

総合研究大学院大学

# 中高生のための 第6回 科学セミナー

「ヒッグス粒子の発見」



中村浩二

(高エネルギー加速器研究機構)

2013年7月23日

中高生のための科学セミナー

1

# 今日のお話

---

□タイムマシンを使わずに大むかしのできごとを知ることでできるの？宇宙の成り立ち？

□歴史的発見！ヒッグス粒子とは？

□実験結果が教えてくれる宇宙初期の謎とは？

# ながめる星空が実は過去？



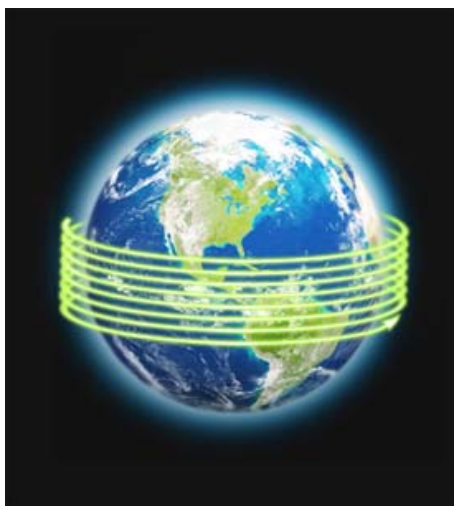
## 宇宙の大きさ

大きさ

100,000,0000,0000,0000,0000,0000 m  
( $=10^{26}\text{m}$ )

全く実感がわかりませんが...  
とてつもなく大きい。

## 光のはやさ



この世の何よりもはやいと言われている光でさえ

1 秒間に 3,0000,0000 m (地球を7周半！)

宇宙のはじからはじまで100億年かかる！

ちょっとそこらへんの星の光は  
実は、数万-数十万年まえのものだったりする？



# 高性能な望遠鏡

国立天文台ハワイ観測所



すばる望遠きょう

ハッブル望遠きょう



132億年前のぎんた



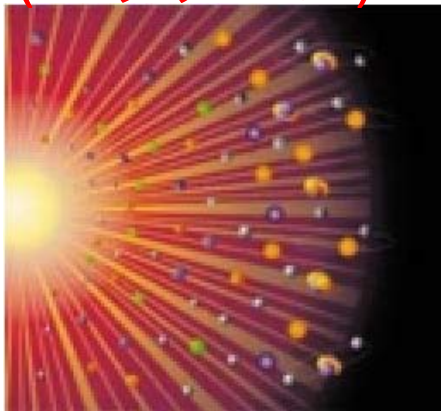
MACS1149-JD

# 宇宙は大きくなっている?!

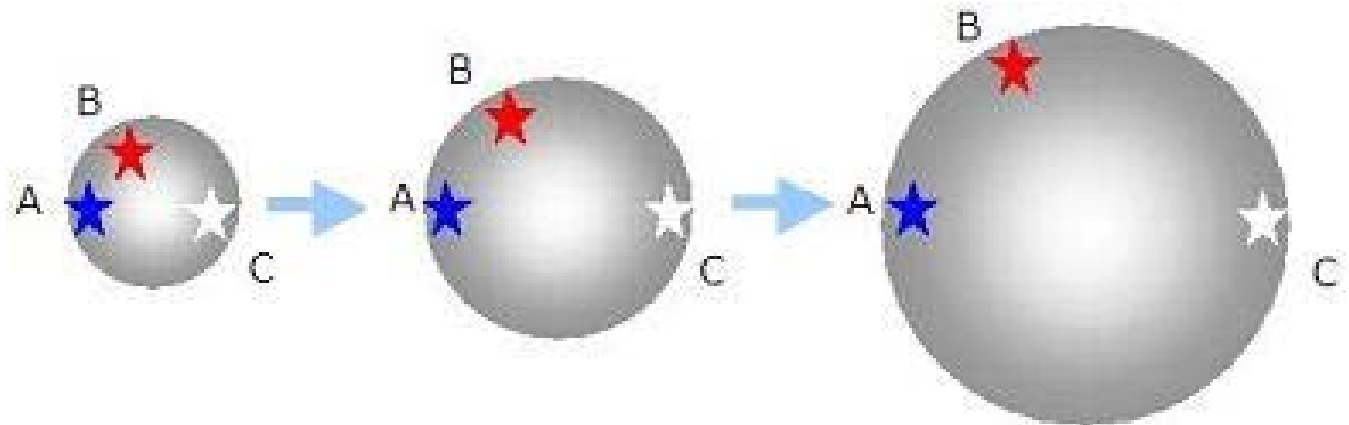
## 現代の常識？

宇宙ははじまりがあって膨張を続けている！

はじまりは大爆発！  
(ビッグバン)



その直後から大膨張！  
(インフレーション)

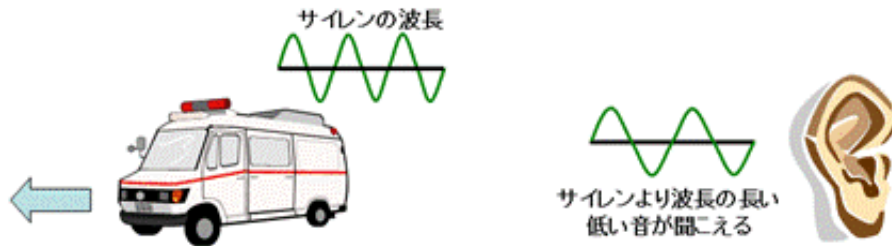


# なぜ、そんなことがわかるのか？

## ドップラー効果？

よく知られているのが、音のドップラー効果

救急車が遠ざかるとき



遠ざかっているものから出る光

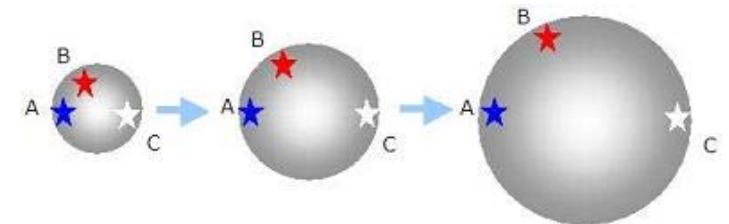
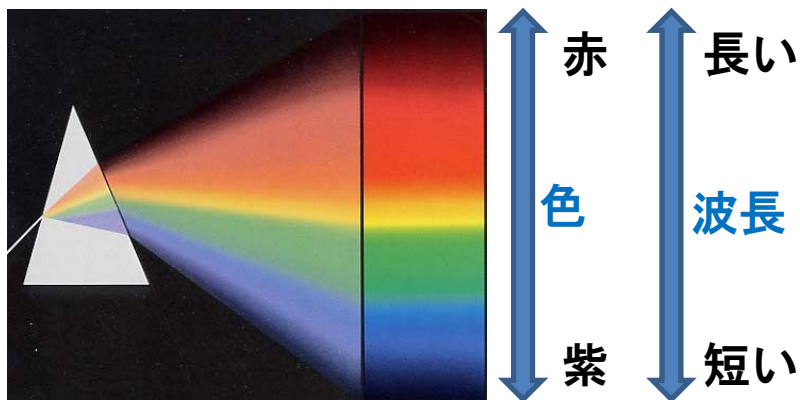


