

# 巨大加速器 LHC で迫る 初期宇宙の世界

★★★★

★★★★

筑波大学理工学群物理学類

中條 達也

「若い世代のための出前講義」

気仙沼高等学校

2012年11月30日



Pb+Pb @  $\sqrt{s} = 2.76$  ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693

# 講義内容

**テーマ：「宇宙の歴史と現代物理学」**

第1部 原子核・素粒子物理学と宇宙

第2部 加速器実験で宇宙誕生の謎に迫る

# 第1部「原子核・素粒子物理学と宇宙」

1. はじめに

2. ビックバン

3. 極初期宇宙

- ・ 宇宙開闢 ( $t = 0$  秒)
- ・ インフレーション宇宙膨張期 ( $t = 10^{-36} \sim 10^{-11}$  秒後)
  - ・ 力、素粒子、質量とは何か？

## 第2部 「加速器実験で宇宙誕生の謎に迫る」

・✂・ 特殊相対性理論入門

4. 実験で「クォークスープ」をつくる ( $t = 10^{-6}$  秒後)

5. その後の宇宙 ( $t = 3$  分～137 億年後 (現在) )

6. エピローグ

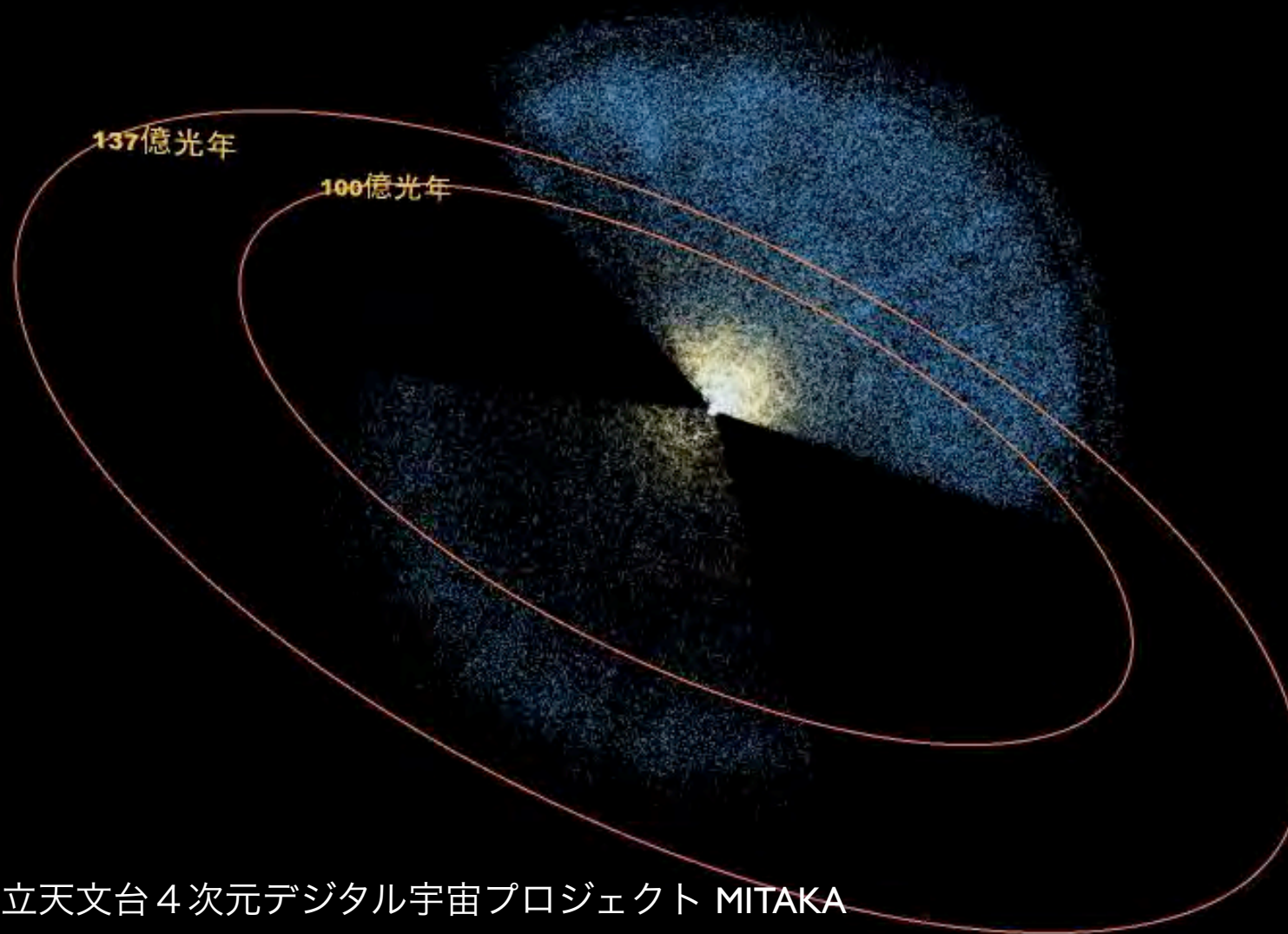


---

# 1. はじめに

---

物質の階層と物理学



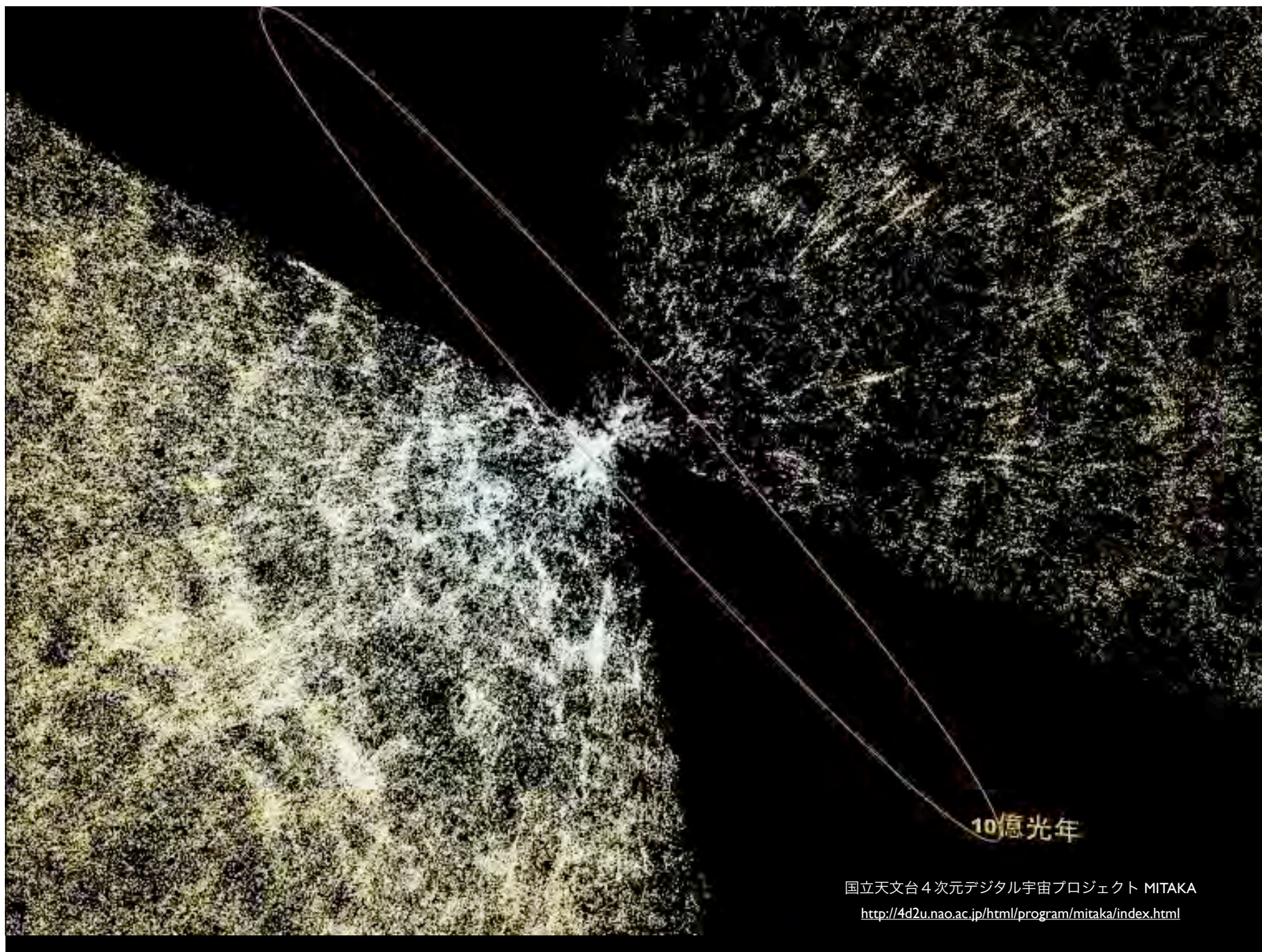
国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト MITAKA

<http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/index.html>



国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト  
FOUR-DIMENSIONAL DIGITAL UNIVERSE PROJECT, NAOJ

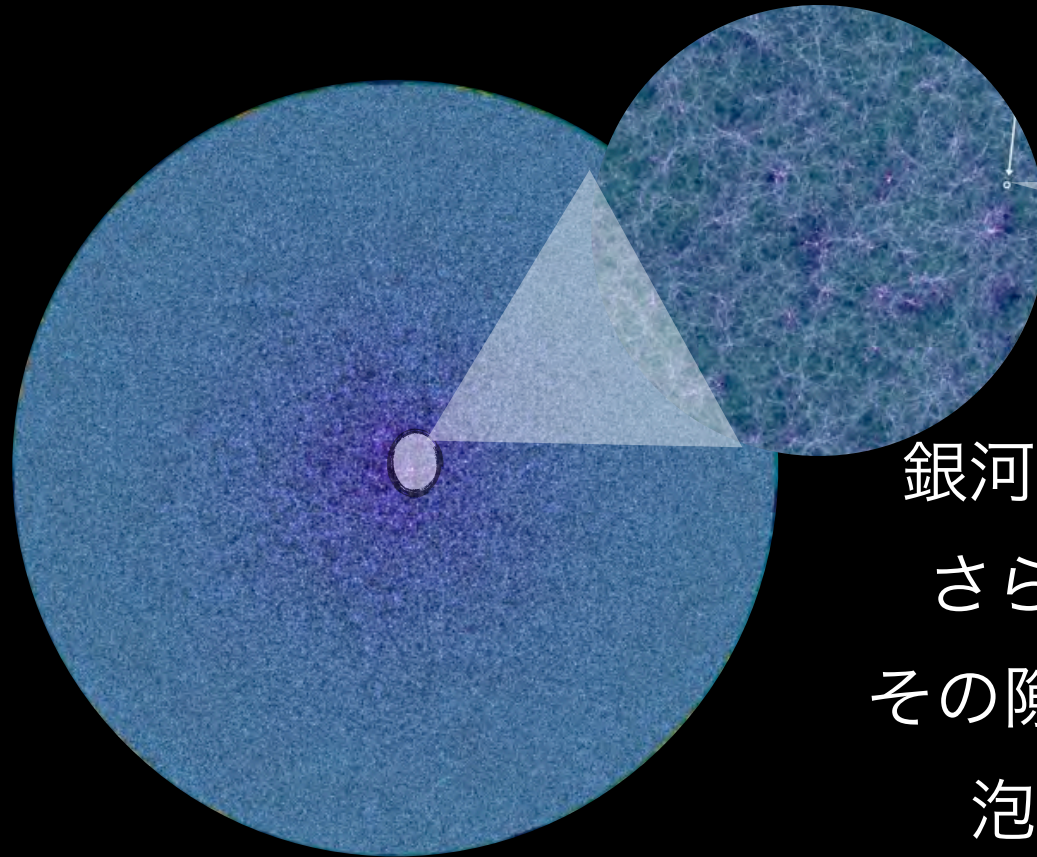




国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト MITAKA

<http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/index.html>





1点1点が銀河.  
銀河は銀河団を形成し、  
さらに超銀河団を形成.  
その隙間に何もない空間、  
泡（ボイド）をもつ  
＝「宇宙の大規模構造」  
（宇宙初期を見ている）

$> 10^{26}$   
m



超遠方銀河



$> 10^{26} \text{ m}$

$\sim 10^{21} \text{ m}$

アンドロメダ銀河

$> 10^{26} \text{ m}$   
 $10^{21} \text{ m}$

$\sim 10^{11}$   
 $\text{m}$



太陽、地球、月



$> 10^{26} \text{ m}$

$10^{21} \text{ m}$

$10^{11} \text{ m}$

$10^2 \text{ m}$



地球の上





$> 10^{26} \text{ m}$

$10^{21} \text{ m}$

$10^{11} \text{ m}$

$10^2 \text{ m}$

1.70 m



人の大きさ



$> 10^{26} \text{ m}$

$10^{21} \text{ m}$

$10^{11} \text{ m}$

$10^2 \text{ m}$

1.70 m

$10^{-5} \text{ m}$

神経細胞

$> 10^{26}$  m

$10^{21}$  m

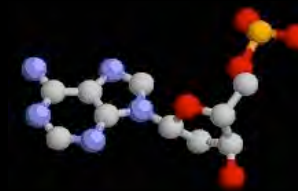
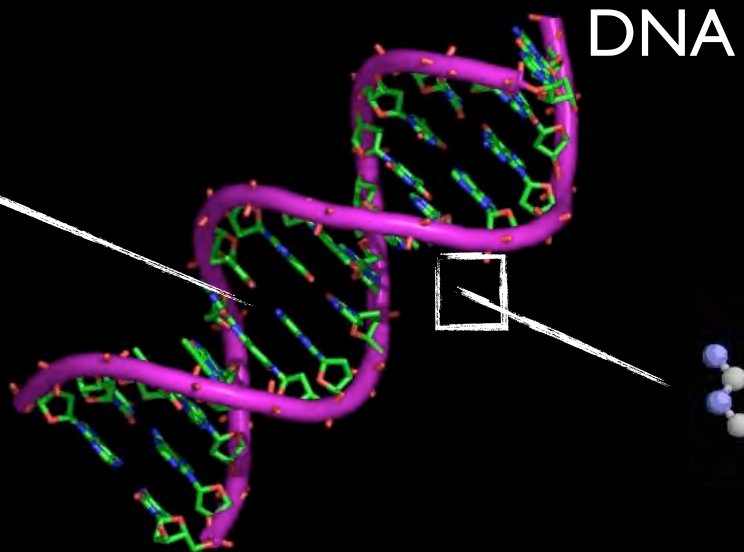
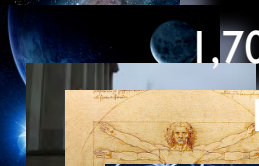
$10^{11}$  m

$10^2$  m

1,70 m

$10^{-5}$  m

$10^{-8}$  m



分子

$> 10^{26} \text{ m}$

$10^{21} \text{ m}$

$10^{11} \text{ m}$

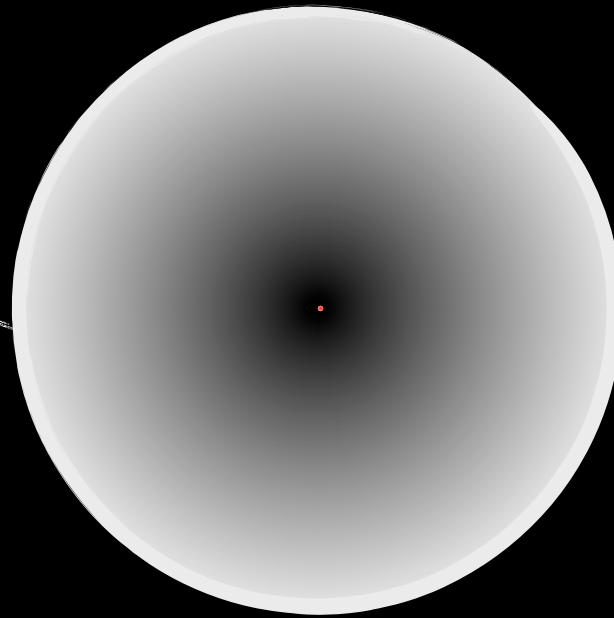
$10^2 \text{ m}$

1,70 m

$10^{-5} \text{ m}$

$10^{-8} \text{ m}$

$10^{-10} \text{ m}$



水素原子



$> 10^{26} \text{ m}$

$10^{21} \text{ m}$

$10^{11} \text{ m}$

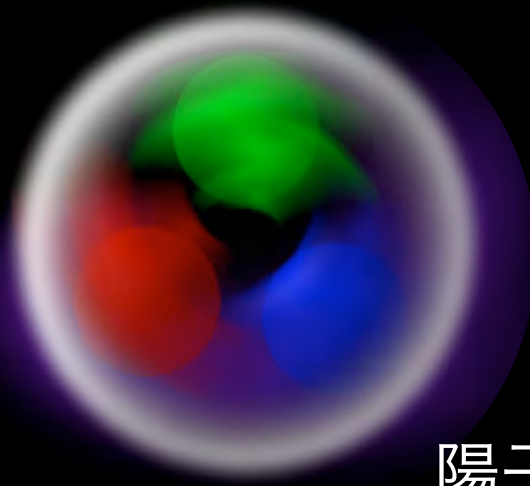
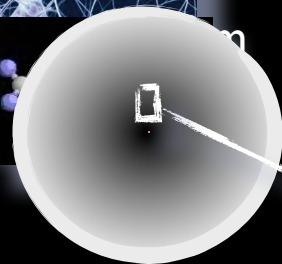
$10^2 \text{ m}$

1,70 m

$10^{-5} \text{ m}$

$10^{-8} \text{ m}$

$10^{-15} \text{ m}$



陽子

$> 10^{26} \text{ m}$

$10^{21} \text{ m}$

$10^{11} \text{ m}$

$10^2 \text{ m}$

1,70 m

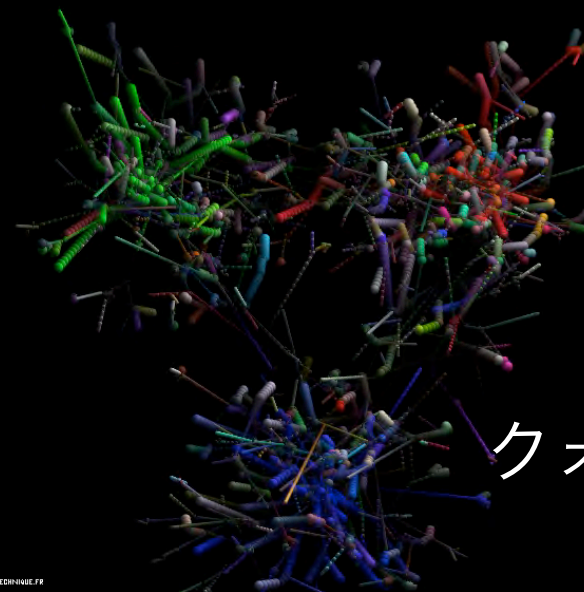
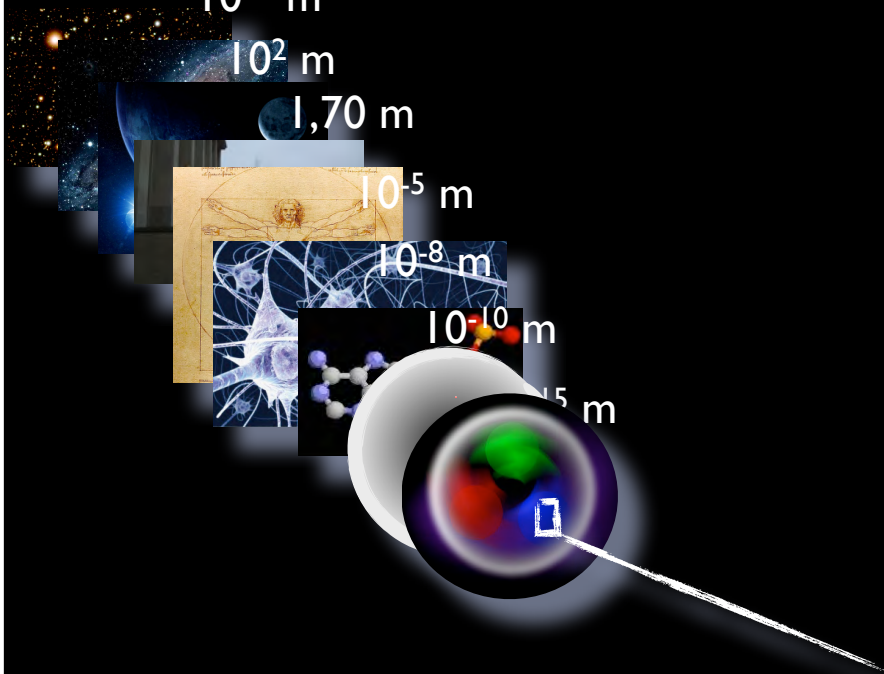
$10^{-5} \text{ m}$

$10^{-8} \text{ m}$

$10^{-10} \text{ m}$

$10^{-15} \text{ m}$

$10^{-18} \text{ m}$

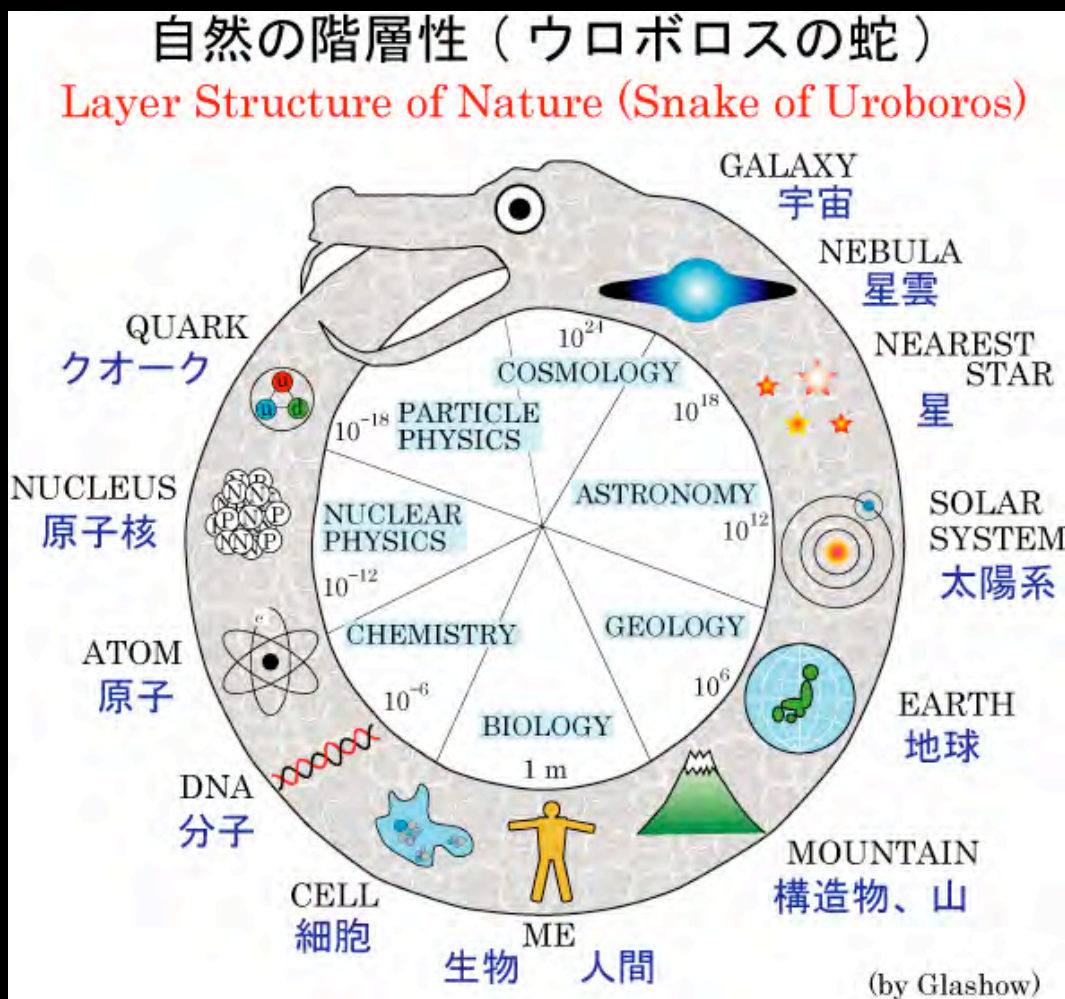


クォーク

IPS  
WWW.LACTAMIDE.POLYTECHNIQUE.FR



# ウロボロスの蛇



## 物理学の世界

異なる階層（スケール）が互いに  
関連し、繋がっている

例) 宇宙 ( $10^{28}\text{m}$ )



素粒子 ( $10^{-18}\text{m}$ )

<http://www.yukawa.phys.sci.osaka-u.ac.jp/SAP/?SAP%2FProgram%2F11>

---

## 2. ビックバン

---

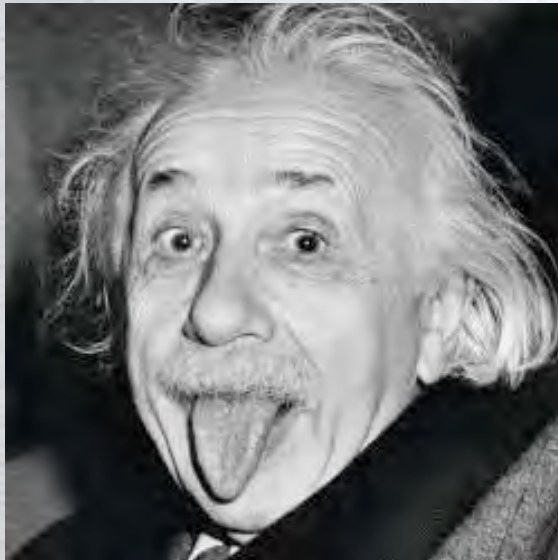
その証拠と意味

# 一般相対性理論 (1915-1916)

## アインシュタイン方程式

重力場の方程式

時空のゆがみと力（エネルギー）を記述



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

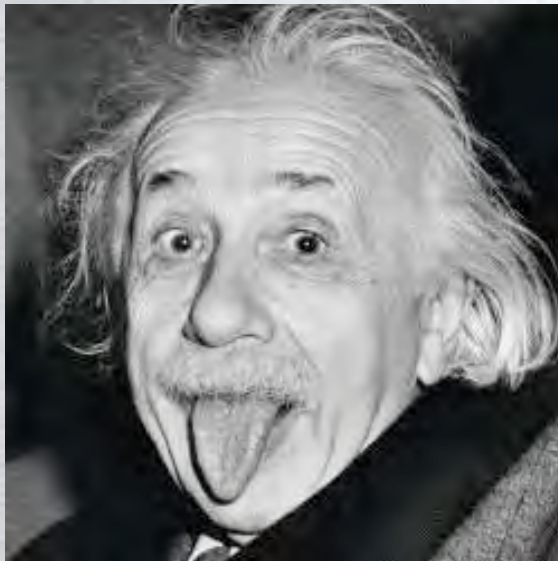


# 一般相対性理論 (1915-1916)

## アインシュタイン方程式

重力場の方程式

時空のゆがみと力（エネルギー）を記述



リッチ・テンソル（時空の曲率）

円周率

重力定数

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

計量テンソル  
(重力ポテンシャル)

スカラー曲率

光速

エネルギー

運動量テンソル

時空のゆがみ具合を表わす

物質が持っている  
エネルギーを表わす

# ビックバンモデルの始まり

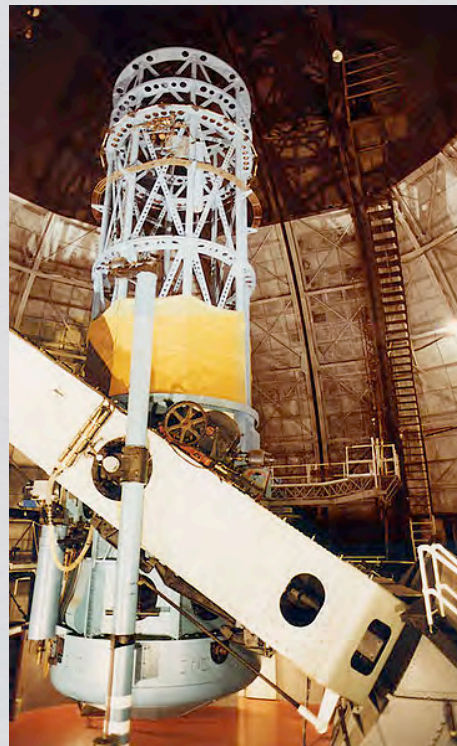
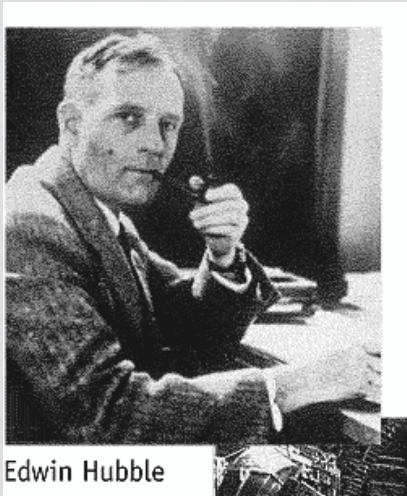
- \* 1920年後半、一般相対性理論の発表後、その帰結として、ルメートル（ベルギーの物理学者）が宇宙膨張モデル（ビックバン仮説）を提唱。
- \* しかしアインシュタインが宇宙膨張仮説を否定。「宇宙項」の導入（膨張の証拠が見つかった後、その過ちを悔いたことは有名）。



