

九州大学

Excellent Students in Science 育成プロジェクト

第3回公開講演会、2009年12月19日

宇宙のはじまりと元素の起源

— 時間・空間・物質を統一する —

国立天文台理論研究部

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

梶野敏貴

20世紀の科学的成果

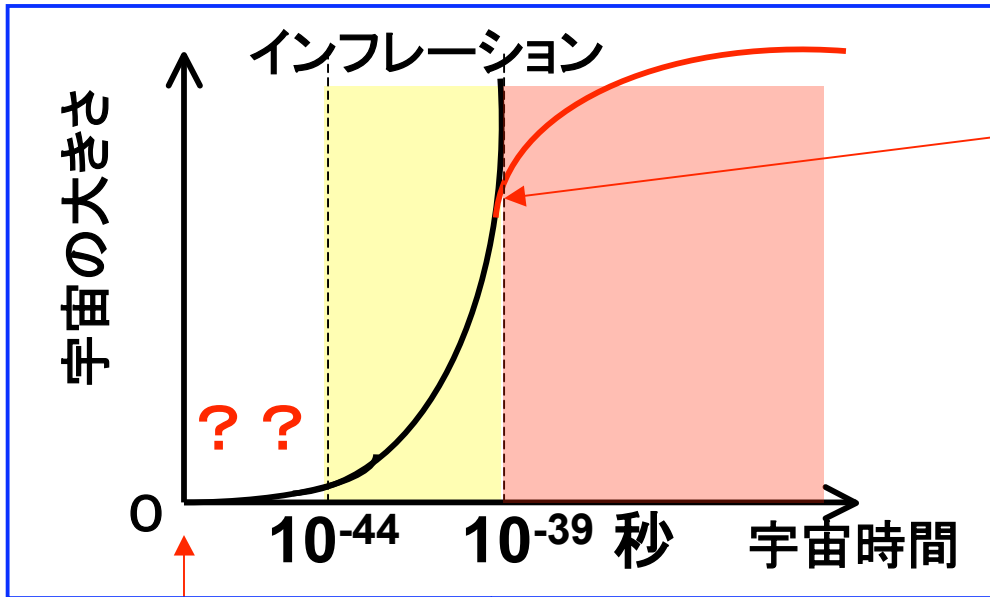
“物質(人間)の起源は星にある”

物質と時間・空間とは、区別できる別のもの。

今日(21世紀)の講義の目的

“起源はビッグバン初期宇宙にある”

物質(人間)と時間・空間(宇宙)を統一！



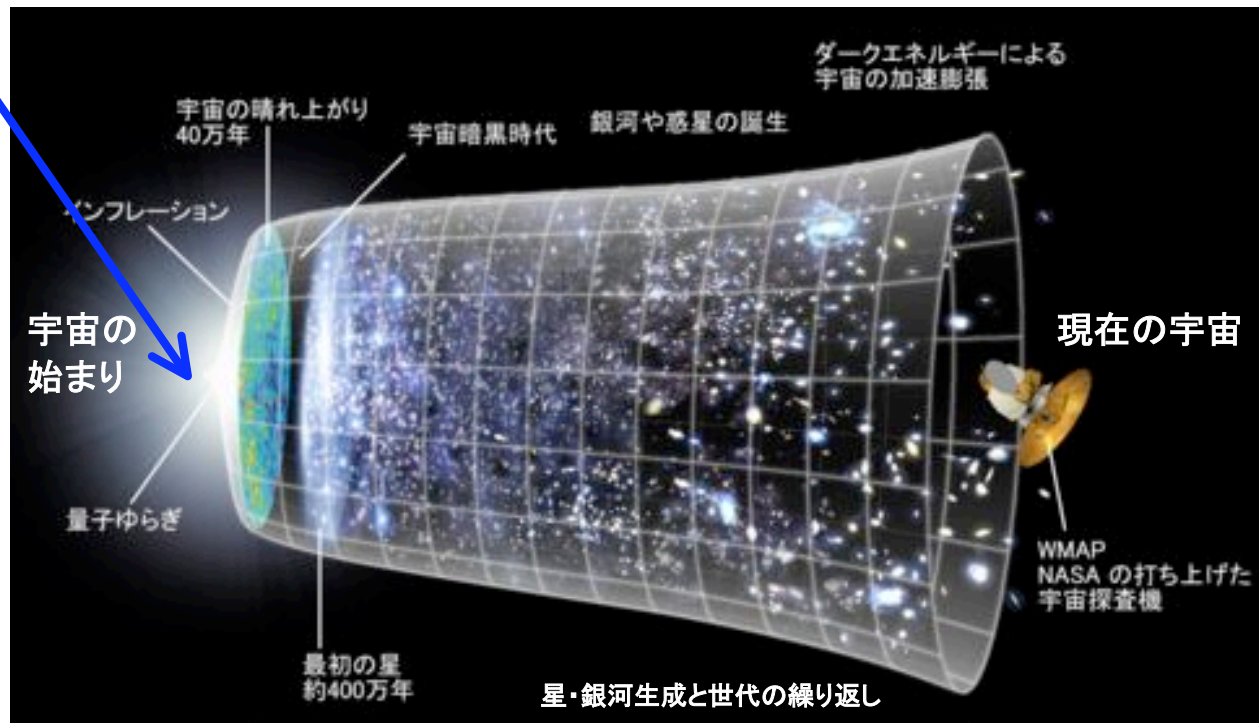
潜熱が開放されて光で満たされ、
素粒子が作られる。
ビッグバン(火の玉)宇宙の始まり。