(音と同じで)波長が長くなる

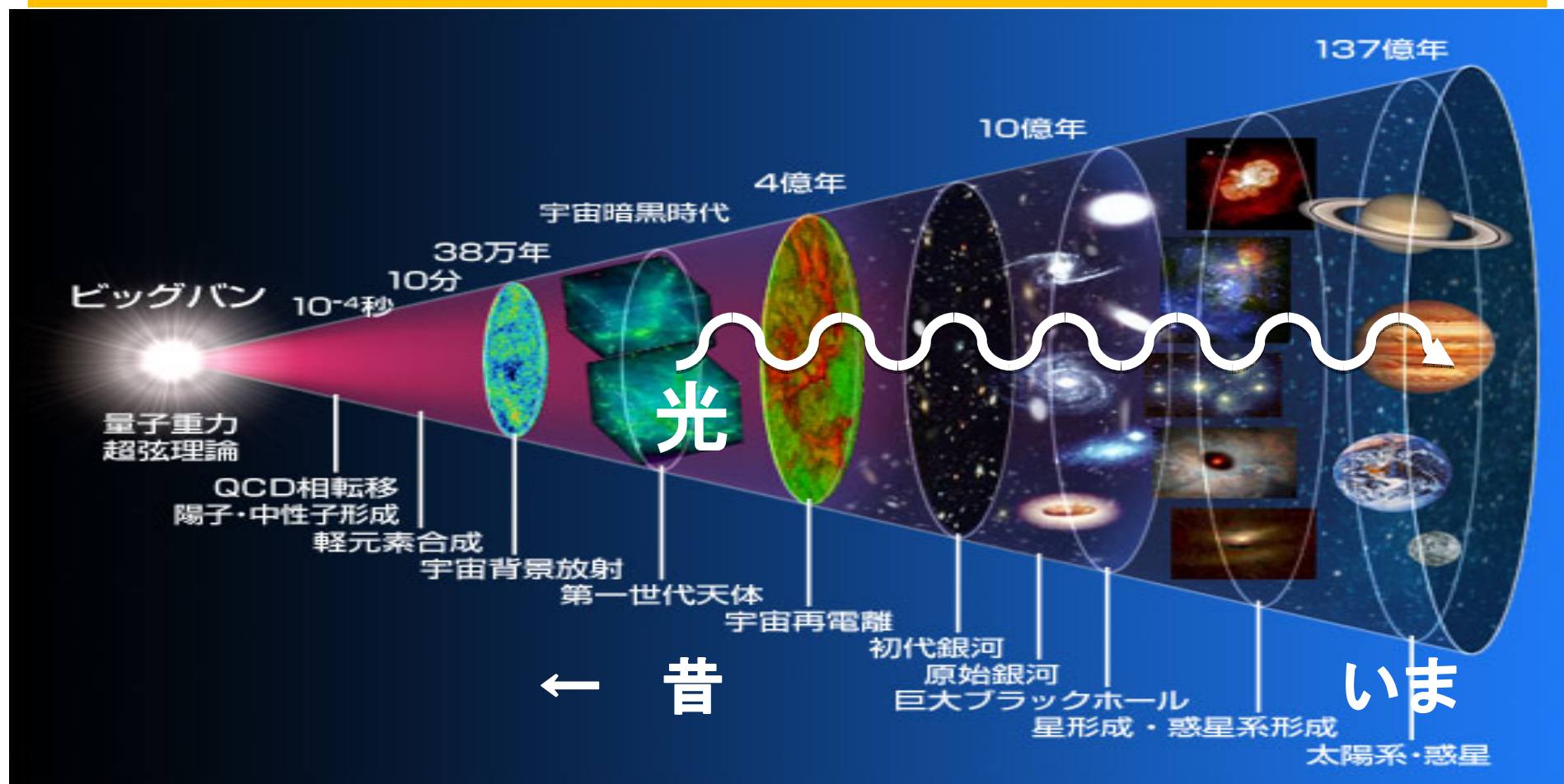


赤っぽく見える！（赤方偏移）

光のドップラー効果もある！



# 宇宙の歴史 ~どこまで観測できるか~



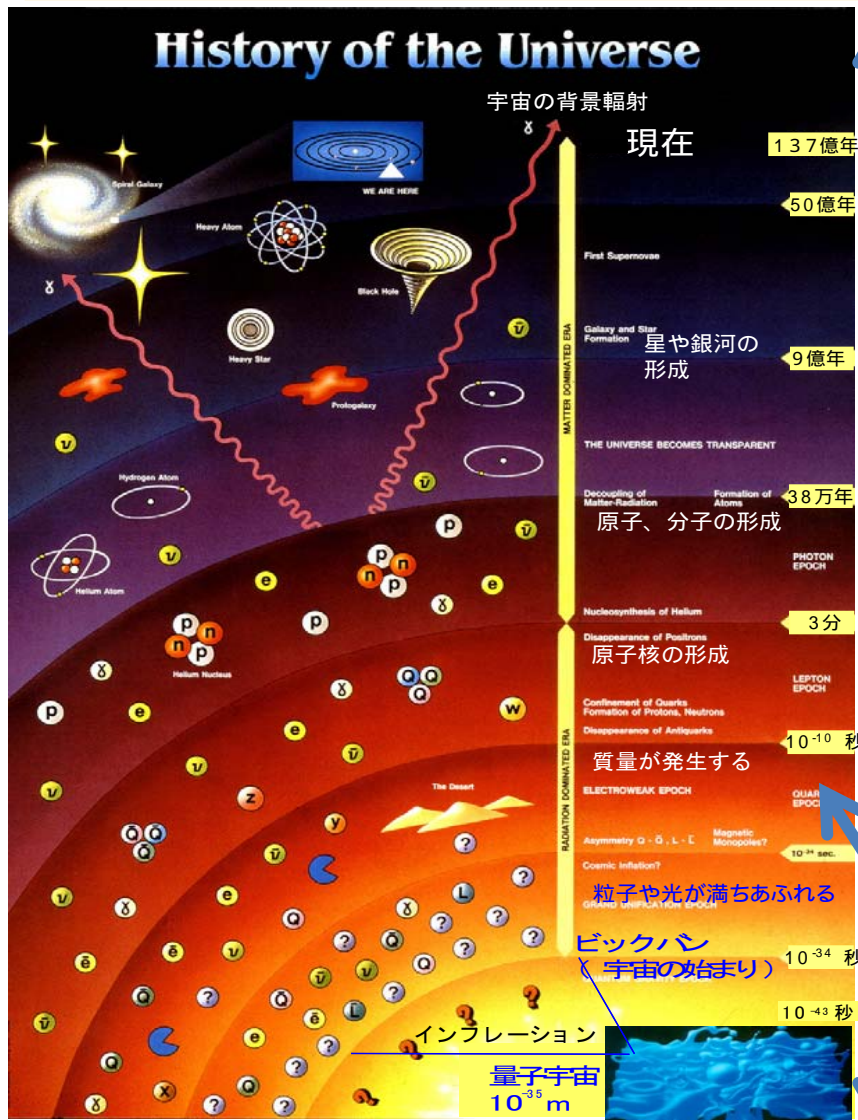
宇宙ができて38万年以前は光がとどかない！

→観測不可能

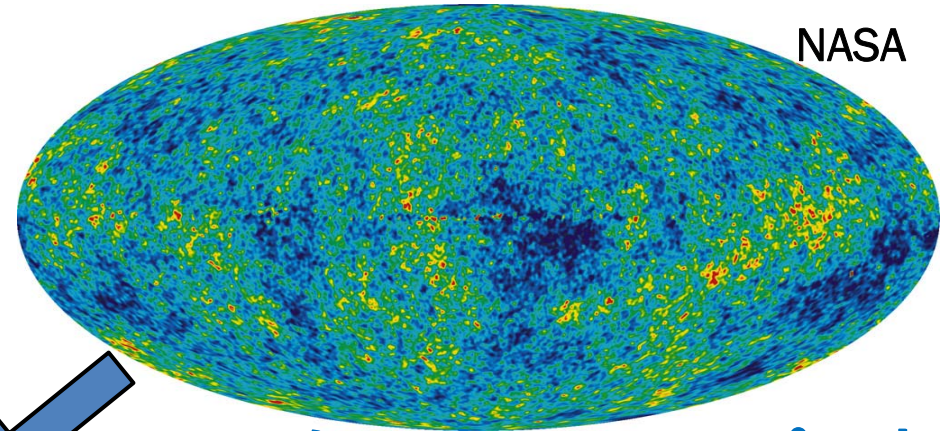
LHCはこれを可能にする！



# ビッグバン直後の宇宙にせまる！



観測可能！



38万年の時のスナップ写真

## ビッグバン直後

エネルギーが高く、物質がバラバラ  
→ ビッグバン直後を地球上で再現？

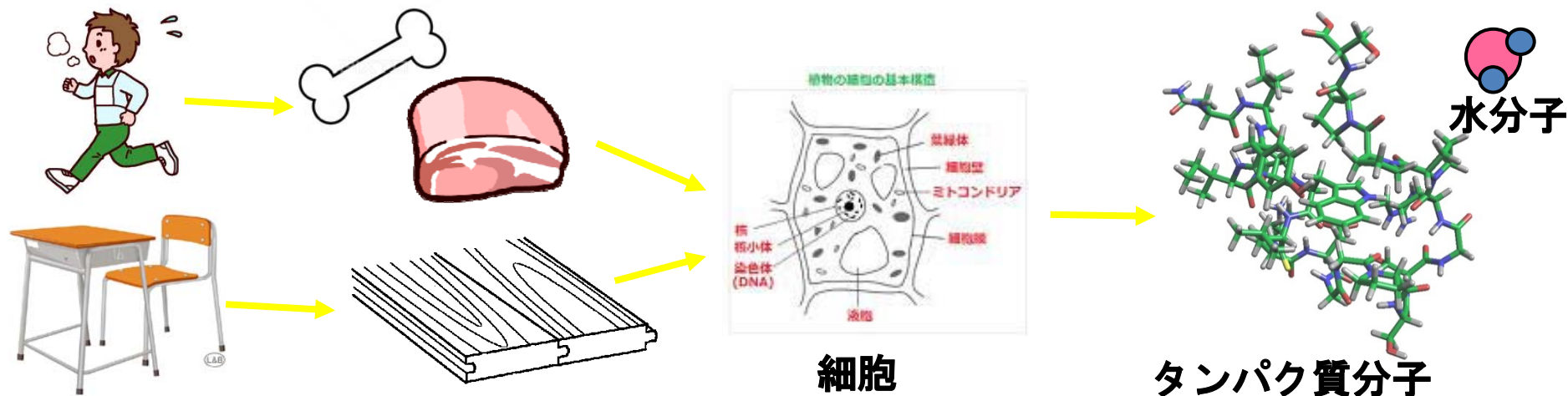
LHC実験

1  
1,0000,0000,00  
00

秒後の宇宙



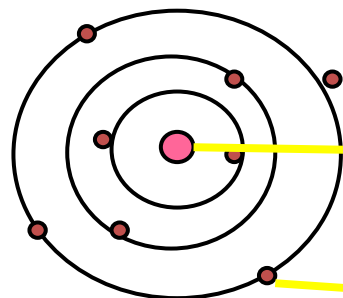
# LHCのお話の前に... 素粒子とは？



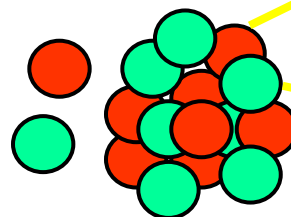
$H_2O$   
水の分子



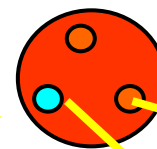
酸素原子



酸素原子核



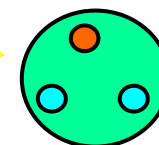
陽子



u-クォーク



中性子



d-クォーク



電子

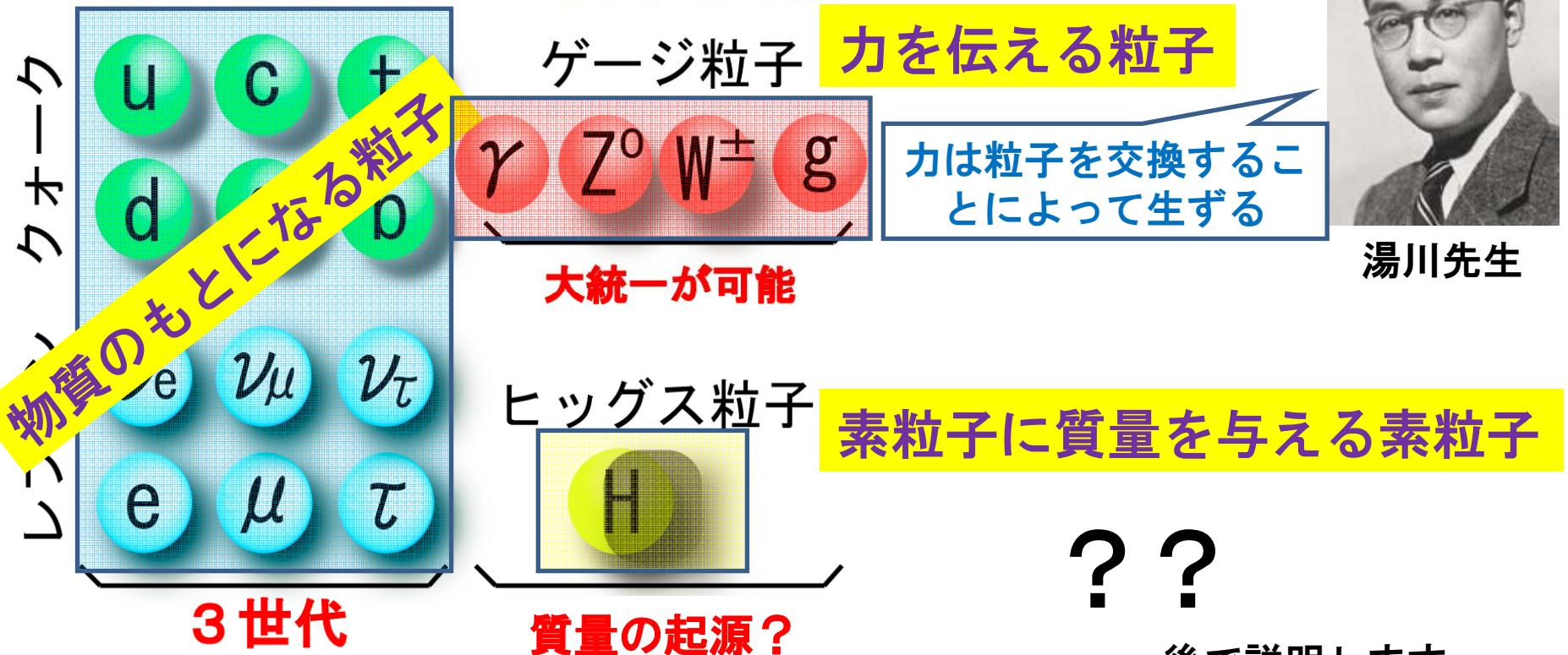


# LHCのお話の前に... 素粒子とは？

素粒子：

これ以上細かくできない、物質を構成する最小単位

現在の標準モデルに対する理解



湯川先生

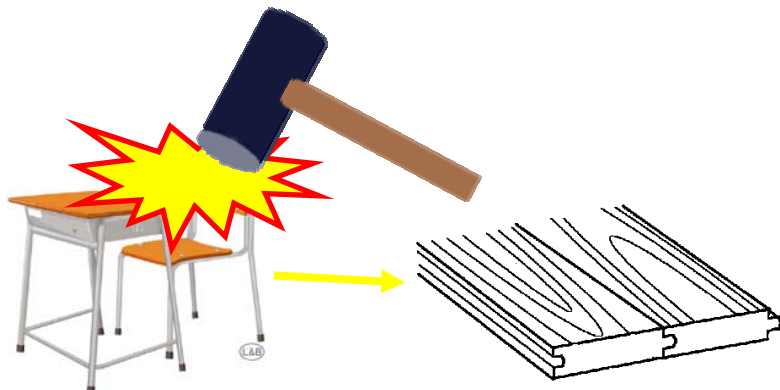
??

後で説明します。

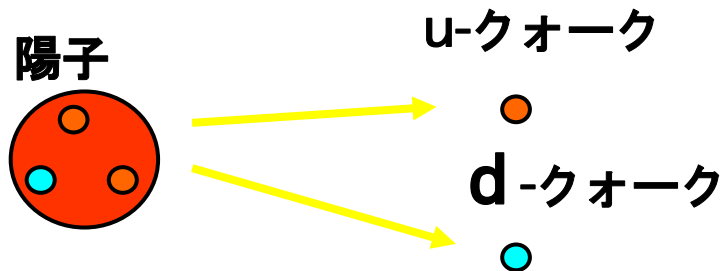
# LHCのお話の前に... 素粒子とは？

**素粒子：**

これ以上細かくできない、物質を構成する最小単位  
ものを壊すのには力（エネルギー）が必要！

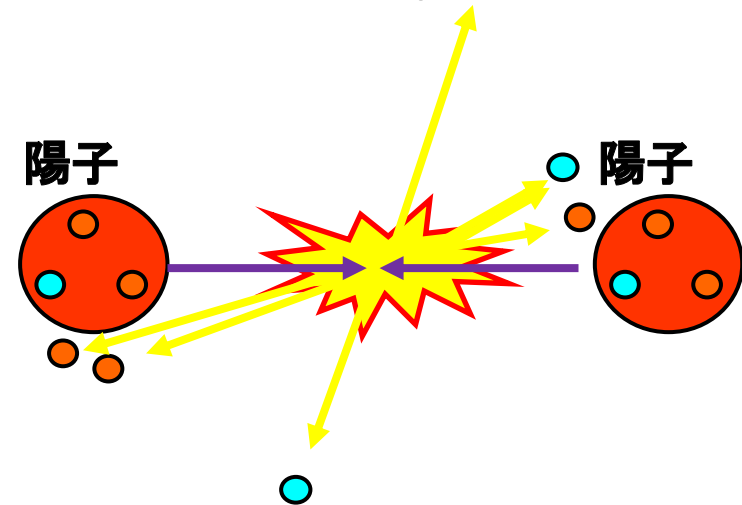


ものが小さくなると.....



