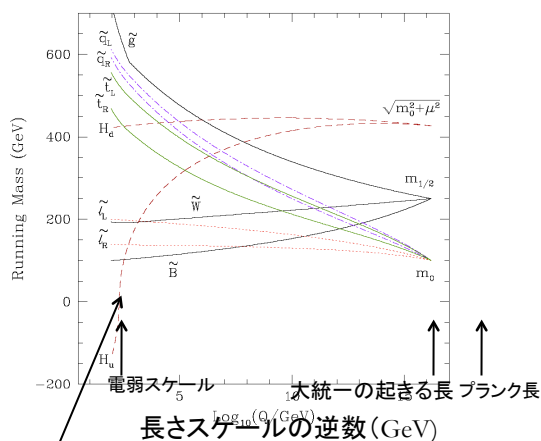
更に、超対称性のすごいところは、トップクォークが重いと言う事実から、
プランク・スケールから、電弱スケールを自動的に導出できる。

((1)神の見えざる手も種明かしできる)



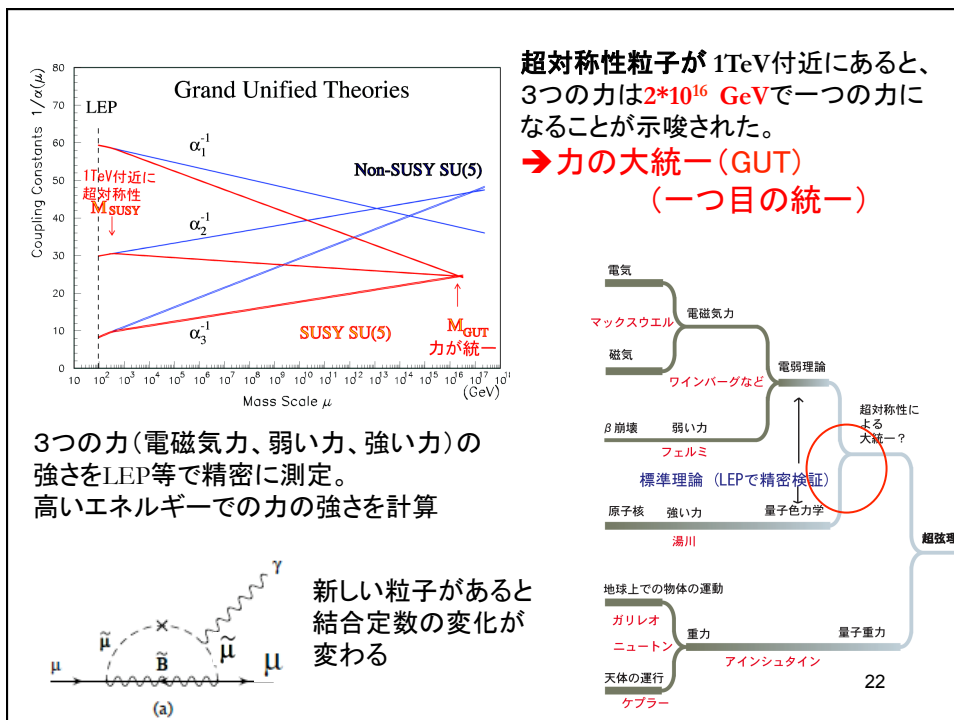
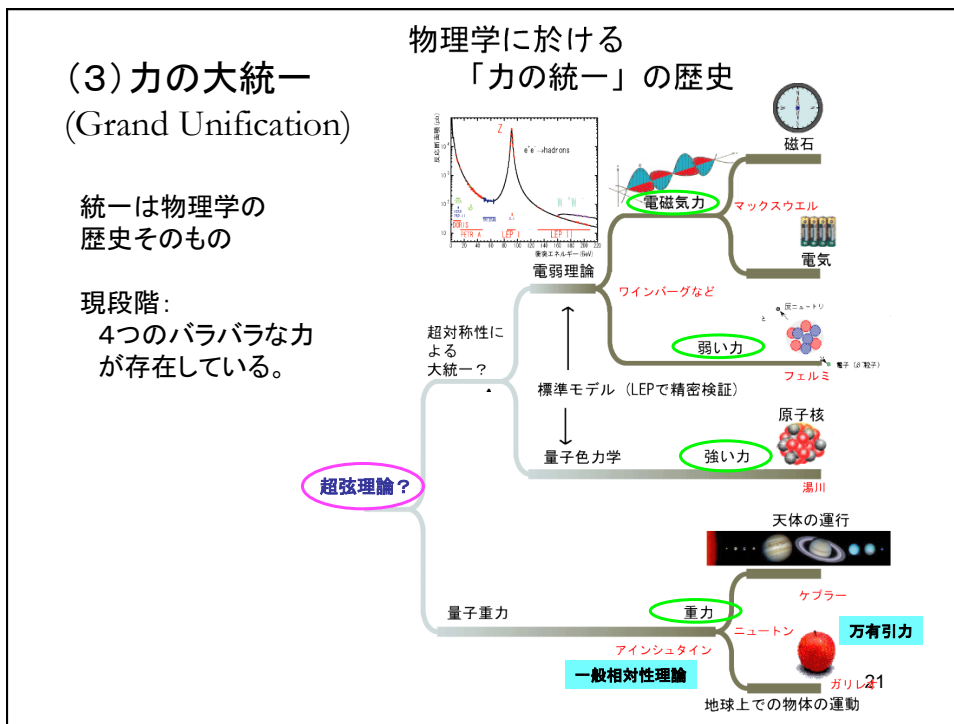
19

