

---

# 現代物理学への招待 II

---

★★★★

★★★★

筑波大学物理学域  
中條 達也

# 自己紹介

- \* 氏名：中條 達也
- \* 現職：筑波大学物理学類 講師
- \* 専門：高エネルギー原子核物理学（実験）
- \* 現在やっている実験：
  - \* LHC-ALICE 実験(CERN・スイス), RHIC-PHENIX 実験 (BNL・アメリカ)など
- \* 2000年、筑波大学 博士（理学）号取得、BNL博士研究員（米）、バンダービルト大学（アメリカ）博士研究員を経て、2005年より現職

# 講義内容

テーマ：「宇宙の歴史と現代物理学」

第1回 ビックバンと原子核・素粒子物理学

第2回 重イオン衝突実験で宇宙誕生の謎にせまる



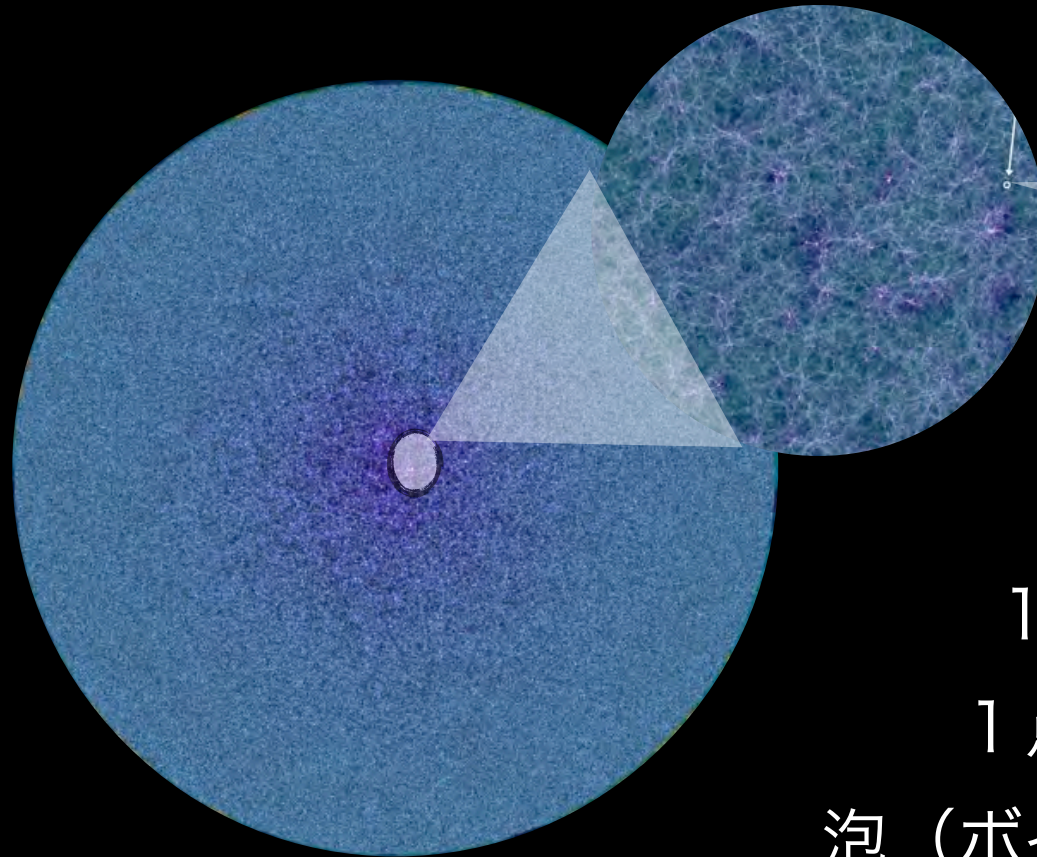
# 第1回 ビックバンと原子核・素粒子 物理学

1.はじめに

2.ビックバン（その証拠と意味するところ）

3.力と素粒子、質量の謎

4.まとめ



137億年前  
1点1点が銀河  
泡（ボイド）構造をもつ  
＝宇宙の大規模構造

$> 10^{26}$   
m

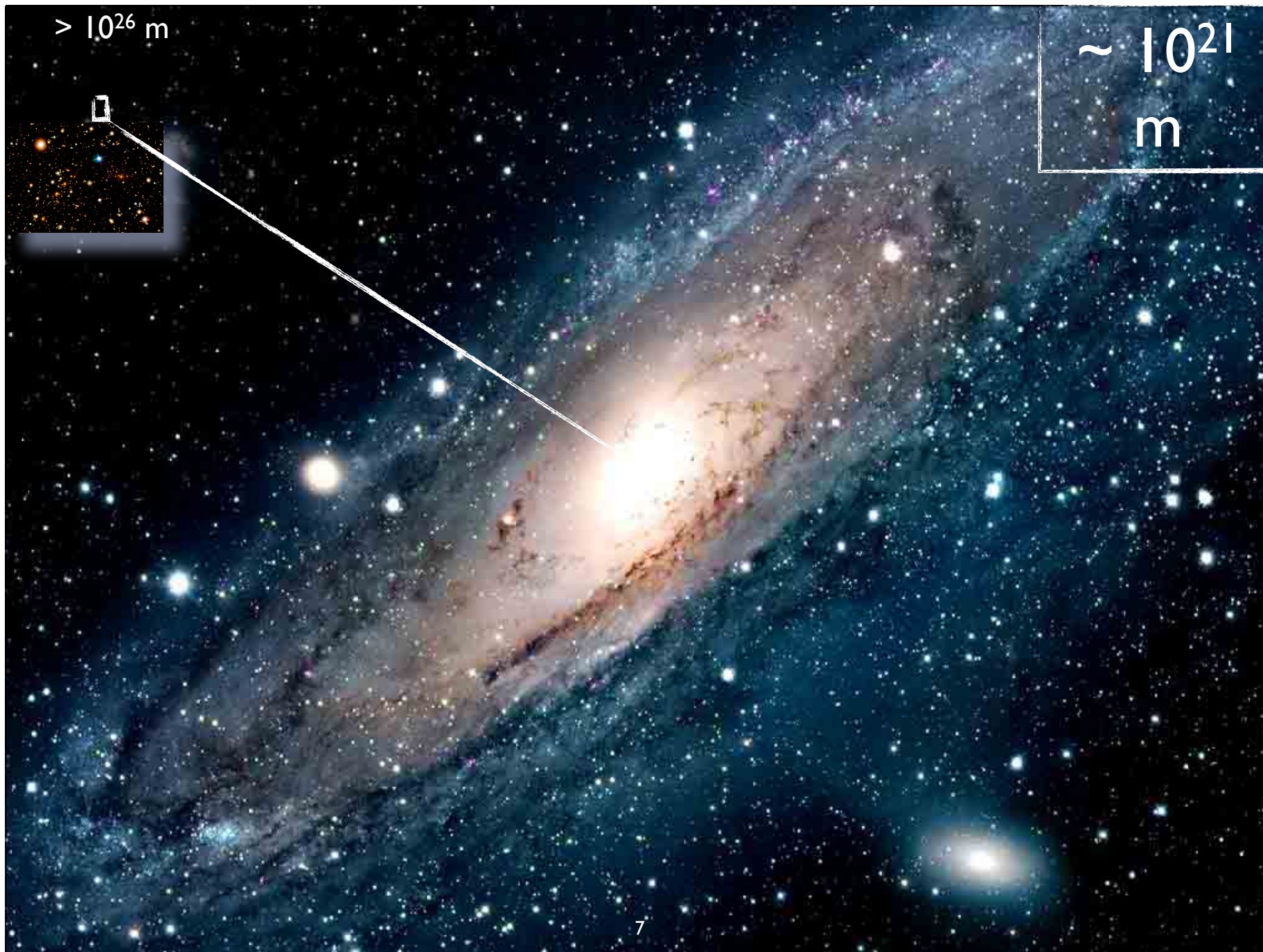




$> 10^{26}$  m

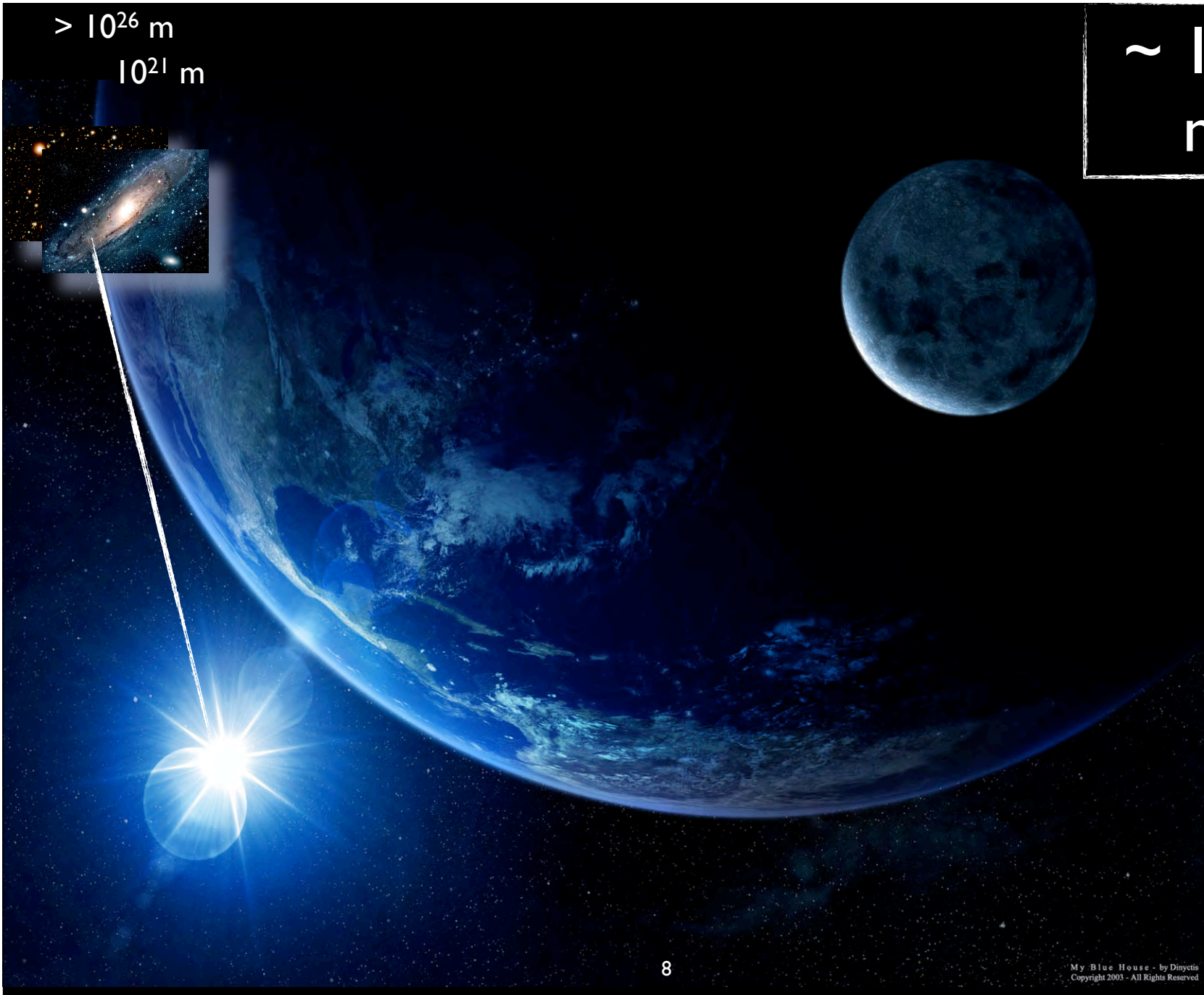
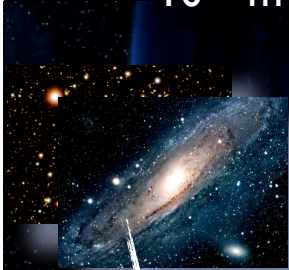


