

# 加速器で分かる 宇宙の歴史

筑波大学理工学群物理学類

中條 達也



筑波大学  
*University of Tsukuba*

久慈高校・出張講義

2013年11月15日

# 自己紹介

- 中條 達也（ちゅうじょう たつや）
- 筑波大学 理工学群 物理学類 講師
- 専門：高エネルギー原子核物理学（実験物理）
- 現在やっていること：
  - 国際共同実験 ALICE（CERN, LHC 加速器・スイス）
  - 国際共同実験 PHENIX（BNL, RHIC 加速器・米国）
- 2000年 筑波大学 博士（理学）号取得, BNL 研究員、バンダービルト大学研究員を経て、2005年より現職
- ALICE 日本グループの outreach（広報）担当

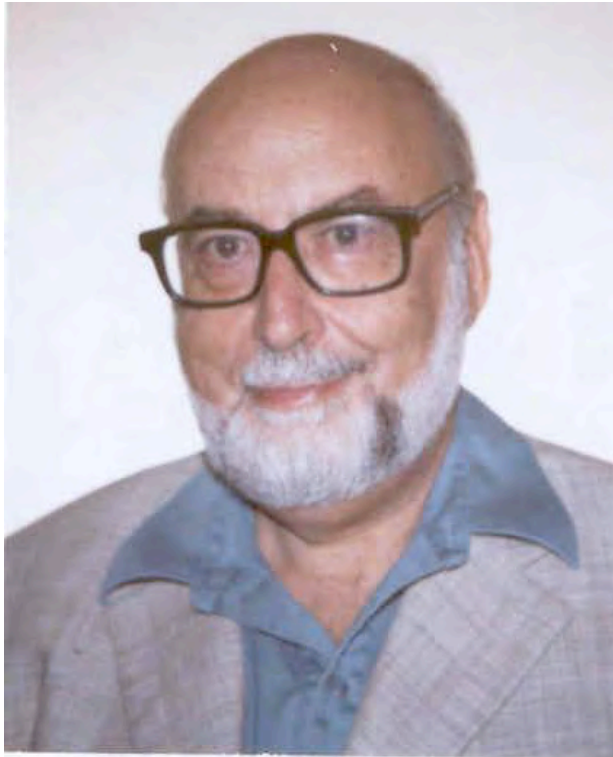
**講演スライド (PDF) のダウンロードはこちらから**

[https://dl.dropboxusercontent.com/u/  
70486402/2013/kuji/  
kuji\\_koukou\\_lec2013\\_v02.pdf](https://dl.dropboxusercontent.com/u/70486402/2013/kuji/kuji_koukou_lec2013_v02.pdf)

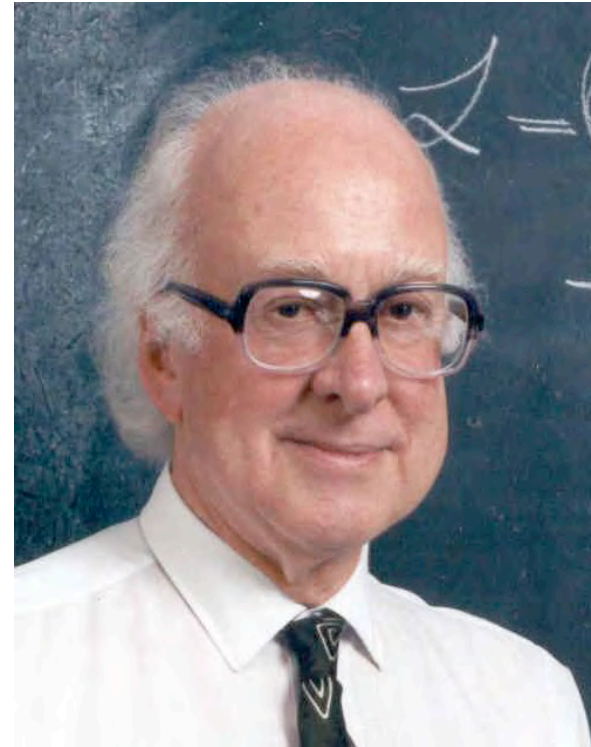
はじめに



# 2013年ノーベル物理学賞



F. アングレール



P. ヒッグス

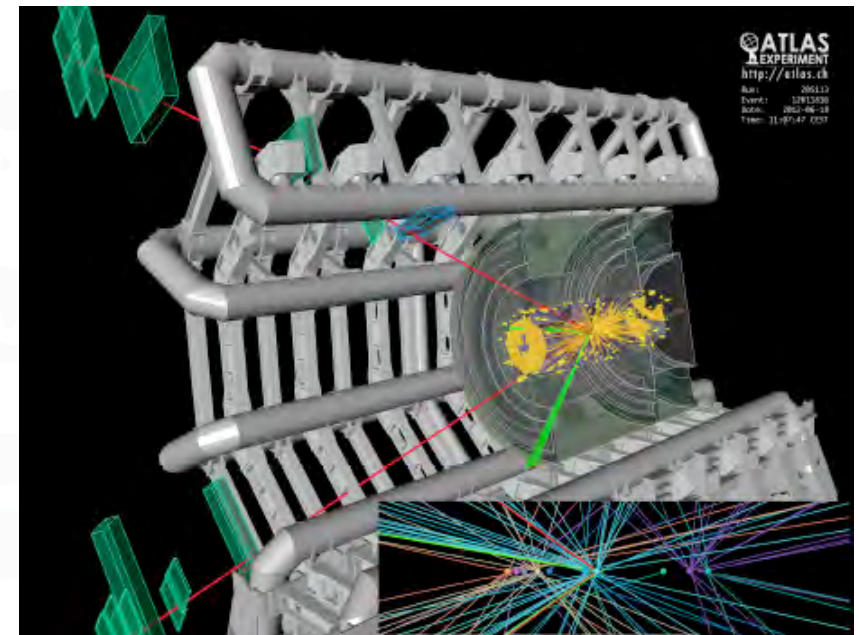
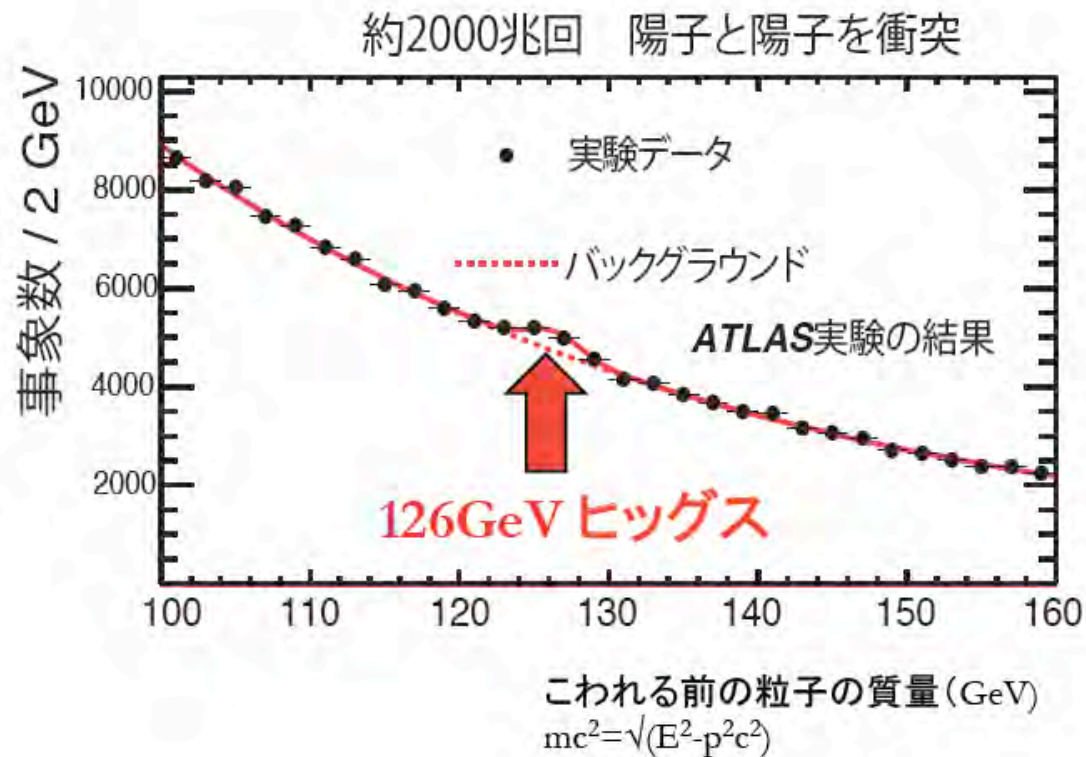


受賞理由：「物質の質量の起源に関する理論的発見」  
(1964年に発表された理論)

# ヒッグス粒子の発見 (2012.7)



LHC 加速器(CERN)



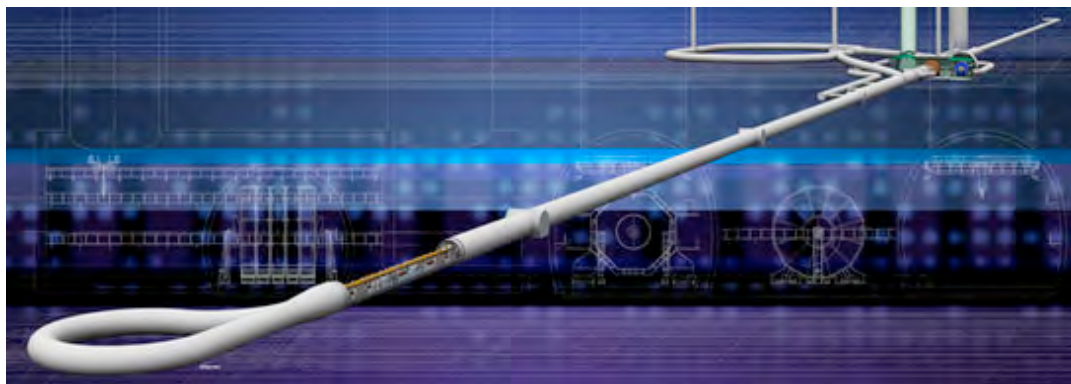
ATLAS 実験で観測された  
ヒッグス粒子の候補



# 国際リニアコライダー ILC

## 北上山地が候補地に (2013.8)

最新のニュースから  
(その3)



### リニアコライダー候補地:北上山地、大差で選出

毎日新聞 2013年08月23日 11時37分 (最終更新 08月23日 12時22分)

宇宙誕生の謎に迫る超大型加速器「国際リニアコライダー」(ILC)を推進する国内の研究者組織「ILC戦略会議」(議長=山下了・東京大准教授)は23日、東京都文京区の同大で記者会見し、岩手・宮城両県の北上山地を建設候補地として選んだと発表した。現在、海外で具体的検討はなく、ILC実現が決まれば北上山地が有力な候補地となる。

もう一つの候補地だった佐賀・福岡両県の脊振(せふり)山地と比較。交通の便や研究・生活環境で脊振がやや優位だったが、地形や自然災害などの技術評価の得点では「63対37」の大差で北上が適地と判断した。脊振では施設がダム湖や都市部の地下を通ることなどが懸念された。北上は東日本大震災級の地震に対しても耐震性があり、工期や費用が縮減できると判断した。



岩手県一関市の資料をもとに作製

全長 31 km, 総額 8,300 億円

経済効果 4 兆円とも！



# 日本人3氏ノーベル賞

## 南部・小林・益川氏に物理学賞



南部陽一郎さん



小林誠さん



益川敏英さん

スウェーデン王立科学アカデミーは7日、今年のノーベル物理学賞を、米シカゴ大名誉教授で大阪市立大名誉教授の南部陽一郎さん(87)、高エネルギー加速器研究機構名誉教授の小林誠さん(64)、京都大名誉教授で京都産業大教授の益川敏英さん(68)の3人に贈ると発表した。すべての物質を形づくる素粒子の理論研究での先駆的な業績が評価された。日本人のノーベル賞受賞は02年以来で、これで15人。物理学賞は同年の小柴昌俊・東京大特別栄誉教授に続き、これで7人になる。

賞金は1千万スウェーデン・クローナ(約1億4千万円)で、南部さんが半分、小林さんと益川さんが各4分の1ずつを受ける。授賞式は12月10日、ストックホルムである。

南部さんの授賞理由は「自発的対称性の破れの発見」。一般に「左右対称」とは、左右を逆にしても見た目などの性質が変わらないこと。物理学の世界にも同様に「対称性」があり、左右を入れ替えるような操作をしても物理法則が変わらないと、長く考えられてきた。

ところが、南部氏は61年、素粒子の世界で対称性が自然に失われてしまうケースがある、という考え方を初めて提唱した。この「自発的対称性の破れ」という考え方により、素粒子理論のさまざまな謎を解く糸口が見つかった。

南部さんは次々と斬新なアイデアを打ち出し、「物理学の予言者」とよばれる。ノーベル賞以外の世界の物理学賞を総なめしていた。小林さんと益川さんの業績は「CP対称性の破れの起源の発見」。73年、宇宙の成り立ちにかかわる「CP対称性の破れ」という現象を説明するためには、物質を形づくる基本粒子「クォーク」が6種類必要だということ、理論的に導き出した。

当時、クォークは3種類しか知られておらず、単独の粒子として取り出せないこともあって、存在自体を疑問視する専門家さえいた。

しかし、74年に4番目のチャームクォーク、77年に5番目のボトムクォーク、94年に最後のトップクォークが確認され、2人の「予言」は現代物理学の「定説」になった。

2008年10月7日  
朝日新聞号外



The Nobel Prize in Physics 2008

Yoichiro Nambu, Makoto Kobayashi, Toshihide Maskawa

2008 年 10 月 7 日

## 2008 年ノーベル物理学賞

スウェーデン王立科学アカデミーは 2008 年ノーベル物理学賞について、その半分を“素粒子物理学と核物理学における自発的対称性の破れの発見”に対してシカゴ大学エンリコ・フェルミ研究所 (米国イリノイ州) 南部陽一郎氏に、残りの半分を“クォークが自然界に少なくとも三世代以上ある事を予言する、対称性の破れの起源の発見”に対して高エネルギー加速器研究機構 (KEK、筑波) の小林誠氏と京都大学の益川敏英氏に贈ることを決定した。



Photo: University of Chicago

Yoichiro Nambu



© The Nobel Foundation Photo: U. Mortan

Makoto Kobayashi



© The Nobel Foundation Photo: U. Mortan

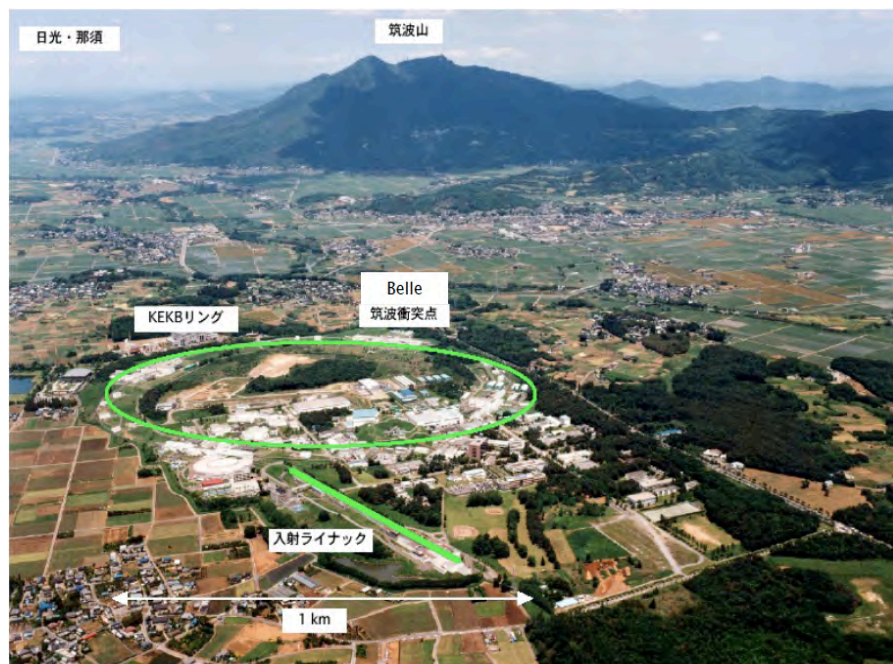
Toshihide Maskawa

小林誠氏と益川敏英氏によって記述された対称性の破れは南部氏の研究したそれとは別種のもので、宇宙の始まりから自然界に存在したと考えられており、これが 1964 年に初めて素粒子実験で発見された時は大きな驚きをもって迎えられた。小林氏と益川氏による 1972 年の説明の重要性が科学界で完全に確認されるに至ったのはごく最近のことである。この業績に対し両氏にノーベル物理学賞が贈られる。両氏は対称性の破れを標準模型の枠組みに沿って説明しつつ、更にこの模型が三世代のクォークを含むまで拡張されることが必須であるとした。ここで予言された新しいクォークの仮説は近年物理実験で確認された。更に最近、2001 年にこのような対称性の破れを示すより多くの現象が米国スタンフォードの BaBar 及び筑波の Belle という二

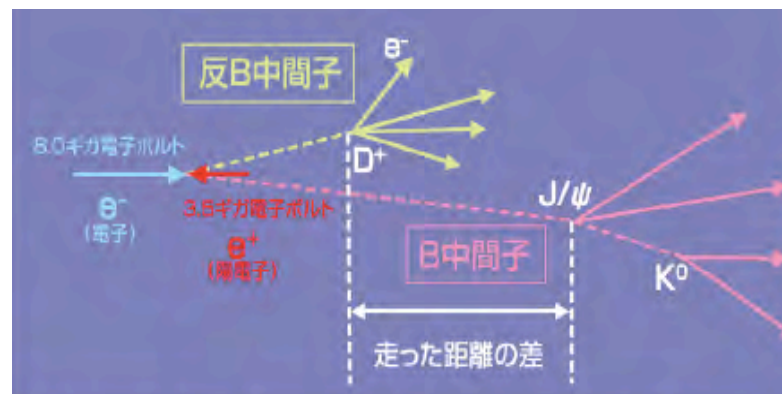
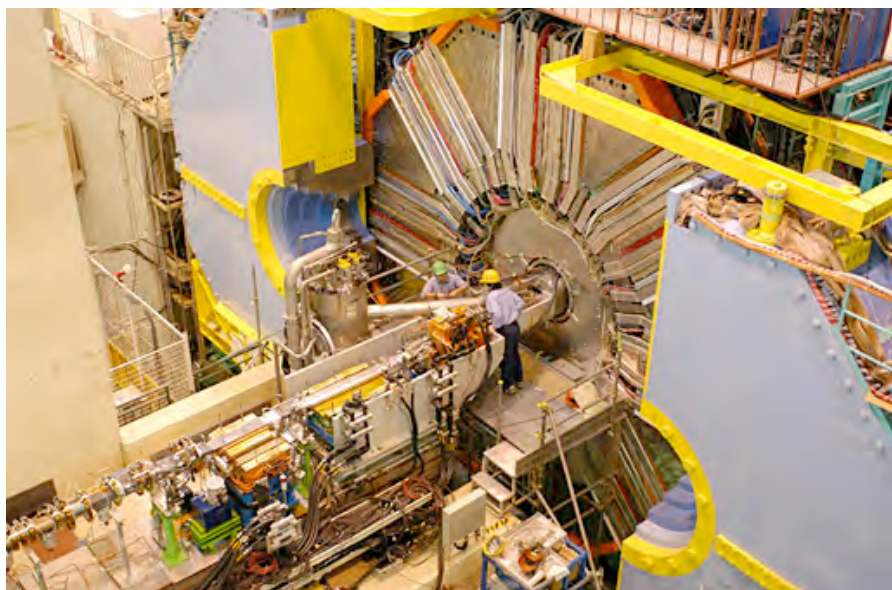
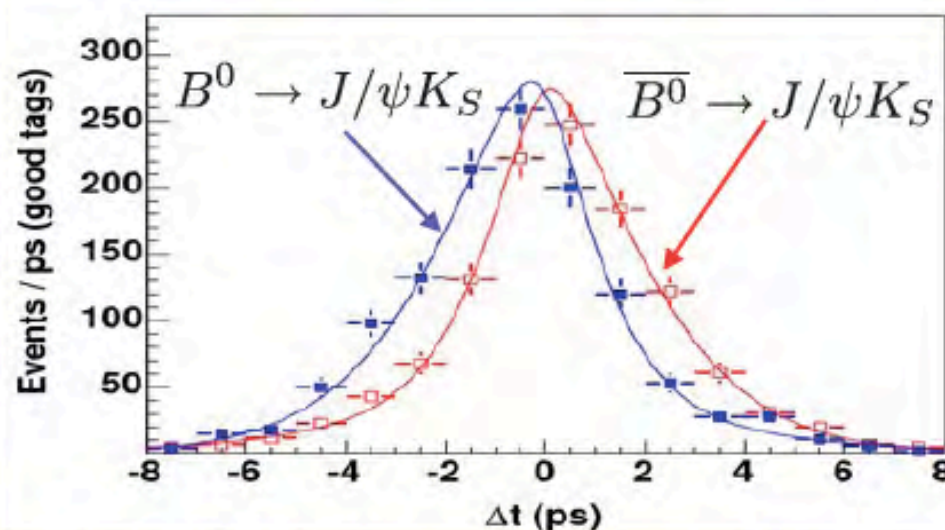
つの検出器によってそれぞれ独立に検証された。その結果は小林氏と益川氏の三十年近く前の予言と完全に一致した。現在まで説明されていない同種の対称性の破れは、約 140 億年前のビッグ・バンで起ったとされる、まさに宇宙の起源の背後にある。初めに同量の物質と反物質が生じたとすると、それらは互いに対消滅してしまうはずである。実際には、反物質を構成する粒子 100 億個について、物質を構成する粒子の方が反物質を構成する粒子よりも一個多い程度の微小なずれがあり、そのような対消滅は起きない。この対称性の破れのために、現在の我々の宇宙が存続していると考えられている。この現象が正確にはどのように起きたのかは、いまだに未解明である。おそらく CERN (ジュネーヴ) の新しい加速器 LHC が、いまだ我々を悩ますこのような謎の一部明らかにするであろう。



# KEKB 加速器, Belle 実験 (KEK, つくば)



小林・益川理論が予言する  
CP 対称性の破れを発見 (Belle)



# この講義のテーマ

- どうやら加速器は科学の進歩に役立っている様だ。
- 加速器で分かる科学（＝物理学）とは、どの様な世界なのか？
- 素粒子・原子核の世界（＝ミクロ）から、宇宙（＝マクロ）の歴史がなぜ分かるのか、どこまで分かってきたのか？
- そもそも「物理学」とはどんな学問なのか？

# 加速器で分かる宇宙の歴史

## 第1部 原子核・素粒子物理学と宇宙

1. イントロダクション
2. ビックバン
3. 極初期宇宙

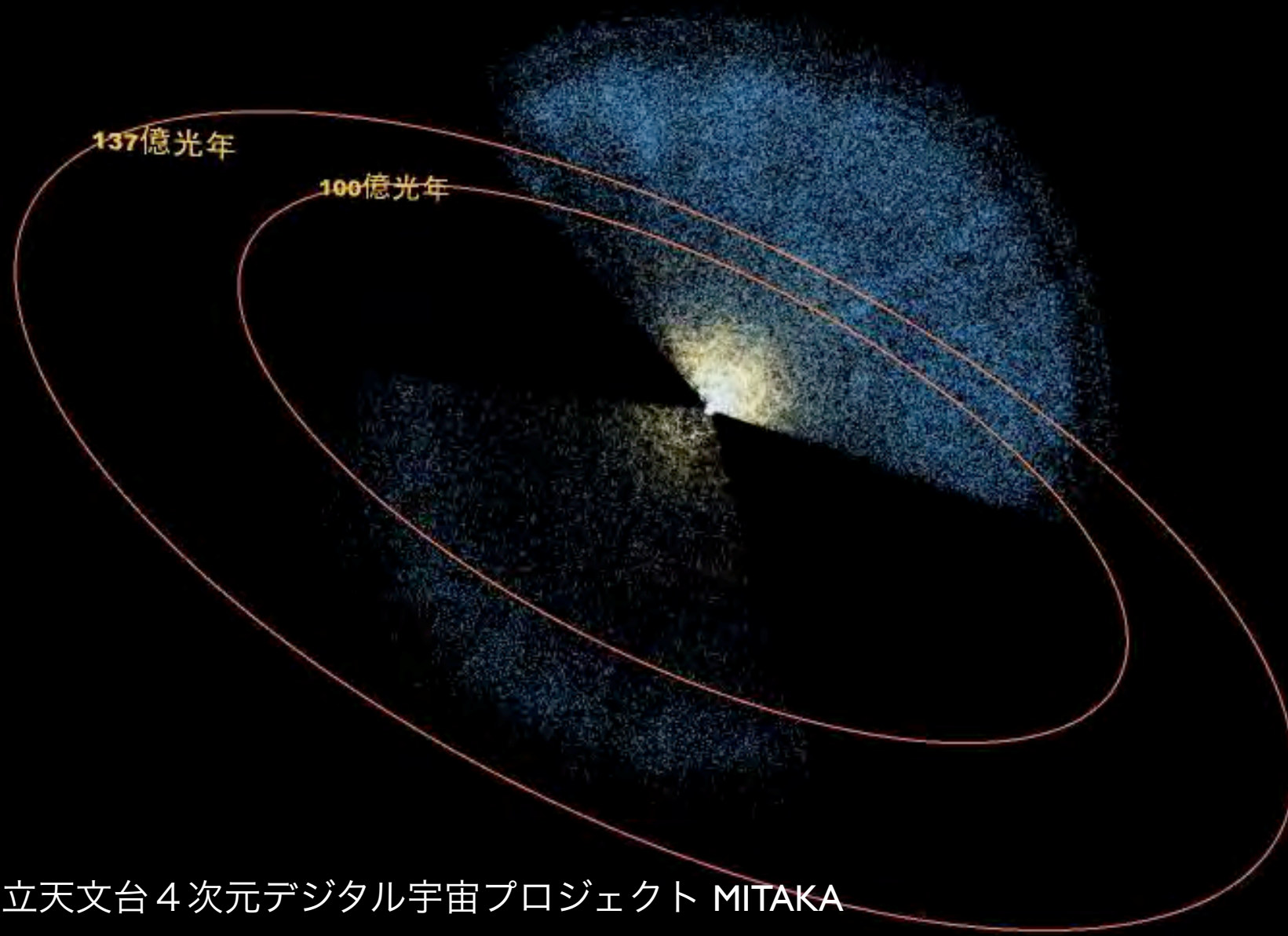
## 第2部 加速器実験で迫る初期宇宙

4. 特殊相対性理論の考え方
5. 加速器実験で「クォークスープ」をつくる



# 1. イントロダクション

物質の階層と現代物理学



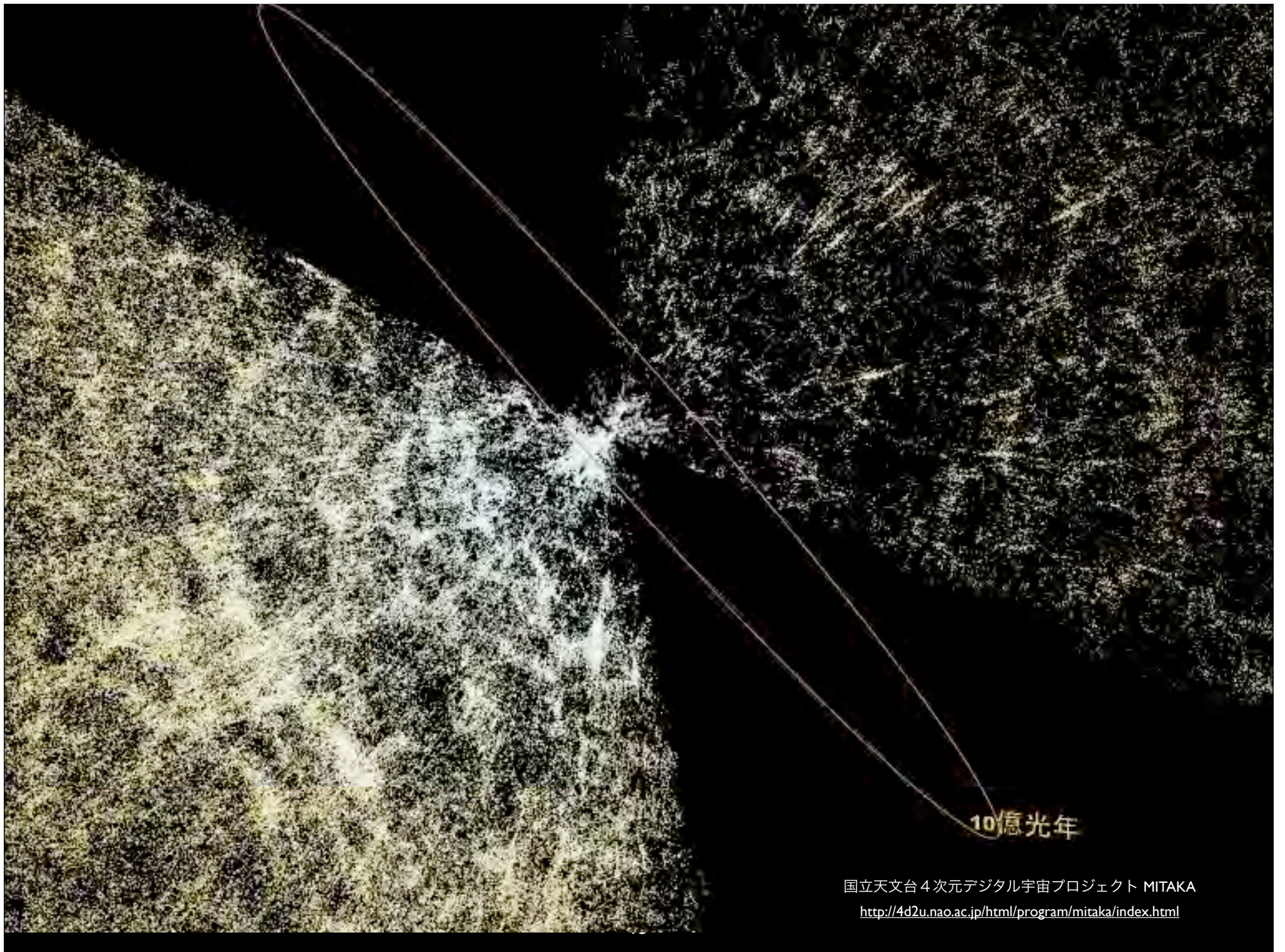
国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト MITAKA

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

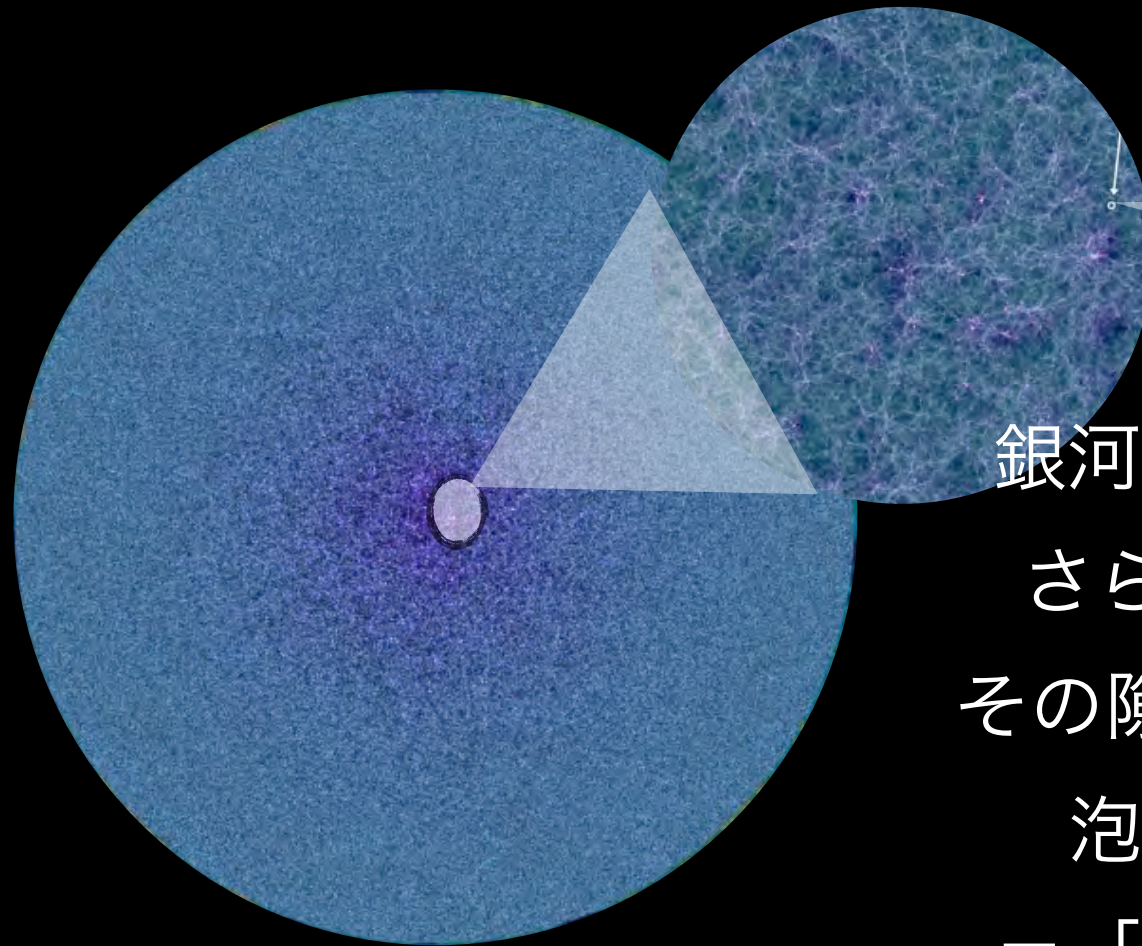


国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト  
FOUR-DIMENSIONAL DIGITAL UNIVERSE PROJECT, NAOJ