二つの階層問題を同時に解明できる

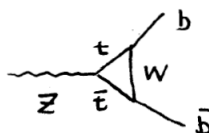
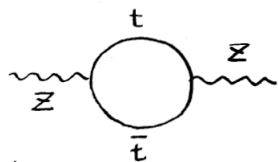


トップクォークの質量が重い(ヒッグス粒子との結合定数 ~ 1)と言う性質を使うと、ヒッグス場の質量 2 が 電弱スケール(10^{-17} m)で負になり、このスケールを作りだすことができる。

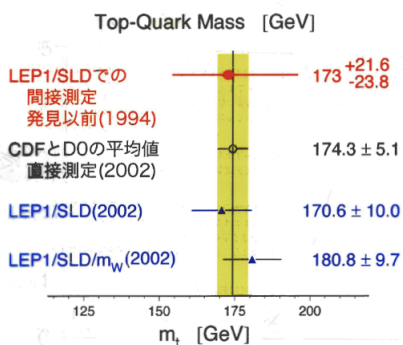
また、このスケールからより小さなスケールまで質量計算しても発散しない



「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



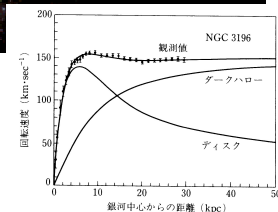
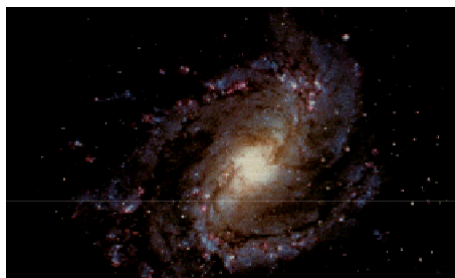
Z粒子の性質(質量・結合)を高い精度で調べることで、トップクォークの存在やその質量を正確に予言

1994年に発見: 直接測った質量と一致:

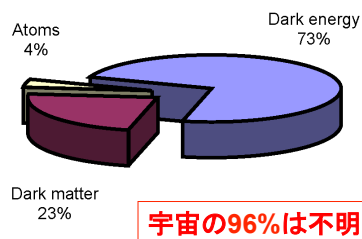
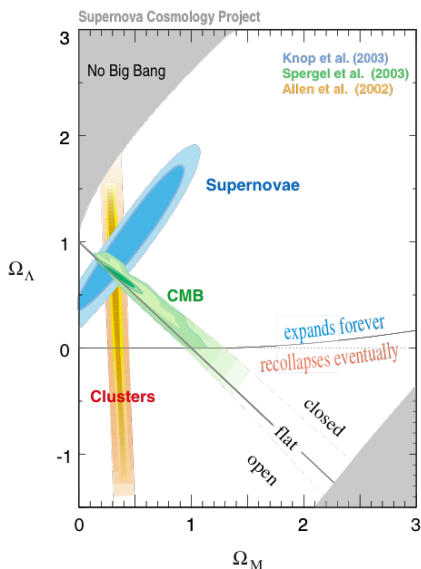
存在している(と思われる)粒子の性質さえ分かっていたら、高い予言能力がある。 23