$\sim 10^{21}$   
m



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

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





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

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

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

$10^2 \text{ m}$





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

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

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

$10^2 \text{ m}$

1.70 m





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

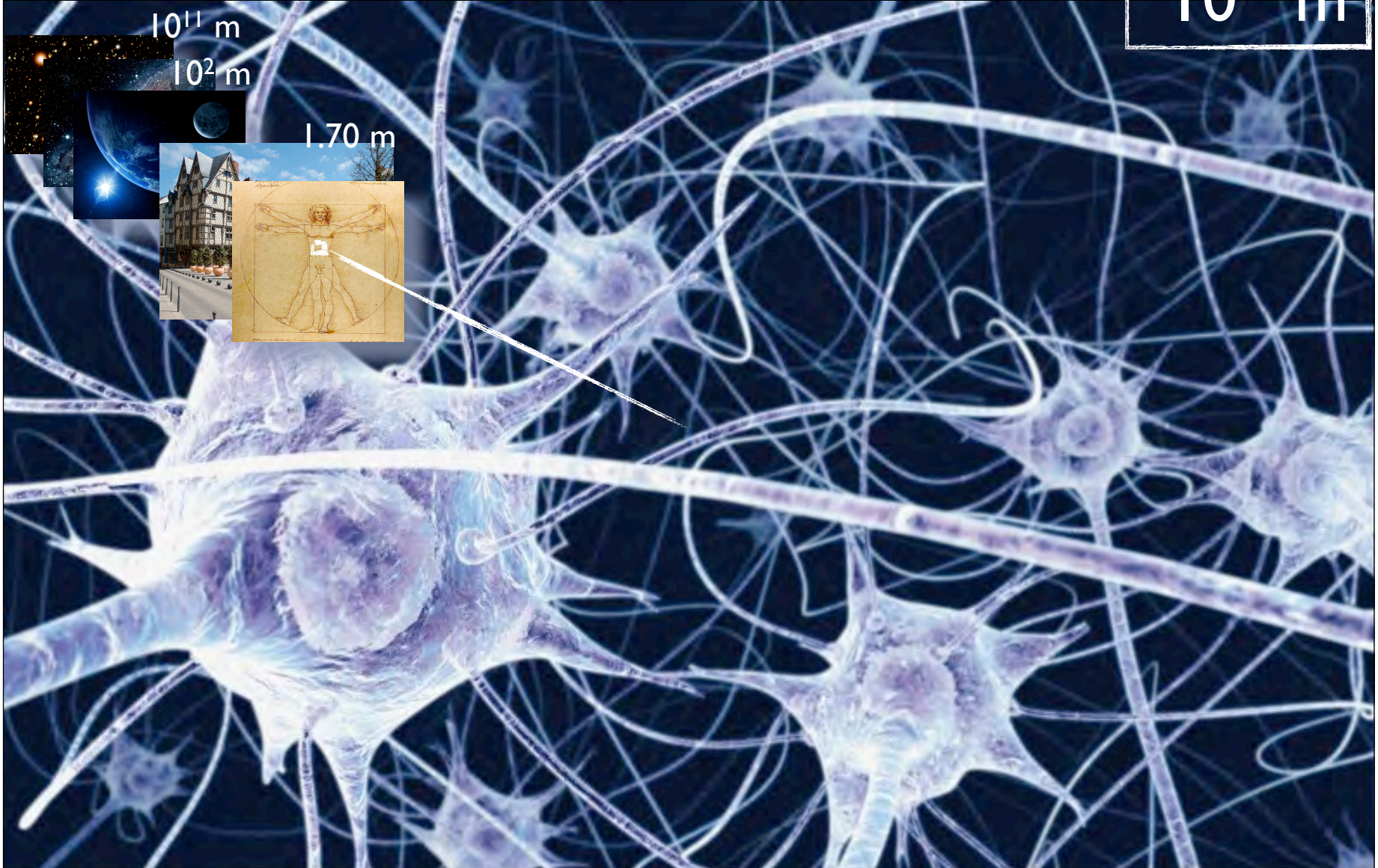
$10^{21} \text{ m}$

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

$10^2 \text{ m}$

1.70 m

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



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

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

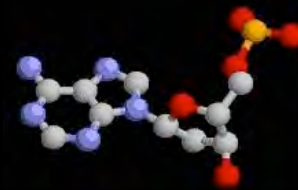
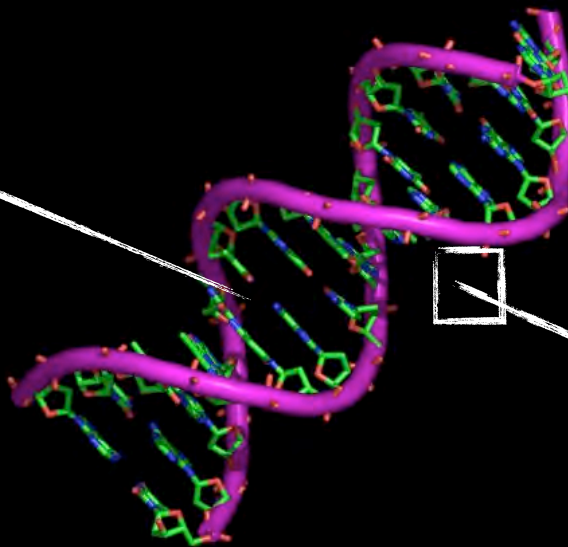
$10^{11} \text{ m}$

$10^2 \text{ m}$

1,70 m

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

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





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

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

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

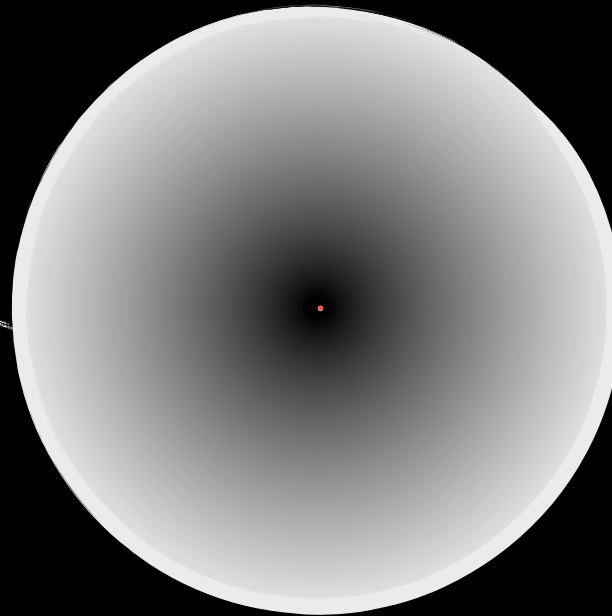
$10^2 \text{ m}$

$1,70 \text{ m}$

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

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

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



水素原子

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

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

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

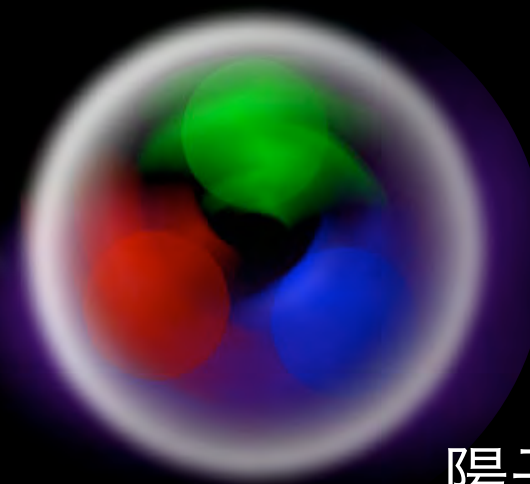
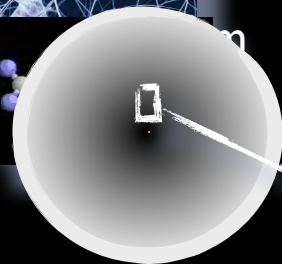
$10^2 \text{ m}$

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

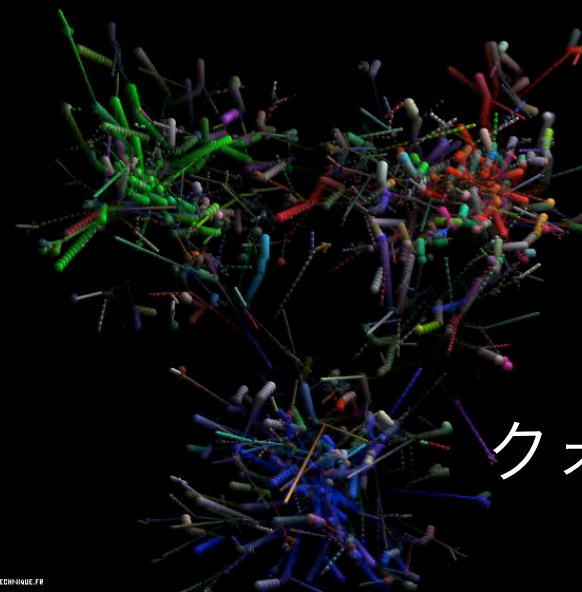
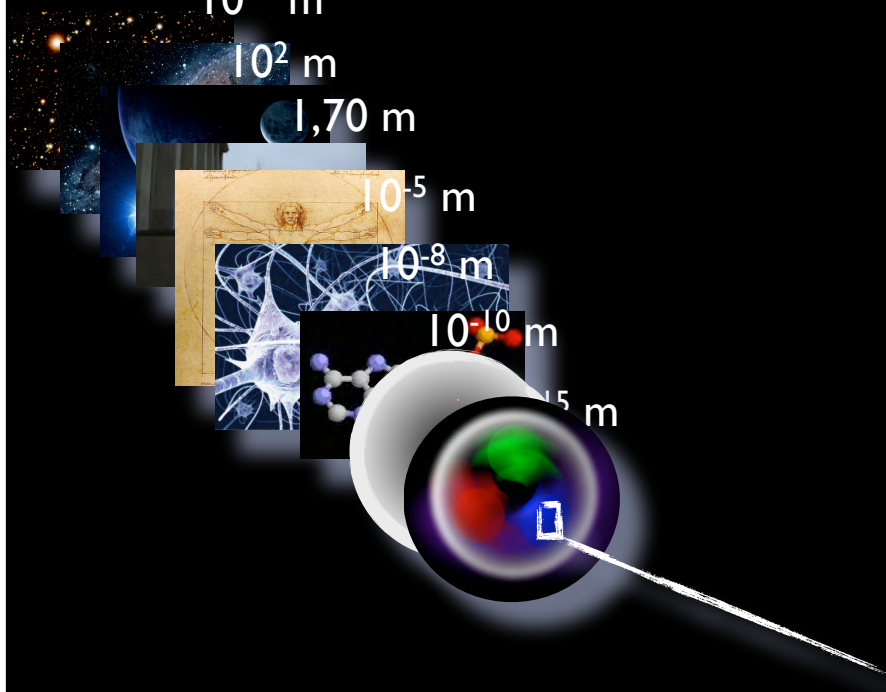
$10^{-5} \text{ m}$