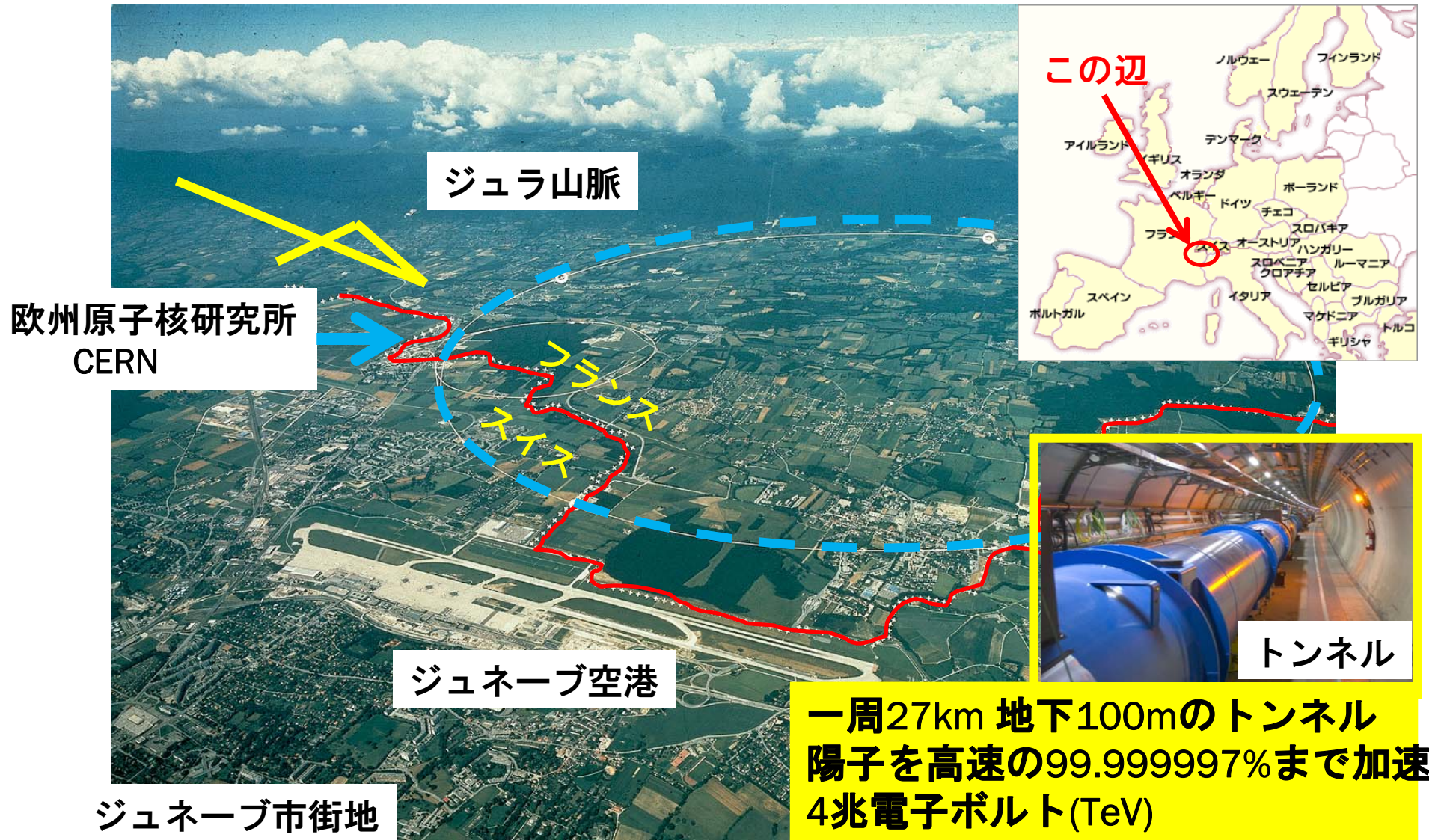
これはかなづちでは無理...