宇宙の始まりと膨張

時間の始まりとは何か？

スティーブン・ホーキング
 ・ $v(\text{宇宙膨張}) > c(\text{光速})$
 ・虚時間→実時間

超大統一理論
 ・量子重力理論
 ・時間・空間もゆらぐ



宇宙の相転移と対称性の破れ

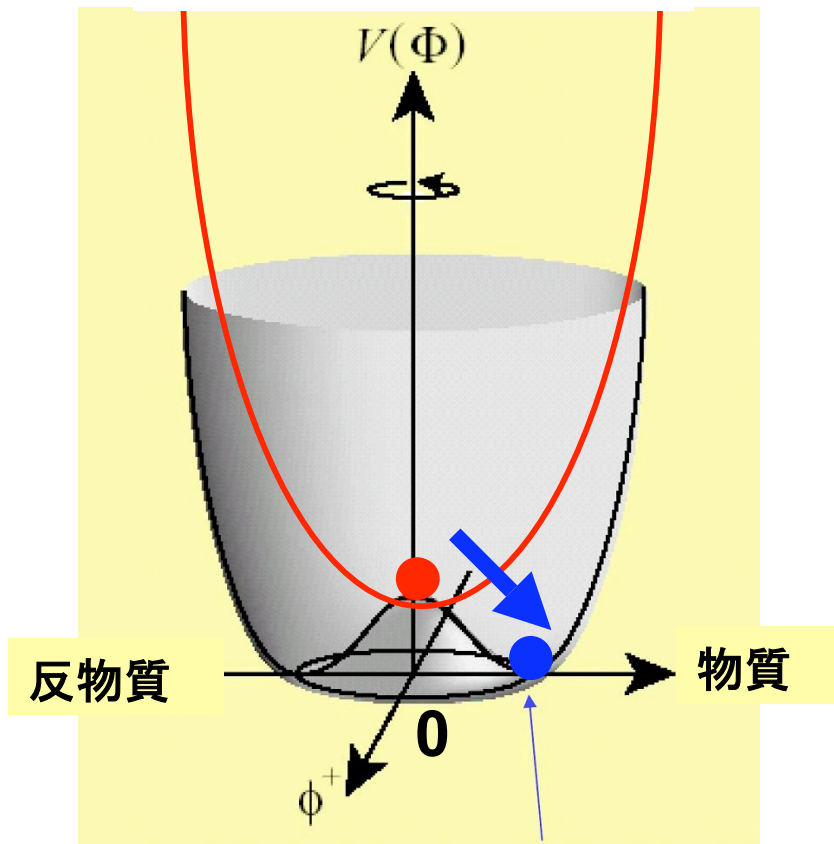
南部陽一郎(2008年ノーベル物理学賞) = 知の巨人

初期宇宙は
高い対称性を持っている。

物質はなぜ質量を持っているのか？



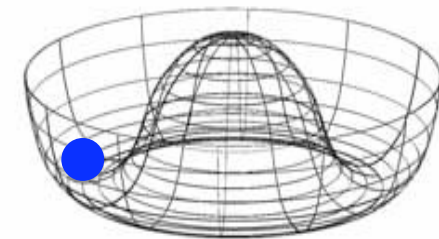
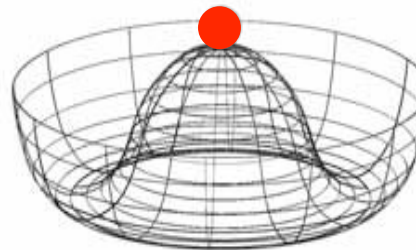
「自発的対称性が破れることによって
素粒子の質量が生じる。」という概念を
1961年に提唱。



対称性が破れた
冷たい現在の宇宙(低温)。

高温

低温



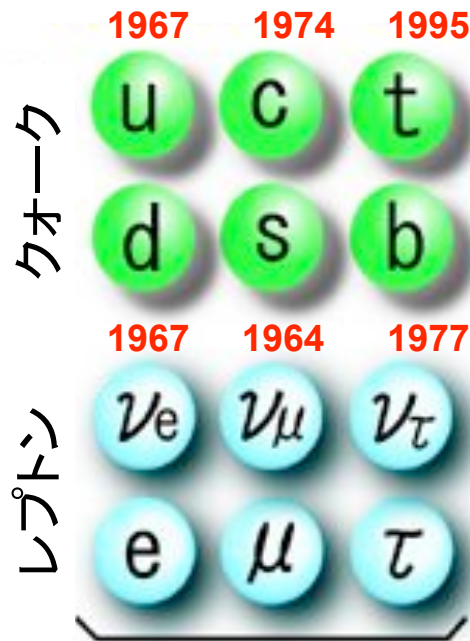
メキシカン・ハット物理学

素粒子の標準理論

宇宙に存在するすべての物質をかたち作る究極の素粒子と力を伝える粒子たち

物質粒子

カイラル対称性



三世代

第一世代

第二世代

第三世代

力を媒介する粒子

ゲージ対称性：ゲージ粒子

光子、ウィークボソン、グルオン、グラビトン



質量を作り出す粒子

ヒッグス粒子



“クォークは3世代で6種類が必要である。”



