

観測可能な領域で

銀河	~ 300,000,000,000 個
太陽(恒星)	~30,000,000,000,000,000,000,000個



星の数 30,000,000,000,000,000,000,000個  
人の細胞数 60,000,000,000,000個

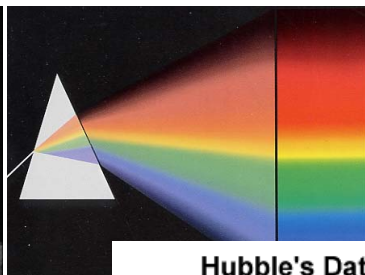


## 1929年 宇宙膨張の発見

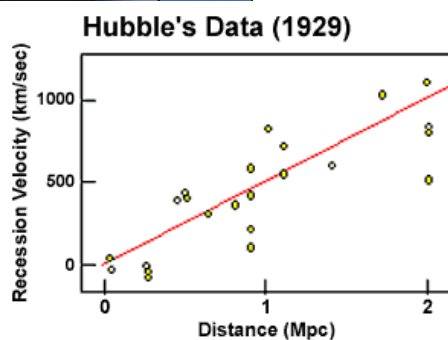


(ハッブル)

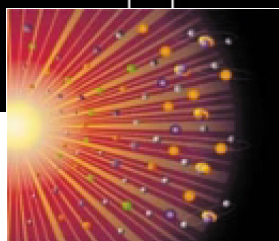
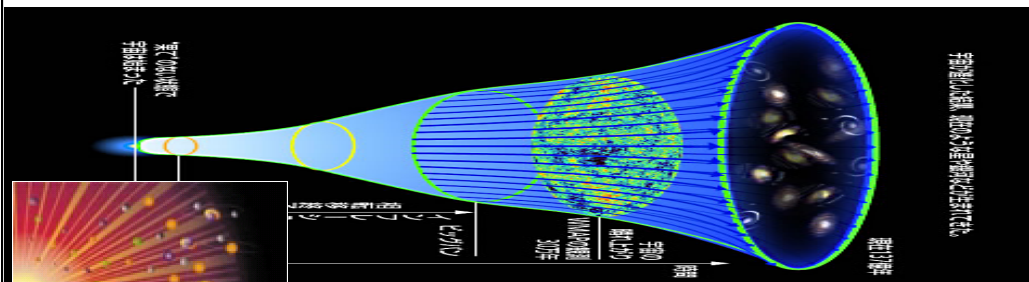
「銀河はどんどん遠ざかっている！！」



プリズムで見る  
ドップラー効果  
で、遠ざかる  
物体は  
赤く見える



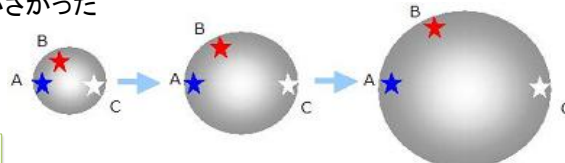
## 宇宙に始まりがある！！



### ビッグバン

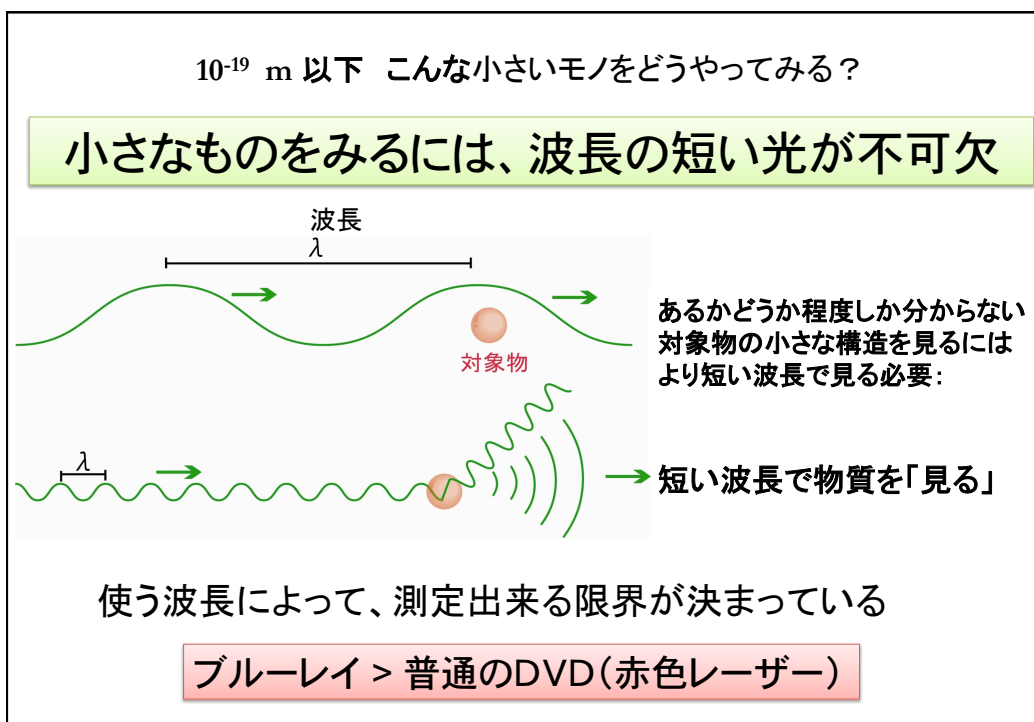
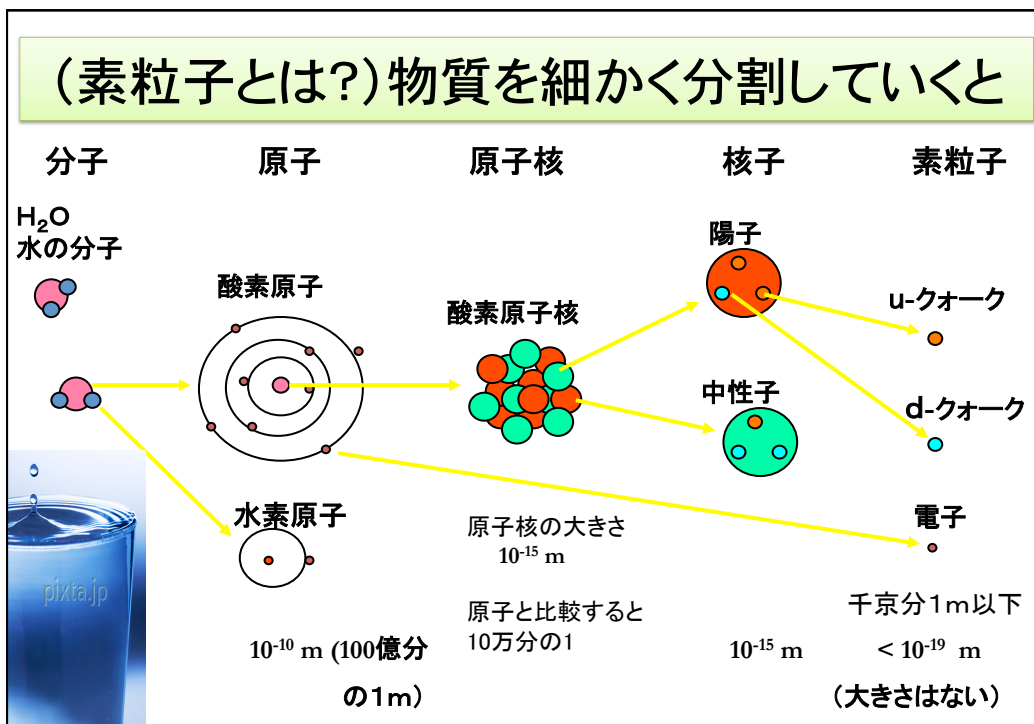
何も無い所からどうして、  
ビッグバンのエネルギーが？