**加速器というものを使う！**  
陽子を光の速さ近くまで加  
速してぶつける。



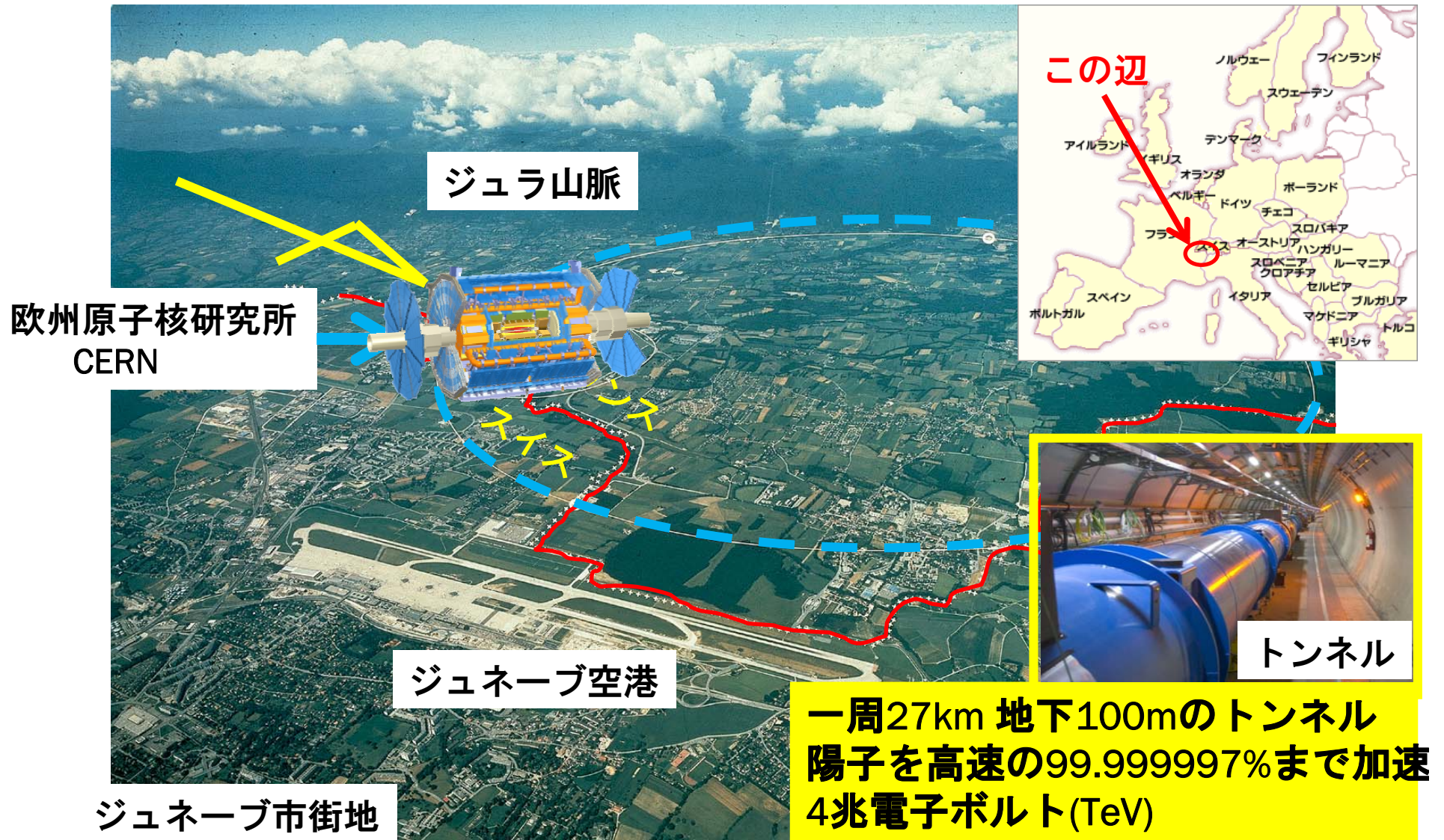


# 世界最大の加速器 LHC



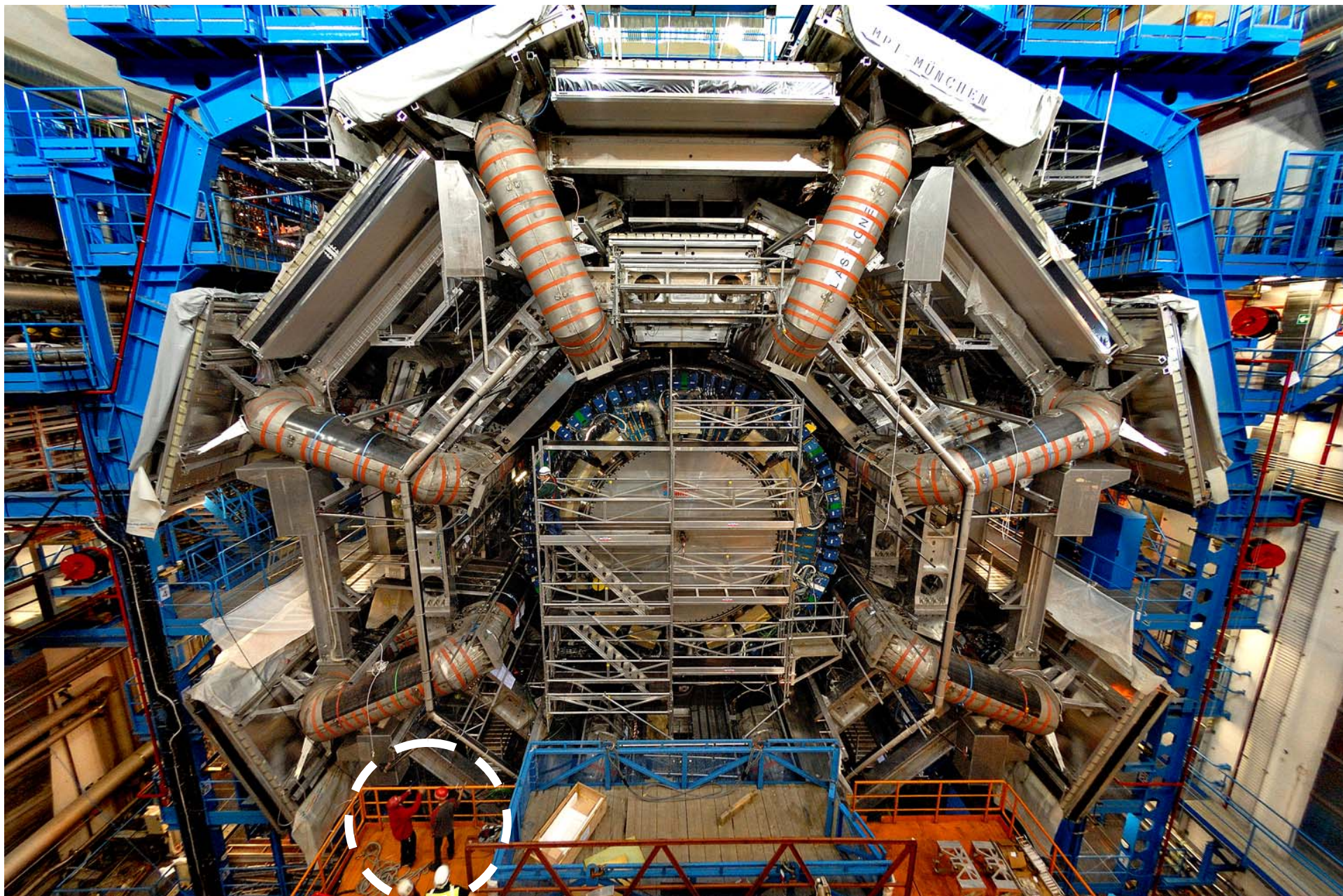


# ATLAS検出器



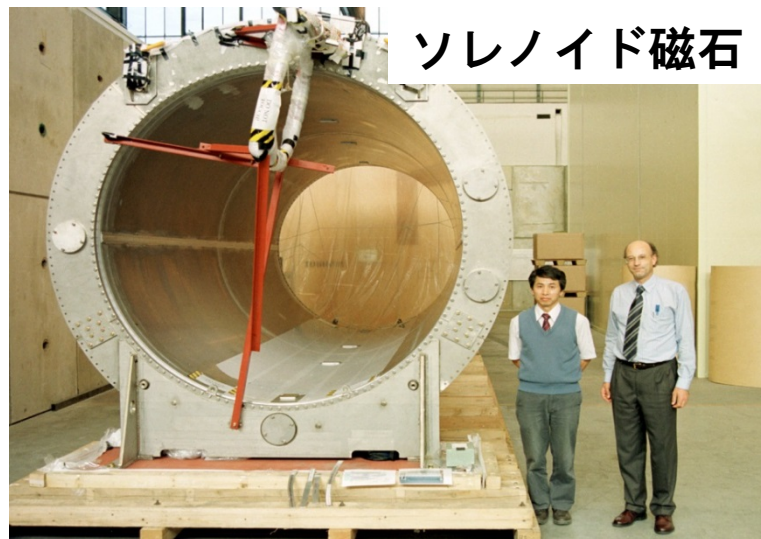


# ATLAS 検出器





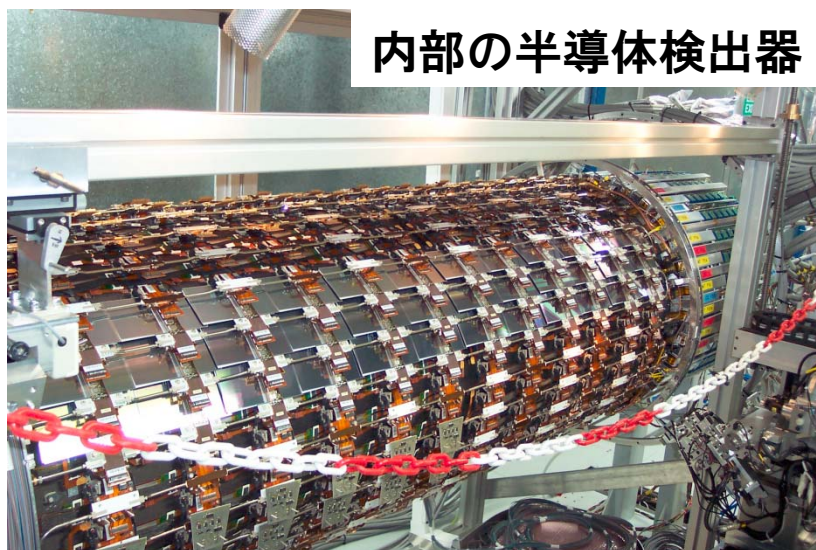
# 日本が作った3つの検出器



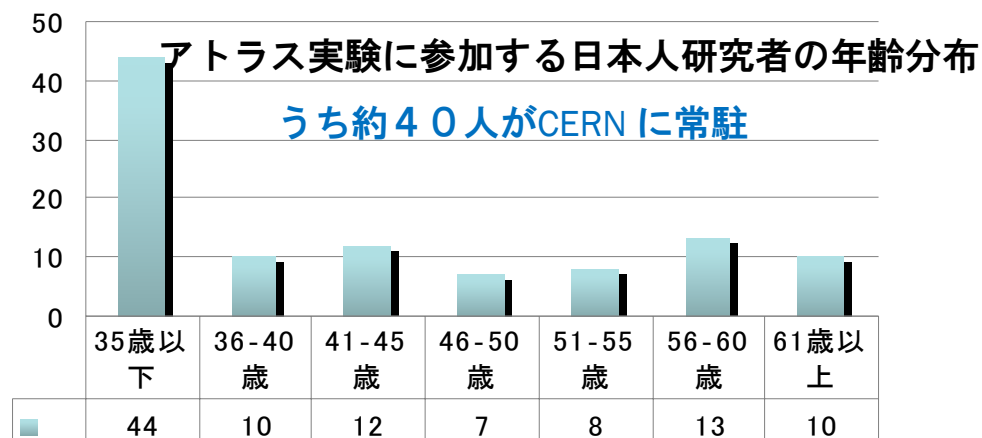
ソレノイド磁石



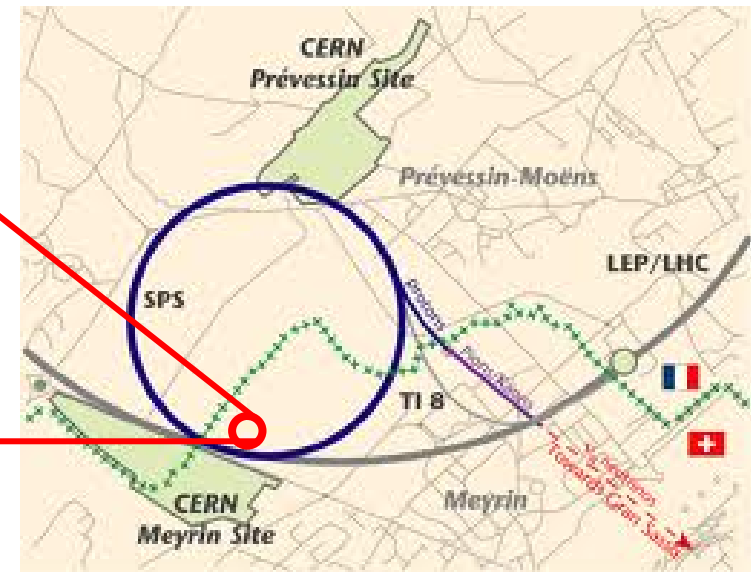
ミュー粒子検出器



内部の半導体検出器



# ちょっと休憩(CERNの生活編)



ダン・ブラウン 天使と悪魔の舞台

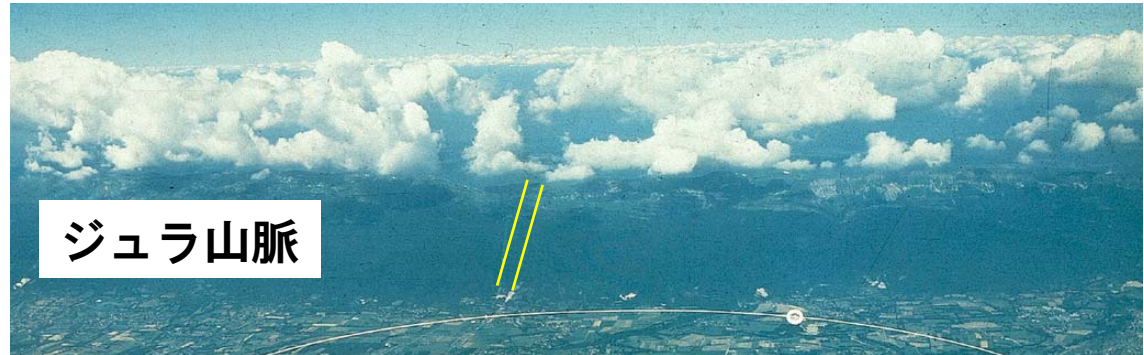


最近、路面電車もCERNまで開通！

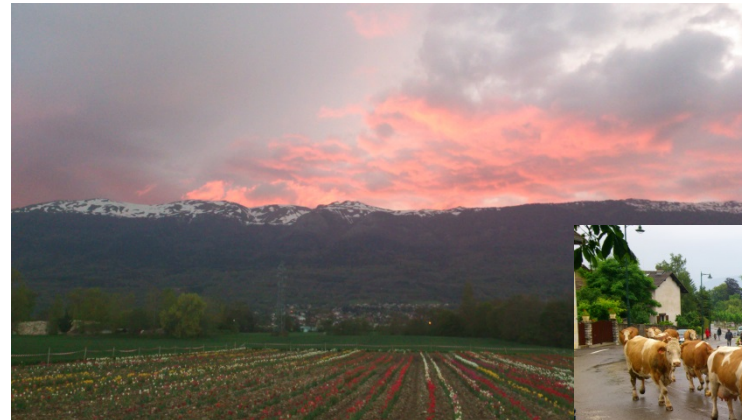




# ちょっと休憩(CERNの生活編)



ロープウェーを上がると、  
夏はハイキング冬はスキー場  
アンモナイトなどの化石がごろごろしてます。



ふもとの村





# ちょっと休憩(CERNの生活編)

CERNから車で一時間くらい

モン・ブラン(ヨーロッパ最高峰)

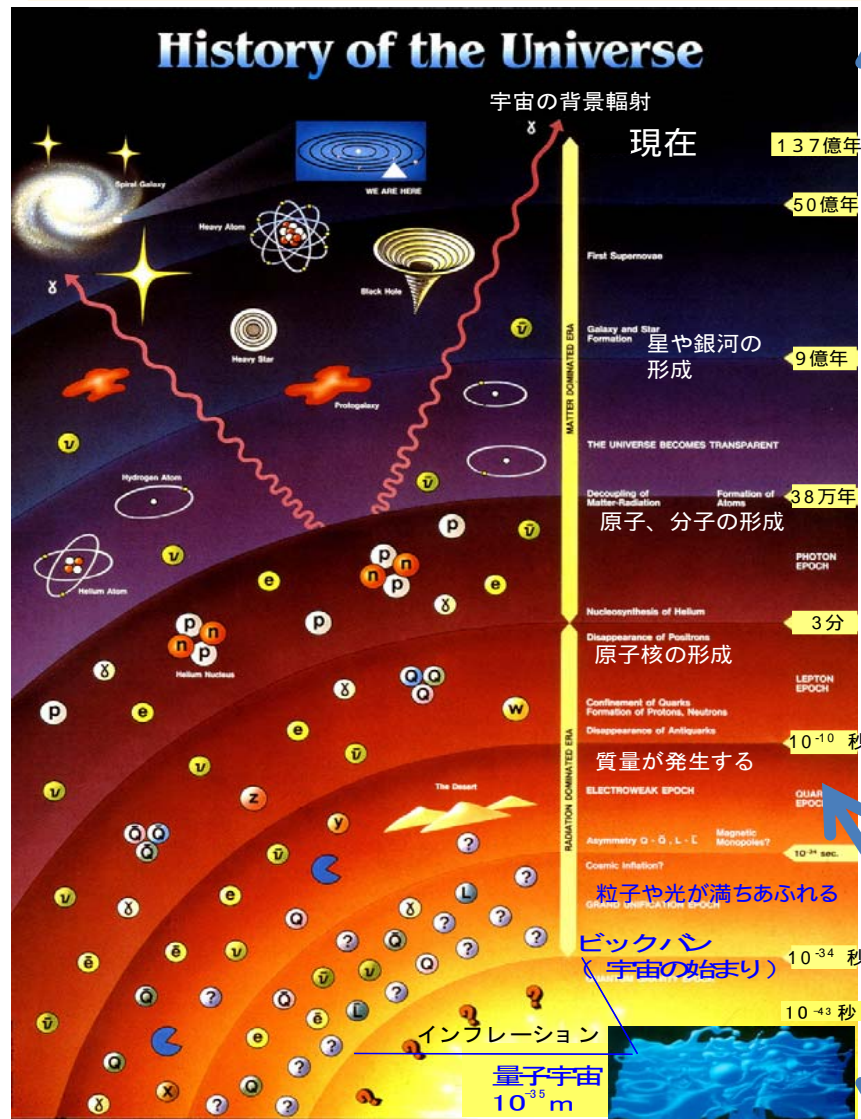


CERNから車で2-3時間くらい

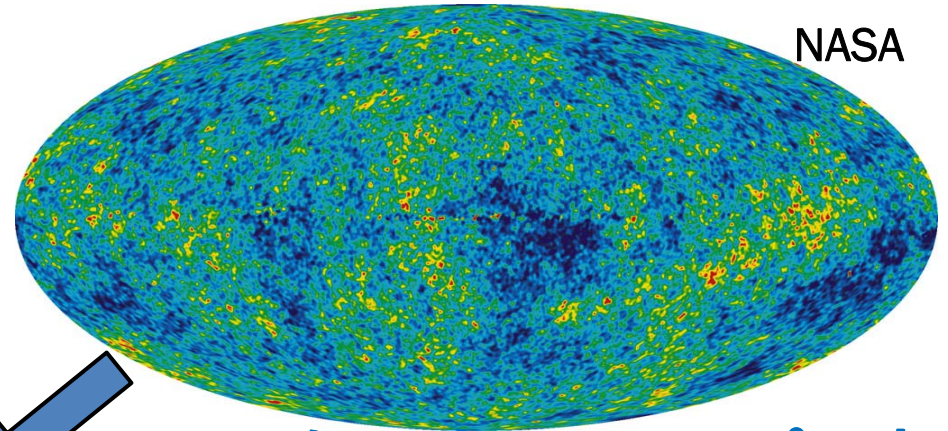
インターラーケンからの眺め



# ビッグバン直後の宇宙にせまる！



# 觀測可能！！



NASA

## 38万年の時のスナップ写真

# ビッグバン直後

エネルギーが高く、物質がバラバラ  
→ビッグバン直後を地球上で再現？

# LHC実験

$$\frac{1}{1,0000,0000,0000}$$

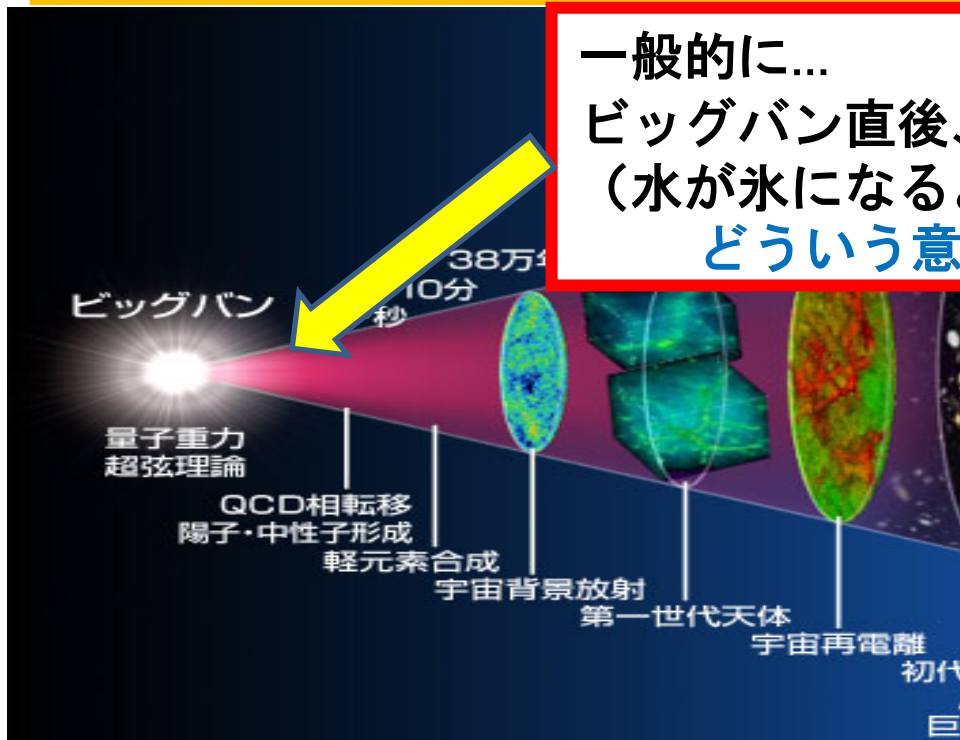
## 秒後の宇宙



# ヒッグス粒子とは？

一般的に...

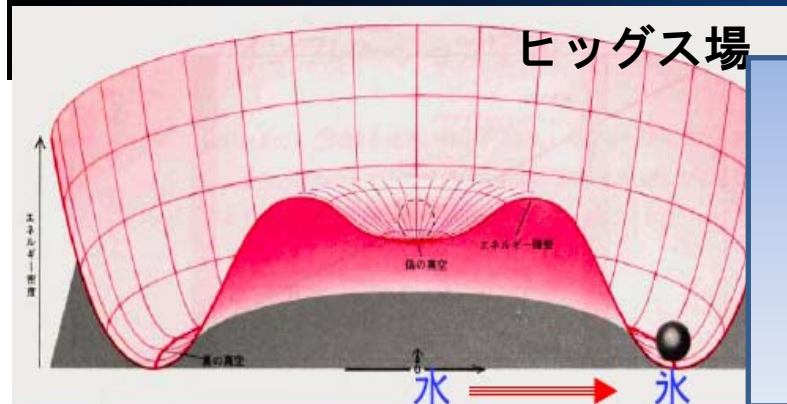
ビッグバン直後、温度が急激に下がって、  
(水が氷になるように) ヒッグス粒子が真空中に凝縮  
どういう意味？わかるようなわからないような...