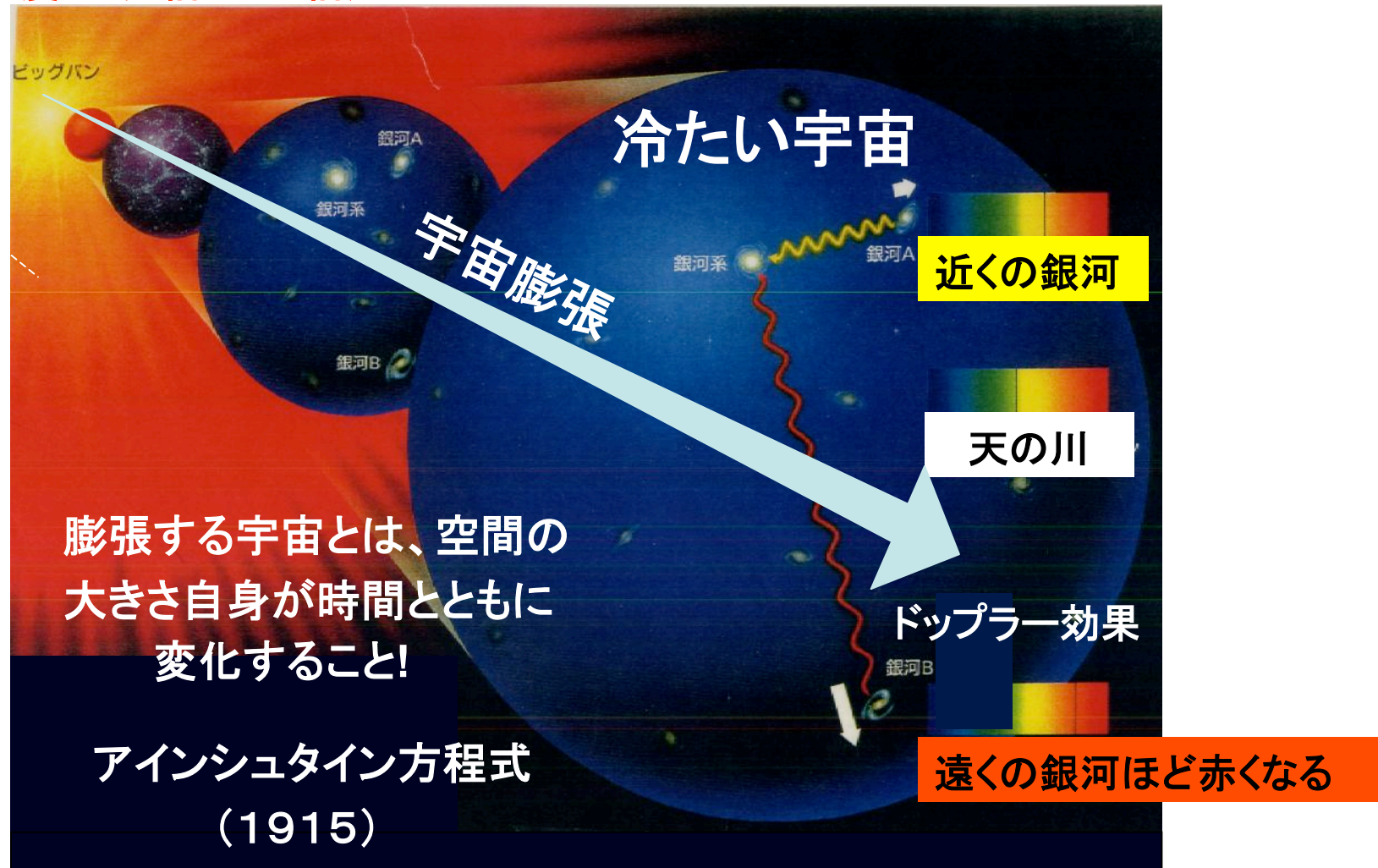
小林・益川理論(1973年)の予言が実証され、
2008年ノーベル物理学賞受賞。

ビッグバン宇宙とは？

137億年前に誕生し、対称性の破れとともに進化を開始した宇宙はインフレーションを経て急膨張し、素粒子がつぎつぎと作られて、火の玉宇宙へと姿を変えた。膨張と共に冷えて、現在の宇宙に！

高温（一兆度×一兆倍×一万倍）

火の玉
宇宙



アインシュタイン方程式 (一般相対性理論)

(1) 重力場が非常に弱い極限では、ニュートン方程式に戻るべし。

(2) 2階の微分量まで共変である。

$$G^{\mu\nu} = R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g^{\mu\nu} = 8\pi G T^{\mu\nu} + \Lambda g^{\mu\nu}$$

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}{}_{\mu\lambda\nu} = \partial_{\lambda} \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} - \partial_{\nu} \Gamma_{\mu\lambda}^{\lambda} + \Gamma_{\eta\lambda}^{\lambda} \Gamma_{\mu\nu}^{\eta} - \Gamma_{\eta\nu}^{\lambda} \Gamma_{\mu\lambda}^{\eta}$$

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2} g^{\lambda\beta} \left\{ \partial_{\nu} g_{\beta\mu} + \partial_{\mu} g_{\beta\nu} - \partial_{\beta} g_{\mu\nu} \right\}$$