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」  
（遠方の宇宙 →  
宇宙初期を見ている）

$> 10^{26}$   
m

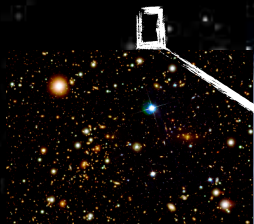


ハッブル望遠鏡

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

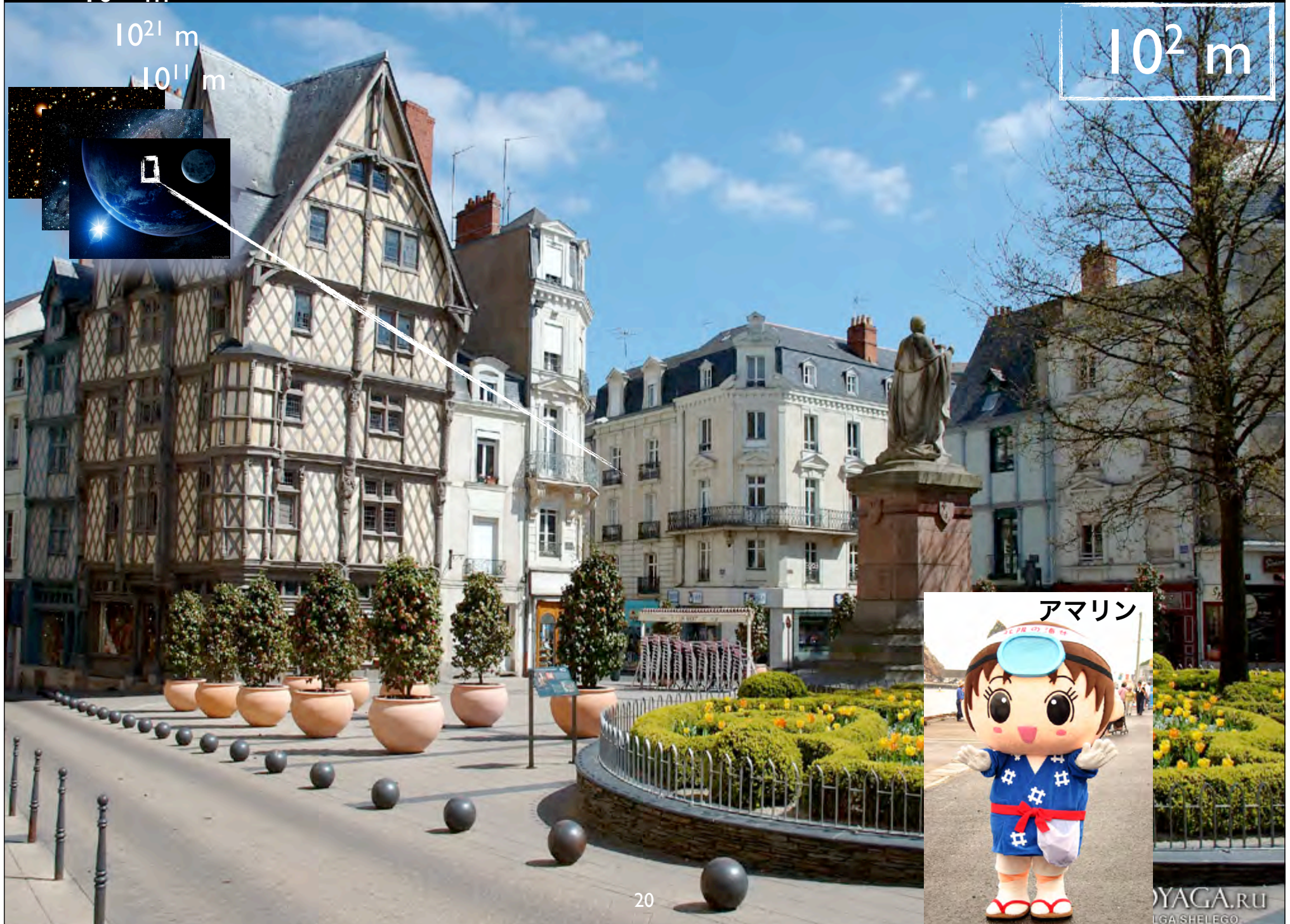


$> 10^{26} \text{ m}$

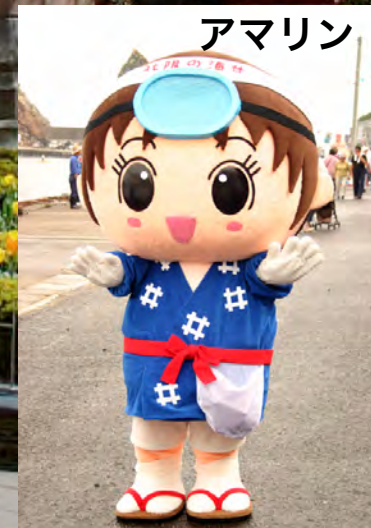
$10^{21} \text{ m}$

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

$10^2 \text{ m}$



アマリン



YAGA.RU  
LGA SHELEGO



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

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

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

$10^2 \text{ m}$

1.70 m



人の大きさ



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

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

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

$10^2 \text{ m}$

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

1.70 m

神経細胞

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

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

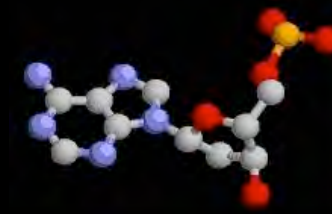
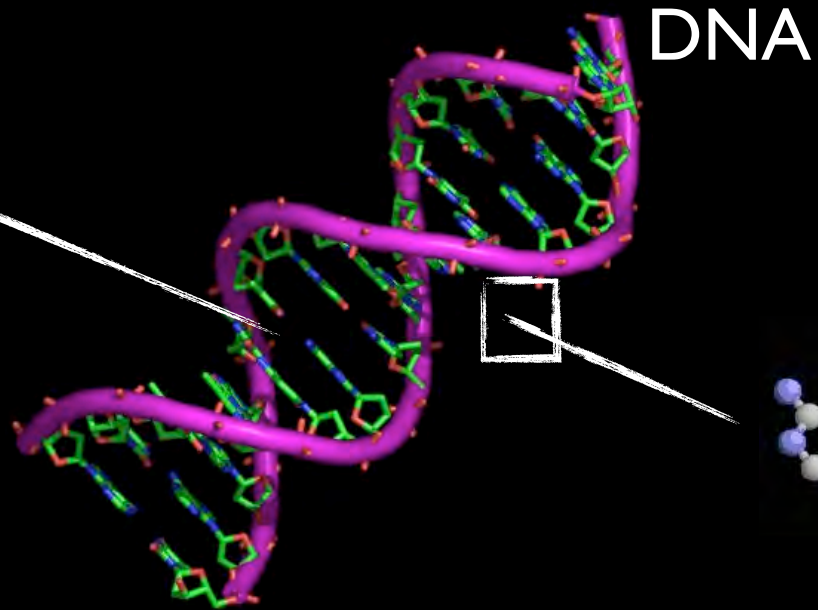
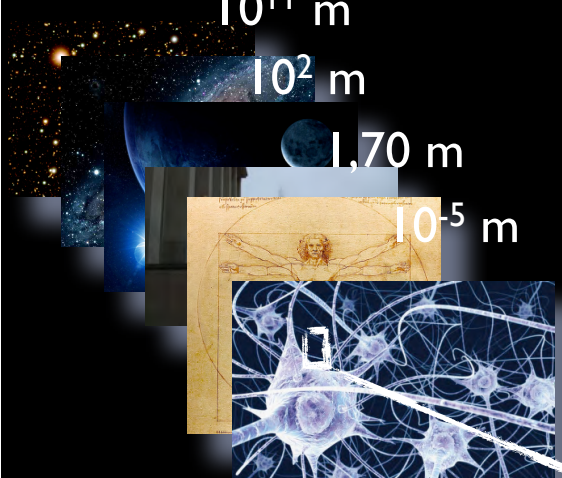
$10^{11} \text{ m}$

$10^2 \text{ m}$

$1.70 \text{ m}$

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

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



分子



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

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

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

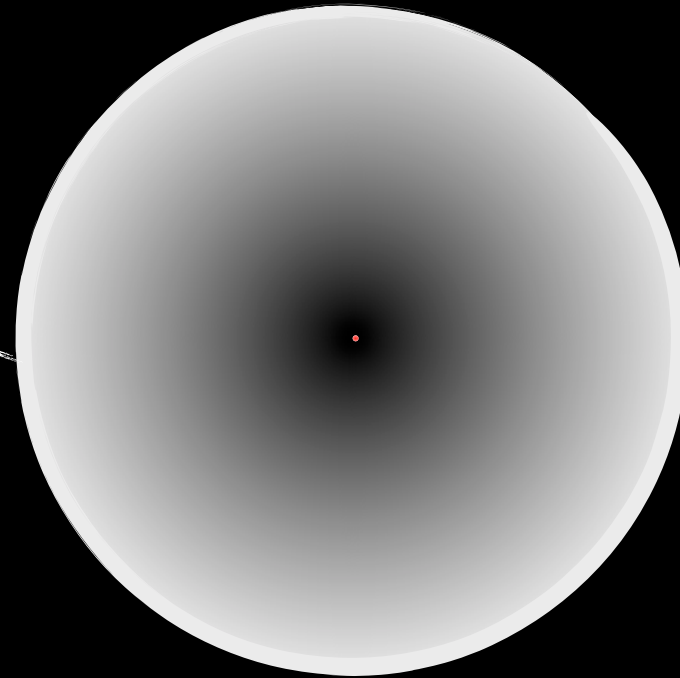
$10^2 \text{ m}$

$1,70 \text{ m}$

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

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

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



水素原子

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

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

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

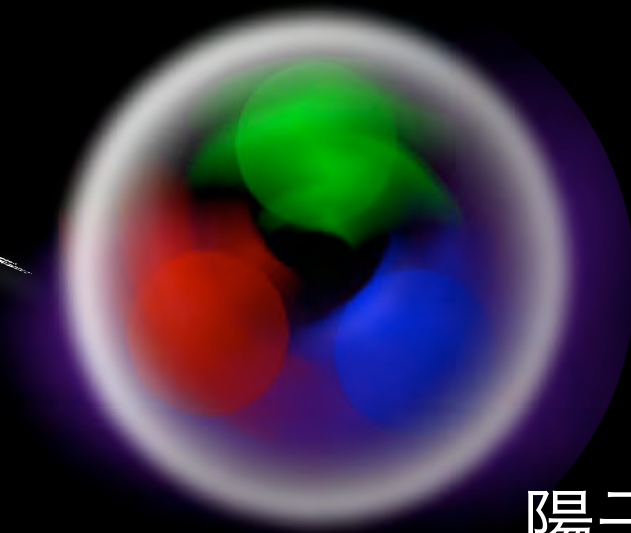
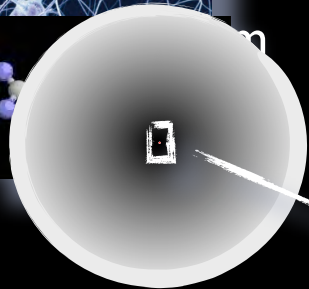
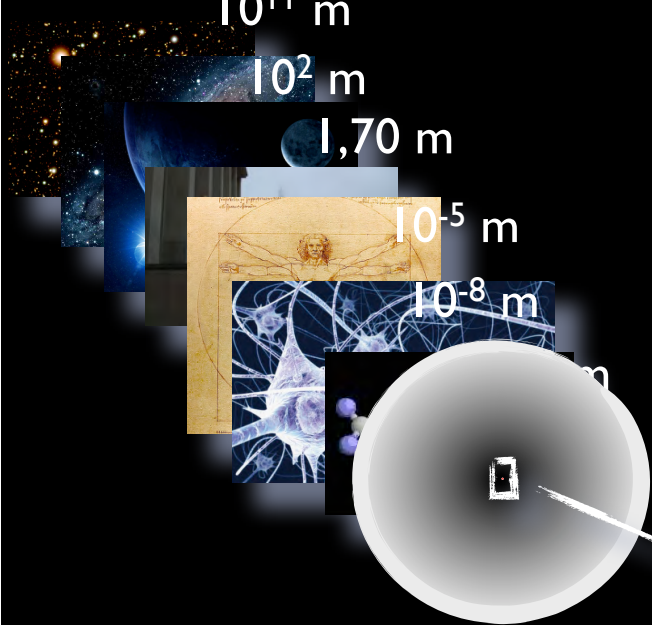
$10^2 \text{ m}$

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

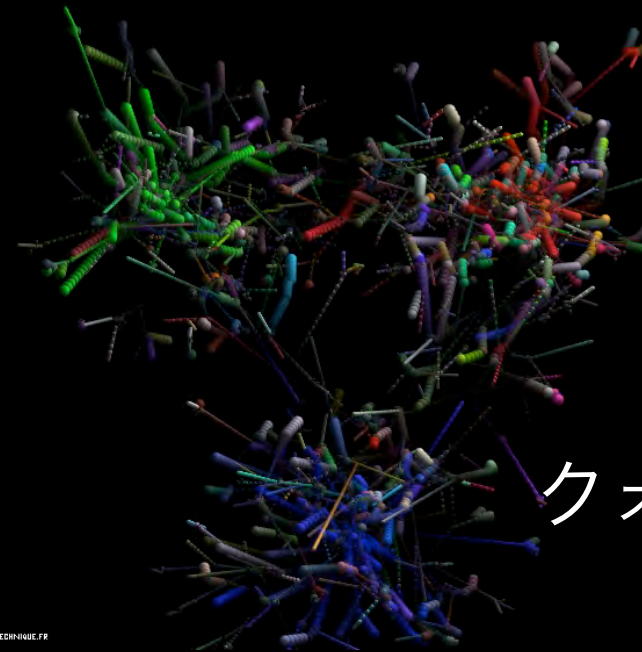
$10^{-5} \text{ m}$

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

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

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

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



クォーク

JFC  
WWW.LACTAMINE.POLYTECHNIQUE.FR

# ウロボロスの蛇（ギリシャ神話）

自然の階層性（ウロボロスの蛇）

Layer Structure of Nature (Snake of Uroboros)



## 物理学の世界

異なる階層（スケール）が互いに  
関連し、つながっている

宇宙 ( $10^{28}\text{m}$ )



素粒子 ( $10^{-18}\text{m}$ )

その差、実に 46 桁！

- ではまず、宇宙のはじまり「ビッグバン」  
についてみてみよう！



# 2. ビックバン

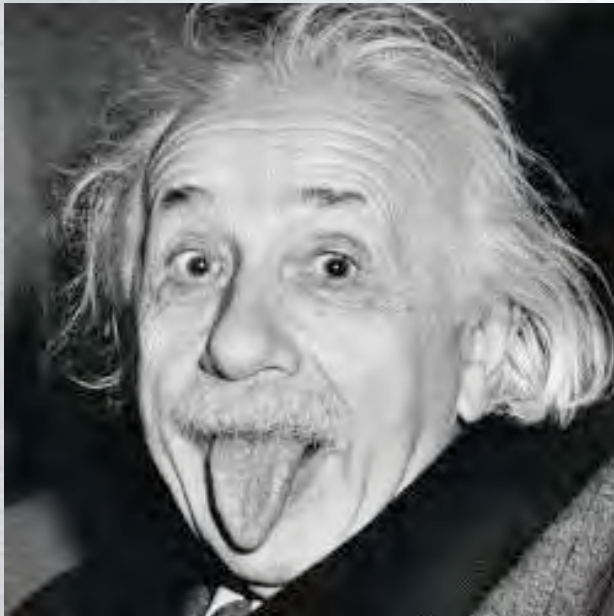
その証拠と意味

# 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



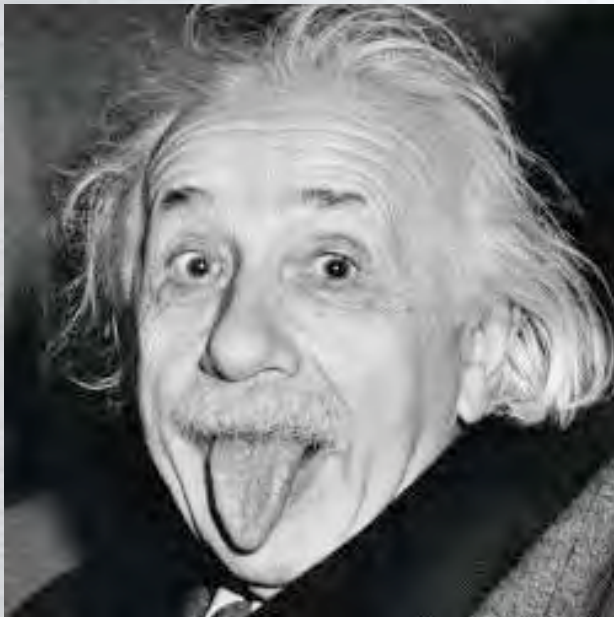
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

# 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

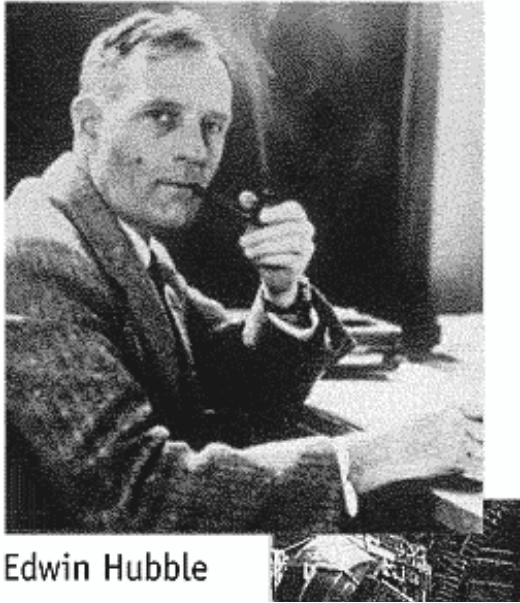
- 1920年後半、一般相対性理論の発表後、その帰結として、ルメートル（ベルギーの物理学者）が宇宙膨張モデル（ビックバン仮説）を提唱。
- しかしアインシュタインが宇宙膨張仮説を否定。「宇宙項」の導入（宇宙膨張の証拠が見つかった後、その過ちを悔いたことは有名）。



ジョージ・ルメートル  
(ベルギー)



# 証拠 1) ハッブルの法則



Edwin Hubble



ロサンゼルス郊外のウィルソン山天文台  
の100 inch フッカー望遠鏡  
銀河を1つ1つ、丹念に調べた。

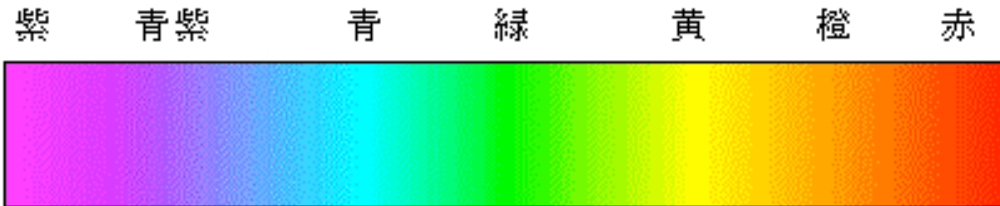
E. ハッブル（米）：1929年、  
銀河後退の観測

- 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

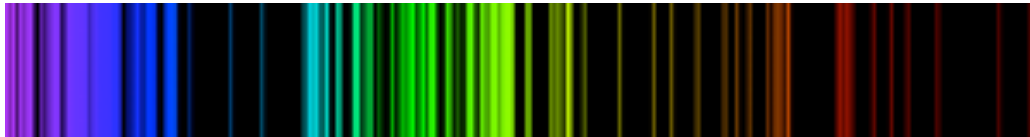
遠方の銀河ほど大きく赤方  
シフトしていることを発見

# スペクトルとは？

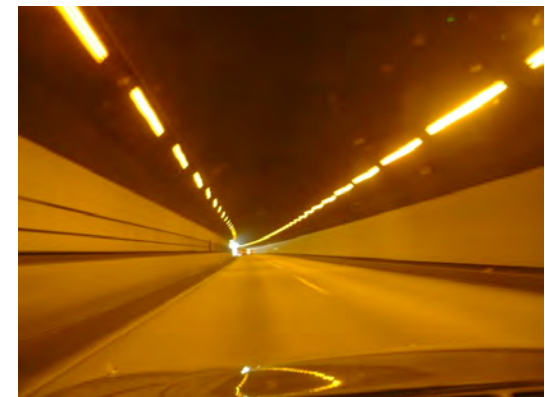
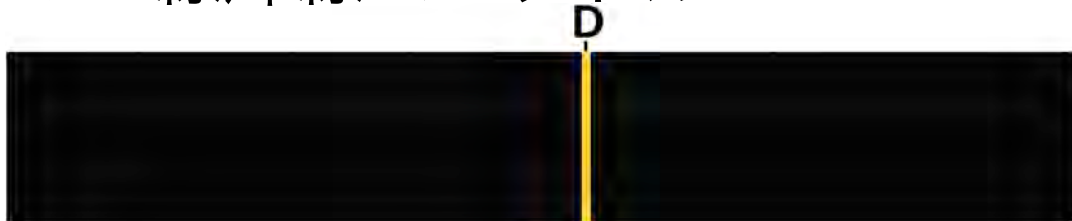
様々な光を分光器（プリズム）にかけてみる  
連続スペクトル



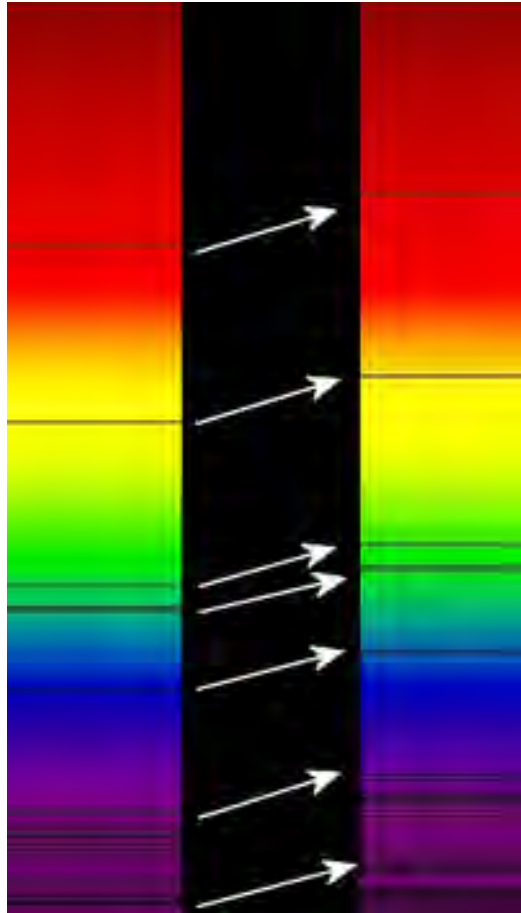
鉄の輝線スペクトル



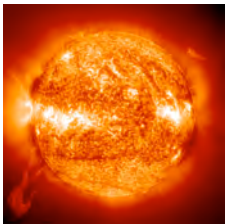
Na D線輝線スペクトル



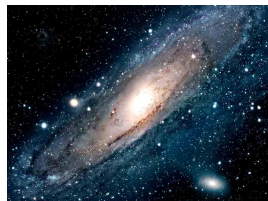
# 赤方偏移



太陽光



遠方銀河



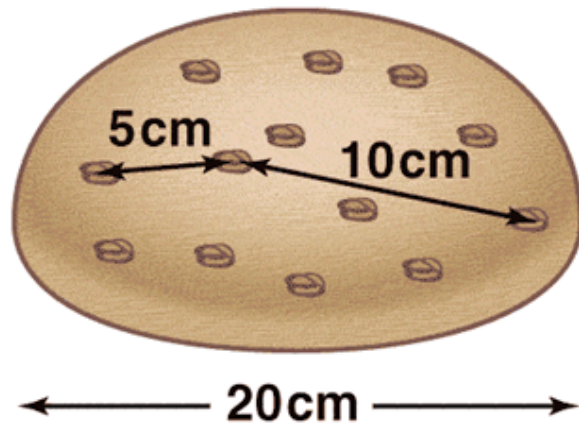
太陽の光のスペクトル(左)と遠方銀河のスペクトル(右)を比較。

遠方銀河の吸収線が赤い方にシフトしている = 「赤方偏移」

- 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)



- ・ 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

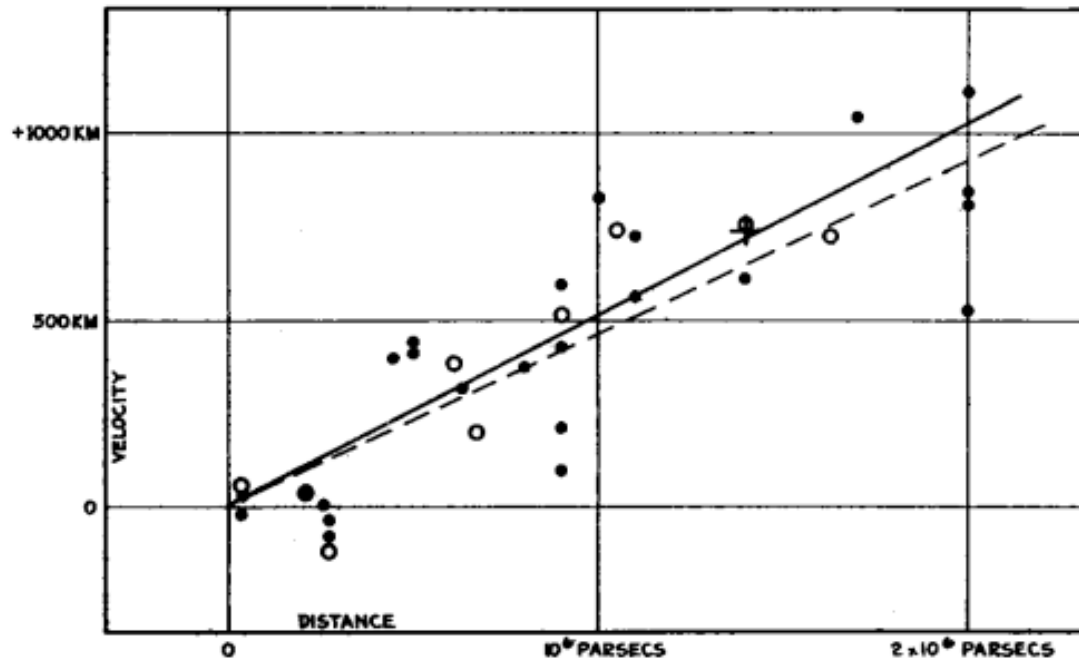


FIGURE 1

## 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距離の誤差が大きく、かつ銀河間の距離が約1/7だったことが分かっている)

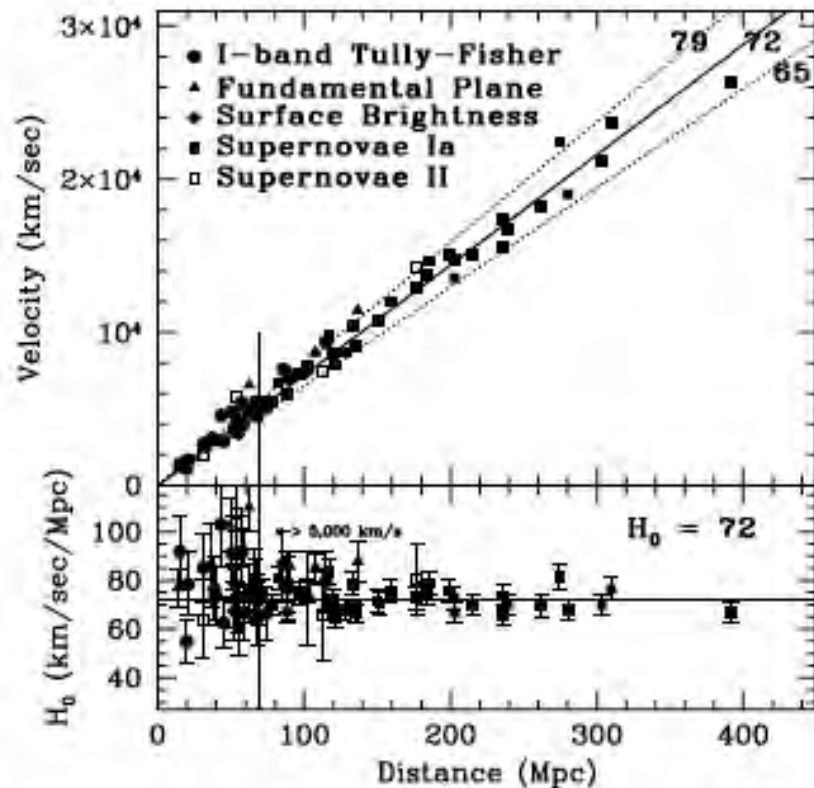
# 距離

## 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）



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



1 3 億光年までの銀河、  
超新星を測定



**ハッブルの法則に従う**

(実は加速度膨張をしていることも分かっている、  
2011年のノーベル賞)

# 証拠 2) 宇宙背景放射



Robert Wilson & Arno Penzias (ベル研究所)

1960年代

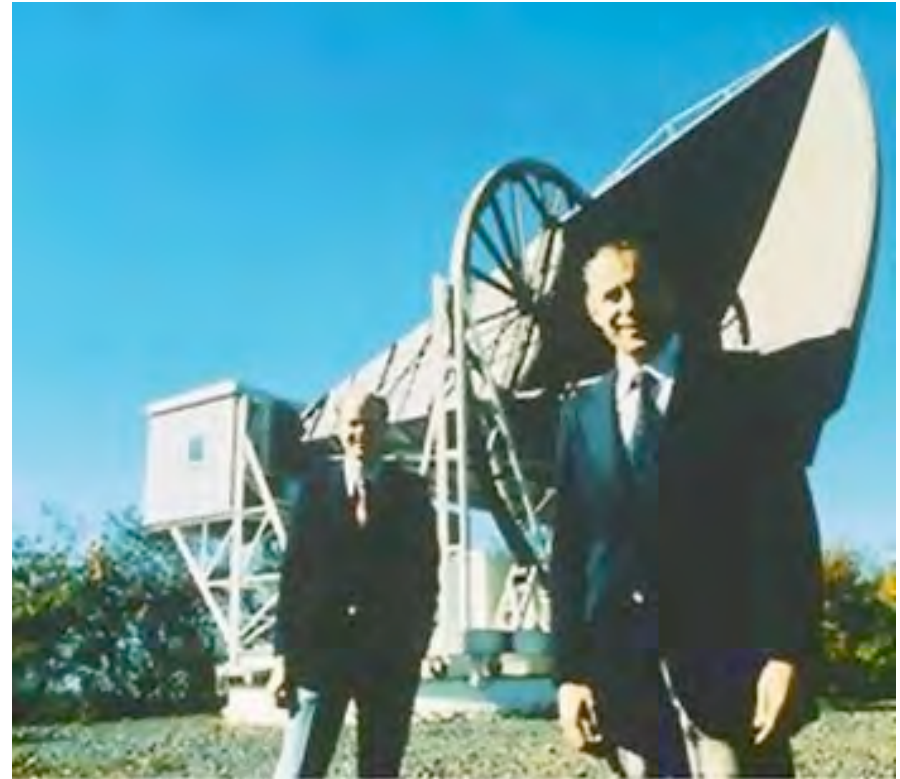
- ・ 宇宙マイクロ波背景放射の観測 ( $\lambda = \text{mm} - \text{m}$ )
- ・ 銀河が発する電波を観測する目的で始めた。
- ・ その中に「雑音」があらゆる方向から、同じ強度でやってきていることを発見！

→ 温度：約 3 K



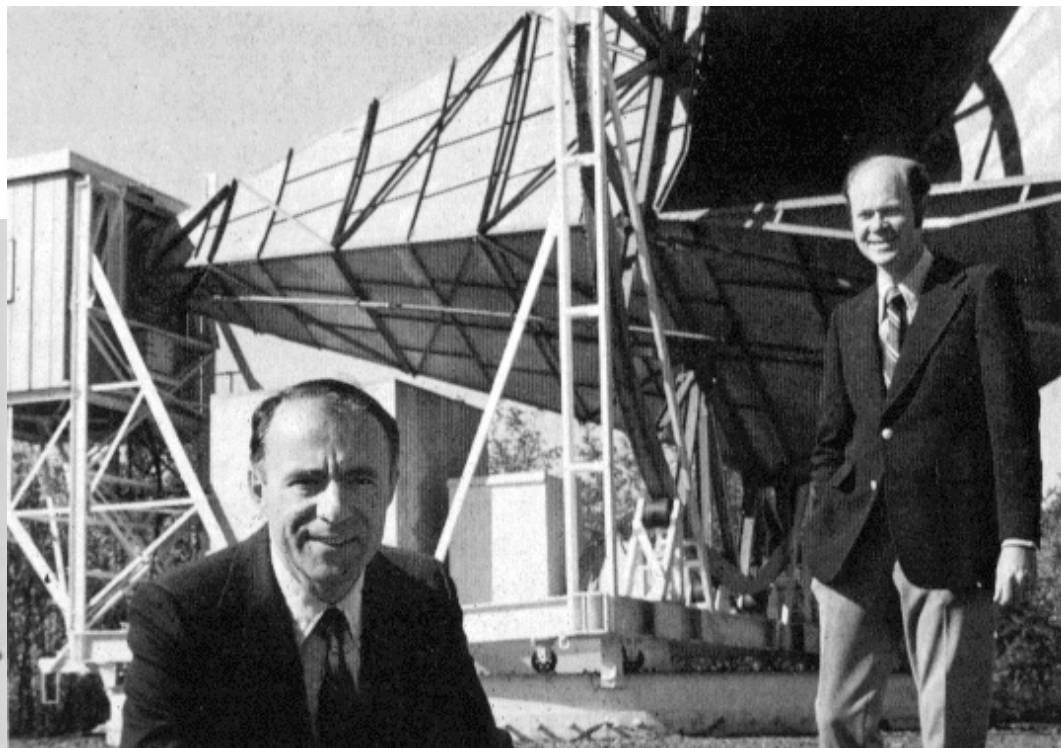
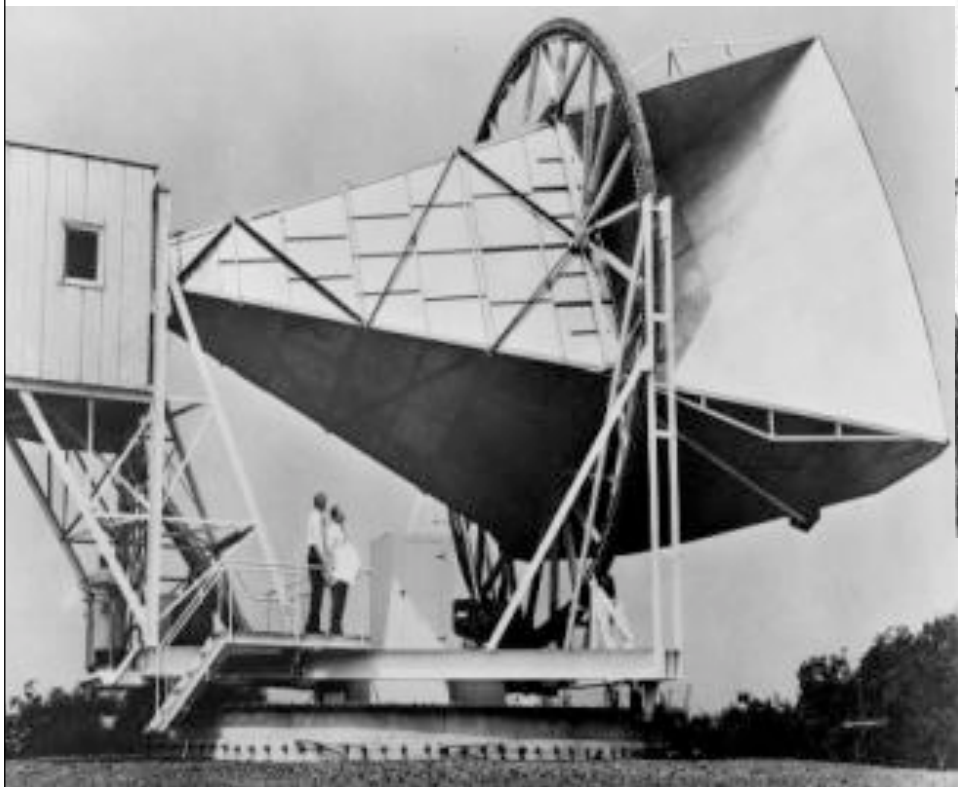


A. ペンジアス



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**

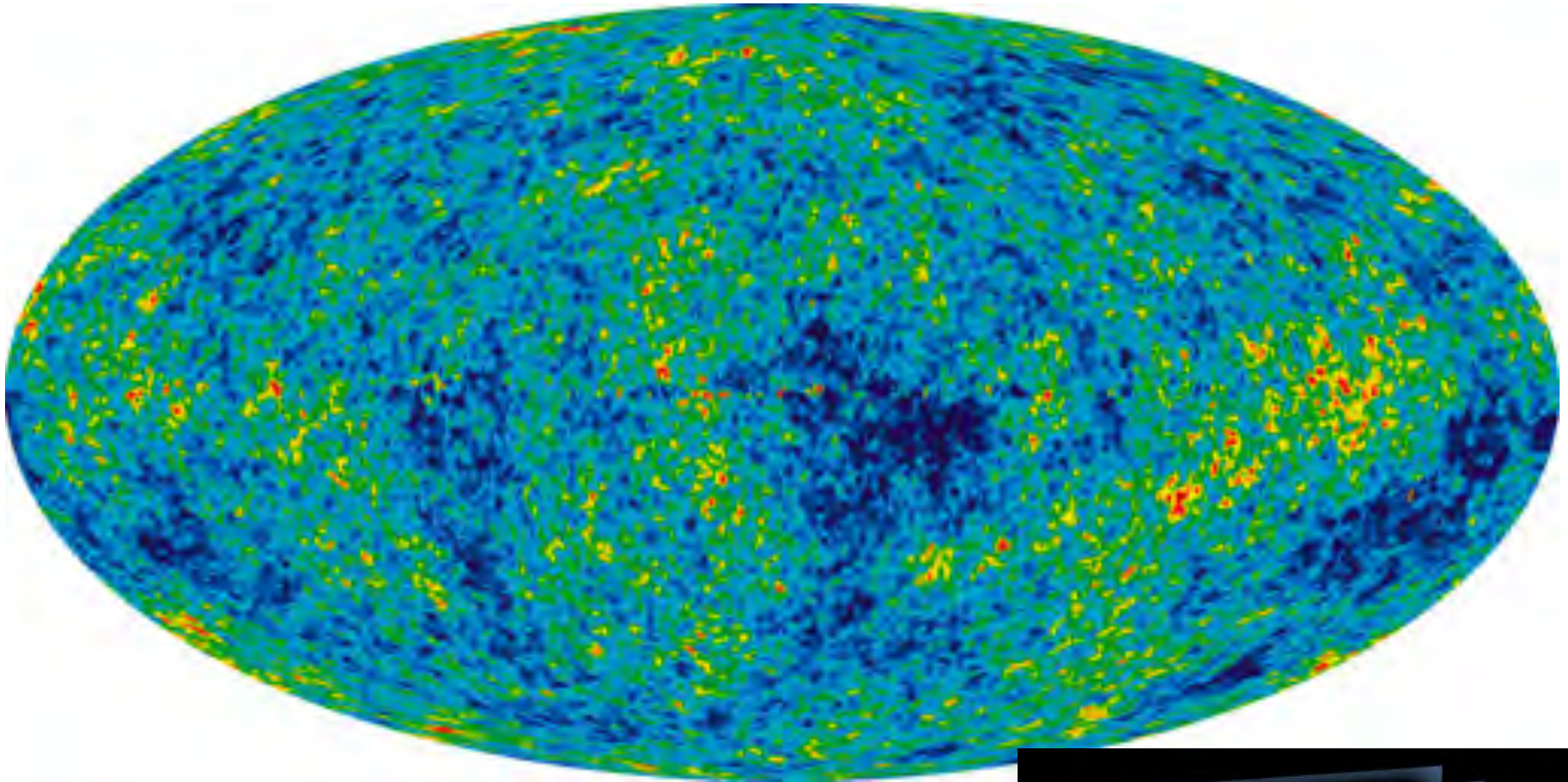


アンテナについた鳥の糞の除去を丹念に行った→  
ノーベル賞！

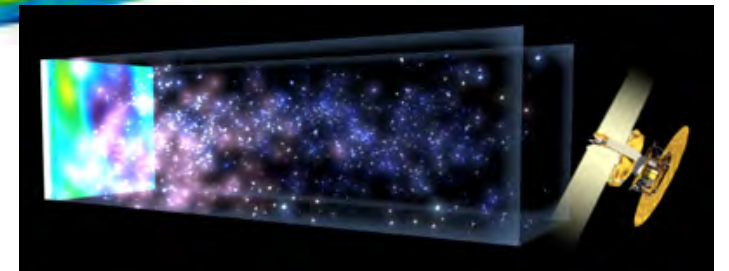
余談：アナログテレビのホワイトノイズ（赤ちゃんの泣き止み） = 3K の宇宙背景放射