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

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

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

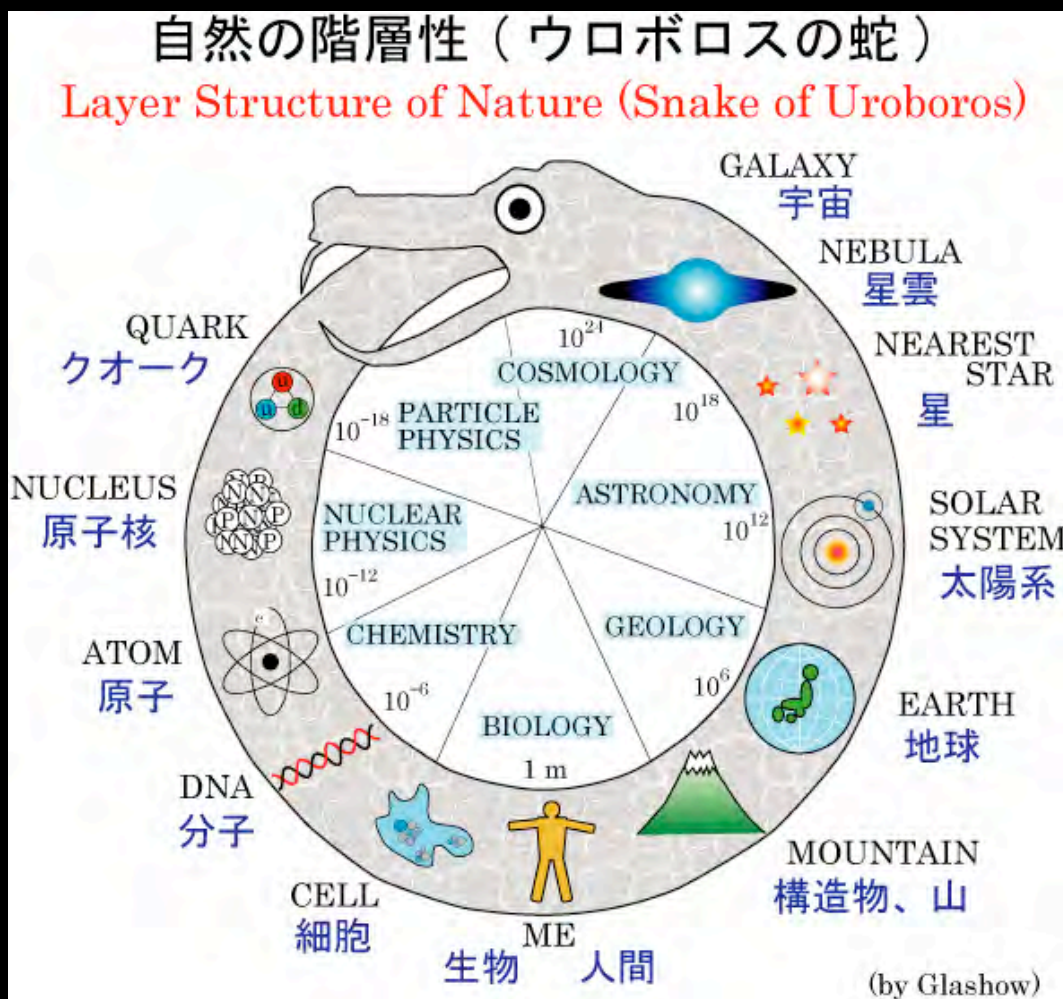
$10^{-18} \text{ m}$



クォーク

IPS  
WWW.LACTATMIRE.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>

---

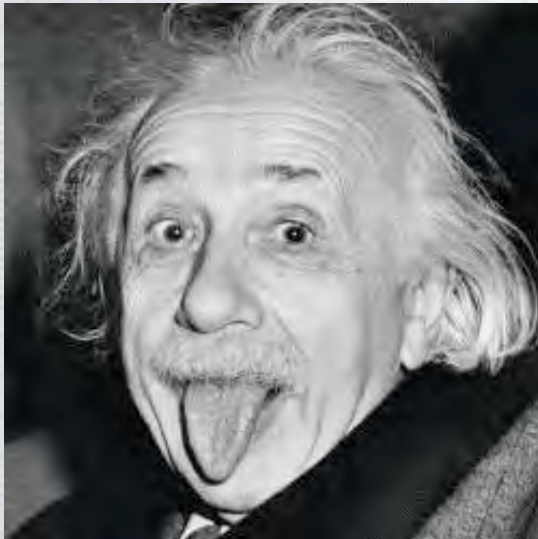
# 1. ビックバン

---

その証拠と意味



# 一般相対性理論 (1915-1916)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

重力場の方程式  
時空のゆがみと力を記述

# ビッグ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（ビッグバン仮説）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）。

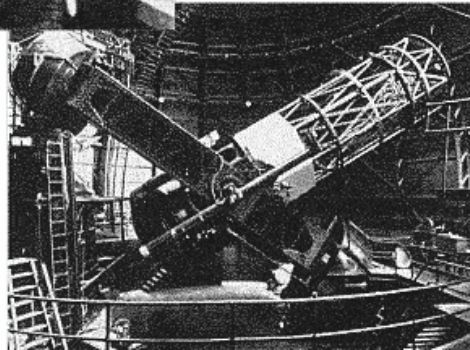
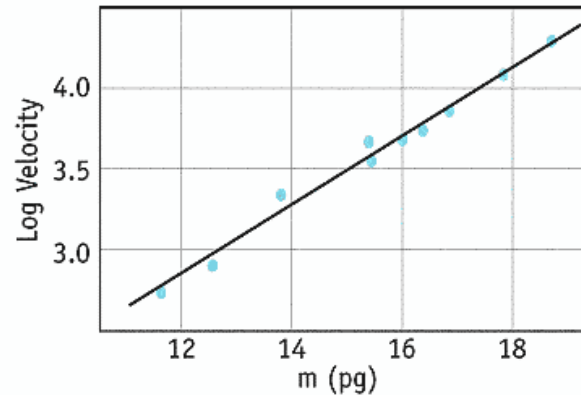


# 証拠 1) ハッブルの法則

## DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

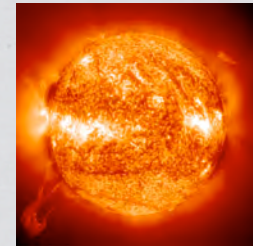
## E. Hubble: 1929年、 銀河後退の観測

- 宇宙膨張の直接的証拠
- 音のドップラー効果：  
近づく音：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

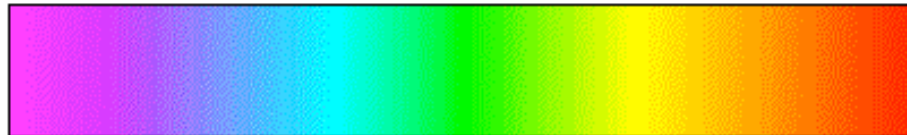
遠方の銀河ほど大きく赤方

シフトしていることを発見

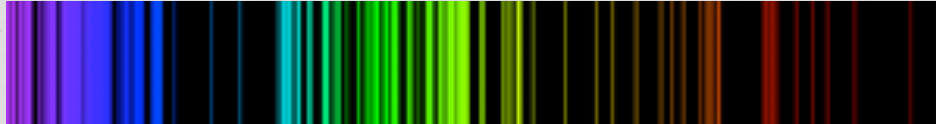
# スペクトル



紫 青紫 青 緑 黄 橙 赤



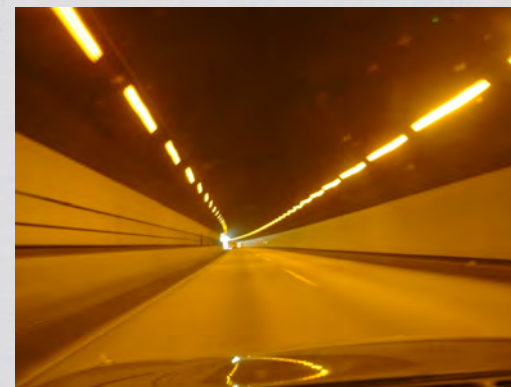
連続スペクトル（太陽光）



鉄の輝線スペクトル

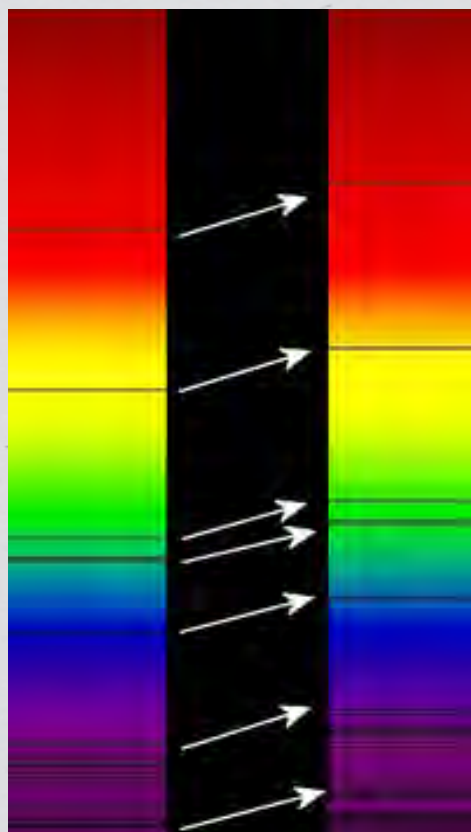


Na D線輝線スペクトル





# 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

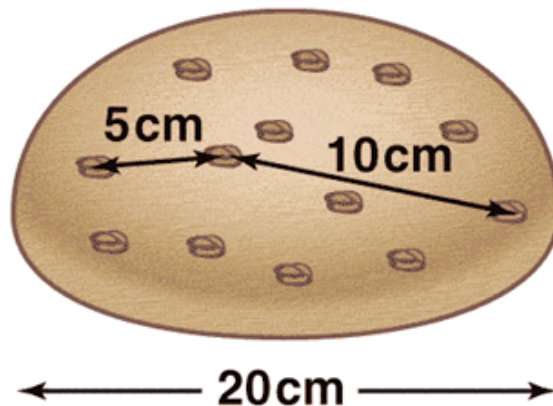
宇宙膨張：遠方の銀河ほど早い速度で観測者から遠ざかっている。

# ハッブル膨張のイメージ (ぶどうパン)

宇宙が大爆発するイメージは  
間違い。

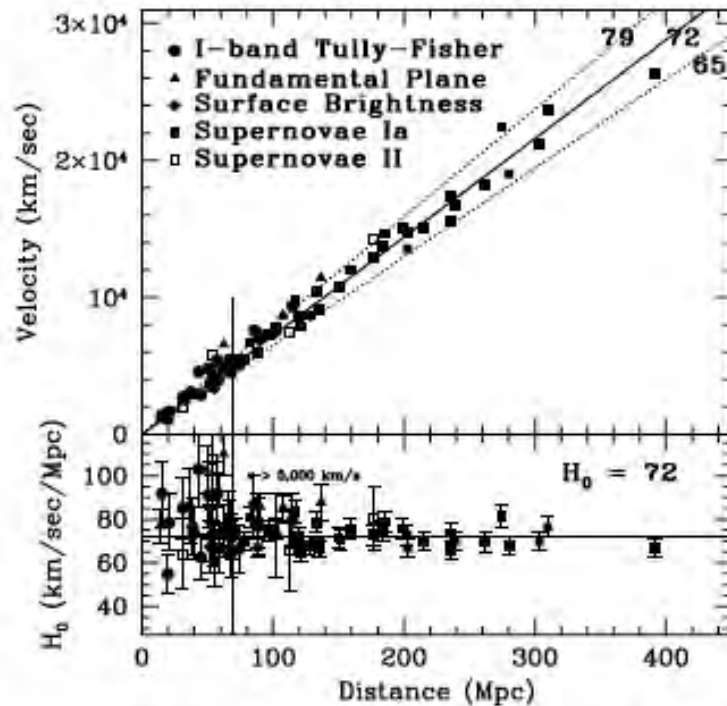
空間自体（いれもの）が等方的  
に押し広げられるイメージ

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



MAP990404





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

- $v = H_0 \times r$ ,
  - $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$   
(Hubble 定数,  $h$  は観測の不定性を表す)
- ハッブル宇宙望遠鏡によるハッブル定数の決定
  - 400 Mpc までの銀河、超新星の速度と位置の関係を測定
  - $H_0 = 65 - 79 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .
  - $h = 0.72 \pm 0.08$ .