ジョージ・ルメートル  
(ベルギー)



# 証拠 1) ハッブルの法則

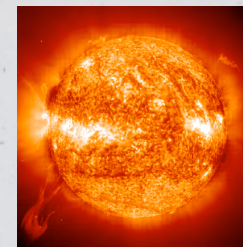


E. ハッブル（米）：1929年、  
銀河後退の観測

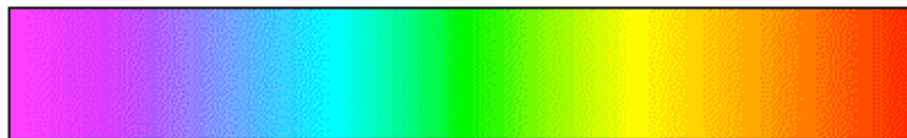
- 宇宙膨張の直接的証拠
- 音のドップラー効果：
  - 近づいてくる音：高い
  - 遠ざかる音：低い
- 光のドップラー効果：
  - 遠ざかる銀河のスペクトル
  - 赤い方（長波長側）にシフト
  - = 赤方偏移

遠方の銀河ほど大きく赤方  
シフトしていることを発見

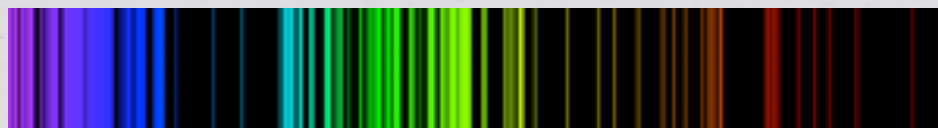
# スペクトルとは？



紫 青紫 青 緑 黄 橙 赤



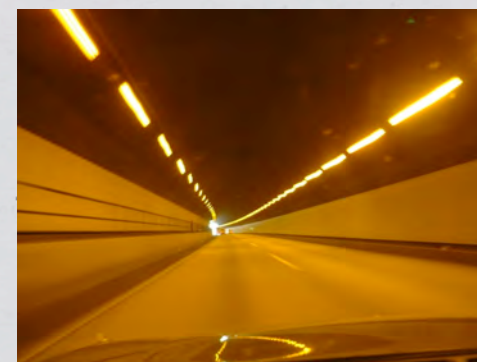
連続スペクトル（太陽光）



鉄の輝線スペクトル

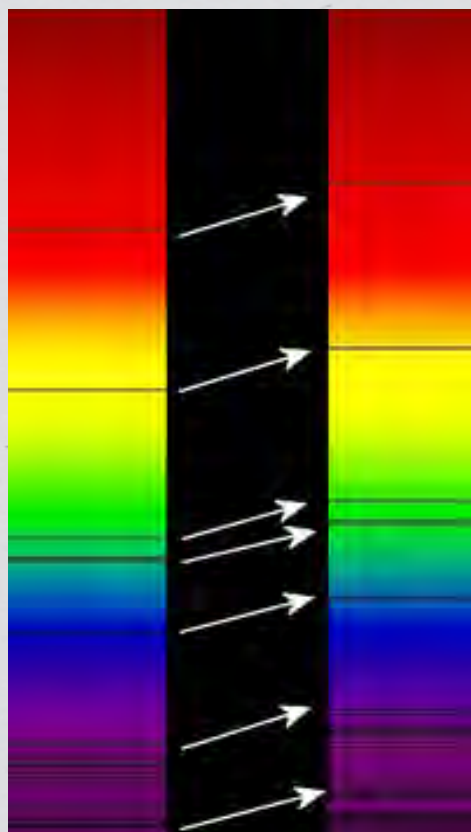


Na D線輝線スペクトル





# 赤方偏移



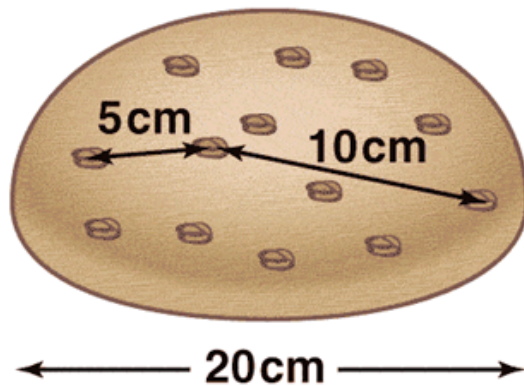
太陽光

遠方銀河

太陽の光のスペクトル(左)と遠方銀河のスペクトル(右)吸収線が赤方にシフトしている

宇宙膨張：遠方の銀河ほど早い速度で観測者から遠ざかっている。

# ハッブル膨張のイメージ (ぶどうパン)



MAP990404

宇宙が大爆発するイメージは  
間違い。

空間自体（いれもの）が等方  
的に押し広げられるイメージ

銀河（干しぶどう）の大きさは  
そのまま、遠い銀河（干  
しぶどう）ほど早く遠ざかる

速度

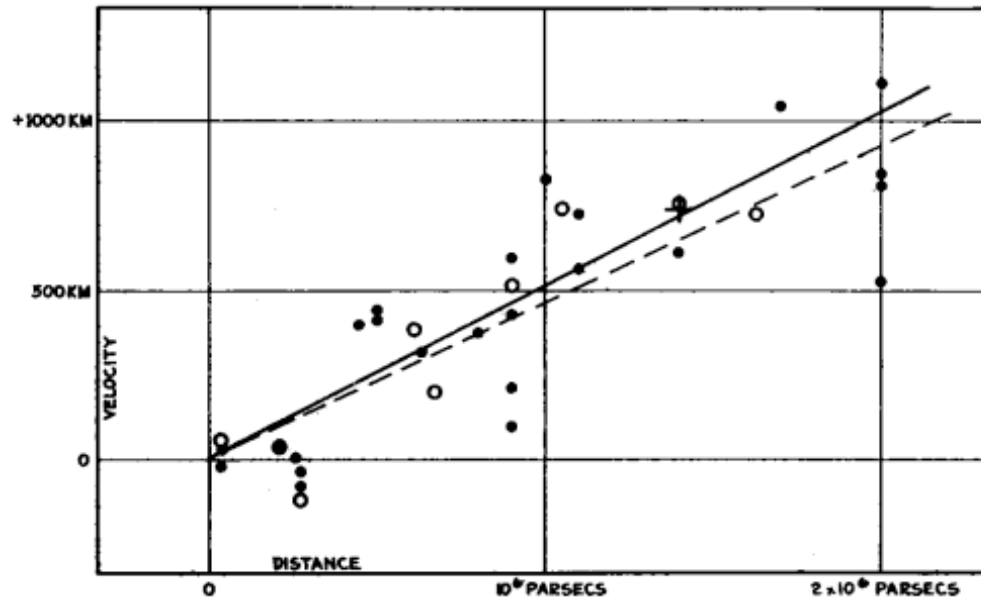


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

ハッブルが  
1929年に  
発表した論文の  
オリジナル  
プロット

(現在では銀河までの誤差が大きく、  
かつ銀河間の距離が約 1 / 7 だったこ  
とが分かっている)

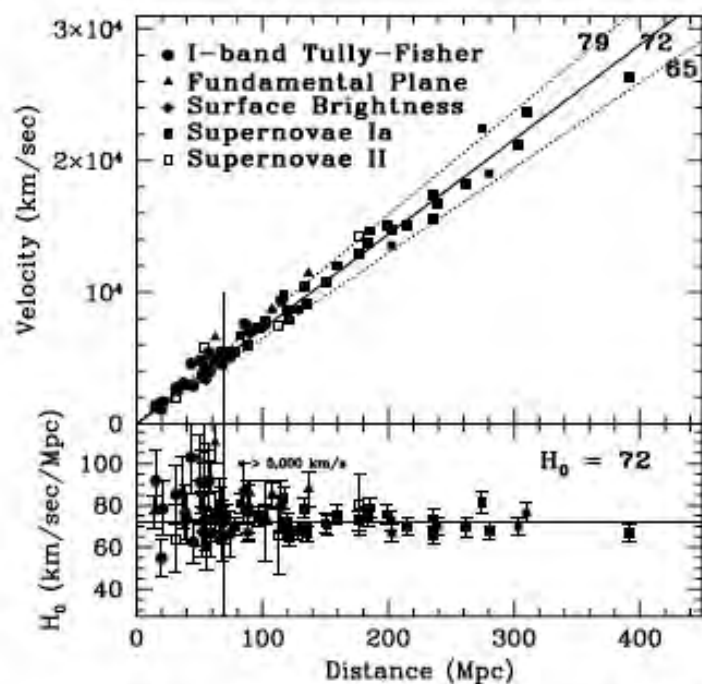
距離

ハッブルの法則

$$v = H_0 \times r$$

銀河の後退速度 = 定数 × 距離

# 現在の観測例（ハッブル宇宙望遠鏡, 2001）



400 メガ・パーセック  
= 13 億光年までの銀河、  
超新星を測定

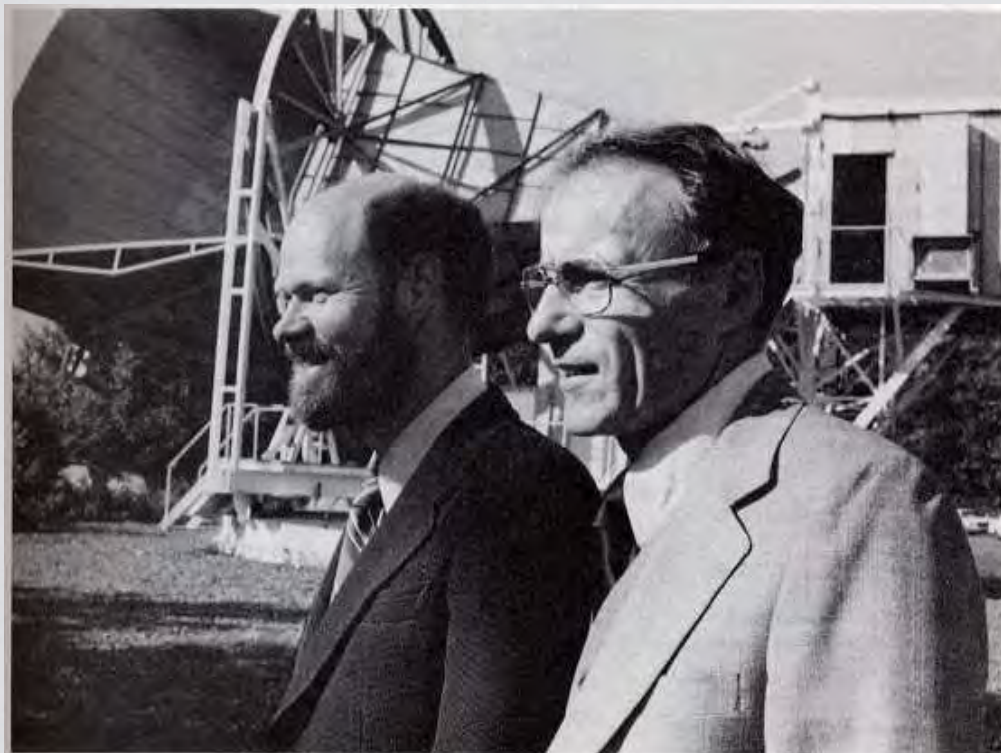
ハッブルの法則に従う

W.L. Freedman et al., *Astrophys. J* 553, (2001) 47,  
Final Results from the *Hubble Space Telescope*  
Key Project to Measure the Hubble Constant

\* 1 pc = 3.26 光年, 1 Mpc =  $10^6$  pc =  $3.086 \times 10^{22}$  m



## 証拠 2) 宇宙背景放射



After Hubble—Quasars, CBR, and the Standard Cosmological Model ■ 47

Robert Wilson & Arno Penzias (ベル研究所)

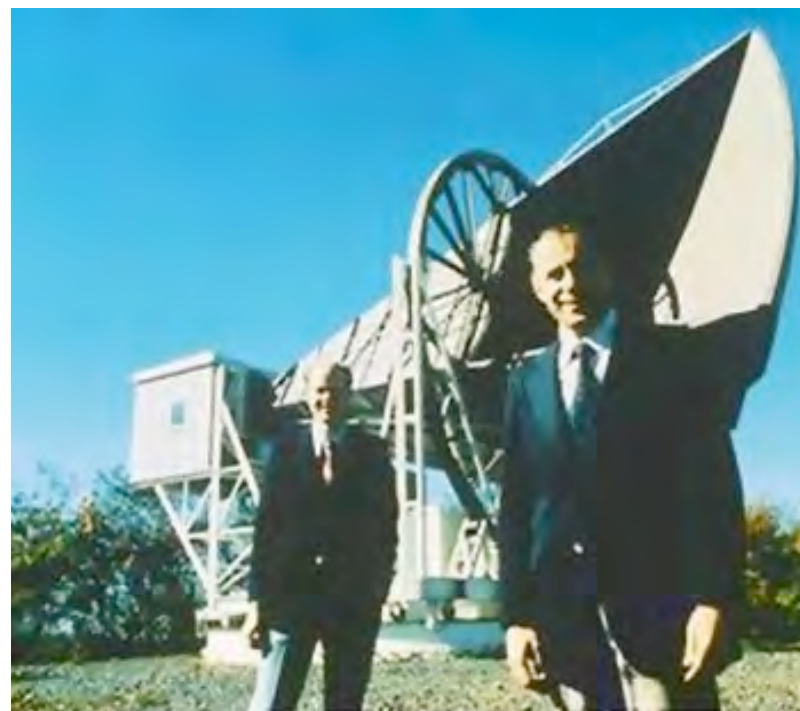
### 1960年代

- ・ 宇宙マイクロ波背景放射の観測 ( $\lambda = \text{mm} - \text{m}$ )
- ・ 銀河が発する電波を観測する目的で始めた。
- ・ その中に「雑音」があらゆる方向から、同じ強度でやってきていることを発見！

→ 温度：約3K

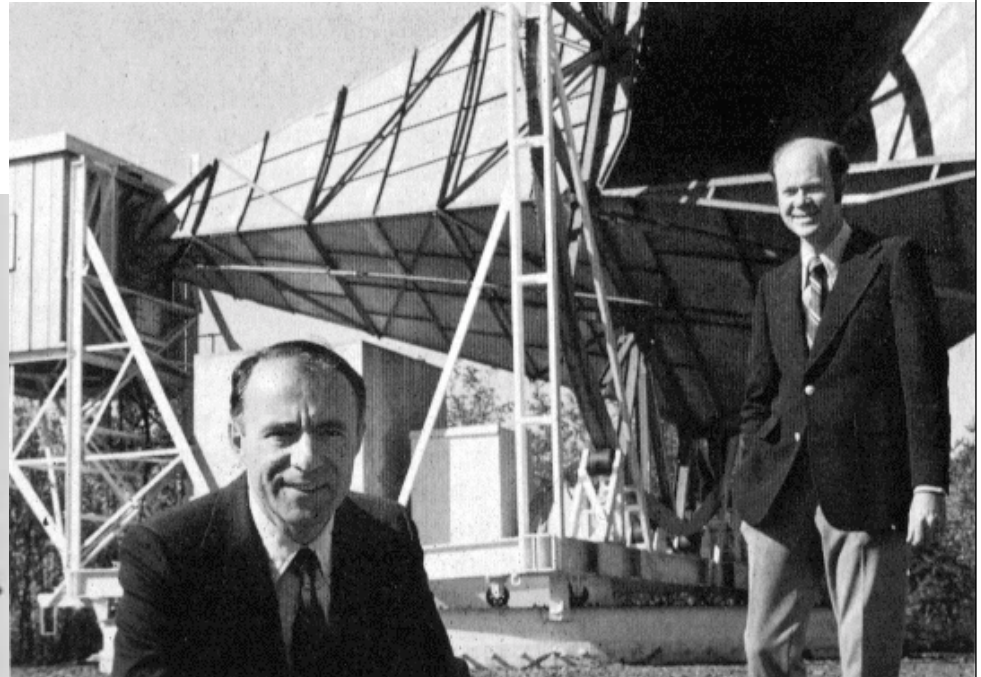
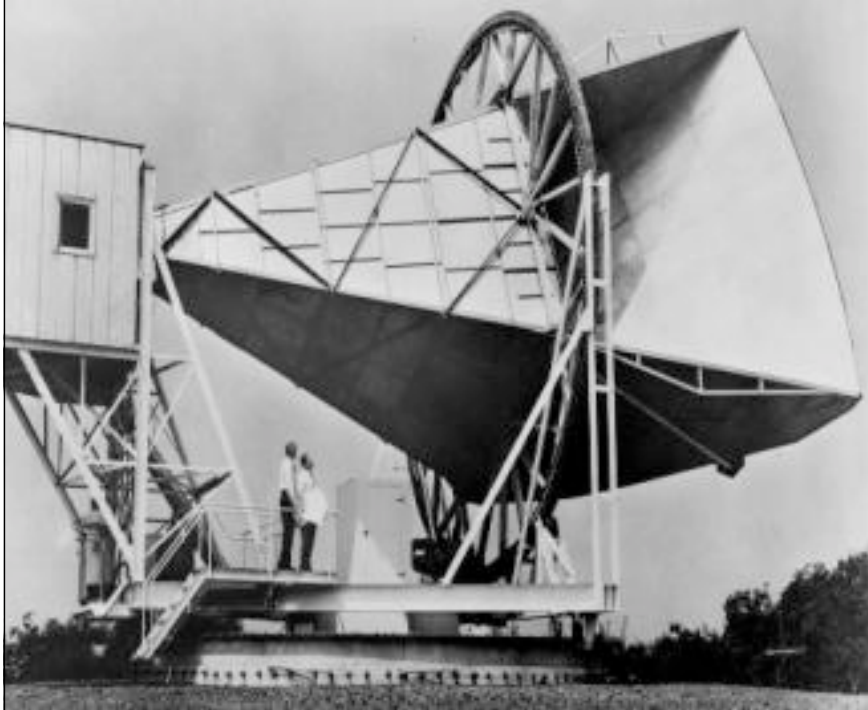


A. ペンジアス



R. W. ウイルソン (右)

1978年、宇宙マイクロ波背景放射  
の発見でノーベル物理学賞を受賞



アンテナについた鳥の糞の除去を丹念に行った  
→ノーベル賞！



# ビッグバンの意味するところ

- ビッグバンは確かに存在した。
  - （証拠） ハッブルの法則、背景放射
- 背景放射の揺らぎ測定によると、宇宙年齢は 1 3 7 億年
- つまり 1 3 7 億年前に、全てはある 1 点から始まったということ。
- 全宇宙のエネルギーが 1 点に！
- 「**火の玉宇宙**」は膨張により冷え、現在に至る。
- 宇宙初期→高エネルギー物理学→素粒子の世界へ

---

# 3. 極初期宇宙

---

ビックバンから  $t = 0 \sim 10^{-36}$  秒後の世界

# 宇宙の開闢 「無」 ( $t = 0$ 秒)

- 「無」から宇宙が誕生したという仮説。
- 提唱者：A. ビレンキン（ウクライナの物理学者）
- 「無」 = 空間も時間もない。
- **「真空のエネルギー」**：正のエネルギーと負のエネルギーの間を揺らいでいる。
- あるとき「正のエネルギー」が勝ったとき、エネルギーの固まりが一気に生まれる。これが宇宙の誕生である、という仮説。その後、宇宙はインフレーション的な急激宇宙膨張する。
- インフレーションが終わると、真空エネルギーは熱エネルギーに転化し、火の玉宇宙になる。



アレキサンダー・ビレンキン



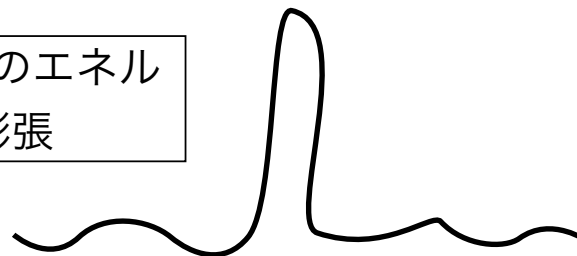
① 真空のエネルギーの揺らぎ

正のエネルギー

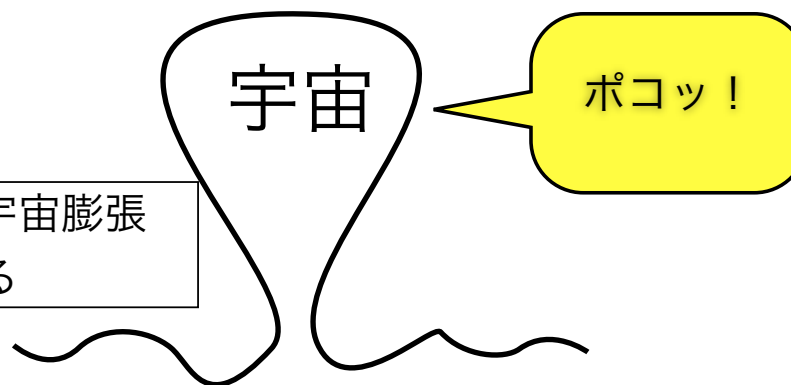
負のエネルギー



② ある確率で正のエネルギーの方へ膨張

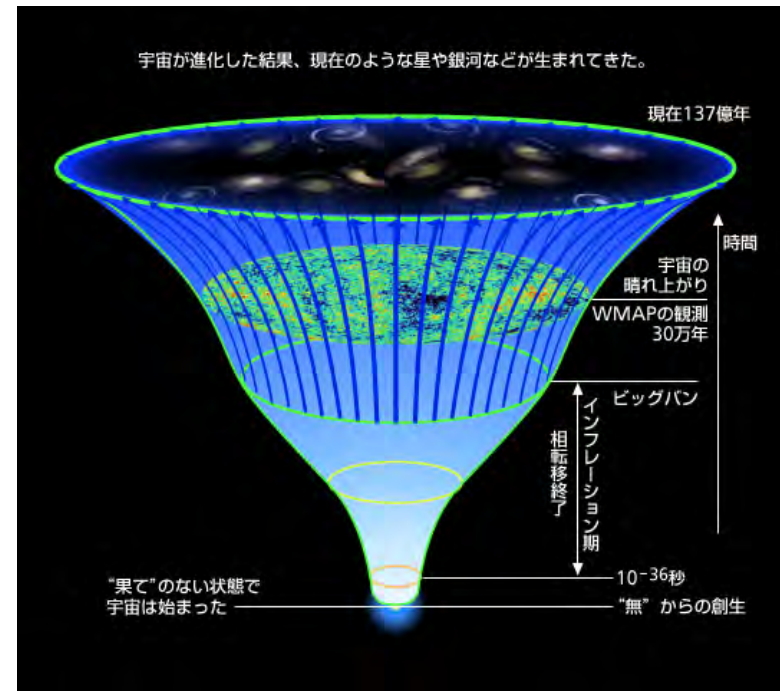


③ インフレーション宇宙膨張で宇宙が生まれる



# インフレーション期 ( $t = 10^{-36} \sim 10^{-11}$ 秒)

- インフレーション期は「火の玉」宇宙状態。
- 現代の理論によれば、このインフレーション期に「素粒子」が誕生した。
- 素粒子とは、大きさが無い（測定できない）粒子。
- 温度が冷えて行くに従って、**宇宙が相転移**していった。素粒子に質量が生まれ、力が生まれる。
- 佐藤勝彦博士、グース博士（アメリカ）が独立に提唱。



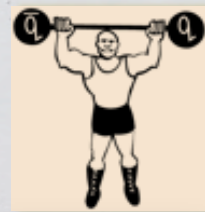
# 4つの力とその媒介粒子

\* 重力 (グラビトン)

\* 電磁気力 (光子)

\* 強い相互作用 (グルーオン)

\* 弱い相互作用 (Z, W ボソン)





クォーク

3	$10^3$	$10^5$
---	--------	--------

6	100	$10^3$
---	-----	--------

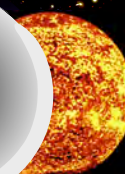
0.5	100	$10^3$
-----	-----	--------

$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$
-----------	-----------	-----------

レプトン



$n \Rightarrow p+e^-+\bar{\nu}$  質量  $0-10^5$  ?



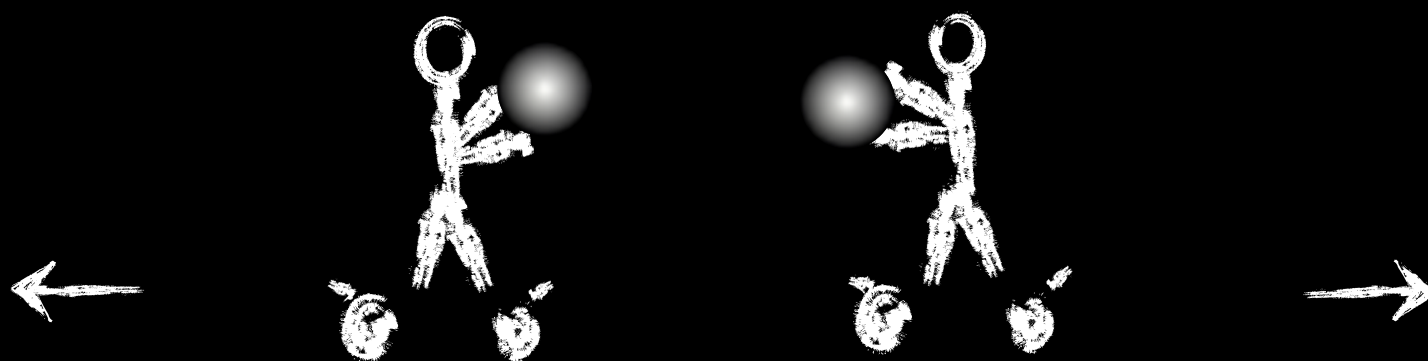
0	$10^4$
---	--------

0	$10^4$
---	--------

ゲージ粒子 (力)