← 時間をもどすと  
宇宙は原子より小さかった



宇宙のはじまりの研究

“素粒子”





小さな世界は **量子力学** が支配

小さく視ると、粒子と波の両方の性質が見えてくる。(2重性)

**素粒子 = 粒 + 波**

波である証拠 → 電子でも干渉

波の広がりの分だけぼやける

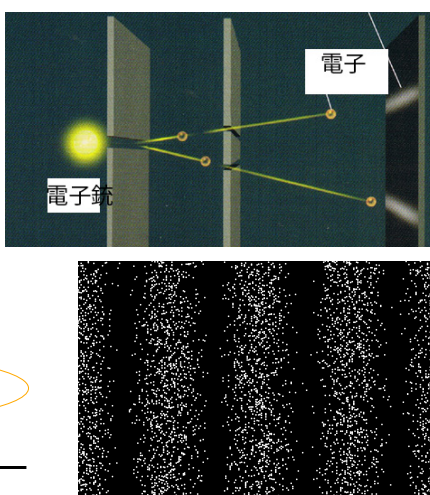
ハイゼンベルグ不確定性原理  $\Delta P \Delta x > h/2\pi$

プランク定数

波長  $\lambda = \frac{h}{p}$

運動量 ~ エネルギー

短い波長 ↔ 高いエネルギー



**加速器は大きな顕微鏡**

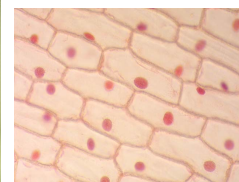
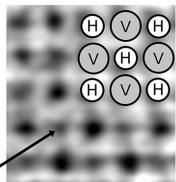

倍率1000倍程度 たまねぎ細胞

分解能

光学顕微鏡	光	光の波長 ~ 0.1ミクロン (=10 <sup>-7</sup> m)
電子顕微鏡	電子	電子の波長 ~ 1オングストローム (=10 <sup>-10</sup> m)
LHC加速器	陽子	陽子の波長 ~ 10 <sup>-19</sup> m (原子核 10万分1)

100万倍程度 10<sup>-10</sup>m

水素原子！！

## 世界最大の加速器 LHC

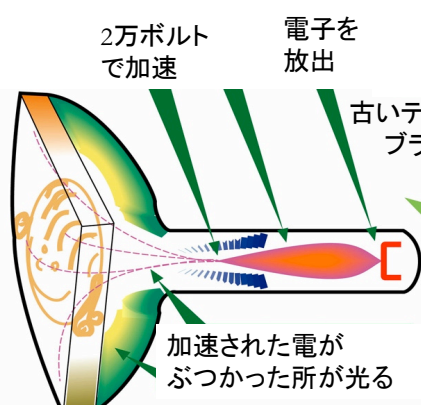
一周27 km 地下トンネル  
陽子を光速の99.999997%まで加速  
(4TeV(兆電子ボルト))



トンネル内部

ビデオ

### 実は身近な加速器：電子ボルト(単位)



ぶつかっちゃうとだめなので  
静電場でなく、電磁波を使って  
加速するのが加速器  
ブラウン管のざっと1億倍の加速能力

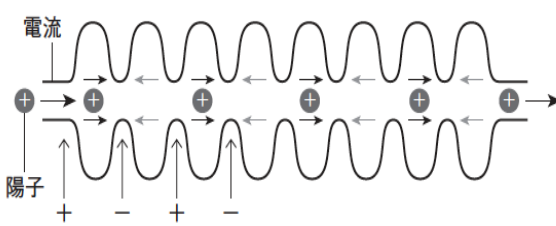
**電子**  
(加速エネルギー-E)

$E=1.5 \text{ eV}$  (電子ボルト)  
 $=2.4 \times 10^{-19} \text{ J}$   
(速度 730 km/s 光速0.2%)

**1.5 ボルト**

テレビは  $\sim 20\,000 \text{ eV}$   
LHC 加速器  $4 \times 10^{12} \text{ eV}$

(加速のしくみ)



プラスとマイナスの電極が交互に並んでおり、交流で電荷  
が入れ替わることで繰り返し加速されていく。 12



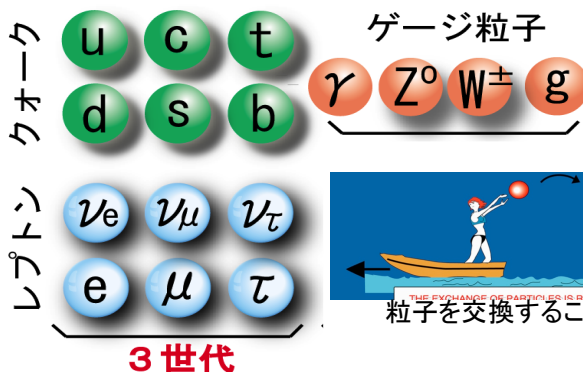
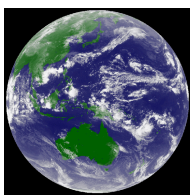
これまで16種類の素粒子が見つかった

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

標準模型

地球も皆さんも  
すべて



13

素粒子I: 物質を形づくる素粒子

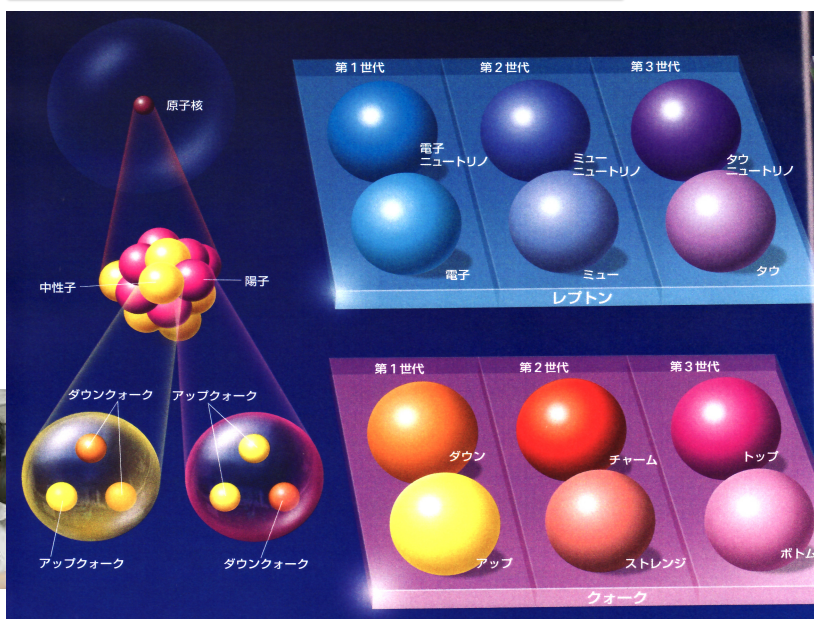
ニュートンより

陽子・中性子の核子は、  
2種類のクォークで構成  
それ以外に電子と  
ニュートリノ

このセットが  
3セットある



益川・小林先生



## 素粒子II: 力を伝える素粒子

粒子を交換することで力が働く  
ゲージ粒子

粒子A

粒子B

### 自然界の4つの力

**重力子 (未発見)**

重力

太陽  
地球

電磁力

原子核  
電子

**光子**

**グルオン**

強い力

原子核 (陽子・中性子)

原子核やクォークをまとめる力  
湯川先生が予言

弱い力

ニュートリノ  
中性子  
電子

**W,Z粒子**

Cs137

中性子は陽子に変わる

15

## 相対性理論

普通の間

50km/h

→

150km/h

東海道新幹線 270km/時

車内で 電球をピカッとすると  
光速  $V(\text{光}) = 1.08 \times 10^9 \text{ km/時}$

外にたってる案山子が見たら、  
 $V(\text{光}) + V(\text{新幹線})$  ?