## 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



# 宇宙背景放射 (COBE 衛星)

宇宙背景放射

強度

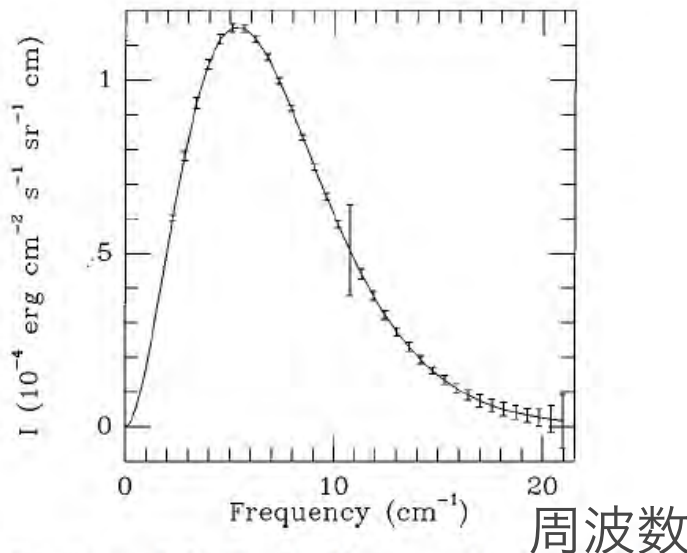


FIG. 4. Spectrum of the Cosmic Microwave Background Radiation as measured by the FIRAS instrument on COBE and a black-body curve for  $T=2.7277$  K. Note, the error flags have been enlarged by a factor of 400. Any distortions from the Planck curve are less than 0.005% (see Fixsen *et al.*, 1996).

**C**osmic **M**icrowave **B**ackground (CMB).  
COBE 衛星(the Cosmic Background Explorer)

光子の強度を周波数の関数として測定。

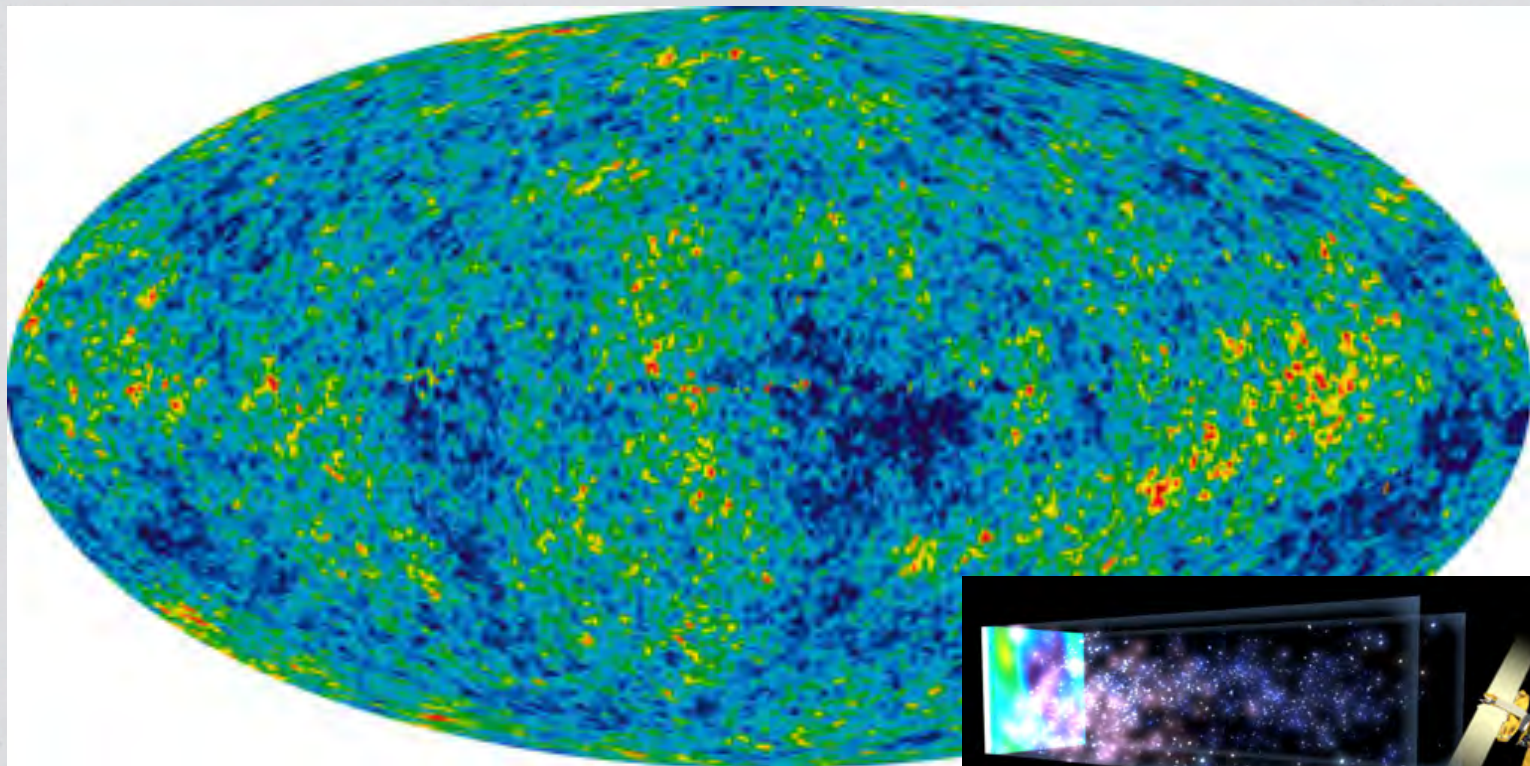
$T_{\text{CMB}} = 2.725 \pm 0.002$  K (C.L. 95%)

完璧な黒体輻射 (プランク曲線)

$10^{-5}$  の精度で、方向によらず強度が変わらない (等方性)

＊ 宇宙背景放射のスペクトル

# 宇宙背景放射の揺らぎ (WMAP, 2001-2010)



\* WMAP 衛星による温度揺らぎ測定



Table 3. “Best” Cosmological Parameters

Description	Symbol	Value		
Total density	$\Omega_{tot}$	1.02		
Equation of state of quintessence	$w$	$< -0.78$		
Dark energy density	$\Omega_\Lambda$	0.73		
Baryon density	$\Omega_b h^2$	0.0224		
Baryon density	$\Omega_b$	0.044		
Baryon density ( $\text{cm}^{-3}$ )	$n_b$	$2.5 \times 10^{-7}$		
Matter density	$\Omega_m h^2$	0.135		
Matter density	$\Omega_m$	0.27		
Light neutrino density	$\Omega_\nu h^2$	$< 0.0076$		
CMB temperature (K) <sup>a</sup>	$T_{\text{cmb}}$	2.725		
CMB photon density ( $\text{cm}^{-3}$ ) <sup>b</sup>	$n_\gamma$	410.4		
Baryon-to-photon ratio	$\eta$	$6.1 \times 10^{-10}$		
Baryon-to-matter ratio	$\Omega_b \Omega_m^{-1}$	0.17		
Fluctuation amplitude in $8h^{-1}$ Mpc spheres	$\sigma_8$	0.84	0.04	0.04
Low- $z$ cluster abundance scaling	$\sigma_8 \Omega_m^{0.5}$	0.44	0.04	0.05
Power spectrum normalization (at $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ ) <sup>c</sup>	$A$	0.833	0.086	0.083
Scalar spectral index (at $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ ) <sup>c</sup>	$n_s$	0.93	0.03	0.03
Running index slope (at $k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ ) <sup>c</sup>	$dn_s/d \ln k$	-0.031	0.016	0.015
Tensor-to-scalar ratio (at $k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$ )	$r$	$< 0.90$	95% CL	
Redshift of decoupling	$z_{\text{dec}}$	1089	1	1
Thickness of decoupling (FWHM)	$\Delta z_{\text{dec}}$	195	2	2
Hubble constant	$h$	0.71	0.04	0.03
Age of universe (Gyr)	$t_0$	13.7	0.2	0.2
Age at decoupling (kyr)	$t_{\text{dec}}$	379	8	7
Age at reionization (Myr, 95% CL))	$t_r$	180	220	80
Decoupling time interval (kyr)	$\Delta t_{\text{dec}}$	118	3	2
Redshift of matter-energy equality	$z_{\text{eq}}$	3233	194	210
Reionization optical depth	$\tau$	0.17	0.04	0.04
Redshift of reionization (95% CL)	$z_r$	20	10	9
Sound horizon at decoupling ( $^\circ$ )	$\theta_A$	0.598	0.002	0.002
Angular size distance (Gpc)	$d_A$	14.0	0.2	0.3
Acoustic scale <sup>d</sup>	$\ell_A$	301	1	1
Sound horizon at decoupling (Mpc) <sup>d</sup>	$r_s$	147	2	2

<sup>a</sup>from COBE (Mather et al. 1999)<sup>b</sup>derived from COBE (Mather et al. 1999)<sup>c</sup> $l_{\text{eff}} \approx 700$ <sup>d</sup> $\ell_A \equiv \pi \theta_A^{-1}$      $\theta_A \equiv r_s d_a^{-1}$ 

詳細な宇宙論パラメータの決定！

宇宙年齢：137億年

宇宙の組成

我々の知っている物質は

宇宙全体の4%

C.L.Bennett et al., Ap.J. Suppl. ('03)

# 「火の玉宇宙」の提唱

- ・ ビックバン元素合成仮説：1940年代終わり、林忠四郎とジョージ・ガモフによって独立に提唱。
- ・ 当初は水素より重い原子の生成を説明するために研究が始められる。
  - 高温の熱平衡状態の光子 = 5K の黒体輻射を予言。
- ・ 軽い元素がビックバン元素合成 (Big-bang nucleosynthesis, BBN) で作られたと提唱。



