

クレジット:

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 浅井祥仁

ライセンス:

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。




大きな宇宙を生み出した 小さな素粒子と力

ミクロな素粒子から マクロな物質・宇宙
を考える

理学部

浅井祥仁

講義の目次(keyword)

3回目		第4回	物質を構成する素粒子
		第5回	素粒子に働く力
		第6回	ミクロな宇宙が作る巨大な宇宙

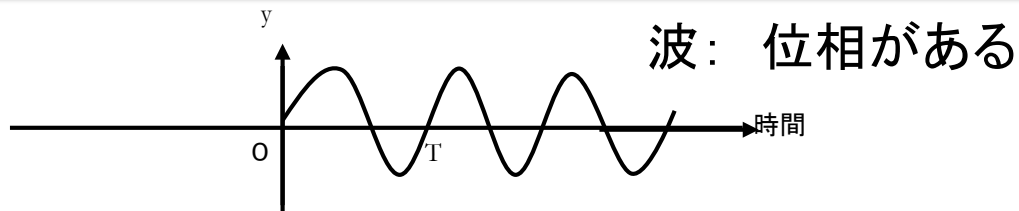
- 1) 復習:ゲージ原理
- 2) 16種類の素粒子が発見
- 3) 特殊相対性理論 重大な問題 「止まらない」
- 4) 素粒子の質量とは
- 5) どうやって探す?
- 6) ヒッグス粒子発見
- 7) 質量はやばい
- 8) ヒッグス粒子発見の意義
- 9) スピン
- 10) 重力と素粒子
- 11) まとめると

わからないぞ！！

- 長さの最小単位
- ゲージ原理
- 光速不変(相対論)

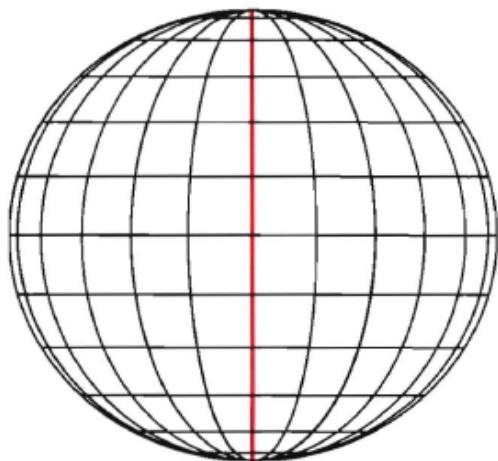
ゲージ原理 素粒子への力の原理

量子力学では
素粒子 = 粒子 + 波

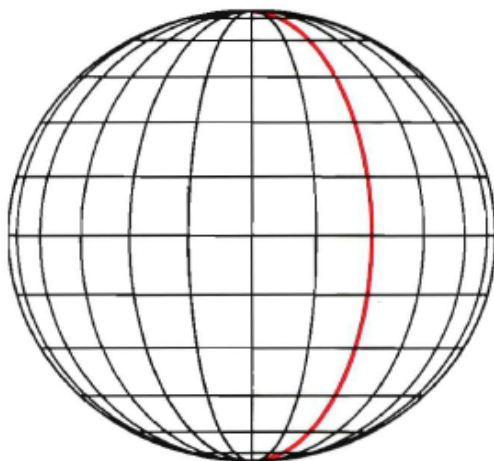


絶対「位相座標」

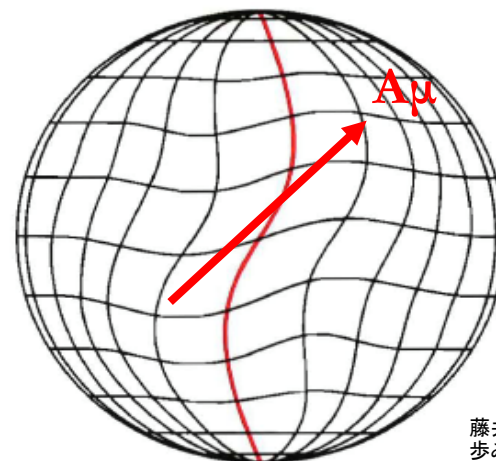
「位相座標」を空間で自由に



はじめの球



大局的対称性の
変換



局所的対称性の
変換

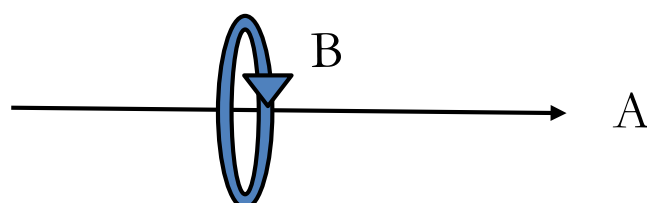
藤井昭彦編『統一理論への
歩み』(別冊サイエンス; 55.
特集素粒子)
東京: 日経サイエンス社
P98 大局的対称性と局所
的対称性

宇宙全体で位相の取り方が同じというのは、“絶対”があるのはまずい。
時空の各点で位相は任意にとって良い(局所的対称性:ゲージ原理)
位相差は観測出来るので物理法則は無茶苦茶になる。
この歪みを直す様に、粒子 A_μ が伝搬する“位相の帳尻あわせ”粒子
位相が調整される (それ以外は、繋がっていない)

A μ って何？ ベクトルポテンシャル

電場と磁場は強く関係しているので、ひとつの量Aで表すことができる

$$E = -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad \varphi = At \quad \text{静電ポテンシャル: 電荷湧きだし} \quad \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

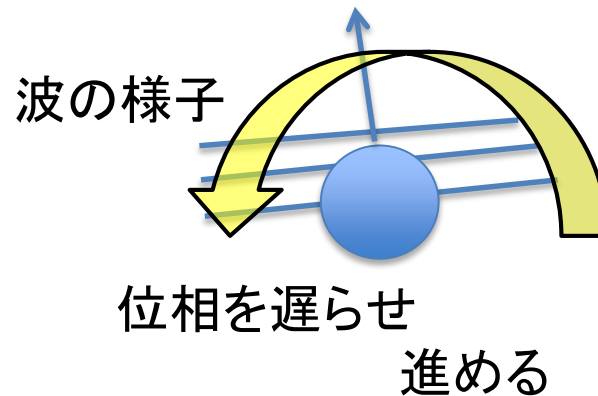
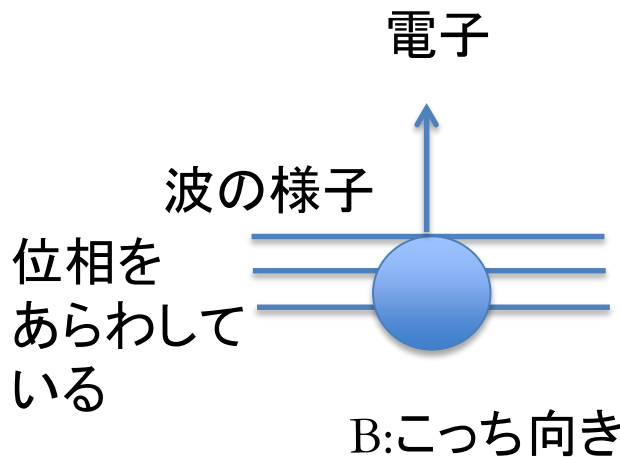
$$B = \nabla \times A \quad A_{x,y,z} \quad \text{ベクトル} \quad (At, Ax, Ay, Az) \quad \text{レンツの法則}$$


<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~asai/Lecture/kisohouteishiki3.pdf>

又は 電磁気学の授業 でならう「補助場」

A:ベクトルポテンシャル
これが光の実体

他のすべての力も同じ



磁場:B
紙面こっち向き

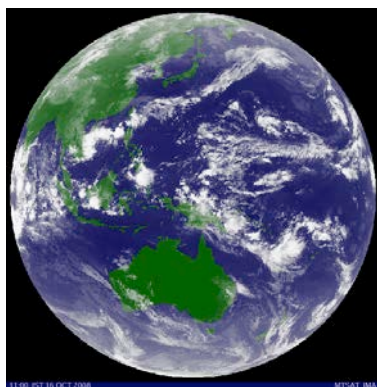
これまで16種類の素粒子が見つかった

物質を形作る素粒子
クォーク・レプトン

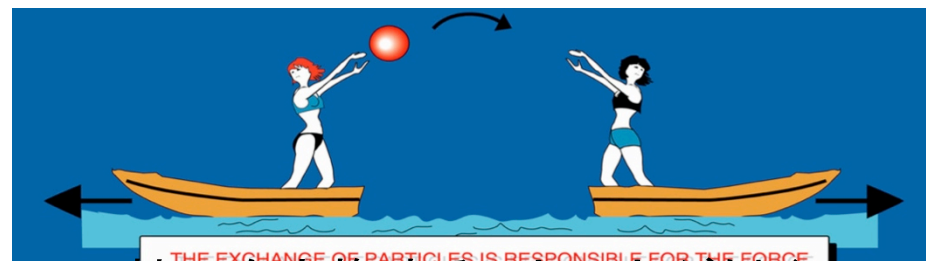
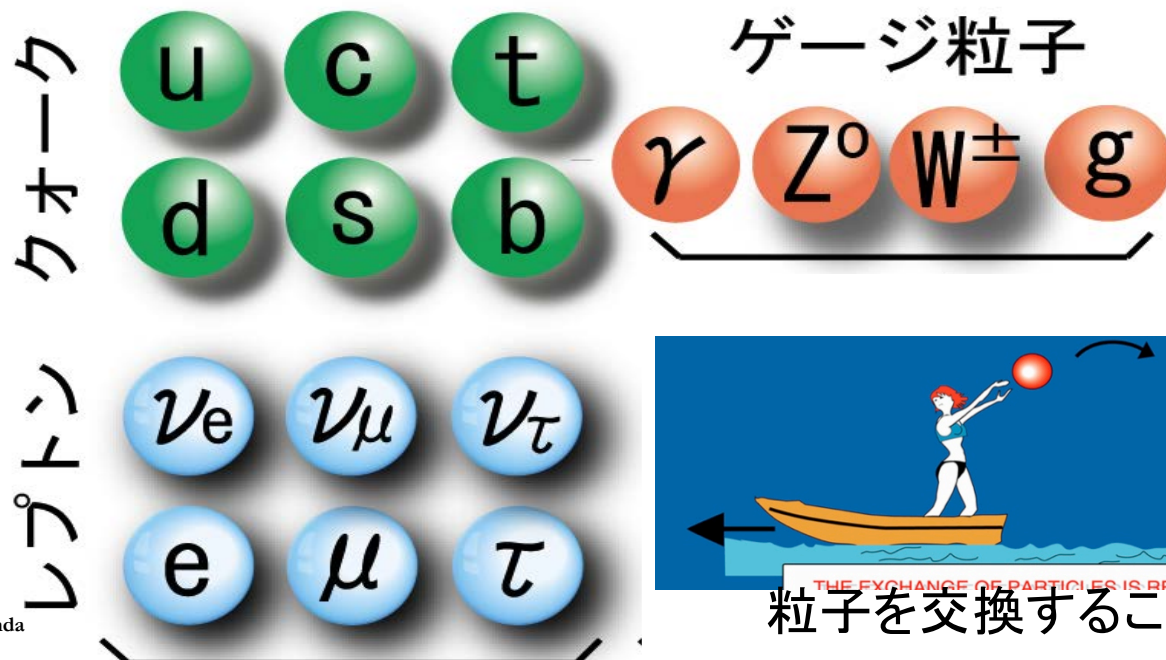
力を伝える素粒子
ゲージ粒子

標準模型

地球も皆さんも
すべて



気象庁
「ひまわり6号が撮影した地球」
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_onda_nka/p01.html

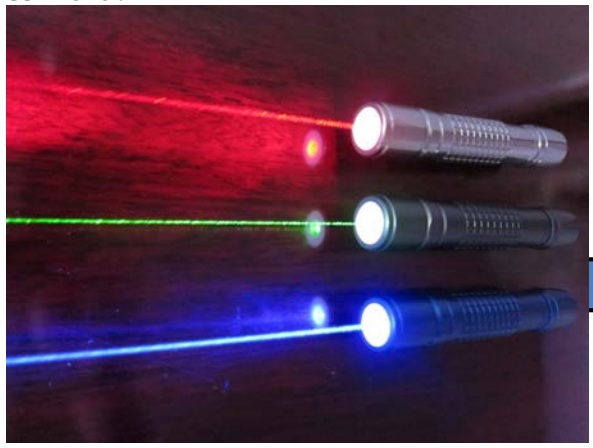


粒子を交換することで力が働く

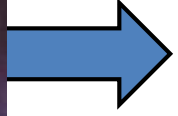
©CERN
「The forces in Nature」
<http://cds.cern.ch/record/39722>

特殊相対性理論

Photo by 伯理璽天德, from Wikimedia Commons
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser.jpeg>
CC BY-SA 3.0