実は、 $V(\text{光})$

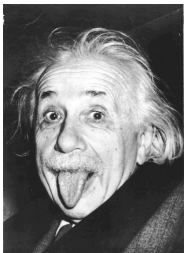
こんな不思議なことが起きている。

空間：  
上下、左右、前後、  
+時間の過去未来  
混ぜて = 時空

16

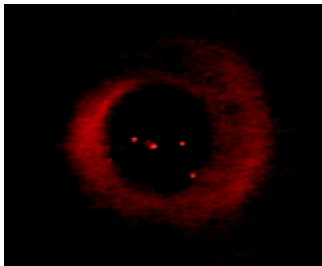



## 素粒子の質量



「止まった光??」  
光は止まれない。  
どんな人が、どうみても  
秒速30万kmで  
動いてる。

止まった電子  
の写真






「原子や電子」も  
とめることが  
出来る。

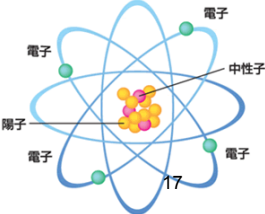
この違いは何故？

とまったから、原子核や  
原子ができた。  
とまらなかったら  
この宇宙はできていなかった

光 →



光の速度  
で追っかけると  
止めることが出来る？



素粒子の原理

素粒子  
質量=0

⇔

素粒子  
質量≠0

矛盾

素粒子の原理

質量があつては  
ならない

「質量」

があると運動が阻害  
速度も遅くなるし、  
止まれる。

重さは「重力の強さ」  
質量とは違う。  
でも、「重さ」と  
「質量」と実験で  
高い精度一致している。  
(実験事実)

矛盾をどうやって？

18

矛盾をどうやって？

素粒子の原理

素粒子 質量=0

矛盾

素粒子 質量≠0

現実

素粒子の原理

素粒子 質量=0

→

原理は不変  
環境が悪い！！

素粒子 質量≠0

現実

スネチャマは  
悪くない。  
ジャイアンが  
わるいから

19

## 悪い環境 = ヒッグス(場)満ちた真空

エネルギーの強さ

ヒッグスのつまり方

ヒッグスがない → ある状態

何もない状態

エネルギー低いので  
この状態に落ち着く

ヒッグス場に満たされた状態

「自発的  
対称性の  
破れ」

南部先生  
2008年ノーベル物理学賞

「このアイデアの  
お世話になりました」  
By Peter Higgs

20



素粒子の原理

素粒子 質量=0




→

素粒子 質量≠0

原理は不変  
環境が悪い!!

なんかが詰まっている  
悪い環境だと  
なんで 質量が ??

例え話ですが、

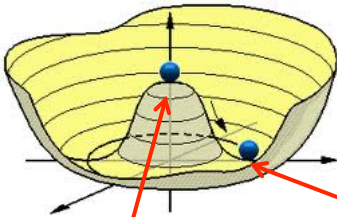




パーティー会場  
そこへ 有名人が入ってきます。  
サインを求める人が廻りに集まって歩けなくなる。  
有名人: たくさん集まる → 遅くなる (質量が大)  
普通の人: あつまらない → さっさと歩ける (質量が小)

→


動きにくさ=質量  
(重さ)

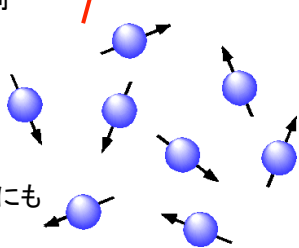
(例えでなくて)本当に自然で起きている??  
結晶を構成する原子の向き



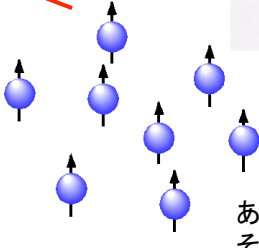
別の方向

ある方向





どの方向にも  
等方的



ある方向に  
そろろう

↑

**どうやって探す?**

エネルギー

一様(宇宙全体)