ヒッグス場でみたされた空間が  
最もエネルギーが低い(安定)

## 自発的対称性の破れ

南部陽一郎博士  
ノーベル物理学賞  
(2008年)



素粒子に質量を与える、  
ヒッグス粒子の存在を予言

## ヒッグス機構

(ボルト)・アングレール  
ヒッグス





# ヒッグス粒子とは？

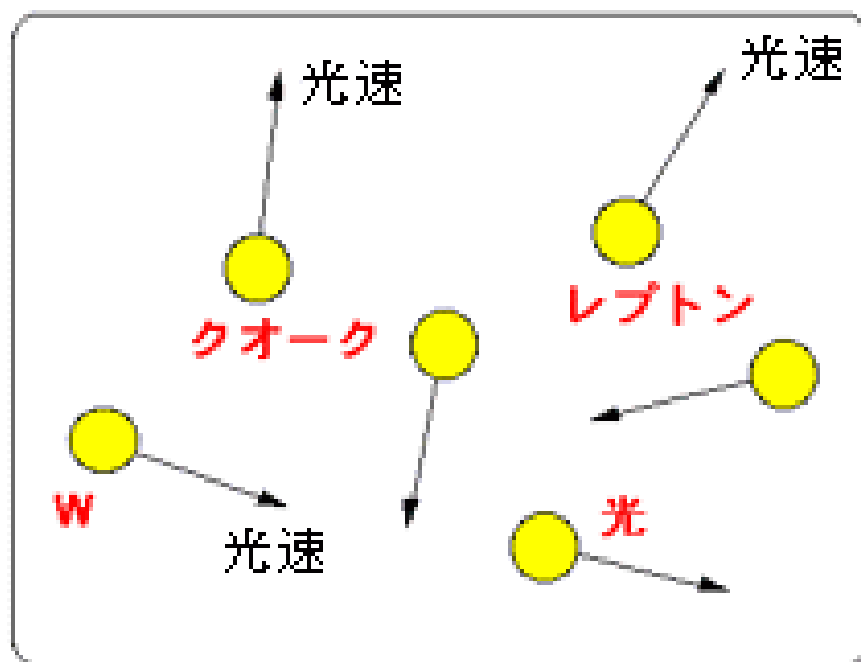
ヒッグス粒子がないと... 素粒子は光の速さ(光速)で飛び回る。

ヒッグス粒子があると... 光：ヒッグスに影響を受けず進む。

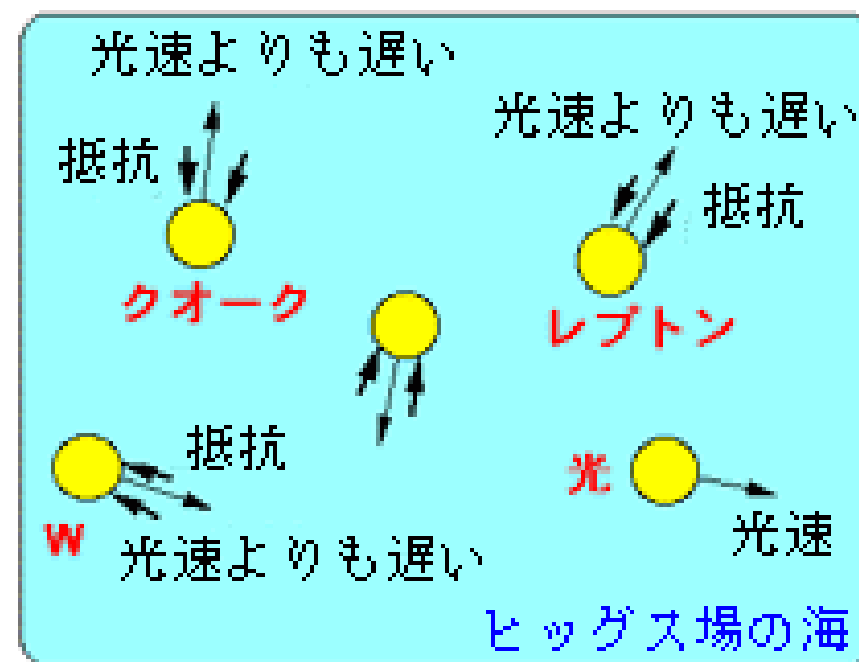
他の粒子：ヒッグス粒子に影響を受けて遅くなる(とまる)。

おそくなる = 重さ(質量)がある

ヒッグス粒子がない世界



現実の世界



# ヒッグス粒子とは？

ヒッグス粒子がないと... 素粒子は光の速さ(光速)で飛び回る。

ヒッグス粒子があると... 光：ヒッグスに影響を受けず進む。

他の粒子：ヒッグス粒子に影響を受けて遅くなる(とまる)。

おそくなる = 重さ(質量)がある

ヒッグス粒子がない世界

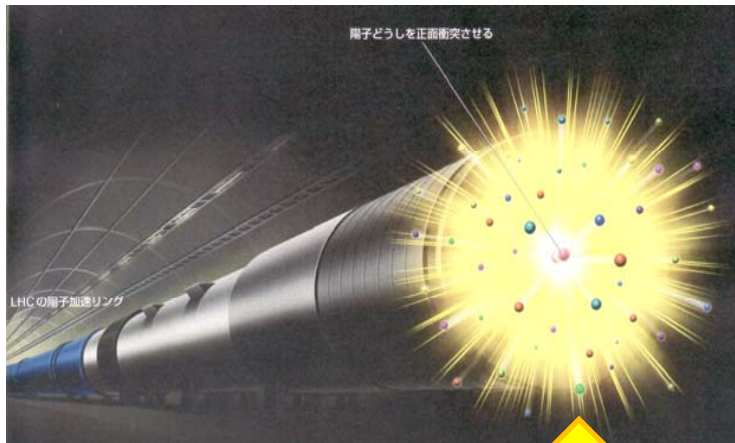


現実の世界



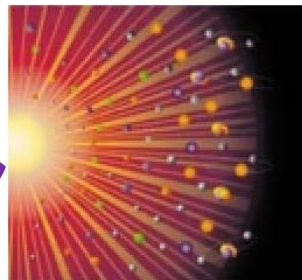
# ヒッグスの見つけ方

- どこかに偏ってあるもの→見つけやすい！
- 宇宙全体に均一に分布しているもの→わからない...



(ミニ)ビッグバン(直後)を作る！

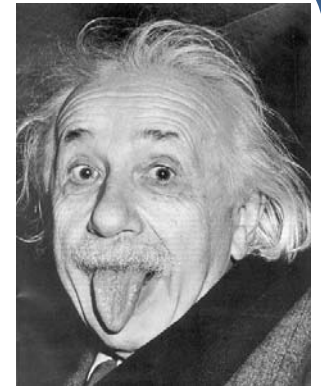
ビッグバン



ビッグバン直後の  
熱い世界を作る

$$E = mc^2$$

エネルギーは重さ(粒子)と  
同じこと



アインシュタイン

ヒッグスの海を  
粒子としてとりだす！



# ヒッグスの見つけ方

アイデア：ビッグバン直後の熱い世界を作る(LHC)  
ヒッグスの海を粒子としてとりだす！

どのくらい“熱い世界”が必要？

高速の99.999997%まで加速  
4兆電子ボルト(TeV)



昔の加速器

トリスタン(茨城県)  
60GeV 電子-陽電子



1986-1995年

LEP (CERN)  
200GeV 電子-陽電子



1989-2000年

テバトロン(アメリカシカゴ郊外)  
2000GeV 陽子-反陽子



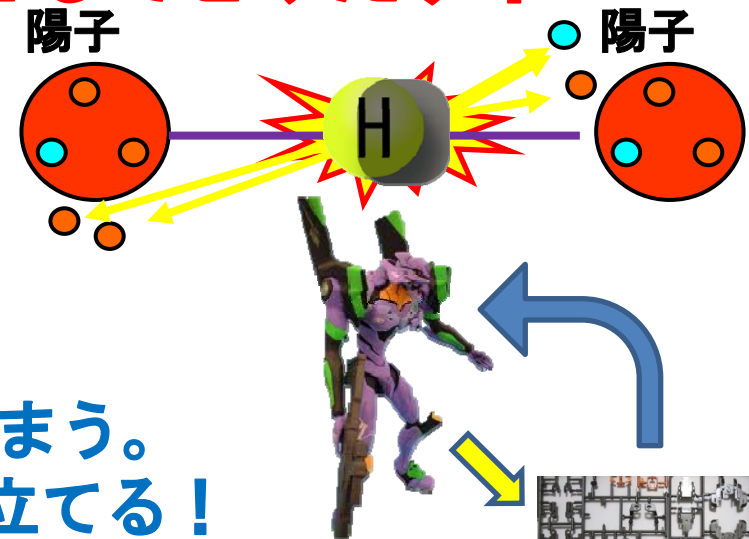
1983-2009年

# ヒッグスの見つけ方

アイデア：ビッグバン直後の熱い世界を作る(LHC)  
ヒッグスの海を粒子としてとりだす！

どのくらい“熱い世界”が必要？

高速の99.999997%まで加速  
4兆電子ボルト(TeV)



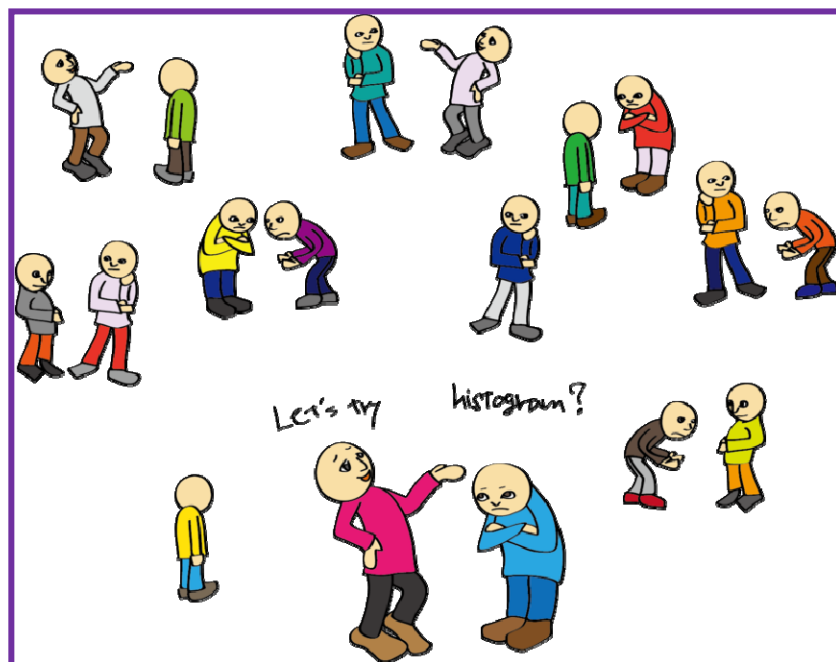
難しさ 1: 粒子として取り出した  
ヒッグス粒子はすぐに壊れてしまう。  
→壊れた破片を寄せ集めて組み立てる！