# 宇宙背景放射は一様ではなく、揺らいでいた！ (NASA の衛星 WMAP, 2001-2010)

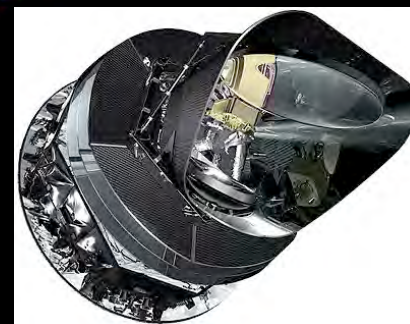
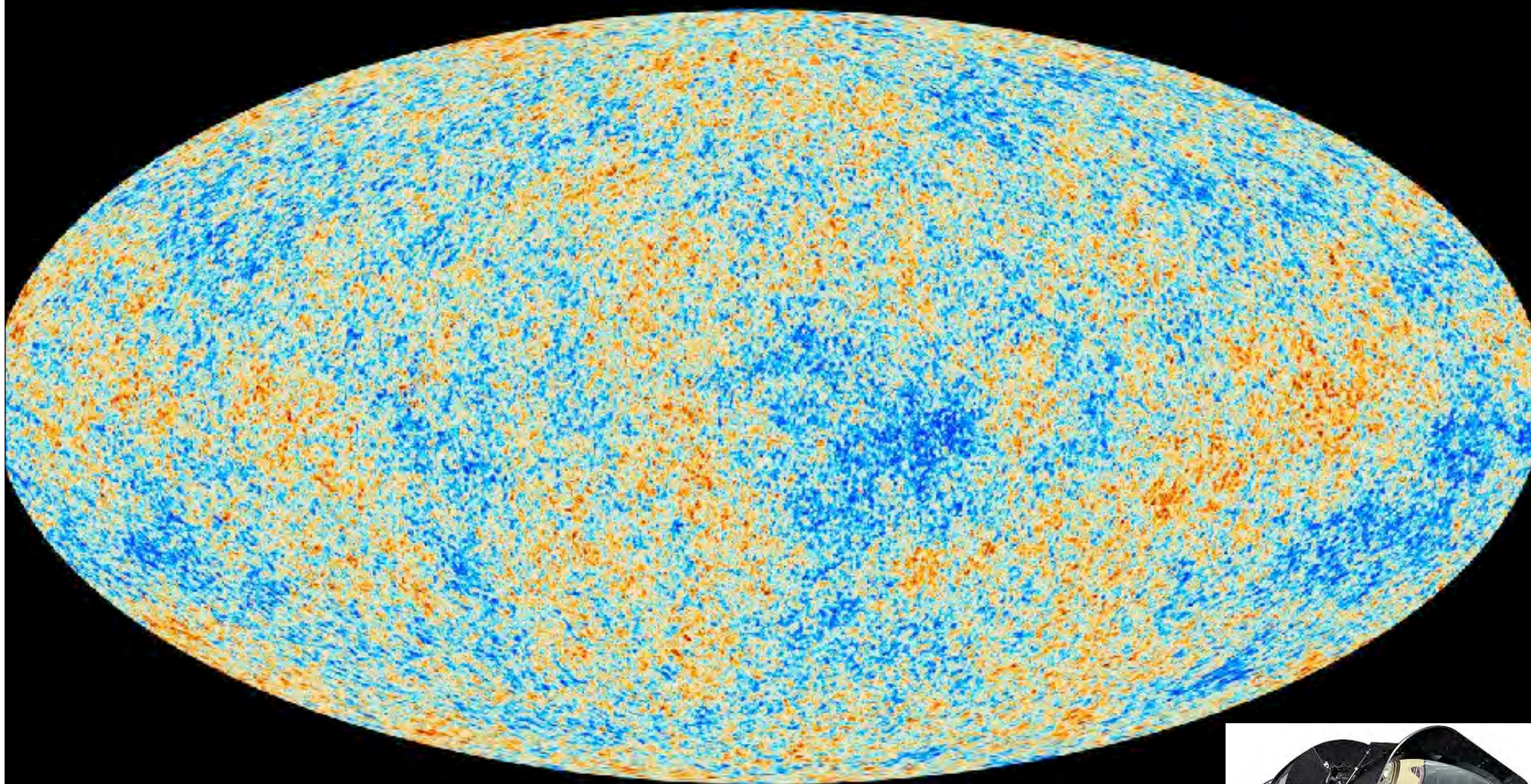


- WMAP 衛星による温度揺らぎ測定



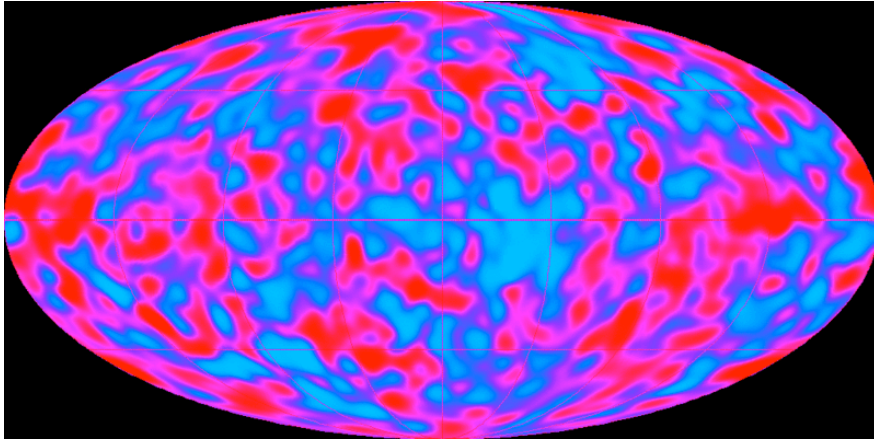


# 欧州衛星「プランク」による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の全天マップ (2013)

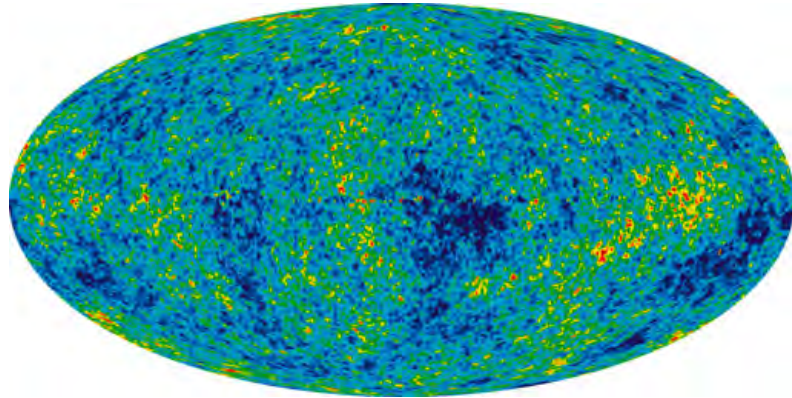


[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/planck/news/planck20130321.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/planck/news/planck20130321.html)

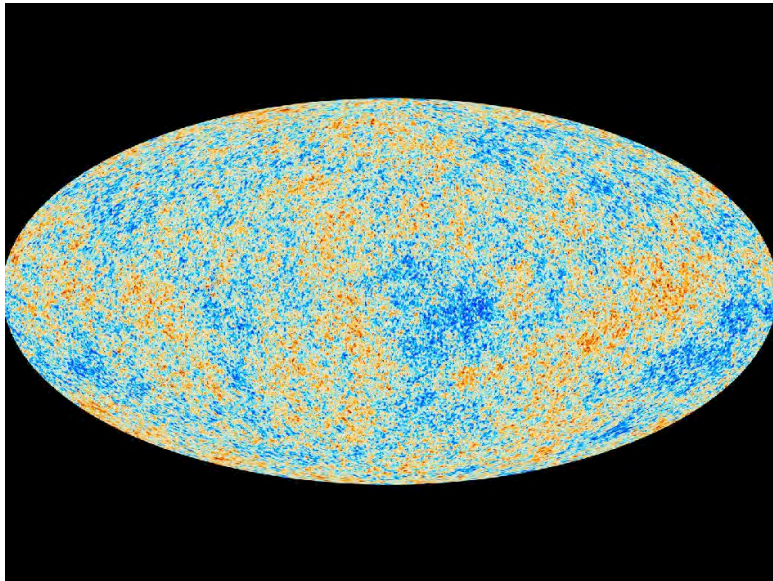




**COBE (1989-1992)**



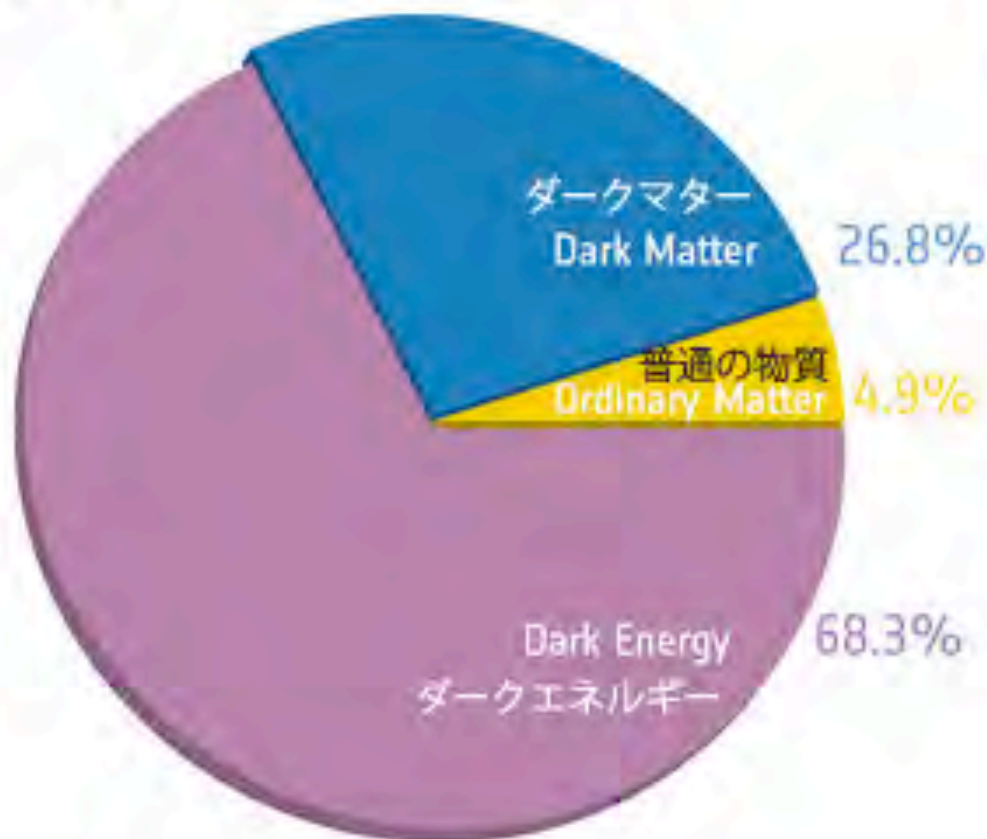
**WMAP (2001-2010)**



**PLANCK (2009 - 2013)**

# 宇宙の組成 (PLANCK, 2013)

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/planck/news/planck20130321.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/planck/news/planck20130321.html)



ダークエネルギー、  
ダークマターの  
正体は未だ不明



**21世紀の物理学の  
重要テーマの1つ**

**宇宙年齢：138億年**

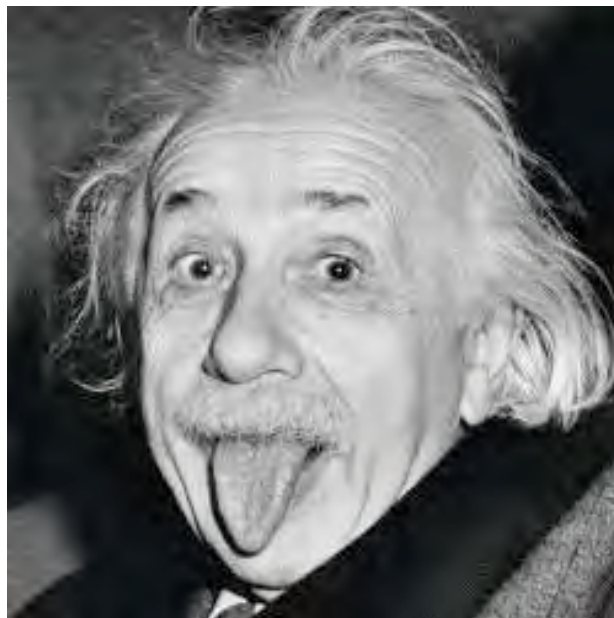


# 「ビッグバン」の意味するところ

- 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138億年
- つまり138億年前に、**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**

ひと休み

# 物理屋（＝物理学者） という職業とは？



# 物理屋とは？

- 理論屋（理論物理学者）と実験屋（実験物理学者）がいる。
- アインシュタインやヒッグス氏、小林・益川両氏、南部氏は理論屋
- 小柴氏（ニュートリノ実験）などは実験屋
- **物理屋（あるいは研究者）に共通する性格（私見含む）**
  - 面白い現象や、新しい説明できない現象が大好き。
  - つまり実験屋、理論屋ともに、何か新しい発見を求めている！
  - 研究者一般に共通することであるが、緻密さ、論理的思考がもとめられる。
  - 実験屋は、体力勝負（根気）という側面も。



# 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

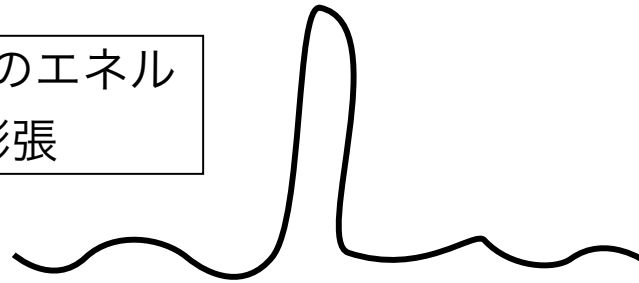
① 真空のエネルギーの揺らぎ

正のエネルギー

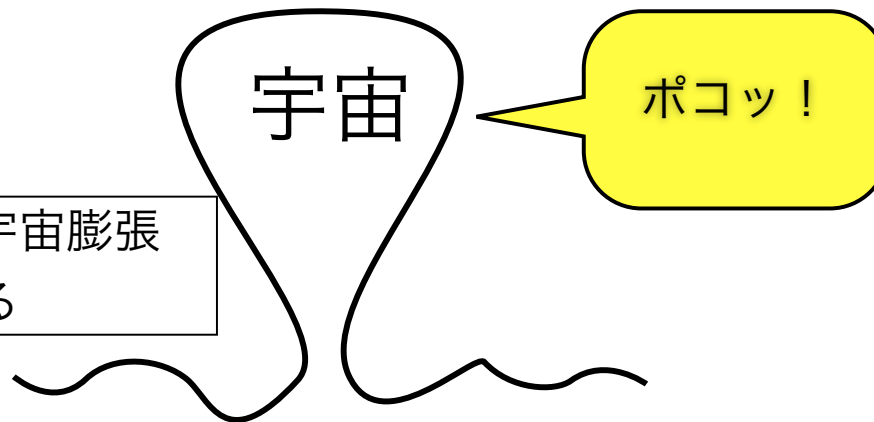


負のエネルギー

② ある確率で正のエネルギーの方へ膨張



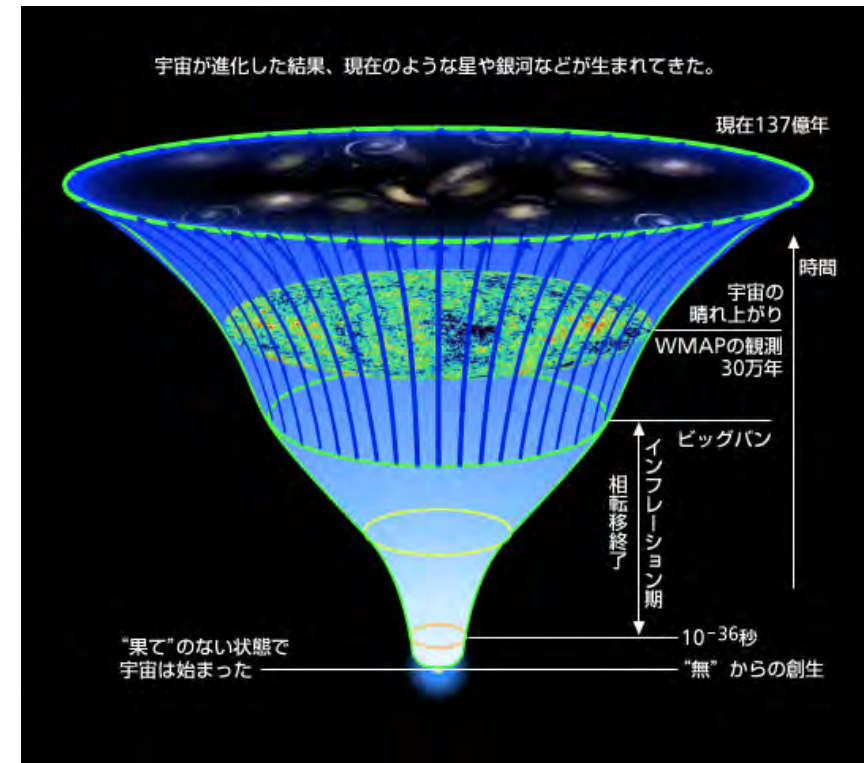
③ インフレーション宇宙膨張  
で宇宙が生まれる





# 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）



$$H+H \Rightarrow D+e^++\nu$$

クォーク

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

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

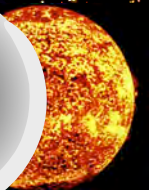
0.5	100	$10^3$
-----	-----	--------

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

レプトン

$$n \Rightarrow p+e^-+\bar{\nu}$$

質量  $0-10^5$  ?



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

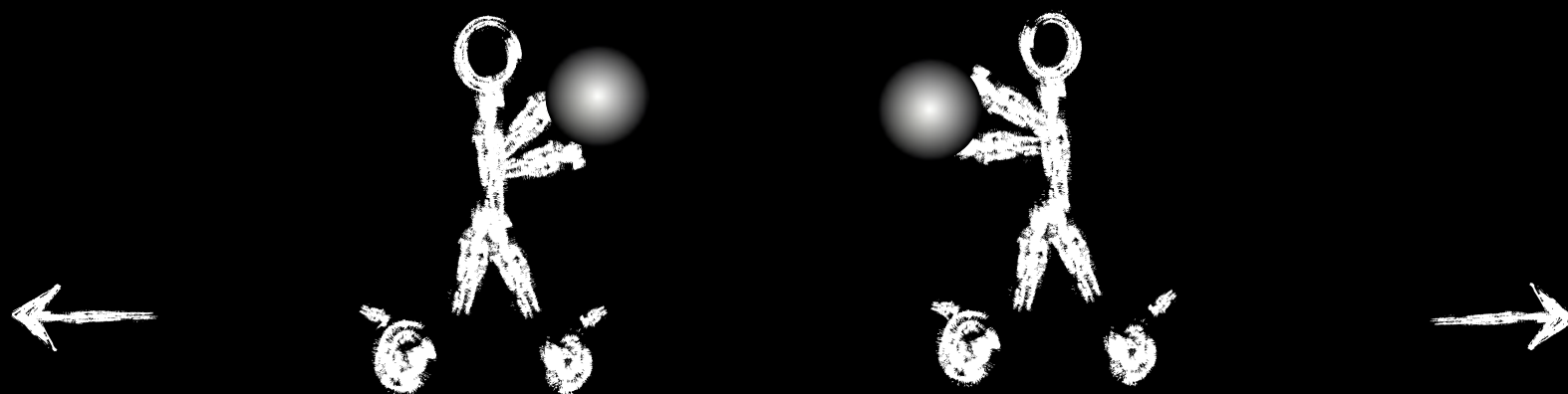
0	$10^4$
---	--------

ゲージ粒子 (力)



# ゲージ粒子の交換によって

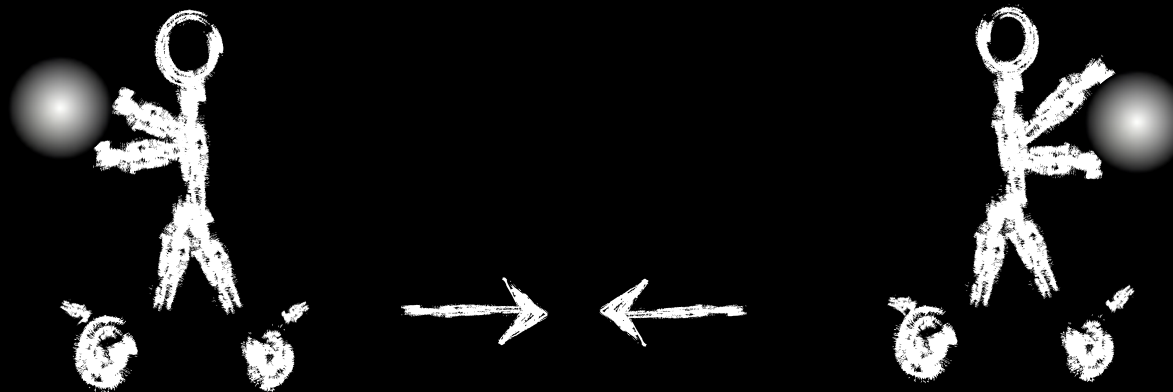
## 力が生まれる



斥力 (=反発力)

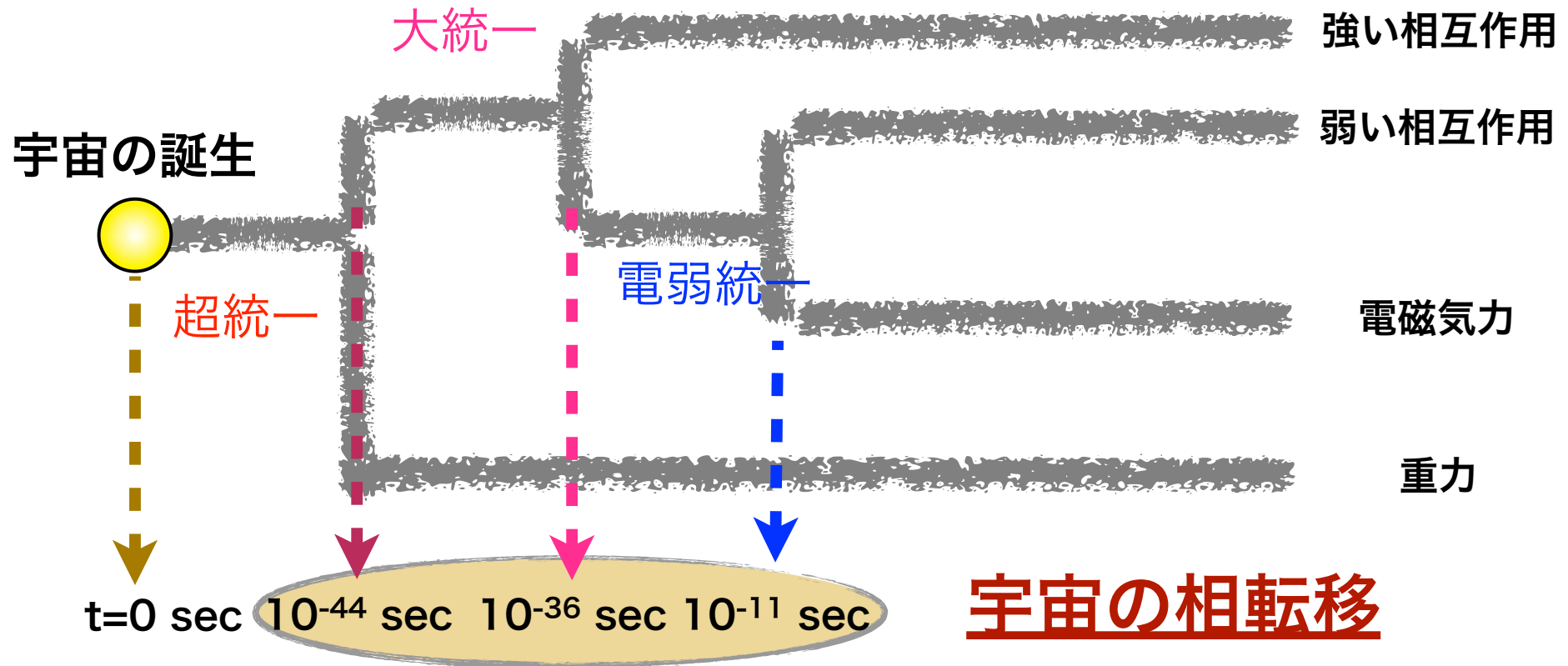
ゲージ粒子の交換によって

力が生まれる



引力作用

# 宇宙の進化と4つの力



素粒子に**質量**が生まれる  
(=素粒子に個性が生まれる)



# 質量とは何か？

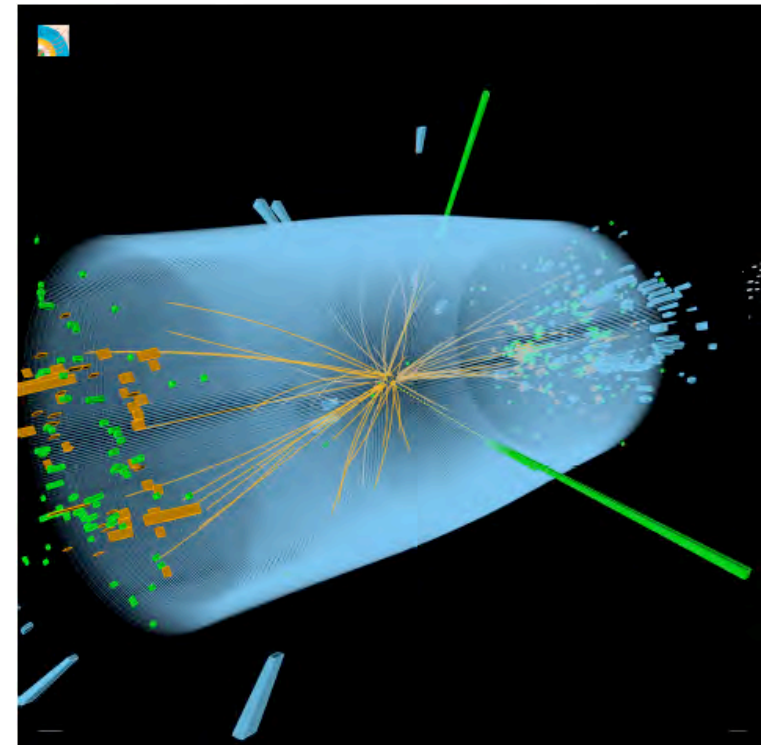
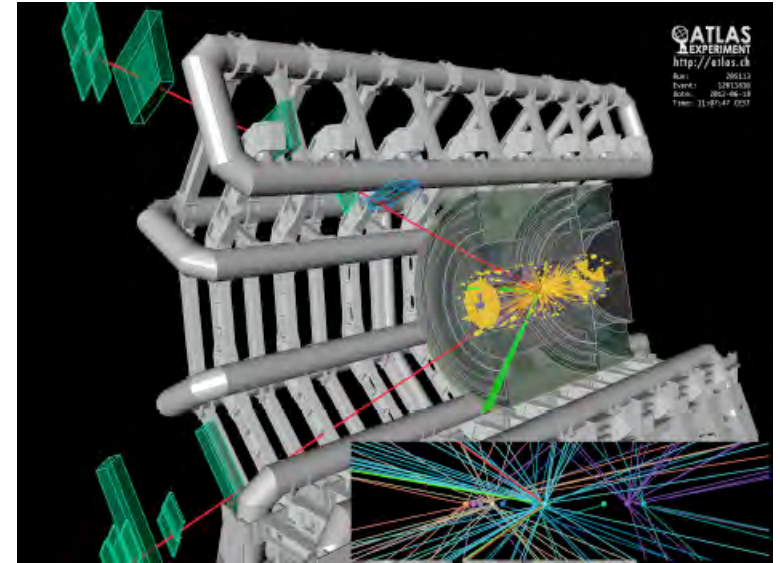


- 「もの」には重さがある。
- 無重力状態の宇宙空間でも、物体がもつ固有の質量は変わらない。
- すなわち質量とは、物体が本来もつ「動かしにくさ」（＝慣性）
- では、物体（例えば陽子）の質量は何で決まっているか？

# ヒッグス（らしき）粒子の発見 (2012.7)



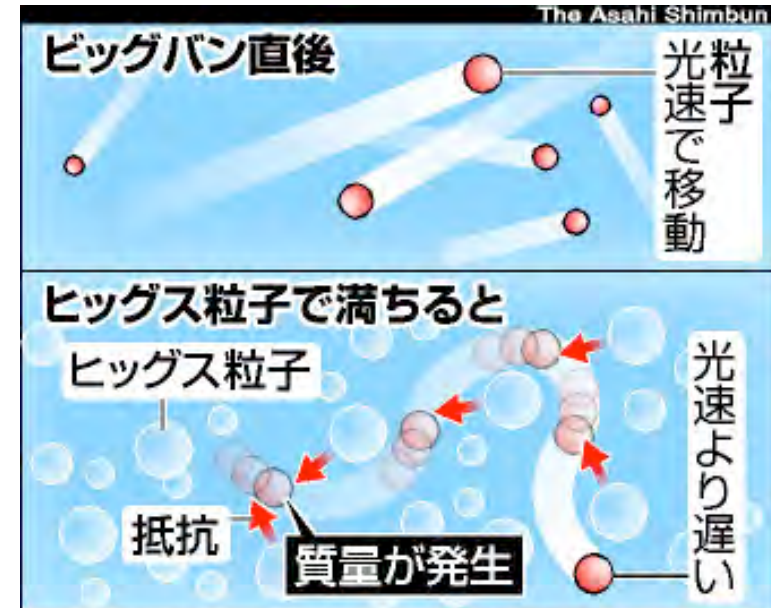
CERN での記者会見の様子  
(2012.7)





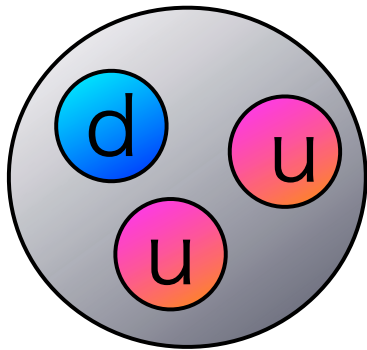
# ヒッグス場による質量獲得

- ビックバン直後は、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  $u$  (アップ) クォークは 3 ( $\text{MeV}/c^2$ ),  $t$  (トップ) クォークは  $10^5$  ( $\text{MeV}/c^2$ ), 光 (フォトン) は 0 (相互作用しない) という具合に。

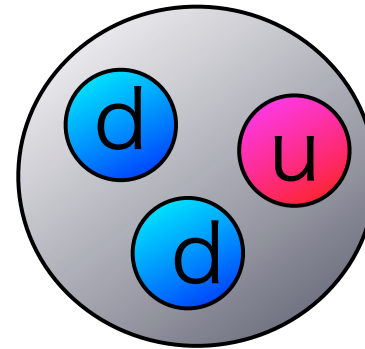




# 陽子と中性子



陽子 (uud)



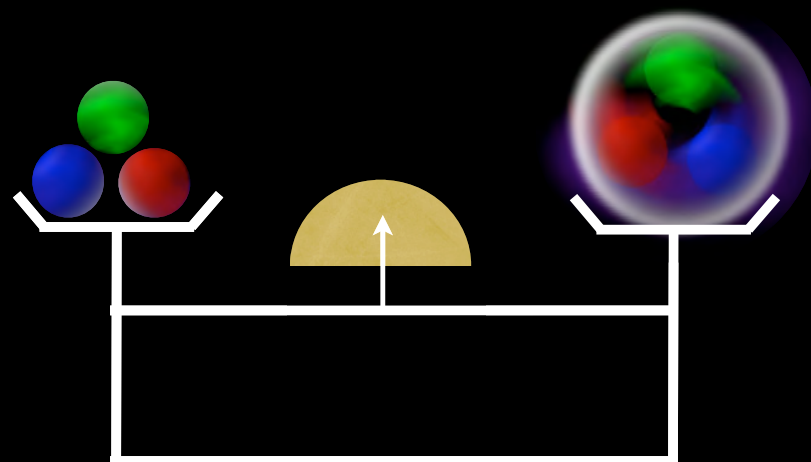
中性子 (udd)

<

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 ~ u (アップ) クォークと d (ダウン) クォークの質量差、ほんのわずか (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

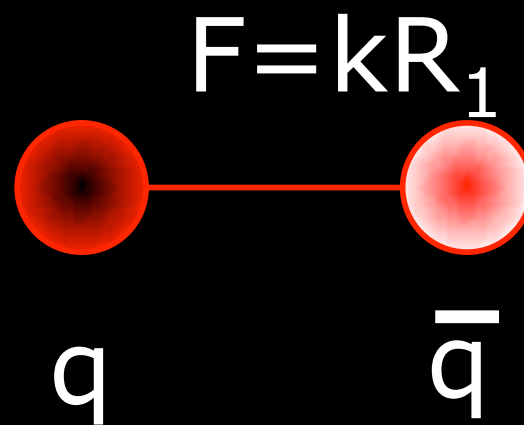
= 陽子の質量の 1 % にすぎない！

(木の玉を 3 つくっつけたら、鉄の玉になった)

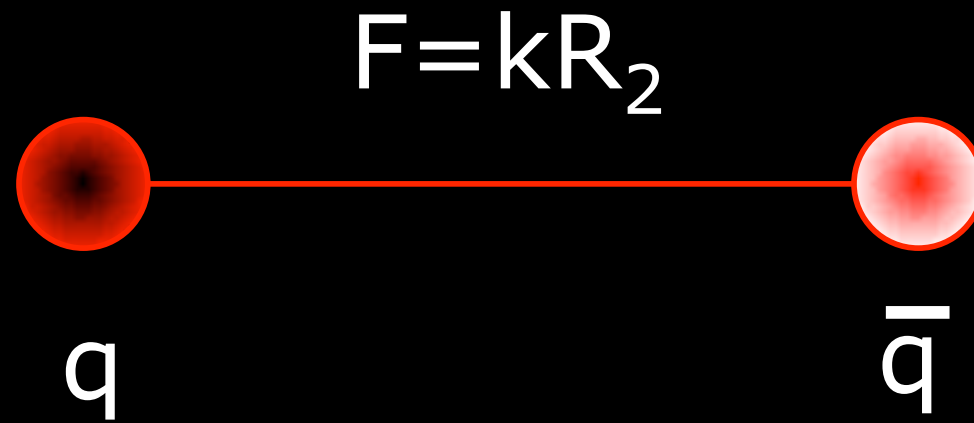
# 質量の源は？

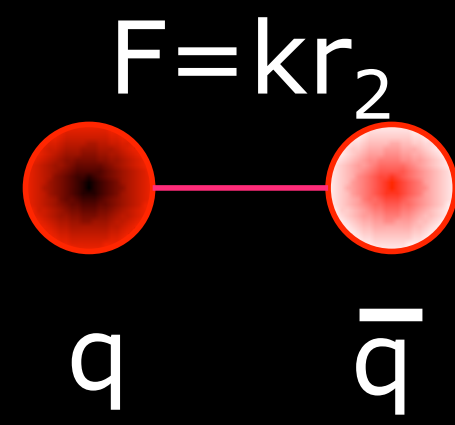
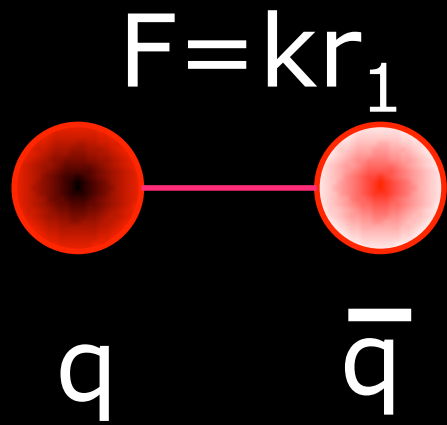
- では残りの99%の陽子の質量は誰がになっているのか？
- まずは陽子を構成している素粒子、「クォーク」の間に働いている「強い相互作用」を考えてみよう。