ヒッグス場に満たされている

時間や空間

LHC加速器 粒子同士を高いエネルギーで衝突エネルギーを狭い空間に集める。

**$E=mc^2$  エネルギーが粒子になる**

陽子 陽子

構成する粒子・反粒子衝突

励起する

エネルギー

ヒッグス粒子

時間や空間

23

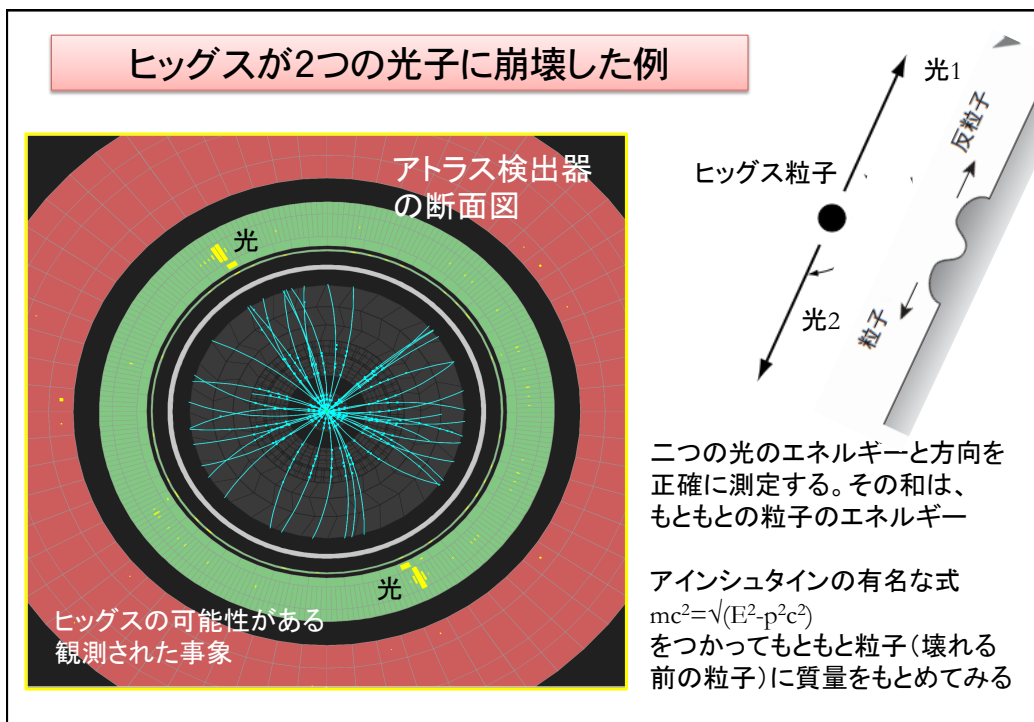
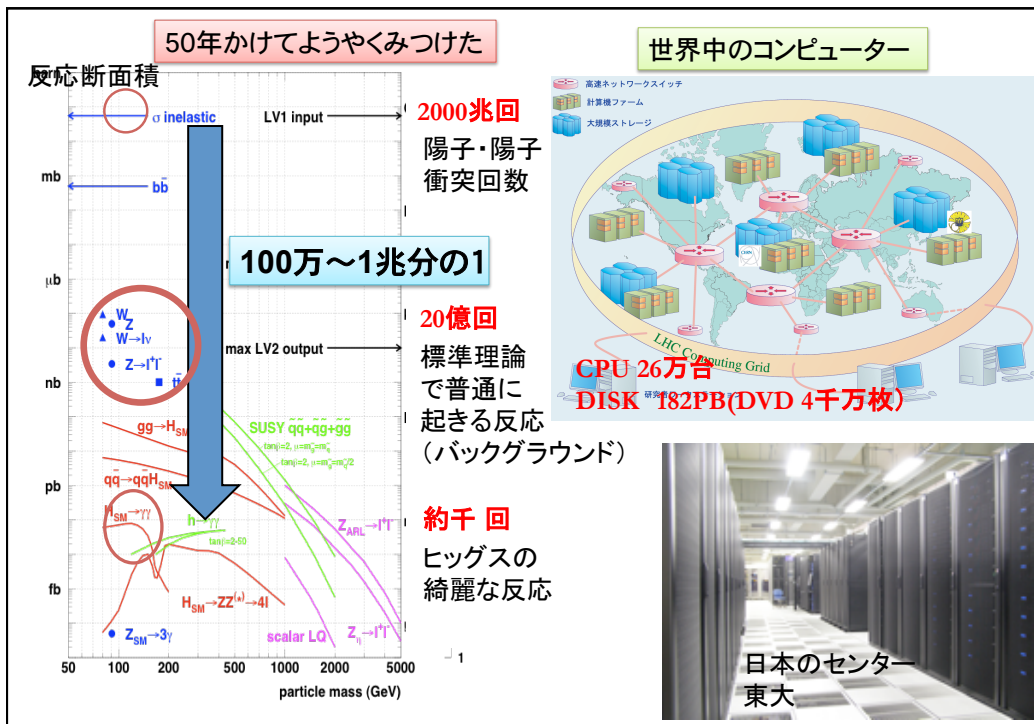
**起こった素粒子反応を捕らえるアトラス検出器**

人間

直径22m 長さ44m 1.1億チャンネル高性能

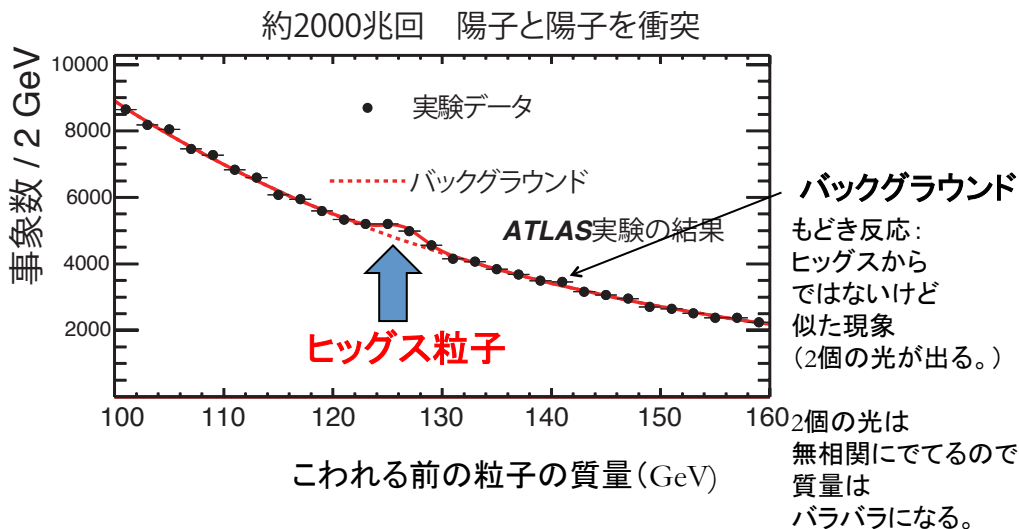
何故大きい?

ビデオ





約2000兆回の衝突の中から光が2個ある現象を探し出してくる



ヒッグス粒子発見の意義

新聞やTVが言うように  
「17番目の素粒子が見つかった」  
という **チョロい**話ではない

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

質量を生み出す  
真空:ヒッグス場

容れ物なので  
宇宙全体にひろがっている

「真空」の意味

真空が「真の空」でなく、何か詰まった不思議な状態

(何か? **ニュートリノの電荷(弱い力)をもった**  
のっぺりしたもの:宇宙全体に一樣に、方向もなく)  
その**エネルギーが宇宙を生み、進化**させていった。  
宇宙の誕生に密接に関係

$PV=nRT$

**粒子の描像**

**ヒッグス場(真空)の描像**  
 ようかんを切ることを想像してください

なんかだまされた感じが  
 するのが、  
 真空のエネルギーの  
**ヘンさ**

29

## 不思議な真空のエネルギー

真空のエネルギーの密度

体積が2倍

エネルギーの密度 変わらない  
 体積 \* 密度 = エネルギーが2倍

????

宇宙のインフレーション膨張にしたがって、体積が大きく  
 エネルギーがどんどん増加 → **ビックバンがすごい**ことになった!!!

何もなかった状態から エネルギーとモノにみちた  
 宇宙が誕生した!!!!

30

### 宇宙の誕生の謎に迫る成果

宇宙が進化した結果、現在のような星や銀河などが生まれてきた。

現在137億年

時間

宇宙の晴れ上がり  
WMAPの観測30万年

ビッグバン

相転移終了  
インフレーション期

10<sup>-36</sup>秒  
"無"からの創生

"果て"のない状態で宇宙は始まった

落ちた分のエネルギー  
「ビッグバン」

インフレーションを起こすエネルギー

今回見つかったヒッグスではないですが、同じような「色付きヒッグス」と言うのもあると考えられています。

31

### ヒッグス粒子が発見で、 標準理論が完成 めでたし、めでたし??

## 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
----------	-------	---------	---

レプトン

$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
e	$\mu$	$\tau$

物質を形成

ヒッグス粒子

H
---

2012年発見

力を伝える(3つの力)

質量の起源

### 問題点

#### 宇宙の成分表

成分	割合
ダークエネルギー	72%
ダークマター	23%
普通の物質	5%

力の起源

宇宙誕生の起源

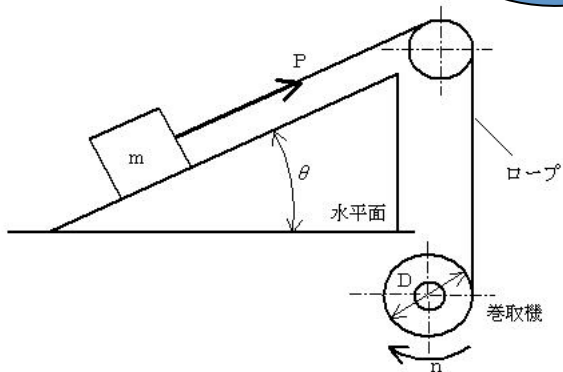


# おまけ

物理の時間にならった  
エネルギー・運動量 保存則は？



力学の問題が  
とけなくなる



始まりや端があったら  
エネルギーや運動量は  
保存しない。

よく、新聞に確率が書いてあったけど。。

## ヒッグス粒子の存在

**確率 99.98%**

世界的な素粒子物理の研究機関である欧州合同原子核研究機関（CERN）は、13日、宇宙の物質を構成する素粒子に質量を与える「ヒッグス粒子」を99.98%の確率で見つけたと発表した。ヒッグス粒子は、宇宙の成り立ちを説明する素粒子物理学の標準理論に欠かせない存在で、世界の物理学者が40年以上にわたって探索してきた。最終結論は、来春以降にさらにデータを収集したうえで下すという。