(4) 暗黒物質のよい候補

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。



最近の天文・宇宙観測データから

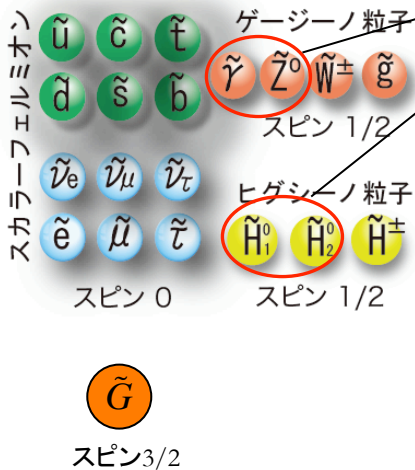


宇宙の96%は不明

- ・一番軽い超対称性粒子(ニュートラリーノ)はダークマターの有力候補
- ・ダークエネルギーの正体は大きな謎

25

超対称性粒子



4つの状態は混合する:
(ニュートラリーノ)
一番軽い状態は安定
質量 $O(100\text{GeV})$
非相対論的でよい候補

あまりモデルに依存せずに

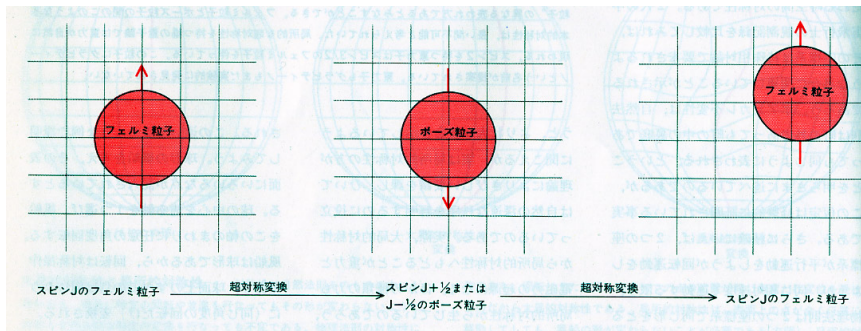
$$\tilde{g}, \tilde{q}$$

の質量が $\sim O(1)\text{TeV}$ の領域で
暗黒物質の良い候補

\tilde{G} 暗黒物質のよい候補に
なるモデルもある。
この時もLHCでも発見可能

26

(5) 重力が自動でとりこまれる



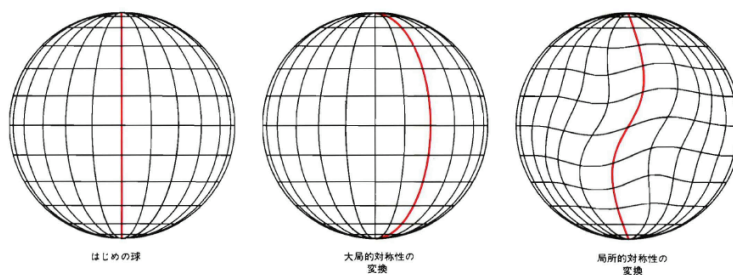
超対称性は、“拡張した”時空の対称性：(時空+粒子の統計性)
 スピン1/2の粒子がある。これを超対称性変換するとスピン0の粒子になる
 またもう一度、変換すると元のスピン1/2にもどる。
 このとき、少し平行移動します(微小なローレンツ変換)

微小なローレンツ変換に対して理論不変 = 重力の理論(一般相対論)

スピン: 時空の回転に結びついた性質 → 超対称性: スピンに結びついた変換
 → 超対称: 時空(重力)と密接にむすび着いている。

ゲージ対称性と力

仮想内部軸に対する自由な回転: $U(\theta)$
 内部軸に対する回転: 物理法則は不変であると考えられる。
 宇宙中一斉に回転する(大局的対称性)



宇宙一斉というのは、相対論を考えると変な概念: もっと一般的に
 時空の各点で任意に回してよい(局所的対称性: ゲージ原理)

物理法則は無茶苦茶になる。この歪みを直す様に、
 粒子が伝搬する“帳尻あわせ”粒子 (これがゲージ粒子で力の源)
 これで、すべての力が説明できる

<p>その対応する軸:</p> <p>電荷: 弱い力荷: 色荷: エネルギー運動量</p>	<p>光の場 W,Zの場 グルオン 重力</p>
---	--------------------------------------

微小なローレンツ変換に対して
不変 = 重力の理論(一般相対論)
局所的な超対称性 →
重力ゲージ理論

局所的超対称性 =
「時空の量子構造」

重力まで含めた統一が
可能になる
(二つ目の統一)

29

現在の理解

物質を構成: フェルミ粒子
力を伝搬: ボーズ粒子
時空はいれもの:

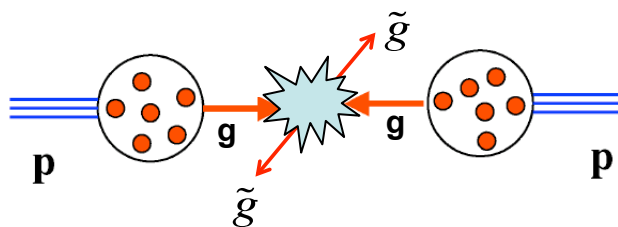
三位一体

時空の物理学と
物質と力(素粒子)の物理学を統一

物質・力・時空の統一
(入れ物と中身の統合):
(3つ目の統一)