バネ常数：  
フックの法則







# 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。

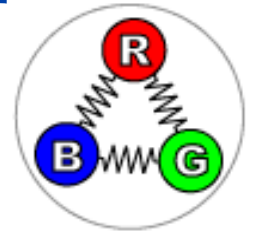
◆ 「縮んだバネ」＝力学的エネルギーを蓄えた状態。

- $E = mc^2$  : 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

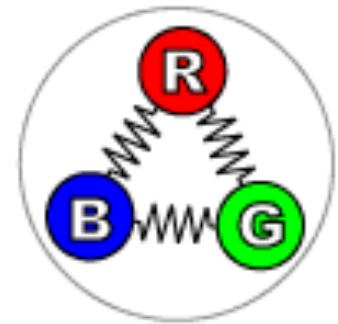
- **クォーク**やその力の媒介粒子である**グルーオン**は、決して単体では存在できない。



- **「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？

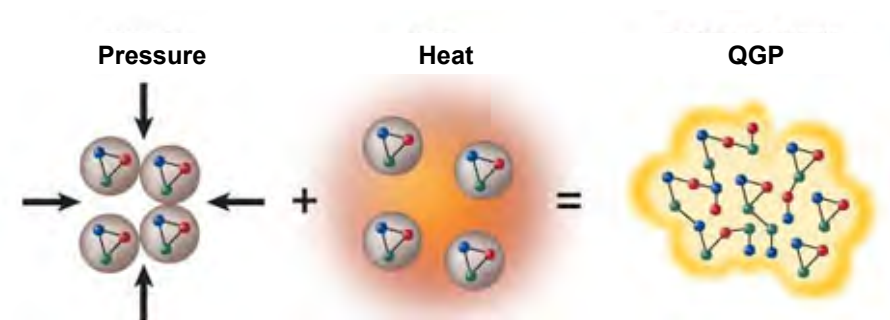




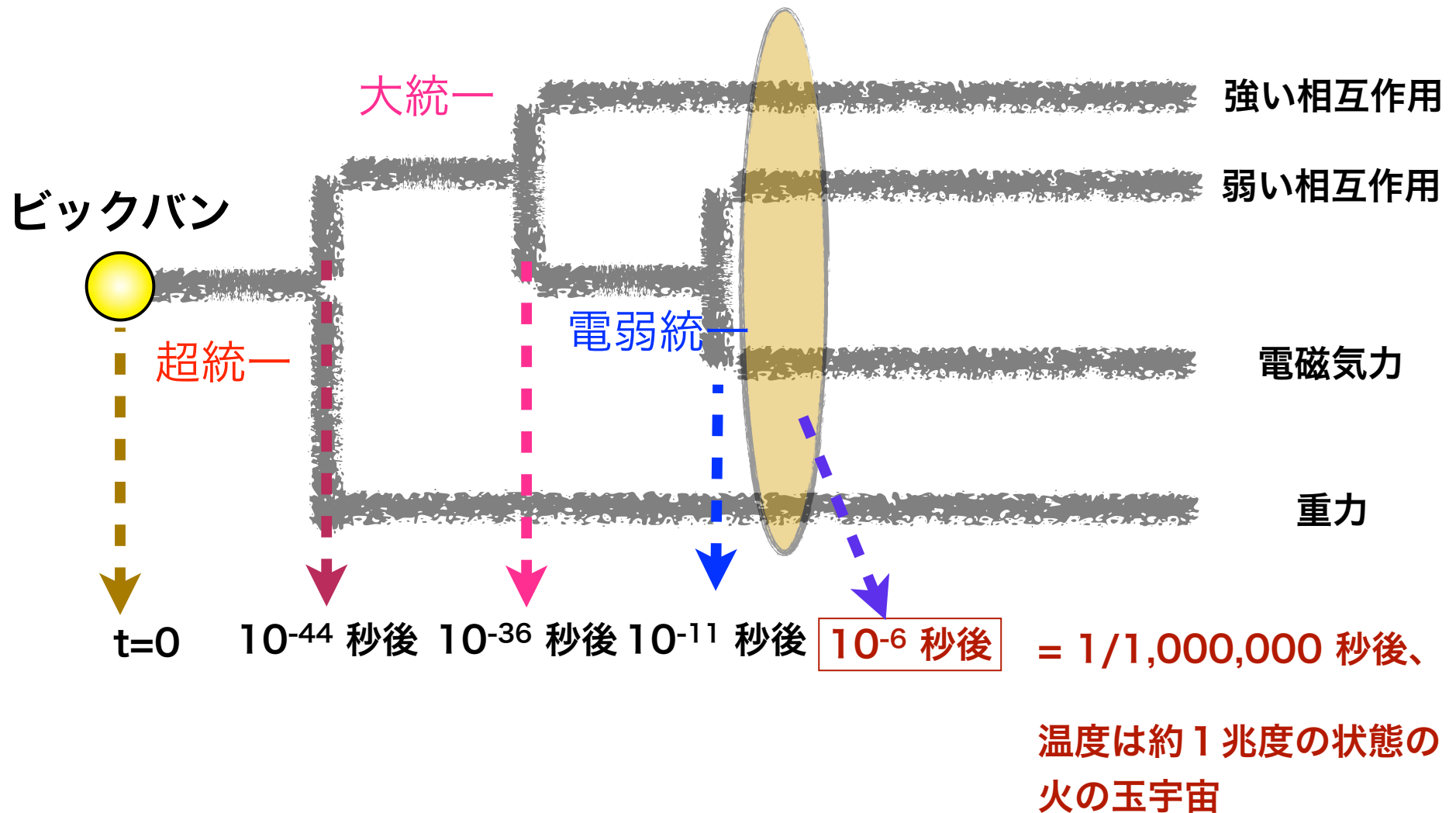
# 質量の謎を解き明かすには？

## • ビック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→ ビックバンから  
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



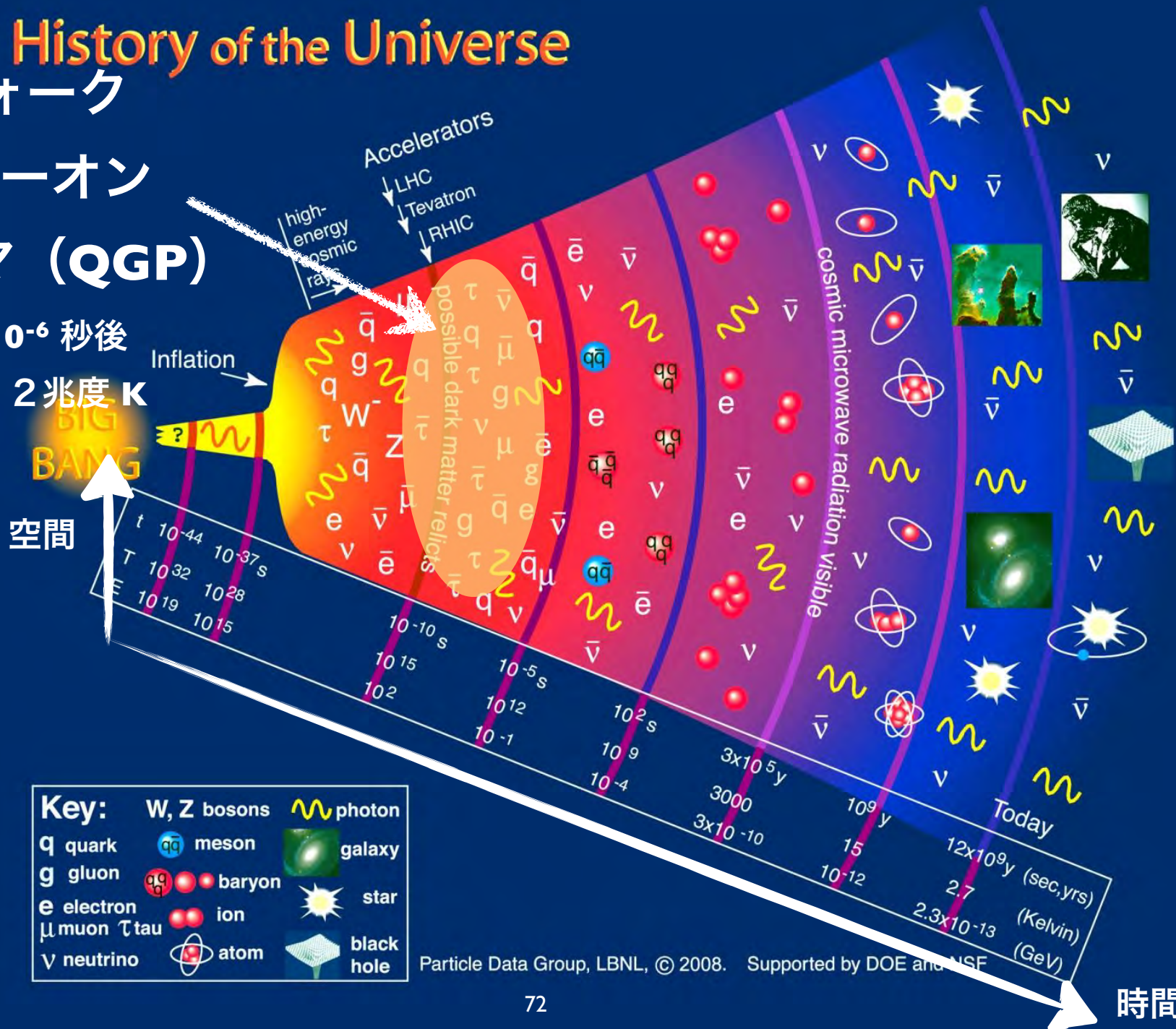
# History of the Universe

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

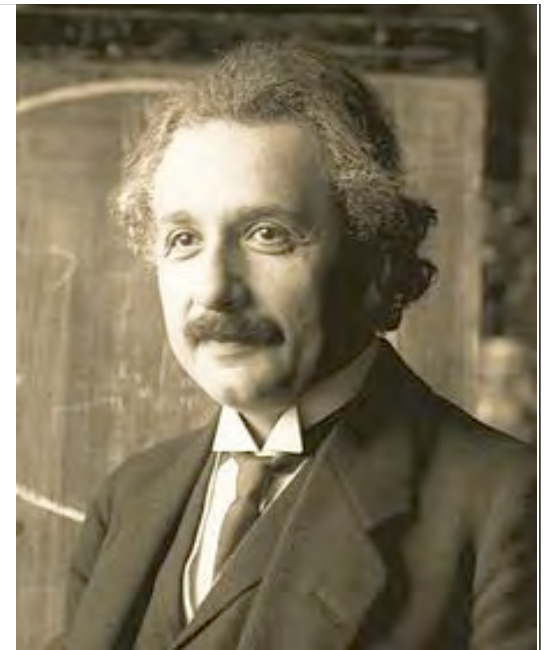


Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF



# 4. 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（液体中の微粒子の不規則運動）
- 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

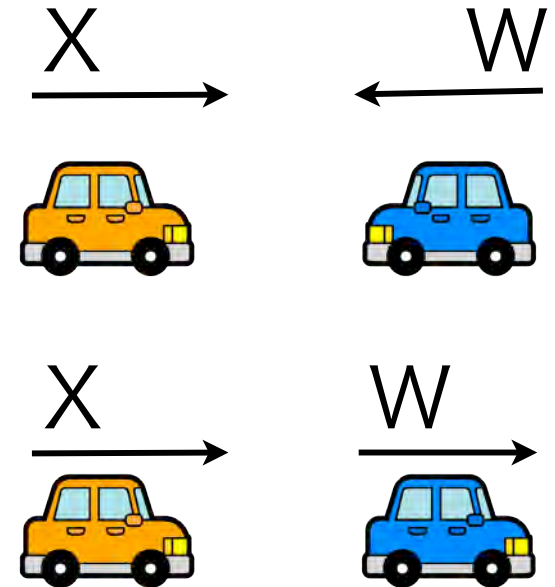
- 近づいてくる車は早く見える

◆  $V = X + W$

- 後ろからくる車は遅く見える

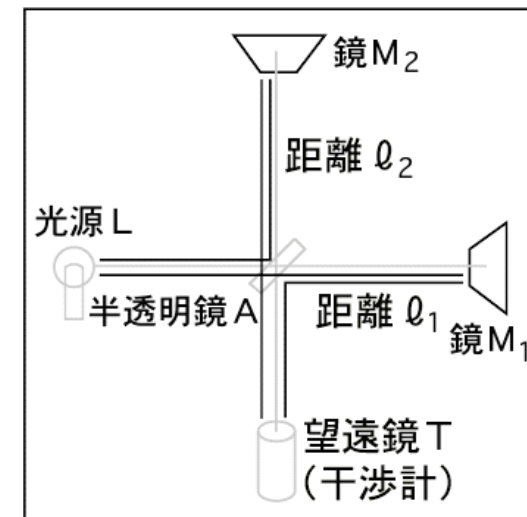
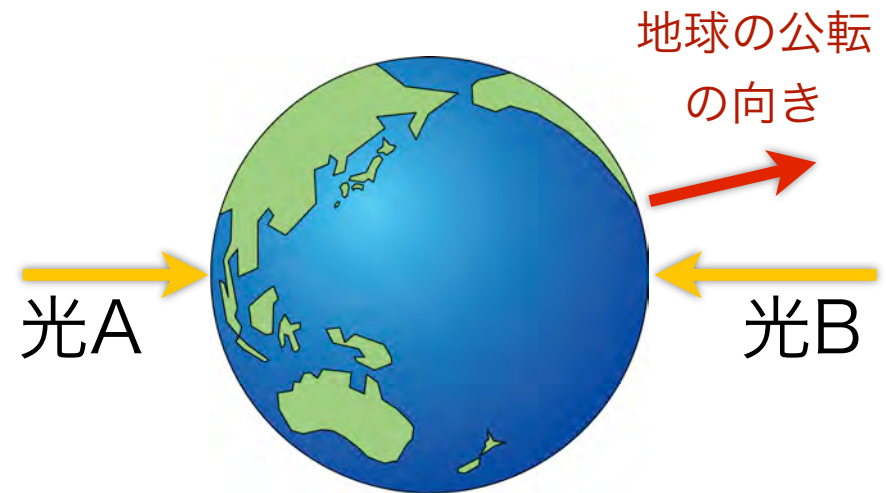
◆  $V = X - W$

- では、光の場合はどうだろうか？



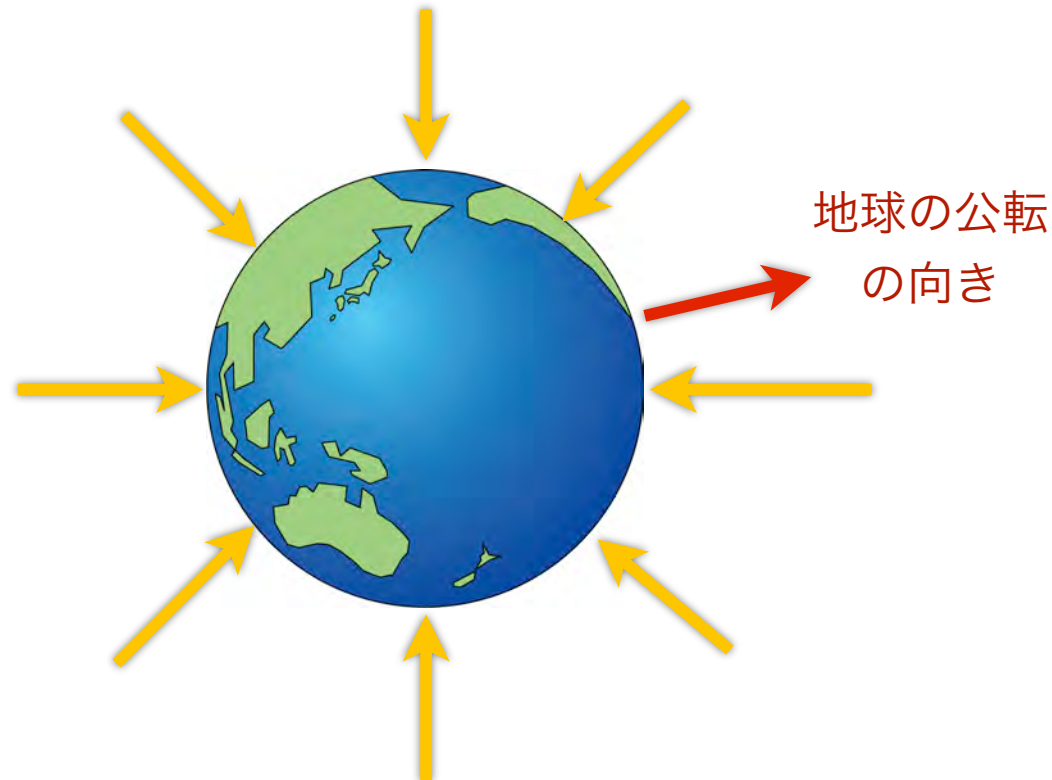
# マイケルソン・モーレの実験

- 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。



# 実験事実

- 様々な実験を行った結果、どの方角からきても、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。



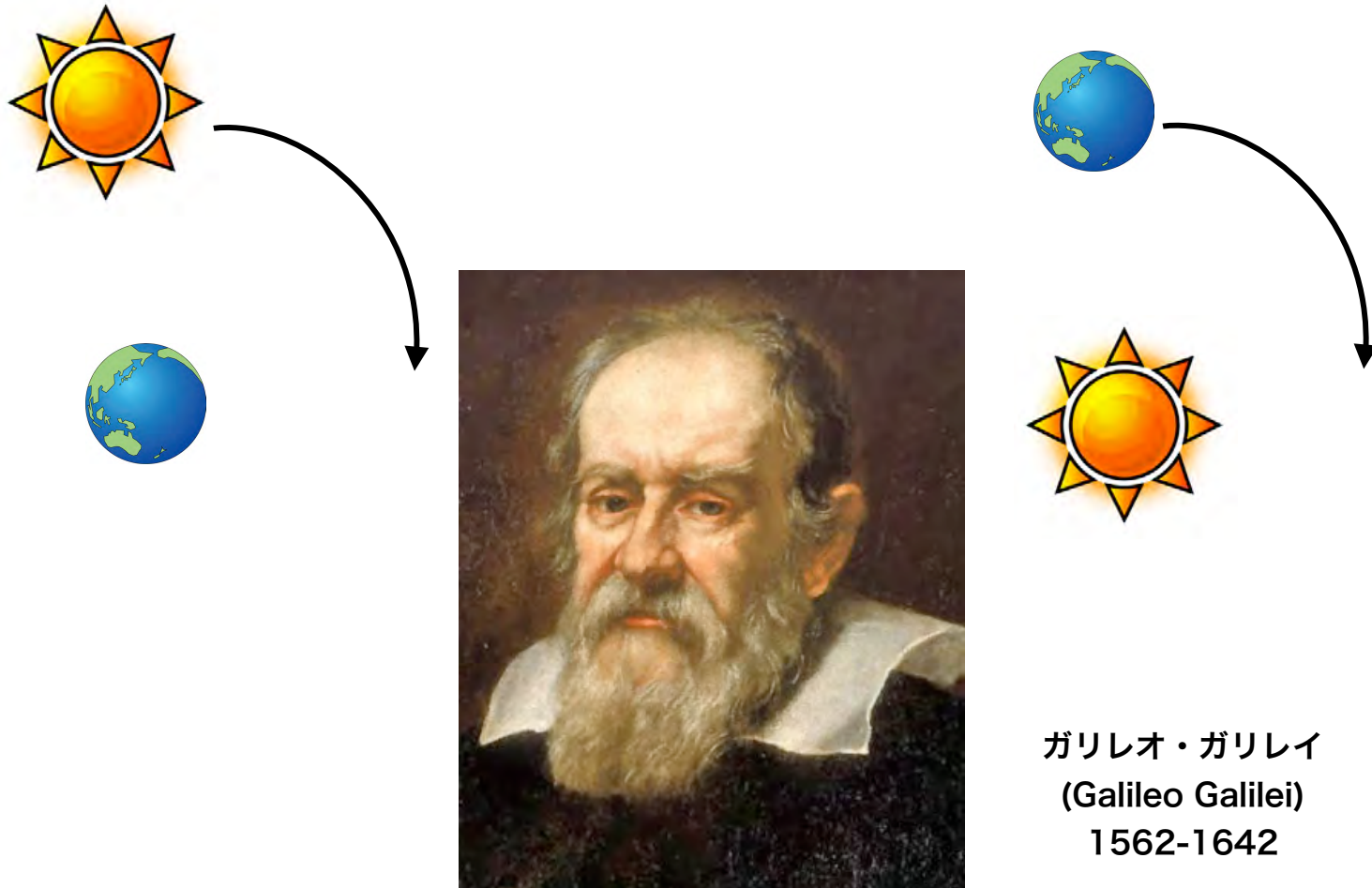


# 特殊相対性理論、 2つの柱

- その1：光の速さは誰からみても変わらない「**光速度不変の原理**」
- 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？

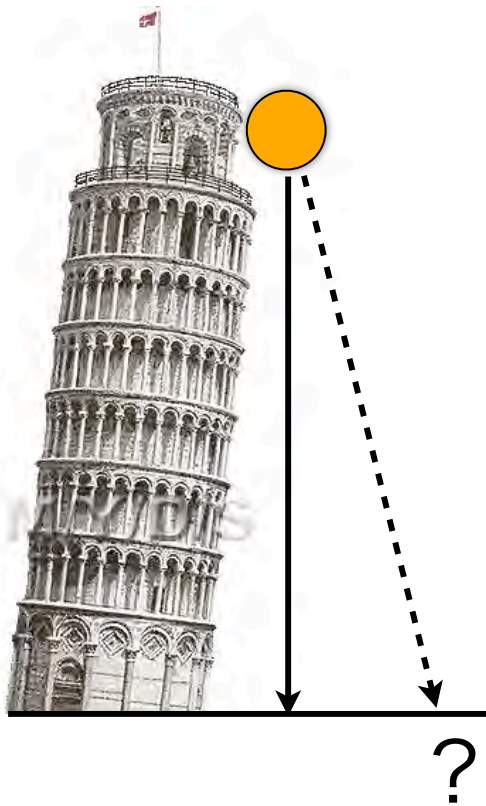
- ・ 天動説と地動説の論争（17世紀）

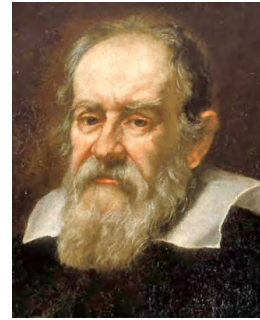


## 天動説派の主張：

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！

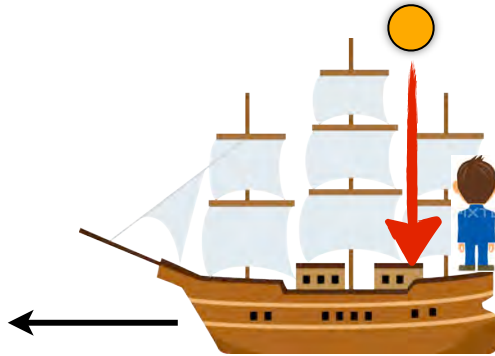
地動説はおかしいよ。



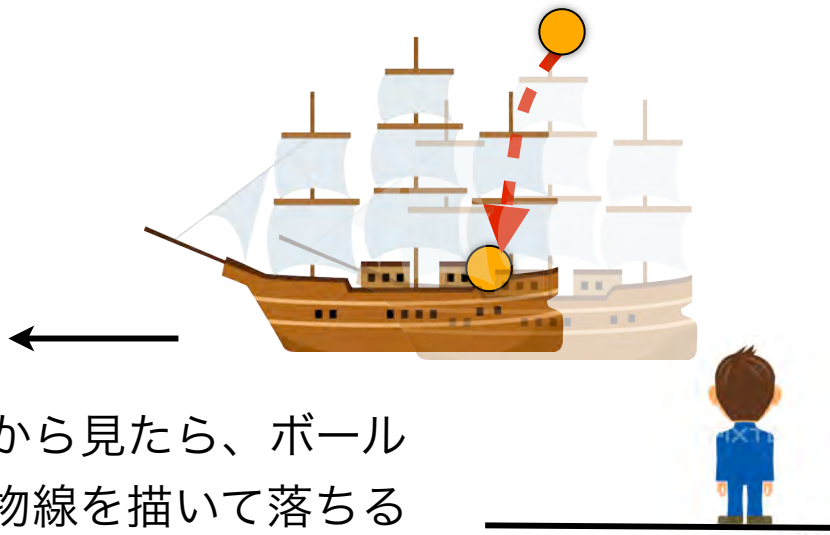


## ガリレオの主張

- ・ 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。



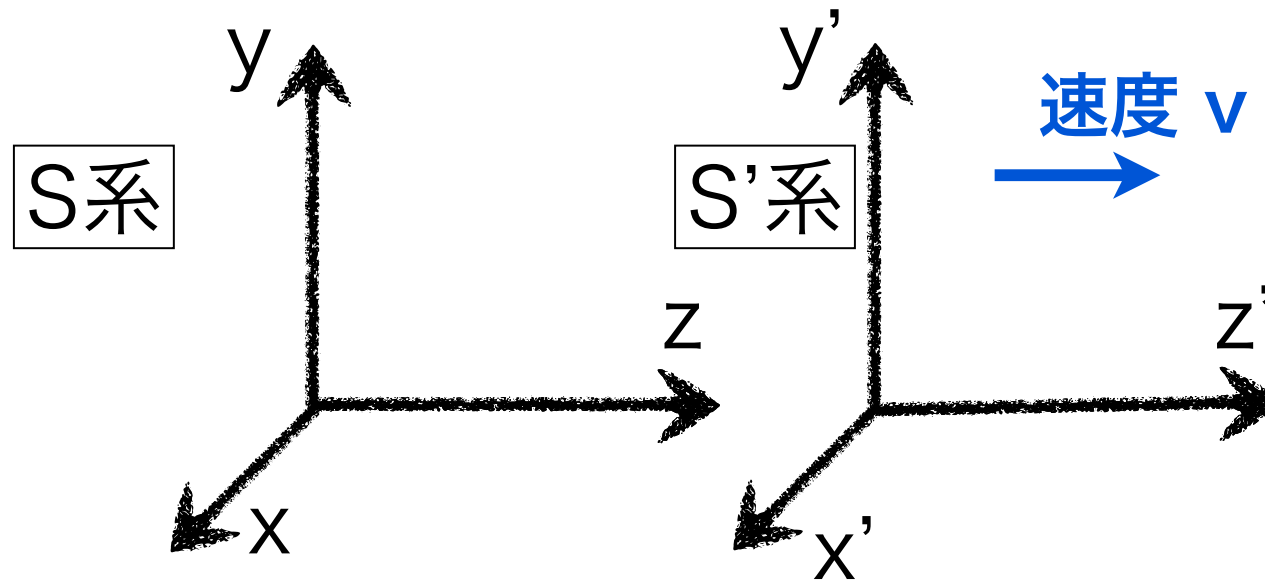
動いている船の上から見たら  
ボールはまっすぐ落ちる



陸から見たら、ボール  
放物線を描いて落ちる

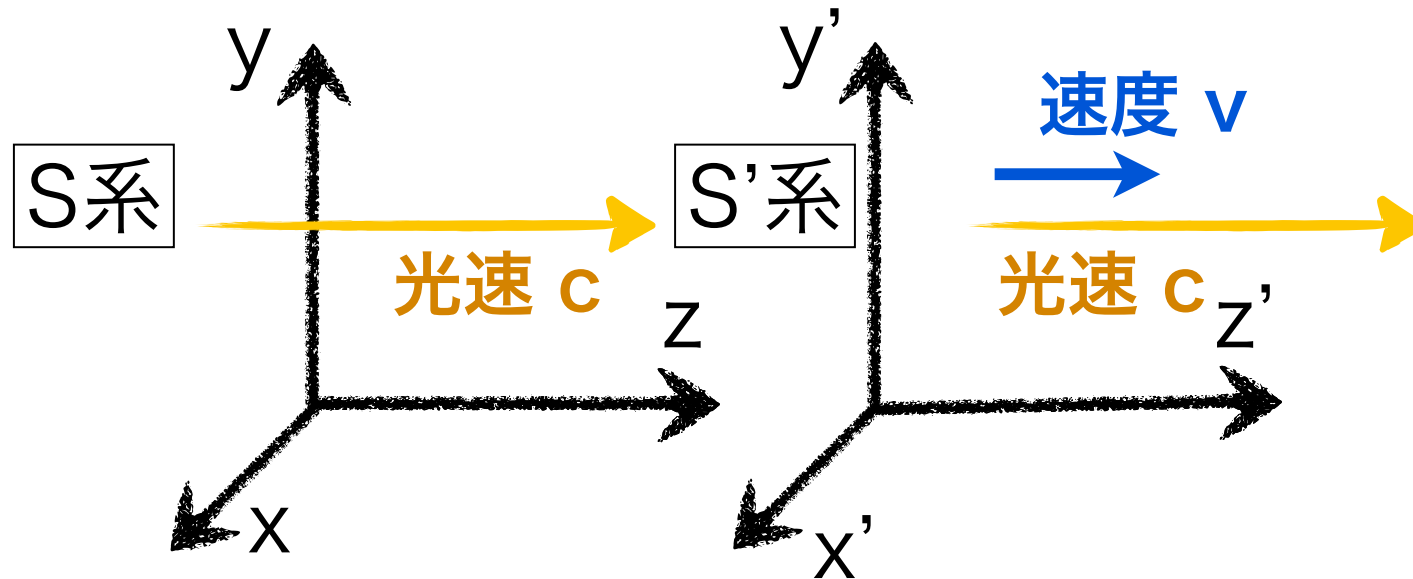


# ガリレイの相対性理論と アインシュタインの相対性理論



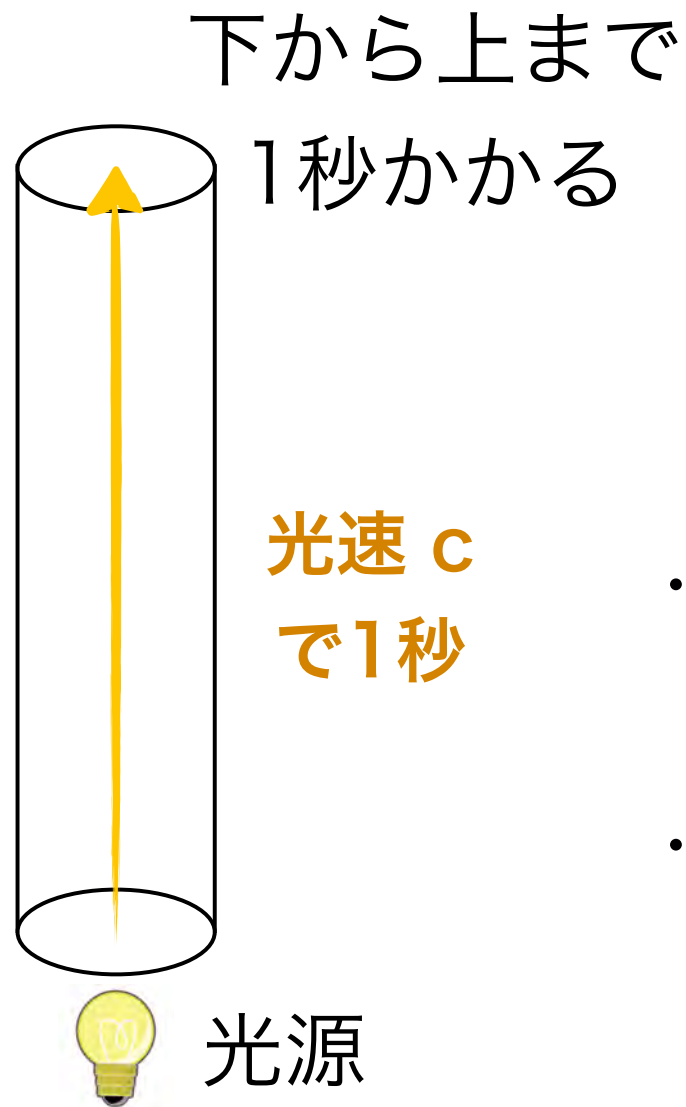
- 17世紀、ガリレイは物体の運動法則は慣性系で不変だとした。
- 慣性系とは互いに等速直線運動をしている系のこと。

# 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

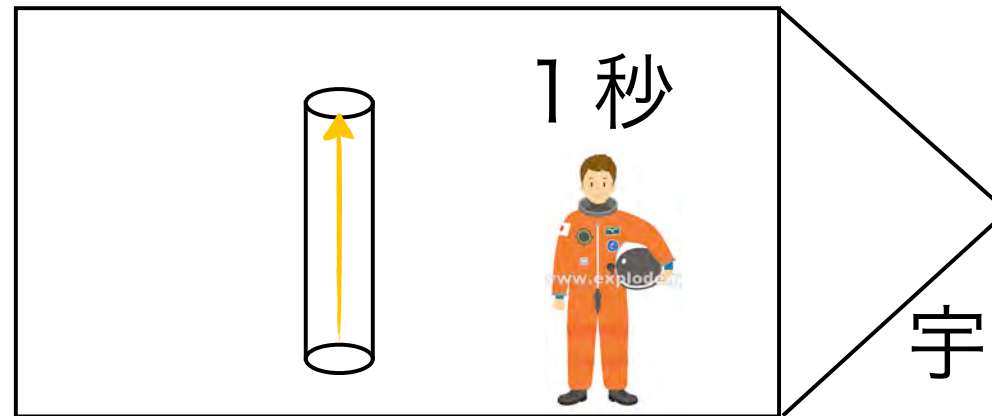


- アインシュタインは20世紀はじめ、これを**光に応用**した
- 動いていても静止していても「光の物理法則」は変わらないとして物理法則を再構築
- (しかし、これを受け入れると、時間や空間が絶対ではなくなってしまう...)

# 光時計

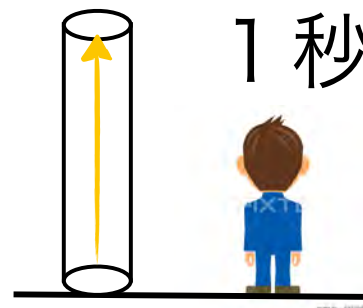


- 円柱の下に光源があり、光が発せられてから、ちょうど1秒で円筒の上まで届く、「光時計」を考える。
- 1秒＝光が上から下まで走るまでの時間



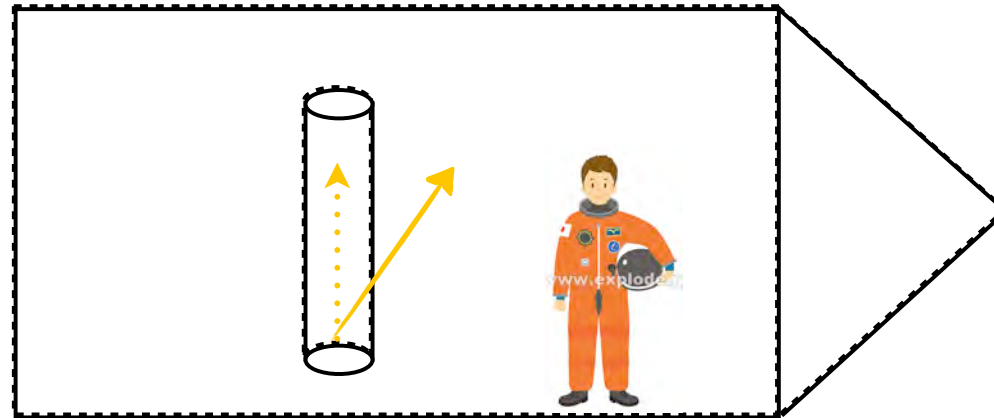
宇宙船

(静止している)



地上の人

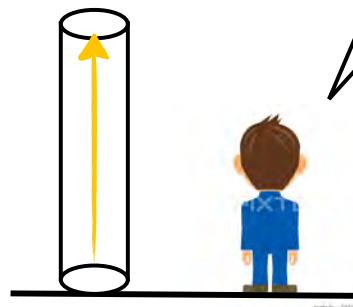




光の速度はどこでも一定.

宇宙船が動いている分、光は斜めに進む.