発表したのは、東京大学や高エネルギー加速器研究機構など日本の15機関も参加するATLAS実験グループと、欧米を中心とするCMS実験グループ。両グループは、2010年から本格稼働したCERNの「大型ハドロン衝突型加速器（LHC）」という実験装置を使い、原子核を構成する陽子とよばれる粒子を光速近くまで加速。二つの陽子を正面衝突させ、中から飛び出し続ける様々な種類の粒子からヒッグス

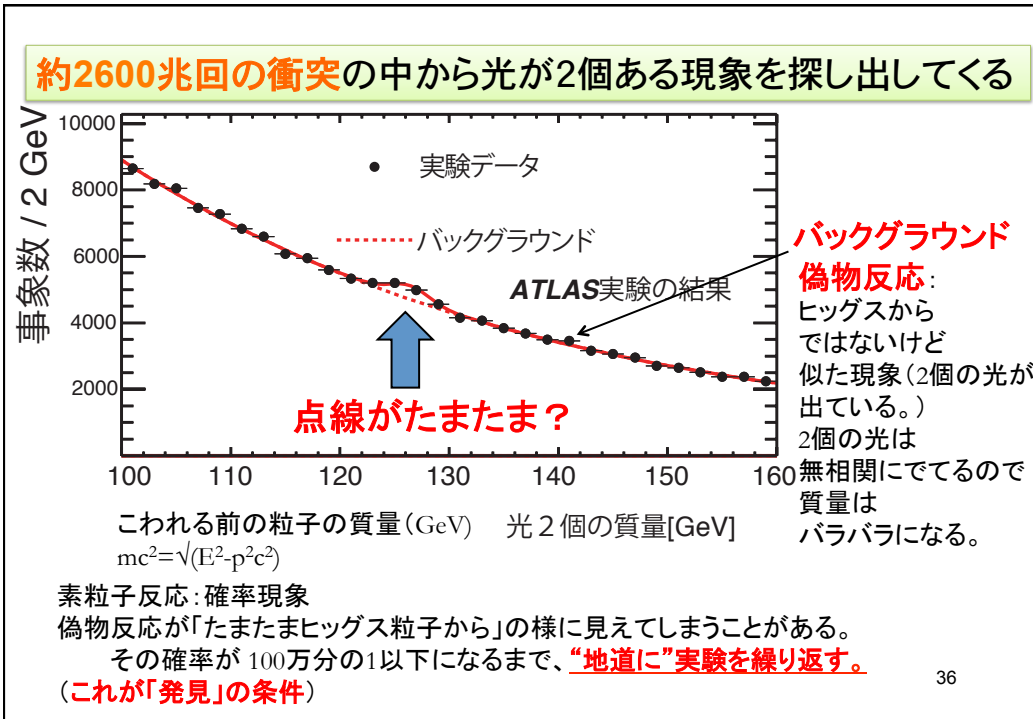
ヒッグス粒子が重くと...  
光は衝突せず光速で進む  
ヒッグス粒子で満たされた空間  
光以外の粒子はヒッグス粒子にぶつかって動かしにくい「質量がある」

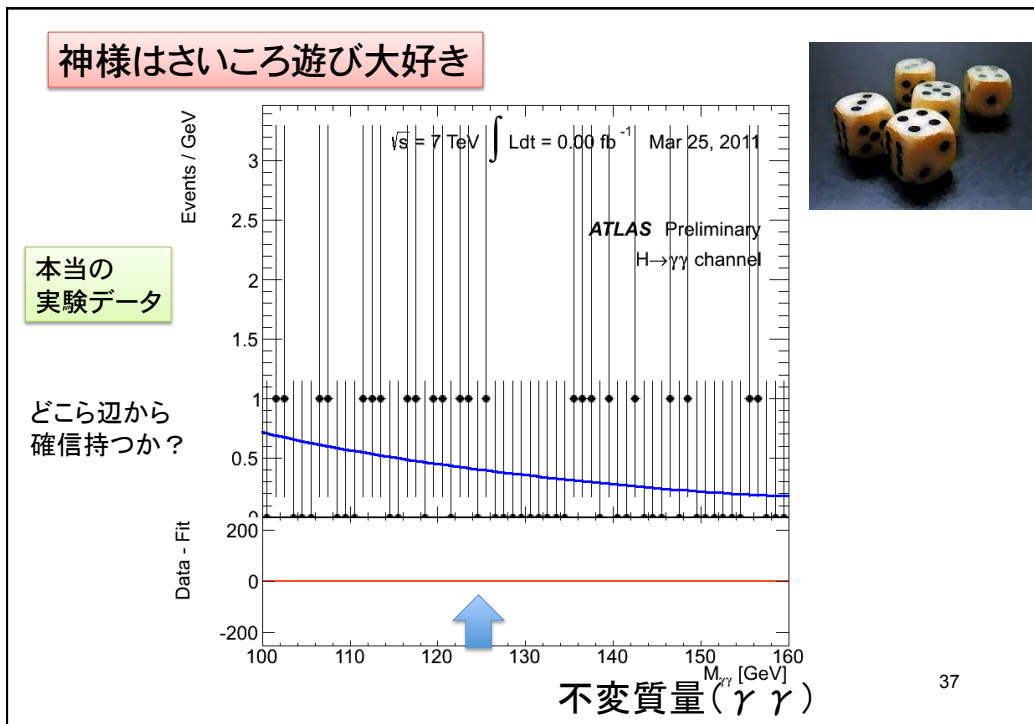
国際チーム 99.9999%

## ヒッグス粒子ほぼ確認

年内断定へ追加実験

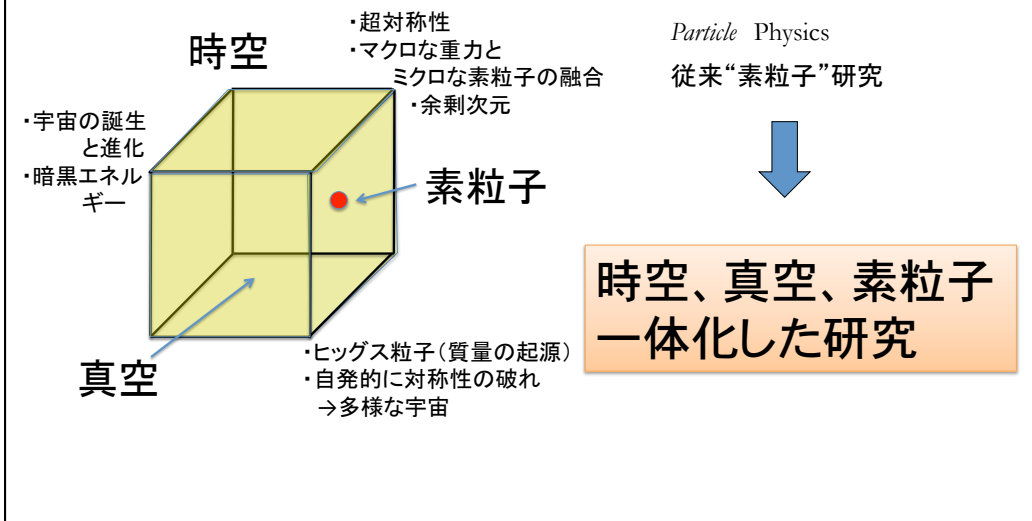
2011年12月(読売新聞) 2012年7月(東京新聞)