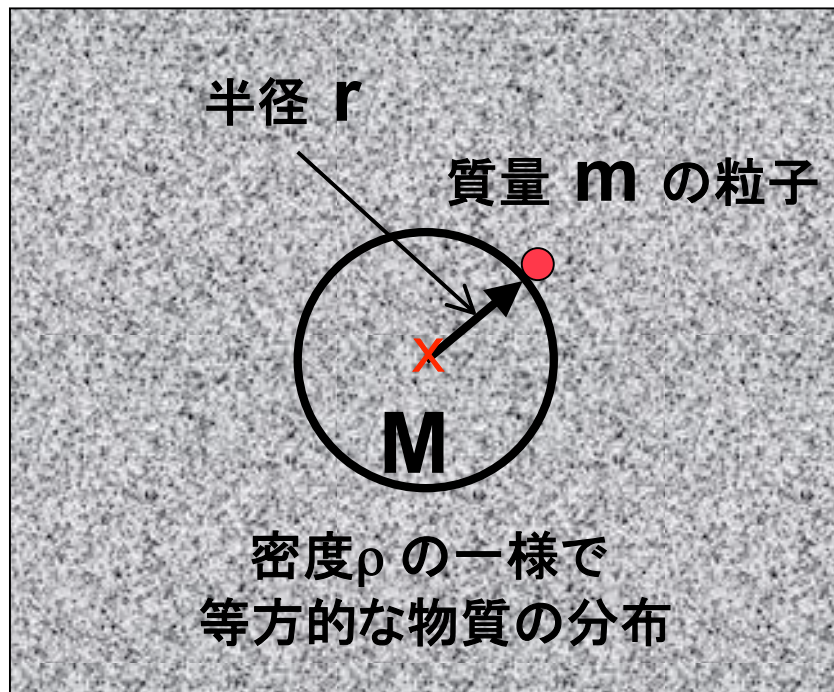
$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & \frac{a^2(t)}{1-kr^2} & & \\ & & a^2(t)r^2 & \\ & & & a^2(t)r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

$$T^{\mu}{}_{\nu} = \begin{bmatrix} -\rho & & & \\ & p & & \\ & & p & \\ & & & p \end{bmatrix}$$

ニュートン方程式

ビルコッフの定理:

物質が一様に分布している空間では、粒子に働く重力は、球の質量が中心に集中しているとした場合の重力と等価である。



球の質量 = 密度 \times 体積

$$M = \rho \times \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GmM}{r}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{Gm[(4/3)\pi\rho r^3]}{r} + E$$

$$\downarrow \div (1/2m) \div r^2$$

$$\left(\frac{v}{r}\right)^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho + \frac{2E}{mr^2}$$

アインシュタイン方程式

$$G^{00} = 8\pi GT^{00} + \Lambda g^{00}$$

ニュートン方程式

$k = \text{空間の曲率} = -1, 0, +1$

$$\left[\frac{v}{a}\right]^2 = H^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad \longleftrightarrow \quad \left[\frac{v}{r}\right]^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho + \frac{2E}{mr^2}$$

ハッブルパラメータ

$$H = v/a = v/r$$

宇宙項(新しい項)

$-k = E/m$ 符号が反対

$$a (\text{宇宙のスケール}) = r (\text{球の半径})$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 = \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$\Lambda = 0$:

1) **$k = 0$** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 \propto a^{-3}$ ($\rho \propto ma^{-3}$) $a^{1/2}da \propto dt$ $a \propto t^{2/3}$