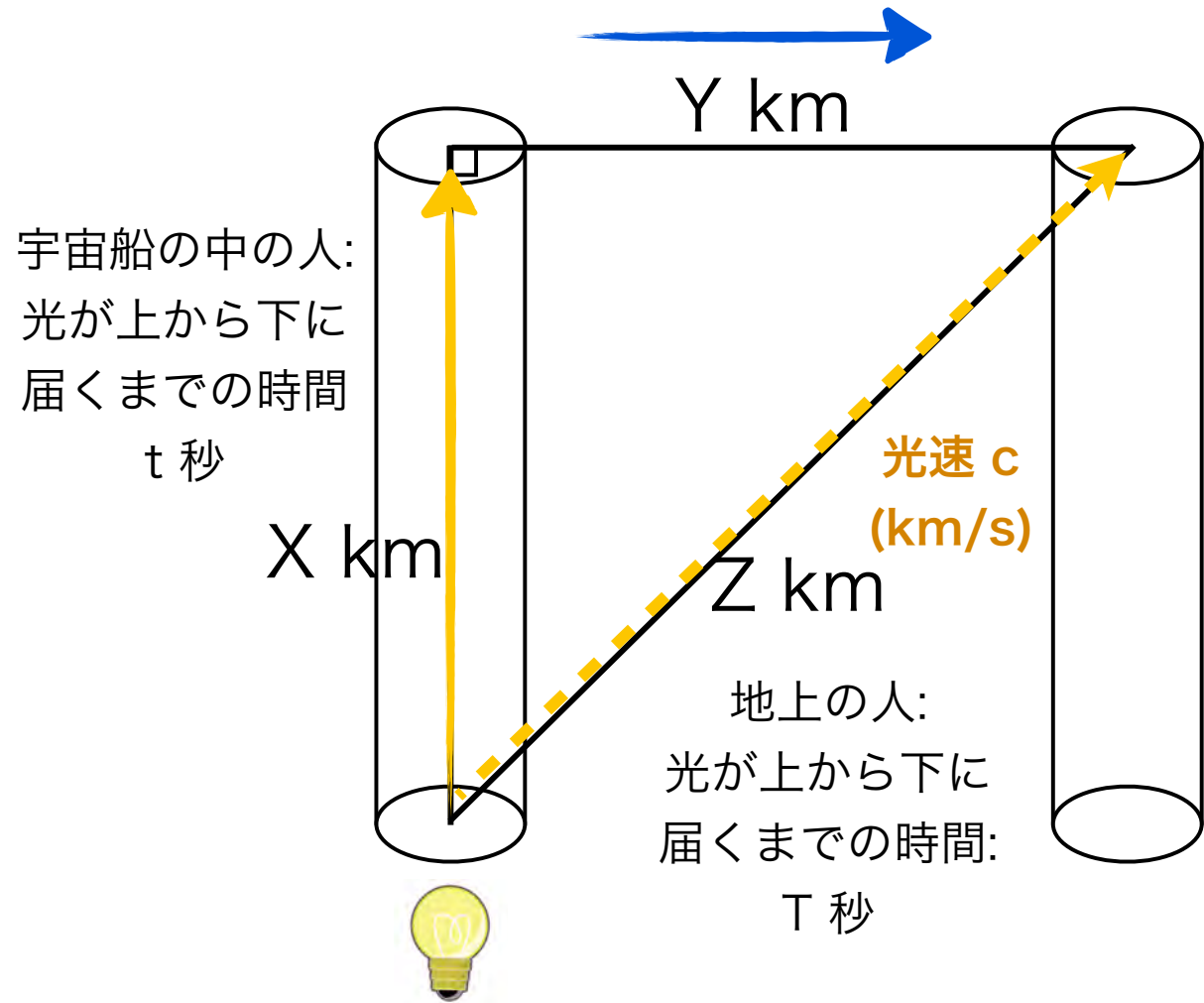
**斜めに進んだ分、進むべき距離が伸びて、  
地上が1秒でも光が上に到達していない**



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  
宇宙船を見た場合

宇宙船の速度  $V$  km/s



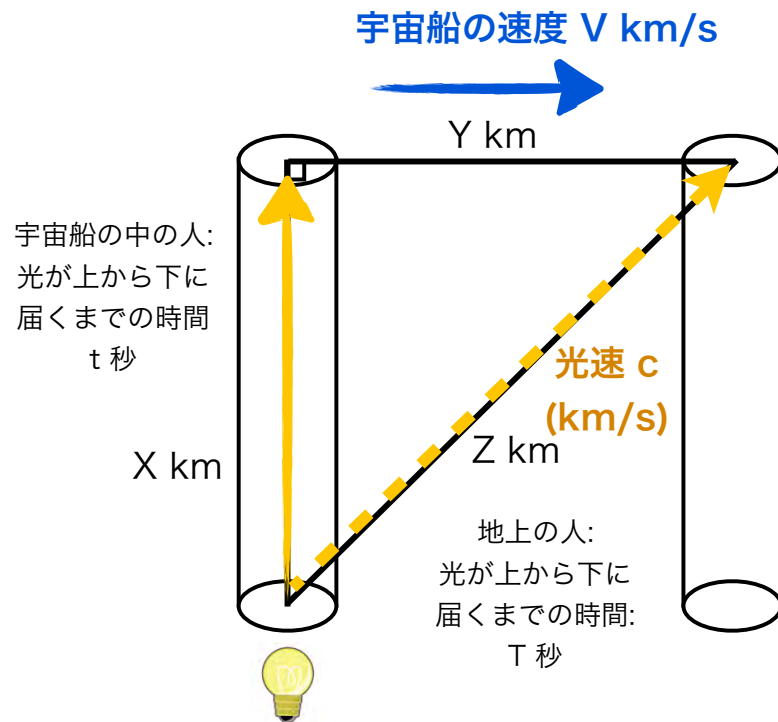
- ・ 地上から宇宙船の光時計を見た場合、光が斜めに進む分、光が上に到着するまでに時間がかかる

- ・  $T > t$

- ・ 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

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

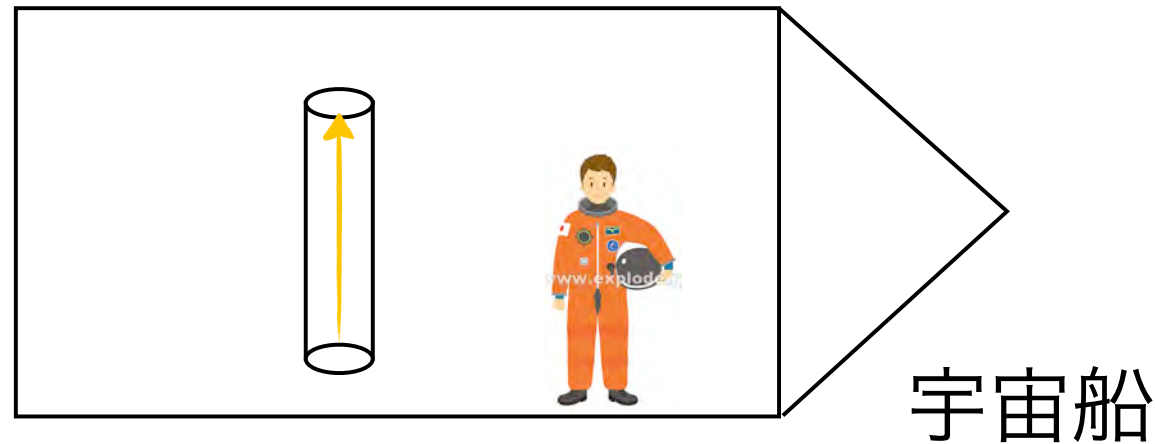
宇宙船（動いているもの）  
の時間

地上（止まっているもの）  
の時間

光速

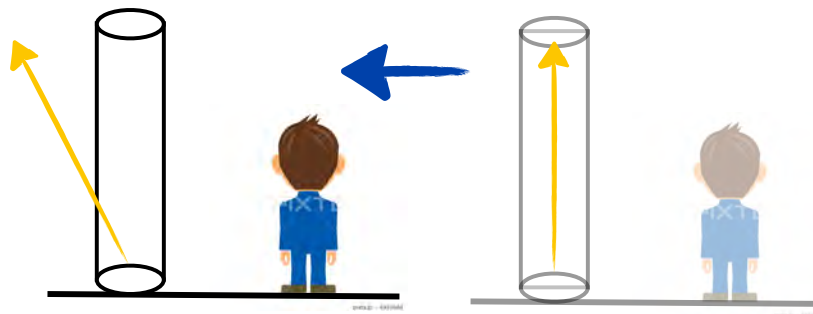
The diagram illustrates the time dilation formula. It features the equation  $t = T \times \sqrt{1 - \left( \frac{V}{c} \right)^2}$  with several labels and arrows. The variable  $t$  is circled in yellow and labeled '宇宙船（動いているもの）の時間' (Time of the spaceship, which is moving). The variable  $T$  is also circled in yellow and labeled '地上（止まっているもの）の時間' (Time on the ground, which is stationary). 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 background of faint, stylized gears.





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！**

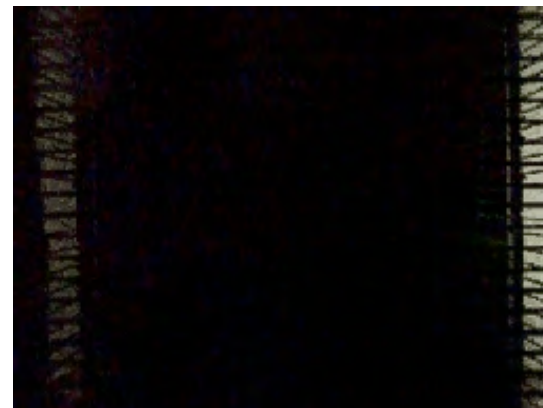
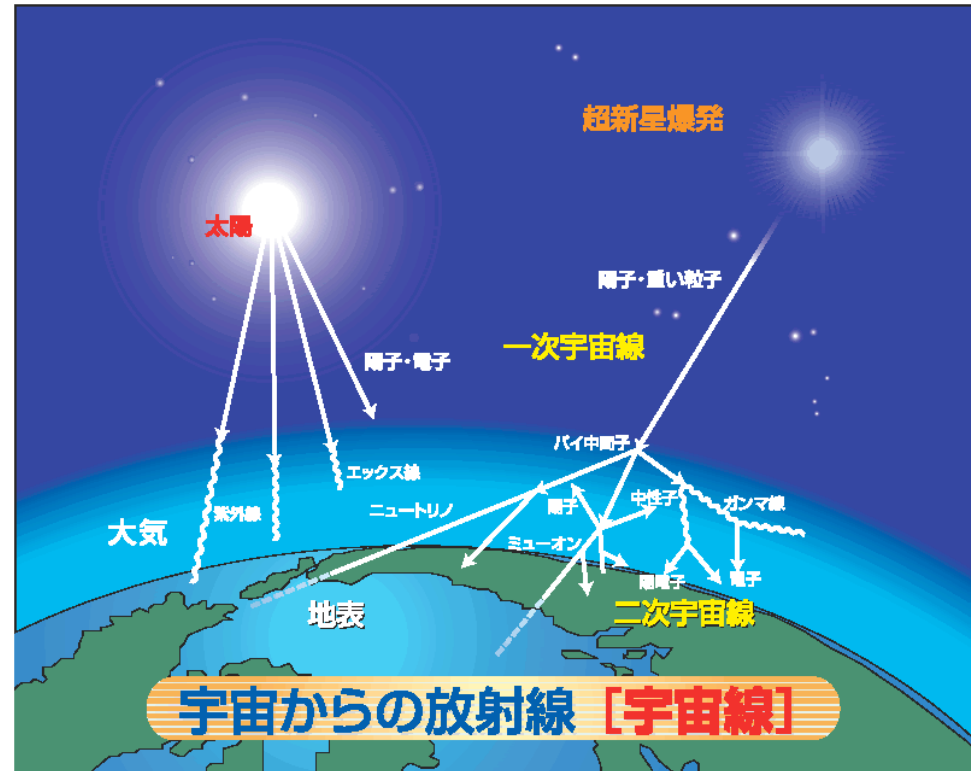


地上の人  
（相対的に）  
動いている

# 時間が実際に遅れている証拠

## • ミューオンの崩壊現象

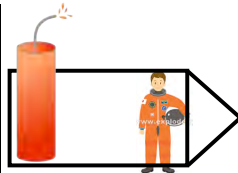
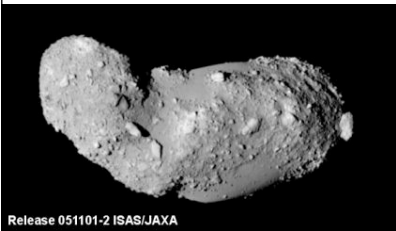
- 宇宙から地球場にはたくさんの宇宙線（陽子など）が降り注いでいる。
- 宇宙線が大気中の窒素と反応、ミューオンを生成。
- （静止）ミューオンは短い寿命（ $100 \mu\text{秒}$ ）で崩壊し、他の粒子になるので、地上にたどり着くミューオンは計算上、 $10$ 億分の $1$ 。
- $1936$ 年、地上でミューオンが多数発見される。
- 光速に近いミューオンの寿命が伸びて、崩壊する前に地上に到達した



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



距離：1 光年 (= L)  
(光が 1 年で進む距離)



小惑星

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。

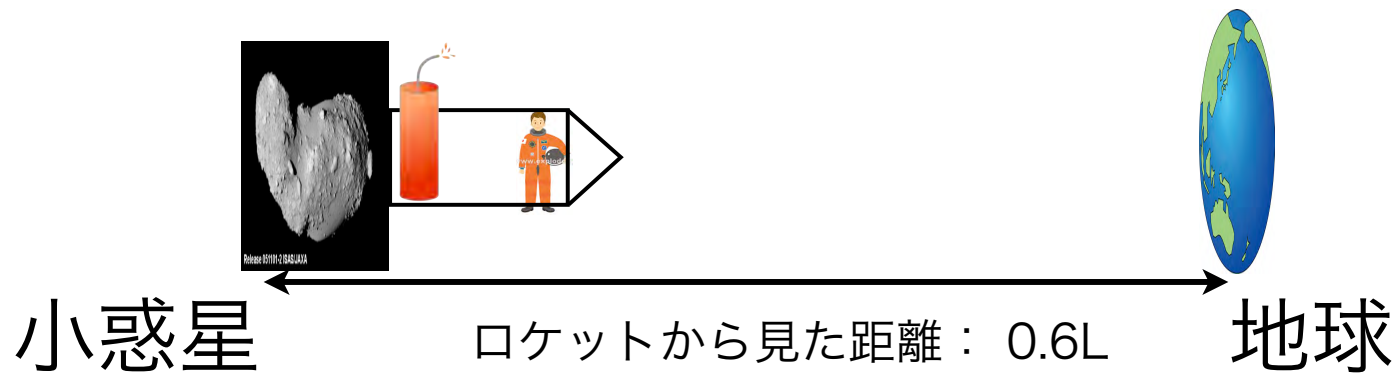
今度は距離を考えてみる

$c = 30$  万 km/s の光速度は常に誰から見ても一定。  
ということは...



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

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」）

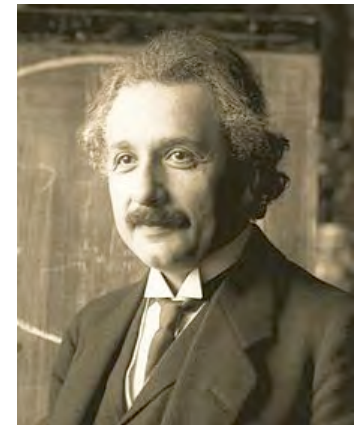


逆に地球からロケットを見ると...



# 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。



# ひと休み 研究者になるには（一般論）

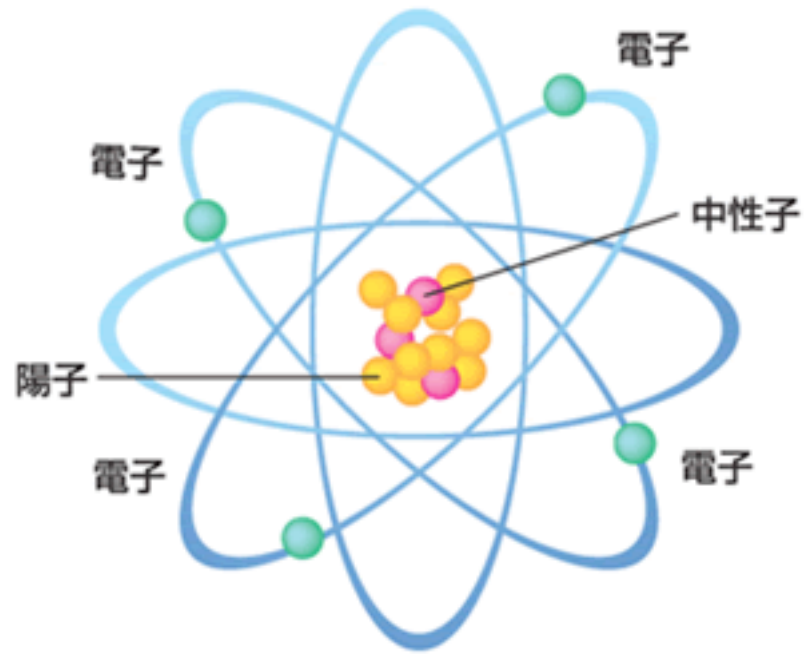
- 大学を卒業してから、大学院に入る。
- 修士課程（2年）、博士課程（3年）を経て、博士号を取得する（工学博士、理学博士など）
- この時点で28～30歳ぐらいになる。
- その後、任期付ポスドク（博士研究員）や企業の研究職に就くのが一般的。
- ポスドク（国内外）は5（=3+2）年くらいが1つの目安。その後、任期なしのポスト（パーマネント）を目指す。
- 35歳くらいまでが1つの目安（かも）。
- 大学教員、研究所の研究員など。

# 5. 実験で「クォークスープ」 をつくる

ビッグバンから  $1/100$ 万～ $1/10,000$  秒後の世界



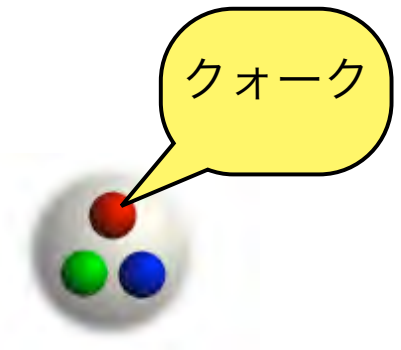
# 復習



原子  
 $10^{-10}$  m



原子核  
 $10^{-14}$  m



陽子・中性子  
 $10^{-15}$  m  
= 1fm



## ラザフォード(右)とガイガー (左) (1912)

この頃の主要研究テーマ

放射性物質の性質

原子の構造、原子核の構成要素は何？

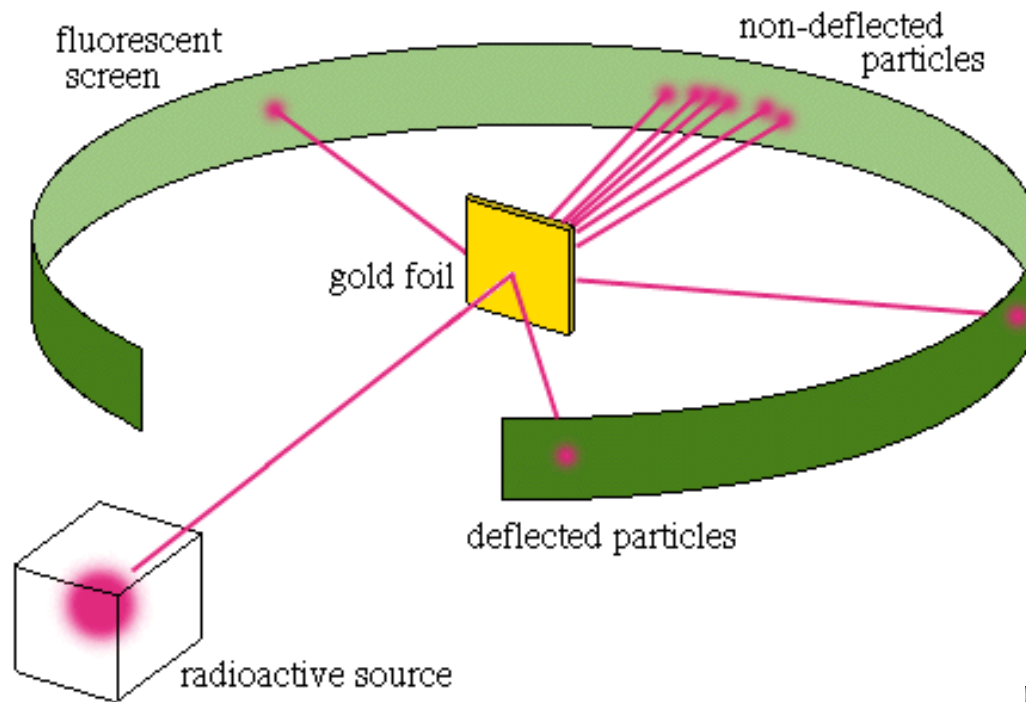
Rutherford and Geiger in the Manchester Physical Laboratories circa 1910  
(Photograph: The University of Manchester)



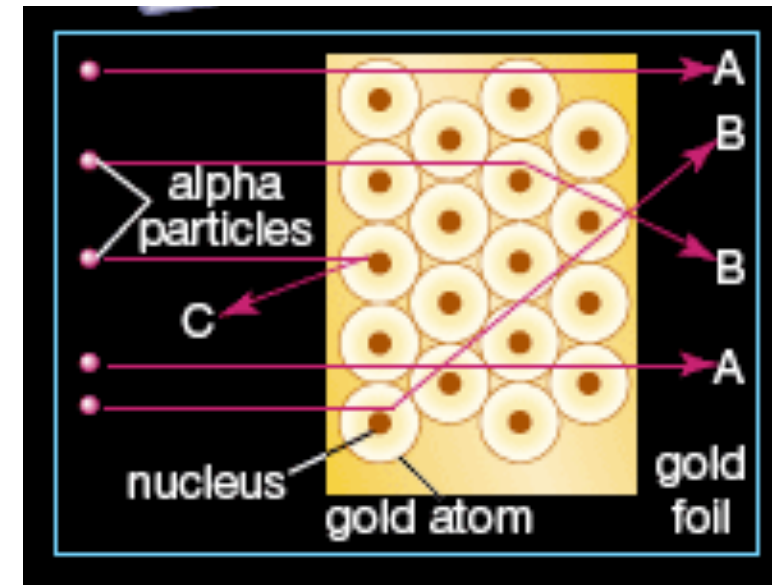
# Rutherford 散乱



ニュージーランド紙幣と  
ラザフォード



5 MeV      アルファ線源



大きな散乱角の $\alpha$ 線を観測  
→原子核の発見 (1911)

# 量子力学：ドブロイ 波長 ( $\lambda$ )

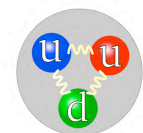
- 光は波であり、粒子である (*by* 量子力学)
- であるならば、粒子も波であり得る = ド・ブロイ波長

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{1240 \text{ (MeV} \cdot \text{fm)}}{p \text{ (MeV}/c)}$$

- 運動量  $p = 100 \text{ MeV}/c \rightarrow \lambda \sim 12 \text{ fm}$  (原子核半径の 2 倍)  $\rightarrow$  原子核全体をみる



- 運動量  $p = 10 \text{ GeV}/c: \rightarrow \lambda \sim 0.12 \text{ fm} < \text{陽子の半径, } 1\text{fm}$   
 $\rightarrow$  陽子や中性子, その内部構造を見る



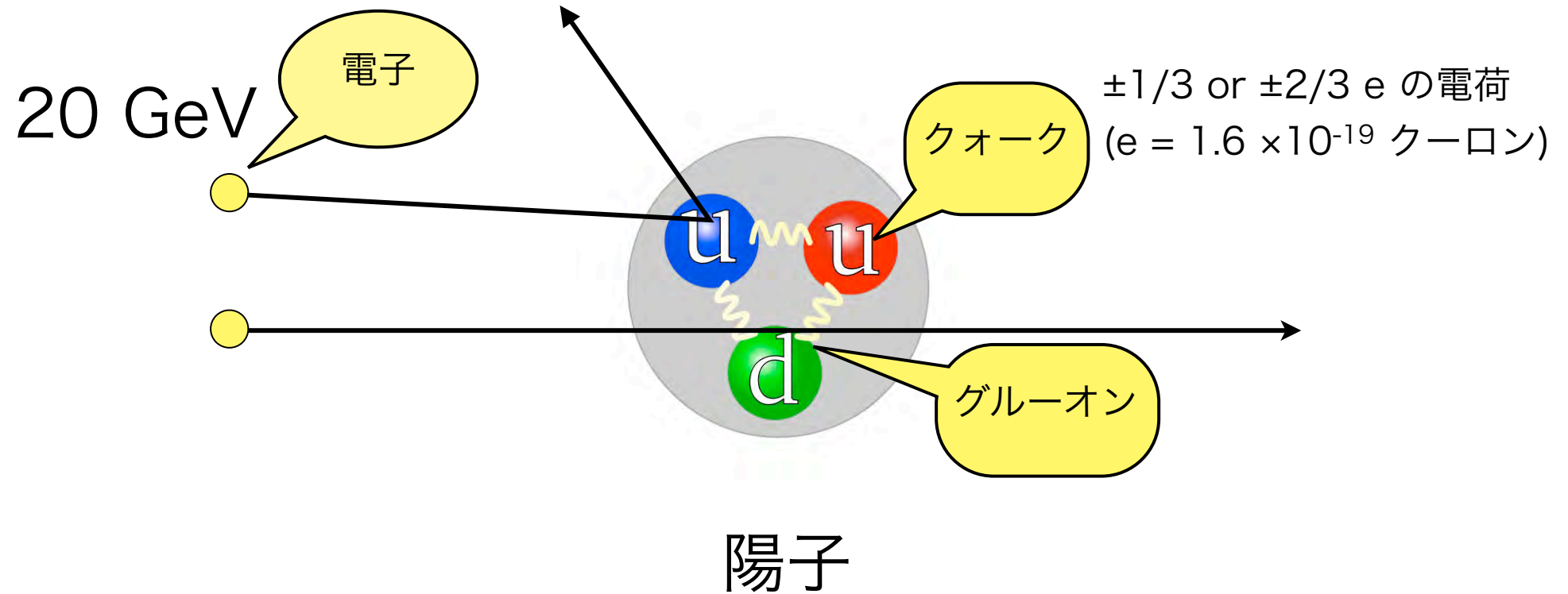


# 現代版 Rutherford 散乱 →クォークの発見

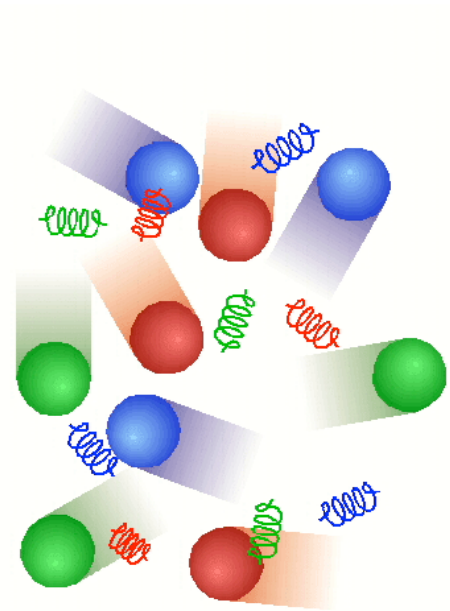
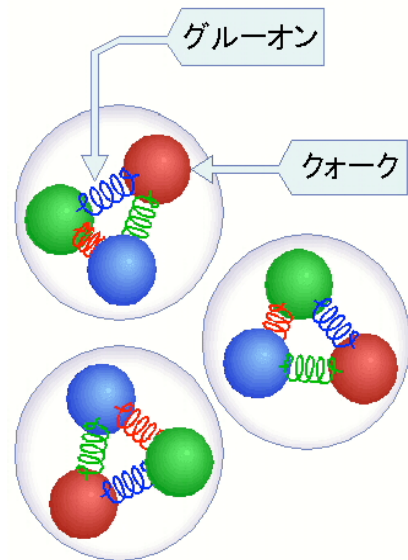
SLAC (スタンフォード線形加速器、米国)



# 現代版 Rutherford 散乱 →クォークの発見 (1969)



# クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とは？



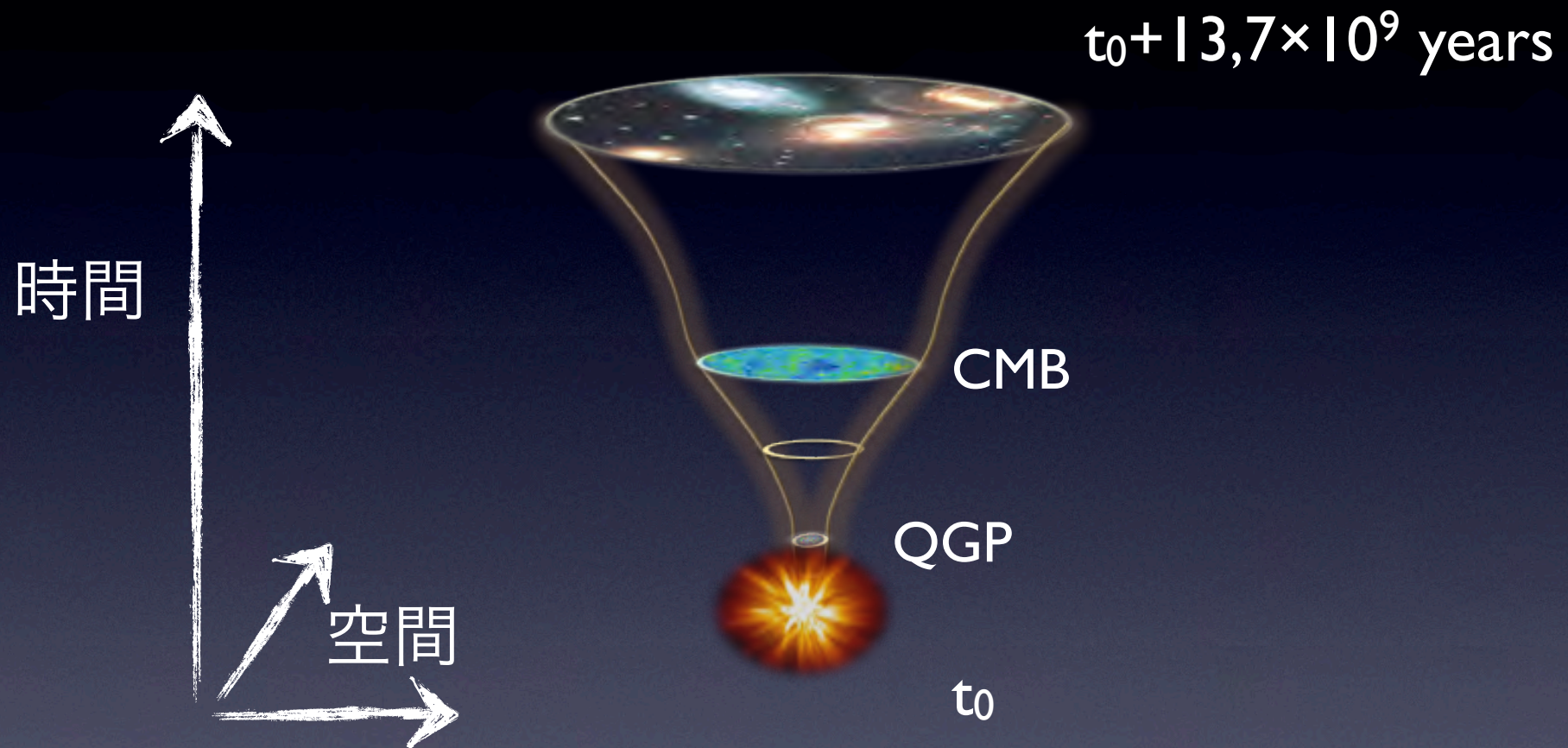
ハドロンに閉じ込められていたクォークやグルーオン

→ 高温高密度下で解放された状態

= **クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)**



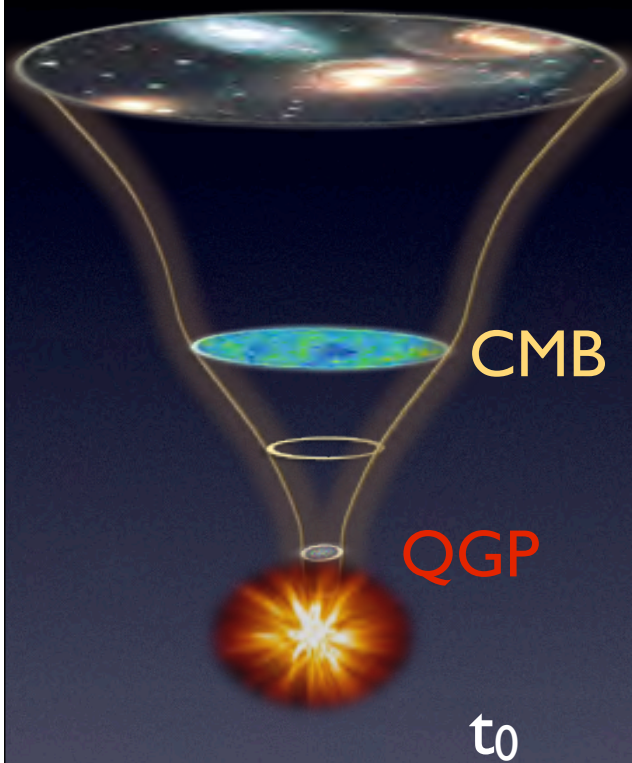
# ビッグバン



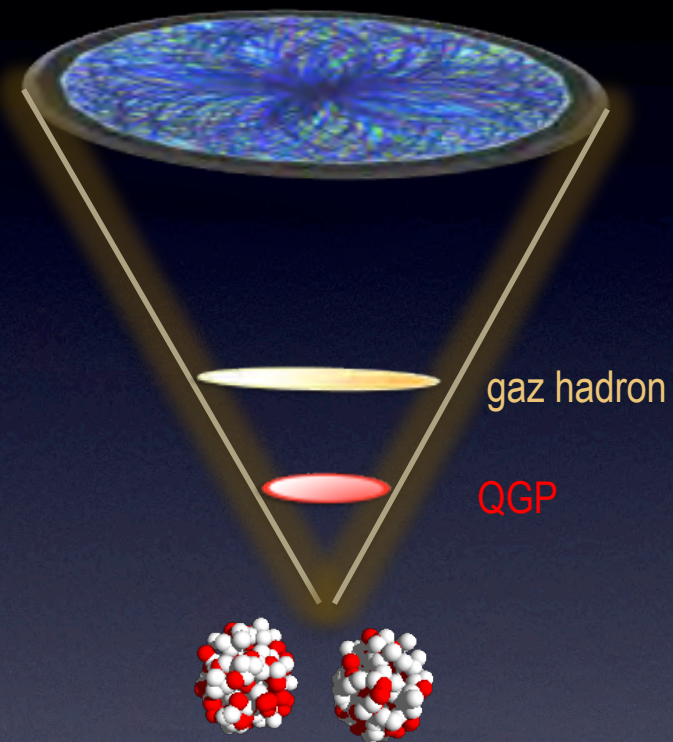


# ビッグバン

$t_0 + 13,7 \times 10^9$  years     $t_0 + 3 \times 10^{-23}$  seconds



# リトルバン





# RHIC (相対論的重イオン衝突型加速器)

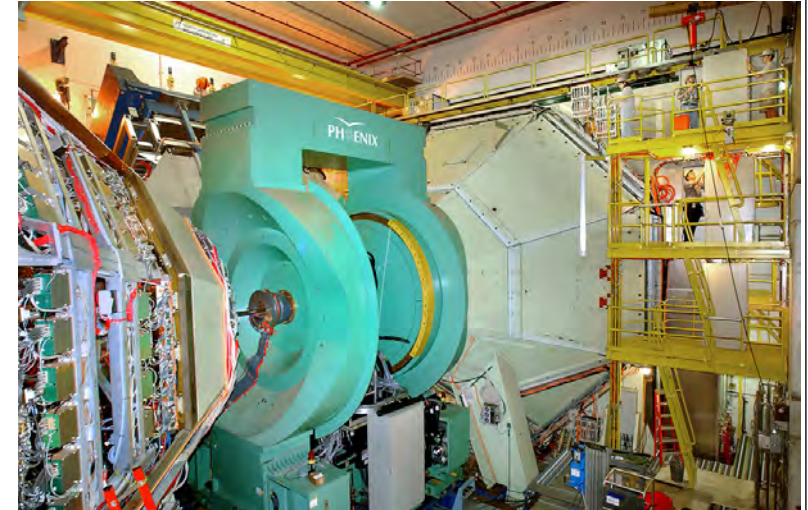
2000-

ブルックヘブン国立研究所 BNL (米・ニューヨーク)