# ヒッグス発見が新しい時代の幕開け



よく見る写真は、加速してるんでなくて、  
曲げてるだけ(でも陽子は曲げるのが大変)



よく見るとトンネルが曲がっている

曲がっていく

陽子

磁場

超伝導で約1万アンペア(2012: 6000A)の  
電流ながして 強力な磁場8.3T (4.7T)

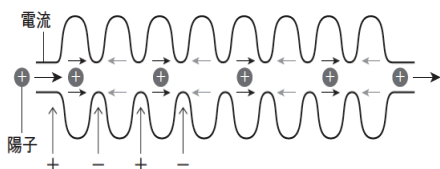
## LHCの加速装置はショボイ

一周して加速したエネルギーは16 MeV です。かなり小さいです。ただ、毎秒1万回転ぐらい回りますので、毎秒0.1TeV加速できます。

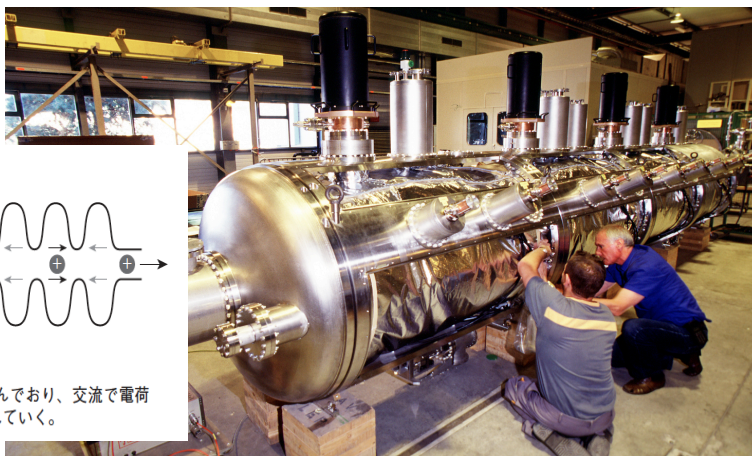
こんな加速器がわずか 8個設置されているだけ。

400MHzの高周波

(加速のしくみ)



プラスとマイナスの電極が交互に並んでおり、交流で電荷が入れ替わることで繰り返し加速されていく。



## 日本の技術力はすごい!

LHC建設には高い技術が不可欠 日本企業も大きく貢献。  
LHCプロジェクトマネージャー「日本の技術無くしてはLHCは出来なかった」



【東芝】ビーム収束用四極超伝導電磁石

【新日鐵住金ステンレス】極低温完全非磁性ステンレス(8の字状のカラー部分)

【JFEスチール】超伝導電磁石用鋼材



【IHI】1.8Kヘリウム冷凍システム



【カネカ】絶縁テープ



【古河電工】超伝導ケーブル

## ATLAS 検出器 約3000人の国際共同

Muon Detectors    Electromagnetic Calorimeters    Solenoid    Forward Calorimeters    End Cap Toroid  
 Barrel Toroid    Inner Detector    Hadronic Calorimeters    Shielding

**Detector character**

Width: 44m  
Diameter: 22m  
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS

Resolution  
(Pt=100GeV)

e,  $\gamma$  1.5%  
Muon 2-3%  
Jets 8%

- **大きなDetector: バランス 優先**のパフォーマンス とにかく大きい  $\delta P/P \sim P/(BL)^2 L$  で勝負
- Accordion Shape of 液体 Ar カロリメータ (放射線耐性、奥行き情報、Fine granularity)
- Large air-core toroidal magnet ミューオンシステム (トロイド磁石)

## CMS検出器

FORWARD CALORIMETER    MICHROCHAMBERS    TRACKER    CRYSTAL CAL    SOL  
 SUPERCONDUCTING COIL    RETURN YOKE

PbWO<sub>4</sub>

Lead Tungstate crystal SiC-78 from China

Resolution  
(Pt=100GeV)

e,  $\gamma$  0.9% !!  
Muon 2-3%  
Jets 12%

- **小さくコンパクト** H=15m L=22m (about half of ATLAS)  
W=12,500ton (twice of ATLAS) 鉄のかたまり return yoke (密度3.2g/cc)
- **一点豪華主義**  
PbWO<sub>4</sub> シンチ 電子・ $\gamma$ に賭けた (Higgs) (高いエネルギー分解能、奥行き情報無し)
- **4T (強力) ソレノイド磁石** (小さいのでBで勝負)  
ハドロンの外側: (薄いハドロンカロリメータ)



ほんとにかよ?

ここにエネルギーを加えると

量子力学世界

現実世界

光  $e^-$   $e^+$  光

光  $\gamma$

$e^-$

$e^+$

実験データー (光から電子、陽電子が飛び出している)

エネルギーを与えている所

エネルギーをあたえると量子力学的な仮想状態から現実の粒子として取り出すことができる。

量子力学「嘘ついていい」

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

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

トップクォーク 短い嘘ならついていい ( $10^{-26}$  秒)