ゲージ粒子の交換によって

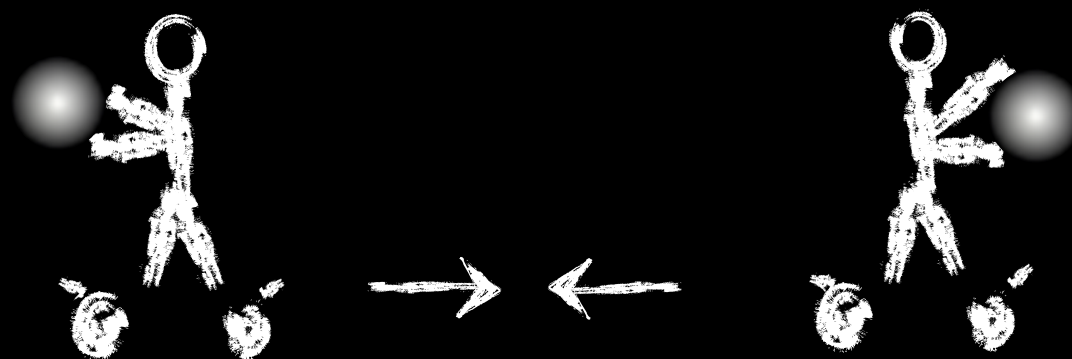
力が生まれる



斥力相互作用

ゲージ粒子の交換によって

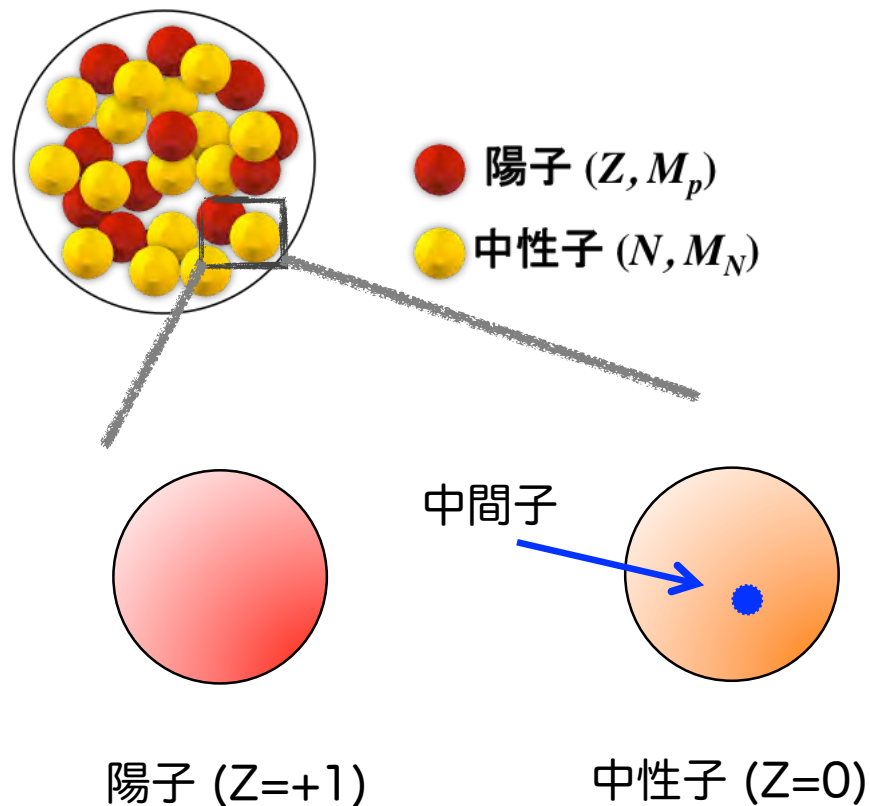
力が生まれる



引力相互作用



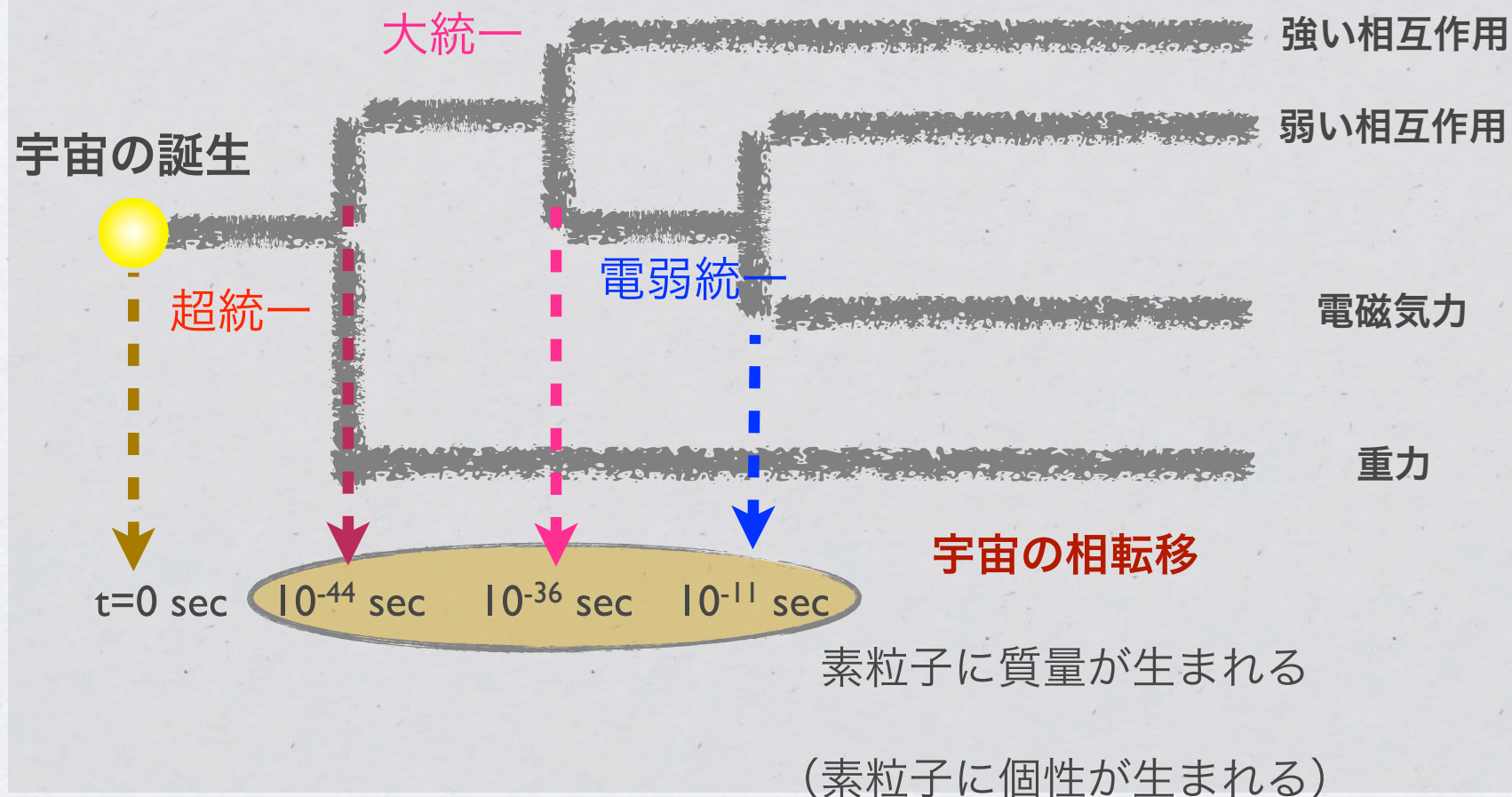
# 中間子論と核力、原子核



湯川秀樹博

- 中間子（粒子）を交換して、陽子と中性子を結びつける（核力）＝原子核の形成

# 宇宙の進化と4つの力



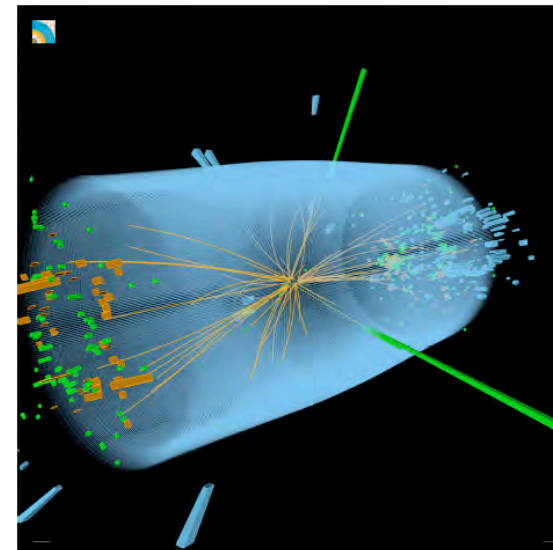
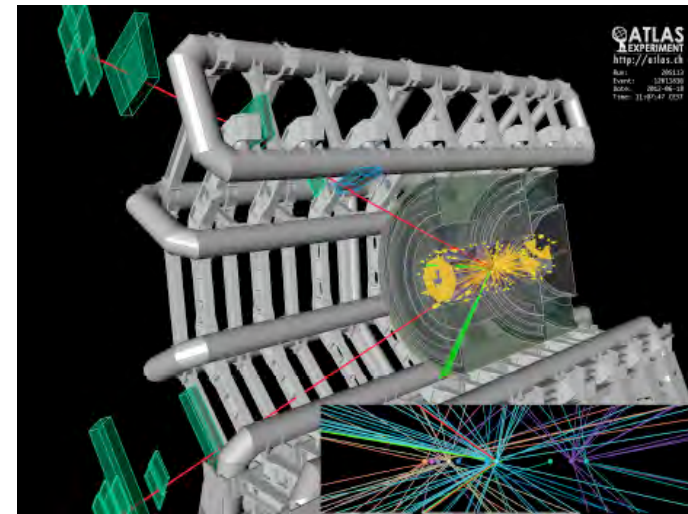
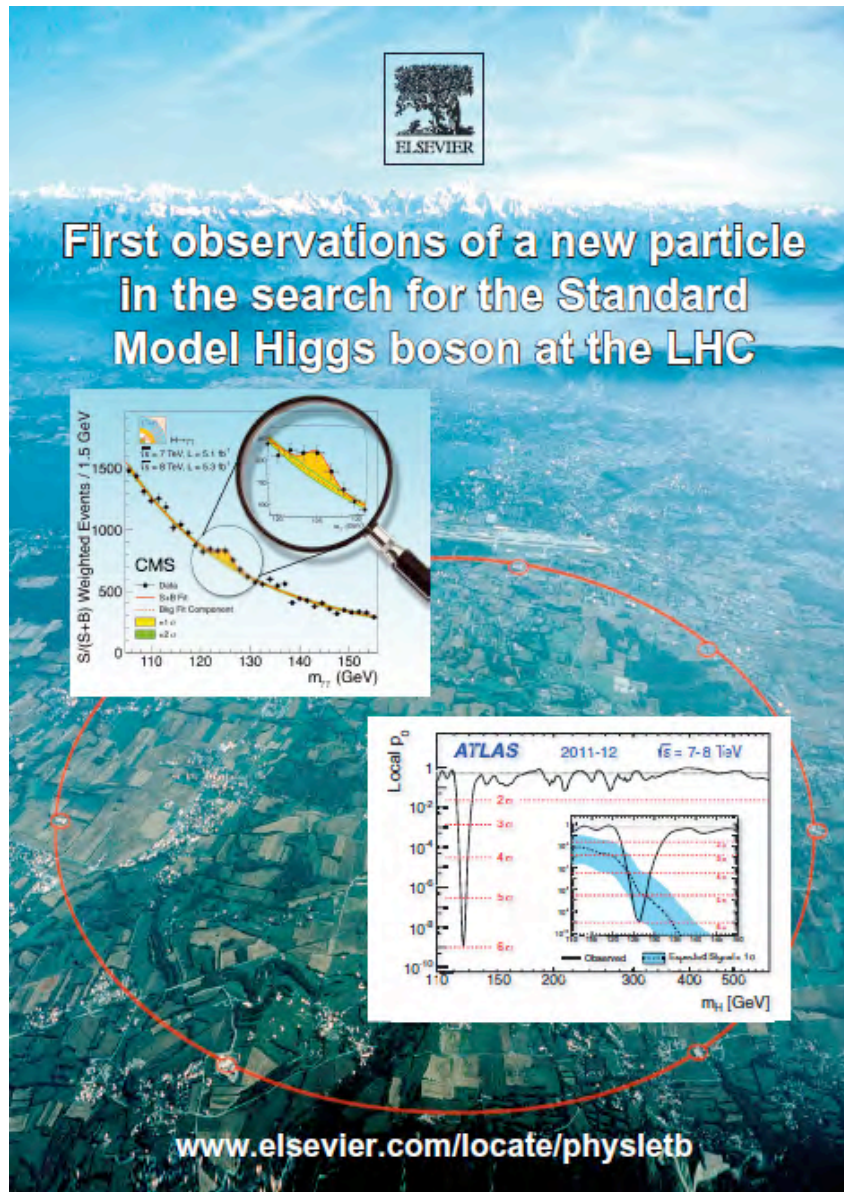
# 質量とは何か？



- 「もの」には重さがある。
- 無重力状態の宇宙空間でも、物体がもつ固有の質量は変わらない。
- すなわち質量とは、物体が本来もつ「動かしにくさ」
- では、物体（例えば陽子）の質量は何で決まっているか？

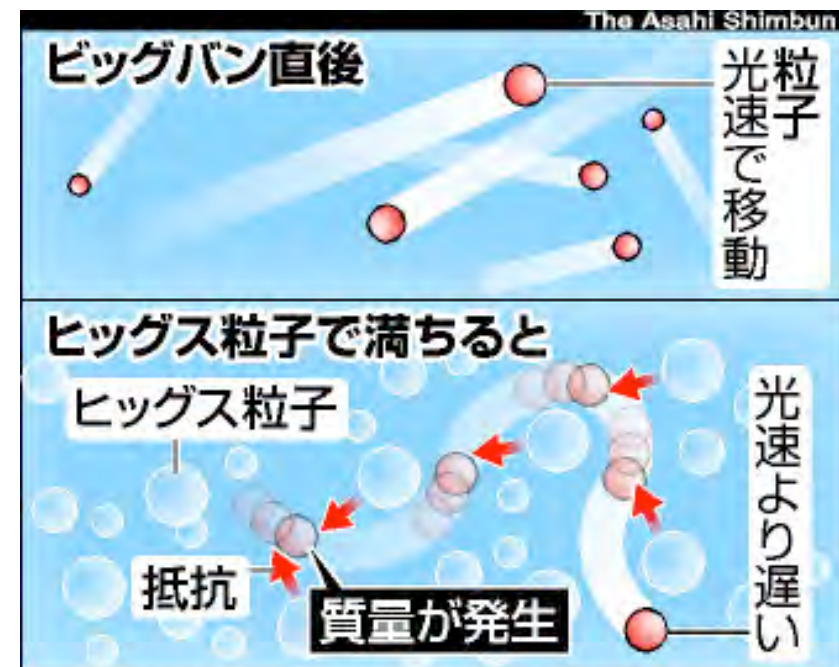


# ヒッグス（らしき）粒子 の発見 (2012.7)

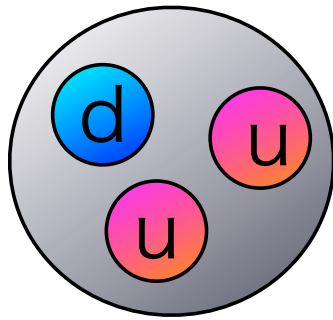


# ヒッグス場による質量獲得

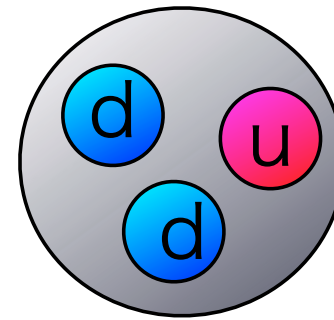
- ビッグバン直後は、素粒子は質量をもたず、高速で飛び回っていた。
- 宇宙初期の火の玉で、クォーク、レプトン、ゲージ粒子などの素粒子ができた。
- 「ヒッグス粒子」 (=ヒッグス場) もできた素粒子の1つ。空間がヒッグス粒子で埋め尽くされた。
- 素粒子の「質量」は、ヒッグス場との相互作用の大きさで決まった。
- 例えば u クォークは  $3 \text{ (MeV/c}^2\text{)}$ , t クォークは  $10^5 \text{ (MeV/c}^2\text{)}$ , 光子は 0 (相互作用しない) という具合に。



# 陽子と中性子



陽子 (uud)



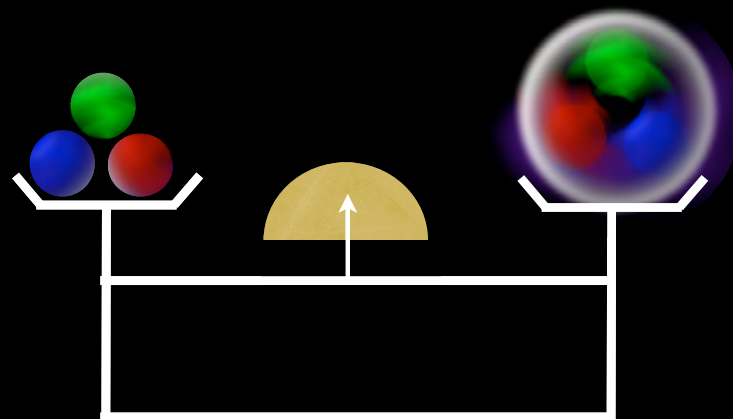
中性子 (udd)

質量 : 938.2 (MeV/c<sup>2</sup>)      質量 : 939.5 (MeV/c<sup>2</sup>)

- 陽子と中性子の質量差  $\sim$  u クォークと d クォークの質量差、ほんの数 (MeV/c<sup>2</sup>)



# 質量の獲得のなぞ



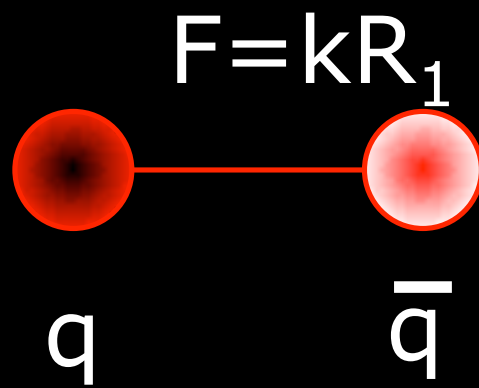
ヒッグス機構によって獲得された質量

=陽子の質量の1% にすぎない！

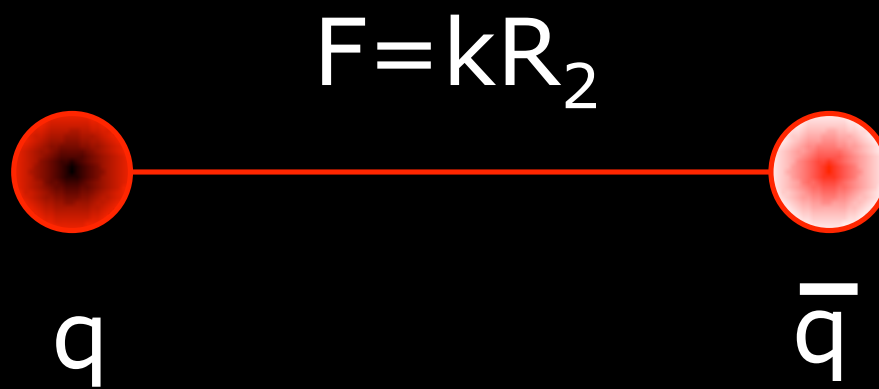
(木の玉を3つくっつけたら、鉄の玉になった)

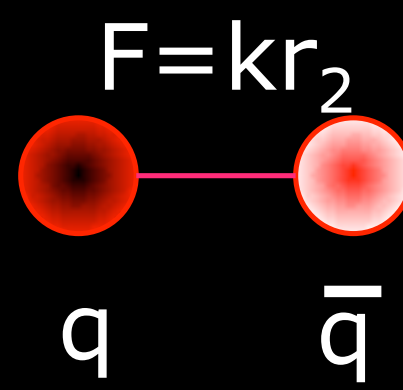
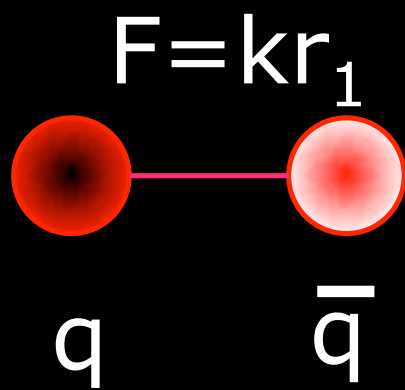
# 質量の源は？

- では残りの99%の陽子の質量は誰がになっているのか？
- まずは陽子を構成している素粒子、「クォーク」の間に働いている「強い相互作用」を考えてみよう。











## The Nobel Prize in Physics 2004

"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"



**David J. Gross**

🕒 1/3 of the prize

USA

University of California,  
Kavli Institute for  
Theoretical Physics  
Santa Barbara, CA, USA

b. 1941



**H. David Politzer**

🕒 1/3 of the prize

USA

California Institute of  
Technology (Caltech)  
Pasadena, CA, USA

b. 1949



**Frank Wilczek**

🕒 1/3 of the prize

USA

Massachusetts Institute  
of Technology (MIT)  
Cambridge, MA, USA

b. 1951



# 質問です. 重いバネはどっち？

A. 自然長のばね

B. 縮んだばね

◆ ヒント：「エネルギー」として考える。

◆ 「縮んだバネ」＝力学的エネルギーを蓄えた状態。

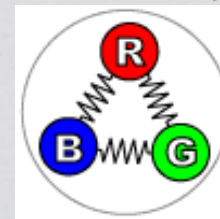
●  $E = mc^2$  : エネルギーと質量は等価。

● 従って「B. 縮んだバネ」の方が「重い」



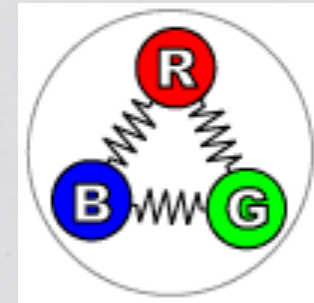
# 「強い相互作用」の不思議な性質

- \* クォークやその力の媒介粒子であるグルーオンは、決して単体では存在できない。
- \* 「クォークの閉じ込め」機構という。
- \* 強い相互作用の特徴は、近距離で弱い力、遠距離で強い力が働く。



## クォークの閉じ込めと「質量」

- \* 裸のクォーク自体がもつ質量は、陽子質量の1%程度だが、陽子がもつ「クォークの閉じ込め」のため、エネルギーが高い状態、すなわち質量が重くなっている、と考える事ができる。



- \* 実験的にどうやって確かめるか？



# 質量の謎を解き明かす

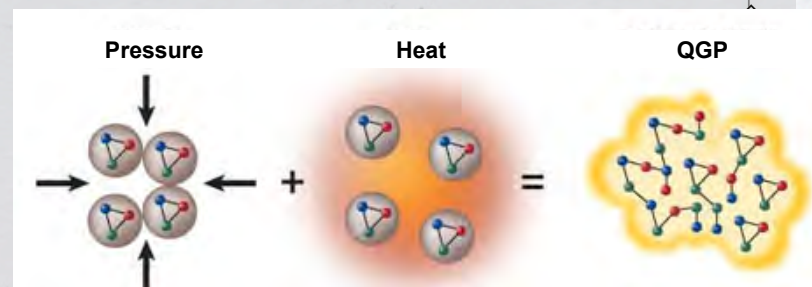
## ◆ \* ビッグバンの宇宙の初期状態にまで戻る

\* どれくらいまで戻るか→ビッグバンから  
1/1,000,000 秒後、温度は約 1 兆度

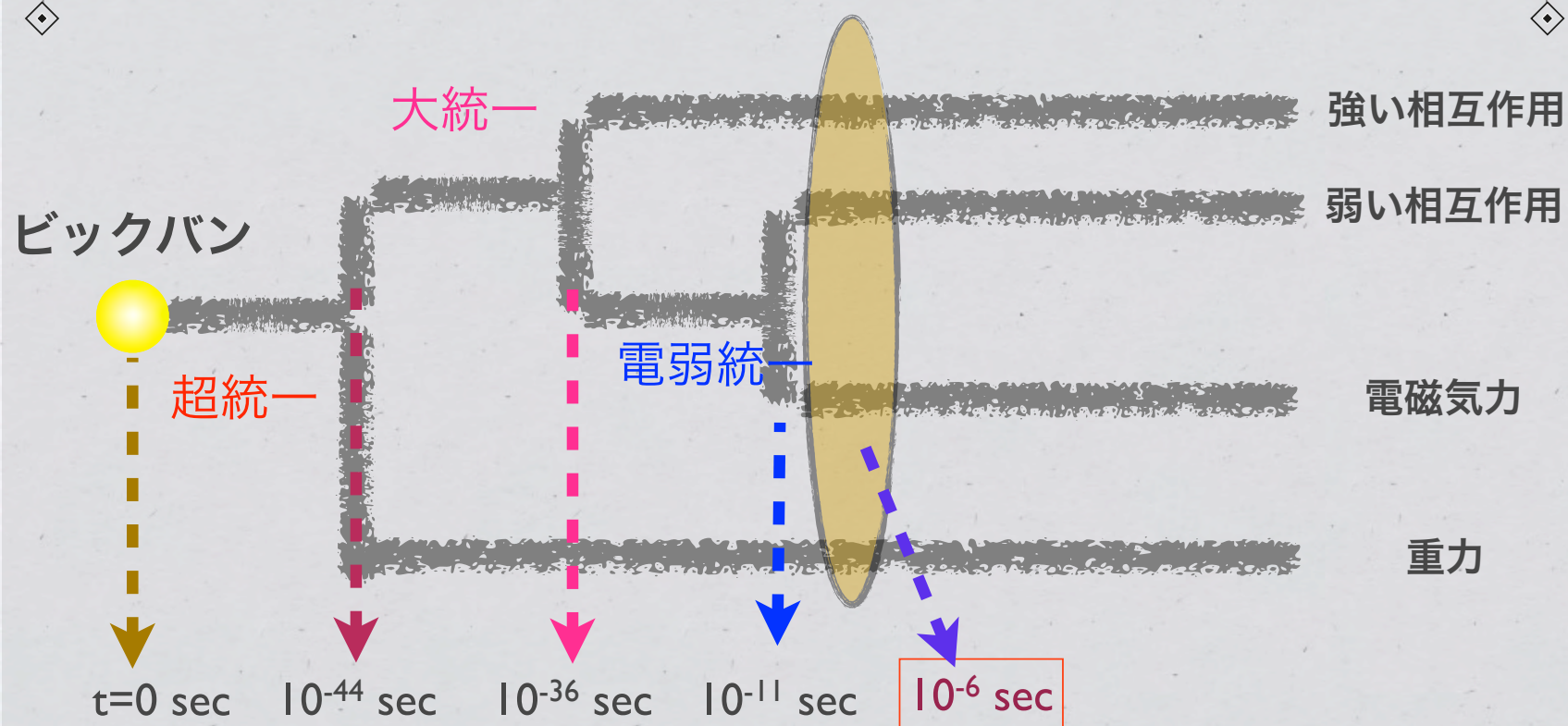
\* そこではクォークやグルーオンが閉じ込めを破り、自由な状態として存在している。

\* 残りの99%の質量は、クォークから陽子になる  
ところで生まれたから、この状態が分かれば、  
質量獲得の謎に迫れることになる。

\* この状態のことを「クォーク・グルーオンプラズマ」(QGP) という



# 宇宙の進化と4つの力

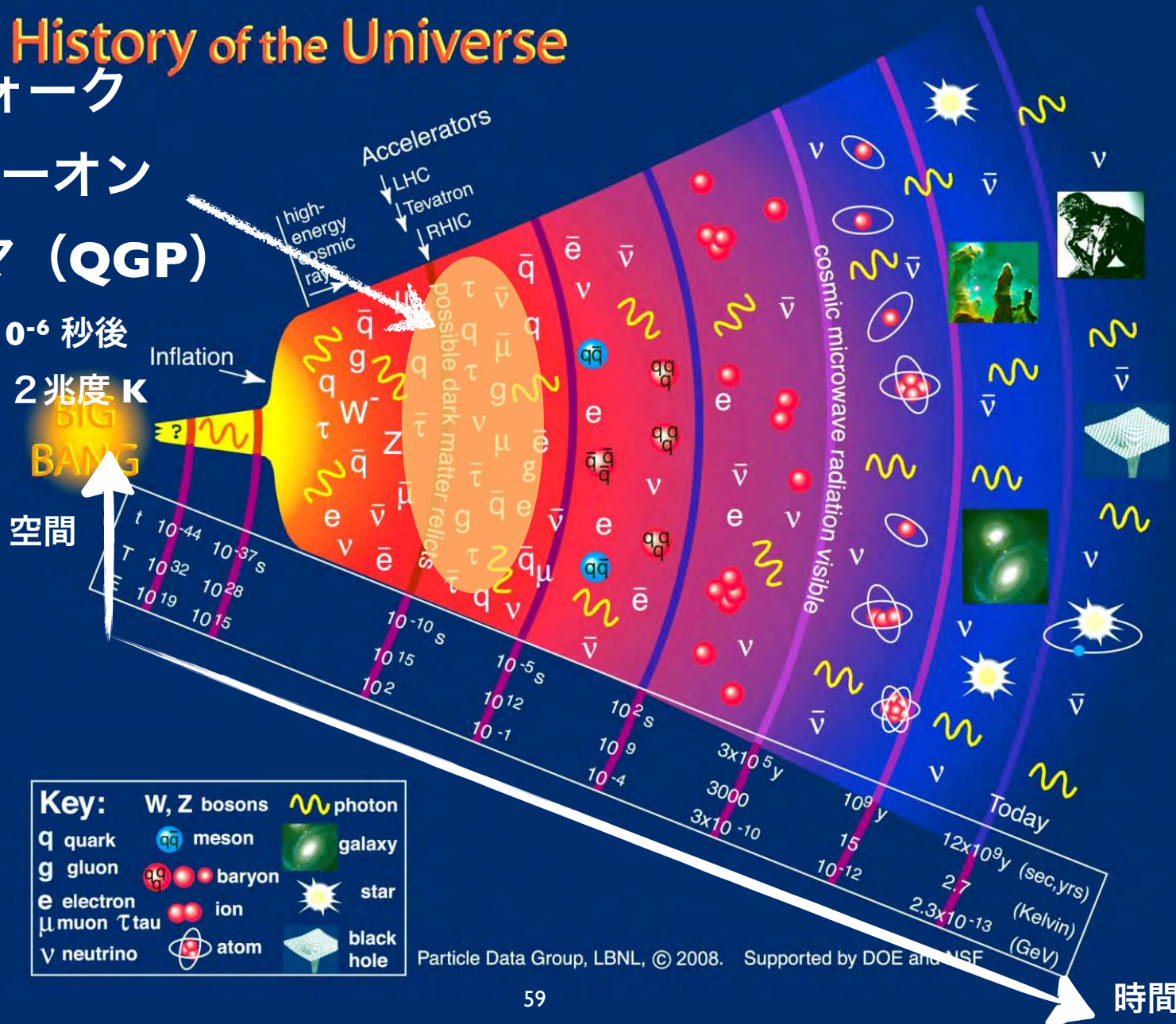




# History of the Universe

クォーク  
グルーオン  
プラズマ (QGP)