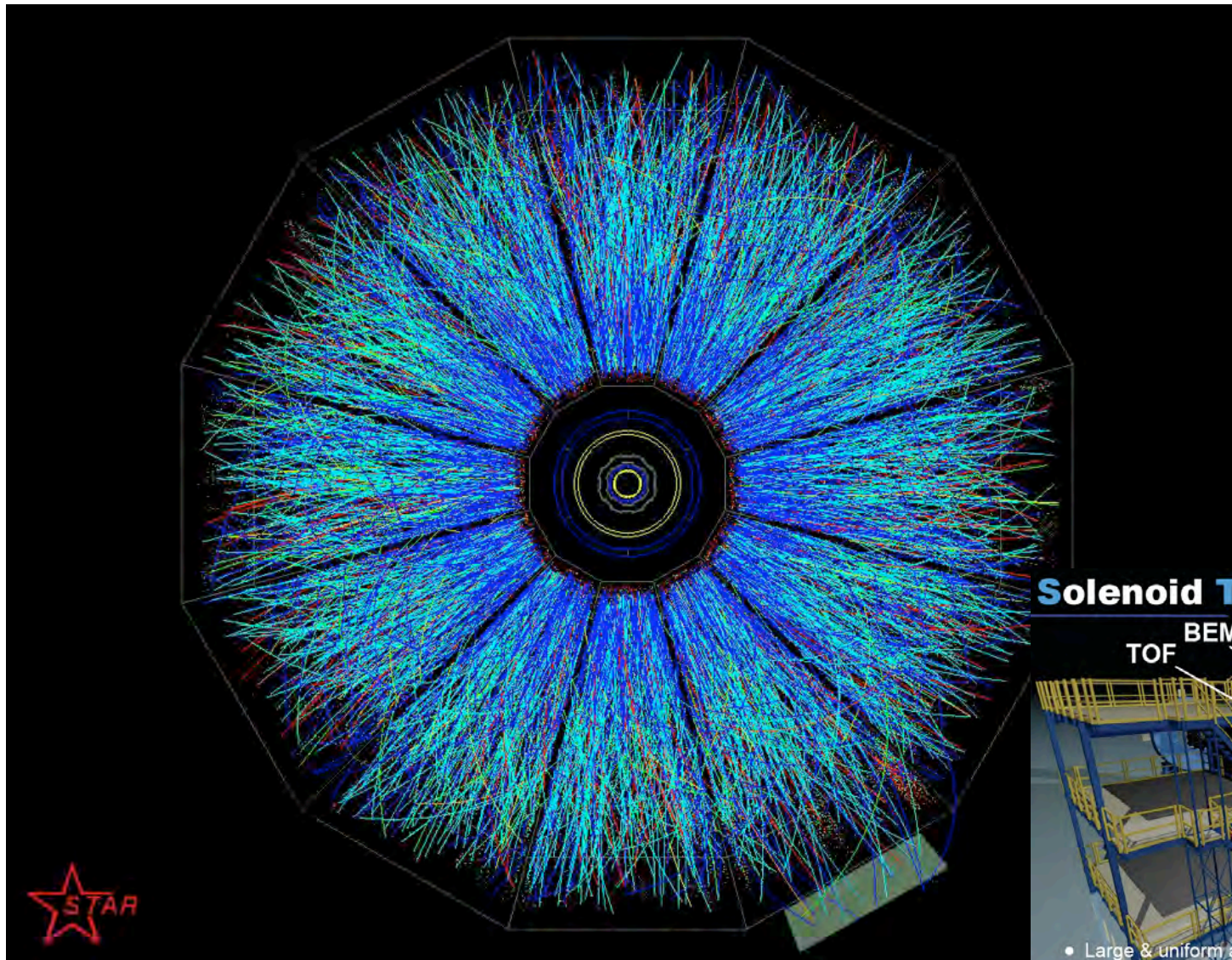
# 国際共同実験 PHENIX



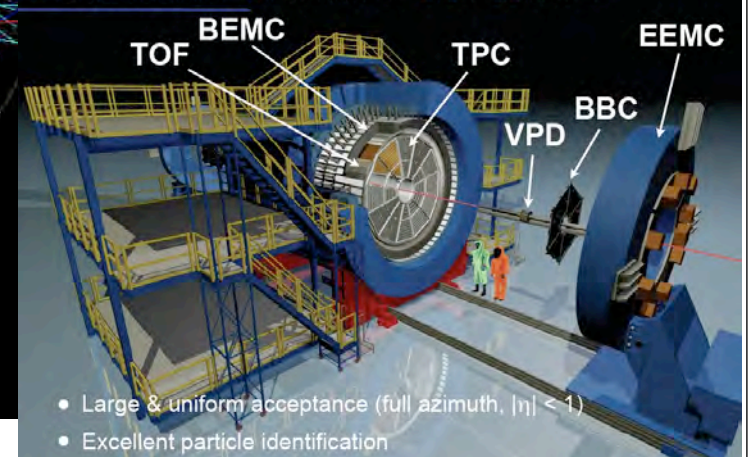
1回の原子核・原子核  
衝突で、約5000の  
粒子が生成される



# STAR 国際共同実験

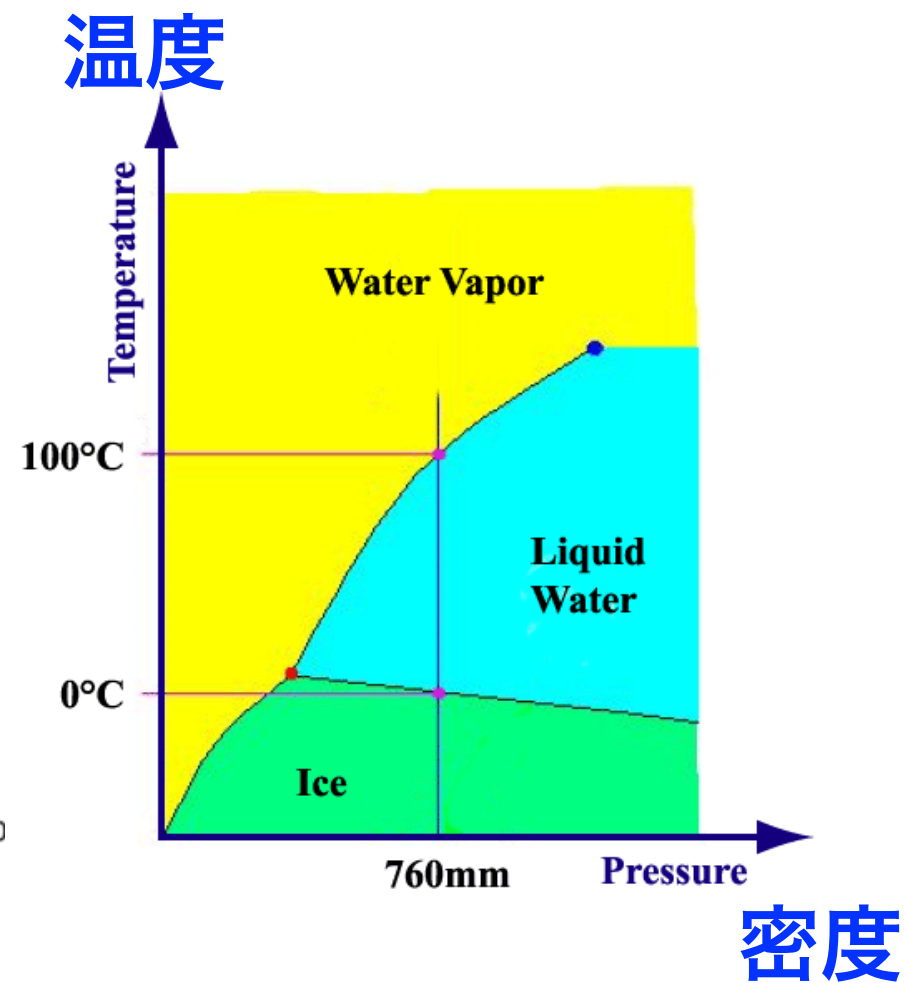
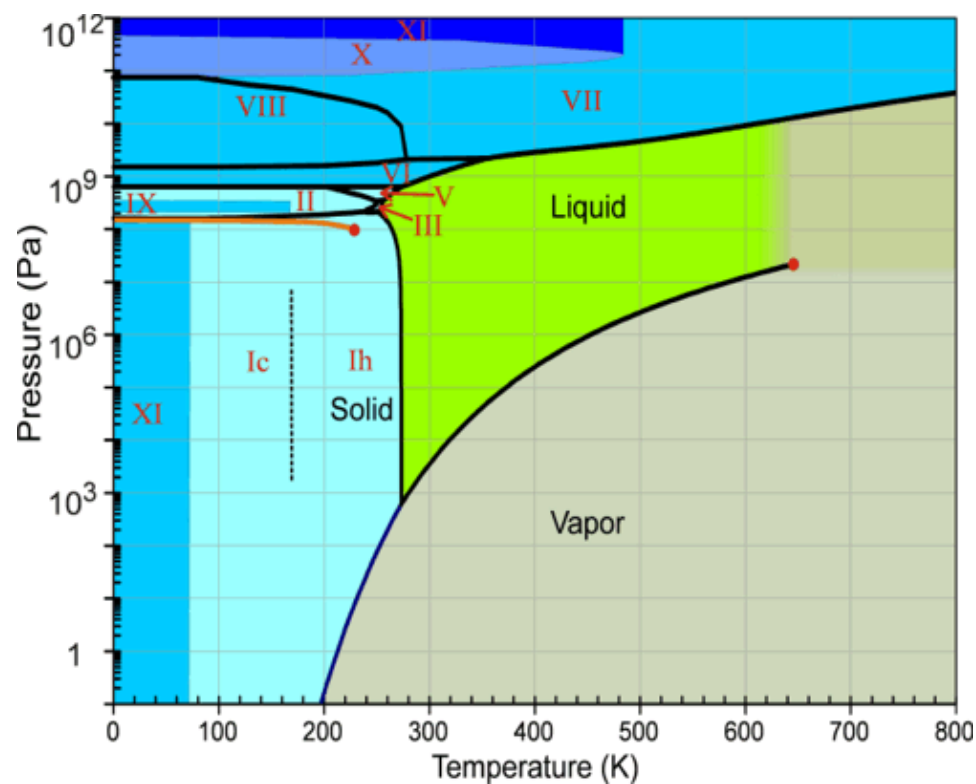


**Solenoid Tracker At RHIC**

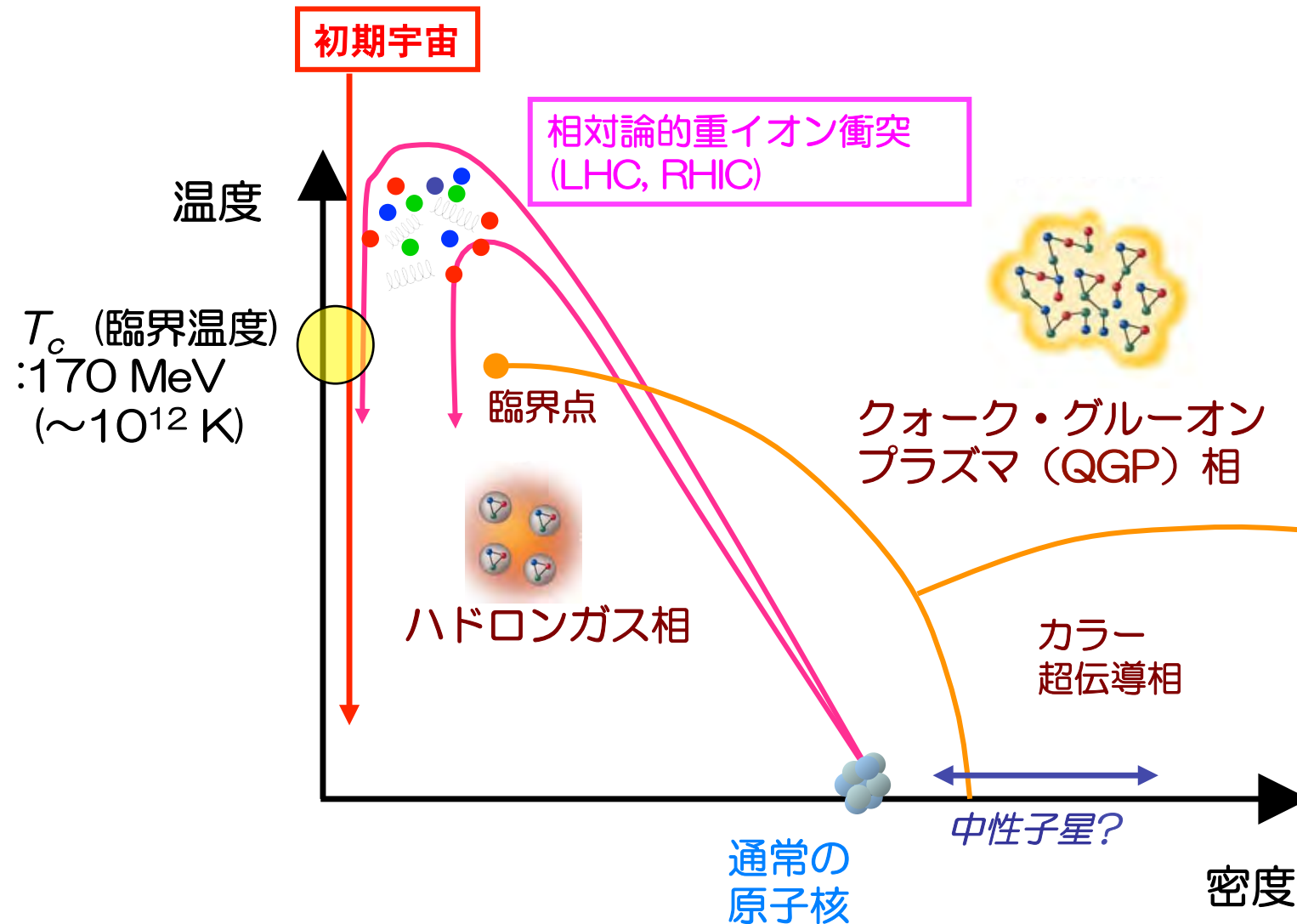




# 水の相図



# 核物質の相図



## 宇宙の始まりはしずく？ 「クォークは液体」と発表

2005年04月18日23時34分

宇宙誕生の大爆発「ビッグバン」直後に相当する超高温・高密度の状態を再現する実験をしてきた日米などの国際チームは18日、物質を形づくる究極の基本粒子クォークは超高温でバラバラになるが、気体のように自由に飛び回るのでなく、しずくのような液体状態にあったと考えられる、と発表した。理論的に予想外の発見で、宇宙や物質のなりたちを説明するシナリオに影響を与える可能性がある。

基本粒子クォークとそれらをくっつける「のり」の役をするグルーオンという素粒子は、超高温の宇宙初期にはバラバラで存在していたが、冷えた今の宇宙では、強い力で陽子などの中に閉じこめられ、1個ずつ引き離すのは難しい。

チームは00年から米ブルックヘブン国立研究所で、ほぼ光速で走る金のイオン同士を衝突させ、ビッグバンの数十万分の1秒後にあたる1兆度以上の「クォークとグルーオンのかたまり」を作ってきた。そこから飛び出した粒子の軌跡などを解析したところ、かたまりは、粘り気がないサラサラした液体の性質を示すことが分かった。







# LHC (Large Hadron Collider)

2009-

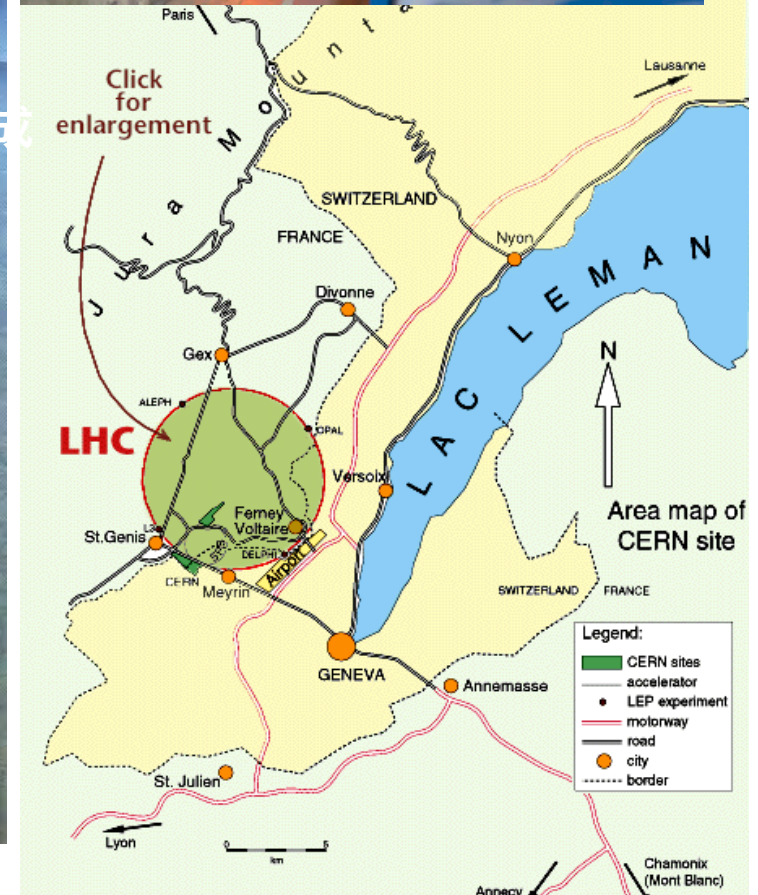
CERN (セルン)

欧州合同原子核研究機構 (スイス)

円周 27 km (山手線 1 周程度)

総額 5500 億円、(日本も 170 億円拠出)

建設に 15 年、計画を含めると 20 年の歳月を経て完成



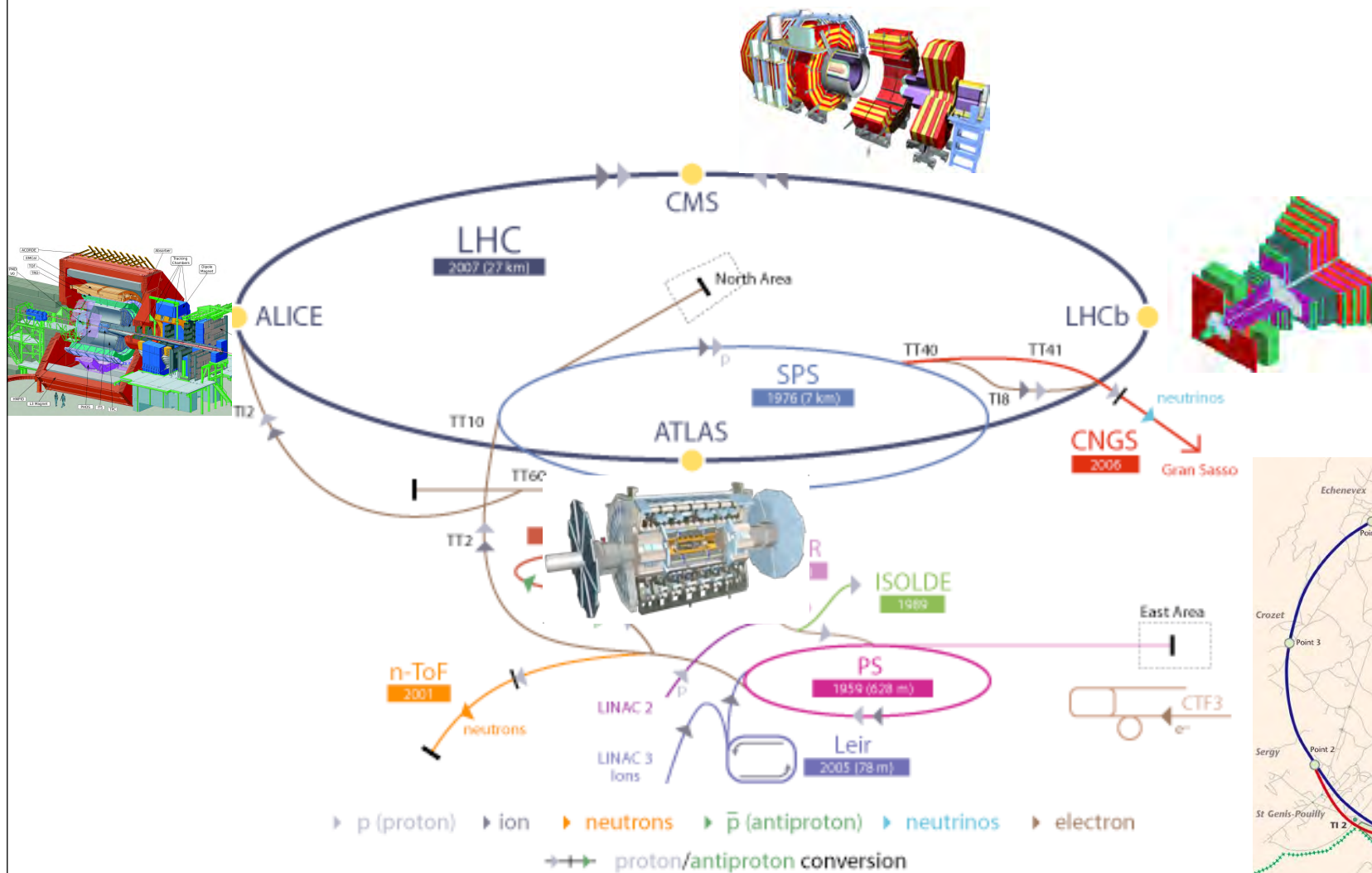




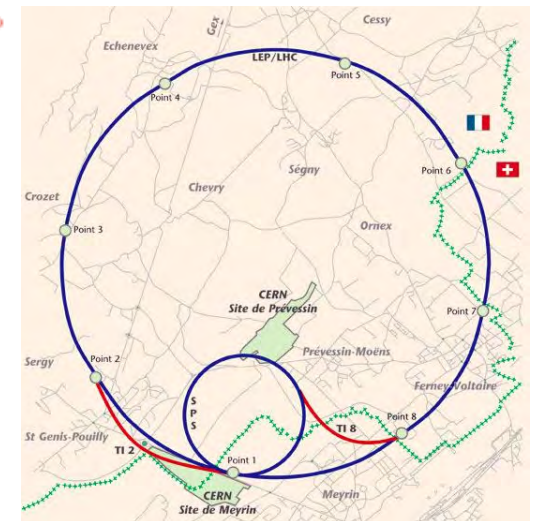
# CERN 加速器制御室

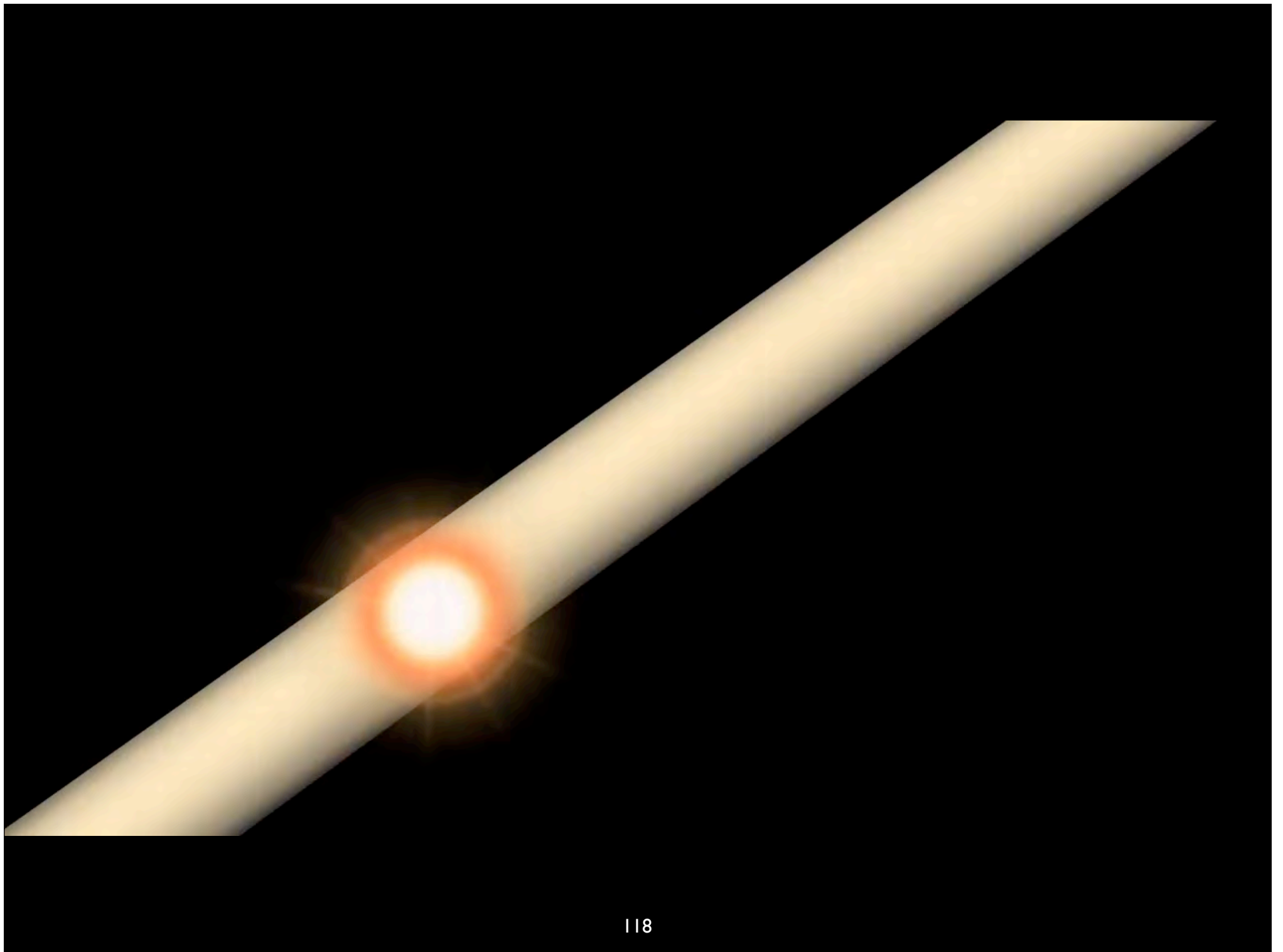


# CERN 加速器施設



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





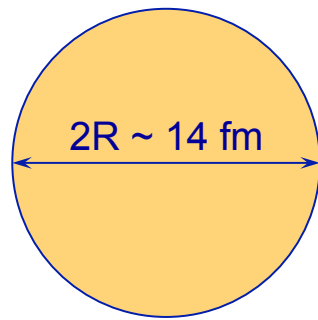
何か1つ、おかしいことに  
気づきませんでしたか？

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！

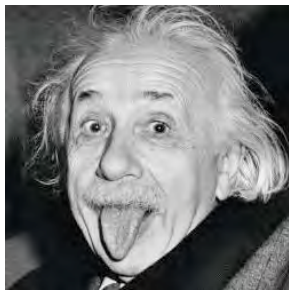
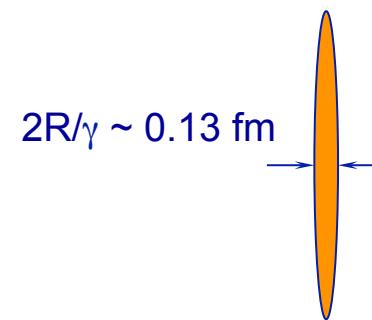


# 光速の 99.7 % で加速された物体を地上からみると

静止している物体



高速で移動している物体

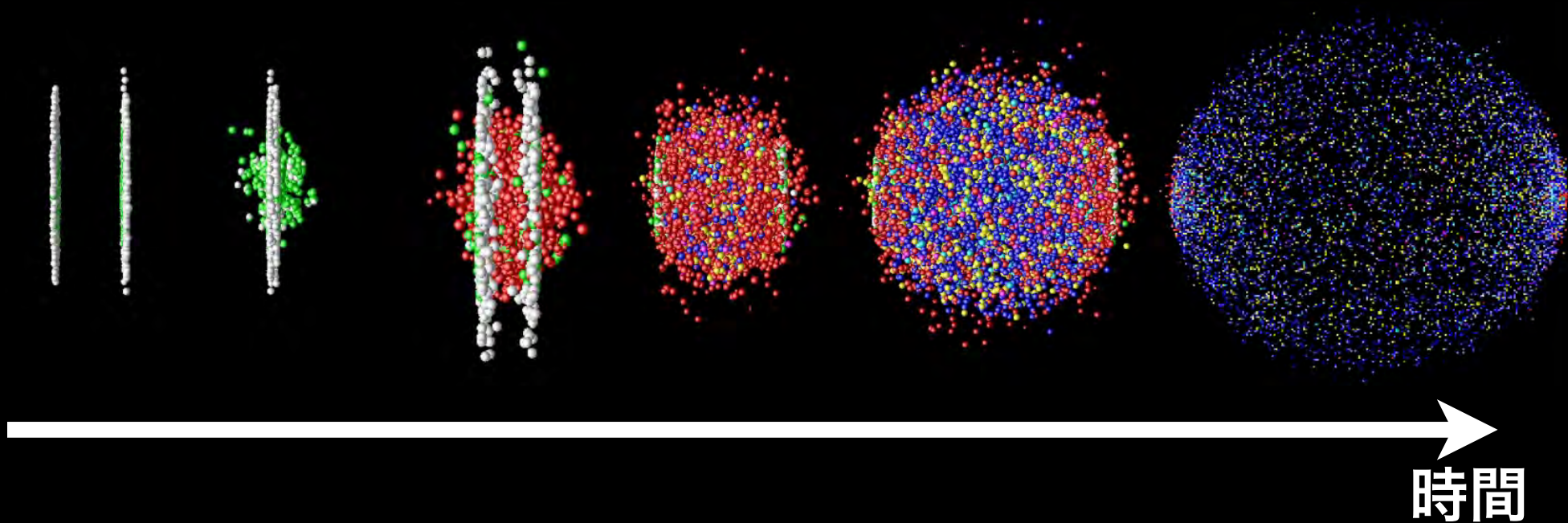


$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



$t = -19.800$

(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



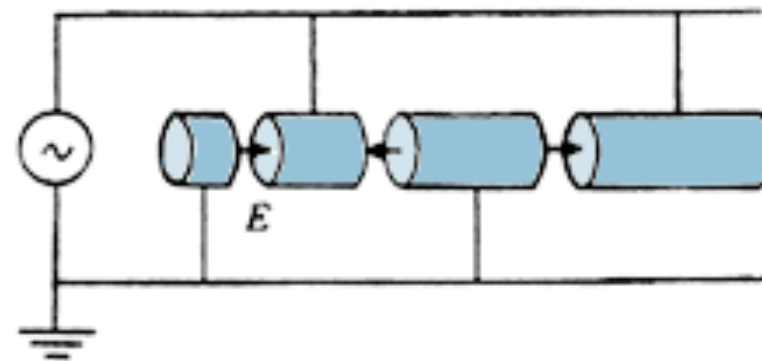
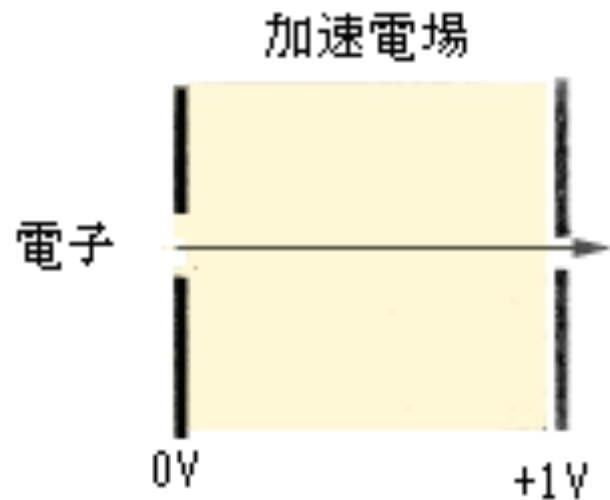
# 超高温度を再現する

- 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
- 粒子は光速の 99.999997% にまで加速される。
- 粒子は束「バンチ」になって加速、そのビームスポット（広がり）は、17  $\mu$ メートル. (髪の毛の太さは 約 70  $\mu$ メートル)
- 衝突ポイント (4つ)でビームを衝突させる。



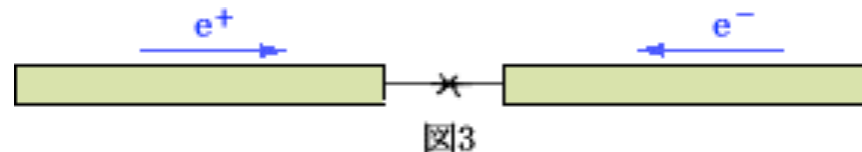
# 加速器の原理 (1)

## 線形加速器

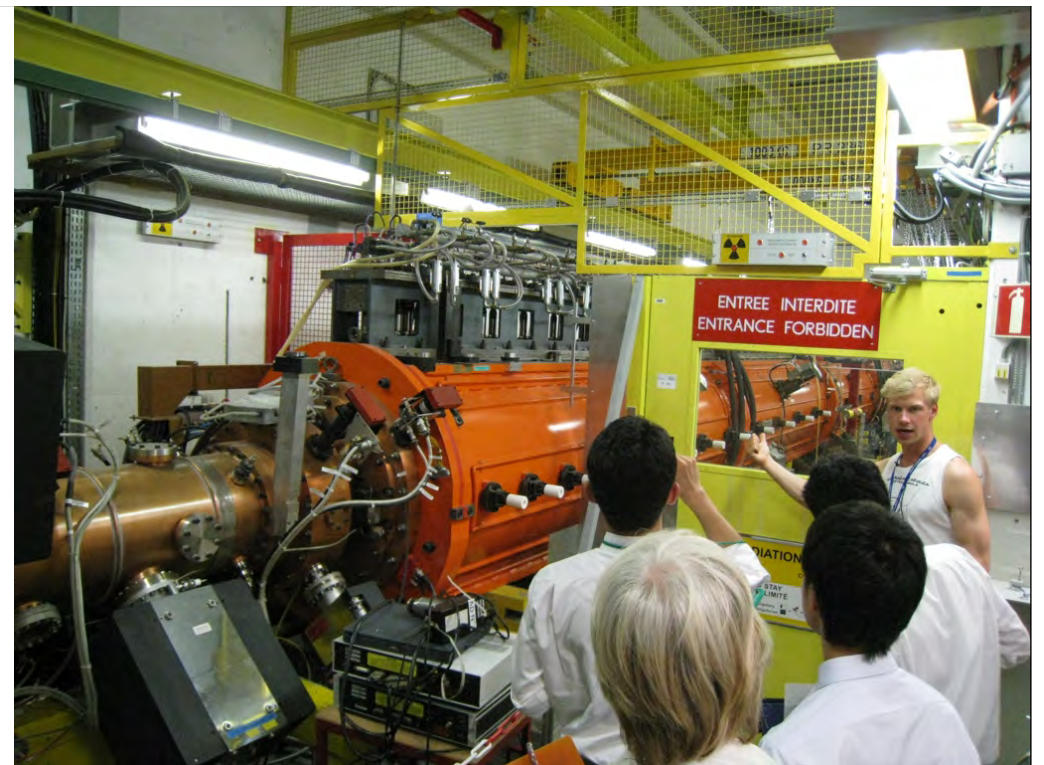


線形加速器

線形衝突型加速器  
(リニアコライダー)



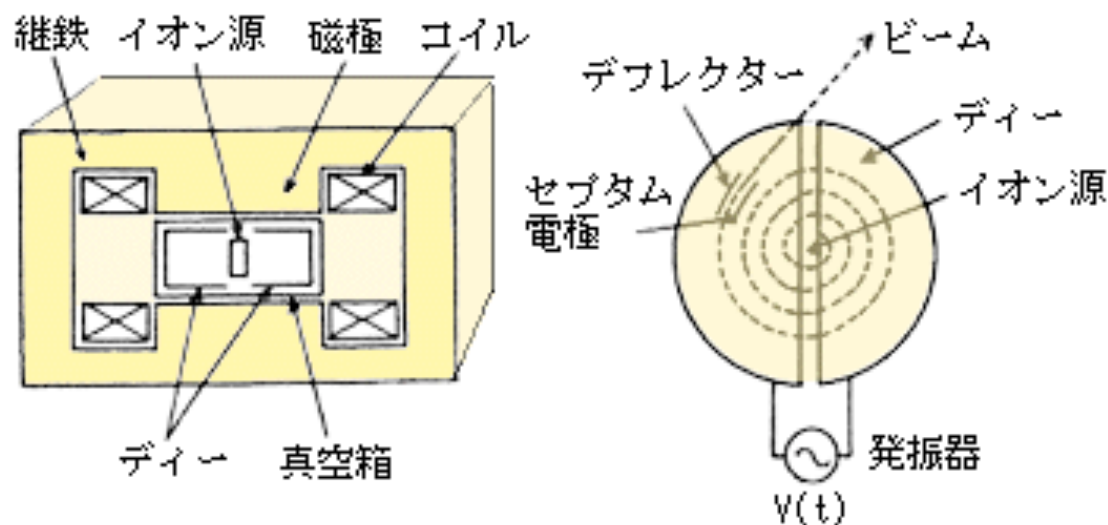
# 陽子の発生源と最初の加速 → (線形加速器)



← 重イオンの最初  
の加速を行う  
(LEIR)