George Gamow



林忠四郎



# 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137億年

\* つまり137億年前、**全ては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

---

## 2. 力と素粒子、質量の謎

---

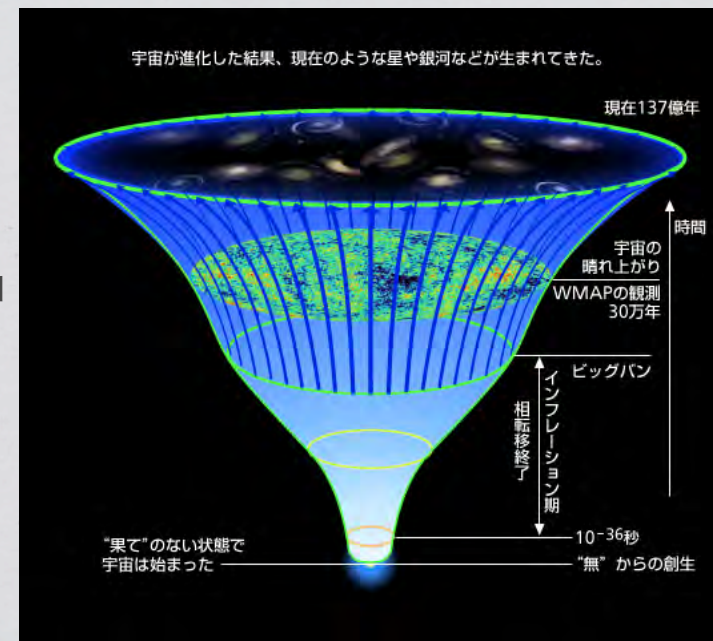


# 宇宙の開闢 「無」 ( $t = 0$ )

- \* 「無」 から宇宙が誕生したという仮説。
- \* 提唱者：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。

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

- \* 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。





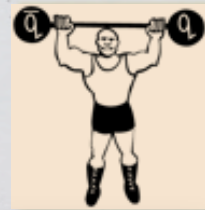
# 4つの力とその媒介粒子

\* 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	$10^3$
---	-----	--------

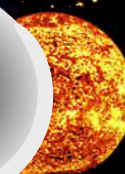
0.5	100	$10^3$
-----	-----	--------

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

レプトン



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



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

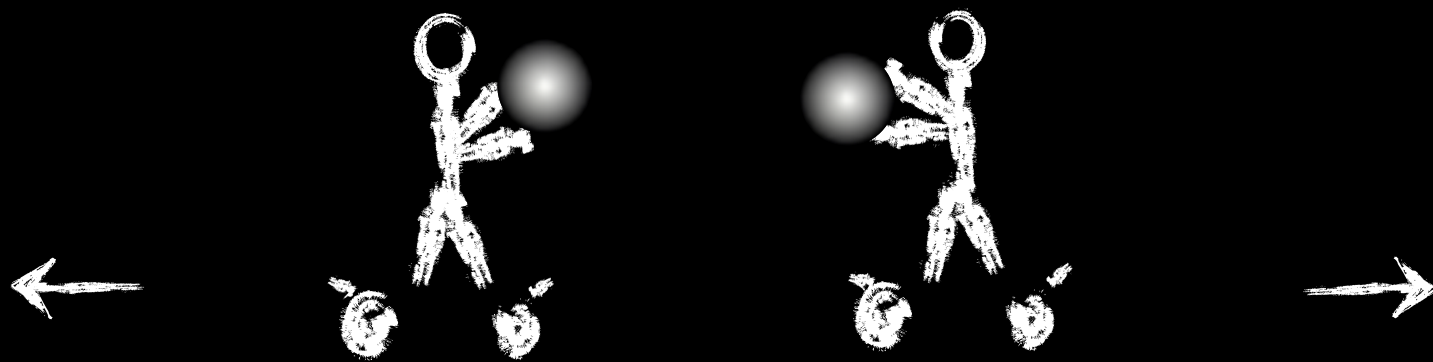
0	$10^4$
---	--------

ゲージ粒子 (力)



ゲージ粒子の交換によって

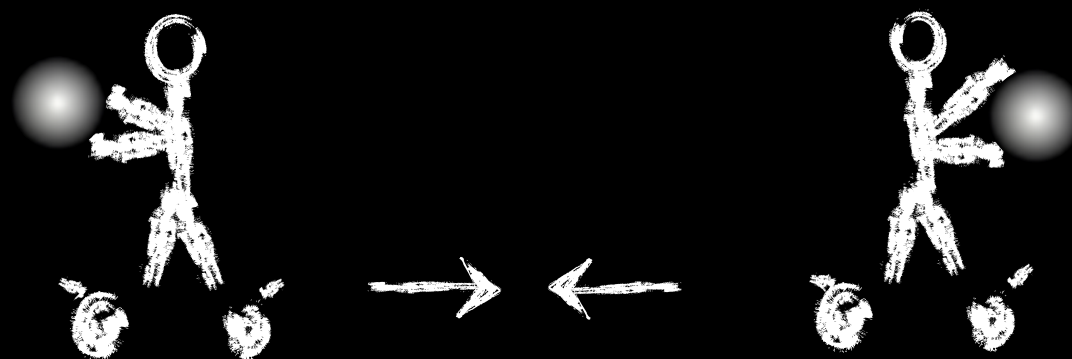
力が生まれる



斥力相互作用

ゲージ粒子の交換によって

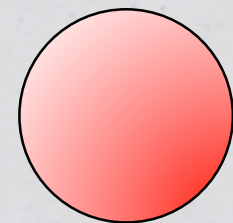
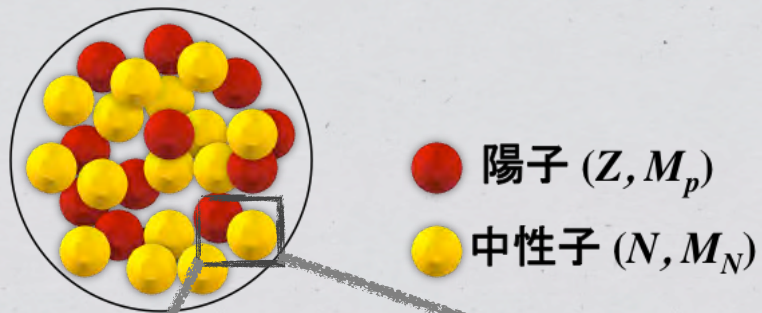
力が生まれる



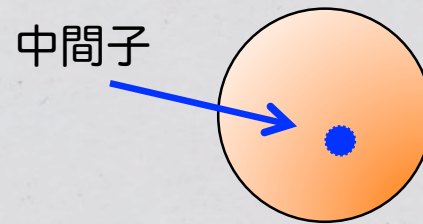
引力相互作用



# 中間子論と核力



陽子 ( $Z=+1$ )

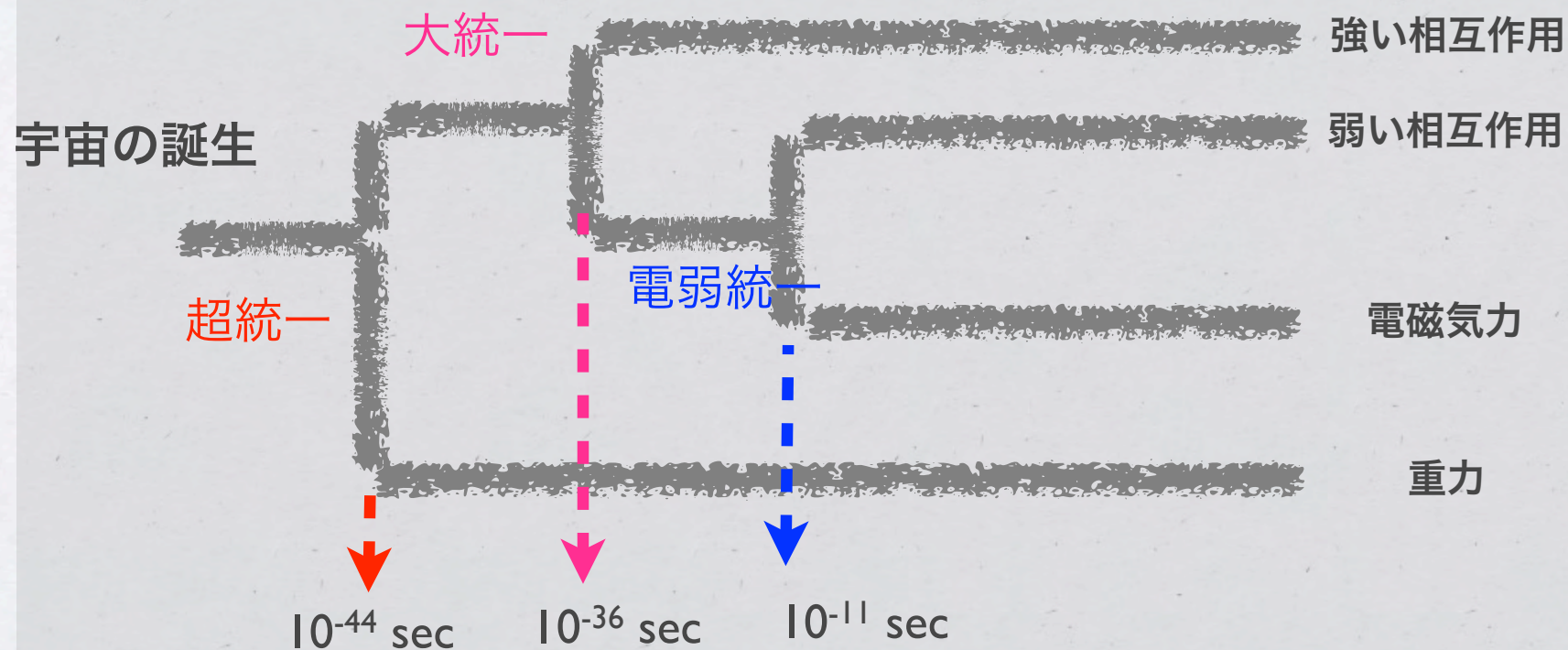


中性子 ( $Z=0$ )



湯川秀樹博士

# 宇宙の進化と4つの力



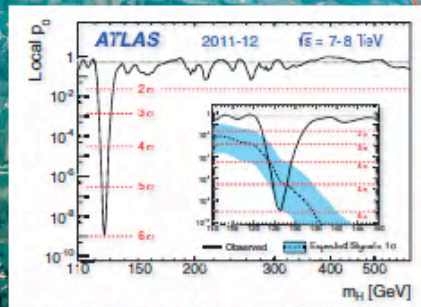
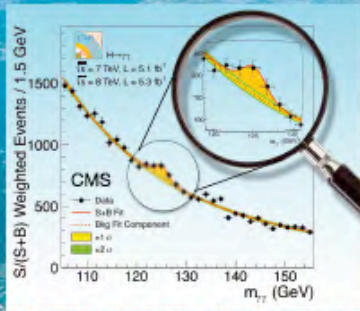