$t = 10^{-6}$  秒後  
温度: 2 兆度 K



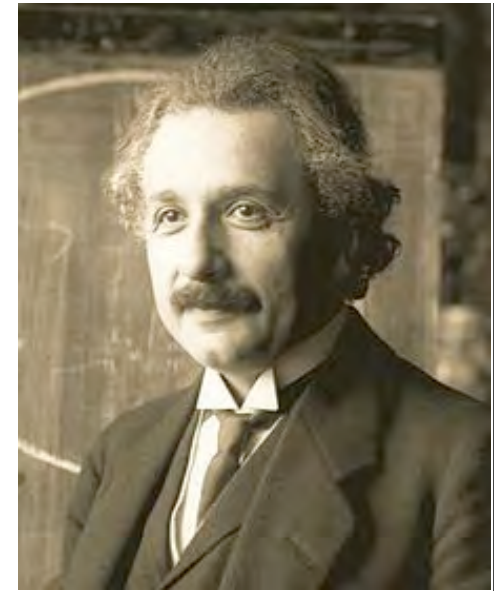
Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF



20分でわかる  
(特殊) 相対性理論  
の考え方

# 奇跡の年（1905年）

- アルバート・アインシュタイン  
(1878-1955)、26歳の年
- 1905年3月：光量子仮説（光電効果、ノーベル賞の受賞理由）
- 1905年4月：分子の大きさの新しい決定方法（博士学位論文）
- 1905年5月：ブラウン運動の理論
- 1905年6月：特殊相対性理論「運動している物体の電気力学」
- 1905年9月：「 $E = mc^2$ 」の論文
- (1916年 一般相対性理論)



# 特殊相対性理論とは？

- 「特殊」：等速直線運動をしている系のみで成り立つ
- ⇔一般相対性理論「重力の理論」
- 「相対性」：空間や時間は絶対的なものではなく、立場によって変わりうる相対的なものである、  
という「理論」

**特殊相対性理論＝光の理論**



# 速度の合成：車の例

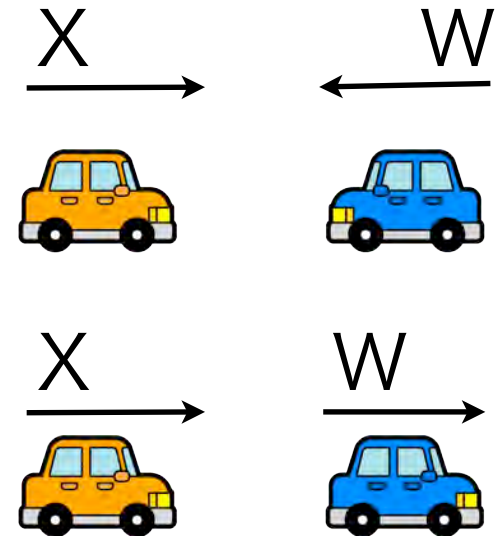
- 近づいてくる車は早く見える

◆  $V = X + W$

- 後ろからくる車は遅く見える

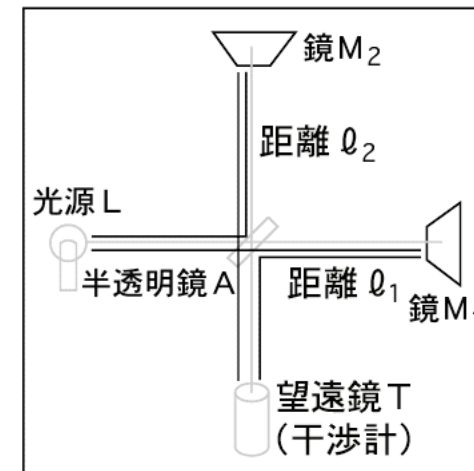
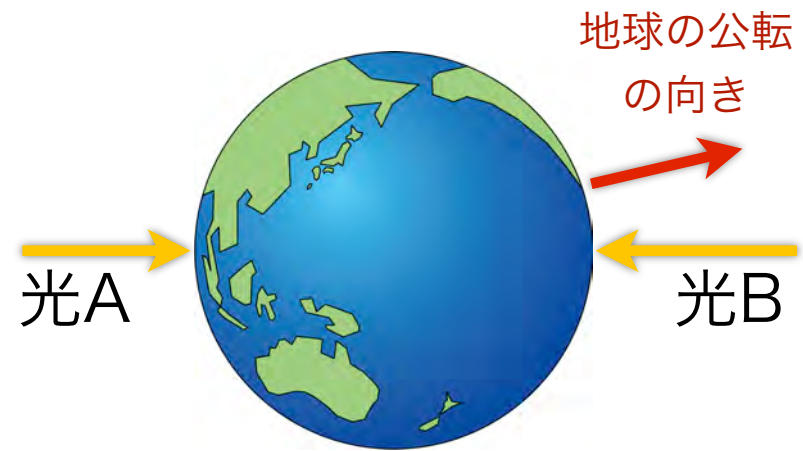
◆  $V = X - W$

- では、光の場合はどうだろうか？



# マイケルソン・モーレの実験

- 光にも車と同様に、速度合成則がなりたつならば、Aの光とBの光の速度に違いが見えるはずだ。
- なぜなら、地球は太陽の周りを猛スピード (約 30 km/s) で公転しているから。

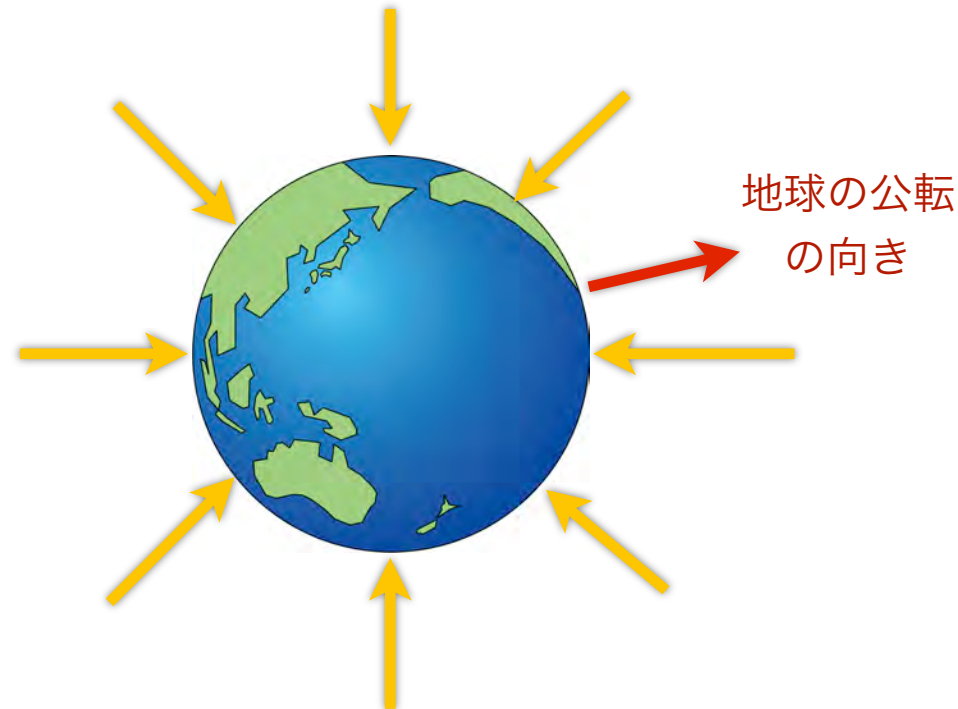


マイケルソン干渉計

<http://homepage2.nifty.com/einstein/contents/relativity/contents/column2.html>

# 実験事実

- 様々な実験を行った結果、どの方向からきても、光速は常に一定。
- 秒速 30 万 km で不変である。





# アインシュタインの考え方

それならば、光の速度は変わらないという  
**実験事実**を受け止めよう。



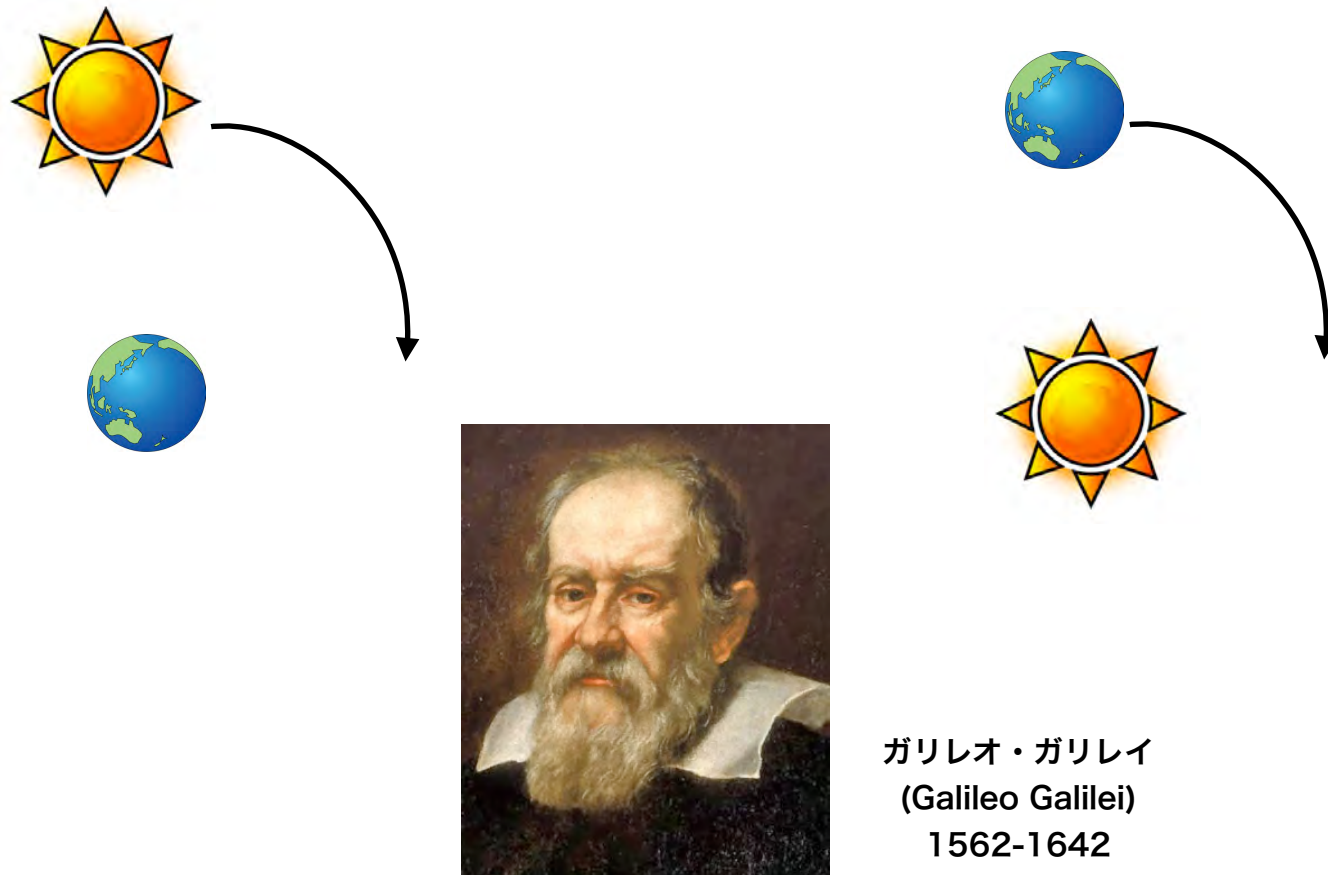
# 特殊相対性理論

## 2つの柱

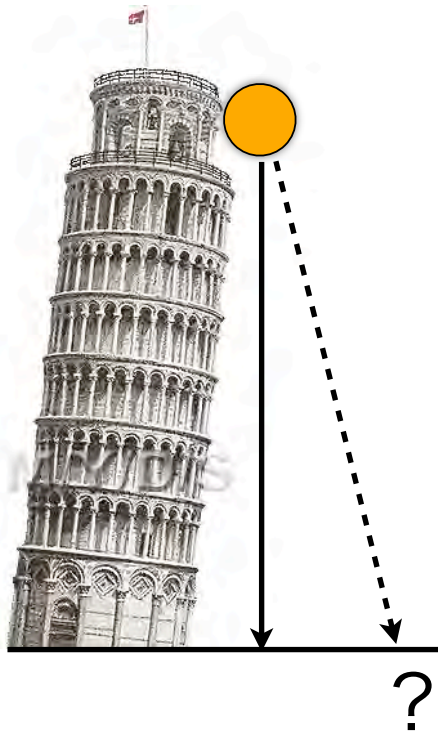
- その1：光の速さは誰からみても変わらない「光速不変の原理」
- その2：等速直線運動をしている系で、物理法則は変わらない「相対性原理」

# 相対性とは？

- ・ 天動説と地動説の論争（17世紀）







## 天動説派の主張：

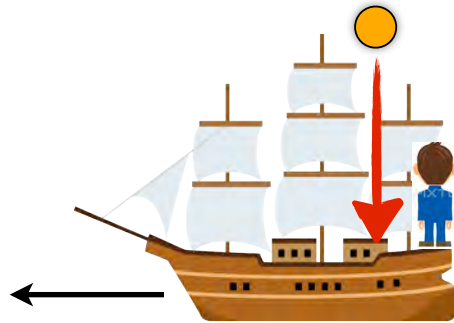
もし地球が動いているのなら、  
玉を塔から落として、真下に落ちる  
のはおかしい。地球が公転してして  
いるのなら、ずれて落ちるはずだ！

地動説はおかしいよ。

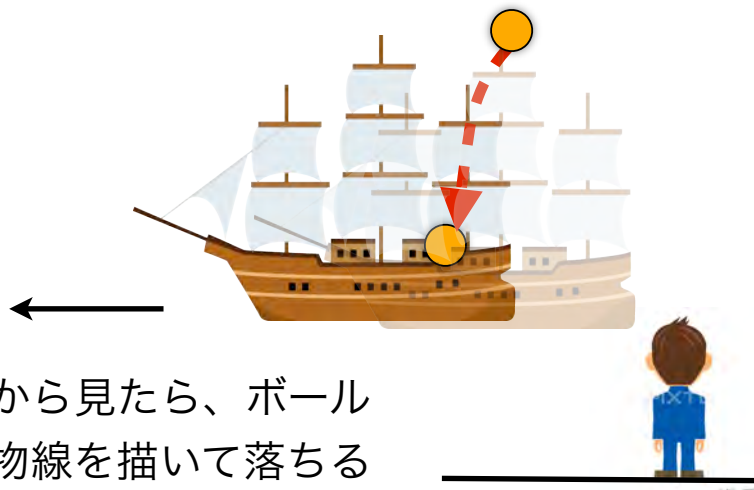


## ガリレオの主張

- ・ いやいや、動いている船のマストから玉を落として見なさい。
- ・ 船の上から見ている人は、玉は真下に落ちます。
- ・ 一方、陸の人は玉は放物線を描いて落ちます。
- ・ だから玉が真下に落ちないのは、地球が動いていないという証拠にはなりませんよ。

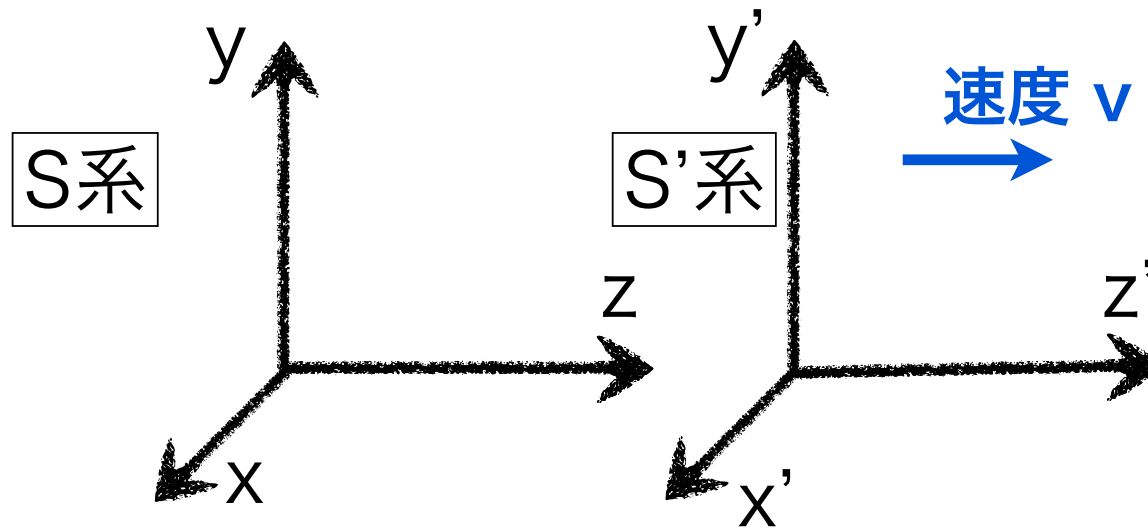


動いている船の上から見たら  
ボールはまっすぐ落ちる



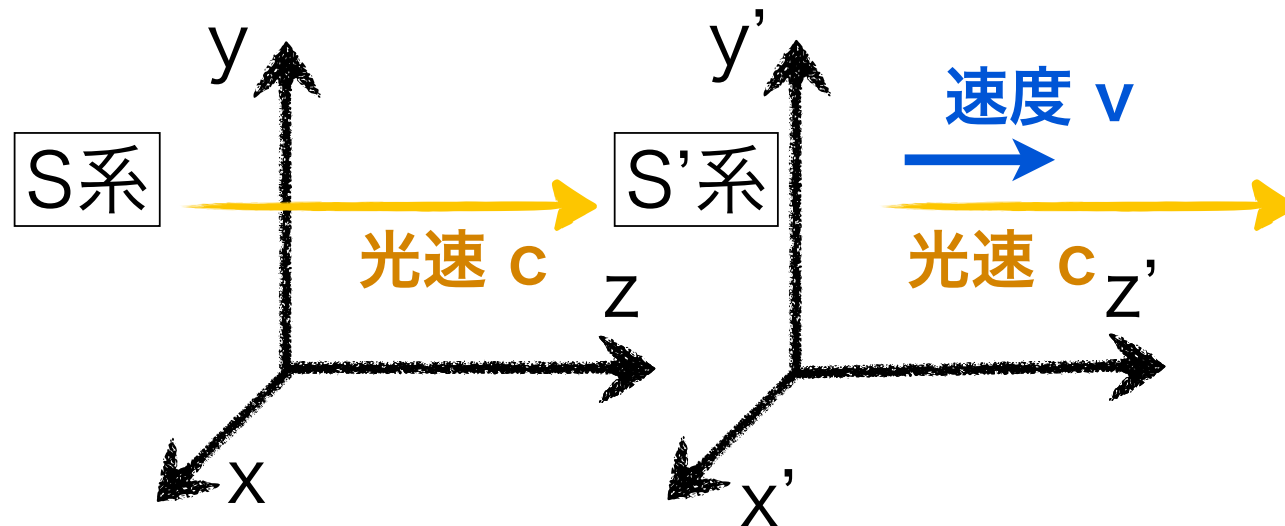
陸から見たら、ボール  
放物線を描いて落ちる

# ガリレイの相対性理論と アインシュタインの相対性理論



- 17世紀、ガリレイは、物体の運動法則は慣性系で不変だとした。
- 慣性系とは互いに等速直線運動をしている系のこと。

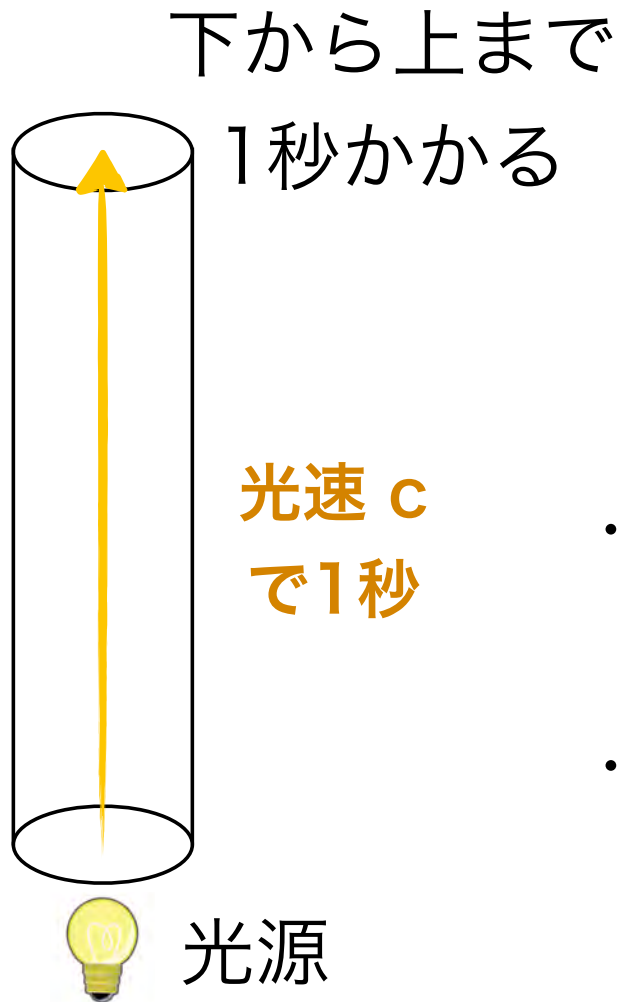
# ガリレイの相対性理論と アインシュタインの相対性理論



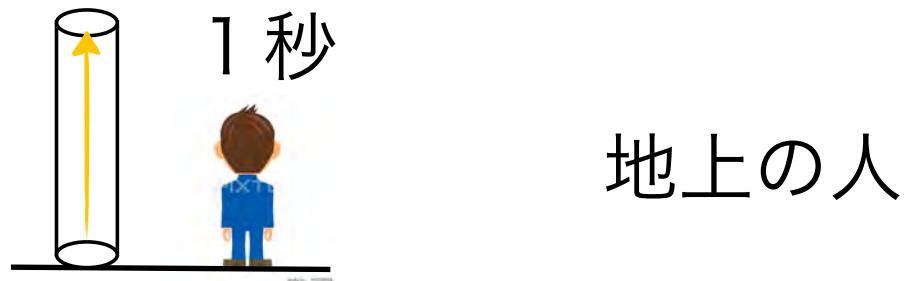
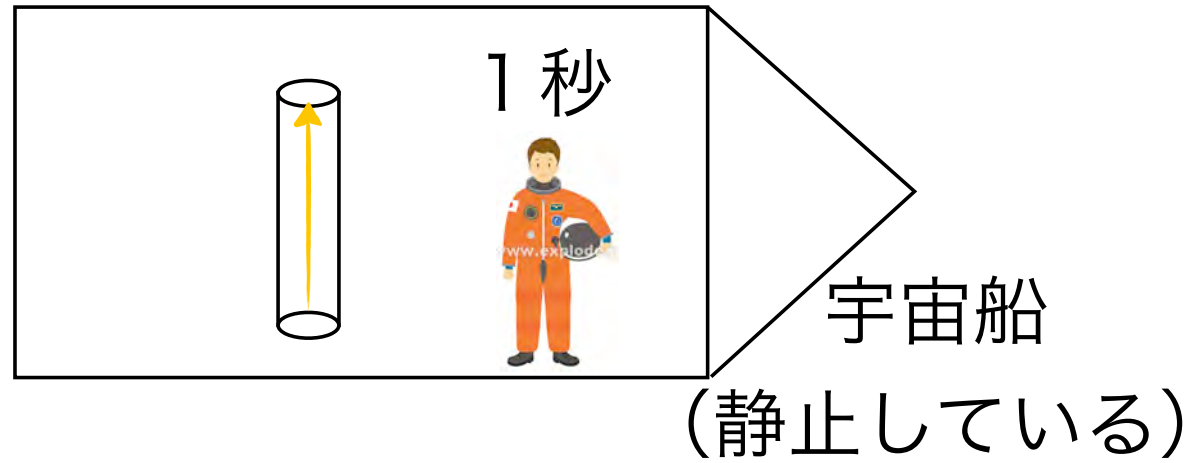
- アインシュタインは20世紀はじめ、これを光に応用した
- 動いていても静止していても「光の物理法則」は変わらないとして物理法則を再構築
- (しかし、これを受け入れると、時間や空間が絶対ではなくなってしまう...)

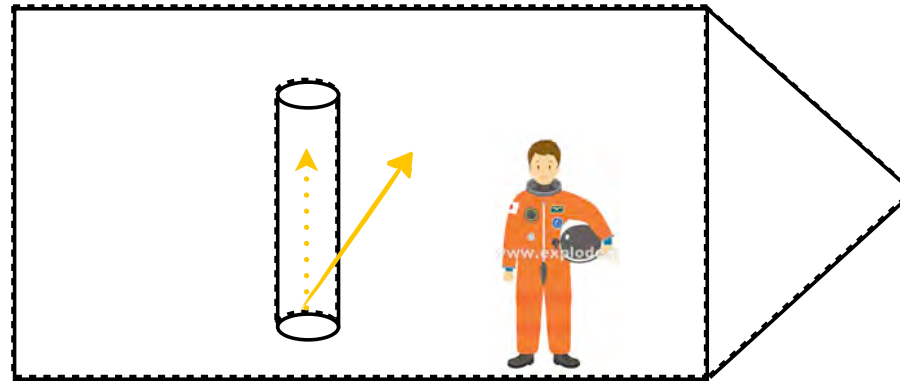


# 光時計

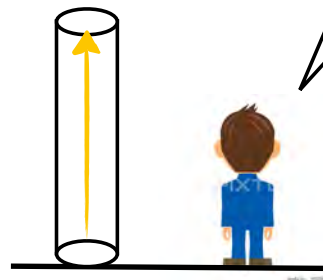


- 円柱の下に光源があり、光が発せられてから、ちょうど1秒で円筒の上まで届く、「光時計」を考える。
- 1秒＝光が上から下まで走るまでの時間



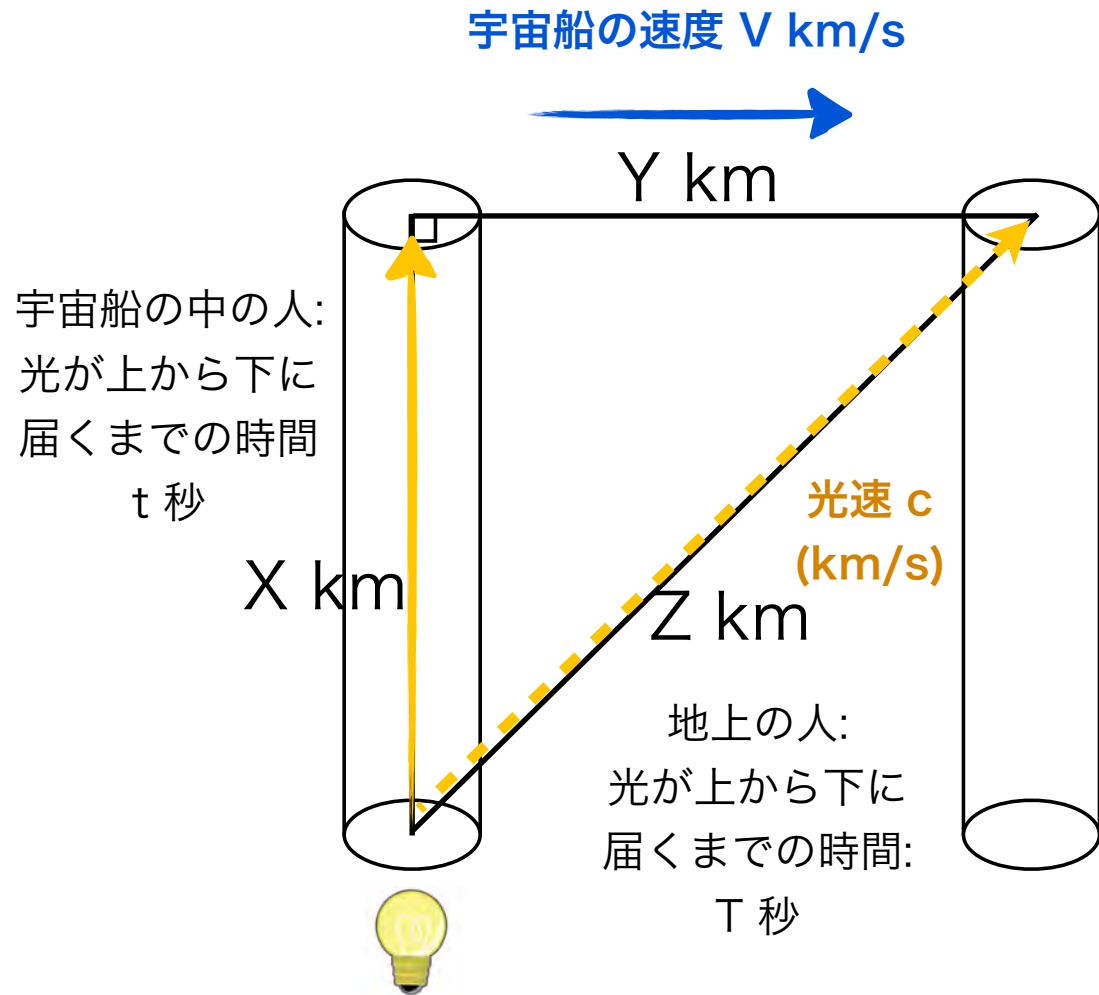


光の速度はどこでも一定.  
宇宙船が動いている分、光は斜めに進む。  
**斜めに進んだ分、進むべき距離が伸びて、  
地上が1秒でも光が上に到達していない**