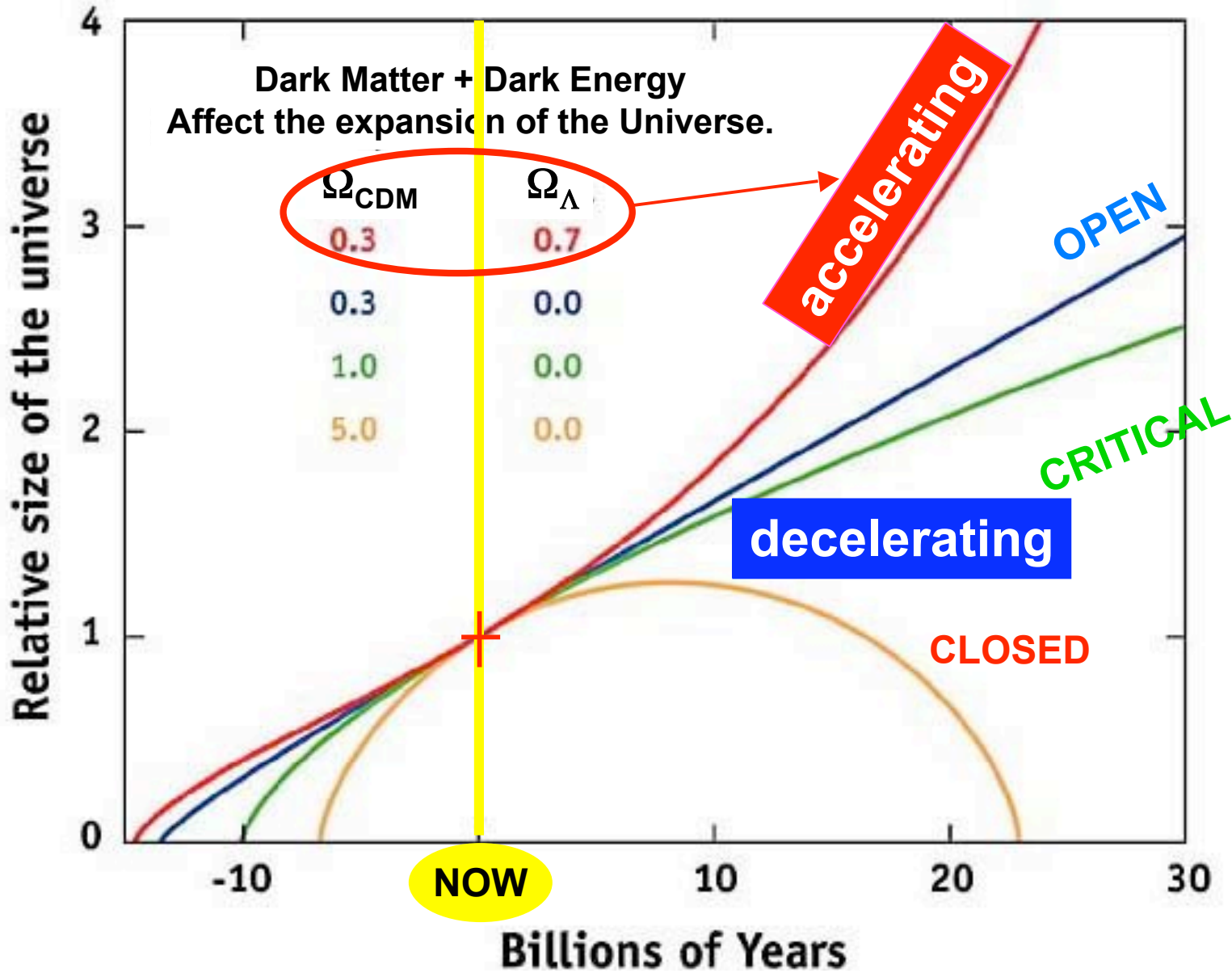
2) **$k = -1 < 0$** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = 8\pi G/3 ma^{-3} + a^{-2} \rightarrow a^{-2}$ (for large a)
 $da \propto dt$ $a \propto t$

3) **$k = +1 > 0$** $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = 8\pi G/3 ma^{-3} - a^{-2} \rightarrow 0$ (at some $a = a_s$)
 & bounce later.

$\Lambda > 0$ and dominates:

$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \Lambda/3$ $a^{-1}da \propto dt$ $a \propto \exp[(\Lambda/3)^{1/2}t]$

Cosmic Expansion



膨張する宇宙の証拠

1. Hubble による膨張宇宙の発見(1919-24)

2. Penzias と Wilson による宇宙背景放射の発見
(1965)

3. Gamow によるビッグバン宇宙論の予言と
元素合成の発見(1948)

EDWIN HUBBLE - THE HEAVYWEIGHT

Edwin Powell Hubble was born in Marchfield, Missouri, in 1889, the son of a local lawyer. He graduated from Chicago University in 1910, where he had studied both law and astronomy. He also distinguished himself as a heavyweight boxer and was invited to turn professional, but turned down the offer. Later he fought an exhibition match with the French champion Georges Carpentier.

In 1913 Hubble worked as lawyer for a few months, but returned to astronomy. He started his historic career in 1919 after serving as major in France during World War I.