難しさ 2: ヒッグス粒子のニセモノが  
ものすごくたくさんできる！  
→特徴を使う。  
→ヒッグス粒子の重さは同じ



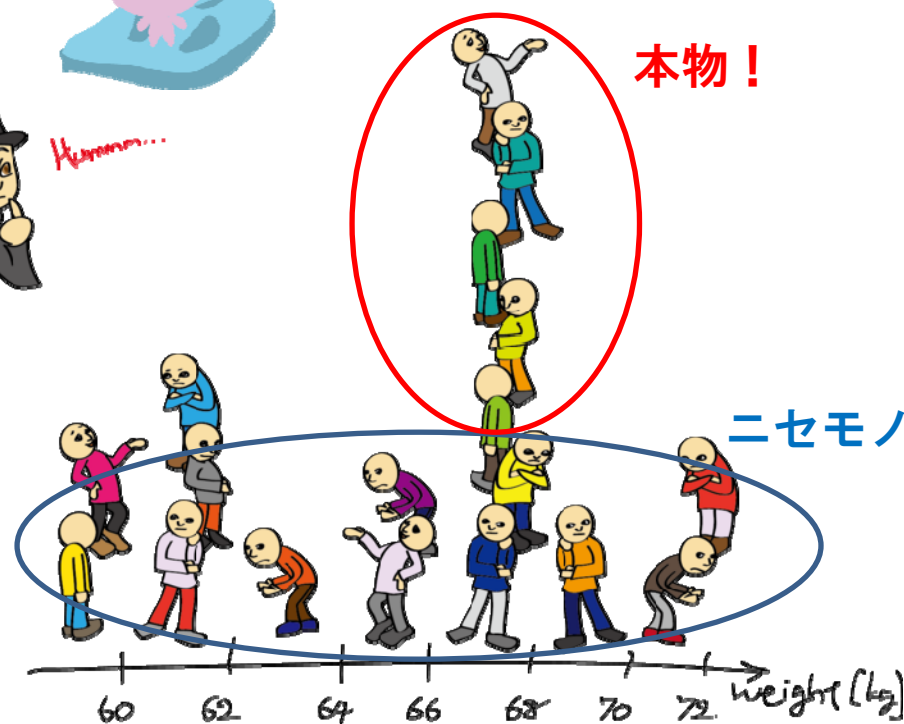
# ヒッグスの見つけ方

## ヒッグスとそっくりな人たち



体重別に並べてみる

本物！



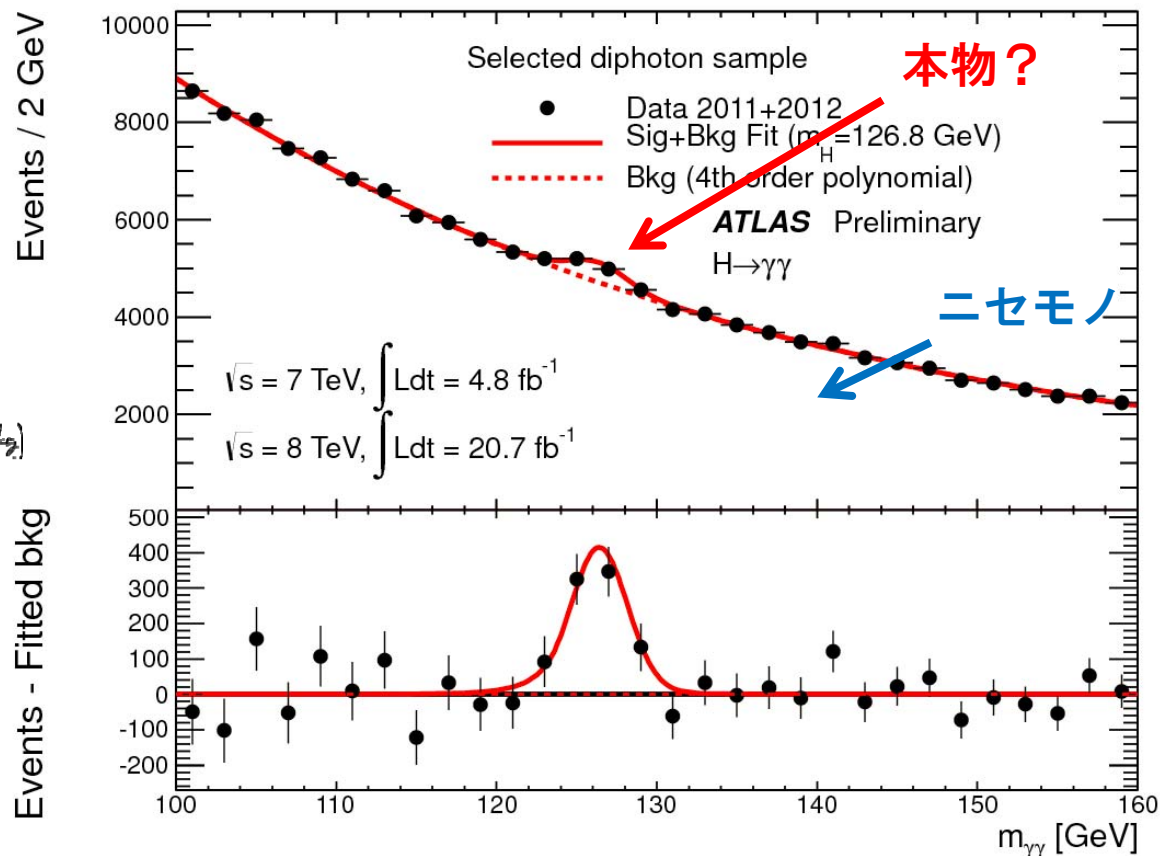
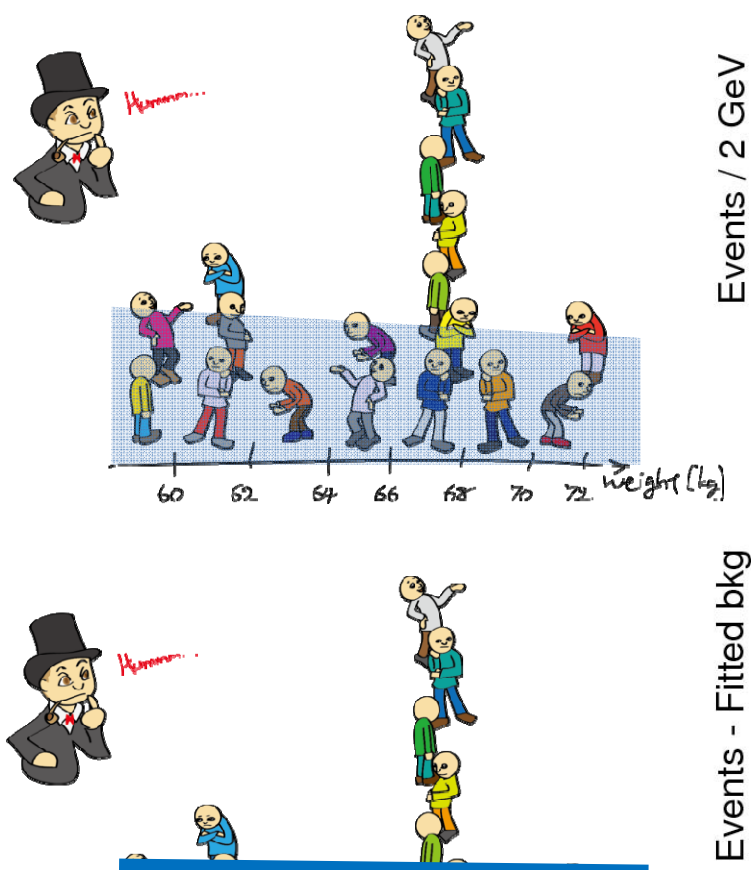
アトラス・オフィシャルブログより  
(山口、佐々木)

<http://d.hatena.ne.jp/lhcatlasiapan/>



# ついにとらえた！大発見！

## 2つの光に壊れたヒッグス粒子を組み立てる！



# 歴史的な大発見！ CERN

CERN歴代の所長さんたち



日本の新聞



アングレールさん

ヒッグスさん

2012年7月4日  
ヒッグス粒子発見か？  
(たぶん、ヒッグス粒子)