あっ、ロケットの中の  
時間が遅れているよ！

地上の人が動いてる  
宇宙線を見た場合



- ・ 地上から宇宙船の光時計を見た場合、光が斜めに進む分、光が上に到着するまでに時間がかかる

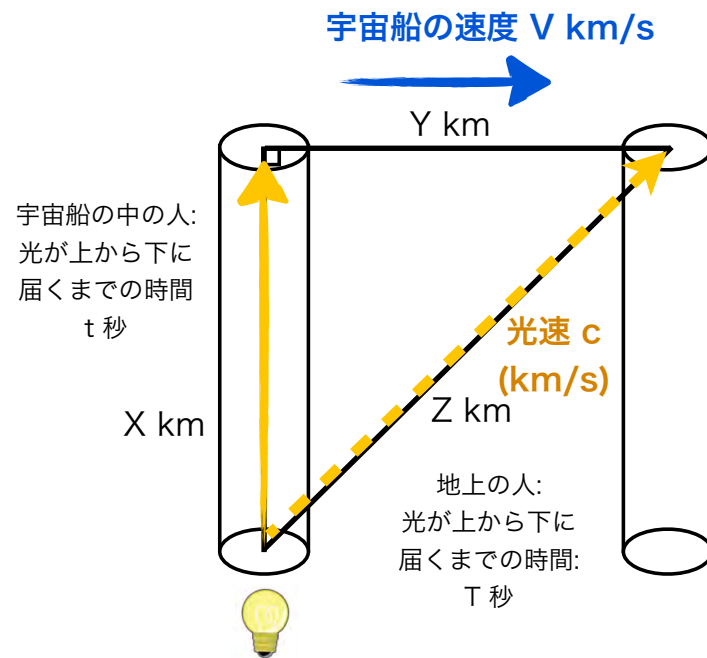
- ・  $T > t$

これが時間遅れ。  
 $T$  と  $t$  の関係を求めれば、時間の遅れが計算できる

地上の人から見た宇宙船の  
光時計の様子



# 実際に計算してみよう！



光は  $X$  km,  $Z$  kmを同じ速度でそれぞれ時間  $t$  秒,  $T$  秒 かけて進む  
距離の比と時間の比より

$$\frac{X}{Z} = \frac{t}{T} \quad \dots\dots ①$$

一方、光が光速  $c$  で  $Z$  進む間に、光時計は速度  $V$  で  $Y$  km 進むので、

$$\frac{Y}{Z} = \frac{V}{c} \quad \dots\dots ②$$

ピタゴラスの定理より

$$X^2 + Y^2 = Z^2$$

両辺  $Z^2$  割る

$$\left(\frac{X}{Z}\right)^2 + \left(\frac{Y}{Z}\right)^2 = 1$$

移項

$$\left(\frac{X}{Z}\right)^2 = 1 - \left(\frac{Y}{Z}\right)^2$$

平方根をとる

$$\left(\frac{X}{Z}\right) = \sqrt{1 - \left(\frac{Y}{Z}\right)^2}$$

①、②の関係を代入

$$\left(\frac{t}{T}\right) = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$$

$T$  を移項して

$$t = T \times \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$$

# 時間の遅れ

動いているものの  
速度

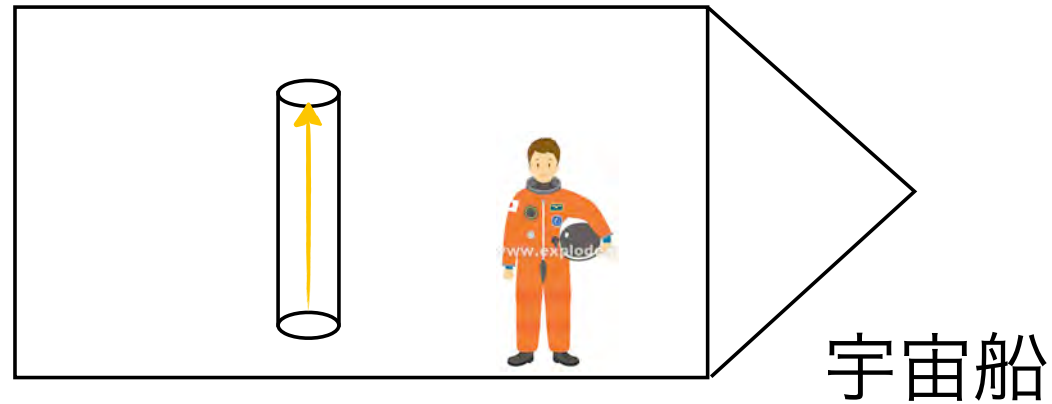
$$t = T \times \sqrt{1 - \left( \frac{V}{c} \right)^2}$$

宇宙船（動いているもの）  
の時間

地上（止まっているもの）  
の時間

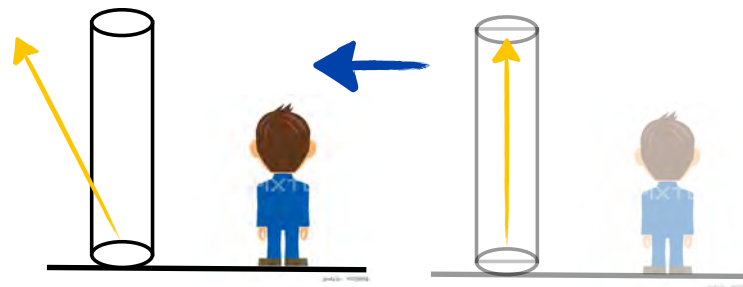
光速

The diagram illustrates the time dilation formula. It features the equation  $t = T \times \sqrt{1 - \left( \frac{V}{c} \right)^2}$  with several labels and arrows. The variable  $t$  is circled in yellow and labeled '宇宙船（動いているもの）の時間' (Time of the spaceship (moving object)). The variable  $T$  is also circled in yellow and labeled '地上（止まっているもの）の時間' (Time on the ground (stationary object)). The variable  $V$  is circled in yellow and labeled '動いているものの速度' (Speed of the moving object). The variable  $c$  is circled in yellow and labeled '光速' (Speed of light). The entire equation is set against a light gray rectangular background.



実は、その逆同様になりたつ。  
すなわち、宇宙船の人からみたら、地上の人は（相対的に）  
動いているので、地上に人の時計が遅れて見える。

**相手の時計が互いに遅れて見える！**

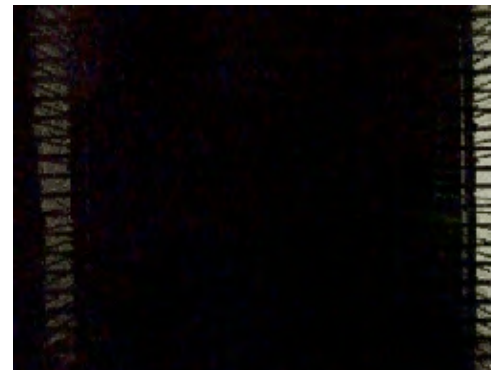
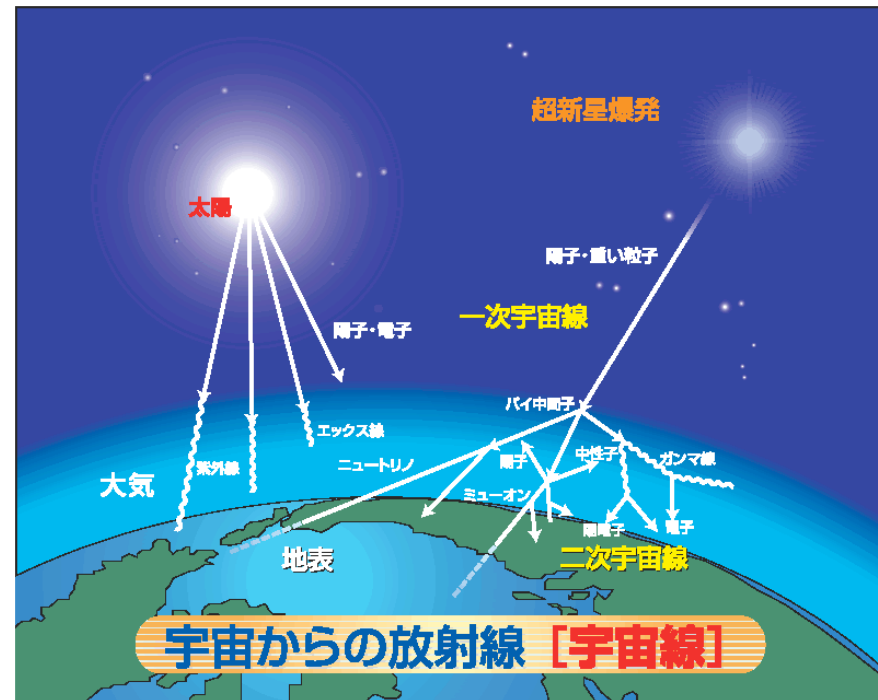


地上の人  
（相対的に）  
動いている

# 時間が実際に遅れている証拠

## • ミューオンの崩壊現象

- 宇宙から地球場にはたくさんの宇宙船（陽子など）が降り注いでいる。
- 宇宙船が大気中の窒素と反応、ミューオンを生成。
- （静止）ミューオンは短い寿命（ $100 \mu\text{秒}$ ）で崩壊し、他の粒子になるので、地上にたどり着くミューオンは計算上、10億分の1。
- 1936年、地上でミューオンが多数発見される。
- 光速に近いミューオンの寿命が伸びて、崩壊する前に地上に到達した



スパークチェンバーで見た  
宇宙線 (KEK ホームページ  
より)

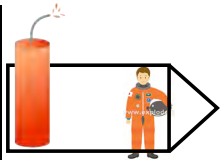


# 時限爆弾ロケット

1 年後に爆発する  
時限爆弾を搭載したロケット



小惑星



距離：1 光年 (= L)  
(光が1 年で進む距離)



地球

時限爆弾の解除装置がある

- ロケットは1 年後に爆発する時限爆弾を積んだまま、小惑星を出発し、1 光年先にある地球（解除装置あり）に向けて発進した。
- ロケットの速度は光速の80%とする。
- 果たして、ロケットは爆発せずに地球までたどり着けるか？

- 先ほどの式を使って、地球の人からみた、ロケットの中の時間の遅れを計算する。

$$\begin{aligned} t &= T \times \sqrt{1 - (v/c)^2} = T \times \sqrt{1 - (0.8)^2} \\ &= T \times \sqrt{1 - 0.64} = T \times \sqrt{0.36} = 0.6T \end{aligned}$$

ロケットの時間は地上の時間より  
0.6 倍（ゆっくり）進んだので、  
時限爆弾は爆発せずに、ロケット  
は地球まで無事たどり着けた。

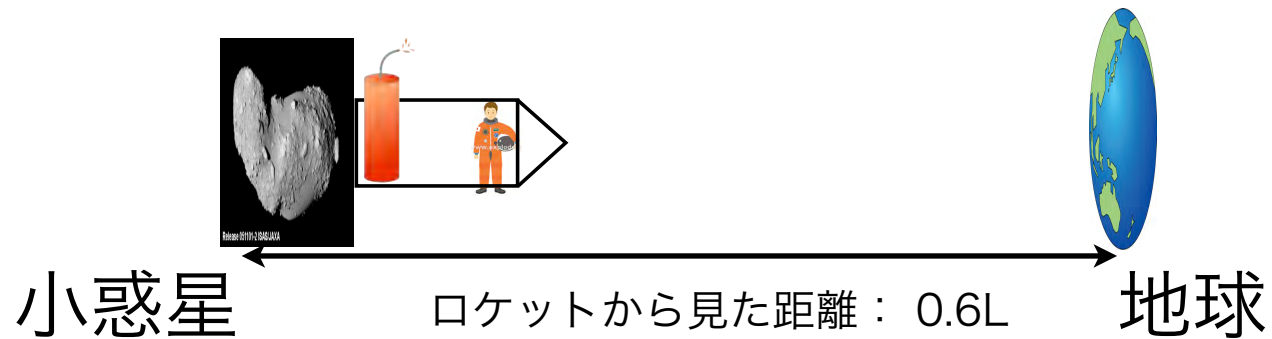
今度は距離を考えてみる

$c = 30$  万 km/s の光速は常に誰から見ても一定。

ということは...

$$c \text{ (速度)} = (\text{距離}) / (\text{時間}) = \text{一定}$$
$$c = \textcolor{red}{(0.6L)} / (0.6T) \text{ でないといけない。}$$

時間と同様に、動いている物体は、止まっている人（地球）から見ると、長さ（空間）が縮んで見える。（＝「ローレンツ収縮」）

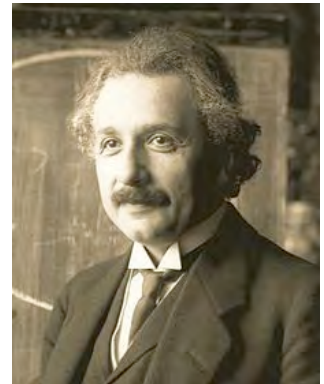


逆に地球からロケットを見ると...



# 特殊相対論のまとめ

- 特殊相対性理論とは、光速度不変の原理と光に対する運動法則はどの慣性系からみても変わらない、という原則をもとに再構築された理論体系。
- これを認めると、時間は縮み、空間も縮む。
- 空間と時間は絶対ではない。





---

## 4. 実験で「クォークスープ」 をつくる

---

ビッグバンから  $t = 10^{-6} \sim 10^{-4}$  秒後の世界

(1/100万  $\sim$  1/10,000 秒後)



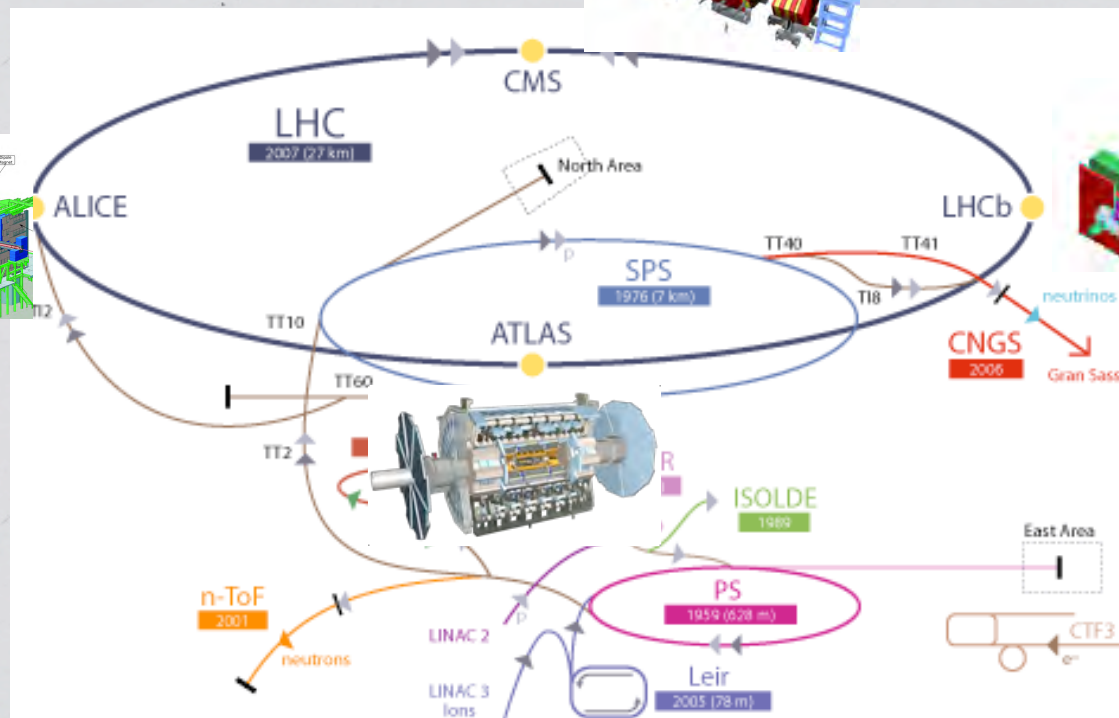
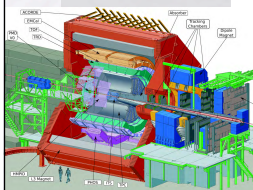
# LHC (Large Hadron Collider)

## 2009-



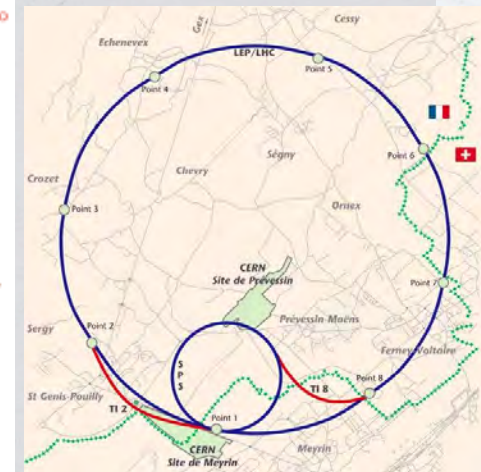


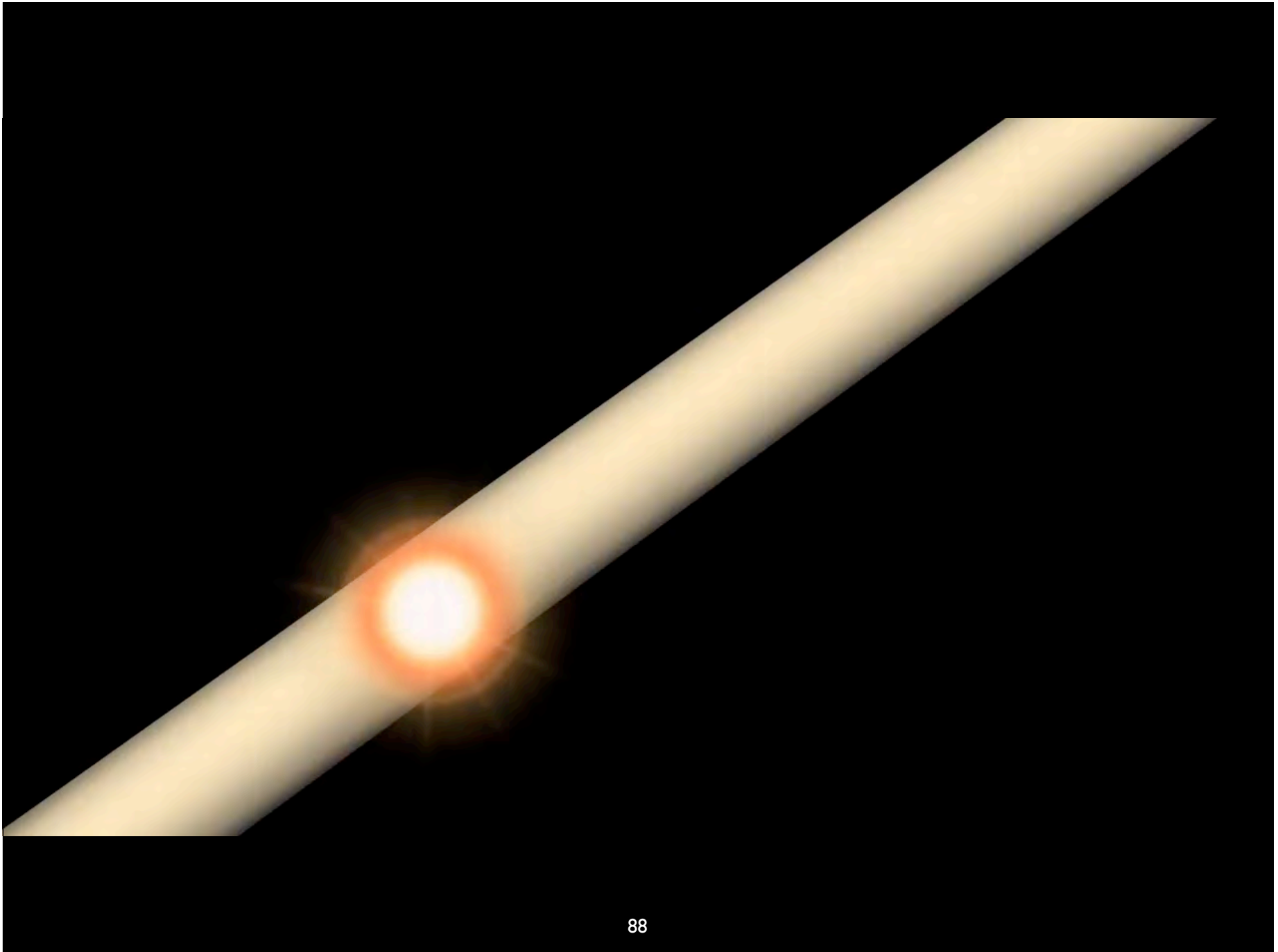
# CERN 加速器施設



▶ p (proton) ▶ ion ▶ neutrons ▶  $\bar{p}$  (antiproton) ▶ neutrinos ▶ electron  
 ↔ proton/antiproton conversion

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron  
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility  
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice  
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEar ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight





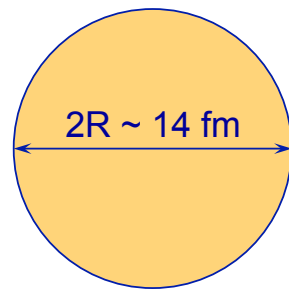


何か1つ、おかしいことに  
気づきませんでしたか？

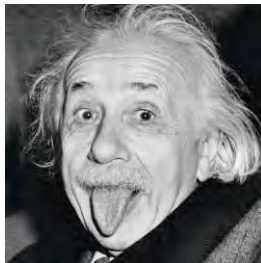
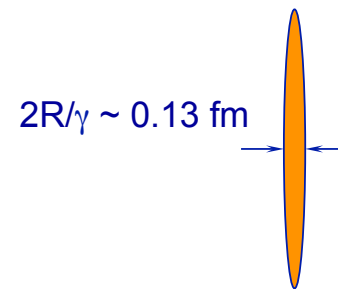
光速に近い加速粒子を地上から観測し  
ているのに、加速粒子が球形だった！

# 光速の 99.7 % で加速された物体を地上からみると

静止している物体



高速で移動している物体

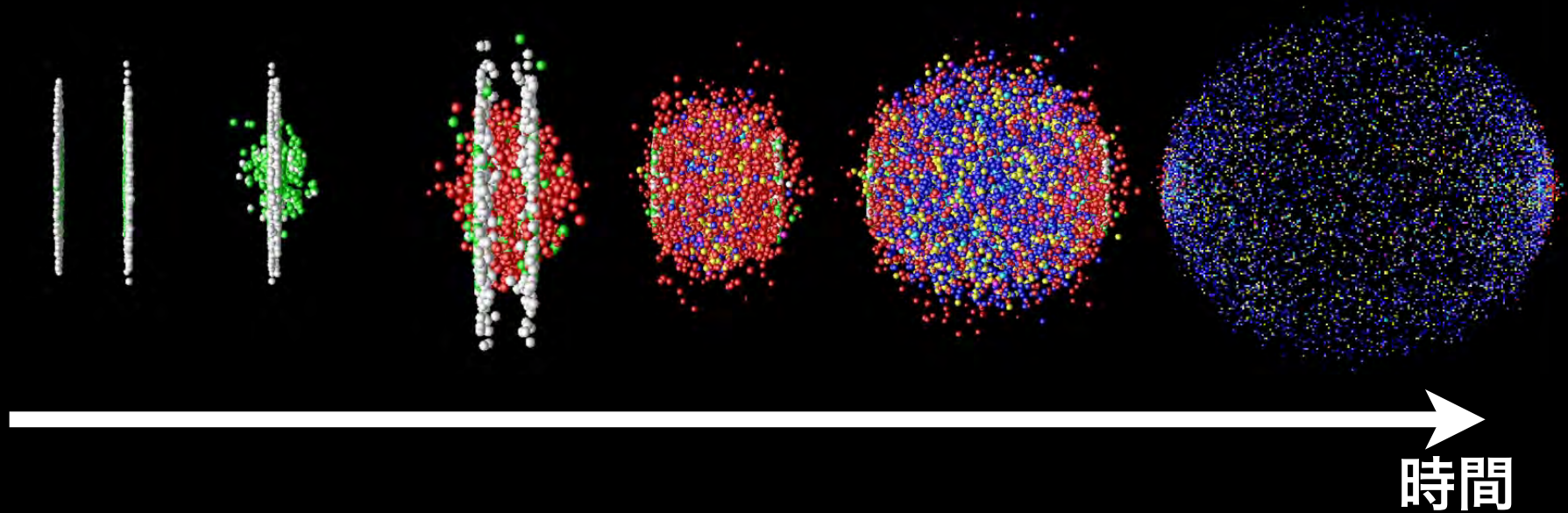


$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



$t = -19.800$

(1) 衝突前 (2) 衝突直後 (3) パートン散乱 (4) QGP生成 (5) ハドロン生成 (6) 膨張とともに終状態へ





# 復習

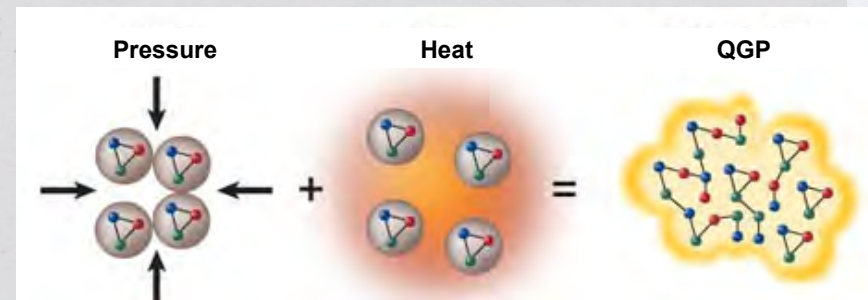
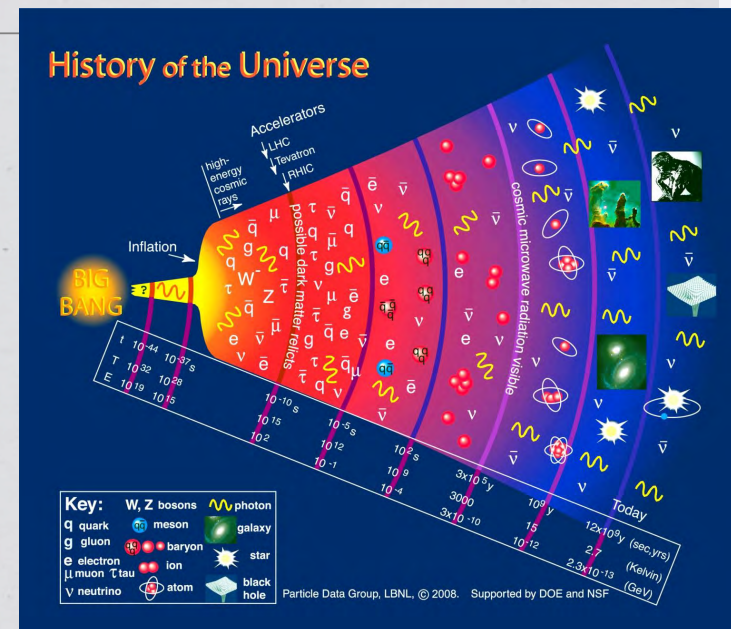
## \* ビッグバンの宇宙の初期状態に戻る

\* ビッグバンから  $1/1,000,000$  秒 ( $10^{-6}$  秒後 = 1 マイクロ秒) 後

\* そのときの宇宙の温度は約 1 兆度

\* 質量獲得の謎 (99%の質量は、クォークから陽子、中性子になるときに生まれている)