銀河の観測から膨張宇宙を 発見した研究者

エドウィン ハッブル
Edwin Hubble

シカゴ大学卒業 1910

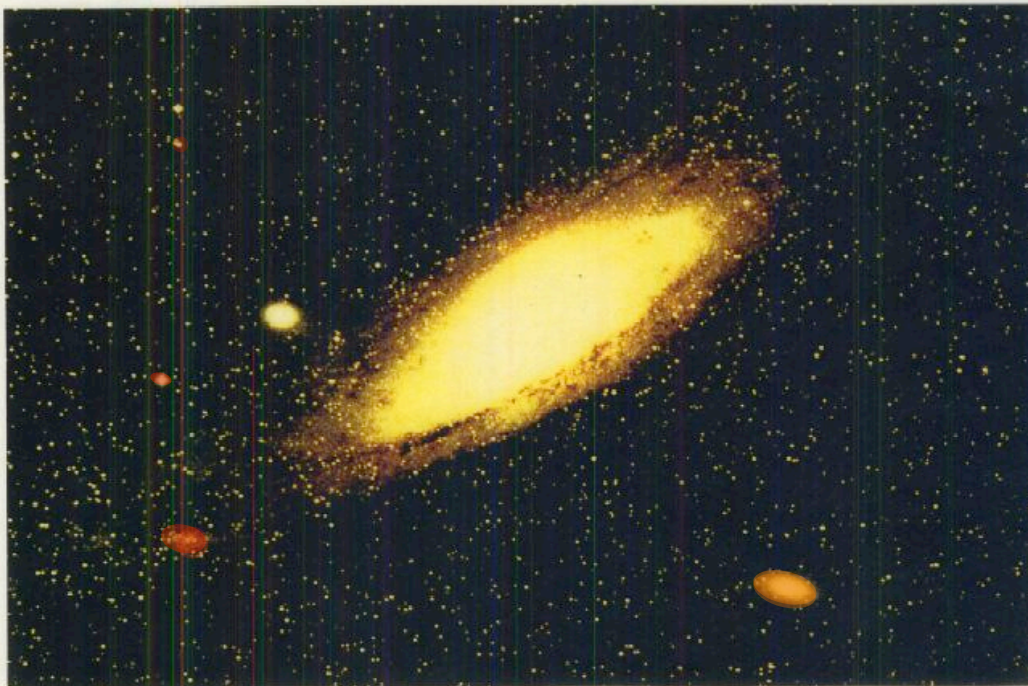
- ・法律と天文学を専攻
- ・ヘビー級のボクサーとして全米チャンピオン、仏国チャンピオンと国際タイトルを競う