# 質量とは何か？

- \* 「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？

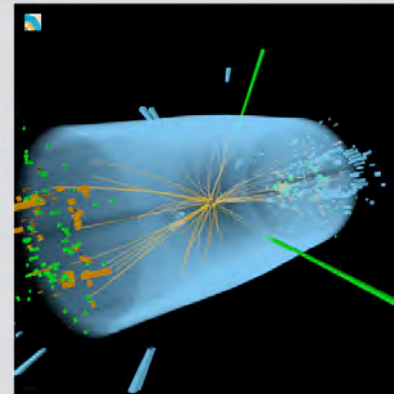
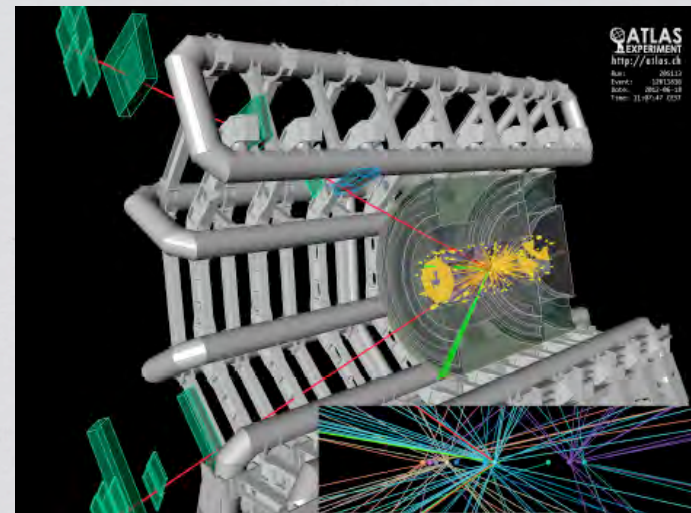


## First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC



[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

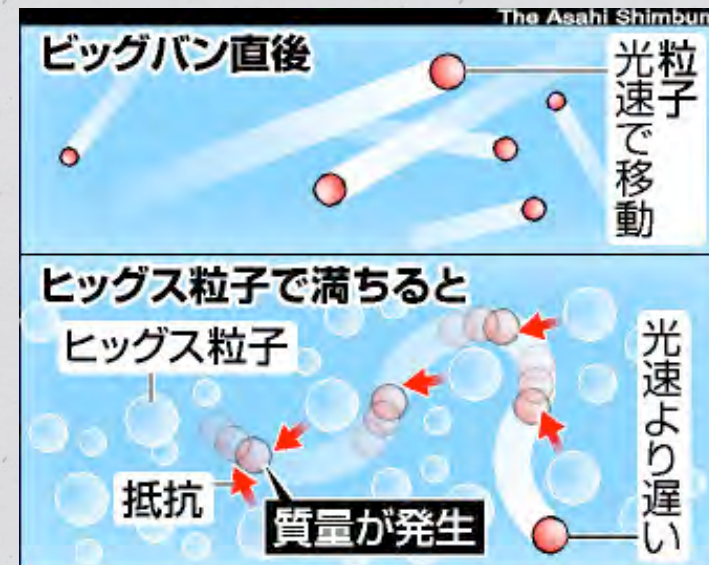
## ヒッグス粒子の 発見 (2012)



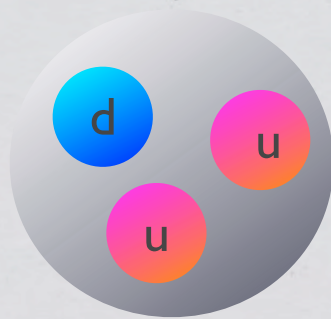


# ヒッグス場による質量獲得

- \* 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。

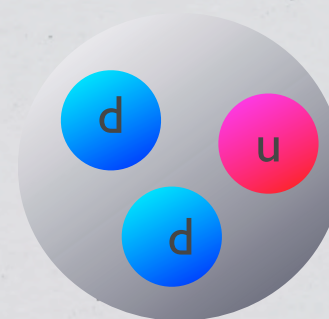


# 陽子と中性子



陽子 (uud)

質量 :  $938.2 \text{ MeV}/c^2$

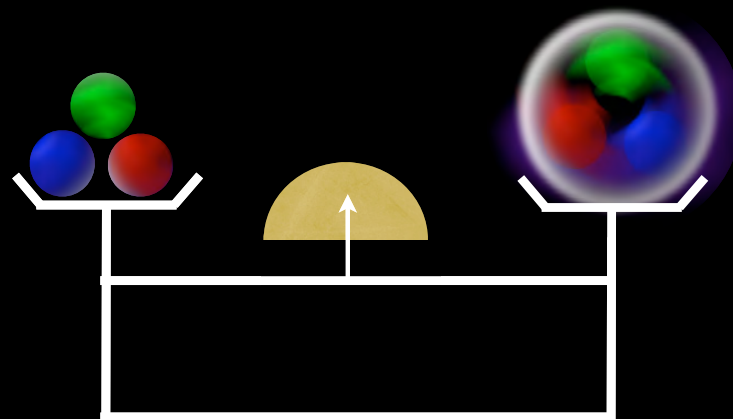


中性子 (udd)

質量 :  $939.5 \text{ MeV}/c^2$

\* 陽子と中性子の質量差  $\sim$   $\bar{u}$  クォークと d クォークの質量差、ほんの数  $\text{MeV}/c^2$

# 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

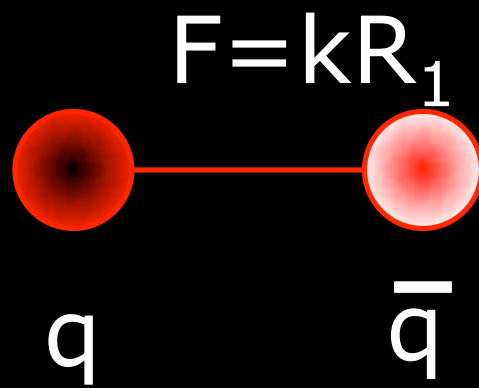
=陽子の質量の1% にすぎない！

(木の玉を3つくっつけたら、鉄の玉になった)

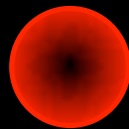


# 質量の源は？

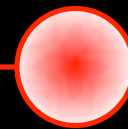
- では残りの99%の陽子の質量は誰がになっているのか？
- まずは陽子を構成している素粒子、「クォーク」の間に働いている「強い相互作用」を考えてみよう。



$$F = kR_2$$

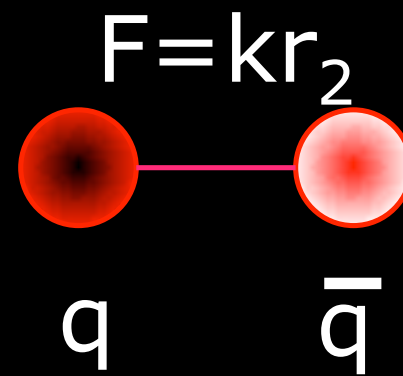
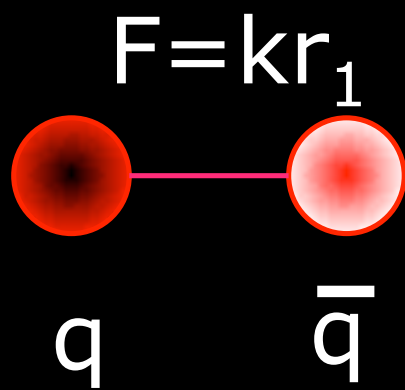


$q$



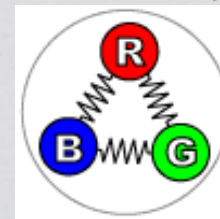
$\bar{q}$





# 「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、消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。



# 質問です. 重いバネはどっち？

1. 自然長のばね

2. 縮んだばね

- ◆ 「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。

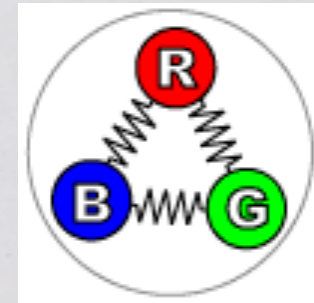
- $E = mc^2$  : エネルギーと質量は等価。
- 従って「2. 縮んだバネ」の方が「重い」





# クォークの閉じ込めと「質量」

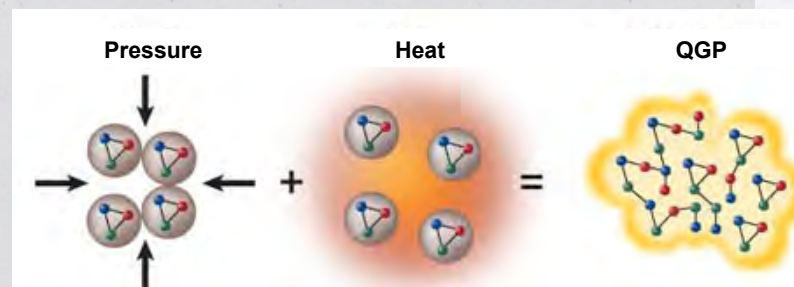
- \* 裸のクォーク自体がもつ質量は、陽子質量の1%程度だが、陽子がもつ「クォークの閉じ込め」のため、エネルギーが高い状態、すなわち質量が重くなっている、と考える事ができる。