\* そこではクォークやグルーオンが閉じ込めを破り、自由な状態、「クォーク・グルーオンプラズマ」(QGP) が存在している

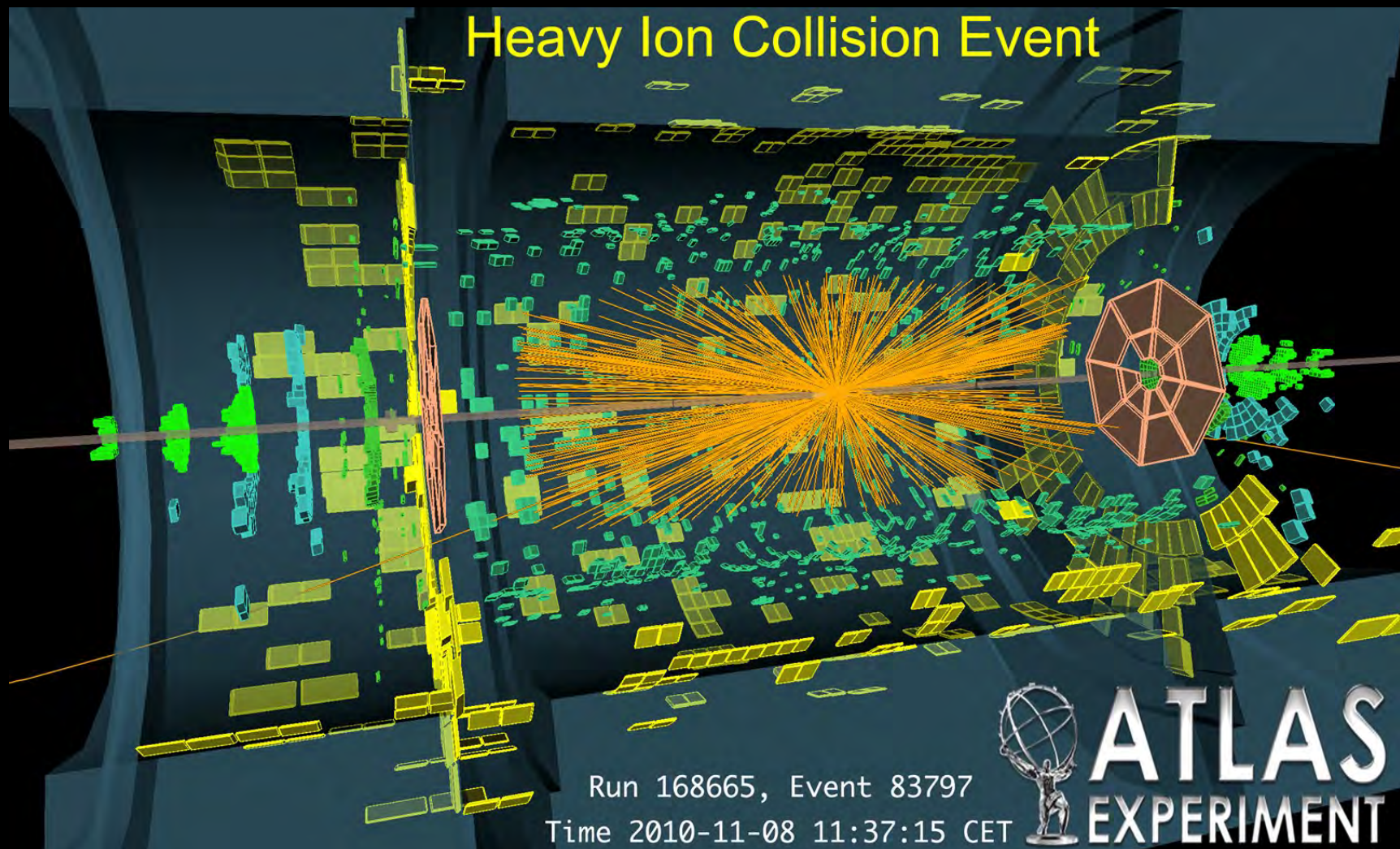


# 超高温度を再現する

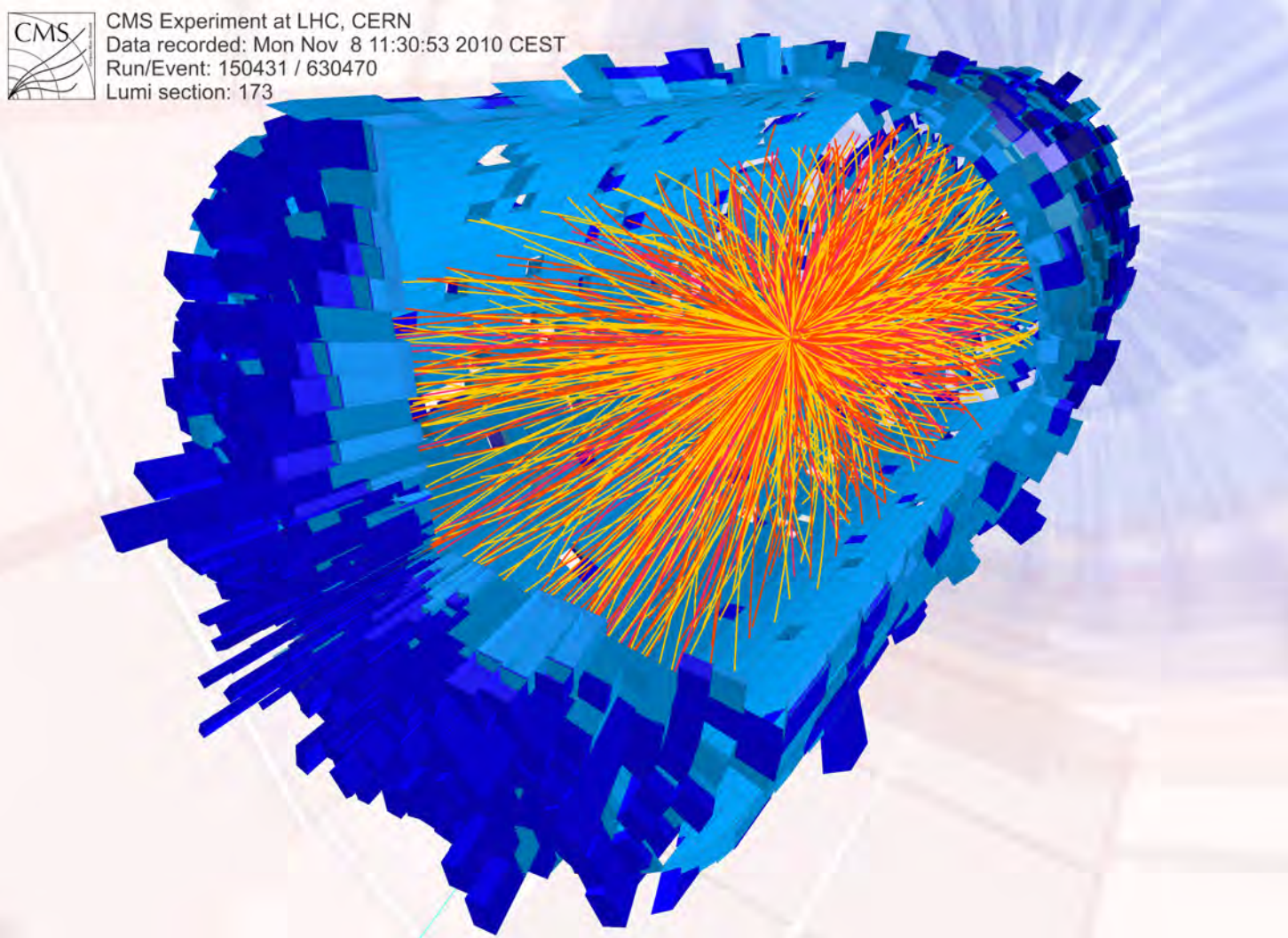
- \* 高エネルギーの加速器を利用する
- \* 加速器の運動エネルギーを「熱エネルギー」に変換
- \* → 粒子生成に使われる



# ATLAS 国際共同実験 (CERN)

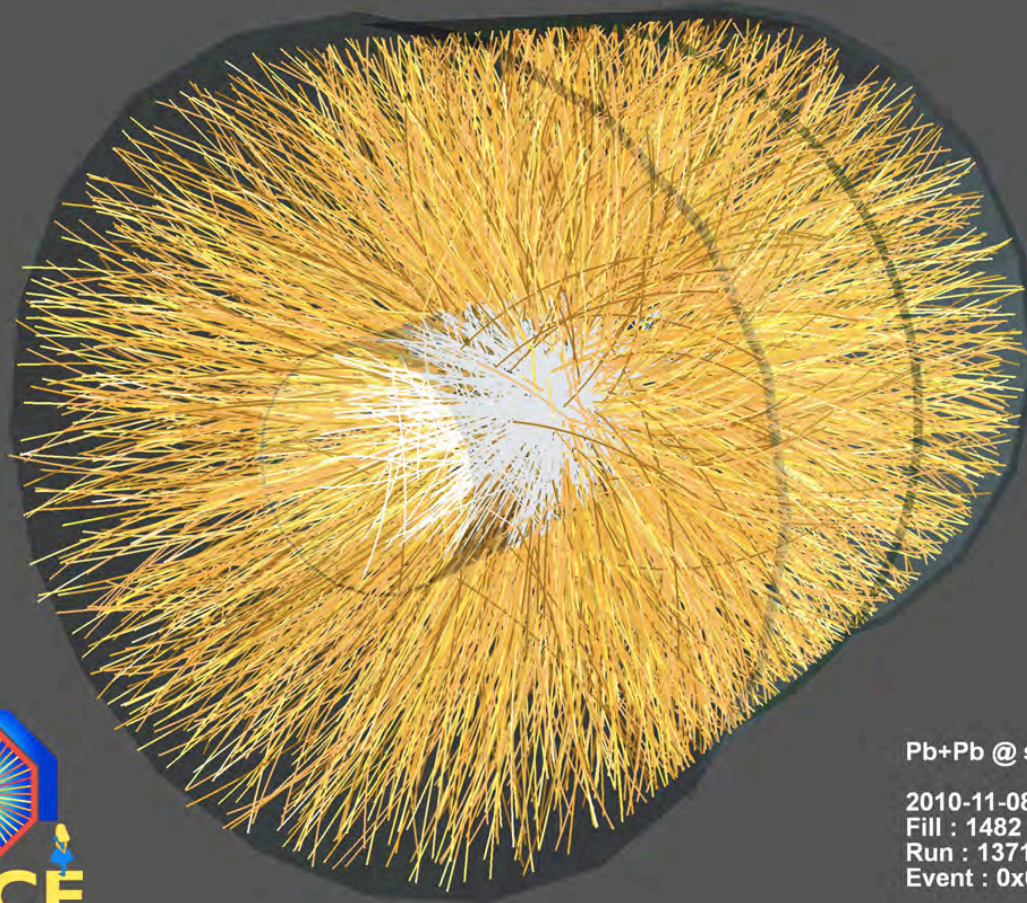


# CMS 国際共同実験 (CERN)





# ALICE 国際共同実験 (CERN)



Pb+Pb @  $\sqrt{s} = 2.76$  ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693







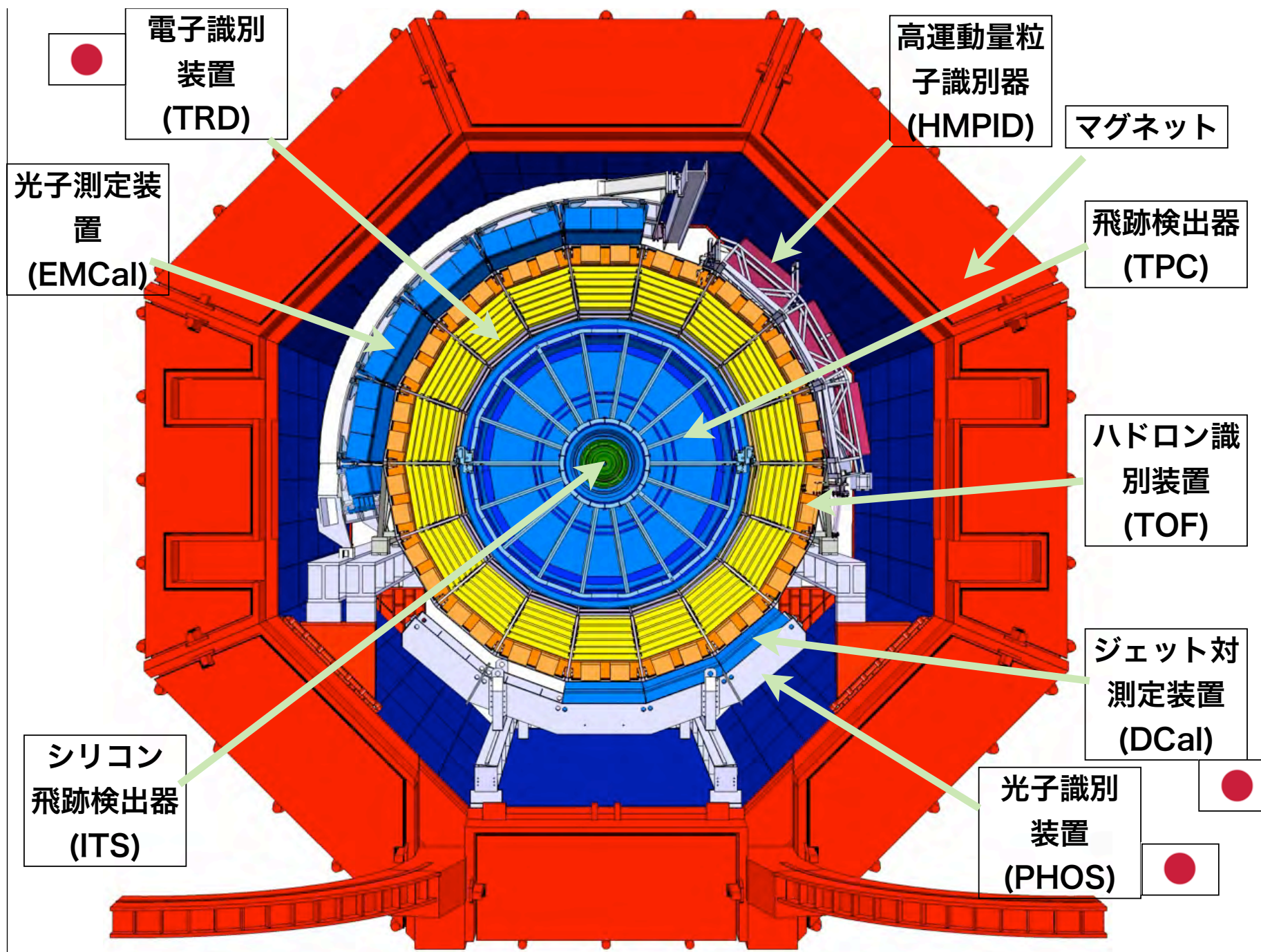




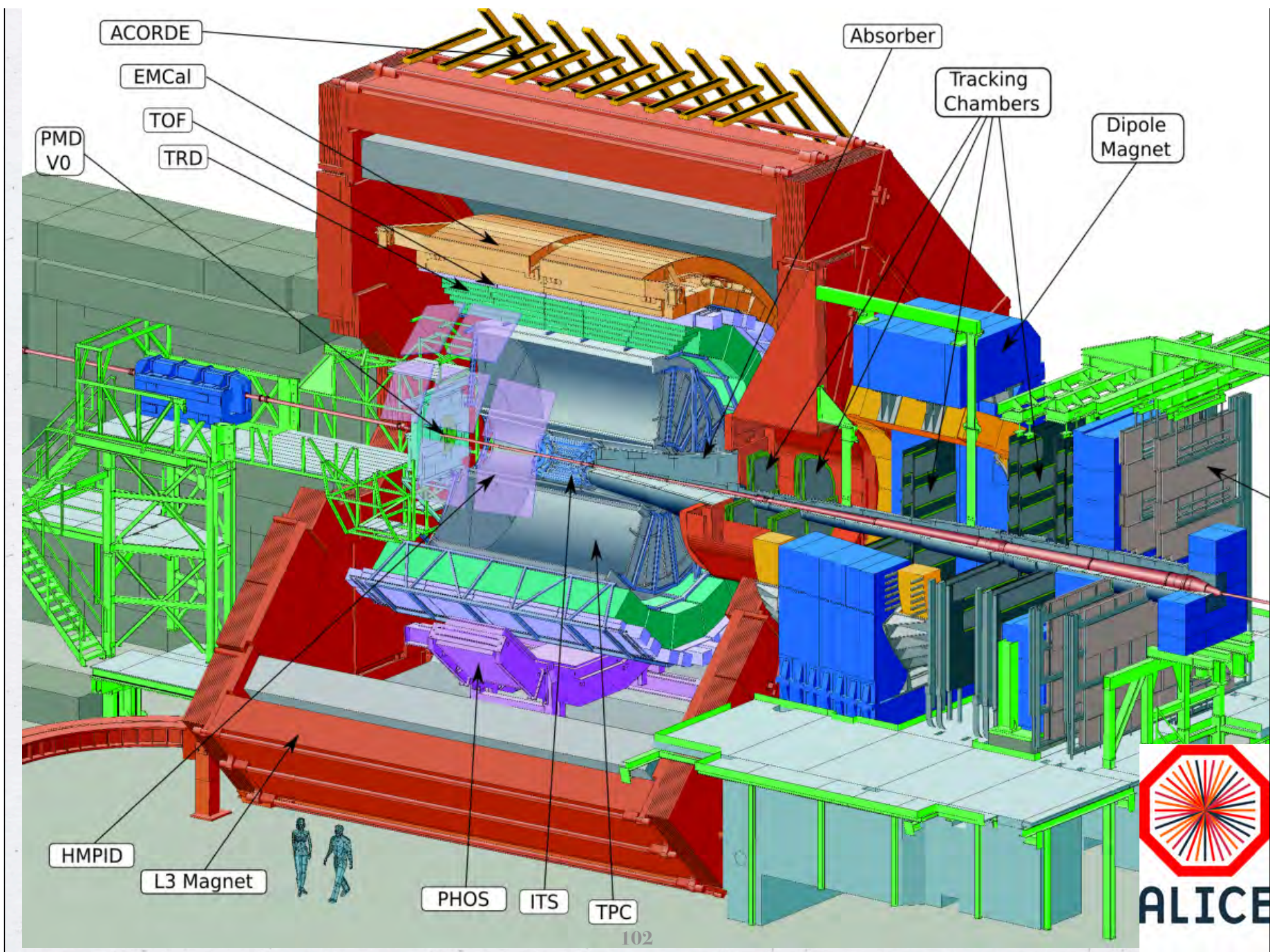
## ALICEコントロール ルームの様子









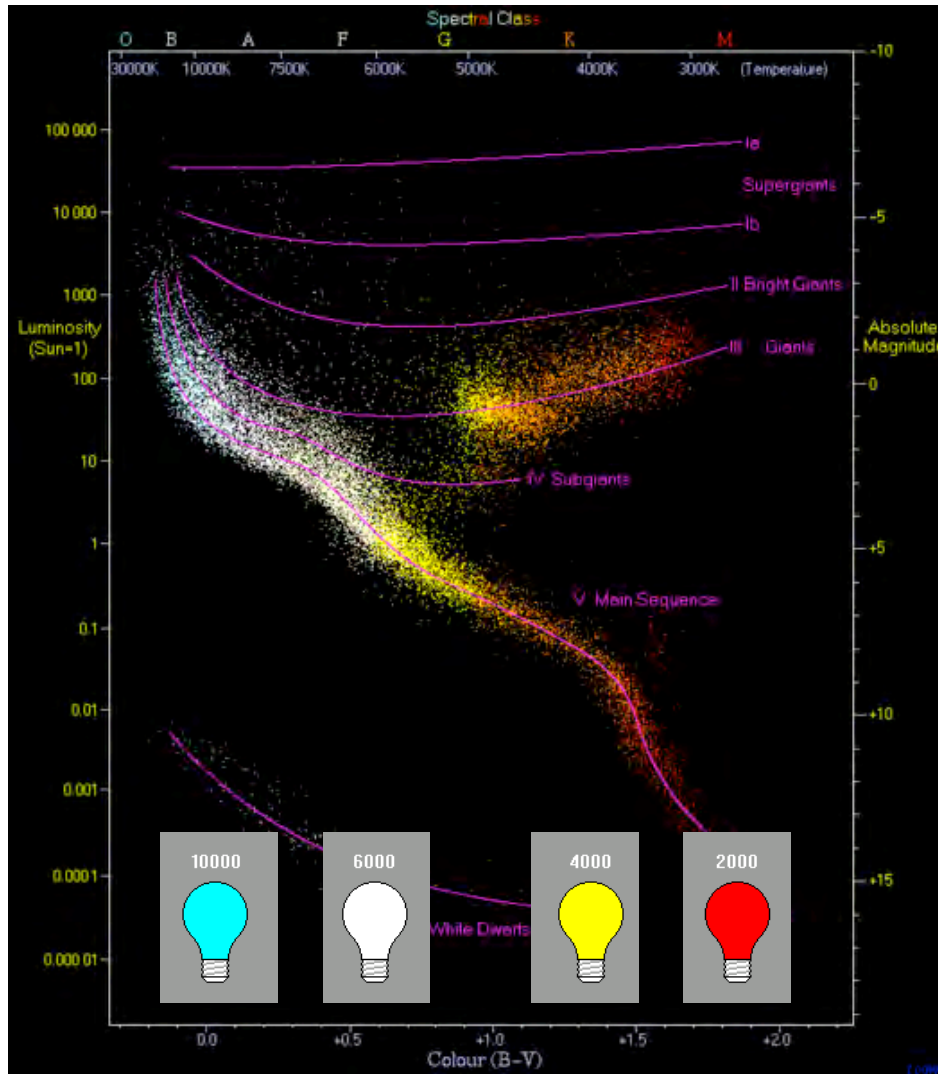


# QGPの温度を測るには？

- QGPの温度は数兆 K にも達するので、普通の温度計では無理。
- **光を使う**
- 光は物質と「強い相互作用」をしないので、周りの物質の影響を受けずに、衝突初期の情報を持ったまま、出てくる。
- 光子のエネルギー分布から温度が分かる。

# 星の温度

絶対輝度



- HR図（星の波長と明るさの関係）
- 星の色と表面温度
- 青白い星の温度（シリウス） > 赤い星の温度（アンタレス）
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell\\_diagram](http://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell_diagram)

星の色  
(波長)

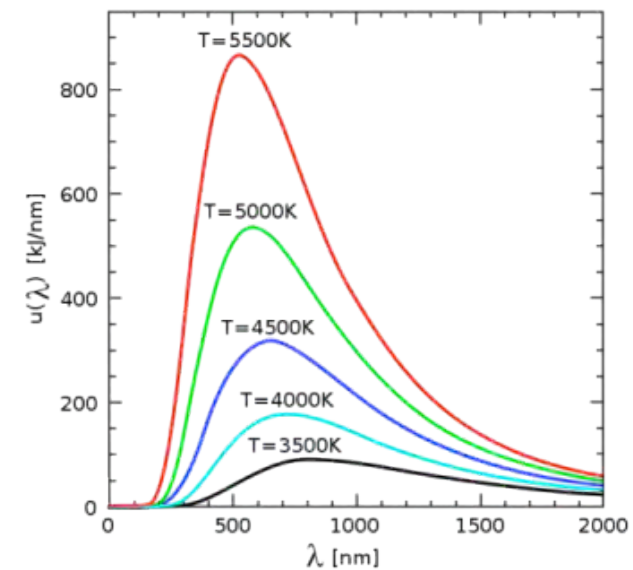


# 溶鉱炉の場合



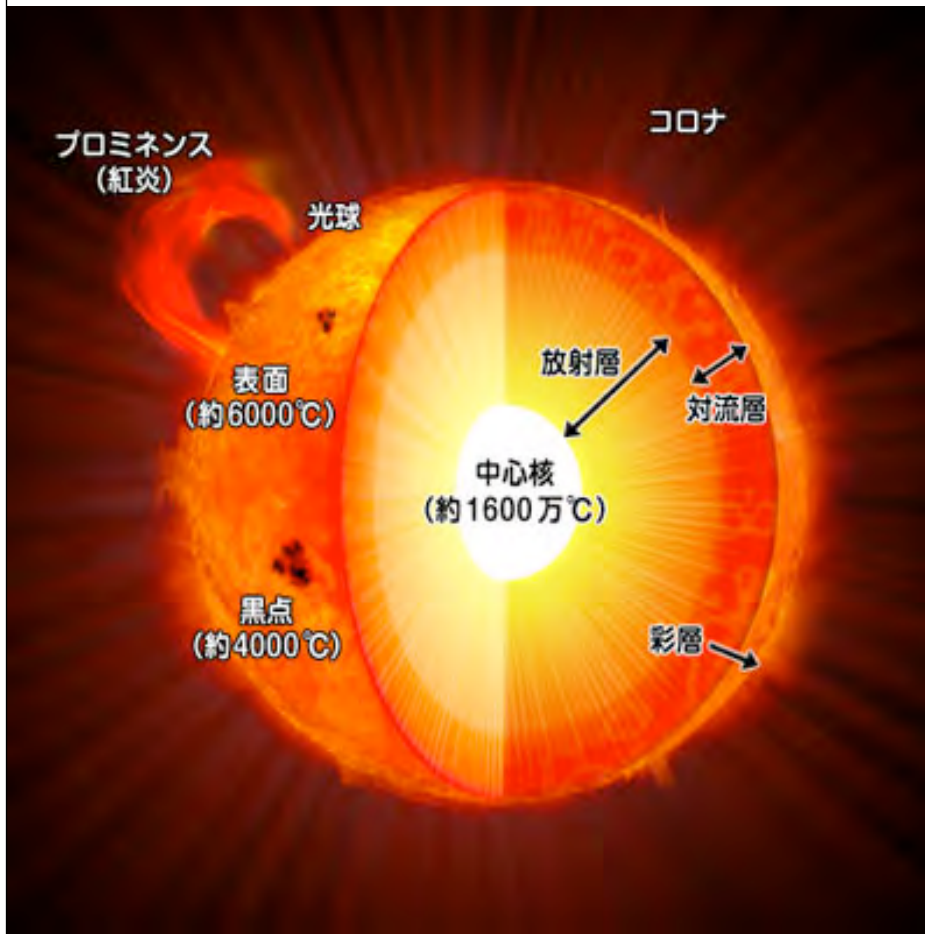
- 光の強度の波長分布（エネルギー分布）から、物質の温度を測定する。

強度



波長

# 太陽の場合



## • 太陽の温度

黒点：4,000 K

表面: 6,000 K

中心核:  $1.6 \times 10^7$  K

\*温度 K (ケルビン) と eV の対応

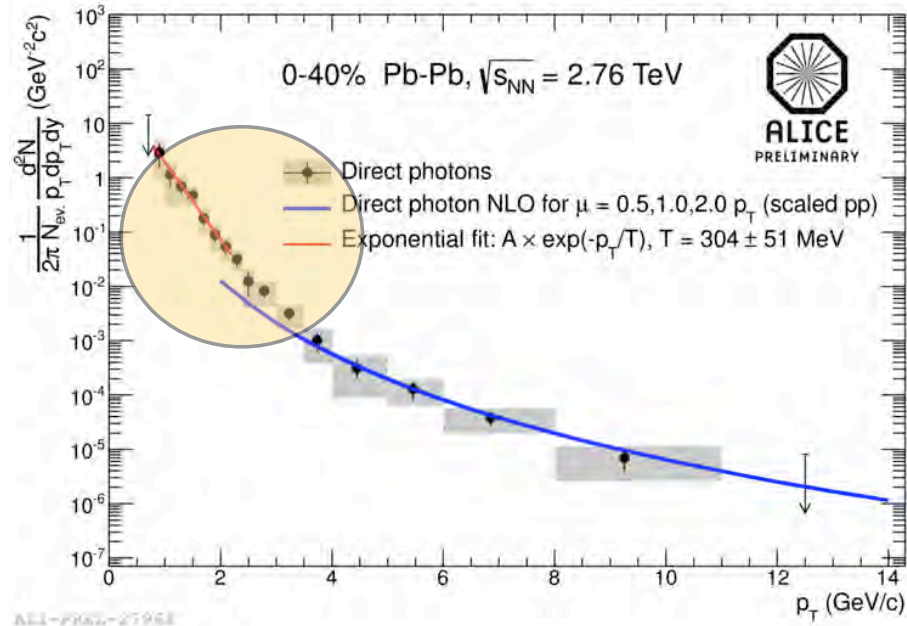
電子1個を1Vの電位差で加速したときのエネルギーが1 eV.