光

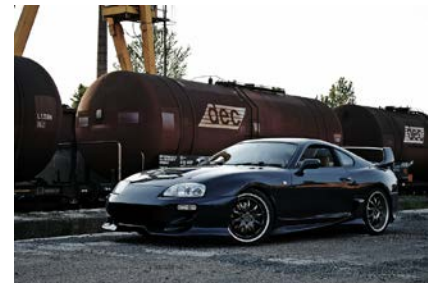
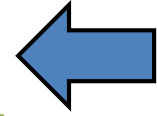


30万km/秒 光速で移動



普通の間覚

100km/h



50km/h

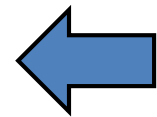


Photo by Toyota Motor Europe, from GATAG
<http://free-photos.gatag.net/tag/%E3%83%88%E3%83%A8%E3%82%BF-%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%A6%E3%82%B9>
CC BY 4.0

30万km/秒



止まっている

「止まっている」なんてある人から見ただけのこと

光にはこんな不思議なことが起きている。

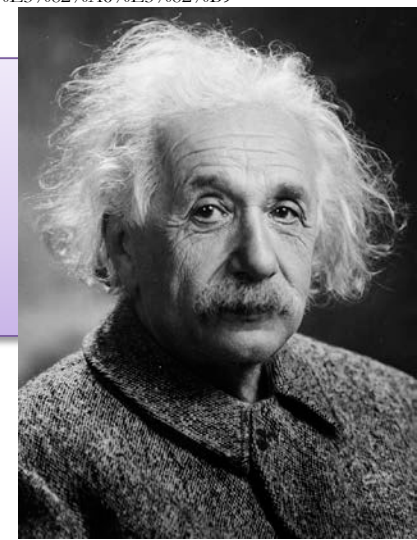
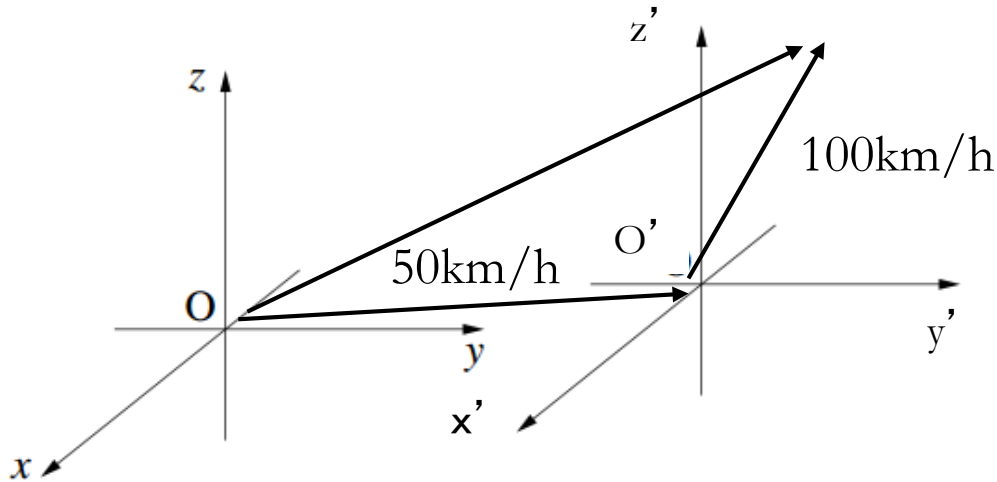


Photo from Wikipedia Commons 7

共通の時間(ガリレイ変換)



みんなに共通の「絶対時間」がある

$$t' = \gamma(1 - \beta^2)t = \sqrt{1 - \beta^2} t \quad \text{時間が遅れる}$$

右図 5秒 → 4秒になってる

$$t=0$$

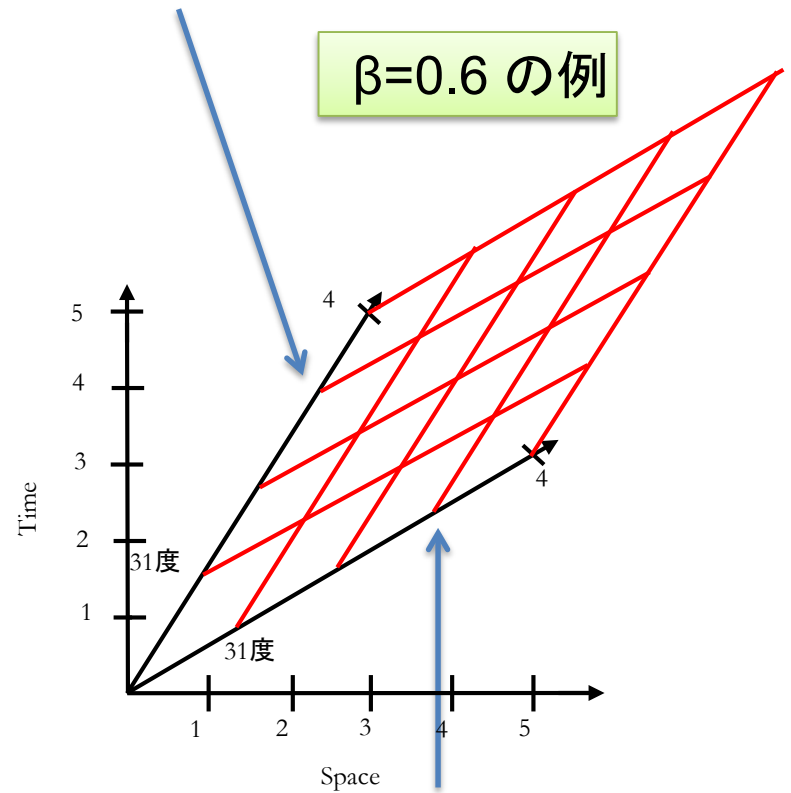
L=5 だった「もの差し」は

$L' = L\sqrt{1 - \beta^2}$ 短くなる(ローレンツ収縮)

時間と空間は同等

運動する座標系の原点にいる人 $x'=0$
 $x = \beta ct$

$\beta=0.6$ の例



それぞれで「止まっている」 $t=t'=0$ の軸
 もの差しを考える

ローレンツ変換

こう変形すると
時間と空間が対等なことがわかる。

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma \\ -\beta\gamma & \gamma \end{bmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

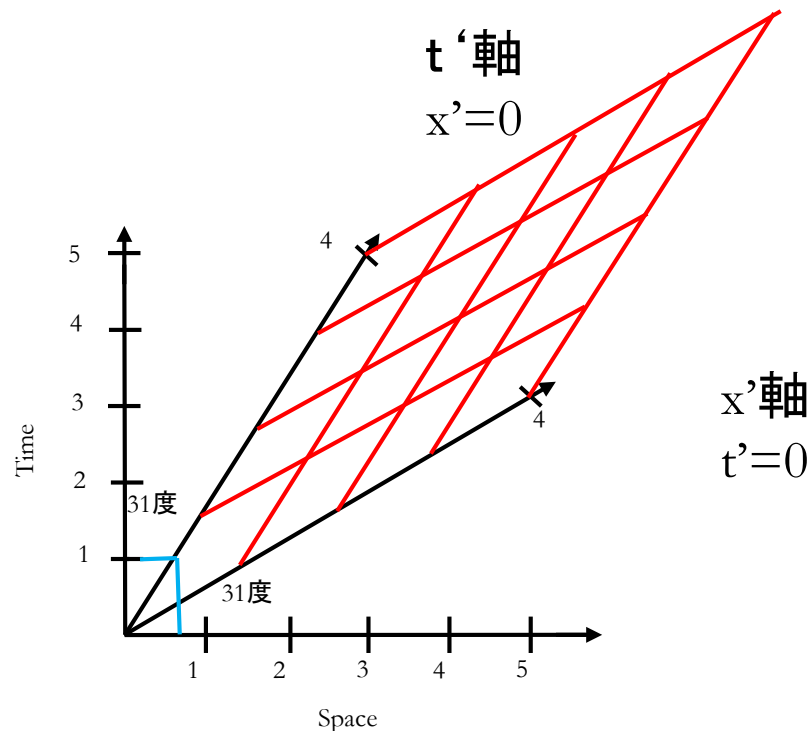
x方向に運動していると
する

C: 光速

$\beta = v/c$ (光速で規格化した速度)

$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2} \geq 1$

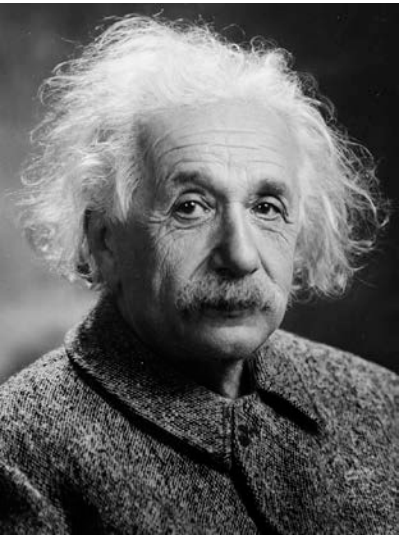
- 1) 時間の進み方が人によって違う。
絶対時間の否定
- 2) 光って? どこ
- 3) $\beta < 1$ が上限 (光速をこえられない)



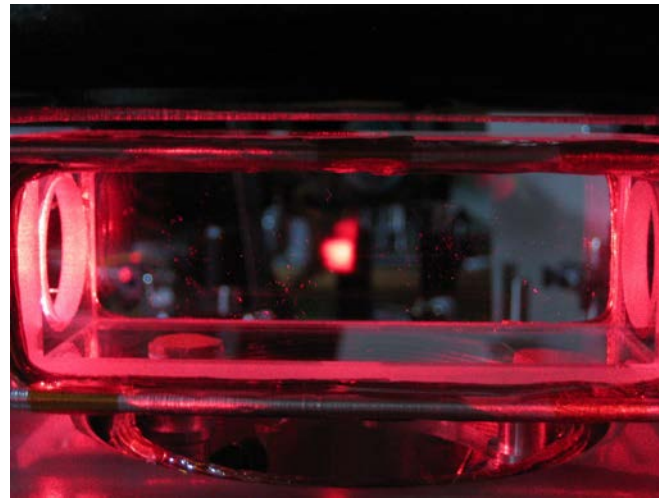
→ 光だけが何故 ずるい!!

素粒子の質量って？

光が偉いのではなく
他が質量をもってるから



「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。

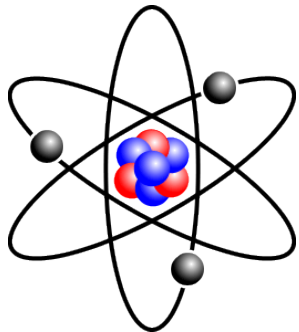


止まった原子
の写真(Li)

五神・湯本・井手口研究室

「原子や電子」も
とめることが
出来る。

この違いは何故？



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stylised_Lithium_Atom.png
Image by Liquid_2003/Halfdan, from
Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0

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

「質量」

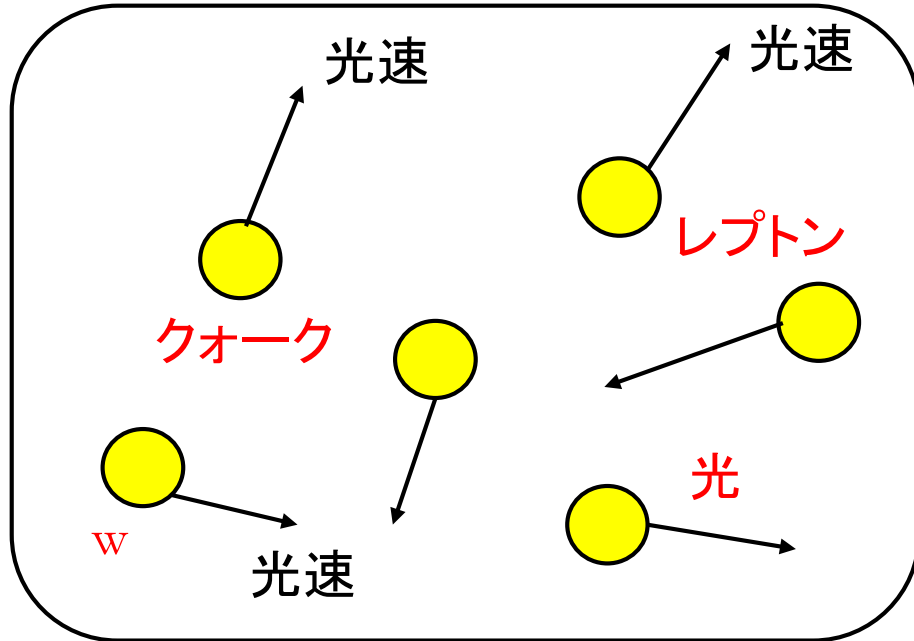
ニュートン方程式 $F = m_1 a$
速度の変化(加速度)を阻害 (慣性質量)
質量があると、減速できて止めることができる
 $m_1 = 0$ だと、いつも一定速度 c