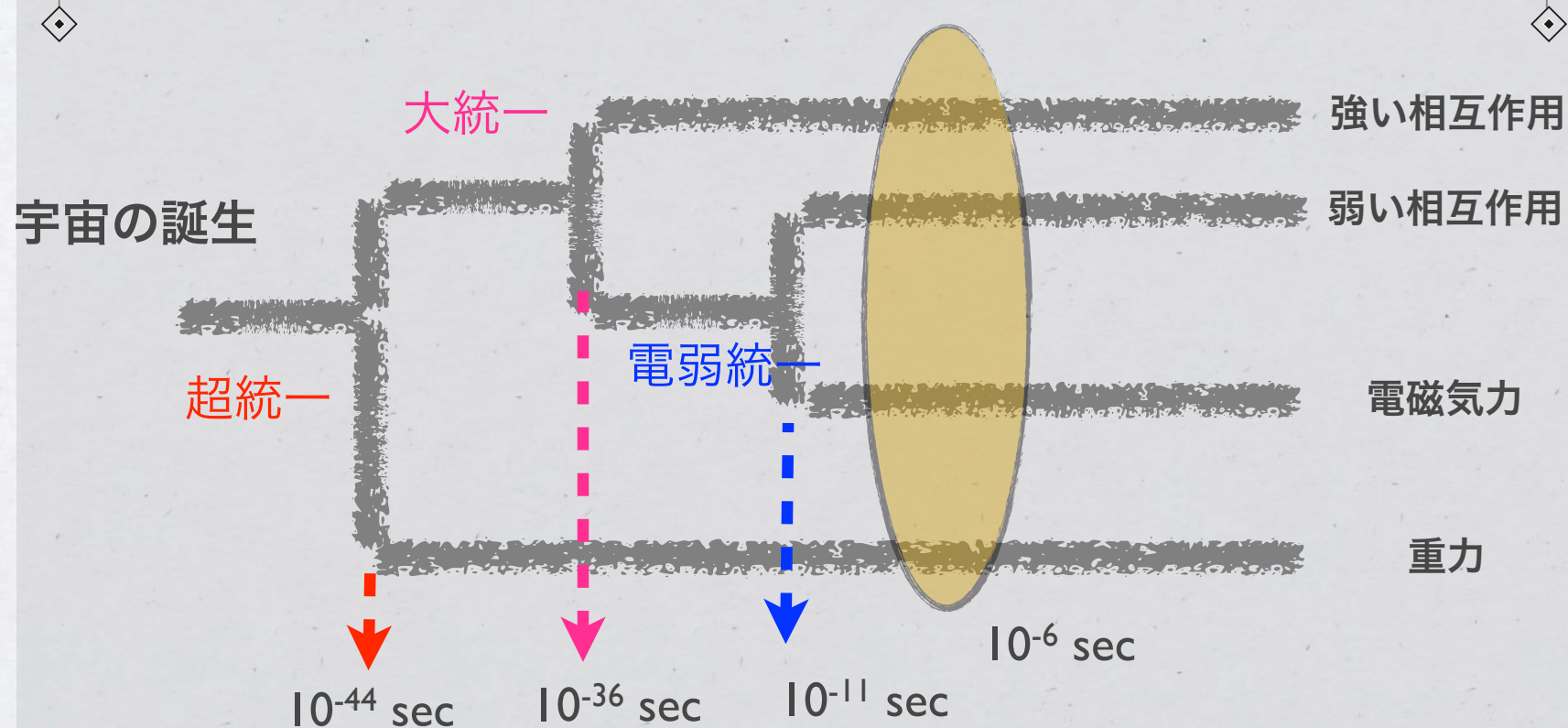
- \* 実験的にどうやって確かめるか？

# 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

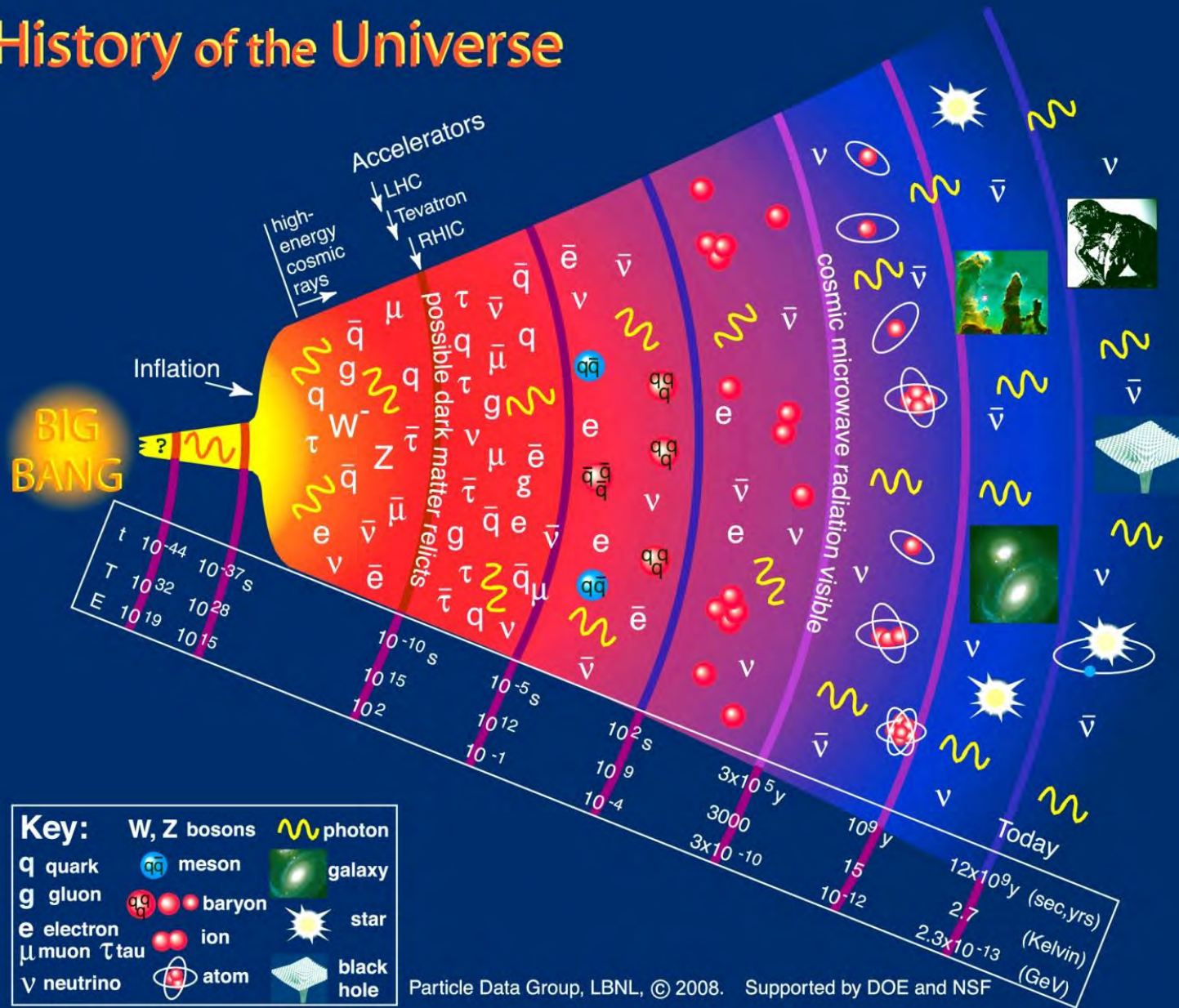


# 宇宙の進化と4つの力





# History of the Universe



# History of the Universe

**QGP**  
クォーク・グルーオン  
プラズマ

時間：ビッグバンから数  $10^{-6}$  秒後  
温度：  $2 \times 10^{12}$  K  
エネルギー密度：  $1 \text{ GeV/fm}^3$

インフレーション  
宇宙急激膨張

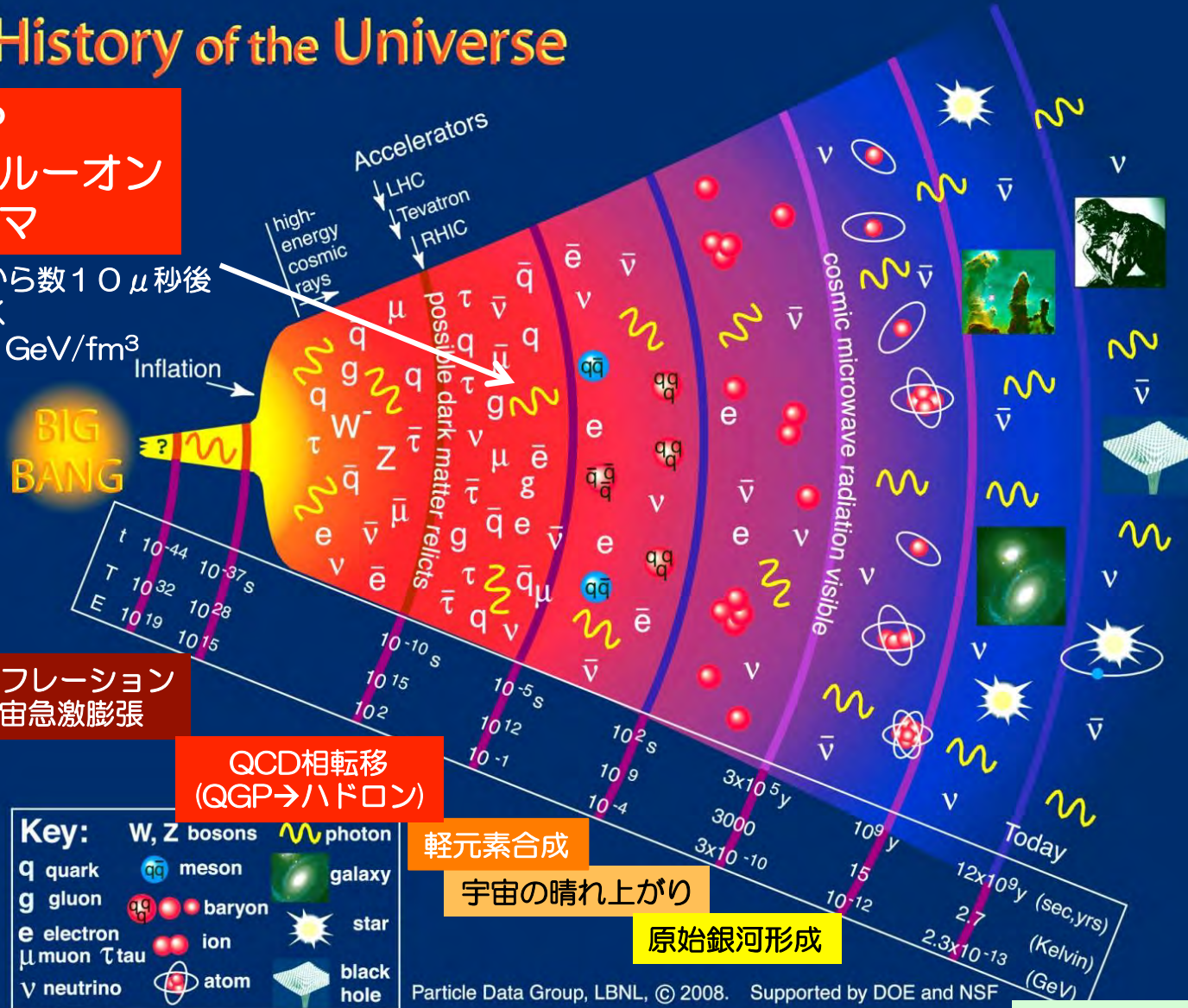
QCD相転移  
(QGP → ハドロン)