1 eV の平均運動エネルギーをもつ気体の温度は

$11,604 \text{ K} = 10^4 \text{ K}$  (気体の運動論より)

# 実験結果

光量



光子のエネルギー

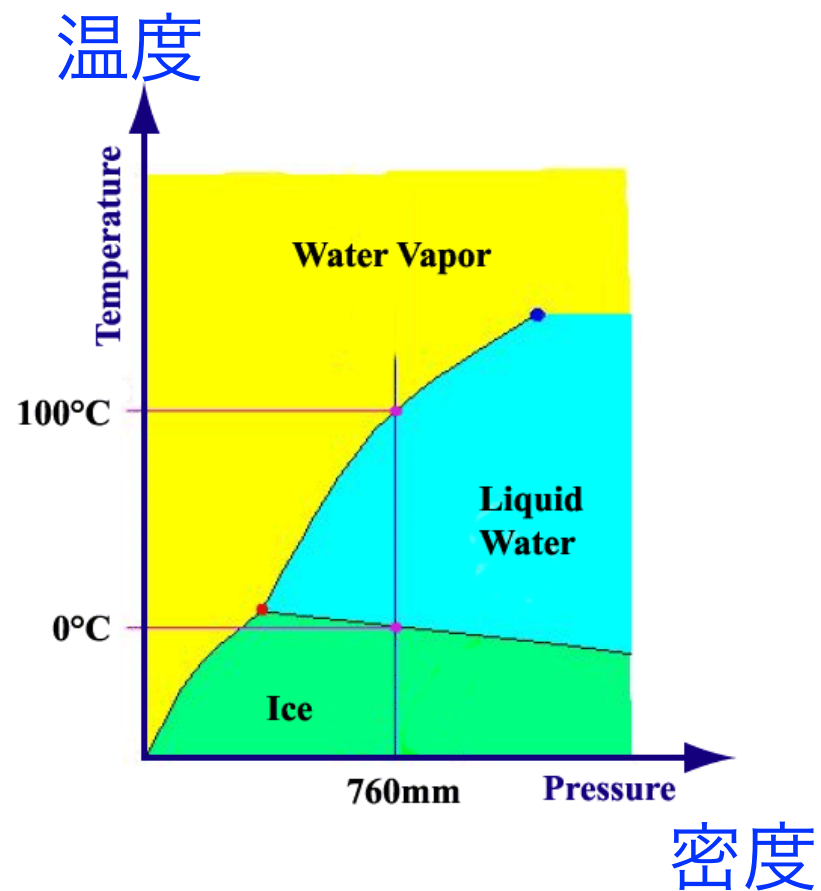
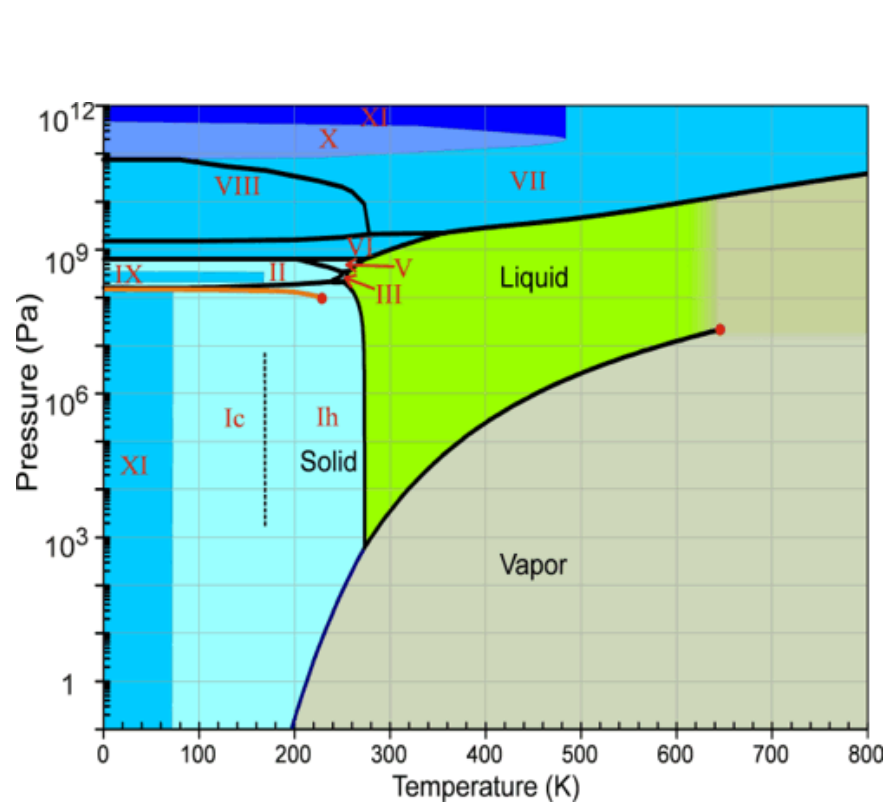
- 光子の測定：温度は5兆度 ( $5 \times 10^{12}$  K)
- QGP生成温度の理論予測、2兆度を遥かに超える高温度を実現
- 世界で最も高い温度！

# QGPから物質世界へ

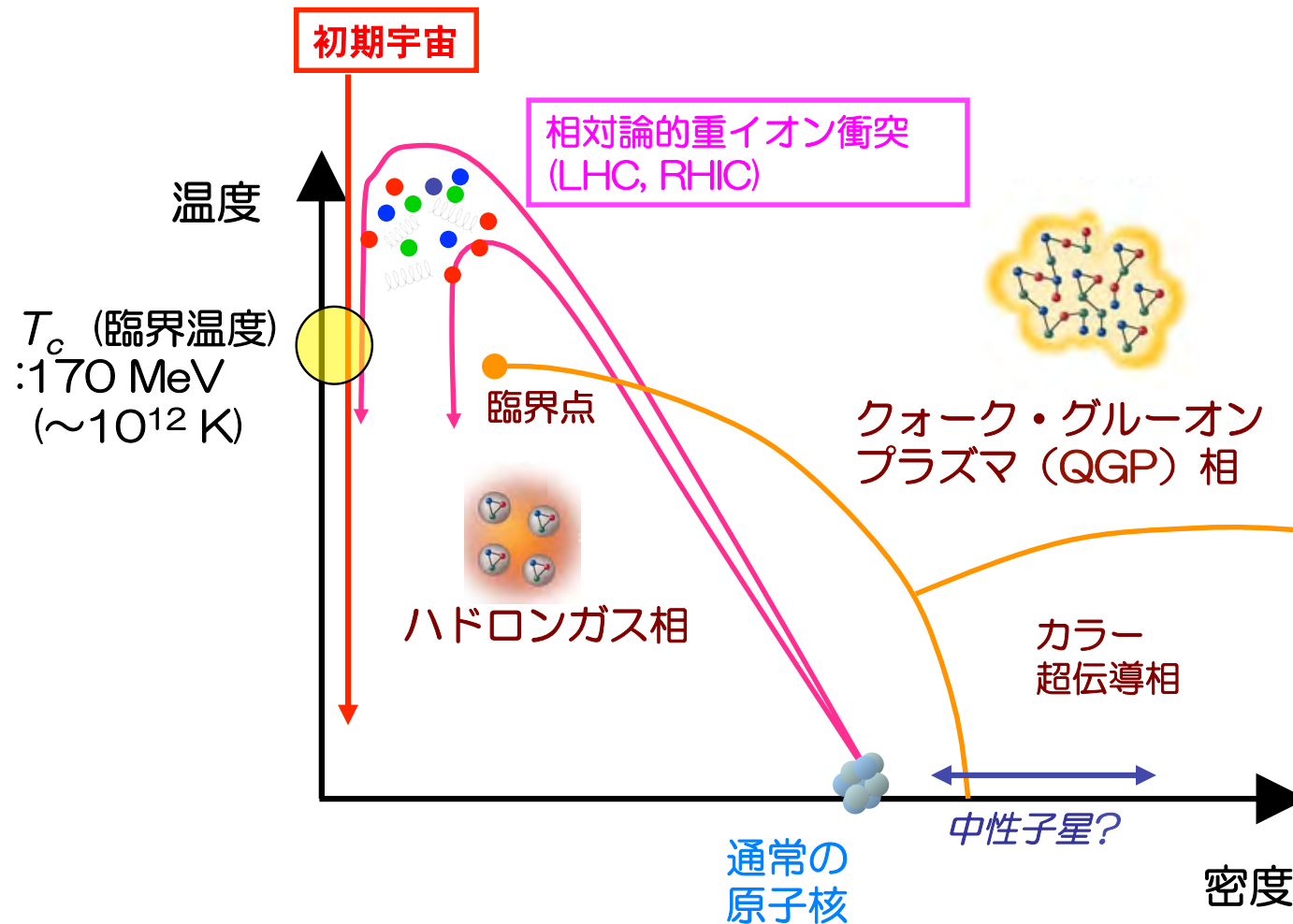
- 物質の相には、固体、液体、気体など、様々な相がある。
- QGP相からハドロン（陽子や中性子などの物質）相への相転移。



# 水の相図

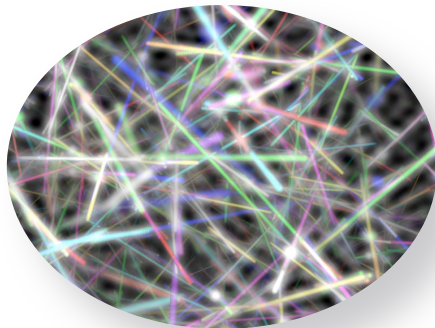


# 核物質の相図

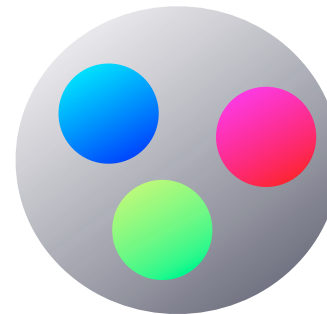
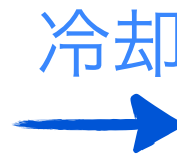


# $t = 1/10,000$ 秒後

- 宇宙は膨張とともにどんどん冷え、QGP相からハドロン（物質）への相転移が起きる
- クォーク3つが集まって、陽子や中性子が生まれた（ハドロン化）
- ハドロン化するときに、ヒッグス機構では生まれない、残りの99%の質量が生まれた！



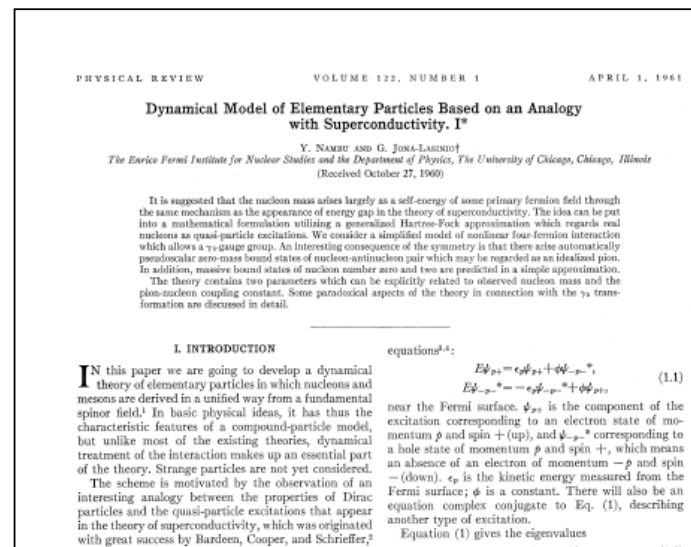
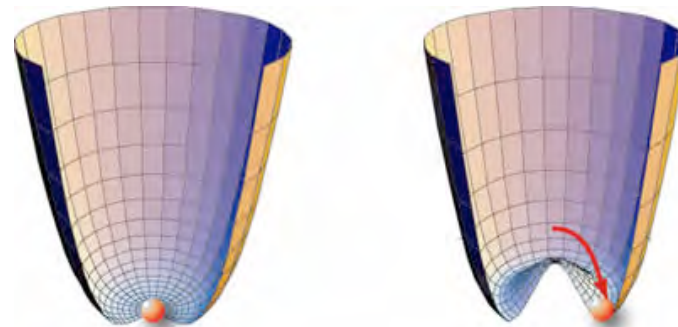
クォークが飛び交う様子  
(QGP)



クォーク3つで陽子、中性子を形成  
(ハドロン化)

# 残り 1 %の質量獲得機構とは？

- (カイラル) 自発的対称性の破れ (南部陽一郎, 2008 年ノーベル物理学賞)
- QCD (量子色力学) の真空 : クォークの対称性が保たれている。高温、高密度に世界
- 現在はその対称性が破られている状態。
- 実験的検証は今後の課題



南部先生の論文



---

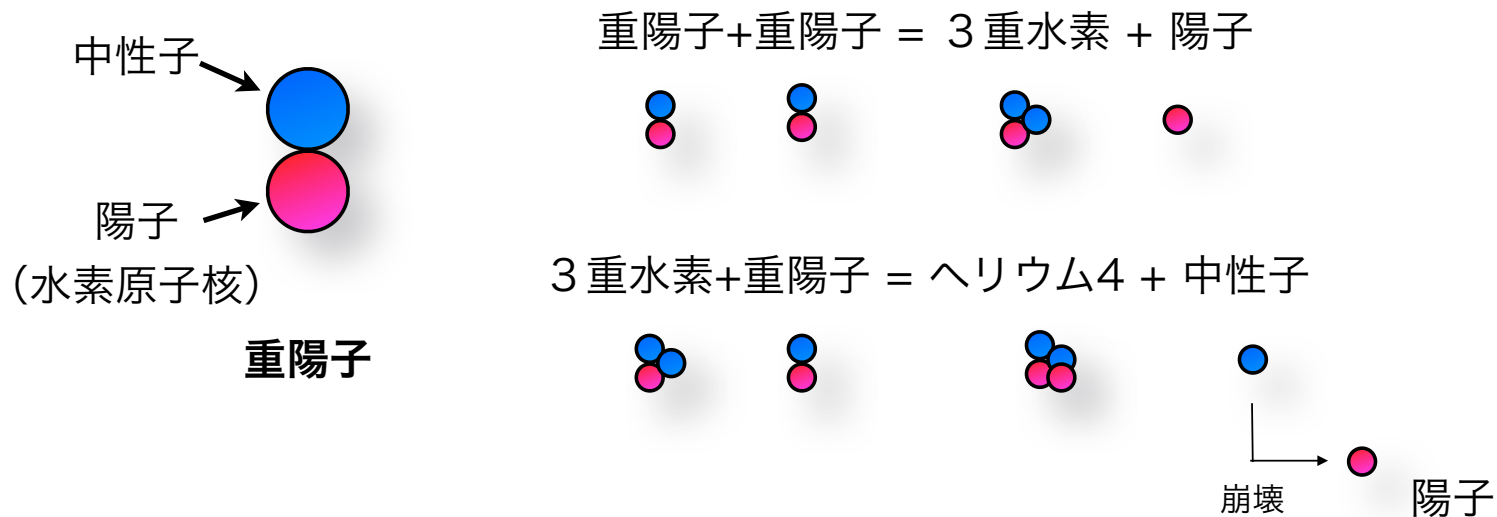
## 5. その後の宇宙

---

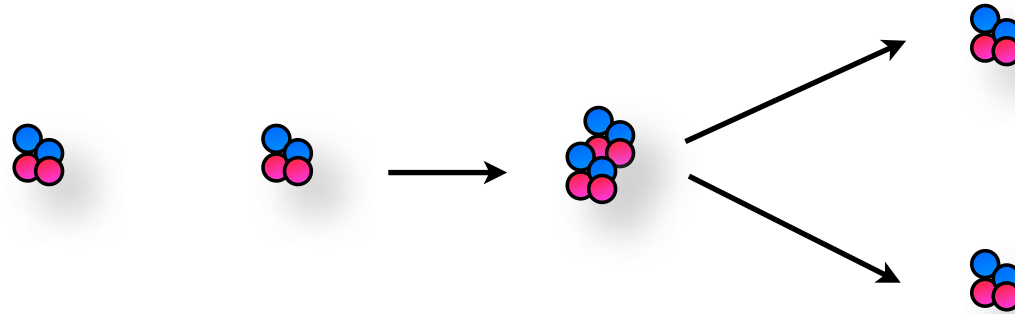
ビックバンから  $t = 3$  分～137億年後（現在）の世界

# t = 3分後

- 陽子（水素）、中性子から重陽子、ヘリウム、微量のリチウムができた。
- ビッグバン元素合成理論
- ところが  ${}^4\text{He}$  は非常に安定な原子核なので、それ以上の元素合成が進まない。
- こうして3分後の宇宙は、陽子とヘリウムの原子核に満ちあふれることになる。



# 質量数 8 の壁

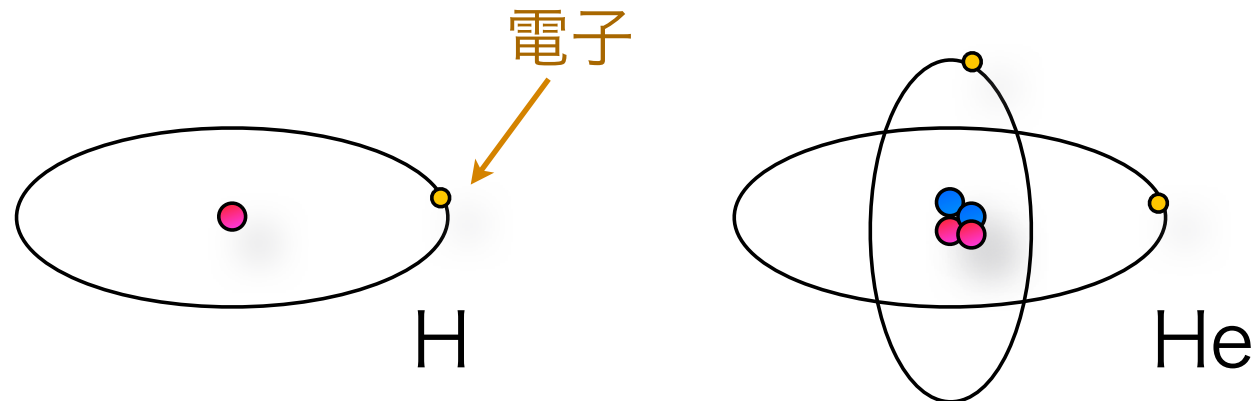


ヘリウム4 + ヘリウム4 → ベリリウム8 → 直ちにヘリウム4へ崩壊

- 安定なヘリウム4原子核に戻ってしまう

# $t = 38$ 万年後

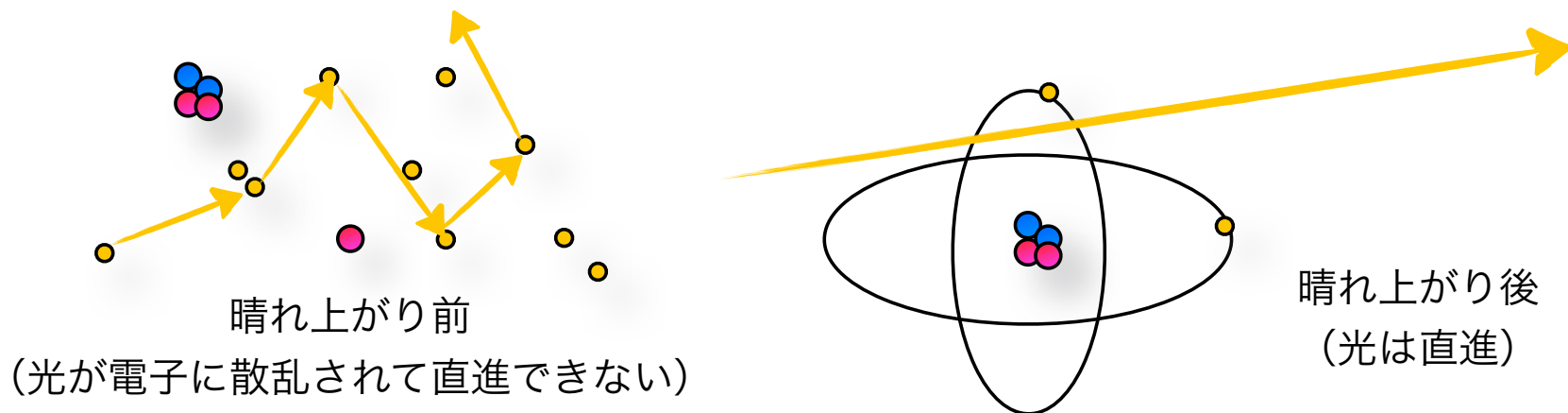
- 宇宙は安定した「陽子」と「ヘリウム4」、「電子」、「光」で満たされていた。
- その後もどんどん宇宙は膨張し、冷えて行き、電子の運動速度が下がる。
- すると、陽子やヘリウムに電子が捕獲され、水素原子、ヘリウム原子を構成するようになる。





# 宇宙の晴れ上がり

- これまで電子によって散乱されていた光は宇宙空間を自由に飛び回れるようになる。
- これを「**宇宙の晴れ上がり**」という。
- 宇宙背景放射 (2.7 K) は、実はこのときの温度が宇宙膨張によって冷え、見えている。

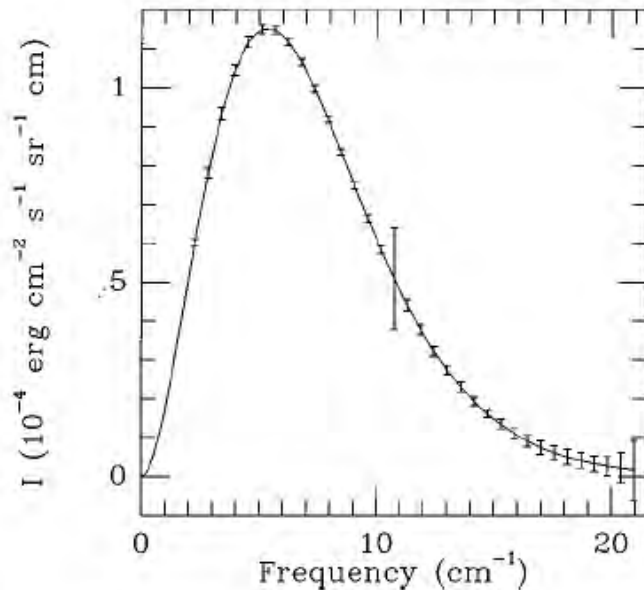


# 衛星による宇宙背景放射の観測

## 宇宙背景放射のスペクトル

宇宙背景放射 = **C**osmic **M**icrowave  
**B**ackground (CMB).

光の  
強度



周波数  
= 光のエネルギー

COBE 衛星(the Cosmic Background Explorer)

光子の強度を周波数の関数として測定。

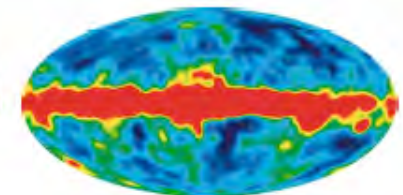
温度:  $T_{\text{CMB}} = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$

温度の揺らぎも測定した (下図)

Penzias/Wilson  
1965



COBE  
2003



# 周期表

So many Dining Room & Kitchen Chairs. You will be amazed Visit Now! Discount folding chairs - Quality and Lowest Prices Guaranteed! Frazoo has direct answers for periodic table So many Dining Room & Kitchen Chairs. You will be amazed Visit Now!

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 水素 1.00794	2 He ヘリウム 4.002602																
3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012182																
5 Na ナトリウム 22.98976928	6 Mg マグネシウム 24.3050																
7 K カリウム 39.0983	8 Ca カルシウム 40.078	9 Sc スカンジウム 44.955912	10 Ti チタン 47.867	11 V バナジウム 50.9415	12 Cr クロム 51.9961	13 Mn マンガン 54.938045	14 Fe 鉄 55.845	15 Co コバルト 58.933195	16 Ni ニッケル 58.6934	17 Cu 銅 63.546	18 Zn 亜鉛 65.38	19 Ga ガリウム 69.723	20 Ge ゲルマニウム 72.64	21 As ヒ素 74.92160	22 Se セレン 78.96	23 Br 臭素 79.904	24 Kr クリプトン 83.798
25 Rb ルビジウム 85.4678	26 Sr ストロンチウム 87.62	27 Y イットリウム 88.90585	28 Zr ジルコニウム 91.224	29 Nb ニオブ 92.90638	30 Mo モリブデン 95.95	31 Tc テクネチウム (98)	32 Ru ルテチウム 101.07	33 Rh ロジウム 102.90550	34 Pd パラジウム 106.42	35 Ag 銀 107.8682	36 Cd カドミウム 112.411	37 In インジウム 114.818	38 Sn スズ 118.710	39 Sb アンチモン 121.760	40 Te テルル 127.60	41 I ヨウ素 126.90447	42 Xe キセノン 131.293
53 Cs セシウム 132.9054515	54 Ba バリウム 137.327	55-71 Lanthanoids	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.94788	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.207	76 Os オスミウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.217	78 Pt 白金 195.084	79 Au 金 196.966569	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.3833	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 208.98040	84 Po ポロニウム (209)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)
87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89-103 Actinoids	104 Rf ラザフォード (261)	105 Db ドブニウム (268)	106 Sg シーボーグ (271)	107 Bh ボーリウム (272)	108 Hs ハクニウム (270)	109 Mt マイタネリウム (278)	110 Ds ダームスタチウム (281)	111 Rg レントゲニウム (280)	112 Cn ウンウンビウム (285)	113 Nh ウンウントリウム (284)	114 Fl ウンウンクア (289)	115 Mc ウンウンペン (288)	116 Lv ウンウンヘク (293)	117 Ts ウンウンセブ (294)	118 Og ウンウンオク (294)
89 La ランタン 138.90547	90 Ce セリウム 140.116	91 Pr プラセオジウム 140.90765	92 Nd ネオジウム 144.242	93 Pm プロメチウム (145)	94 Sm サマリウム 150.36	95 Eu ユウロピウム 151.964	96 Gd ガドリニウム 157.25	97 Tb テルビウム 158.92535	98 Dy ジスプロシウム 162.500	99 Ho ホルミウム 164.93032	100 Er エルビウム 167.259	101 Tm ツリウム 168.93421	102 Yb イタリウム 173.054	103 Lu ルテチウム 174.9668			
97 Ac アクチニウム (227)	98 Th トリウム 232.03806	99 Pa プロトアクチン 231.03688	100 U ウラン 238.02891	101 Np ネプツニウム (237)	102 Pu プルトニウム (244)	103 Am アメリシウム (243)	104 Cm キュリウム (247)	105 Bk バークリウム (247)	106 Cf カリホルニウム (251)	107 Es アインスタイ (252)	108 Fm フェルミウム (257)	109 Md メンデレフ (258)	110 No ノーバリウム (259)	111 Lr ローレンシウム (262)			

質量数 8 の壁をこえて元素を作る必要がある

Help Translate This Page! 周期表 PNG について Forum 連絡先 Poster Demo Facebook Twitter 日本語

# $t = 4$ 億年後

- ・宇宙の晴れ上がりのおかげで、陽子、ヘリウム原子核は中性の「水素原子」、「ヘリウム原子」になった
- ・原子密度の濃い部分が**重力**によって集まり、星を形成し始める

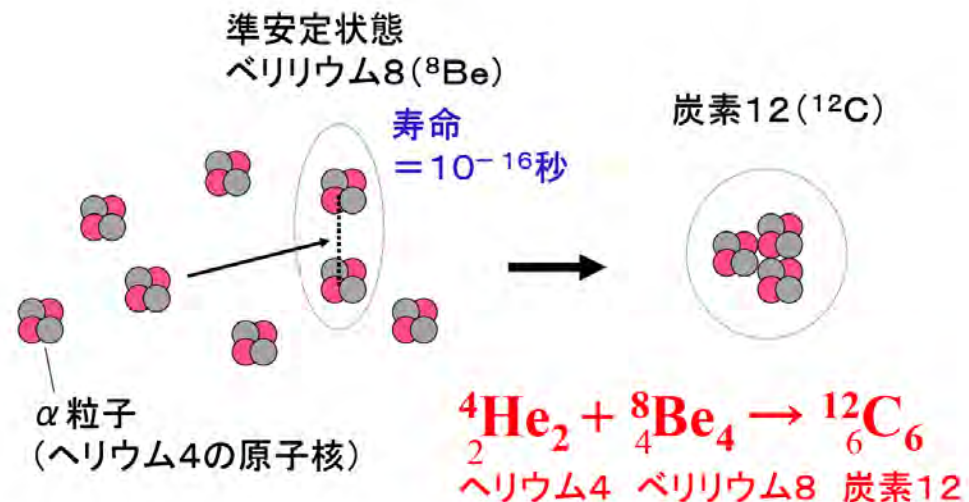
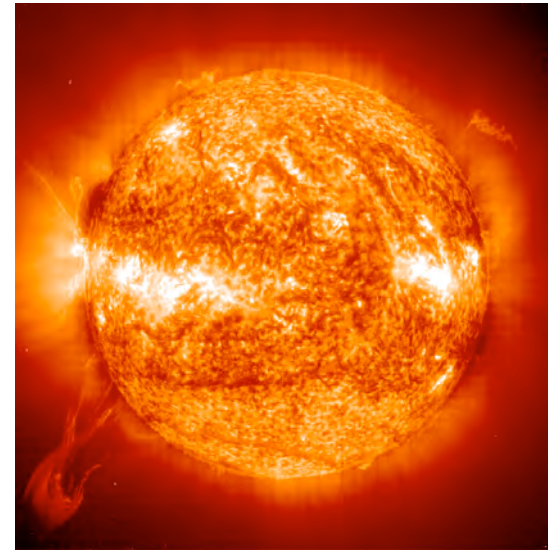
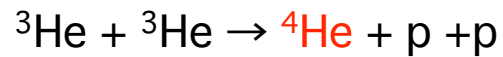
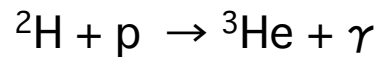
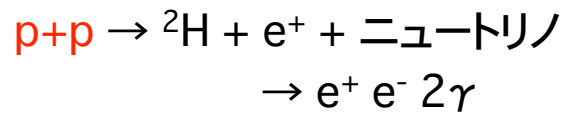


The star formation region N11B in the LMC taken by WFPC2 on the NASA/ESA Hubble Space Telescope.