重さは $F_g = m_g g$ (重力質量)
 $m_g = m_1$??? (等価原理)

素粒子は、質量がないはず。でも、現実の世界では質量がある。

我々は悪い環境に住んでいる！！

真空の対称性がある場合



現実の世界

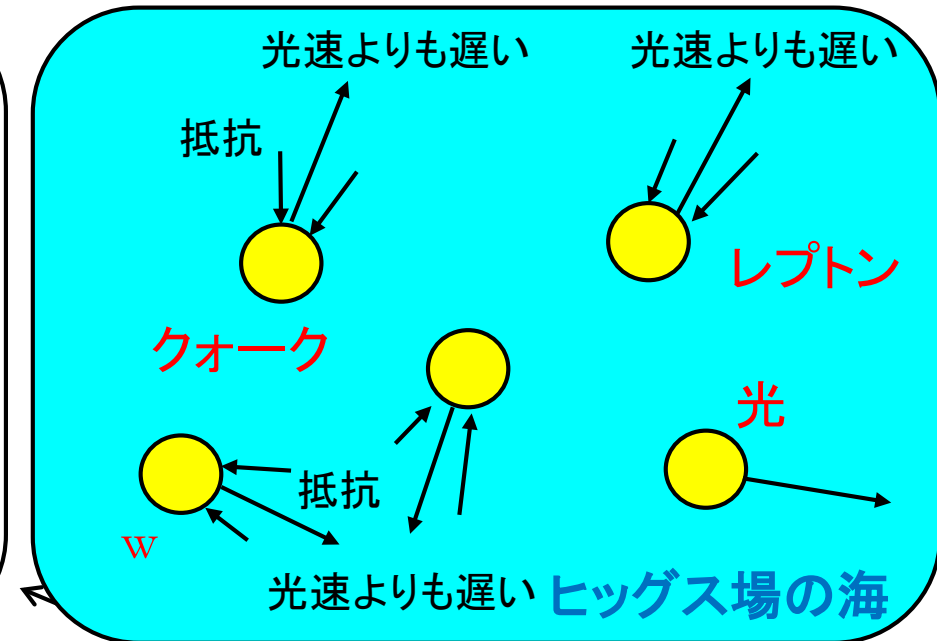
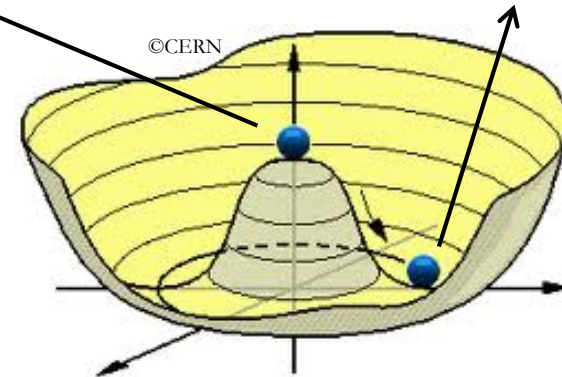


Photo by Betsy Devine, from Wikipedia Commons
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:YoichiroNambu.jpg>
pg
CC BY-SA 3.0

宇宙のはじまり
すべての素粒子の質量がゼロ。全て光速で運動

「自発的に対称性が破れ」て
悪い環境になる。その環境で「質量」を
もった様に見える



ヒッグス場の「場」って？

磁場

宇宙全体一様

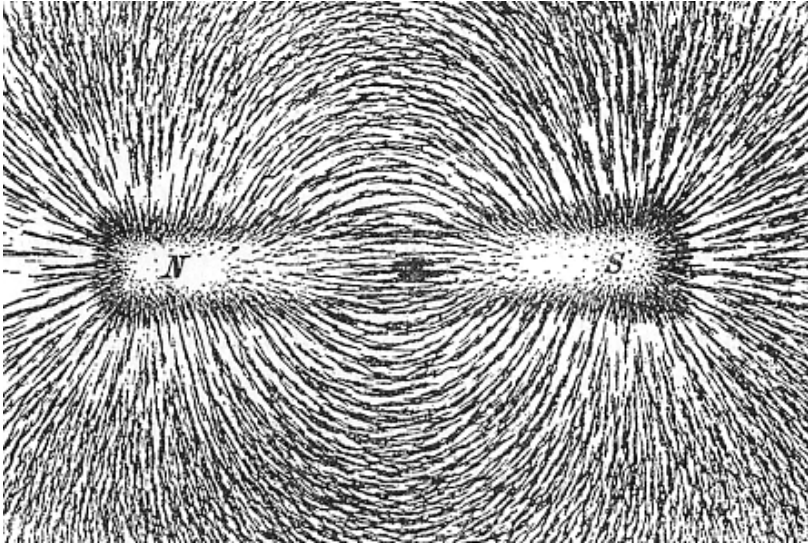
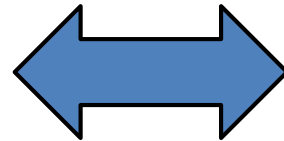
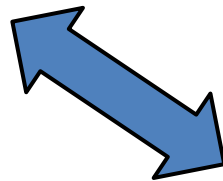


Image from Wikipedia Commons



濃淡



磁場を時間変化→起電力
(レンツの法則)

時間的に
変化 → 光

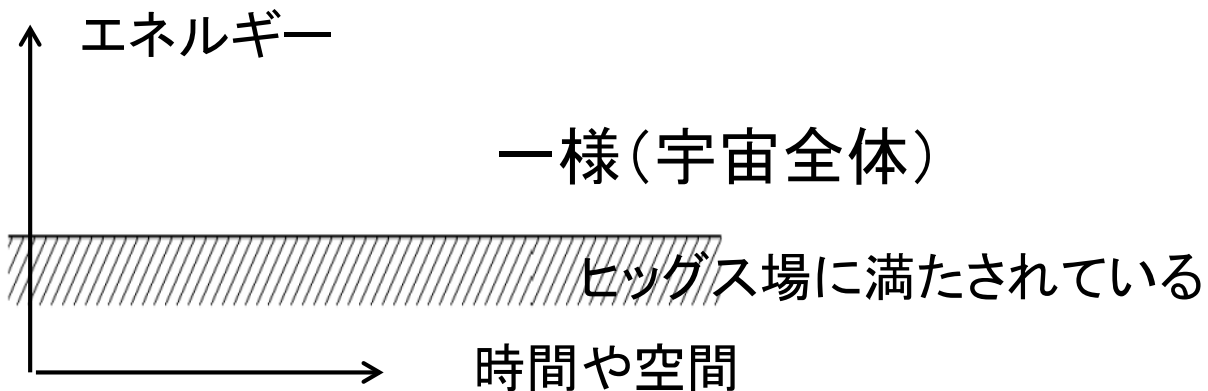


エネルギー
(石をなげる)

Photo from GATAG

自然科学は、実証学問
検証されて初めて物理学になる

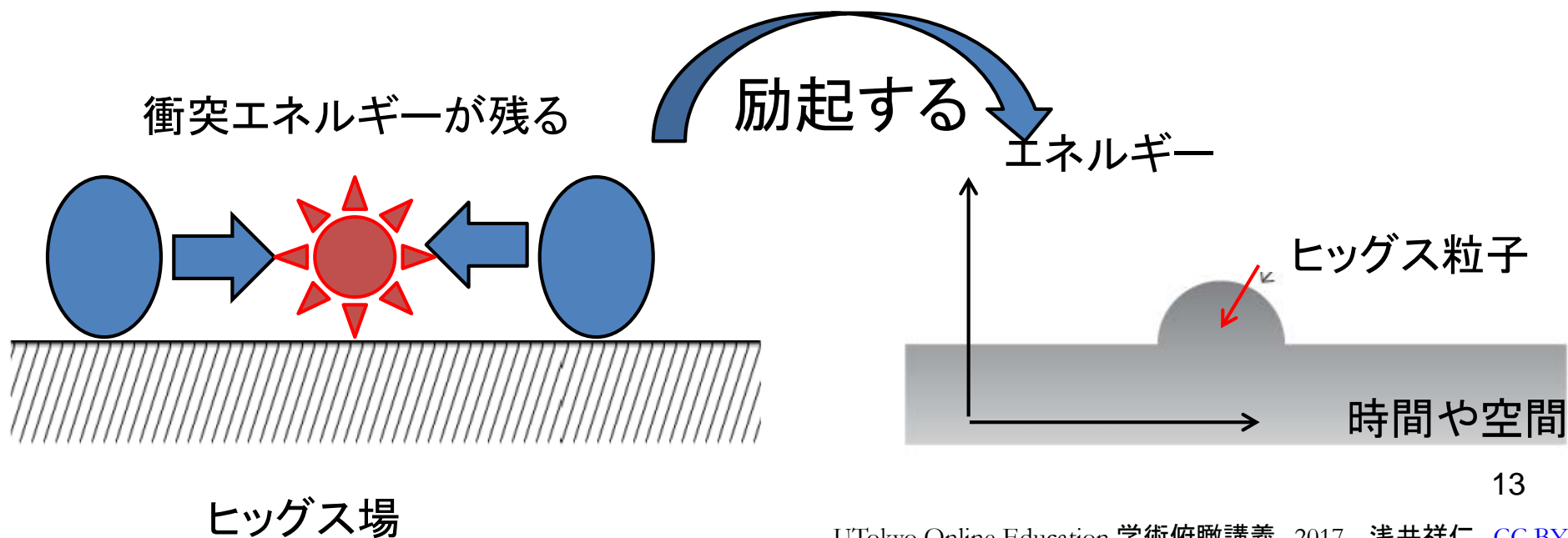
どうやって探す？



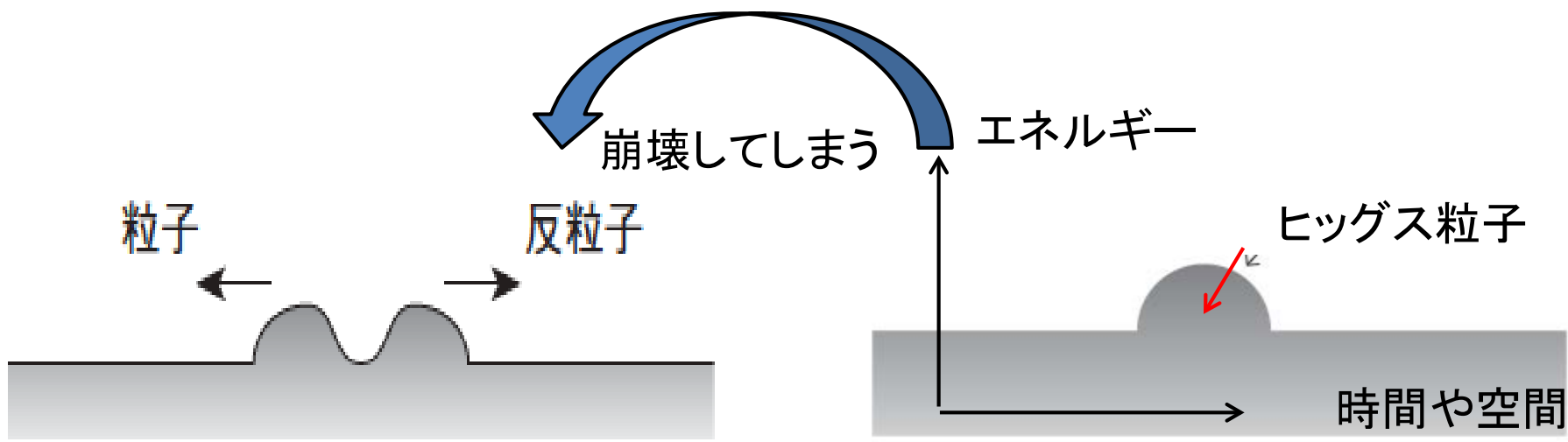
LHC加速器 高いエネルギーで、粒子と反粒子を衝突: 消えて無くなり、
エネルギーだけが残る。