軽元素合成

宇宙の晴れ上がり

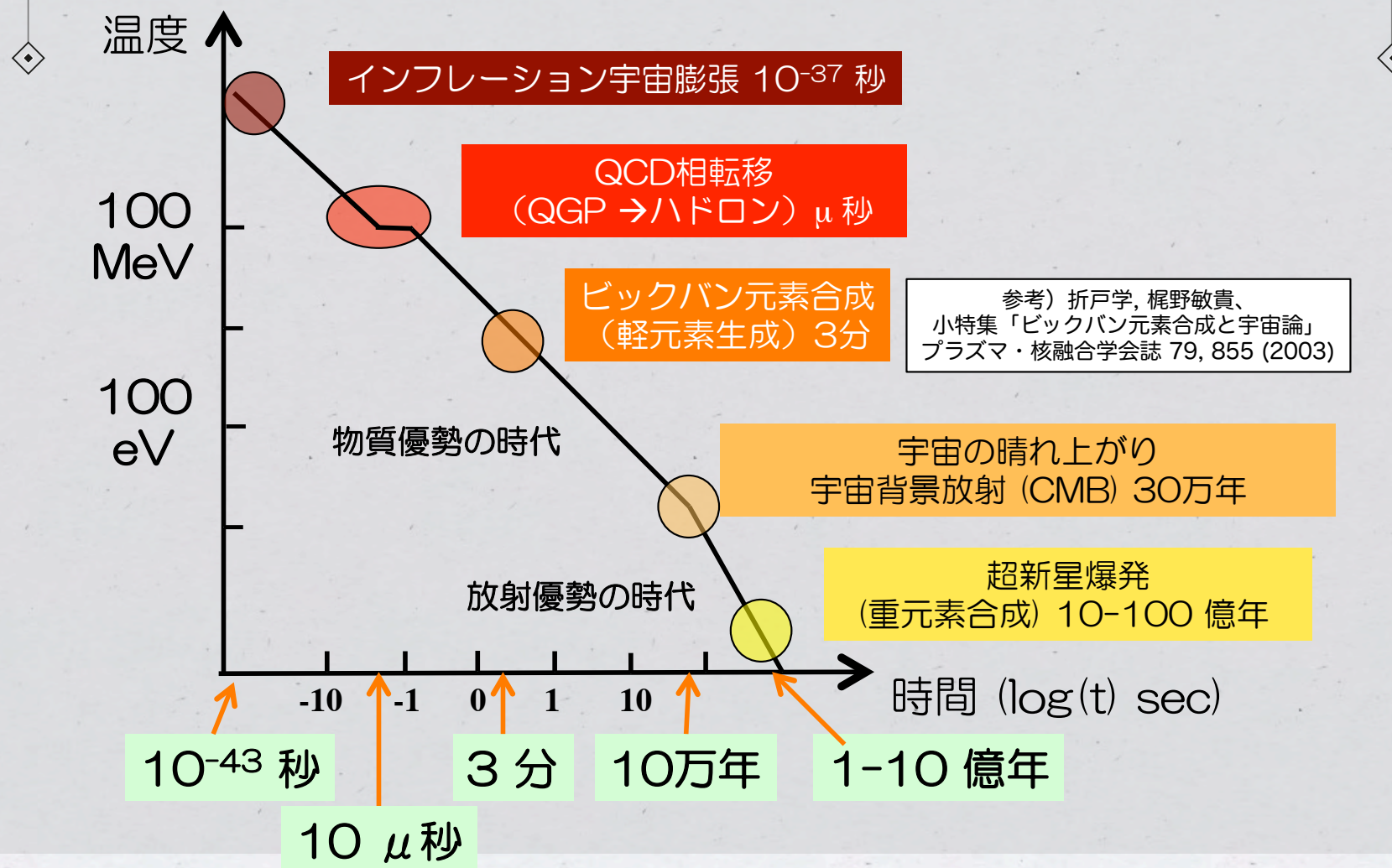
原始銀河形成

現在の宇宙





# 宇宙温度の変遷

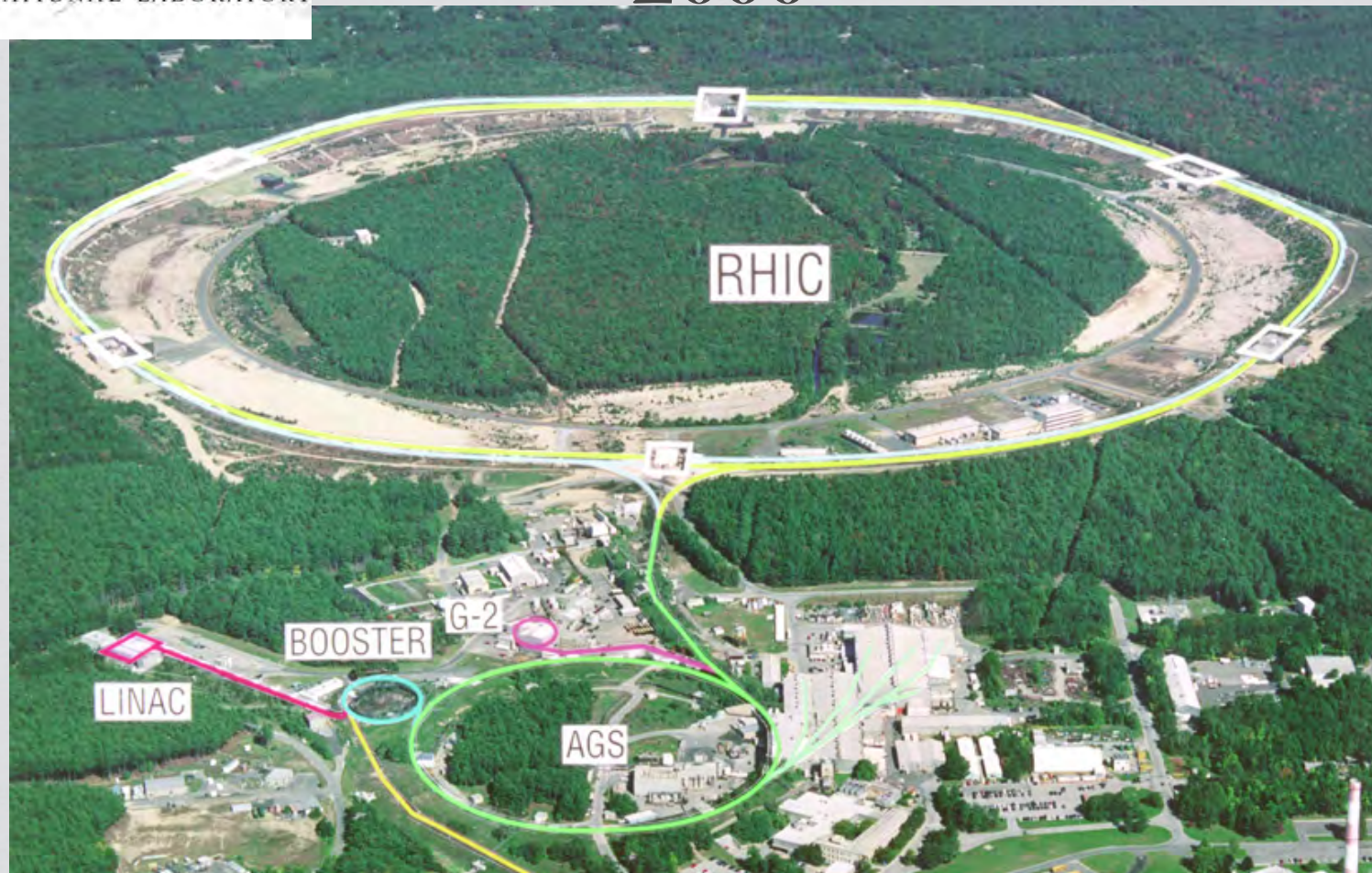




# RHIC (相対論的重イオン衝突型加速器)

**BROOKHAVEN**  
NATIONAL LABORATORY

2000-





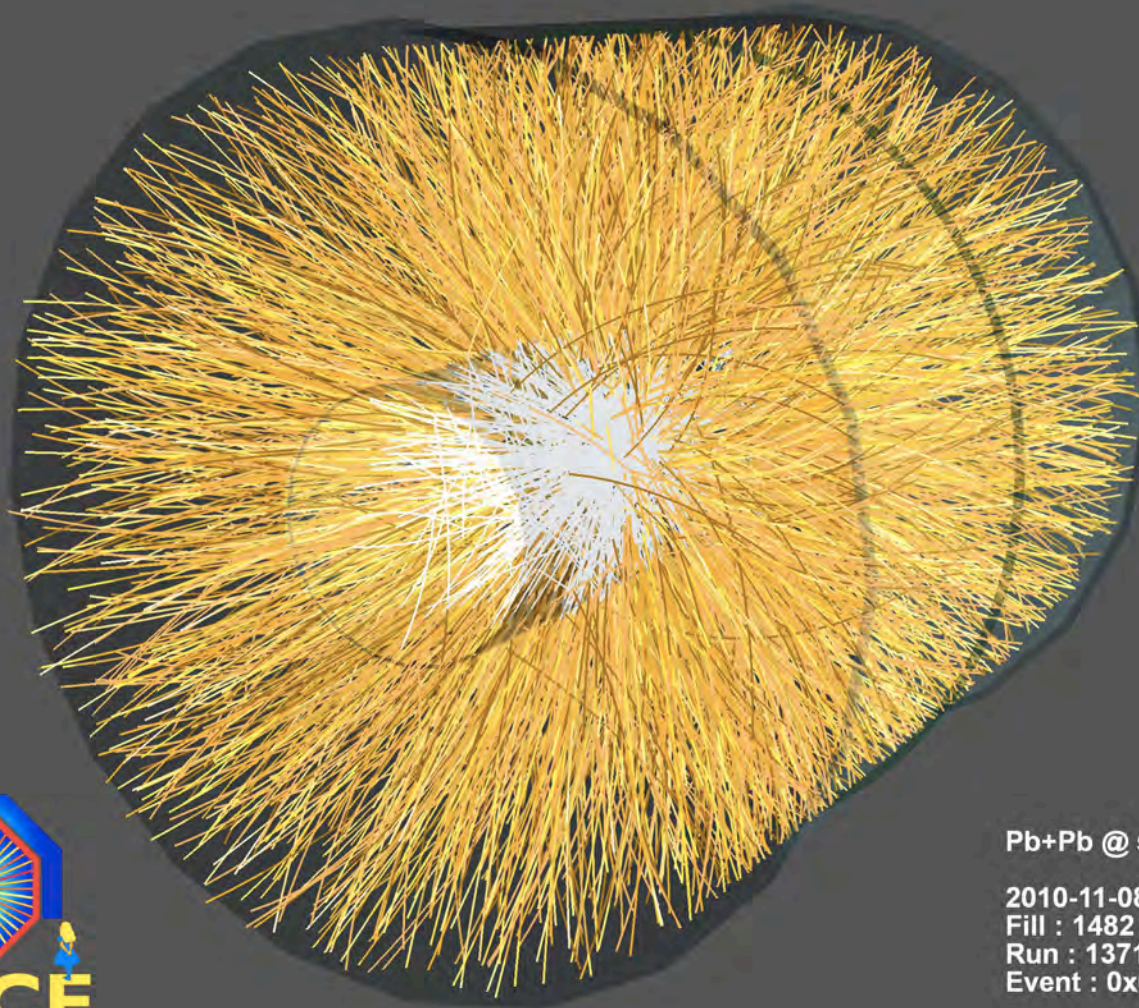


# LHC (Large Hadron Collider)

## 2009-







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

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693



# まとめ

- ビックバンの証拠と宇宙発展の歴史

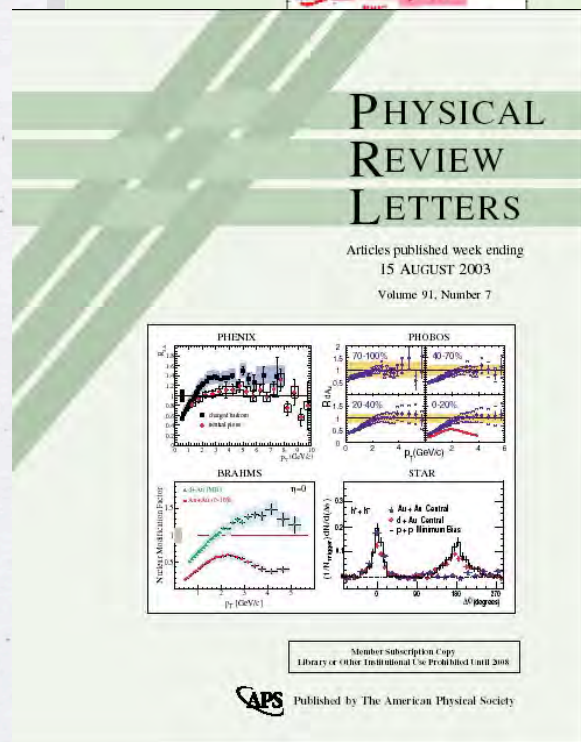
- ◆ ハッブルの法則、背景放射、火の玉宇宙

- 全ては「無」からはじまった。

- インフレーション宇宙膨張と宇宙規模の相転移

- ★ 宇宙の進化と力の分化

- ★ 素粒子の質量と「物質」の質量



社会 asahi.com トップ > 社会 > その他・話題

## 宇宙の始まりはしづく? 「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跳び回るのでなく、しづ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。

2005年4月18日 朝日新聞



次回予告：

## 第2回 重イオン衝突実験で 宇宙誕生の謎に迫る

1. 高エネルギー重イオン実験
2. クォークのスープと初期宇宙（クォーク物性物理学）
3. その後の宇宙