私が生きている間に見つかるとは思っていなかった！



# 実際に結果を出した研究者たち

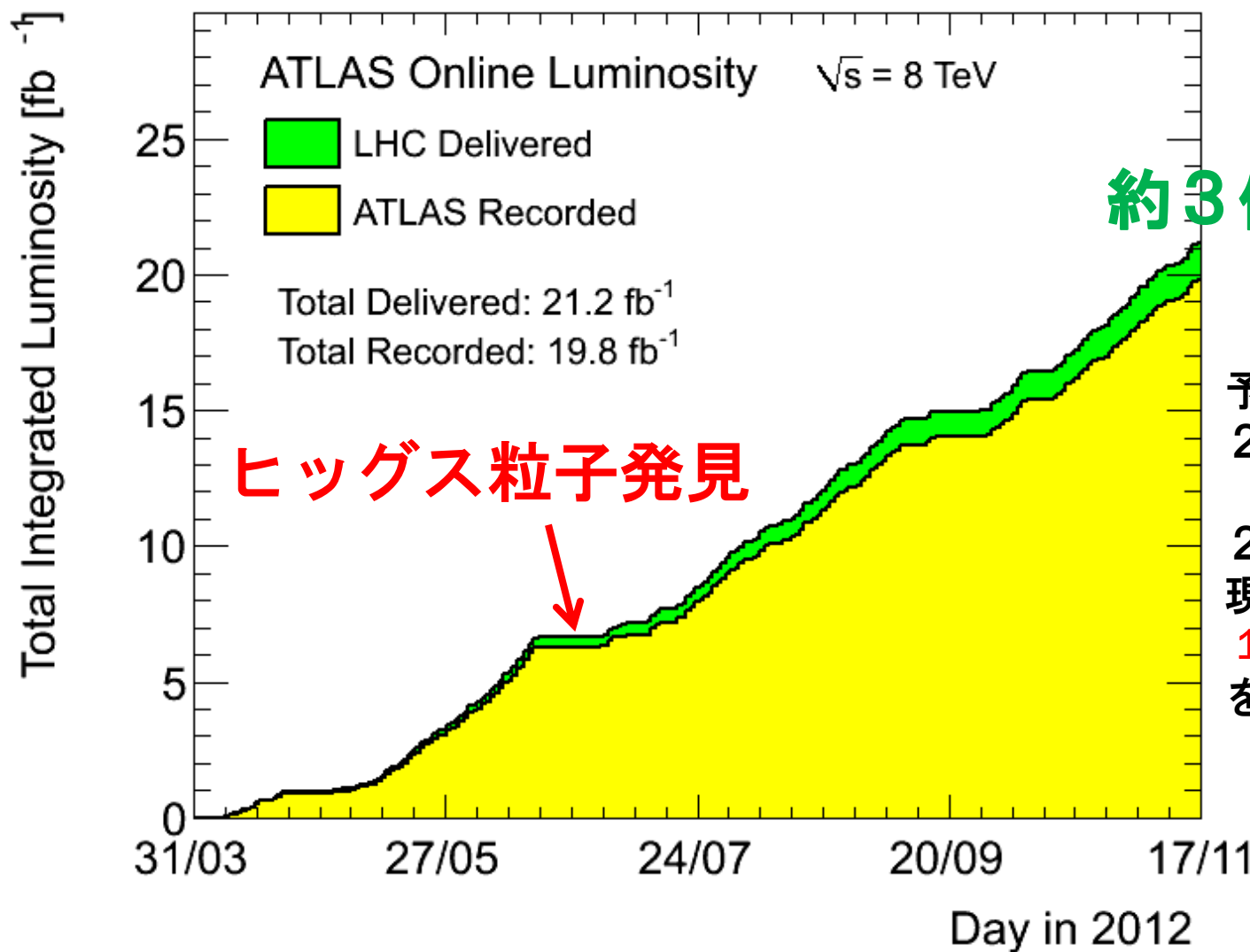
一緒に議論を重ねたアトラス・ヒッグスグループの研究者たち

7月4日祝賀会（CERNにて）



# LHCの能力はこんなもんじゃない！

データ量



約3倍のデータ

予定  
2015年  
↓  
2020年  
現在の  
10-20倍のデータ  
をとる予定

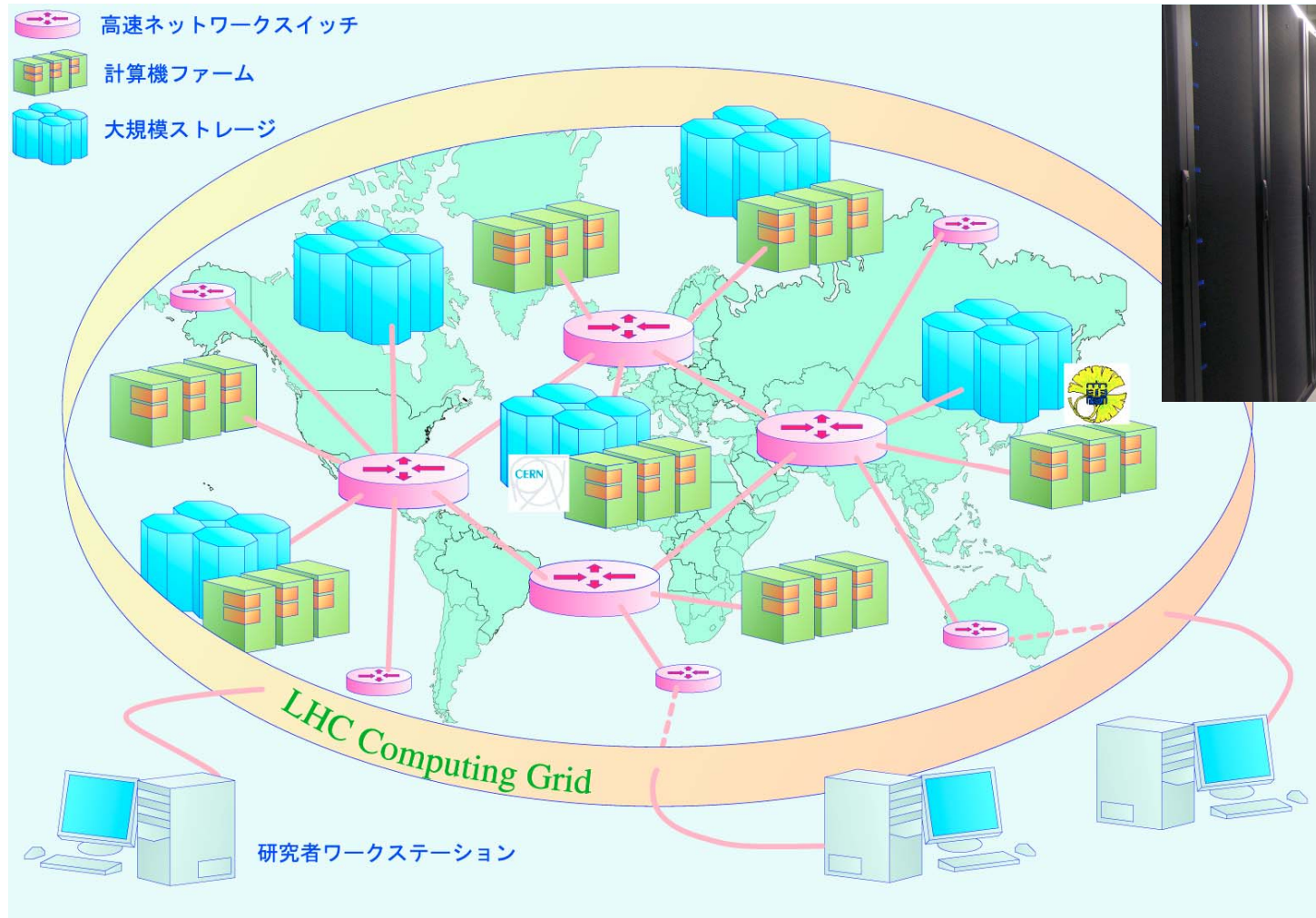
豆知識！

欧米は、  
月日が逆！

日/月



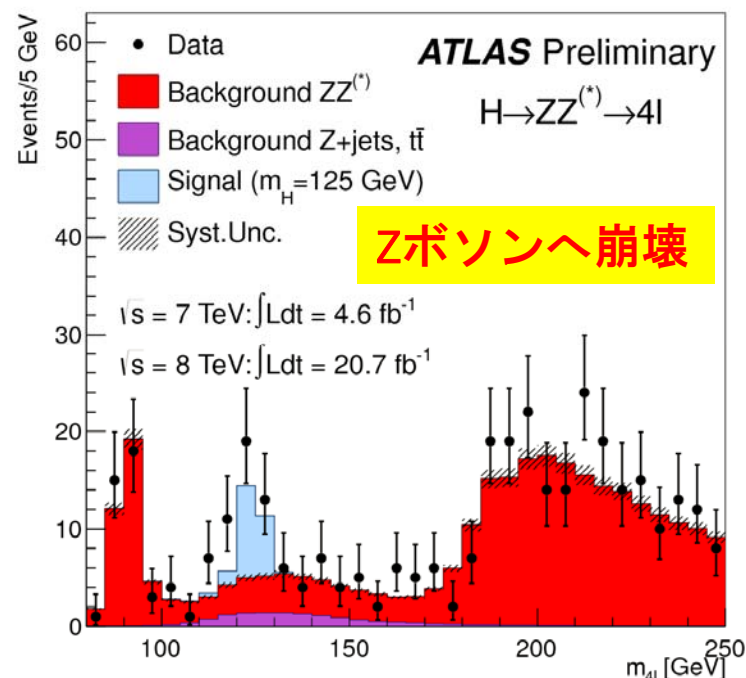
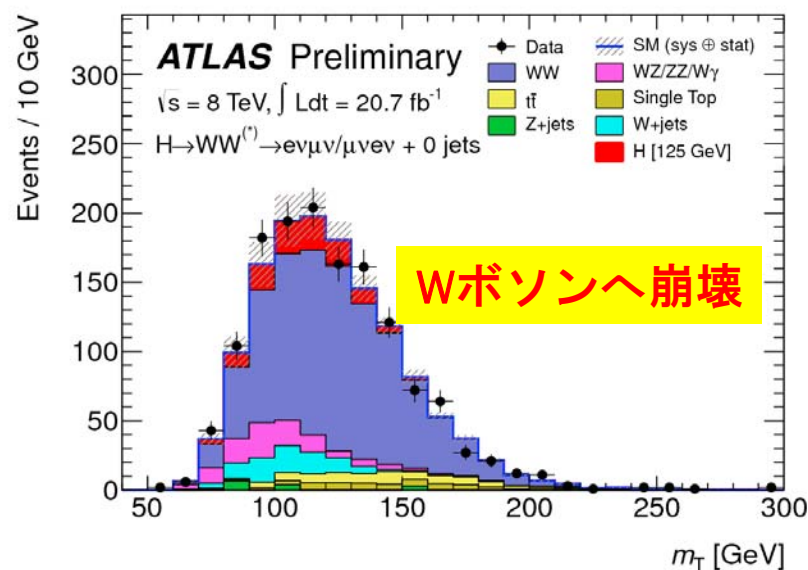
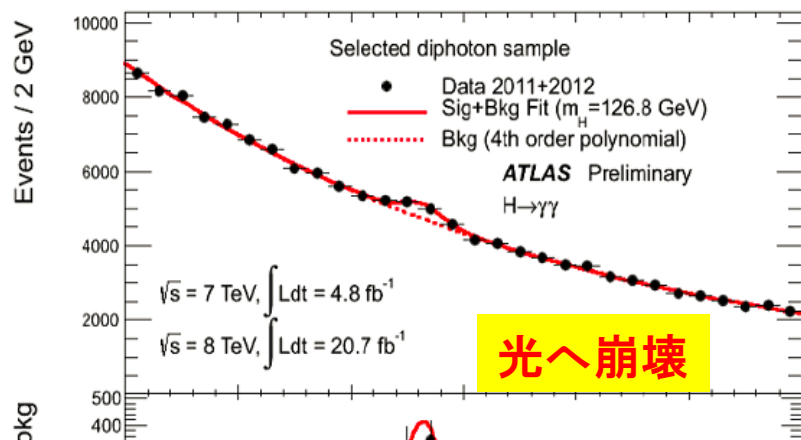
# 余談：巨大なコンピューター網



東京大学

LHCのデータは世界中に配られ、世界中のコンピュータで解析

# ほぼ同時に発見された壊れ方



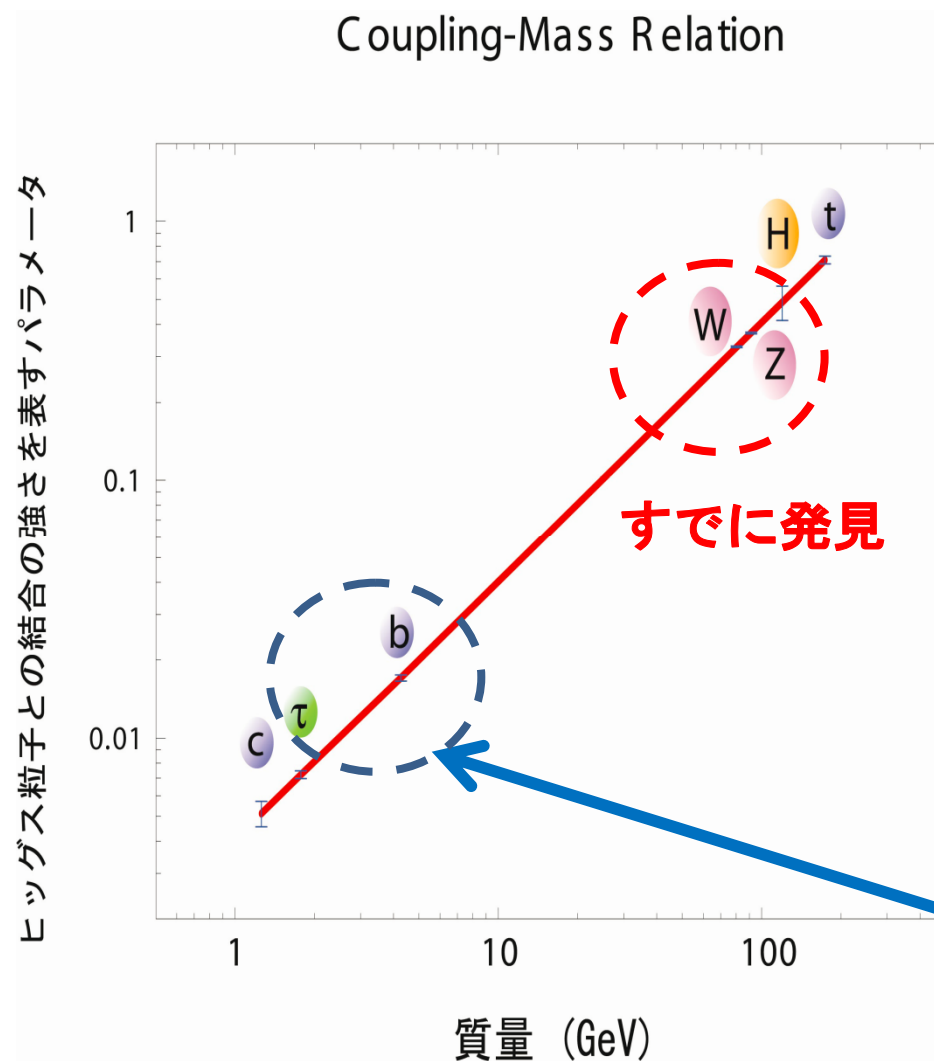
- いろいろな壊れ方を探すことが重要！
- 壊れやすさの測定で、この粒子がヒッグス粒子なのかがわかる。

壊れやすさ = ヒッグスにどのくらい好かれているか = 質量

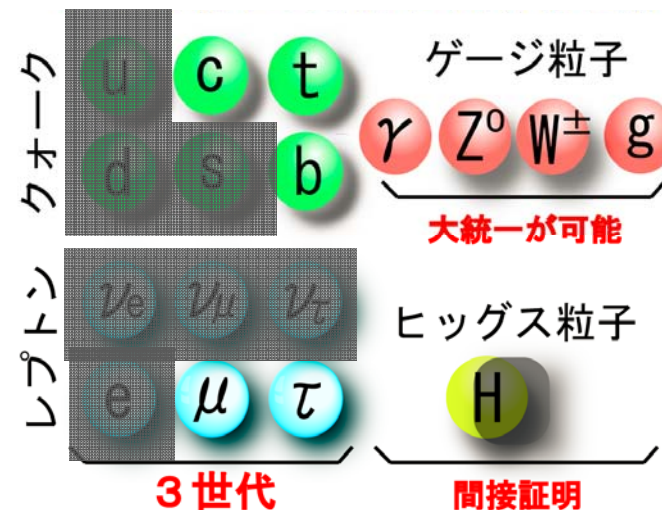


# ヒッグス粒子と呼ぶために

壊れやすさ = ヒッグスにどのくらい好かれているか



原理的に、質量のあるすべての素粒子に崩壊可能



- あまりにも軽いのはちょっと無理...
- 今頑張って探しているもの  $\rightarrow$  b と  $\tau$  への崩壊  
この辺が見つかったら確信できる

# ヒッグス粒子発見が新しい時代の幕開け

## ヒッグス粒子発見の意義

ただ単に17個目の素粒子が見つかったというだけではない

- (1) 素粒子の**質量の問題** → 止まることができるようになり、原子や星、生命の誕生に繋がった。
- (2) 「真空」の意味 → **真空が「真に空」ではなく、何か詰まった不思議な状態。**
- (3) この**真空のエネルギー**が宇宙を生み進化させた。

つまりヒッグス粒子があったから、

**巨大で、エネルギーとモノに満ちた宇宙が誕生した。**

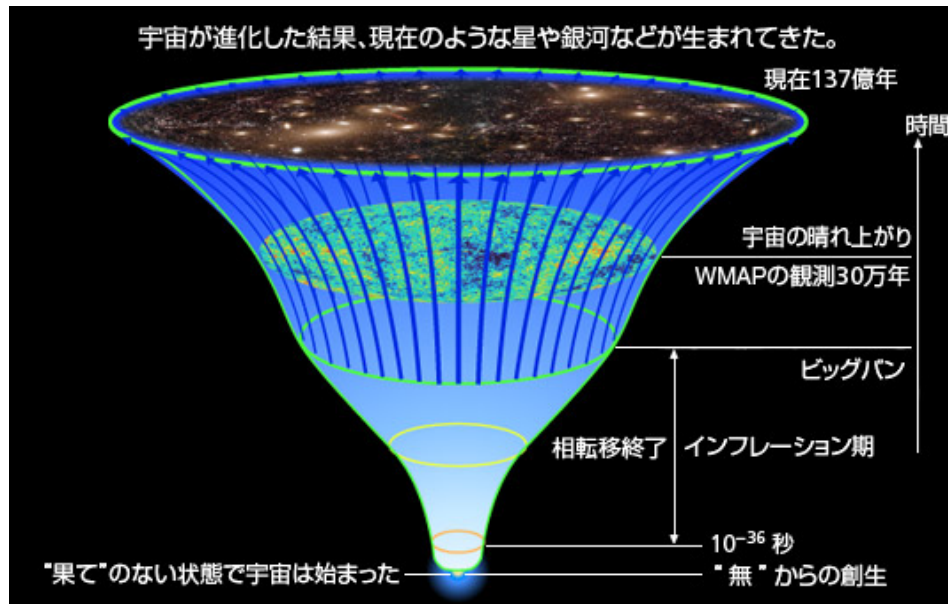




# ヒッグス粒子発見が新しい時代の幕開け

## ヒッグス粒子を調べる事＝ビッグバン直後を調べる

見つかったヒッグス粒子が予想通りの性質を持っているか。(LHCの最重要課題)



### 宇宙初期の謎

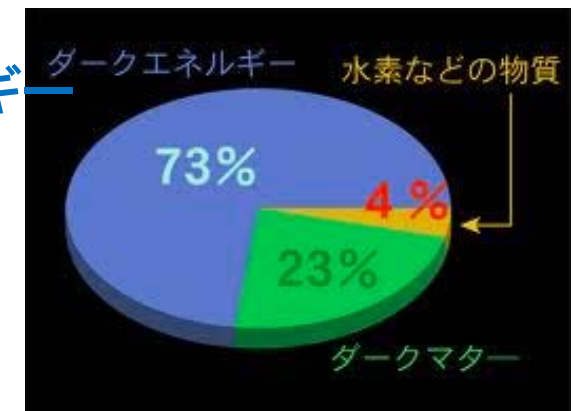
-インフレーション宇宙、ビッグバンのエネルギーはどこから？

-膨らんでも薄まらない真空の不思議な性質？

-実は、宇宙のエネルギーの96%は、見えないものでできている

暗黒物質

暗黒エネルギー



この暗黒物質の正体を探す！  
例) 超対称性粒子、余剰次元、

# まとめ

---

□タイムマシンを使わずに大むかしのできごとを知ることってできるの？宇宙の成り立ち？

□望遠鏡での観測(38万年以降)

□それより前は加速器で作る。

□歴史的大発見！ヒッグス粒子とは？

□真空中に凝縮していて、素粒子に質量を与える。

□巨大で、エネルギーとモノに満ちた宇宙が誕生。

□実験結果が教えてくれる宇宙初期の謎とは？

□ヒッグス場がビッグバン直後の秩序を作った。

□ビッグバンのエネルギーはどこから？暗黒物質？



# 今後の話

# LHC実験

The diagram illustrates a timeline of particle physics research and accelerator development from 2013 to 2030. The timeline is represented by a vertical axis with years listed on the left. Key milestones and goals are indicated by text and arrows:

- 2013:** Higgs particle discovery and other various achievements (highlighted in a green oval).
- 2014-2015:** A two-year break to strengthen the accelerator.
- 2016-2021:** Accelerator energy to be doubled from current levels.
- 2020-2022:** Precision measurement of the Higgs particle and exploration of the Big Bang energy mystery (dark matter).
- 2023-2025:** Data-taking speed to be increased 5 times.
- 2030:** Next-generation accelerator?