$E=mc^2$ エネルギーが粒子になる

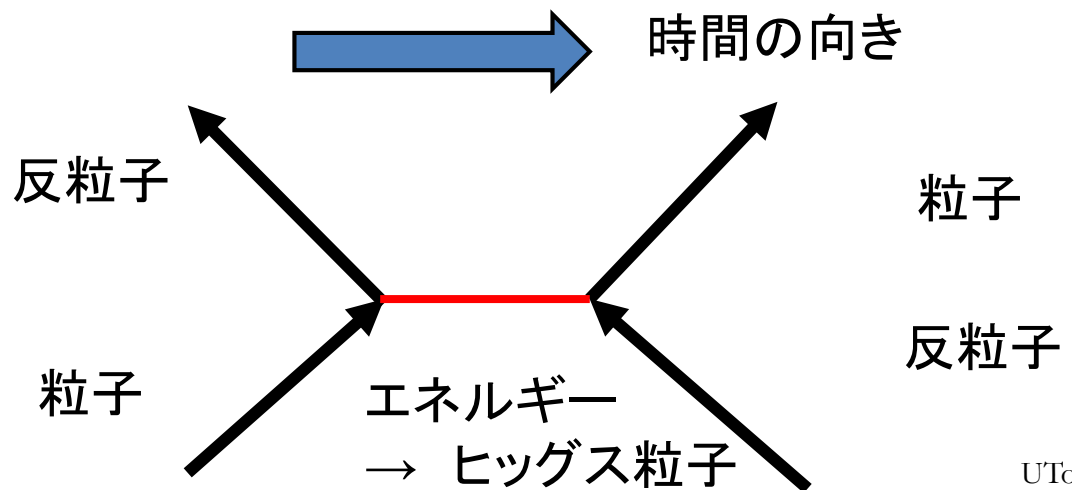
時を遡れる神様が見たら？



素粒子の世界では、時間逆向きのが普通に起きる。
 (時間の向きを区別しない)

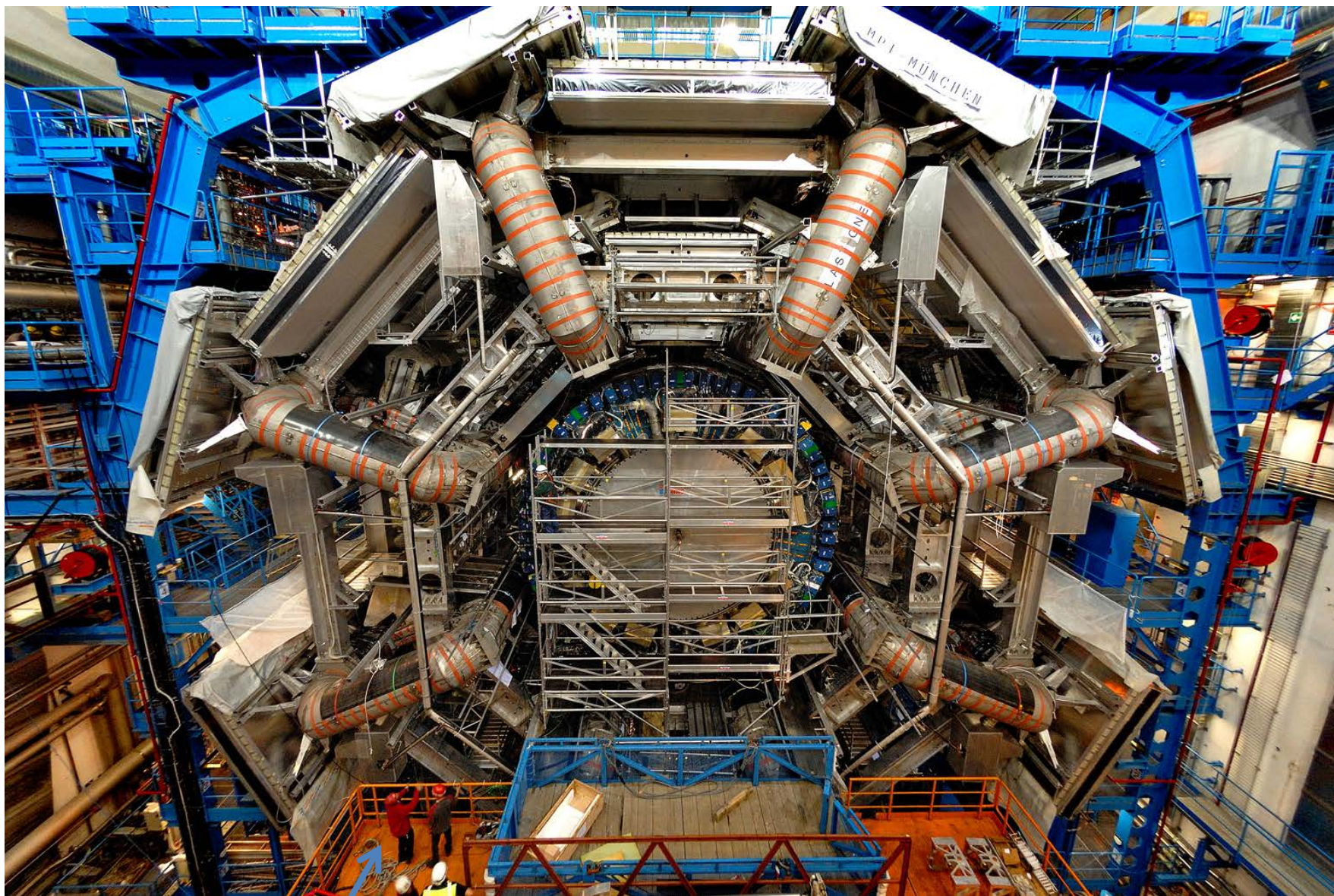


すぐに二つの粒子・反粒子に壊れてしまう



この出て行く
 粒子・反粒子を
 調べて

起こった素粒子反応を捕らえるアトラス検出器



©CERN
<http://cds.cern.ch/record/989405>

人間

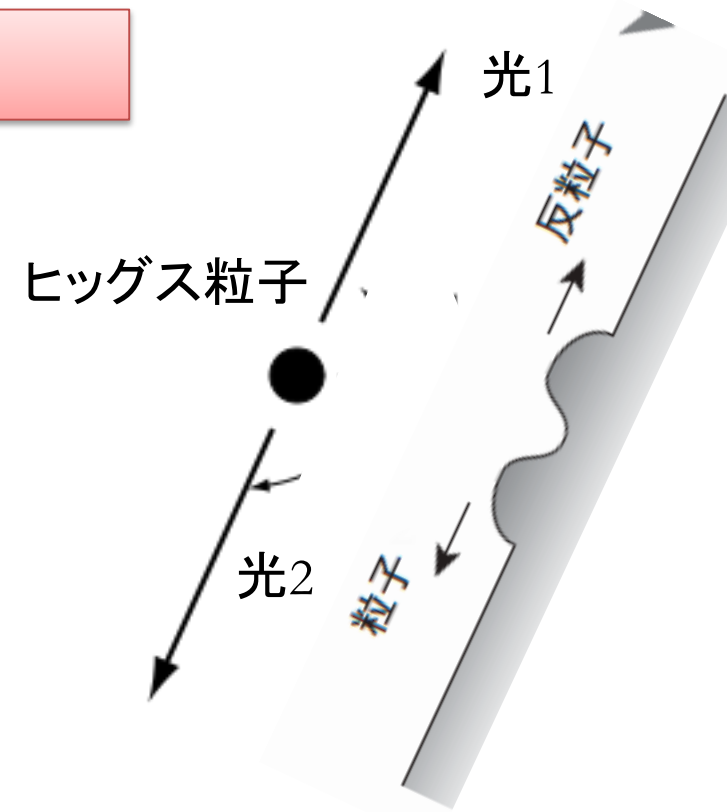
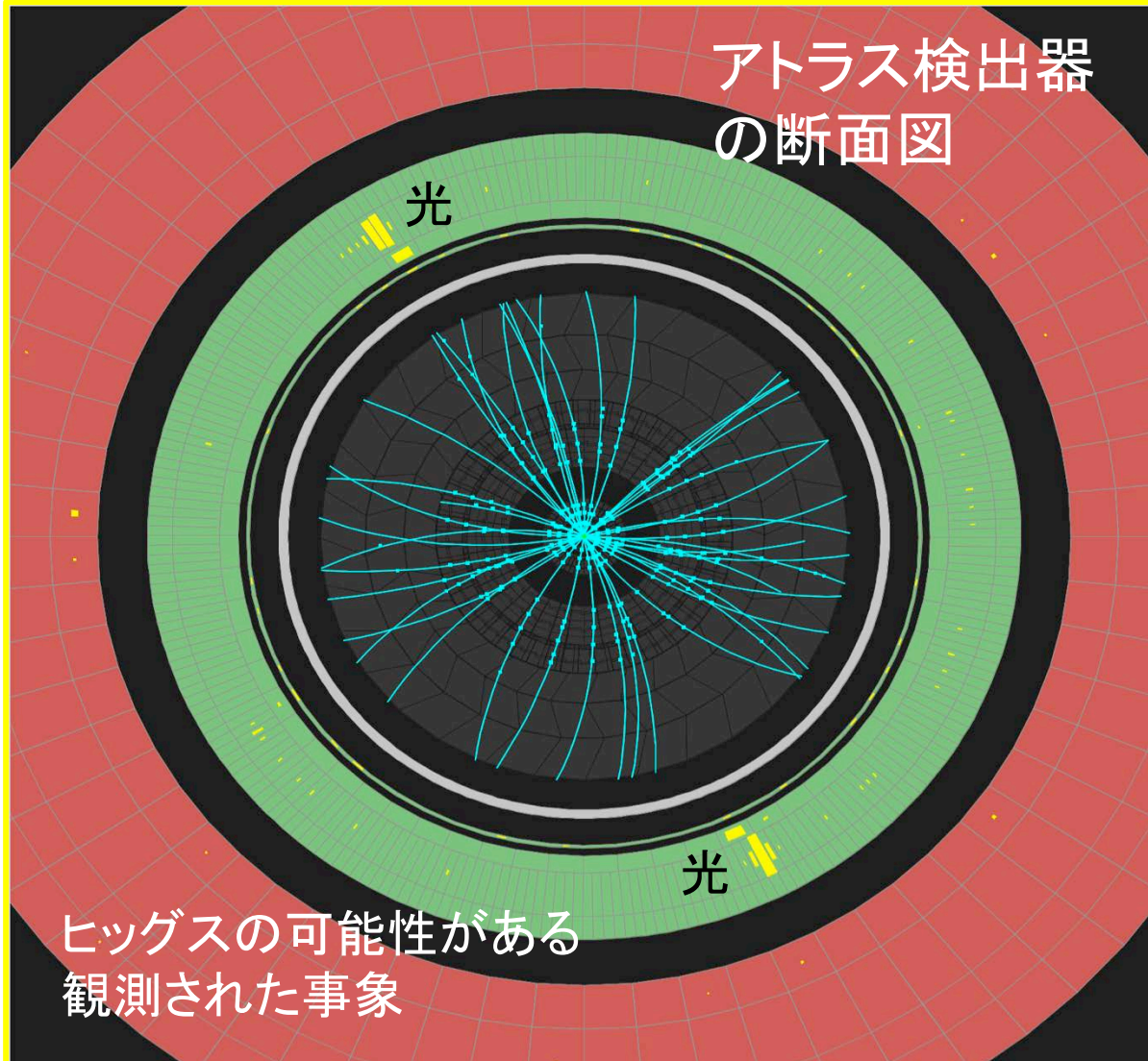
直径22m 長さ44m 1.1億チャンネル高性能

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 浅井祥仁 [CC BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