一番重い素粒子

一方 126GeV

H

よく壊れる

反トップ

トップ

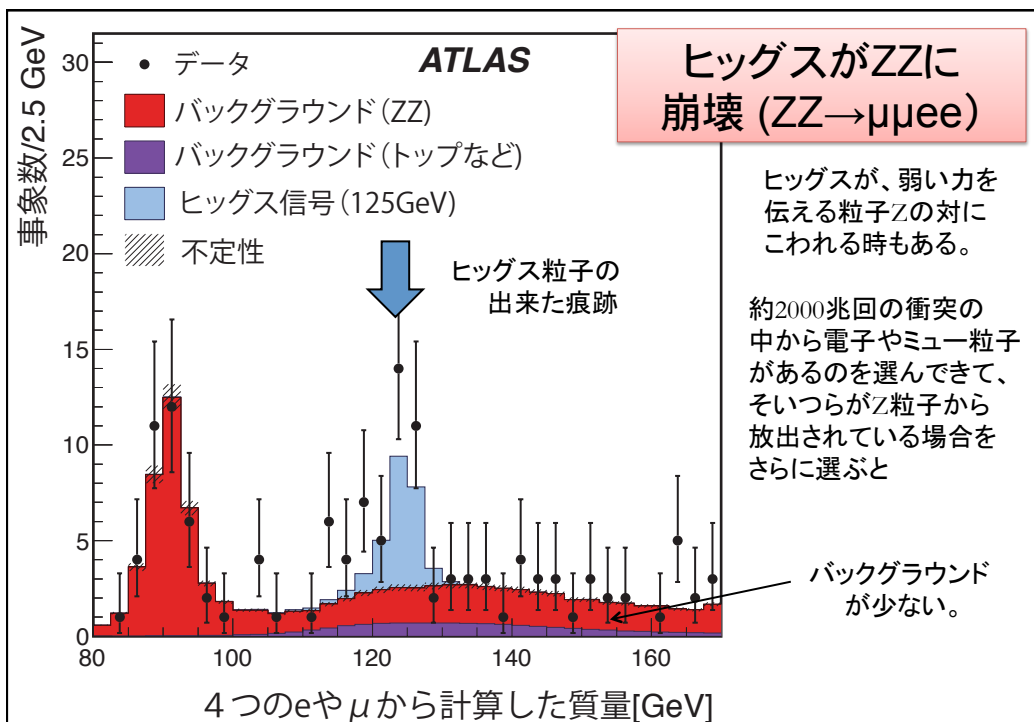
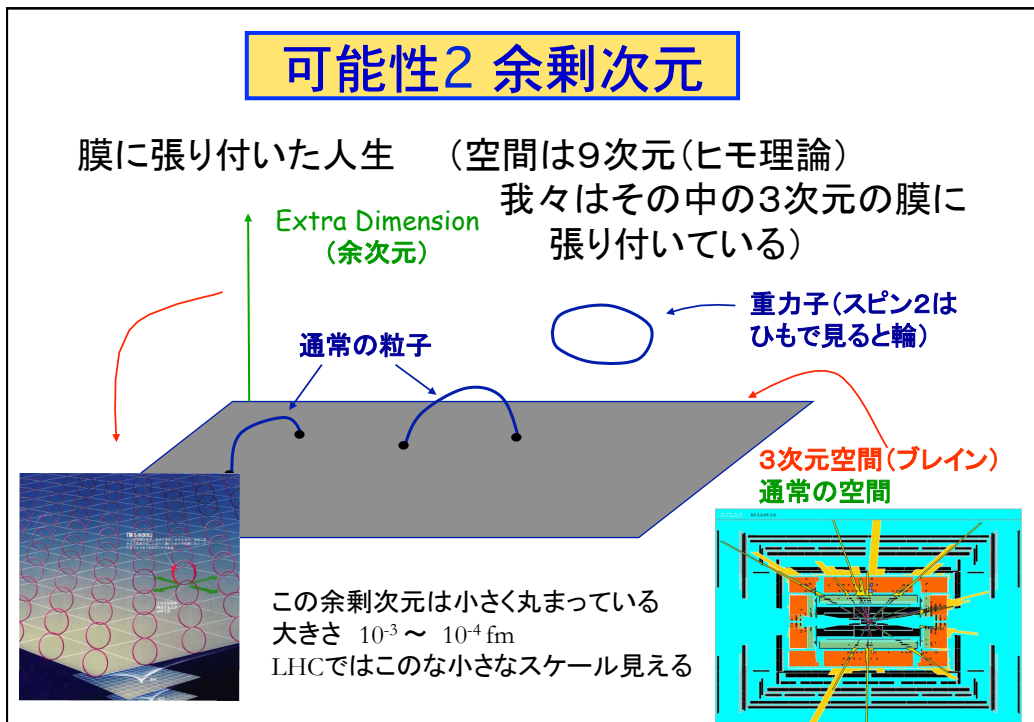
嘘からさめてなくなるけど、トップクォークは電荷をもっているので光をだす

光  $\gamma$

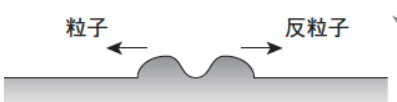
光  $\gamma$

しかし、トップクォークは質量  $173\text{GeV} * 2 \sim 350\text{GeV}$

光



非常に短い時間(10<sup>-21</sup>秒ぐらい)で



粒子 ← 反粒子

ヒッグス粒子はすぐに粒子対に壊れる。  
重たい粒子に良くくっつく

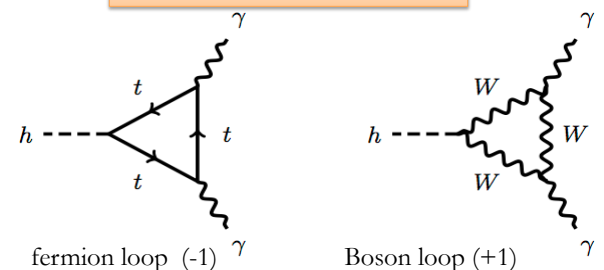
H

W<sup>+</sup>, Z, t, b, c, τ<sup>+</sup>, ....., g, γ

W<sup>-</sup>, Z, t, b, c, τ<sup>-</sup>, ....., g, γ

この壊れ方に分けて  
それぞれ探索を行っている

何故 光に崩壊するのか?



fermion loop (-1)      Boson loop (+1)

spin 1/2 vs 1  
の幾何的特徴で  
cancelする方向

量子力学「嘘ついていい」

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

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

トップクォーク  
一番重い素粒子

短い嘘ならついて  
いい(10<sup>-26</sup> 秒)

一方 126GeV

H

よく壊れる

反トップ

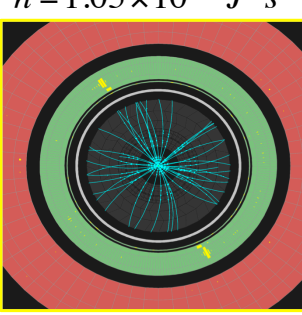
トップ

嘘からさめて  
なくなるけど、  
トップクォークは  
電荷をもっている  
ので  
光をだす

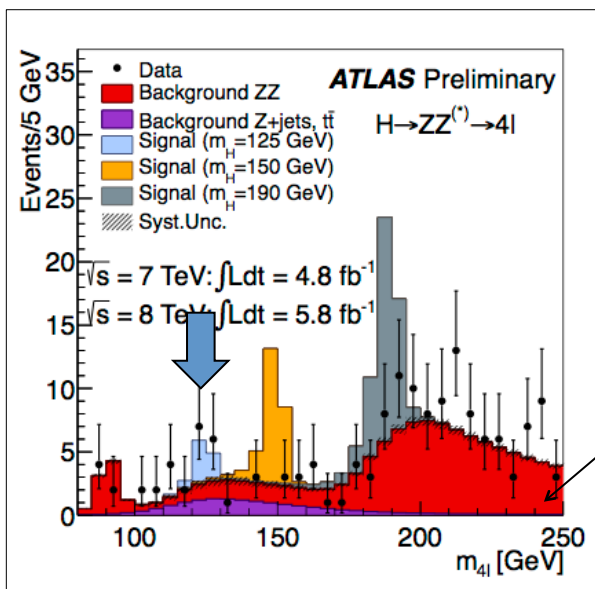
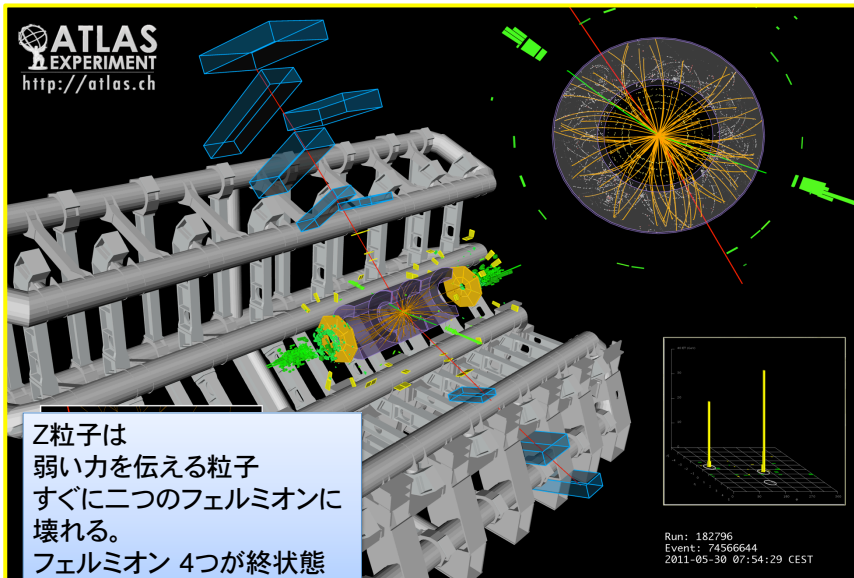
光