The timeline is divided into three main phases by large blue double-headed arrows: 2013-2015, 2016-2022, and 2023-2030. A yellow arrow points down from the 2030 mark, indicating the next generation of accelerators.

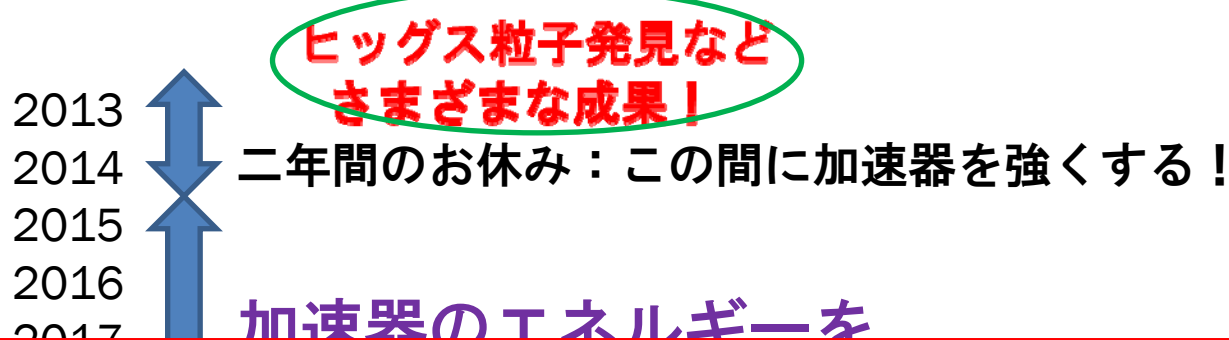
みなさん

2013  
2014  
2015  
2016  
2017  
2018  
2019  
2020  
2021  
2022  
2023  
2024  
2025  
|  
2030

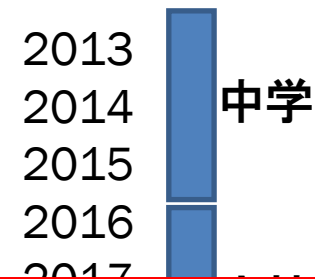
中学  
高校  
大学  
大学院  
↓  
研究者

# 今後の話

## LHC実験



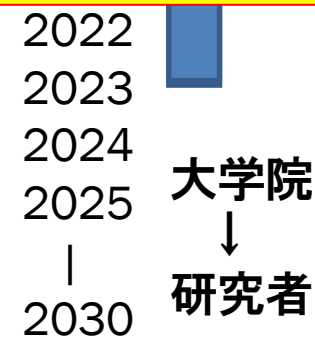
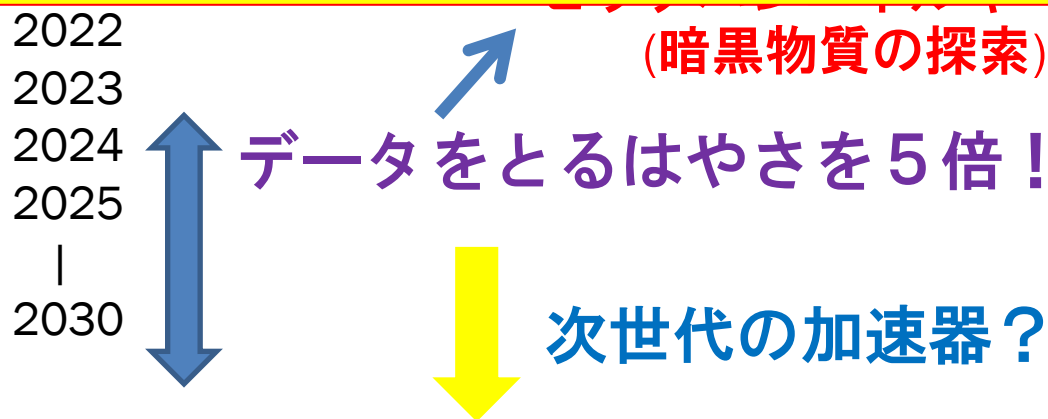
## みなさん



LHCはとても長い実験です。

今後15－20年、LHC実験は、宇宙はじまりの謎にせまります。

**みなさんもCERNで一緒に研究しませんか？**

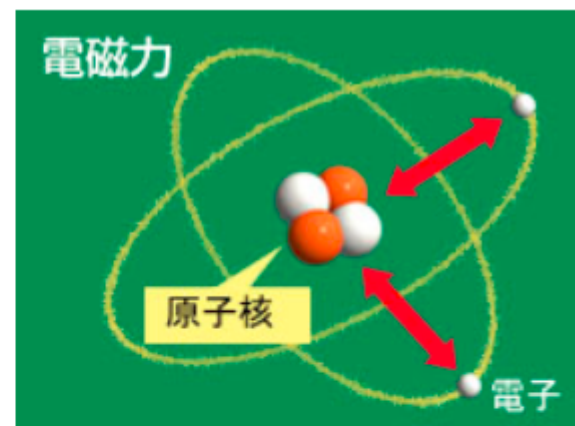
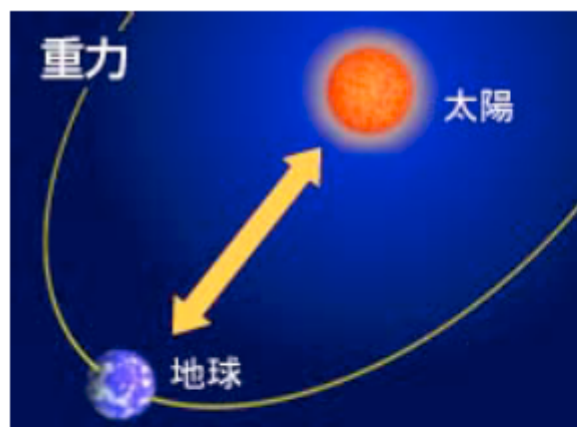




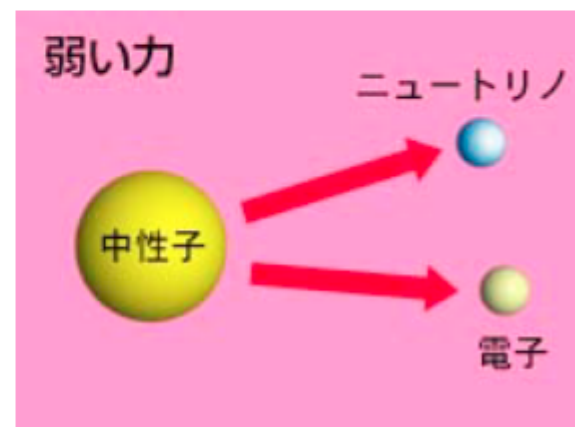
# おまけ

---

# 自然の4つの力



湯川先生が予言



(中性子は陽子に変わる)



# 量子力学

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

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

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

トッポクオーク  
一番重い素粒子

短い嘘ならついて  
いい ( $10^{-26}$  秒)

光

一方 126 GeV

H

よく壊れる

反トッポ

トッポ

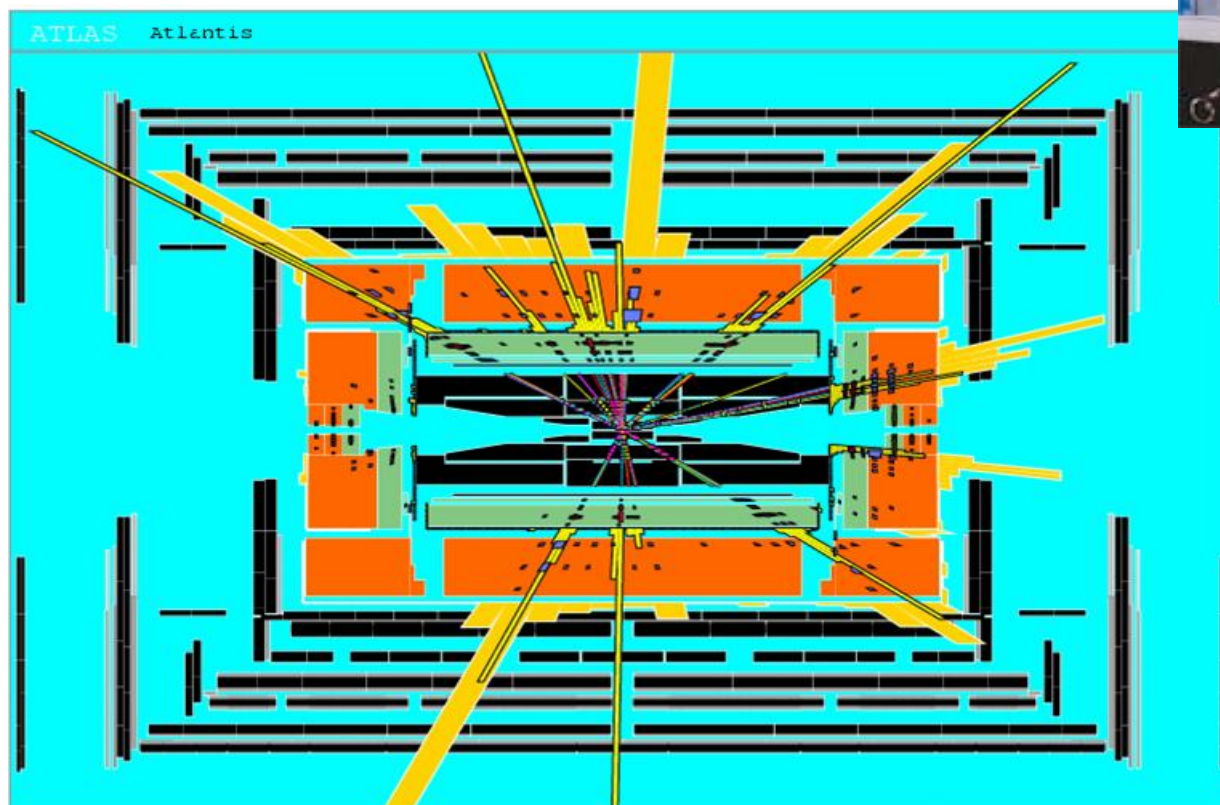
嘘からさめて  
なくなるけど、  
トッポクオークは  
電荷をもっているので  
光をだす

しかし、トッポクオークは  
質量  $173 \text{ GeV} \times 2 \sim 350 \text{ GeV}$

光

# ミニブラックホールができる？

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。



## 人工ブラックホール、地球は無事か 学者「心配ご無用」

2008年6月25日12時52分



【ワシントン＝勝田敏彦】陽子の超高速衝突実験で、小さなブラックホールができてしまうかも知れないけれど、地球がのみ込まれる危険は絶対にありません――。スイス・フランスの国境沿いで今秋にも運転が始まる大型円形加速器「LHC」について、ノーベル賞学者らの委員会がこんな「安全宣言」を出した。

ブラックホールは重力が強すぎて光すら抜け出せない領域。重い星が燃えつきて縮んだときなどに、できることが知られている。地下トンネルにある1周27キロのLHCで、かつてない高エネルギーで陽子同士を正面衝突させると、極微の人工ブラックホールができる可能性が、理論計算から指摘されている。

しかし、「ブラックホールができると、地球や私たちの宇宙まで吸い込まれてしまうのではないか」と心配する声もあった。このため、LHCを開発・運用する欧州合同原子核研究機関（CERN）が、ノーベル物理学賞受賞者らでつくる委員会に「安全審査」を依

頼していた。

報告書は、「ブラックホールはエネルギーを放射しながら縮んでいく」という英国のホーキング博士による「ホーキング放射」の理論などにもとづき、たとえブラックホールができて、すぐに消滅してしまうと説明。

また地球などにはLHCでできる以上の高エネルギーの粒子（宇宙線）がしょっちゅう衝突しており、その時にミニブラックホールが生じているかもしれないが、地球がのみ込まれたりしていないことなどを根拠に、「実験は安全」と結論づけた。





ファビオラ・ジアノッティ  
アトラスグループ代表

ピーターヒッグス  
理論物理家

# 暗黒物質の証拠

弾丸銀河団（34億年）： 銀河団同士の衝突



赤い所： 物質(Gas)がぶつかって  
熱くなってX線を出している  
青いところ： 重力レンズ効果  
銀河団の質量分布