# 加速器の原理 (2)

## サイクロトロン



$$\frac{mv^2}{r} = evB$$

遠心力

ローレンツ力

# 加速器の原理 (3)

## シンクロトロン

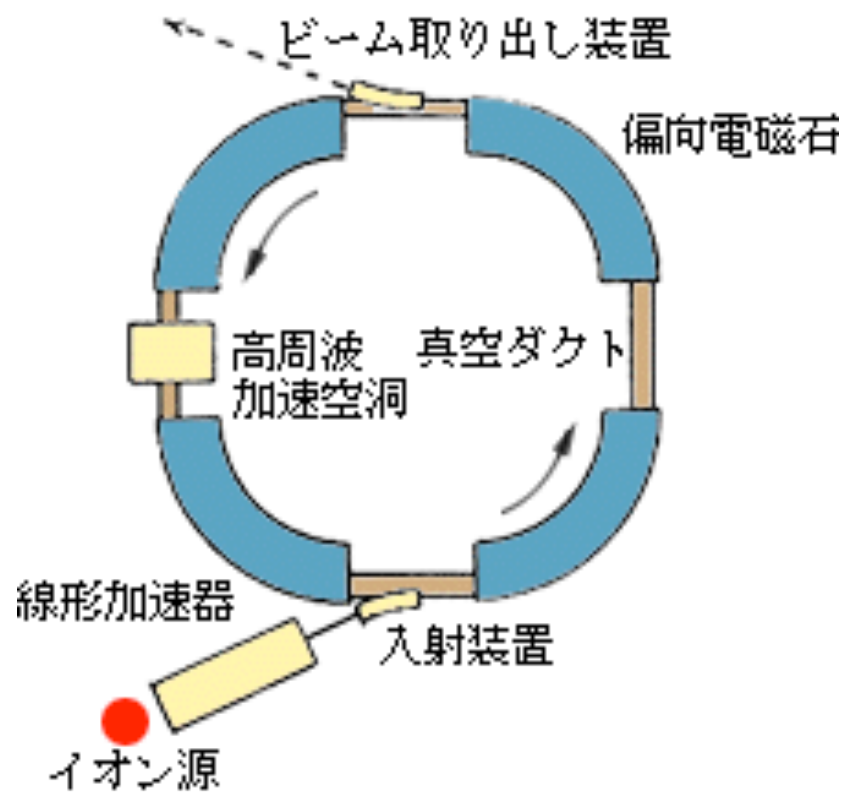


図1.シンクロトロンの構成

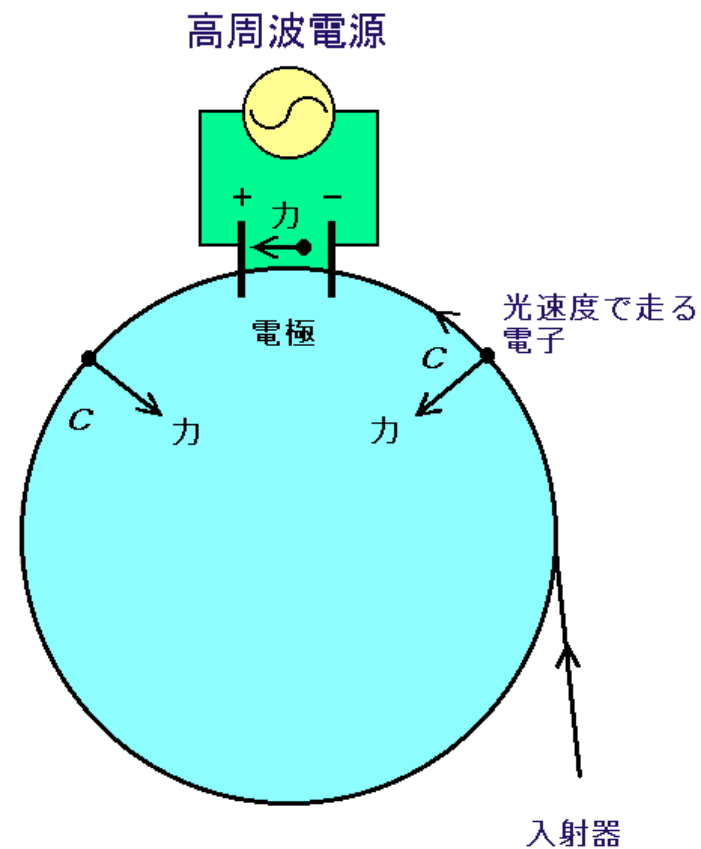
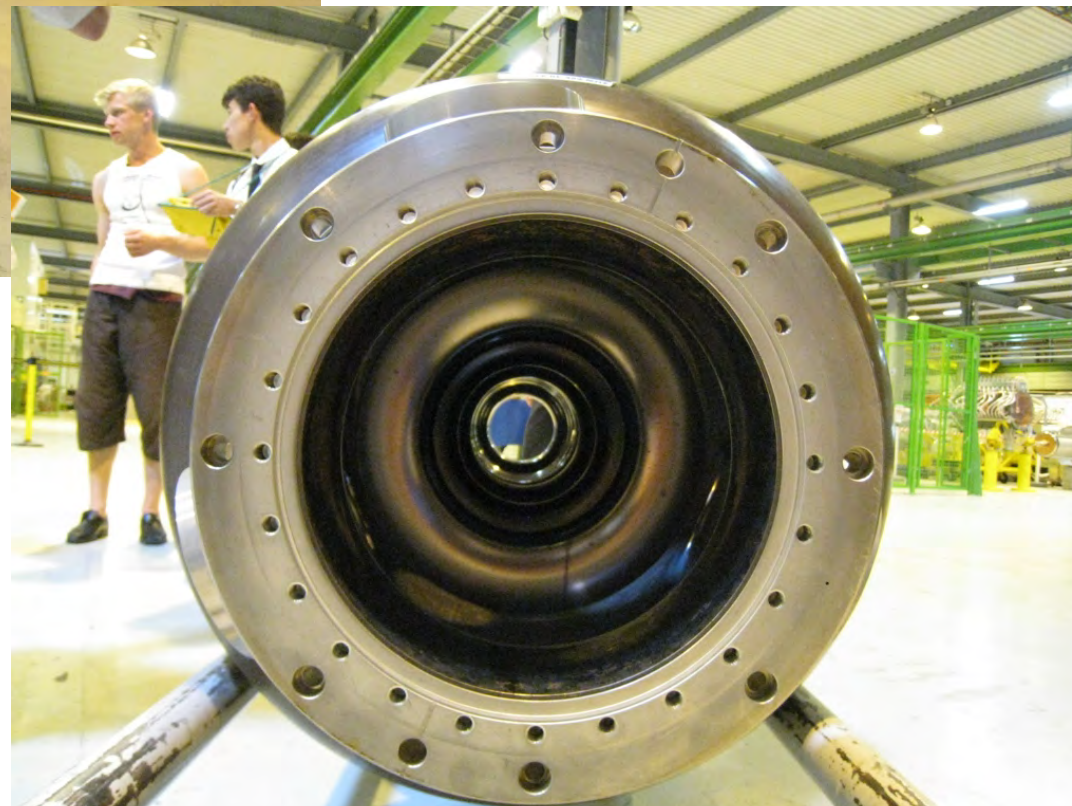


図1 シンクロトン加速の模式図

[出典]日本物理学会(編):シンクロトン放射、培風館(1986年12月)、p.1





**LHC 高周波加速空洞**



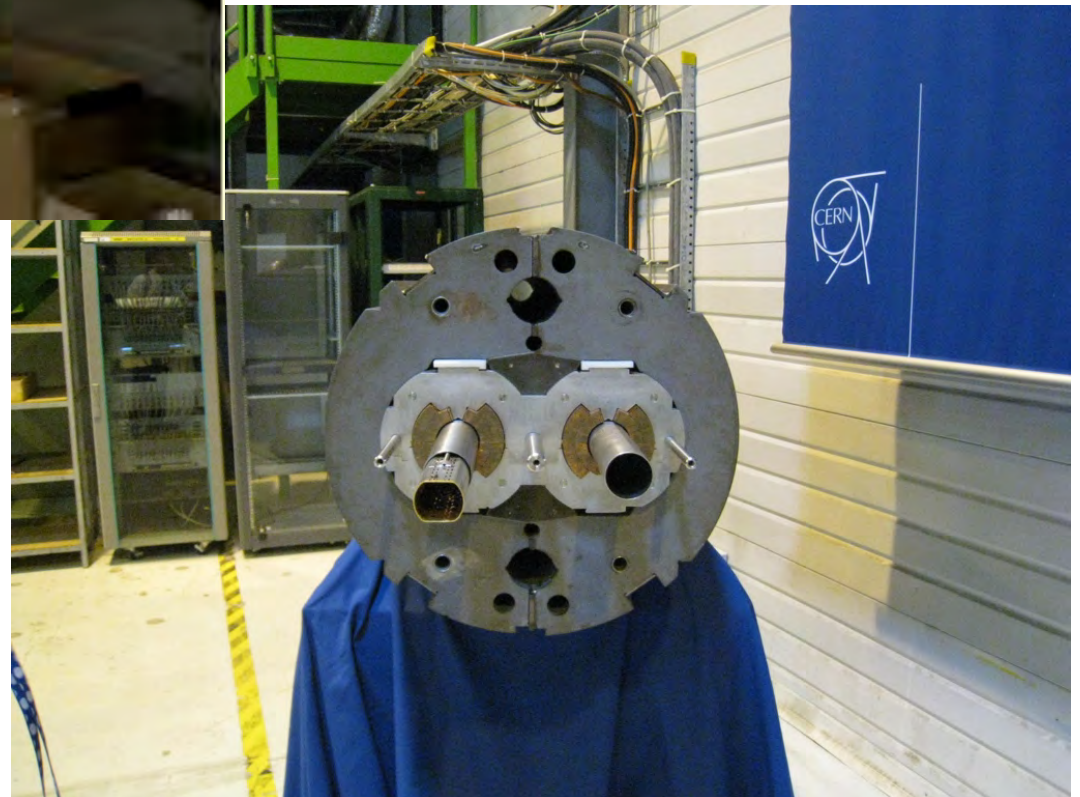


## LHC 四重極磁石

← (KEK (日本) と  
フェルミ研究所 (米国)  
の共同開発)

## LHC 超伝導 マグネット → (1,700 台設置)

陽子の束 ( $10^{11}$ 個),  
0.2 mm の広がりから  $16 \mu\text{m}$  にまで絞り  
込むレンズの役割  
→ 強力な超伝導磁石 (9 テスラ, T)  
地球磁場 = 1 Gauss,  $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gauss}$







← LHC加速器の  
電磁石で使われている  
超伝導体  
Nb（ニオブ）-Ti

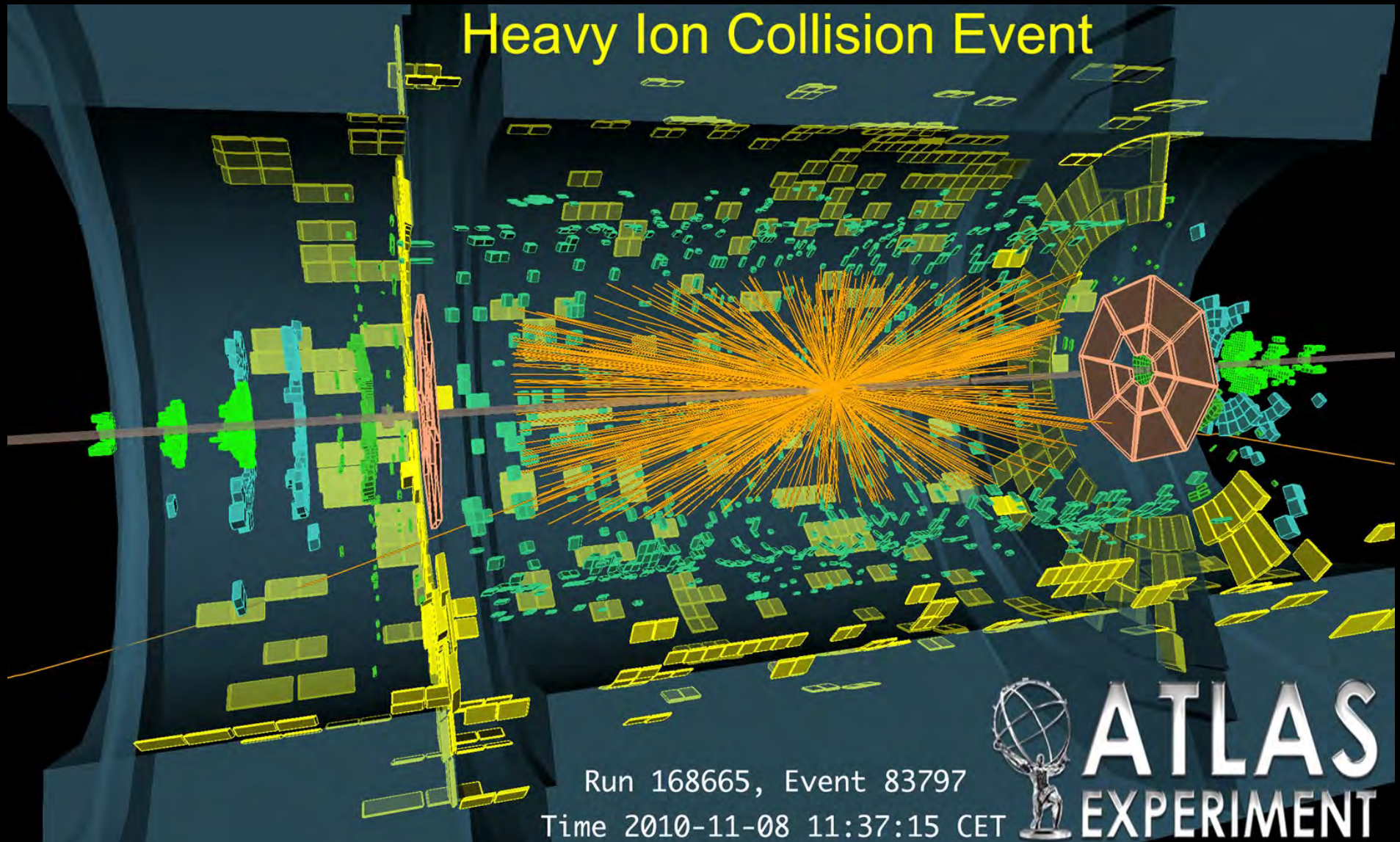
LHC加速器の →  
超伝導電磁石の断面

1.9 K で超伝導マグネットを  
冷却。宇宙背景放射の温度  
2.7 K よりも低い。



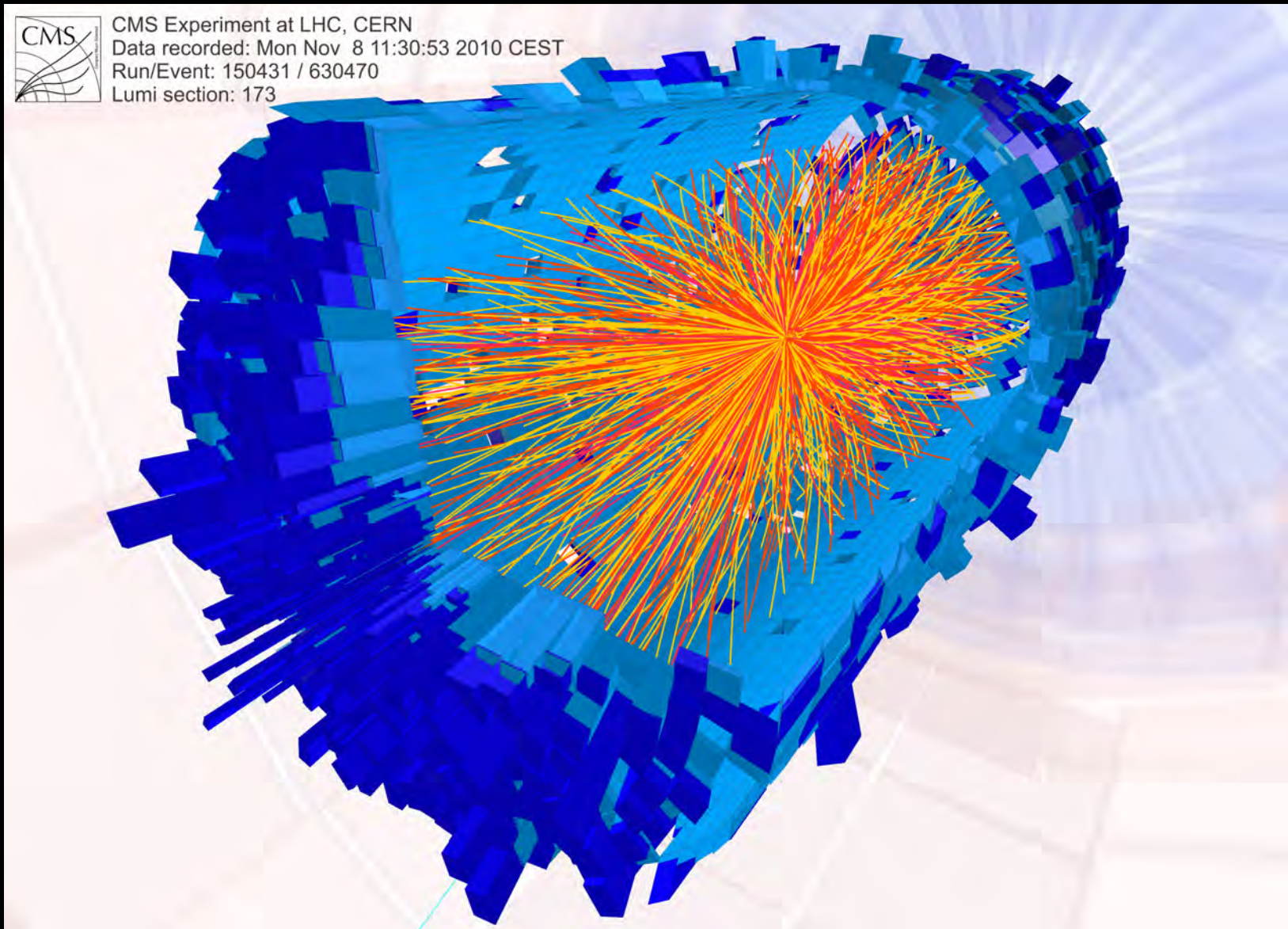


# ATLAS 国際共同実験 (CERN)



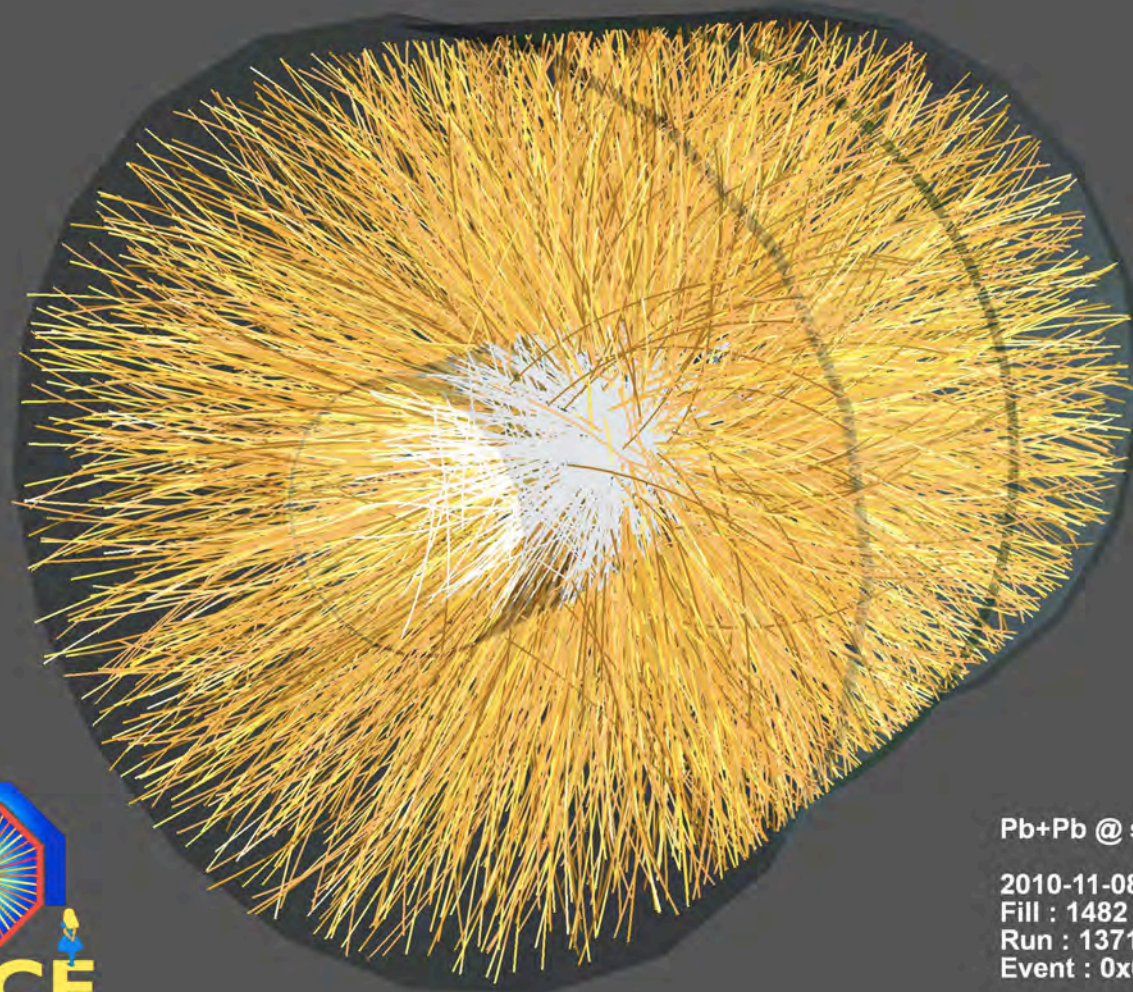


# CMS 国際共同実験 (CERN)





# ALICE 国際共同実験 (CERN)



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

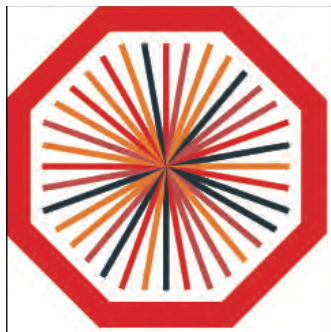
2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693





ALICE

# ALICE 国際共同実験 (CERN)



36 カ国, 129 研究機関

~1,000 の研究者

LHC で唯一、重イオン実験とクォーク・グルーオン  
プラズマ研究に特化した実験



## ALICE MATTERS

A Large Ion Collider Experiment



Home

What's on

Issues

About

Contact

July 2013



## "Meikei High School" visit to ALICE

by Tatsuya Chujo. Published: 20 July 2013  
**ALICE visit Japanese School**

During the period July 8 to 12, 2013, six high school students and two teachers from Meikei High School (Tsukuba, Japan) visited CERN.

Meikei High School is selected as one of the "Super Science High Schools (SSHs)", by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) in Japan. Each SSH has developed enriched curricula, teaching methods, and materials for science and mathematics in cooperation with universities and research institutes.

Followed by the lecture series in spring in Japan, on general modern physics, universe, elementary particle physics, nuclear physics, high energy heavy ion physics, and radiation, which have been done by the staff members of University of Tsukuba, Shinichi Esumi (Tsukuba) made a plan for this school visit to CERN.



During their visit students from the Meikei High School had the chance to visit different

<http://alicematters.web.cern.ch/?q=JapaneseSchool>

# 茗溪学園高校 ALICE 実験見学 (2013.07)

## Recent Comm

**ALICE Birthday**  
 on: **ALICE 20th**  
 4 months 1 we

**Good luck, Ste**  
 on: **Focus on:**  
 5 months 6 day

**Good to see y**  
 on: **CERN: A S**  
 5 months 1 we

**Good to see y**  
 on: **CERN: A S**  
 5 months 1 we

**grande gudda!**  
 on: **Focus On:**  
 5 months 3 we

## Archive

July 2013 (13)

June 2013 (14)

May 2013 (12)

April 2013 (12)

March 2013 (1)

February 2013

January 2013

December 201

November 201

October 2012

August 2012 (

July 2012 (42)







電子識別  
装置  
(TRD) 東大

高運動量粒  
子識別器  
(HMPID)

マグネット

光子測定装  
置 (EMCal)

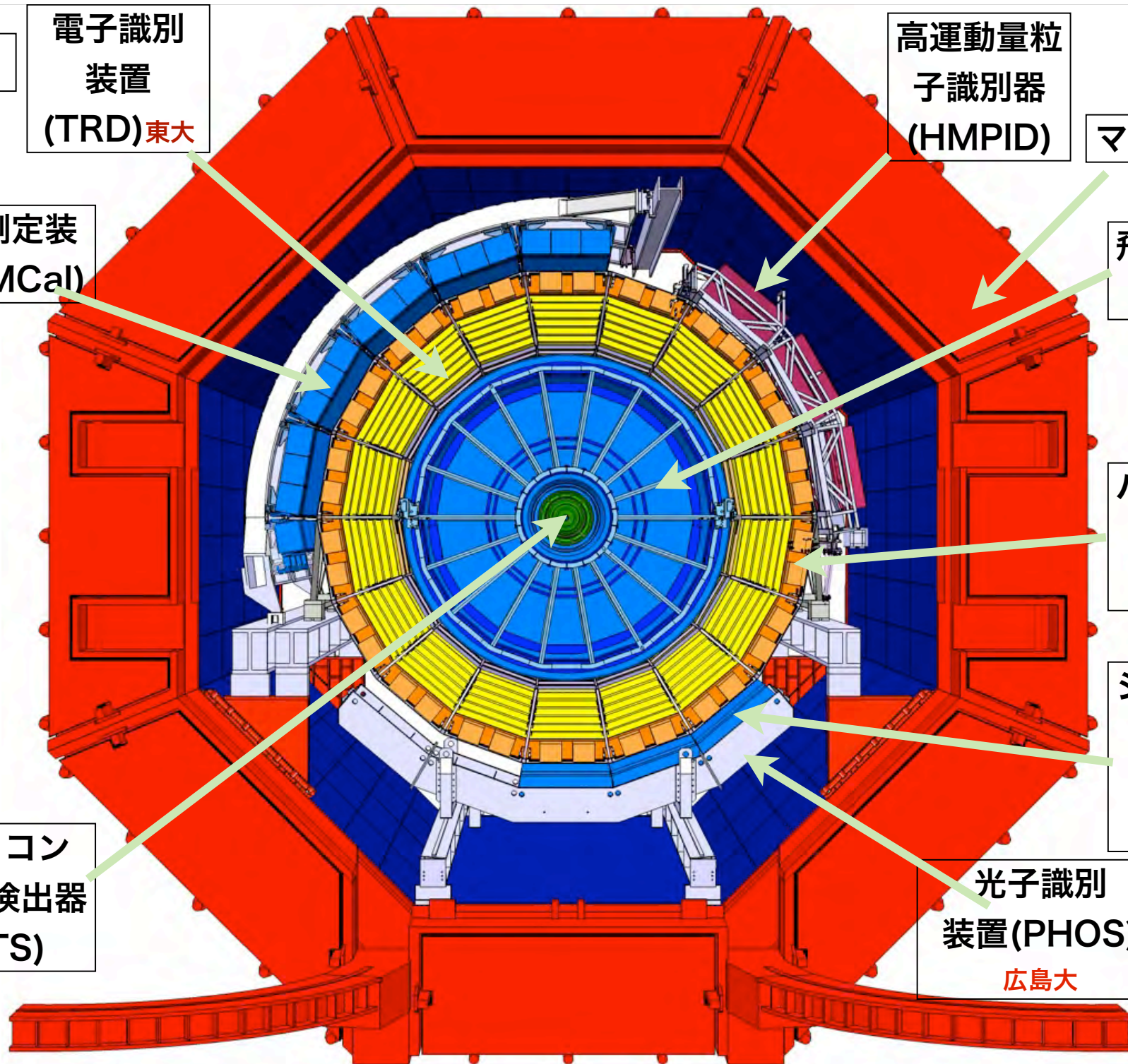
飛跡検出器  
(TPC)

ハドロン識  
別装置  
(TOF)

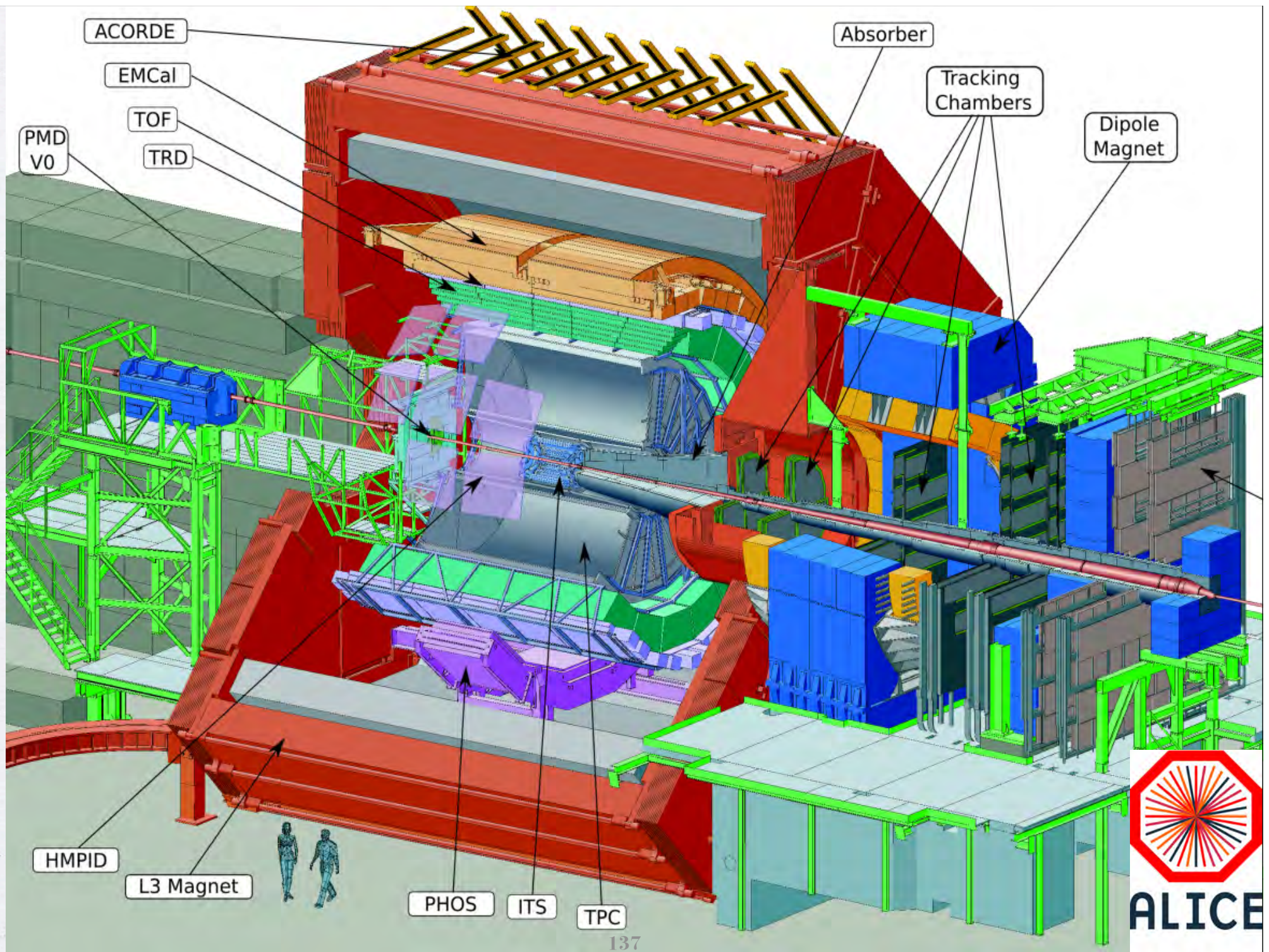
ジェット対  
測定装置  
(DCal)  
筑波大

シリコン  
飛跡検出器  
(ITS)

光子識別  
装置 (PHOS)  
広島大





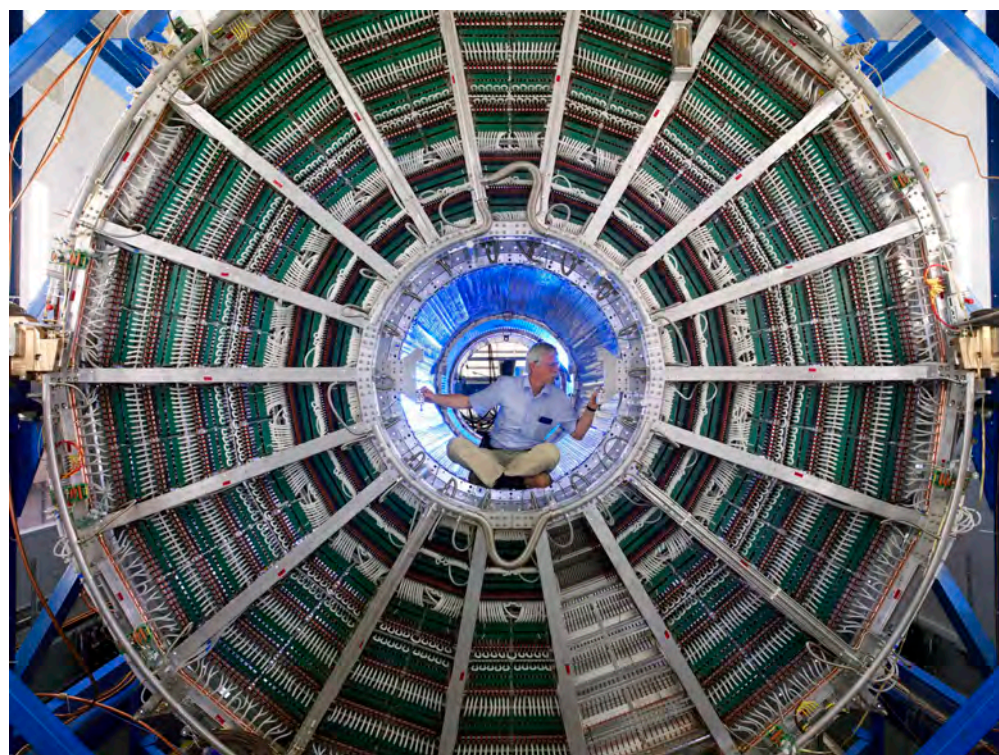
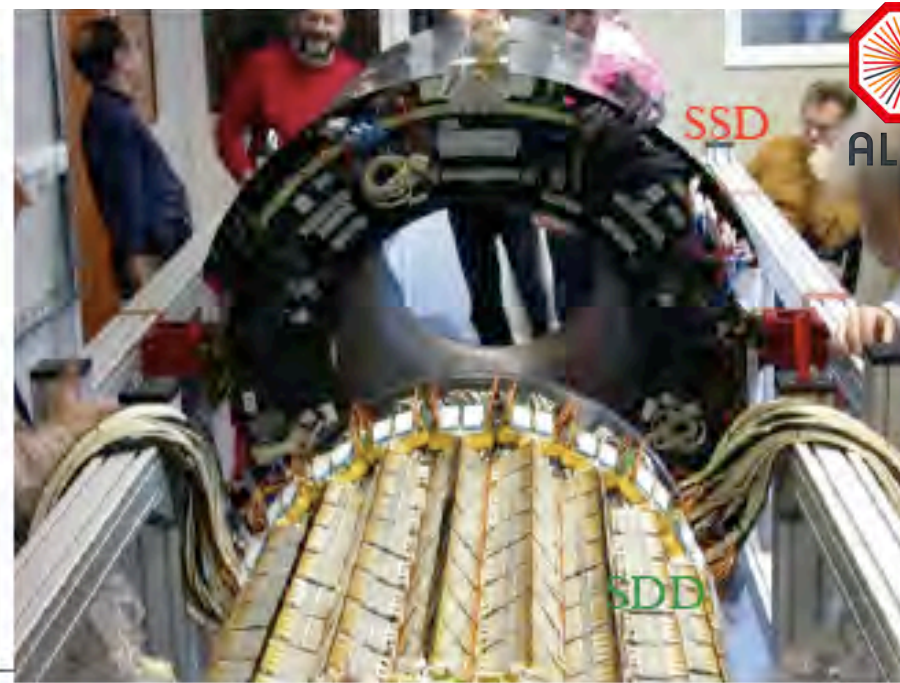




← ALICE の電磁石

ALICE 検出器、大きさ 16 m x 26 m、  
重さ 10,000 トン、  
宇宙のスープを製造、検証する巨大な目と耳。

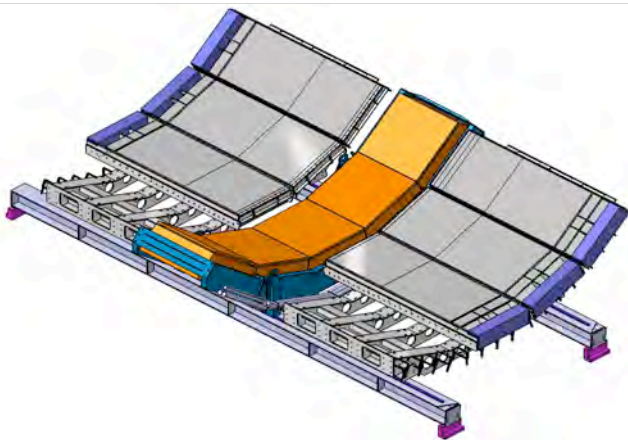




↑半導体 (Si) 検出器  
(全約 13 メガ  
チャンネル = ピクセル)