何故
大きい？

ビデオ
15

ヒッグスが2つの光子に崩壊した例



二つの光のエネルギーと方向を正確に測定する。その和は、もともとの粒子のエネルギー

エネルギーと運動量保存
ここに昔何があったかが分かる

©CERN

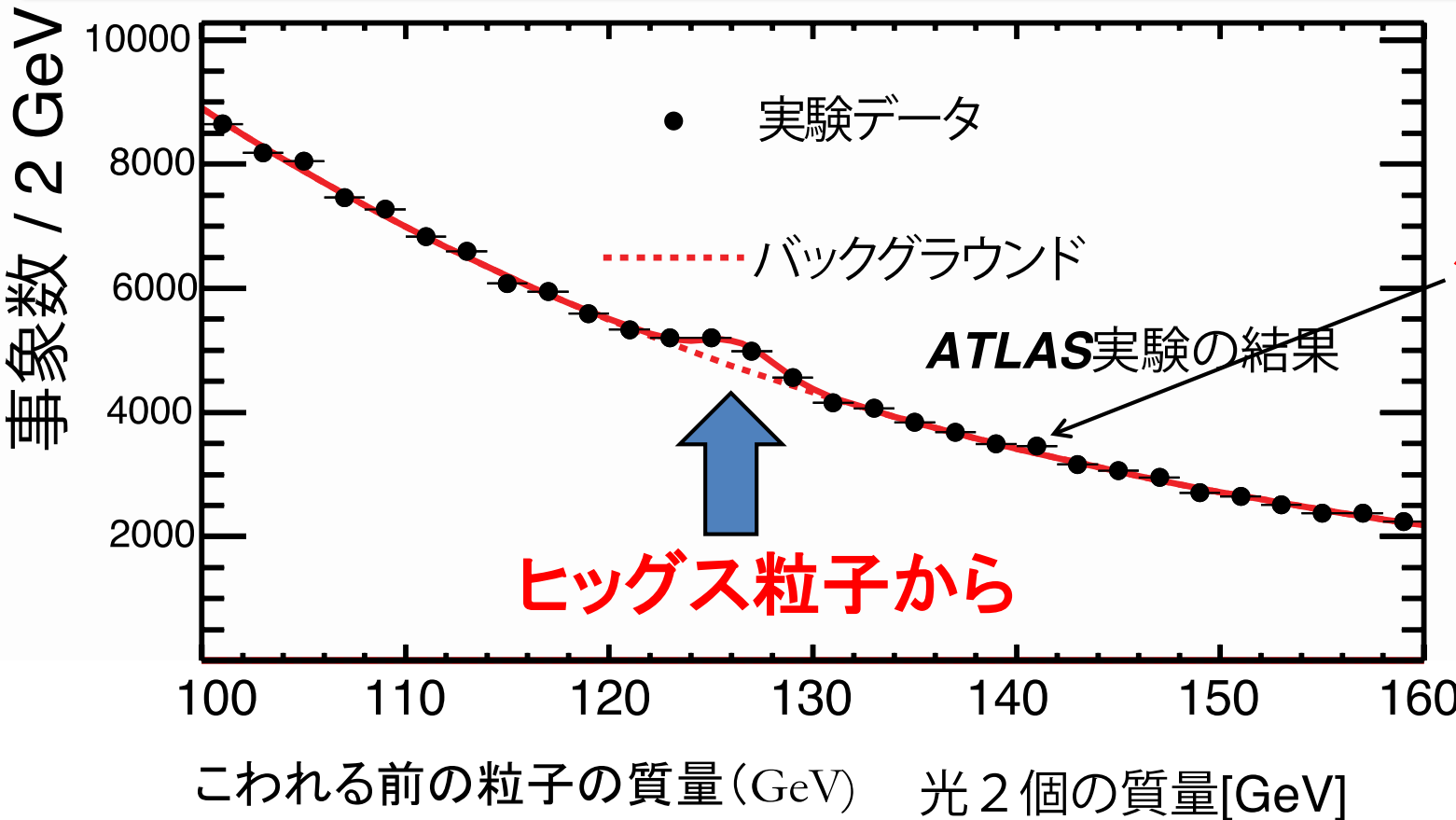
The ATLAS collaboration (2011) Search for the Standard Model Higgs boson in the diphoton decay channel

with 4.9 fb⁻¹ of ATLAS data at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ATLAS CONF-2011-161

<https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2011-161/>

16

約2600兆回の衝突の中から光が2個ある現象を探し出してくる



**バックグラウンド
偽物反応:**
ヒッグスから
ではないけど
似た現象 (2個の光が
出ている。)
2個の光は
無相関にでてるので
質量は
バラバラになる。

ATLAS Experiment © 2017 CERN

よく、新聞に確率が書いてあったけど。。。

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

2011年12月読売新聞
見出し:ヒッグス粒子の存在 確率
99.98%

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除し
ました

2012年7月東京新聞
見出し:ヒッグス粒子 ほぼ確認 国
際チーム99.9999%

2011年12月(読売新聞)

2012年7月(東京新聞)

神様はさいころ遊び大好き

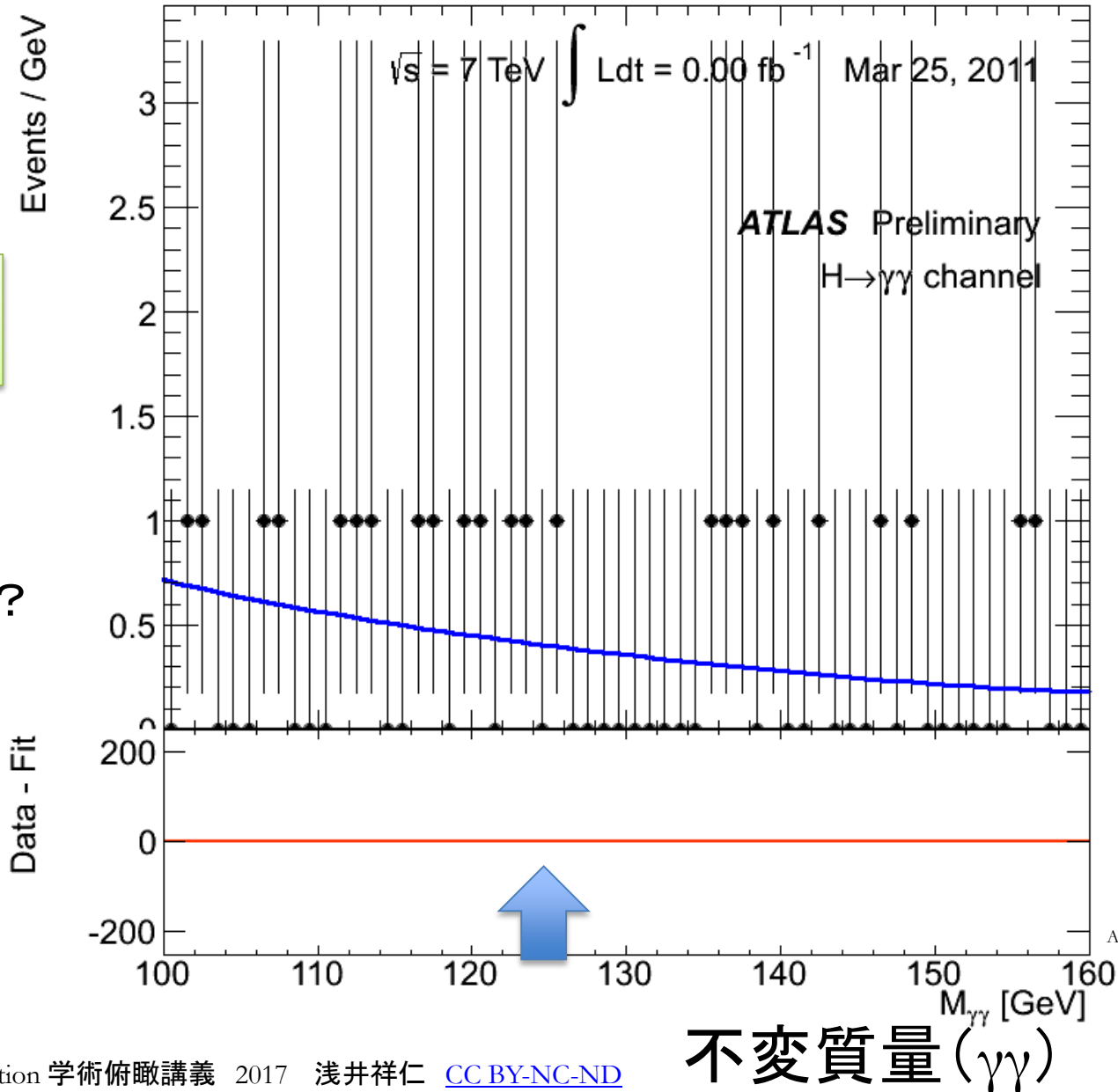
量子力学の 確率の世界



Photo by Gaz, from Wikimedia Commons
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dice.jpg>
CC BY-SA 3.0

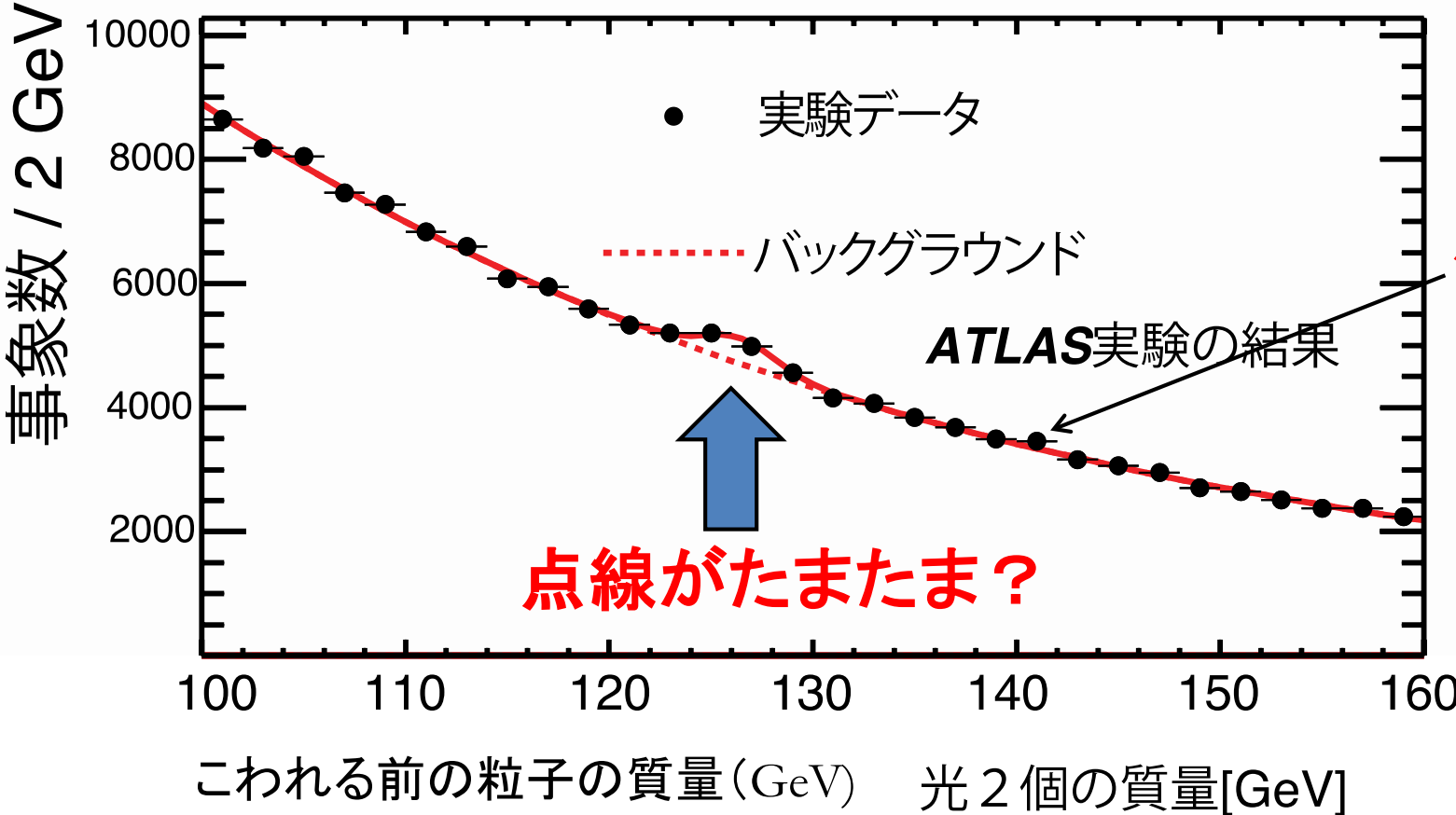
本当の
実験データ

どこら辺から
確信持つか？



ATLAS Experiment © 2017 CERN

約2600兆回の衝突の中から光が2個ある現象を探し出してくる



**バックグラウンド
偽物反応:**
ヒッグスから
ではないけど
似た現象 (2個の光が
出ている。)
2個の光は
無相関にでてるので
質量は
バラバラになる。

ATLAS Experiment © 2017 CERN

素粒子反応: 確率現象

偽物反応が「たまたまヒッグス粒子から」の様に見えてしまうことがある。

その確率が 100 万分の 1 以下になるまで、**“地道に” 実験を繰り返す。**

(これが「発見」の条件)

質量はヤバい！！

鏡の中は別世界

鏡で映した関係：パリティー



1957年

弱い力で **パリティーが破れている**。
実験で発見

左巻き: 弱い力の電荷を持っている
右巻き: 弱い力の電荷をもっていない

Rのニュートリノがいる！



Photo by Bengt Nyman, from Wikipedia Commons
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A2%B6%E7%94%B0%E9%9A%86%E7%AB%A0#/media/File:Takaaki_Kajita_5171-2015.jpg
CC BY-SA 4.0