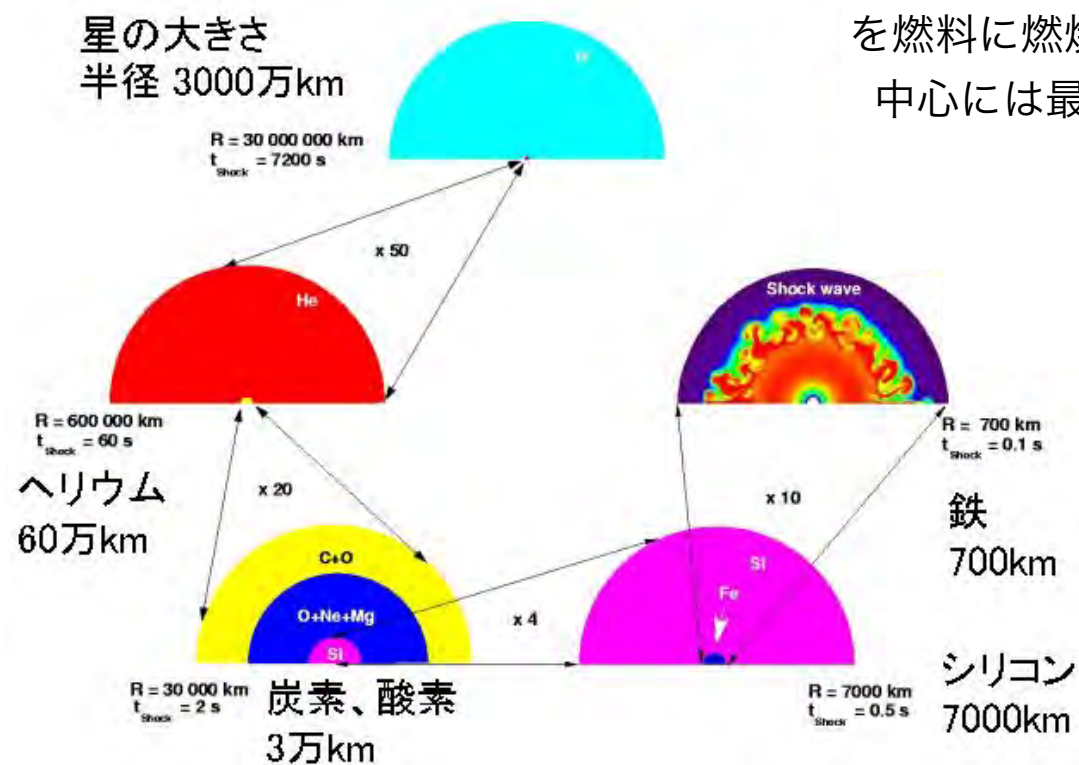
# 質量数8の壁を超えて

星の内部での核融合反応が起こる



# 星のタマネギ構造

水素に始まり、He, C, O, Si  
を燃料に燃焼し、星はタマネギ構造をもつ。  
中心には最も安定な元素 Fe のコアを形成

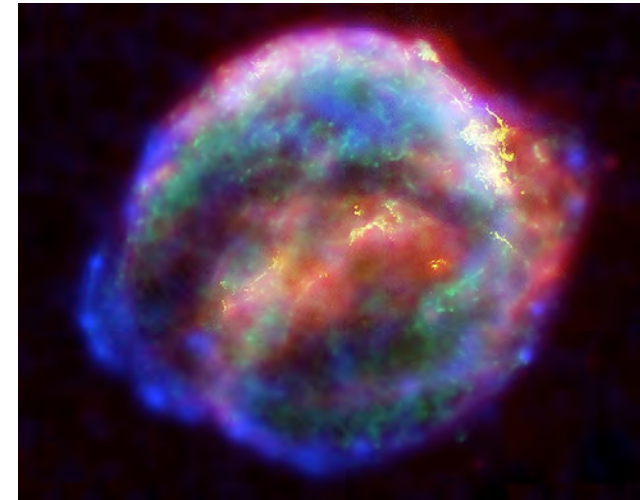


# $t = 10$ 億年後～現在

- 鉄は最も安定な元素
- 星の中で中性子をゆっくり捕獲しながら、ビスマス ( $^{209}\text{Bi}$ ) 元素までを合成できる。
- それより重い元素、例えばウラン、ラジウムなどの重元素はつくれない。
- 何か別の機構が必要。

# 超新星爆発

- 星が末期になると、Fe のコアができる。
- 重力と燃料のエネルギー生成によって星はバランスを取っている
- 重力に支えきれなくなると、**重力崩壊**を起こす。
- **大量の中性子**が発生し、鉄と結合
- $\text{Fe} + n + n + n + n \dots$
- 大量の重元素（ウランなど）を合成する。
- 超新星爆発によって、宇宙空間にばらまかれる。



ケプラーの超新星 (SN 1604) の超新星残骸。 [スピッツァー宇宙望遠鏡](#)、[ハッブル宇宙望遠鏡](#)および[チャンドラX線天文台](#)による画像の合成画像。

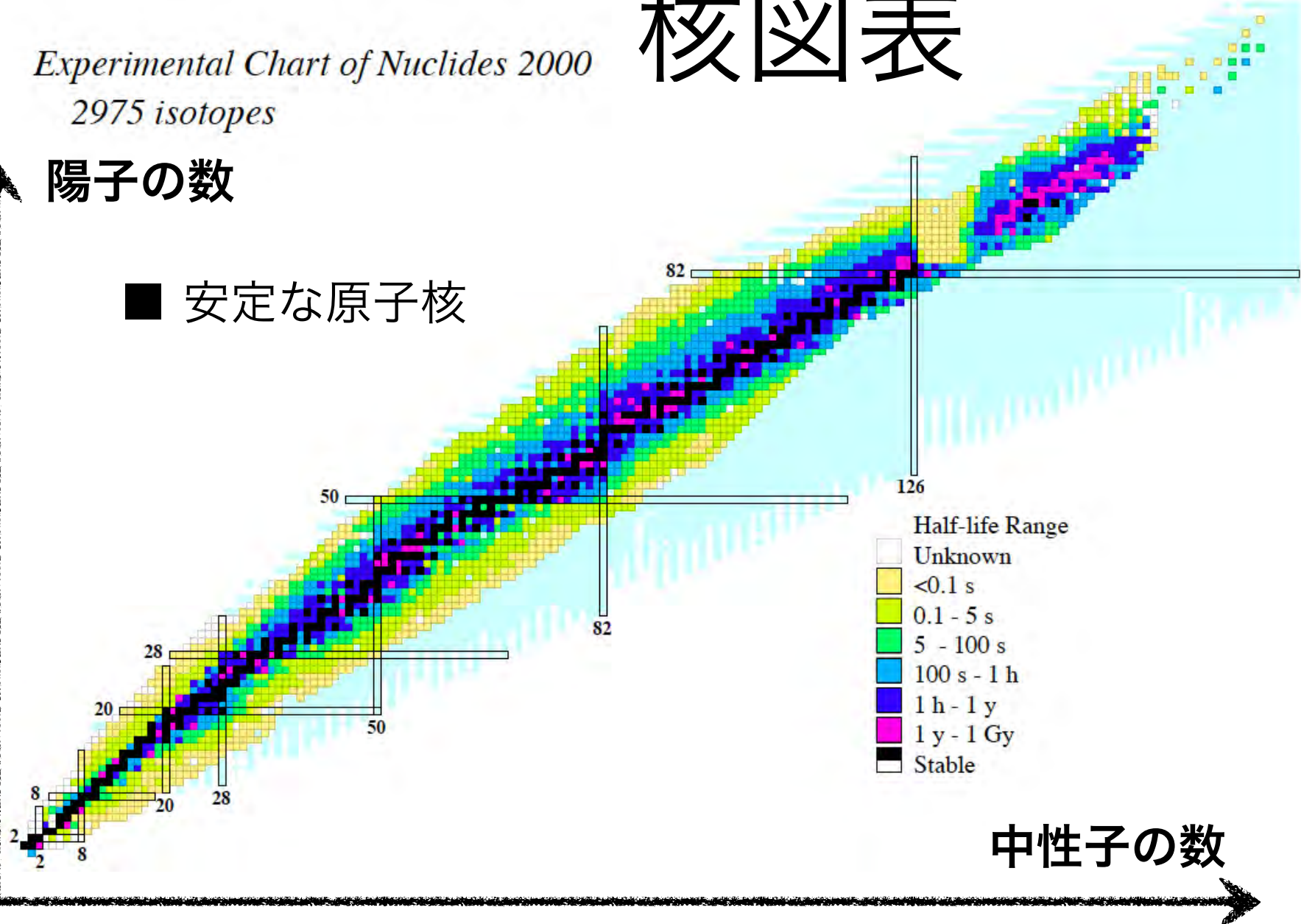


# 核図表

*Experimental Chart of Nuclides 2000*  
2975 isotopes

陽子の数

■ 安定な原子核



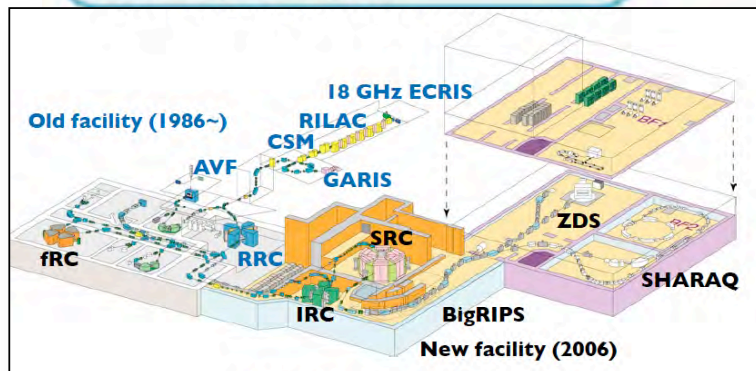
# RIビームファクトリー (理化学研究所)

## 基礎

3000種 (世界最大) のRI ビームを発生  
「未踏の原子核世界を切り拓く」

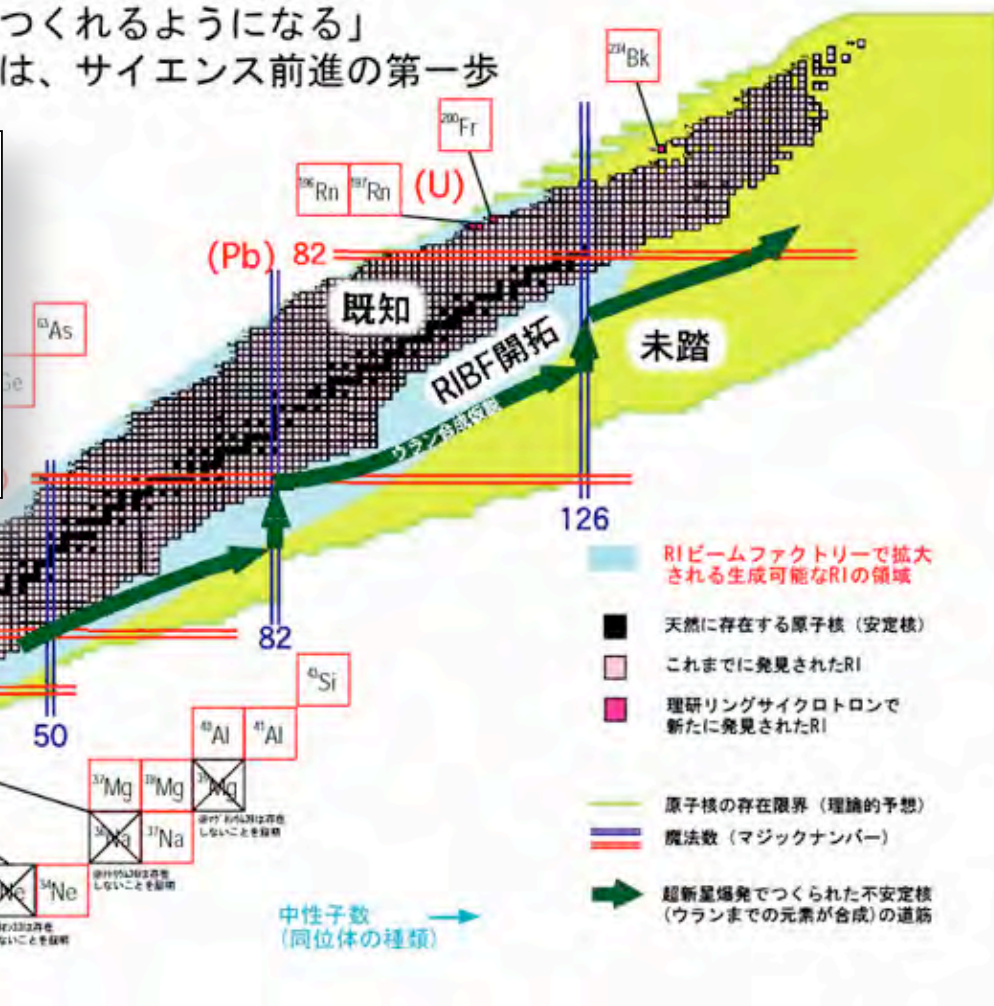
- ・原子核の“正体”を明らかにする
- ・元素誕生の“謎”の解明

「つくれなかったものが  
つくれるようになる」  
のは、サイエンス前進の第一歩



陽子数  
(元素の種類)

(Ni) 28  
(Ca) 20  
(O) 8  
(He) 2





# 元素113 の発見

理化学研究所は9月25日、まだ名前が付けられていない113番目の新元素の3例目の合成に成功し、しかもこれまでの2例とは異なる新たな崩壊経路で確認され、113番元素の確定に大きく貢献する成果を上げ、日本、さらにはアジア初となる元素の命名優先権獲得に大きく近づいたことを発表した。

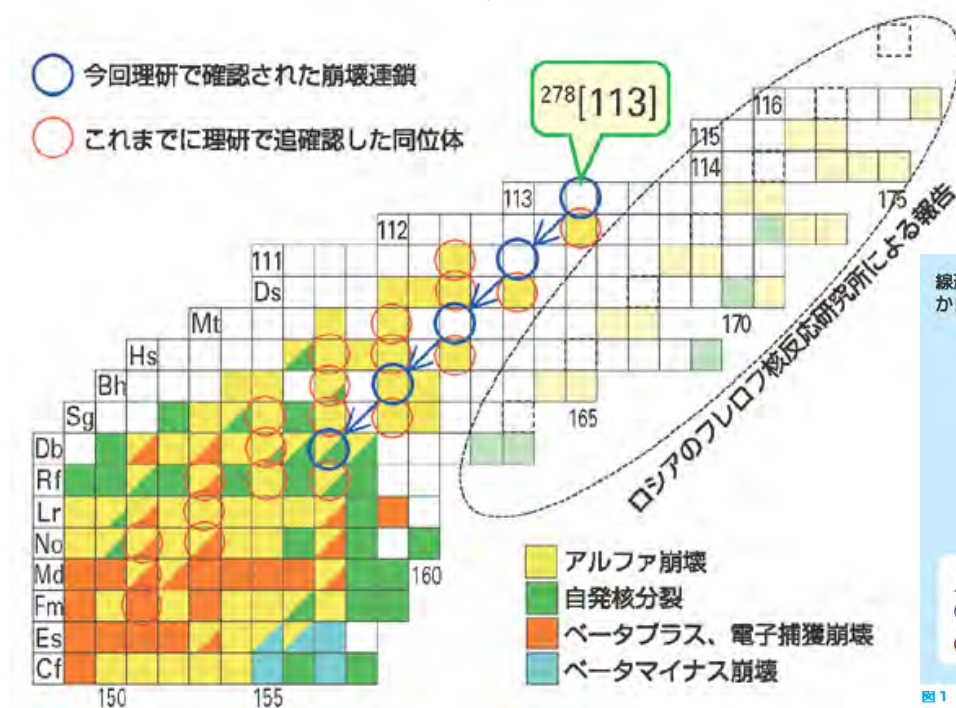


図3 核図表の終端部分  
核図表とは、原子核の陽子数（原子番号）を縦軸とし、中性子数を横軸にして表示したもの。

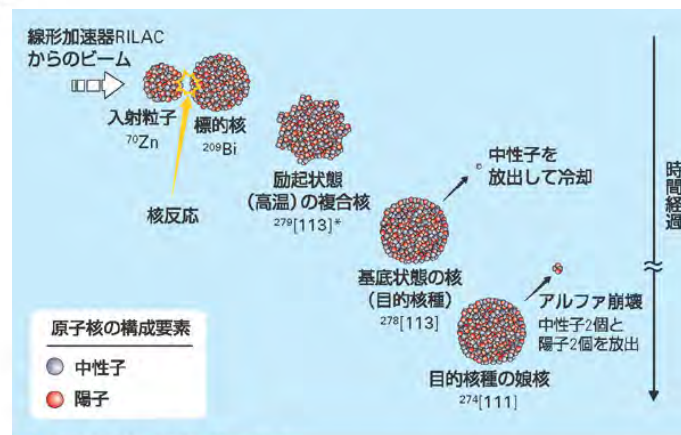
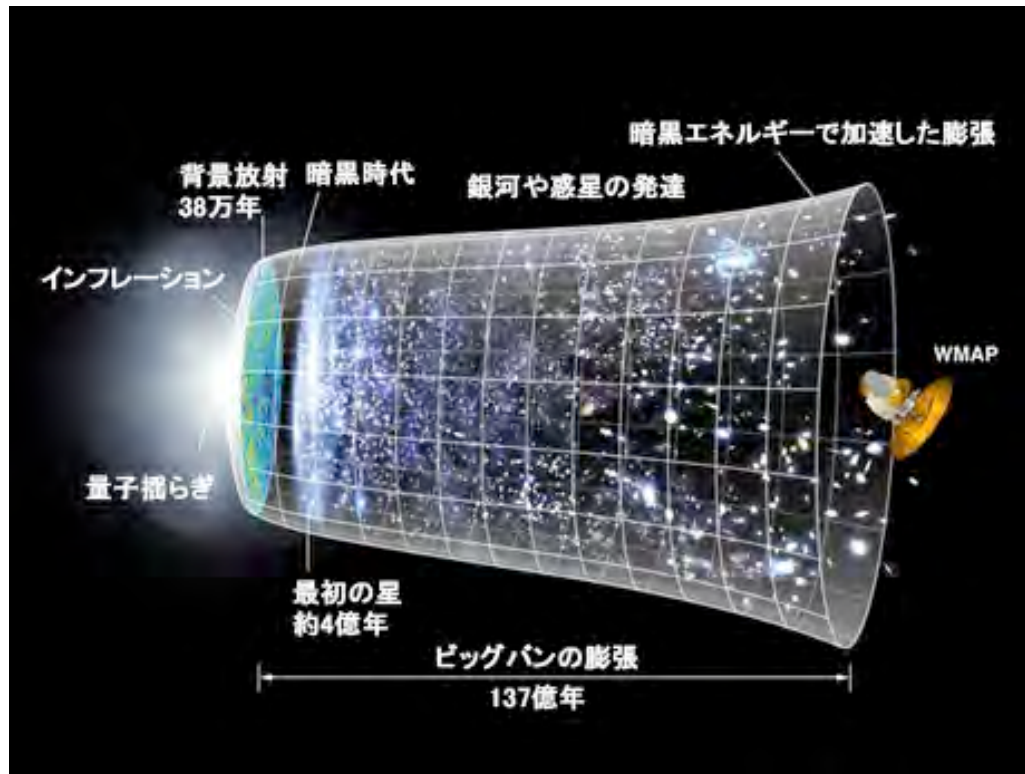


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

<http://news.mynavi.jp/articles/2012/09/28/113element/index.html>

$t = 137$  億年 (現在)



左より、パールムッター氏(Saul Perlmutter)、シュミット氏(Brian P. Schmidt)、リース氏(Adam G. Riess)

写真提供：ノーベル財団

宇宙の加速膨張の発見により、ノーベル物理学賞受賞 (2011)



- 宇宙膨張の速さが「加速」している、つまり速度を増しながらどんどん宇宙が膨らんでいる、ということを観測から明らかにした

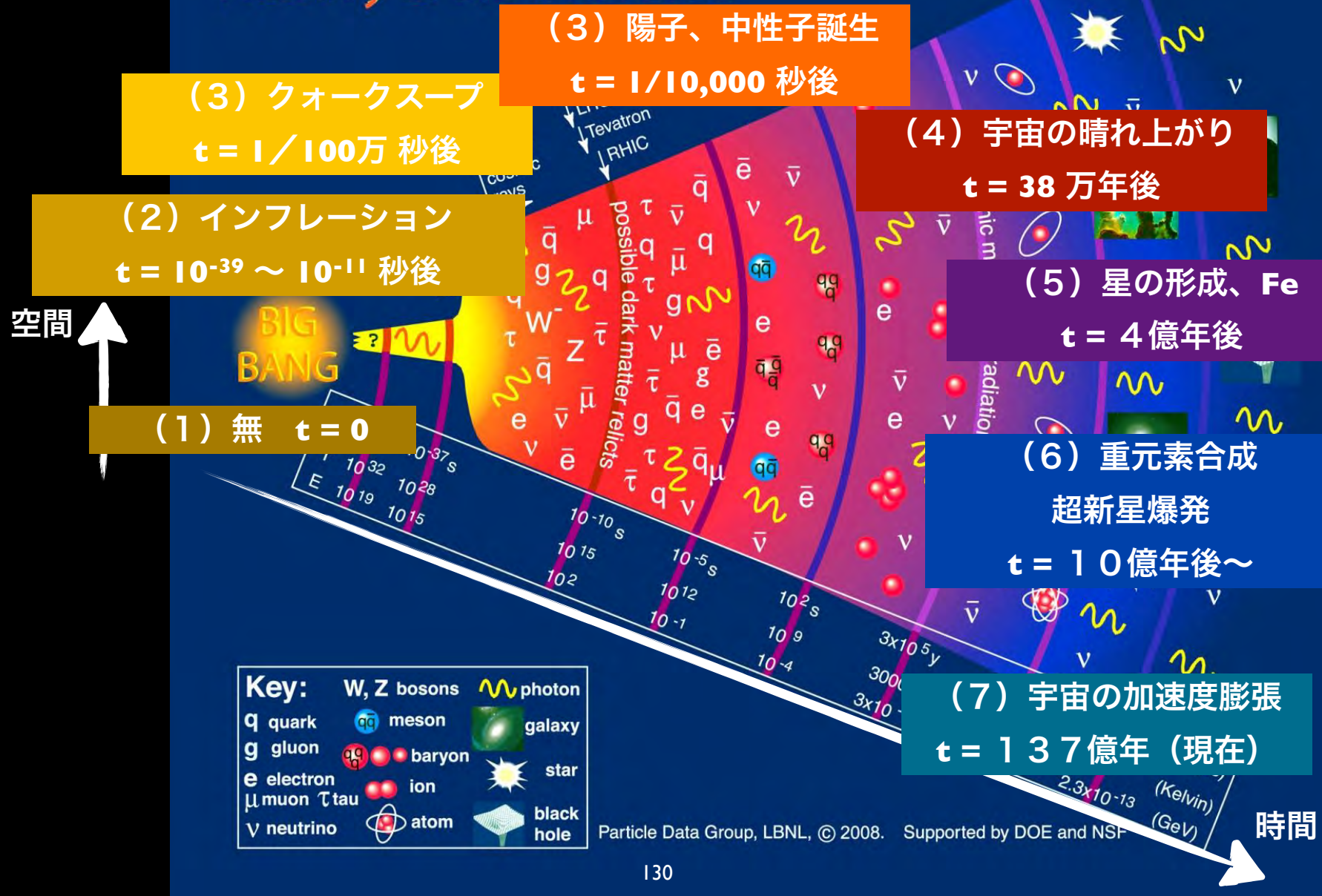


---

## 5. エピローグ

---

# 「宇宙史」を振り返る





# 「宇宙史」を振り返る

(3) クォークスープ  
強い力の時代

(3) 陽子、中性子誕生  
強い力、物質誕生

(2) インフレーション  
素粒子に個性が生まれる、  
4つの力へ分枝

(4) 宇宙の晴れ上がり  
電磁気力の時代

(1) 無 火の玉  
宇宙の誕生、力は1つ

(5) 星の形成、Fe  
重力、弱い力の時代

(6) 重元素合成  
超新星爆発  
重力、弱い力

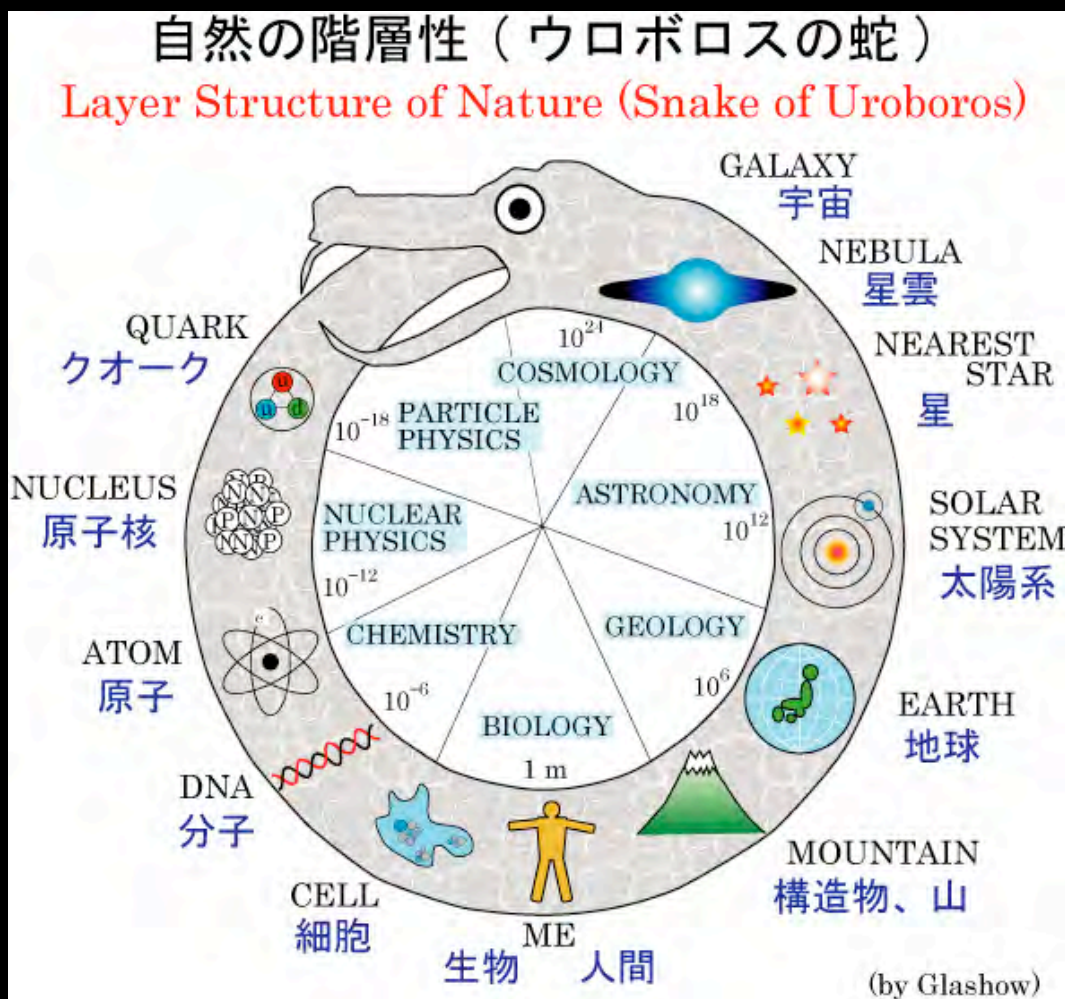
(7) 宇宙の加速度膨張  
重力

Key:

W, Z bosons	photon
q quark	meson
g gluon	baryon
e electron	ion
$\mu$ muon $\tau$ tau	atom
$\nu$ neutrino	black hole

Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

# ウロボロスの蛇



## 物理学の世界

異なる階層（スケール）が互いに  
関連し、繋がっている

例) 宇宙 ( $10^{28}\text{m}$ )



素粒子 ( $10^{-18}\text{m}$ )

<http://www.yukawa.phys.sci.osaka-u.ac.jp/SAP/?SAP%2FProgram%2F11>



# 参考文献（一般向け）

- 「相対性理論を楽しむ本」 佐藤勝彦監修（PHP文庫, 1998）
- 「量子論を楽しむ本」 佐藤勝彦監修（PHP文庫, 2000）
- 「宇宙誕生 100 万分の 1 秒後の謎」 延與秀人著（実業之日本社, 2007）
- 「元素はいかにつくられたか」 野本憲一編（岩波講座物理の世界, 2007）
- 「質量はどのように生まれるのか」 橋本省二著（ブルーバックス, 2010）

# 連絡先

- 中條 達也
- E-mail: [chujo.tatsuya.fw@u.tsukuba.ac.jp](mailto:chujo.tatsuya.fw@u.tsukuba.ac.jp)
- 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1
- 筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻
- TEL/FAX : 029-853-4221
- 研究室のHP : <http://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/>