30

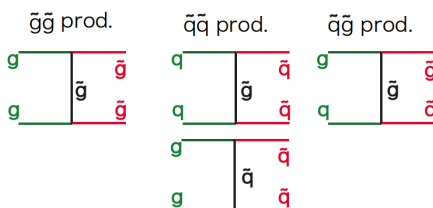
3. LHCで探る超対称性



- 超対称性粒子
- ゲージノ粒子 (Spin 1/2): $\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}, \tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{b}, \tilde{\gamma}, \tilde{Z}^0, \tilde{W}^\pm, \tilde{g}$
 - ヒグシーノ粒子 (Spin 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 (Spin 1/2): $\tilde{u}, \tilde{c}, \tilde{t}, \tilde{d}, \tilde{s}, \tilde{b}$

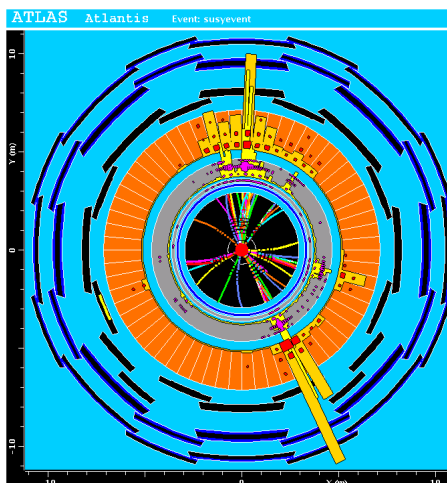
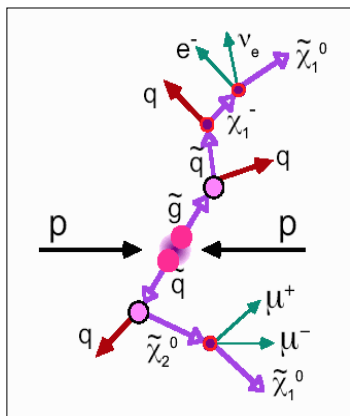
スカラーボソン (Spin 0): $\tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau, \tilde{e}, \tilde{\mu}, \tilde{\tau}, \tilde{H}^0, \tilde{H}_2^0, \tilde{H}^\pm$

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



31

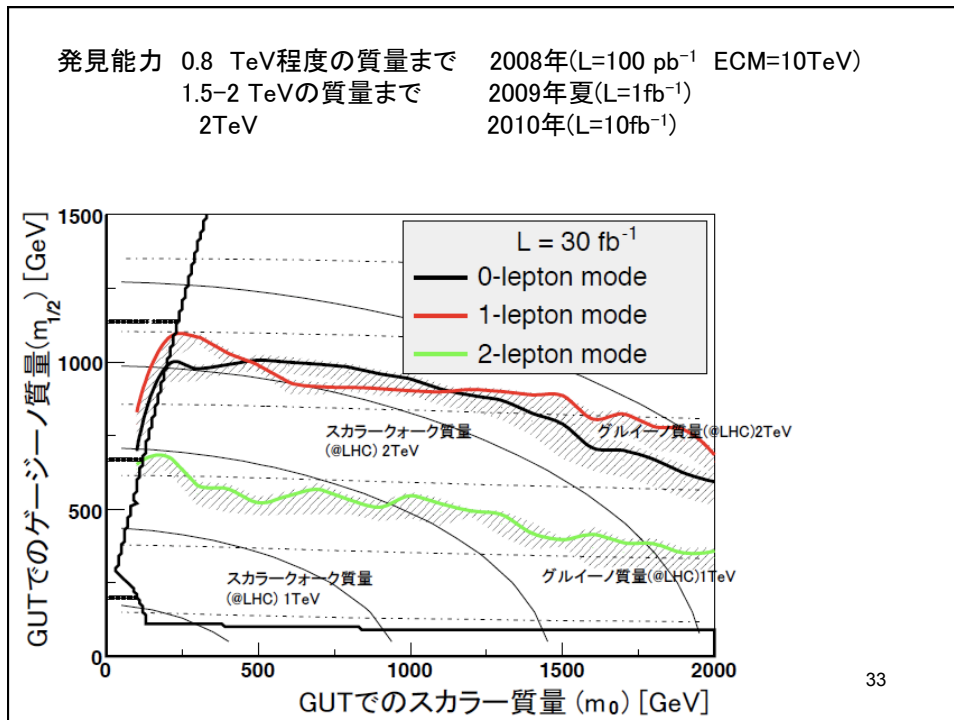
生成された、グルイーノやスカラークォークは崩壊し
LHCでこんな感じの現象が観測される。



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)

32



まとめ

- 超対称性 統一へのキーワード
 - 力の大統一(電磁気、弱い、強い力)
 - 重力も統一(時空の量子化:重力との統一)
 - 力・物質・時空の統一(三位一体)
 - 暗黒物質の理解 宇宙と素粒子の統一的な理解
 - 階層:2つのスケールの統一的な理解
- LHCでは2-3TeVくらいの質量の超対称性粒子を発見する能力を有している

34