スピン $1/2$ の物質を構成する
素粒子: 運動量方向と逆方向

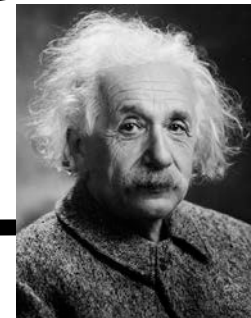
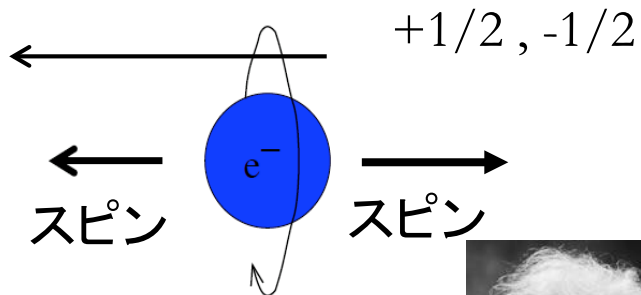
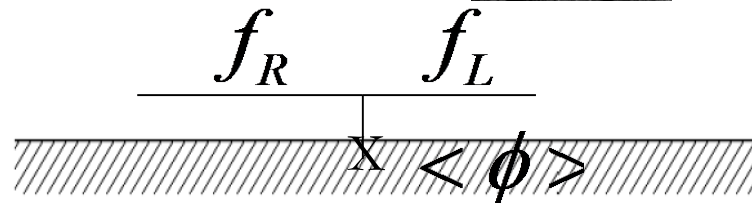
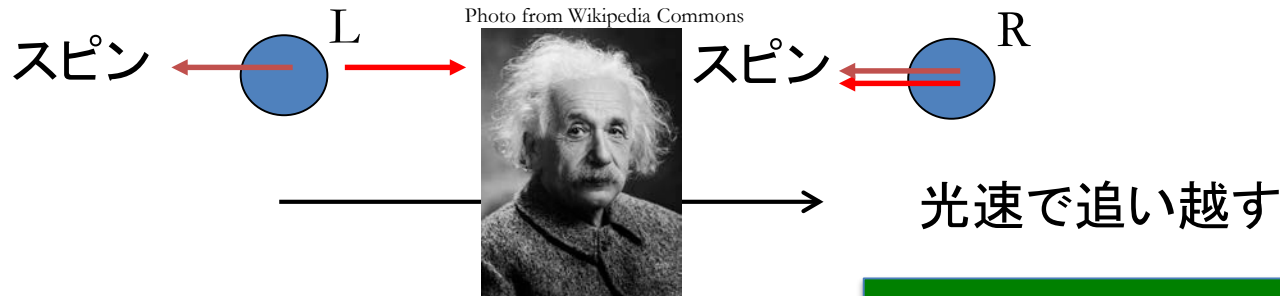


Photo from Wikipedia Commons

質量がある = 光速より遅くなる
光速で追い越す(ローレンツ変換)
左巻きだった粒子が
右巻き粒子になってしまう

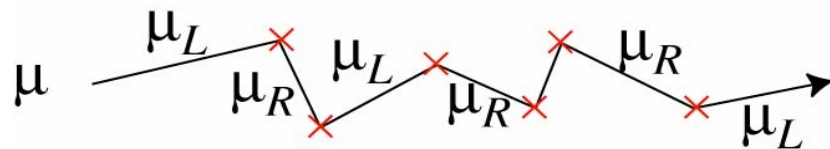
別の素粒子に変わる
質量はまずい

ヒッグス場は、弱い力の電荷のバッファ



ヒッグス場に満たされた真空
「弱い力」が溜まっている。

真空はニュートリノの
様な性質(電荷)をもつ
た、変な状態
にみちている！！



弱い力の電荷をやりとりしながら、粒子の性質が絶えず入れ替わっている。 22

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:ヒッグス粒子(ヒッグス場)

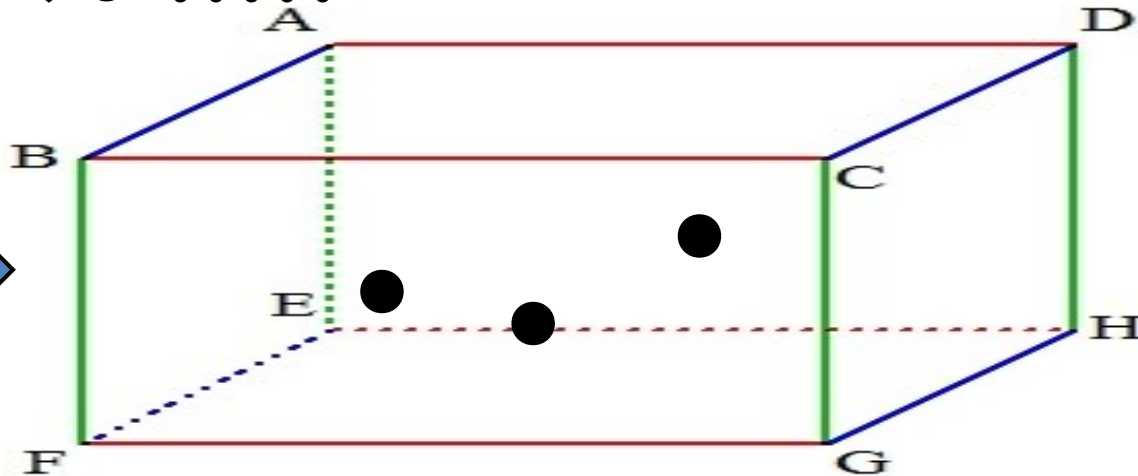
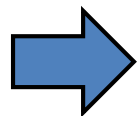
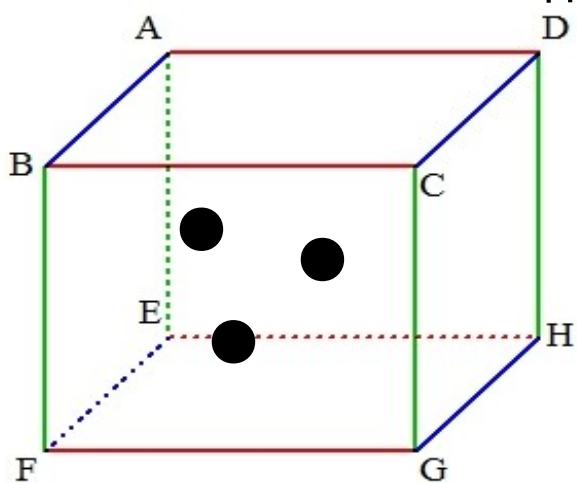
容れ物なので
宇宙全体にひろがっている

「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(弱い力の電荷)のような性質をもっている
のっぺりしたもの:宇宙全体に一様に、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

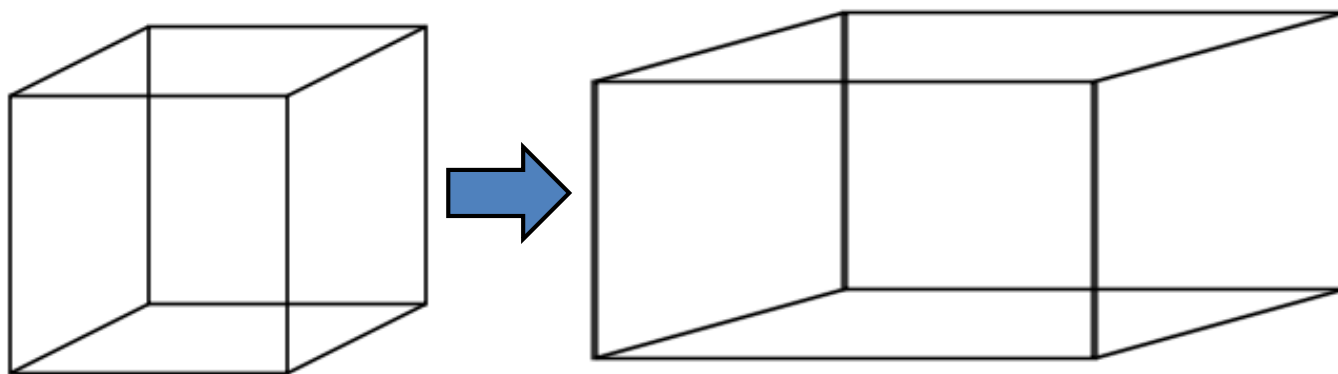
体積2倍にすると。。。。。



気体、液体のエネルギーって？

$$PV = nRT$$

粒子の描像

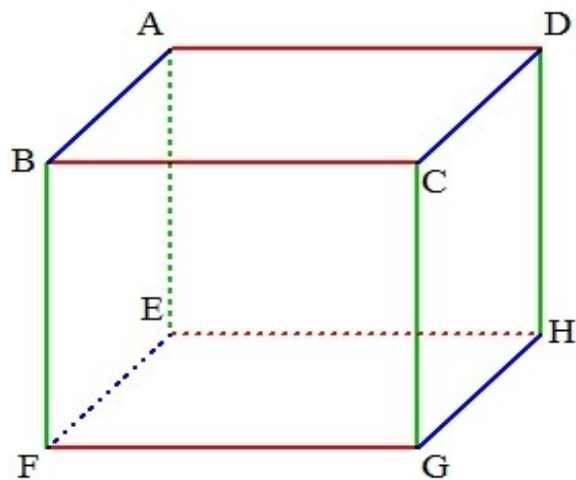


ヒッグス場(真空)
の描像

密度は変わらない

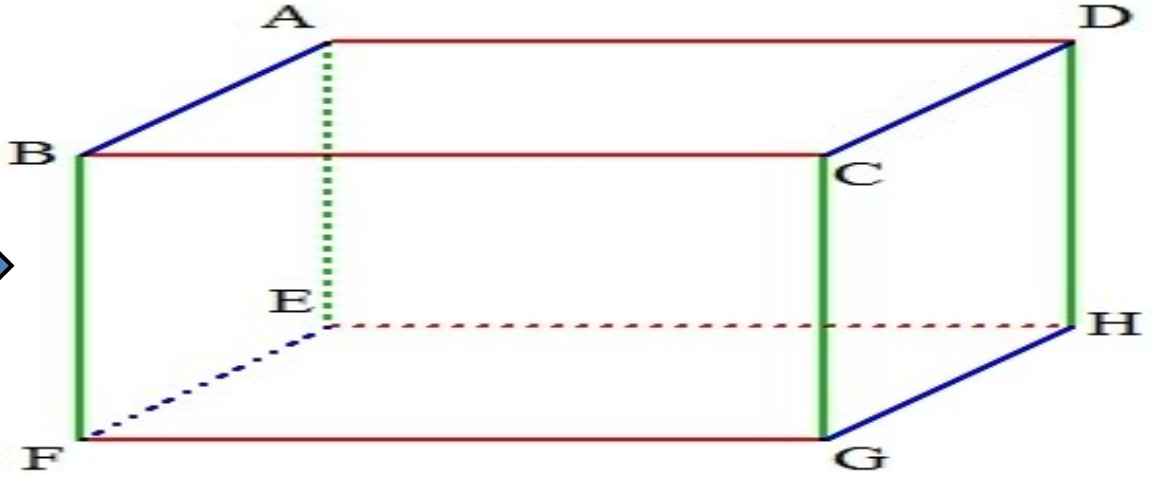
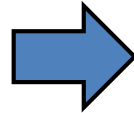
なんかだまされた感じがするのが、
真空のエネルギーの**へんさ**

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

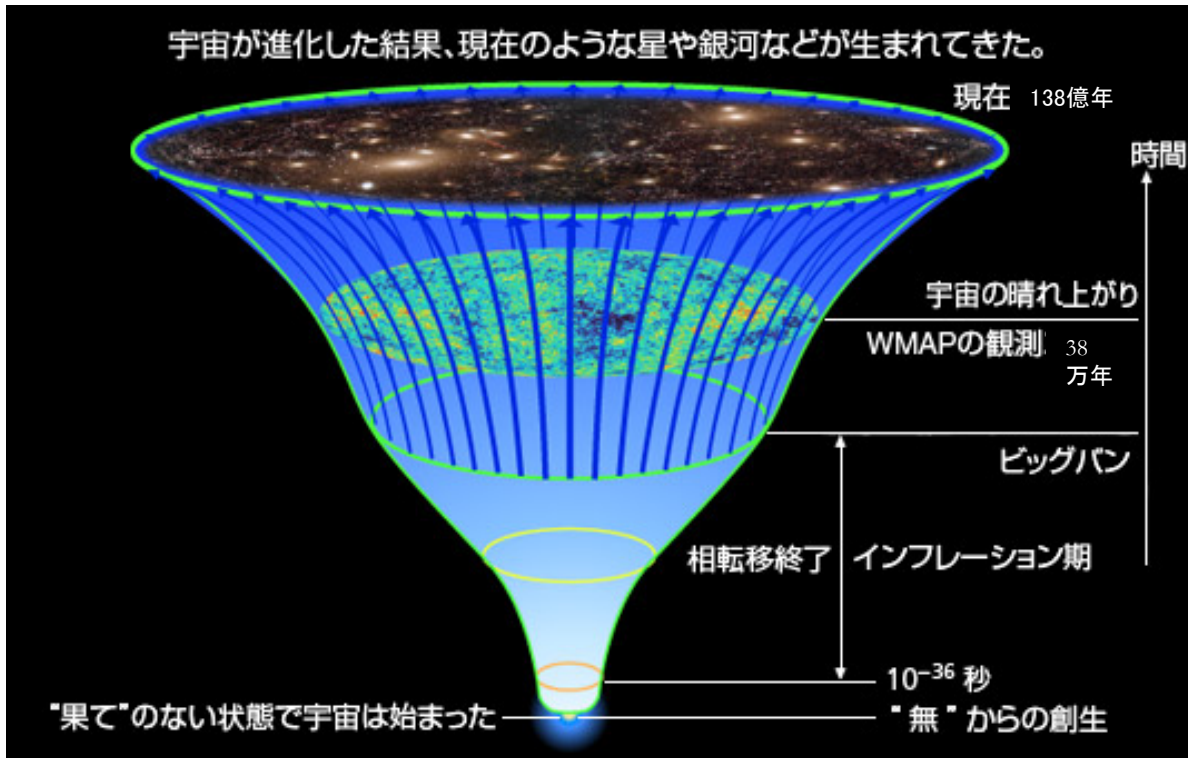
????