しかし、トップクォークは  
質量 173GeV \* 2 ~ 350GeV

光



ヒッグスがZZに崩壊 (ZZ→μμee)



大事な点  
ちがうタイプの研究でも  
同じように見えている。

更に ATLASばかりでなく  
CMSと言う商売がたきも  
同じように見えている。

バックグラウンド

2013年3月7日  
発表の新しい  
結果

4つのレプトンのエネルギーや運動量を測定して  
もとめた質量

数は少ないけど  
バックグラウンド  
も少ない



## 可能性2 余剰次元

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)

Extra Dimension (余次元)

通常粒子

重力子(スピン2はひもで見ると輪)

3次元空間(ブレイン)  
通常空間

この余剰次元は小さく丸まっている  
大きさ  $10^{-4}$  fm  
LHCではこの小さなスケール見える

### 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  $6 \times 10^{24}$  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。

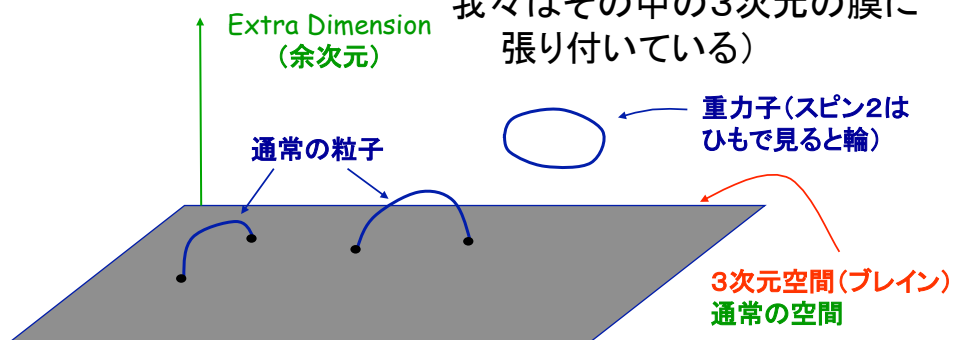
クリップは地球に落ちず、磁石へと引き寄せられる

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」

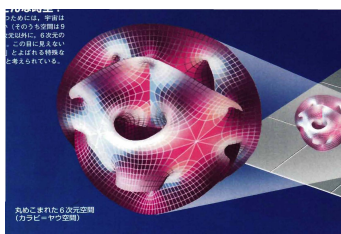
膜に張り付いた人生 (空間は9次元(ヒモ理論))

我々はその中の3次元の膜に張り付いている)



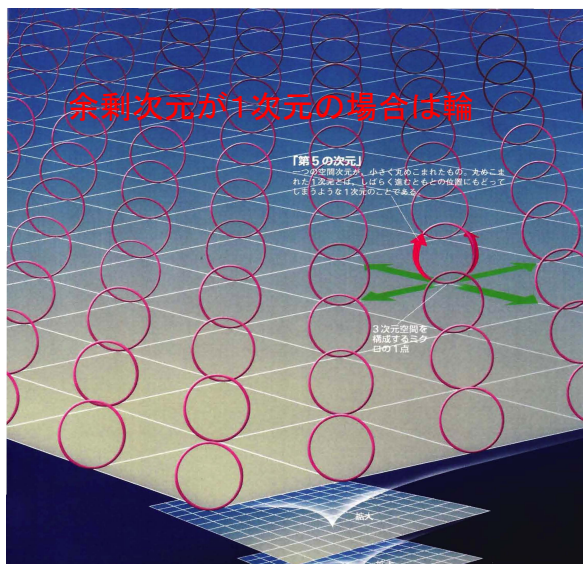
重力子は、広い空間を自由に行き来して、我々は3次元の膜にはりついている。重力子がこの膜に来たときだけ感じる → 重力が弱く見える。

余剰次元はコンパクトに縮まっていて見えない。



余剰次元が6次元の場合はふしぎな形

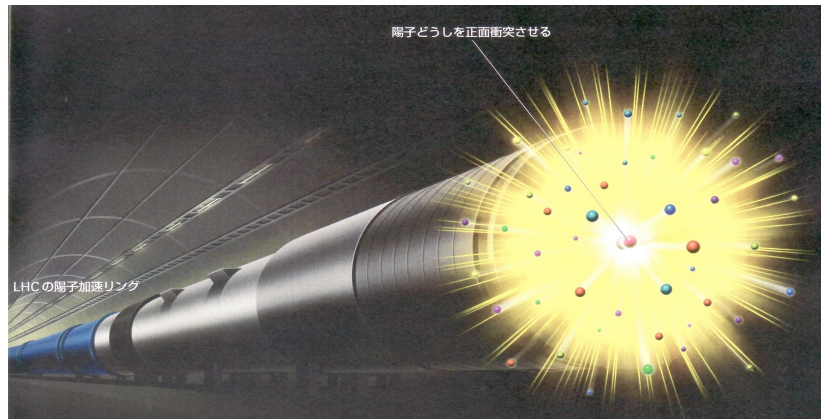
これの大きさが不明  
 $10^{-35}m$  くらいかもしれない  
 $10^{-19}m$  と大きいかもしれない



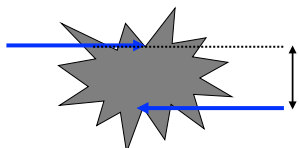
余剰次元が1次元の場合は輪

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

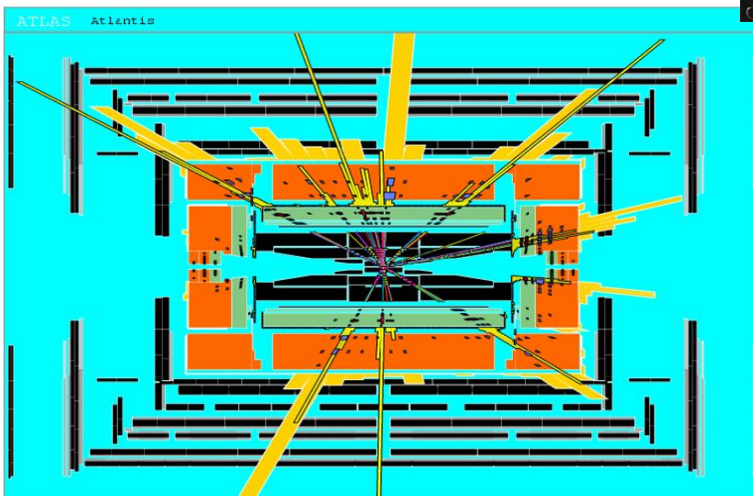
もし、**大きさが $10^{-19}\text{m}$** だとLHCで効果が見える。  
 この距離まで近づくと、次元数が大きくなり 重力が強い力となる。



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)