←飛跡検出器 (TPC)

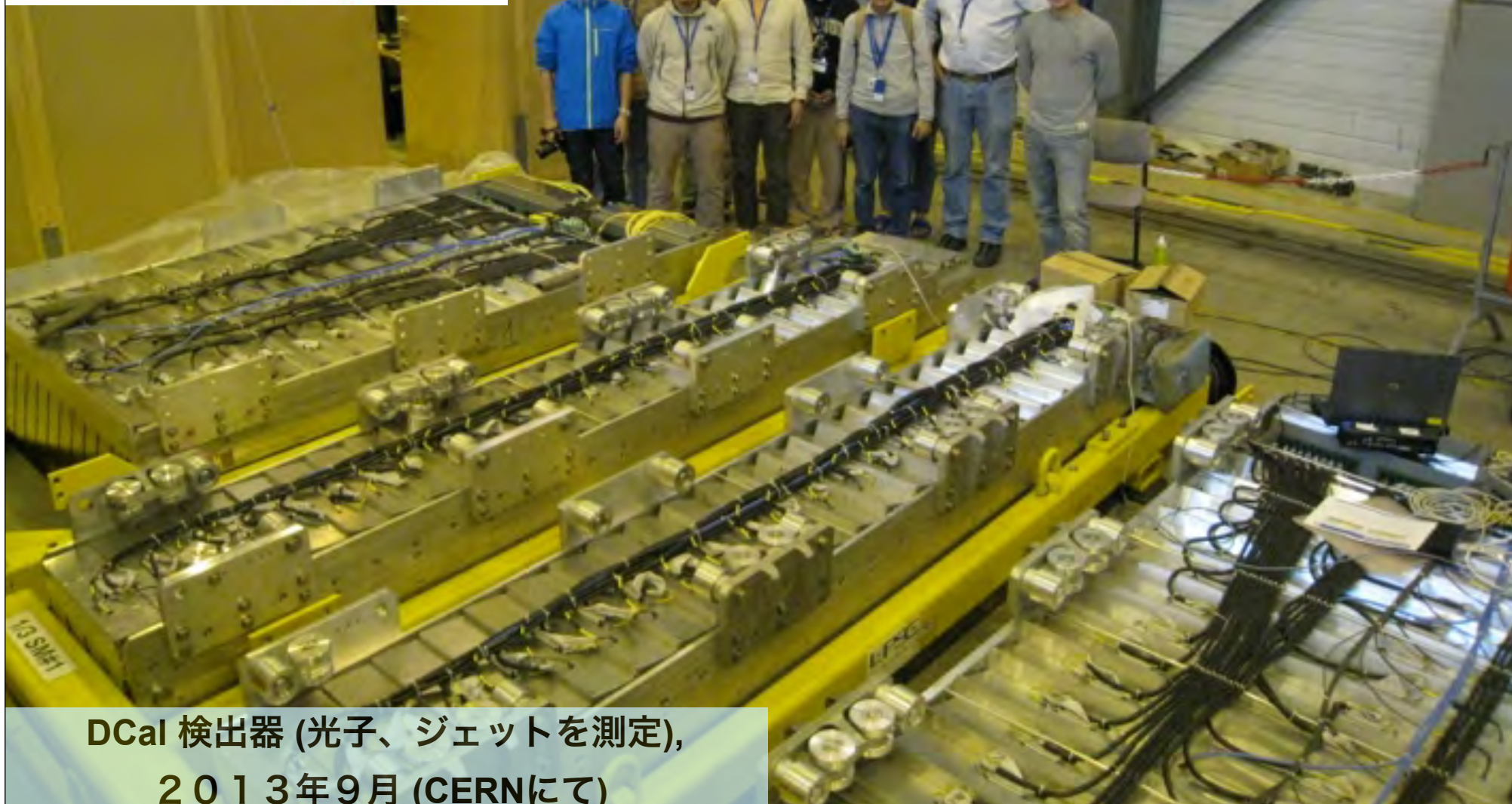




ALICE

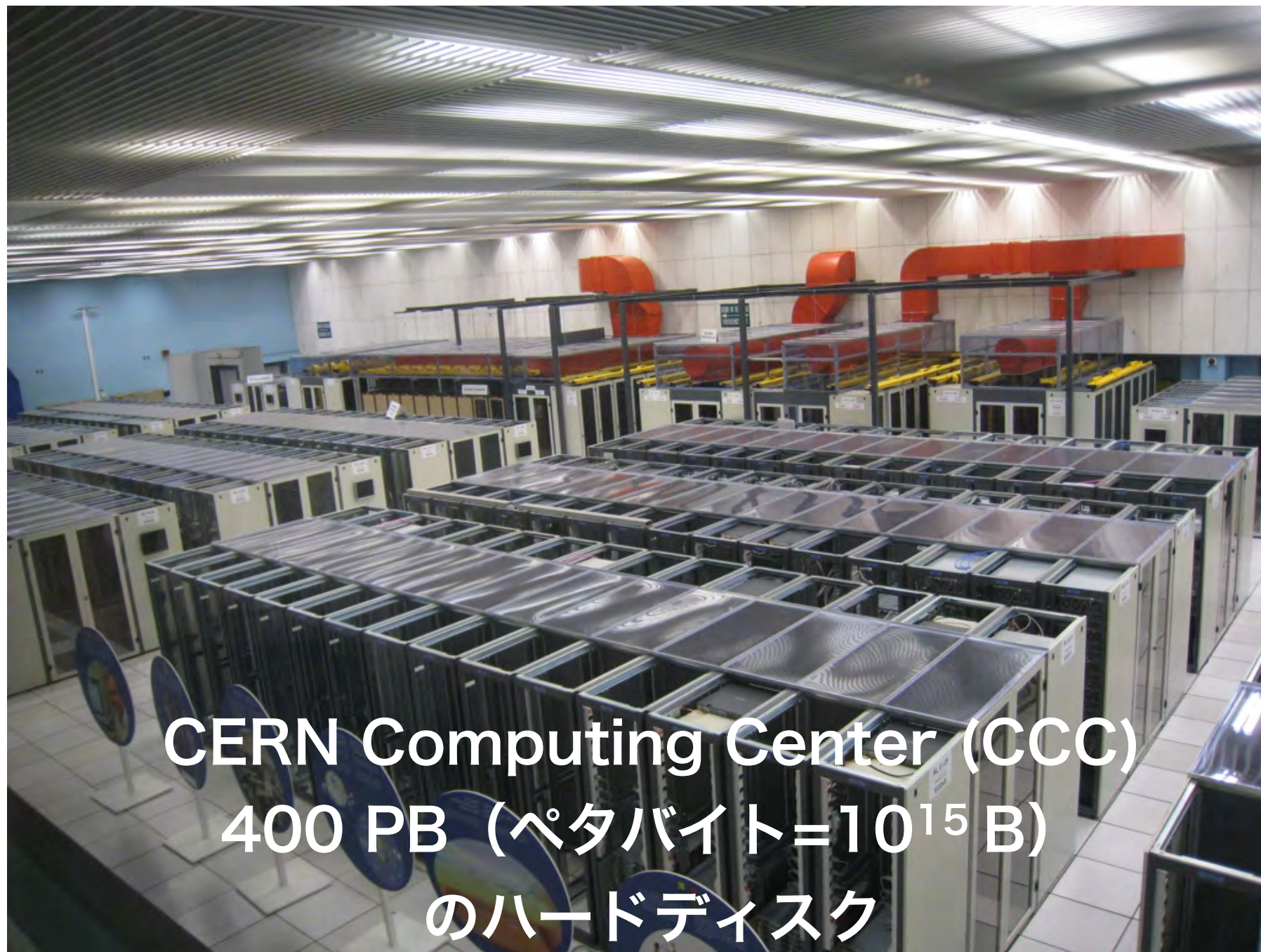


筑波大学  
University of Tsukuba



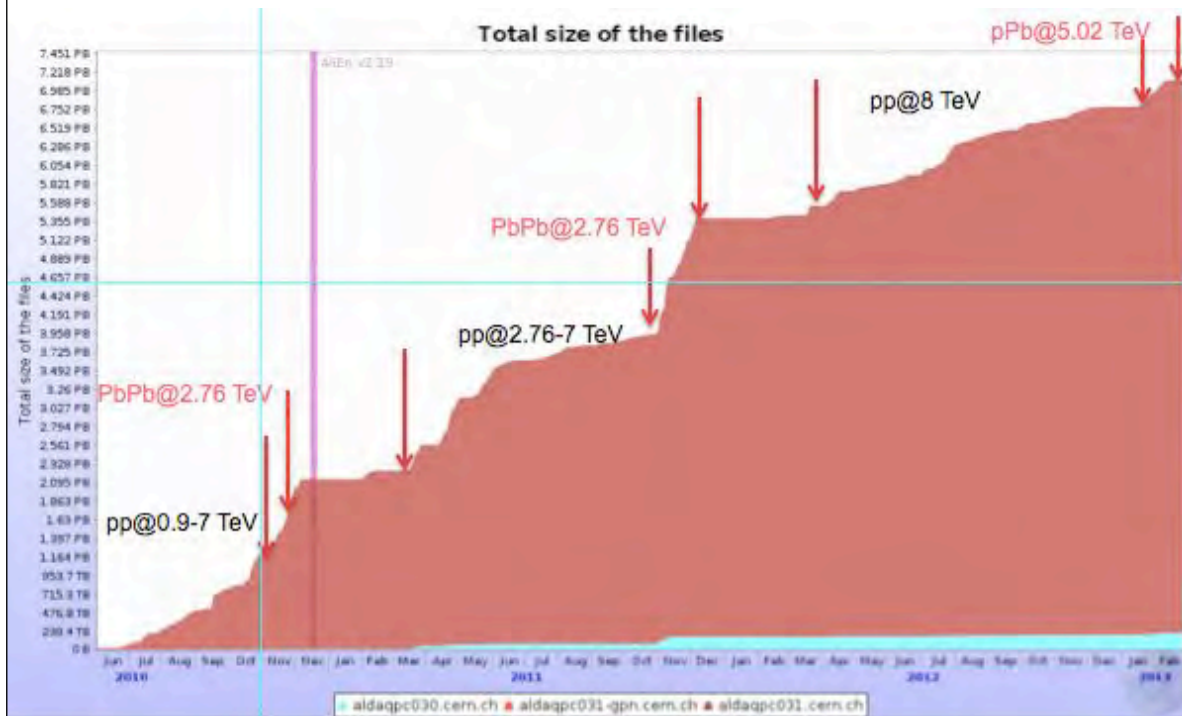
DCal 検出器 (光子、ジェットを測定),  
2013年9月 (CERNにて)





CERN Computing Center (CCC)  
400 PB (ペタバイト= $10^{15}$  B)  
のハードディスク





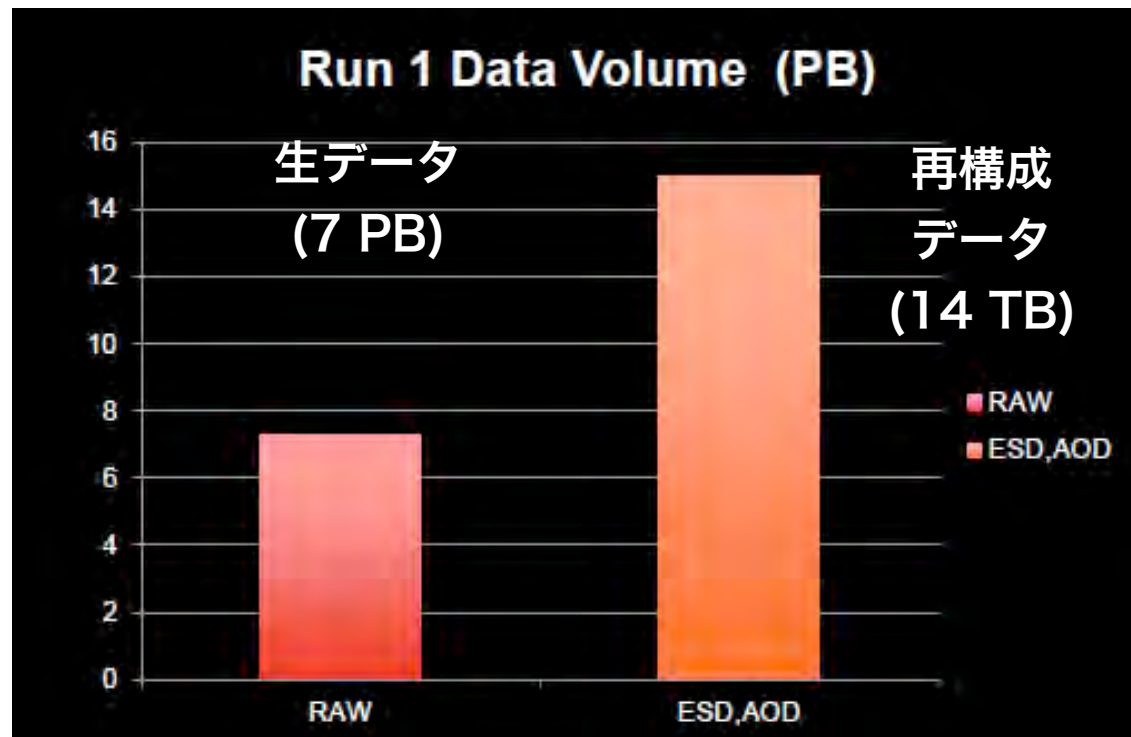
# ALICE実験で生成された データボリューム

2010 - 2013

生データ : 7 PB

再構成データ : 14 PB

**合計 : 21 PB**



Google earth

録画

Grid

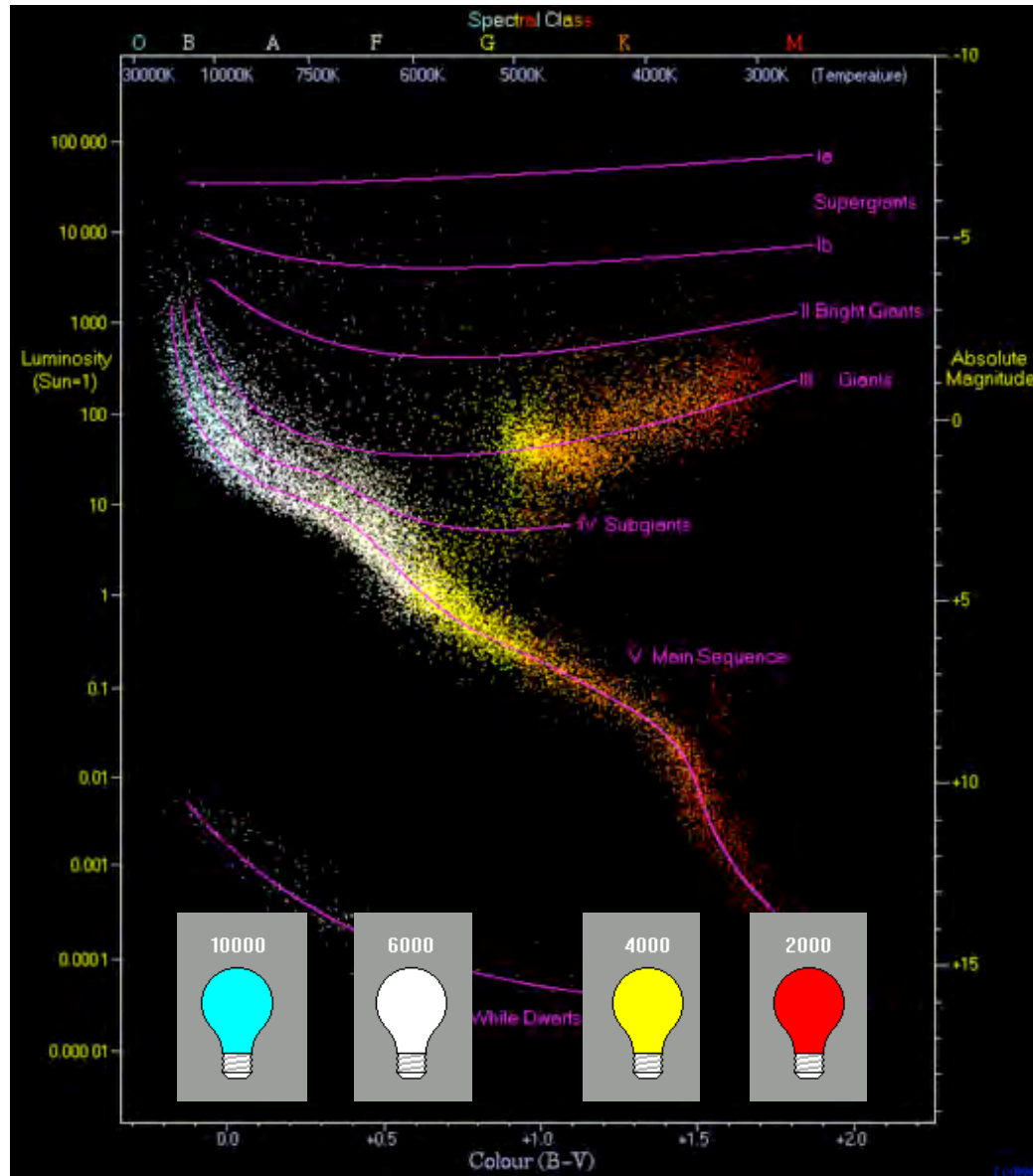
# QGPの温度を測るには？

- 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「**(強く) 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)

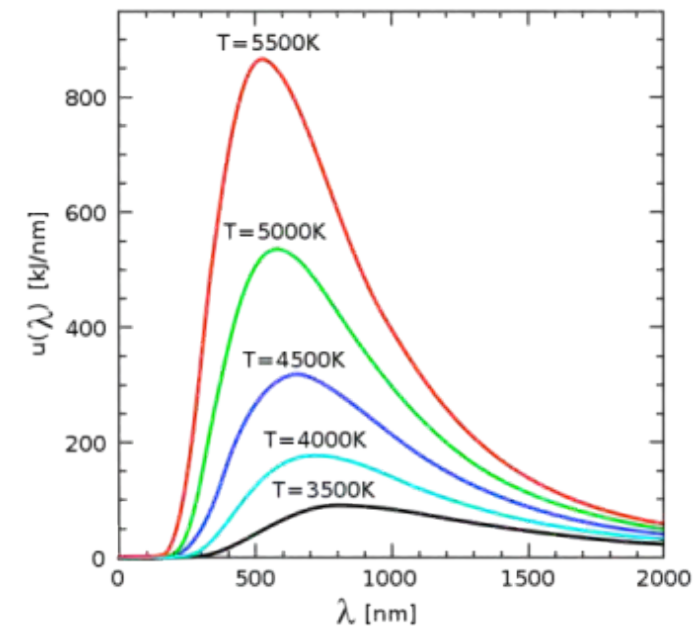
星の色  
(波長)

# 溶鋳炉の場合



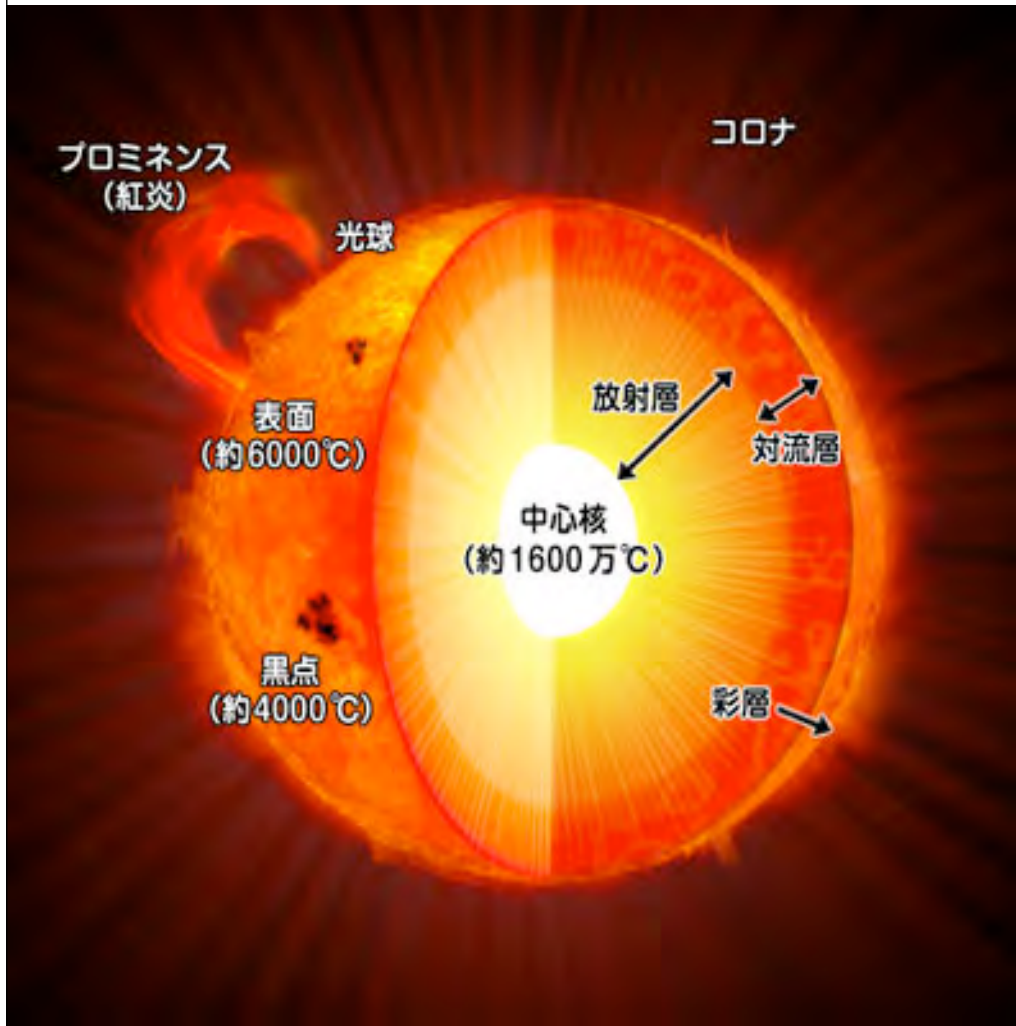
- 光の強度の波長分布（エネルギー分布）から、物質の温度を測定する。

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.

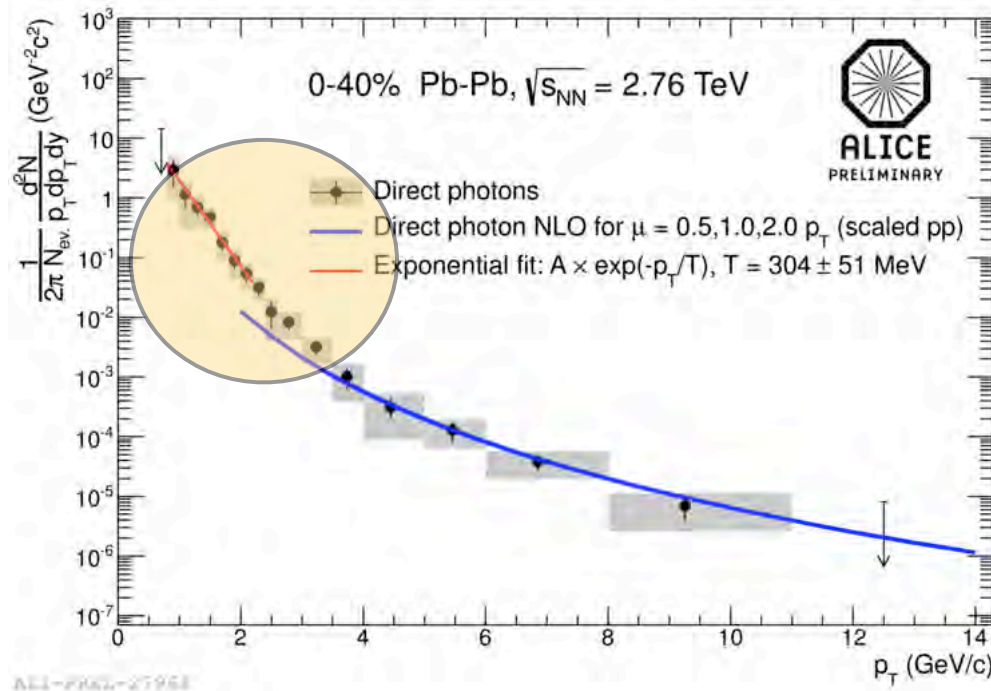
1 eV の平均運動エネルギーをもつ気体の温度は

11,604 K =  $10^4$  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を実現
- 世界で最も高い温度！

# ギネス記録に認定されている

## HIGHEST MAN-MADE TEMPERATURE

**Tweet**

0

8+1

0

Like

Send

Be the first of your friends to like this.



## FOR THE RECORD

**WHO:**  
**BROOKHAVEN NATIONAL  
LABORATORY'S  
RELATIVISTIC HEAVY ION  
COLLIDER**

### WHAT: HIGHEST MAN-MADE TEMPERATURE

WHERE:  
UNITED STATES

In February 2010, scientists at Brookhaven National Laboratory's Relativistic Heavy Ion Collider on Long Island, New York, USA, announced that they had smashed together gold ions at nearly the speed of light, briefly forming an exotic state of matter known as a quark-gluon plasma. This substance is believed to have filled the universe just a few microseconds after the Big Bang. During the experiments – which began in July 2001 and have taken a decade to authenticate – the plasma reached temperatures of around 4 trillion°C, some 250,000 times hotter than the centre of the Sun.

As of July 2012, even higher temperatures may have been achieved at Brookhaven, following the colliding of (heavier) uranium nuclei, but it will take a while to ascertain the temperatures reached; experiments using the Large Hadron Collider near Geneva, Switzerland, may have also achieved higher temperatures but are also yet to be determined.

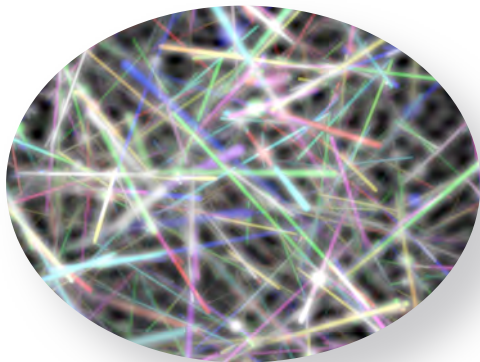


# QGPから物質世界へ

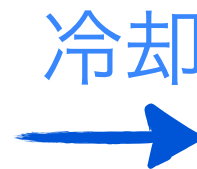
- 物質の相には、固体、液体、気体など、様々な相がある。
- QGP相からハドロン（陽子や中性子などの物質）相への相転移。

# $t = 1/10,000$ 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！



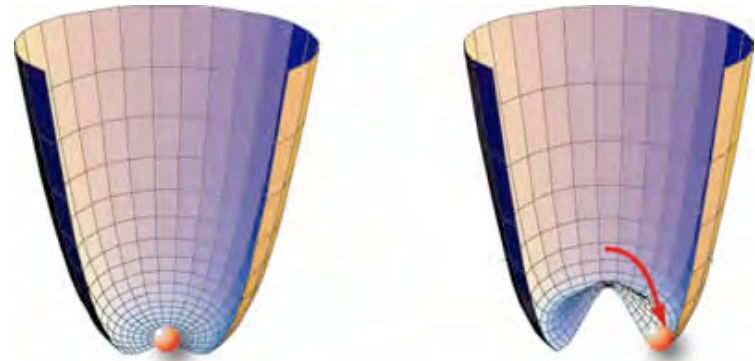
クォークが飛び交う様子  
(QGP)



クォーク3つで陽子、中性子を形成  
(ハドロン化)

# 残り 99%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**



南部陽一郎 博士



**「高校物理」**

**と**

**今回の講演で出て来た話題**

**(現代物理学)**

**との関連は？**

# 「高校物理」と今回の講演で出て来た話題との関連

【図表2】「物理基礎」新課程項目詳細

項 目	備 考	学習指導要領による規定
(1) 物体の運動とエネルギー		
ア 運動の表し方		
(ア) 物理量の測定と扱い方	新規	物理量の測定と表し方、誤差と精度、有効数字 「物理基礎」の学習全体に通じる手法
(イ) 運動の表し方		直線運動を中心に変位や速度の表し方 合成速度・相対速度
(ウ) 直線運動の加速度		加速度を理解
イ 様々な力とその働き		
(ア) 様々な力		摩擦力、弾性力、浮力(関連して圧力)を扱う 垂直抗力、糸の張力も可 静電気力などの遠隔力についても定性的に
(イ) 力のつり合い		平面内で働く力のつり合い 力の合成・分解をベクトルで扱う
(ウ) 運動の法則		運動の三法則を、直線運動を中心に扱う
(エ) 物体の落下運動		自由落下、鉛直投射を扱う 水平投射、斜方投射、空気抵抗は定性的に
ウ 力学的エネルギー		
(ア) 運動エネルギーと位置エネルギー		仕事と関連付けて重力の位置エネルギー、 弾性エネルギーを扱う
(イ) 力学的エネルギーの保存		仕事と関連付けて力学的エネルギー保存則を扱う 力学的エネルギー保存則が成り立つ場合を中心に

←ハップルの法  
則、特殊相対性  
理論

←質量とはなにか

←特殊相対性理論

←フックの法則  
(強い力)

# 「高校物理」と今回の講演で出て来た話題との関連

(2) 様々な物理現象とエネルギーの利用		
<b>ア 熱</b>		
(ア) 熱と温度	物質の三態は物理Ⅱより移行	熱・温度を分子運動の観点から定性的に内部エネルギー、物質の三態にも触れる
(イ) 熱の利用		熱の移動・熱と仕事の変換、熱現象の不可逆性 熱量保存、熱容量、比熱容量(比熱)、潜熱、熱膨張
<b>イ 波</b>		
(ア) 波の性質		直線状に伝わる波の波長・振動数・速さ 重ね合わせ、定在波(定常波)は作図中心に 横波と縦波の違い
(イ) 音と振動		気柱の共鳴、弦の共振、反射・うなりも扱う
<b>ウ 電気</b>		
(ア) 物質と電気抵抗		抵抗率が物質固有の値であること 電流は自由電子の流れ、半導体・絶縁体の存在
(イ) 電気の利用	電磁誘導は物理Ⅱにおいて扱う	交流の発生・直流への変換、送電の仕組み 電磁波の利用
<b>エ エネルギーとその利用</b>		
(ア) エネルギーとその利用	新規	水力・化石燃料・原子力・太陽光などの電気エネルギーへの変換とその特性 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、中性子線の特性と利用、線量の単位、原子力・放射線の安全性
<b>オ 物理学が拓く世界</b>		
(ア) 物理が拓く世界	新規	社会で利用されている科学技術の具体的事例

←クォーク・  
スープの温度

←相転移

←電波  
(宇宙背景放射, 3K)

←加速器、  
半導体検出器、  
コンピューティング

←放射線の検出



# 「高校物理」と今回の講演で出て来た話題との関連

【図表3】「物理」新課程項目詳細

項 目	備 考	学習指導要領による規定	
(1) 様々な運動			
ア 平面内の運動と剛体のつり合い			
(ア) 曲線運動の速度と加速度		変位・速度・加速度のベクトル表現、合成速度・相対速度	← 相対性理論
(イ) 斜方投射		水平投射・斜方投射、空気抵抗のある場合の落下にも触れる	
(ウ) 剛体のつり合い	物理Ⅰより移行	モーメントのつり合い、重心にも触れる	
イ 運動量			
(ア) 運動量と力積		運動量の変化が力積に等しい	← 強い力
(イ) 運動量の保存		衝突や分裂における運動量の保存	(引力と斥力)
(ウ) はね返り係数		衝突の際の力学的エネルギーの減少も扱う	
ウ 円運動と単振動			
(ア) 円運動		遠心力にも触れる	← ローレンツ力と
(イ) 単振動		ばね振り子・単振り子を扱う	遠心力
エ 万有引力			
(ア) 惑星の運動		ケプラーの法則を扱う	
(イ) 万有引力		万有引力の位置エネルギーも扱う	
オ 気体分子の運動			
(ア) 気体分子の運動と圧力	ボイルの法則・シャルルの法則は物理Ⅰより移行	ボイル・シャルルの法則、状態方程式、分子の速さ・運動エネルギーを扱う	← 太陽の温度
(イ) 気体の内部エネルギー		分子運動と関連付けて理想気体を扱う	(電子ボルトと
(ウ) 気体の状態変化		熱力学第一法則を扱う、熱効率、熱力学第二法則にも触れる	ケルビンの関係)

# 「高校物理」と今回の講演で出て来た話題との関連

<b>(2) 波</b>		
<b>ア 波の伝わり方</b>		
(ア) 波の伝わり方とその表し方	物理Iより移行	ホイヘンスの原理、水面波の反射・屈折、波の式
(イ) 波の干渉と回折	物理Iより移行	水面波を扱うこと
<b>イ 音</b>		
(ア) 音の干渉と回折	物理Iより移行	音の干渉(クインケ管など)・回折・屈折
(イ) 音のドップラー効果	物理Iより移行	音源・観測者が一直線上を運動する場合 音源が音速を超える場合に触れることも可
<b>ウ 光</b>		
(ア) 光の伝わり方	物理Iより移行	光速・波長、反射・屈折・分散・偏光など 鏡・レンズの性質は基本的な扱い、光のスペクトル
(イ) 光の回折と干渉	物理Iより移行	ヤングの実験、回折格子、薄膜の干渉 光路長、反射による位相変化 くさび形空気層やニュートンリングも可
<b>エ 探究活動</b>		
<b>(3) 電気と磁気</b>		
<b>ア 電気と電流</b>		
(ア) 電荷と電界		クーロン力、電気量保存、電気力線、静電誘導 摩擦電気、箔検電器なども可
(イ) 電界と電位		電界と電位の関係、電荷の移動と仕事にも触れる
(ウ) コンデンサー		平行板コンデンサーの電気容量、充電と放電 合成容量、誘電体の挿入も可
(エ) 電気回路		キルヒホッフの法則、抵抗率の温度変化、電池の起電力と内部抵抗、 ホイートストンブリッジ、電球の電流特性などを扱う 半導体のpn接合にも触れる
<b>イ 電流と磁界</b>		
(ア) 電流による磁界		直線電流・円形電流・ソレノイドがつくる磁界 磁性体、地磁気も可
(イ) 電流が磁界から受ける力		電流が磁界から受ける力、ローレンツ力、荷電粒子の運動
(ウ) 電磁誘導		電磁誘導、自己誘導・相互誘導、交流発電機など。うず電流も可 交流、リアクタンス、直列回路のインピーダンス
(エ) 電磁波の性質とその利用		電磁波の基本的性質、電気振動、電磁波の発生など ヘルツの実験、物体の熱放射も可

←光のドップラー  
効果、赤方変位、  
宇宙膨張、スペク  
トル

←加速器、検出器

←半導体検出器

←加速器、検出器



# 「高校物理」と今回の講演で出て来た話題との関連

(4) 原子		
ア 電子と光		← 加速器の原理
(ア) 電子		
(イ) 粒子性と波動性		← ドブロイ波長
イ 原子と原子核		(量子論)、
(ア) 原子とスペクトル	原子核の発見→	検出器
(イ) 原子核	→	
(ウ) 素粒子	$E = mc^2$ (重い	← 4つの力、素粒子、Higgs 粒子
ウ 物理学が築く未来	バネの話し、クォークの閉じ込め)	
(ア) 物理学が築く未来		

この様に、皆さんが教科書で習っていることは、  
現代物理学の研究において、基礎となっている

## 物理学の研究

= 「物理の教科書」の新たな1ページを作る！

みなさんもチャレンジしてみよう。



# 講義のまとめ

- 現代の加速器実験では、高エネルギーの重イオンを加速、衝突させて、宇宙の初期状態を疑似生成することができる。
- 宇宙初期の状態は、どうやらクォークスー  
プ（液体）的性質を持つ事が分かってきた
- 現在、この性質の解明（クォーク物性）の  
さらなる解明、物質（陽子など）の質量獲得機構の解明、などが期待されている

# 最後に

- 「強く思うこと」、それだけ実現する。
- 将来どういう自分になりたいか、自分が何に向いているのか、アンテナを広く広げる
- （人との出会いを大切に。人生を変える人物か必ず2、3人、出てくる）
- 自分の為であると同時に、結局それが人のため、社会の為になる

# 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）
- ・ 「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）
- ・ ALICE 日本グループのホームページ：
- ・ <http://www.alice-j.org>





# 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 数理物質系 物理学域
- TEL/FAX : 029-853-4221
- 研究室のHP : <http://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/>