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($\sim 10^{30-40}$ 倍)

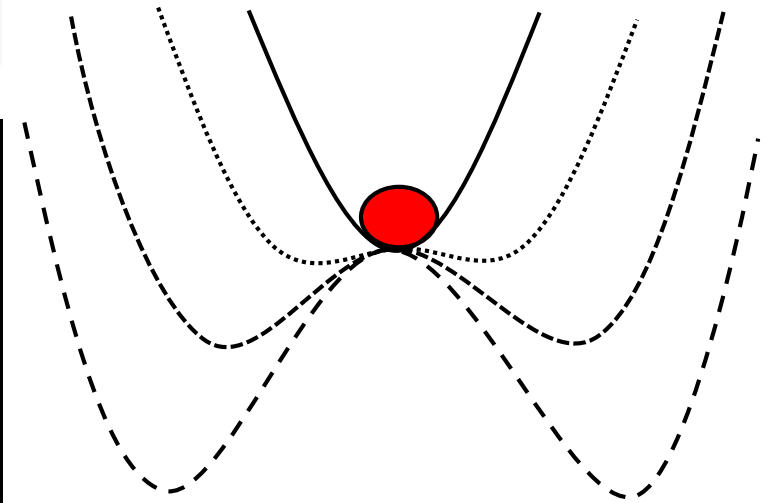
エネルギーがどんどん増加 → **ビッグバンがすごい**ことになった！！！！

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！！！！

宇宙の誕生の謎に迫る成果1



提供: 学術振興会学術システム研究センター長佐藤勝彦先生



1. 量子力学的な揺らぎ
で宇宙ができる。
(おそらく今も、ここでも。)
小さい宇宙 (10^{-35} m)

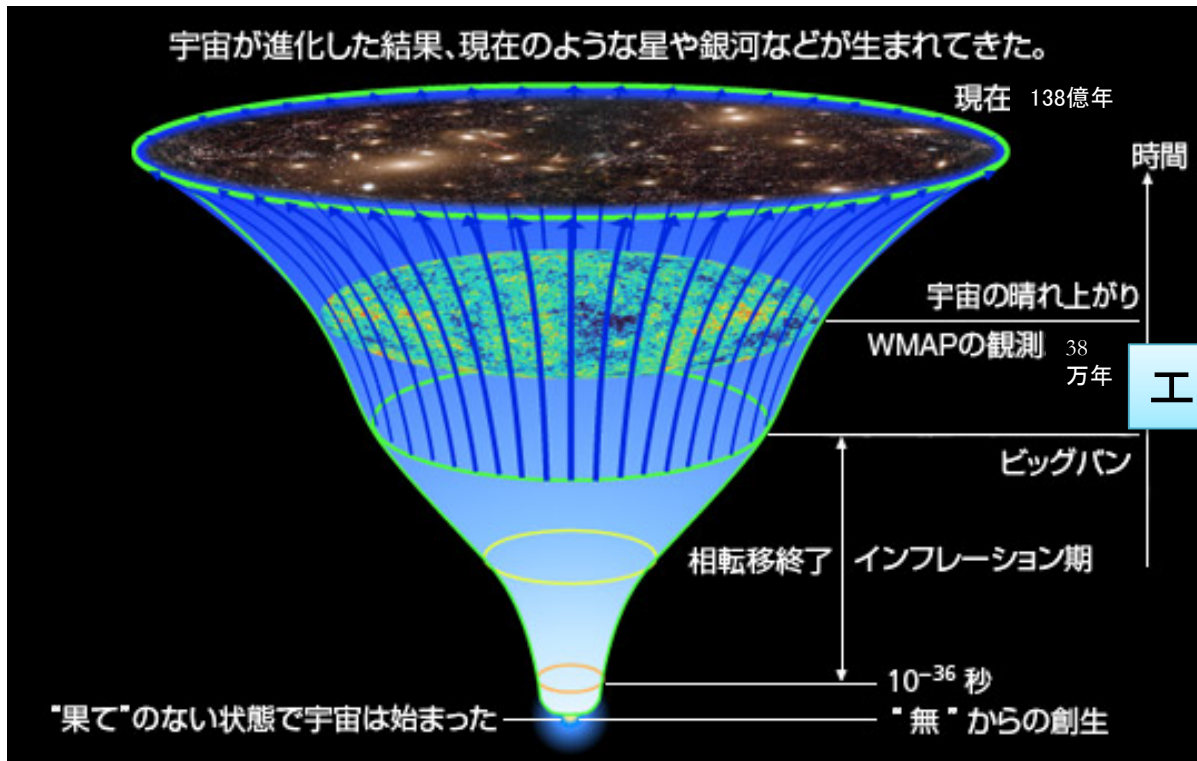
2. ポテンシャルの形が変わる
(この理由はまだ分からない)

3. エネルギーが高い状態になる

エネルギーが保存していない!!!

インフレーションが起こる
宇宙のサイズが 10^{30} - 10^{40} 倍
宇宙が 1-100m くらいのサイズ

宇宙の誕生の謎に迫る成果2



提供: 学術振興会学術システム研究センター長佐藤勝彦先生

インフレーションを起こすエネルギー

このヒッグスがインフレーションを起こしたか？
ヒッグスに兄貴分のヒッグスがおこしたか？
現在論争中。

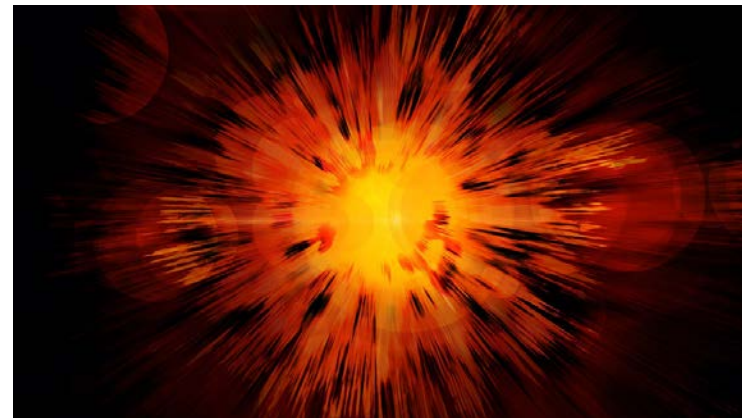
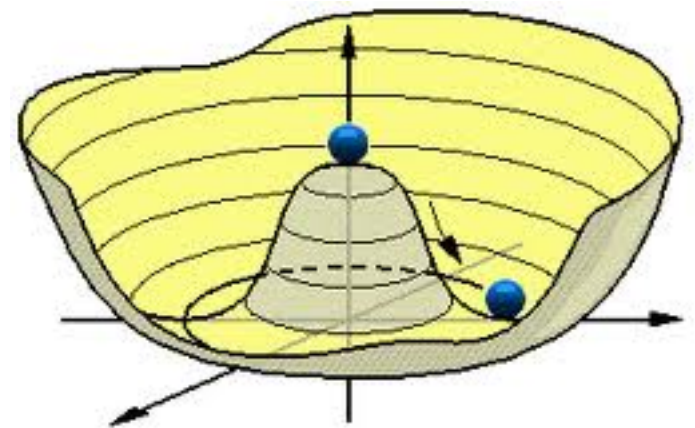


Image by geralt, from pixabay
<https://pixabay.com/en/big-bang-explosion-pop-fireball-1709219/>
CC0

エネルギーが保存していない！！！！

30~40桁倍された
エネルギー
「ビッグバン」として放出



©CERN

高校の物理でエネルギー保存則を考える

ニュートン方程式を考える

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F = - \frac{dV(x)}{dx}$$

ポテンシャル $V(x)$ が”時間に陽に依存しないとする”と、
時間をずらした $t \rightarrow t+\delta$ 時の位置の変化

$$x \rightarrow x' = x + \frac{dx}{dt} \delta$$

となり、その点のポテンシャル $V(x')$ は、

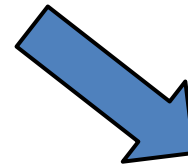
$$V(x') = V(x) + \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dt} \delta$$

ニュートン方程式に代入し、

運動エネルギー $K = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$ をつかって整理

$$\frac{dK}{dt} = m \frac{dx}{dt} \frac{d^2x}{dt^2}$$

$V(x) + K(x) = V(x') + K(x')$ が得られ、
エネルギー保存則が得られる。



時間の並進対称性
エネルギー保存則

空間の並進対称性
運動量保存則

空間の等方性
角運動量保存則

法則を導き出して
仮定(適用限界)を
理解する

物質と力を分けるモノ？

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:ヒッグス粒子(ヒッグス場)

容れ物なので
宇宙全体にひろがっている

Photo by muramasa, from Wikipedia

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%89%E3%83%A9%E3%81%88%E3%82%82%E3%82%93#/media/File:Doraemon-no-akichi.JPG>

高岡おとぎの森公園ドラえものの空き地

美術品の題号: ドラえもん

美術品の著作権者: 藤子・F・不二雄



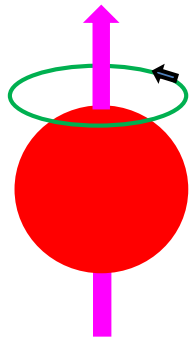
これ何？

小3の私の娘も知っている。
世の中
4次元だよね？

素粒子が見ている世界は
簡単な4次元でない

素粒子のスピン

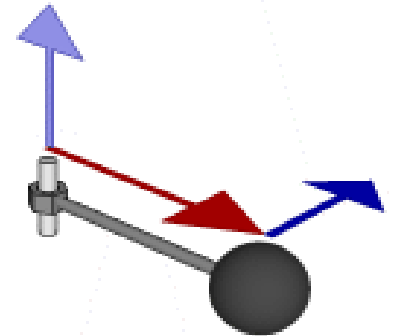
$$\hbar = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



素粒子はスピンを
もっている。
スピン: 角運動量(ぐるぐる回転)
と同じ性質

Image from Wikipedia Commons

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{r} \times \mathbf{F} \\ \mathbf{L} &= \mathbf{r} \times \mathbf{p} \end{aligned}$$



スピン $1 \hbar$ ぐるっと1回転 ぐるぐる1回転まわすことに対応
スピン $1/2$ って? ぐるっと1回転まわしても 半分しか回らないって

ぐるっとまわすと、どれだけ回るか。。。に対応している

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)

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。

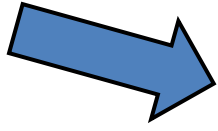
スピン: 素粒子固有の性質であると同時に、空間の見え方を表している

2回転してもとに戻る例

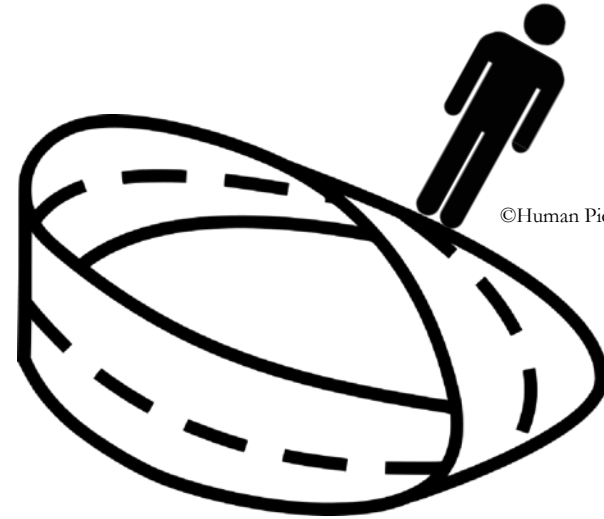
メビウスの輪



Image by Miraceti, from Wikipedia Commons ref.20171122
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%93%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%B8%AF#/media/File:M%C3%B6bi%C5%AFv_pruh.svg
CC BY-SA 3.0

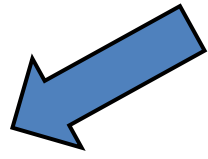


3次元世界に住んでいるんですが
まあ、2次元に1つ次元を下げて
考えてみる。ただの平面でなく、
このメビウスの輪の上に
住んでいる人を考えてみる

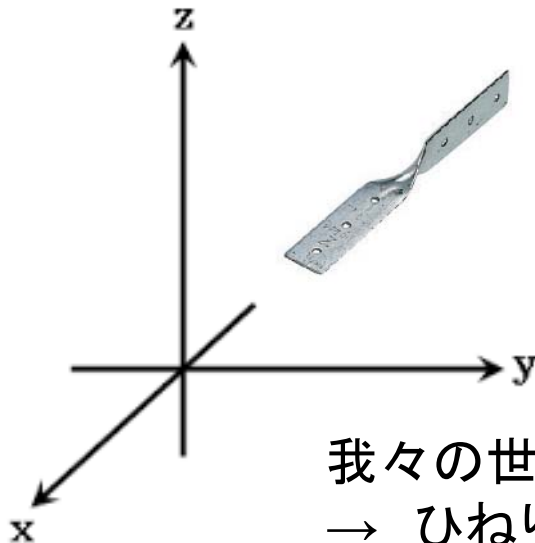


©Human Pictogram 2.0

Image by Miraceti, from Wikipedia Commons ref.20171122
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A1%E3%83%93%E3%82%A6%E3%82%B9%E3%81%AE%E5%B8%AF#/media/File:M%C3%B6bi%C5%AFv_pruh.svg
CC BY-SA 3.0



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。



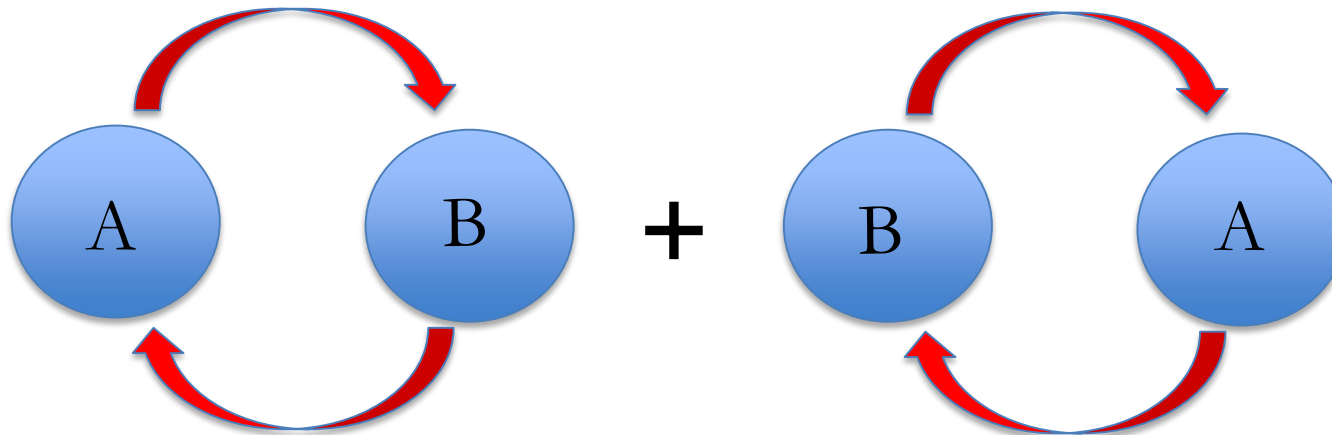
株式会社栗山百造
http://store.hyakuzo.co.jp/products/detail.php?product_id=289

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

スピンの違いで、大きく性質が変わる

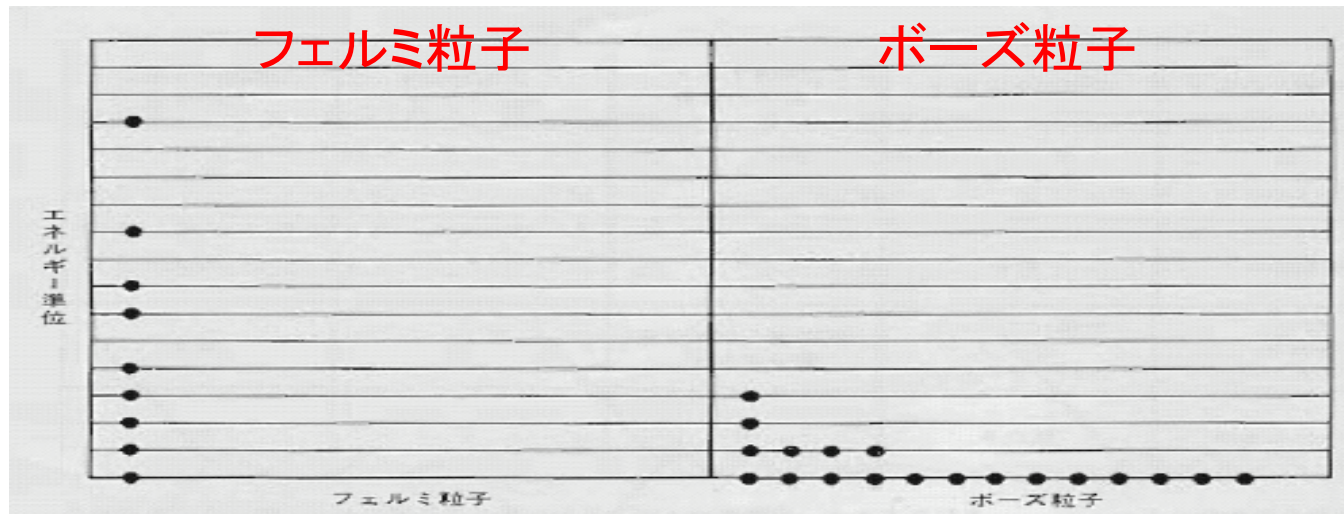
電子Aと電子Bを区別しない

$180+180=360$ 度の回転



光Aと光Bを区別しない

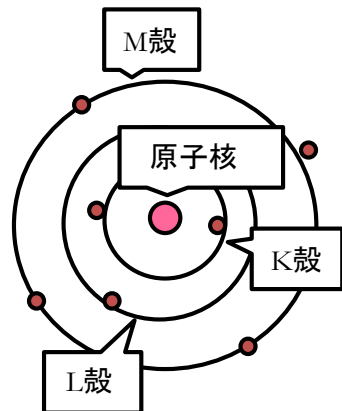
パウリの排他律とボーズ凝縮



血液型で言えば
A型とB型だと
思ってください

藤井昭彦編『統一理論への歩み』
(別冊サイエンス; 55. 特集素粒子)
東京: 日経サイエンス社
1982.11
p. 96 フェルミ粒子とボーズ粒子の
エネルギー準位

物質を作る: (クォーク・レプトン)
フェルミ粒子と呼ばれ スピン $\frac{1}{2}$
「秩序」を重んじ、同じ状態には1個
しか入れない



化学の時間で電子の
軌道を勉強したと
思いますが、同じ状態に
入れないから、下の状態
から詰まっていく

力を伝える: 光、W、Z、グルーオン
ボーズ粒子とよばれ スピン 1,0

同じ状態にいくつでも入れる
(レーザー、超伝導は同じ状態に
いっぱい入っている)

一個ぐらい消えてもいい
自由に生成あたり、消滅したり出来る
力を伝える性質

ブラックホール

光速 c の物体 m
が質量 M 大きさ R の
物体から脱出

$$\frac{1}{2} m c^2 = G_N M m / R$$

$R = 2G_N M / c^2$ より小さかったら
光速でも出てこれない。BHになる

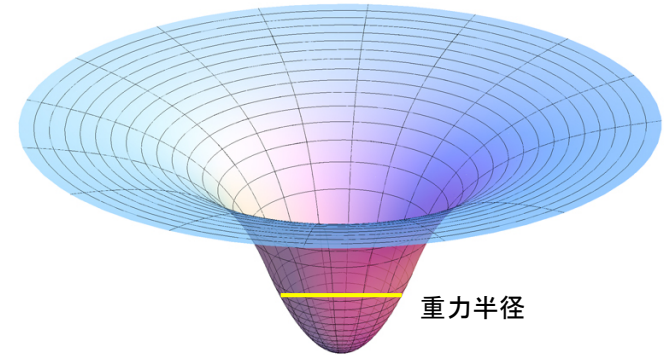
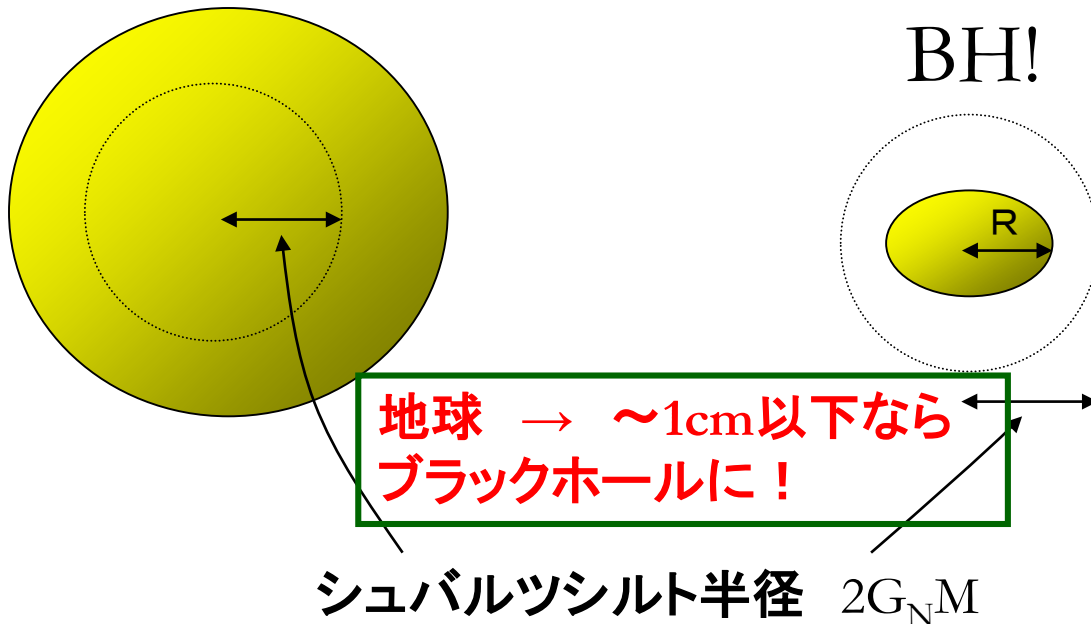


Image by AllenMcC, from Wikipedia Commons ref. 20171124
https://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_well#/media/File:GravityPotential.jpg
 CC BY-SA 3.0

素粒子 (M) は
どのくらい広がっている?

$$\lambda = \hbar / cM$$

広がり λ がシュバルツシルト
半径以下だったら
もう、素粒子の情報は
外にでない。

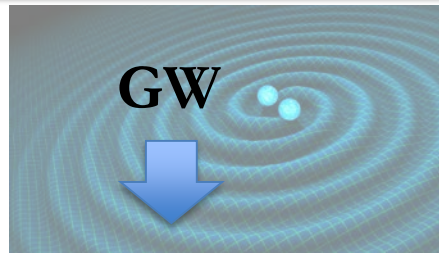
$R = \lambda$ M を解いて代入

$$\lambda = 10^{-35} \text{ m}$$

まとめ ミクロな素粒子とマクロの接点

量子力学
一般相対性理論
の融合
(21世紀の物理)

ミクロとマクロの
融合

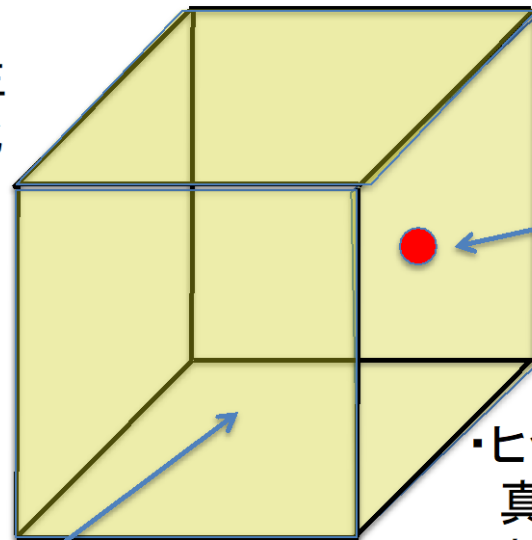


NASA ref.20171122
Gravitational Waves Detected 100 Years After Einstein's
Prediction
An artist's impression of gravitational waves generated by
binary neutron stars. Credits: R. Hurt/Caltech-JPL
<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=5137>

時空

- ・宇宙の誕生と進化
- ・暗黒エネルギー

- ・超対称性粒子
- ・マクロな重力と
ミクロな素粒子の融合
- ・余剰次元と超統一



素粒子

- ・ヒッグス粒子を使って
真空の構造を解明
- ・真空の相転移
- ・素粒子の世代

真空 (ヒッグス場など)



Higgs Boson