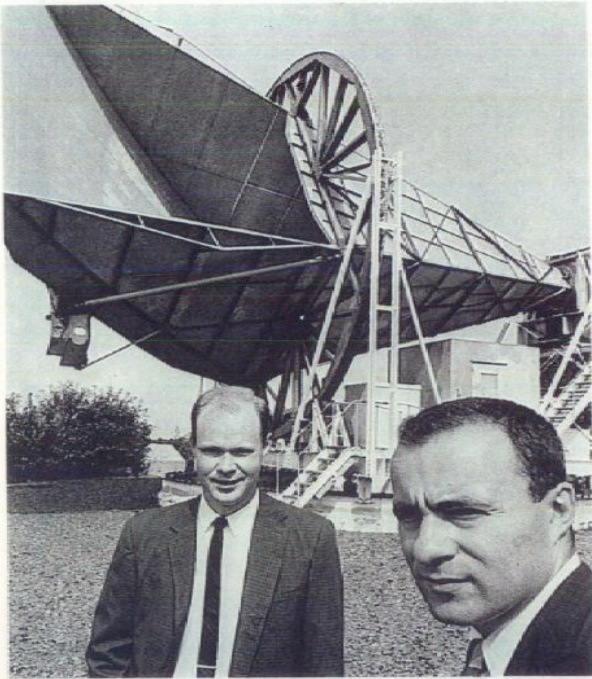
3分間の男

弁護士として就職 1913

- ・天文学研究に戻る(3カ月後)
- ・「遠くの銀河ほど距離に比例して速い速度で遠ざかっている」ことを発見。 1919~1924

3~5年間の男





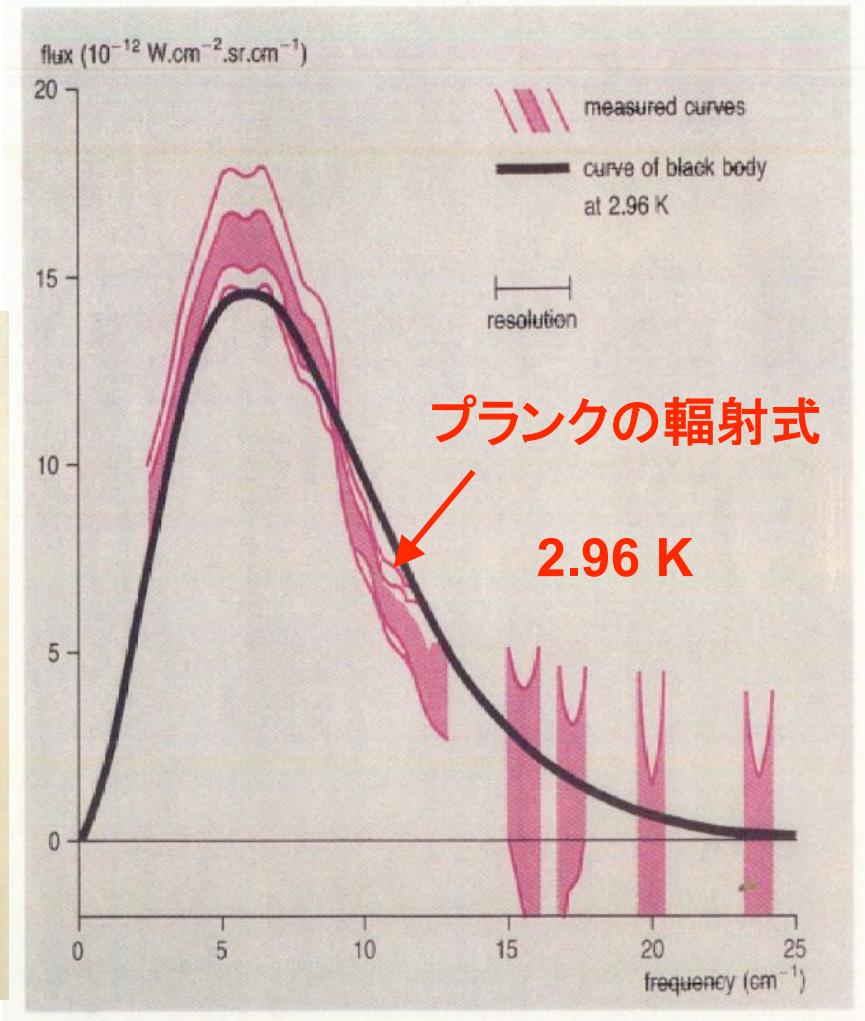
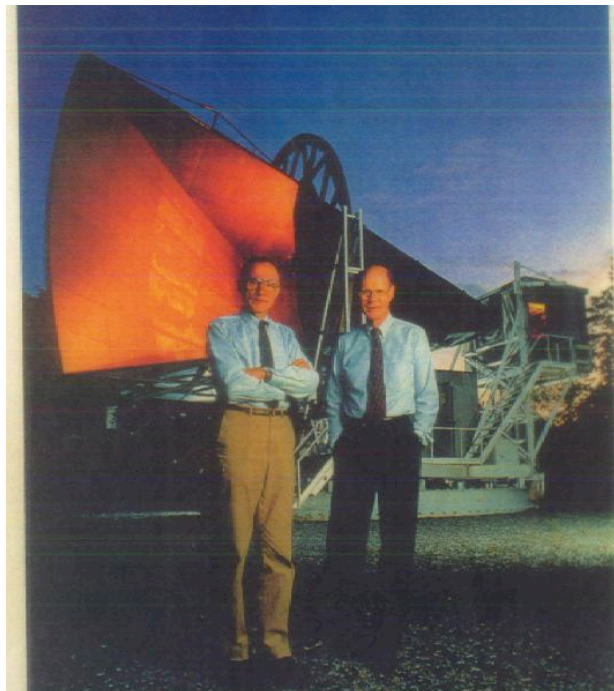
AT&Tで実験中の
無名の電波
天文技師

ペンジャス & ウィルソン

A. A. Penzias & R. W. Wilson

1965年、実験中に偶然、火の玉宇宙
の名残である宇宙背景放射を発見

ノーベル賞受賞
(1967)後、発見
の主演となった角
型アンテナの前に
立つ二人



ペンジャス、ウィルソンによる火の玉宇宙
の名残 = 宇宙背景放射の発見(1965)

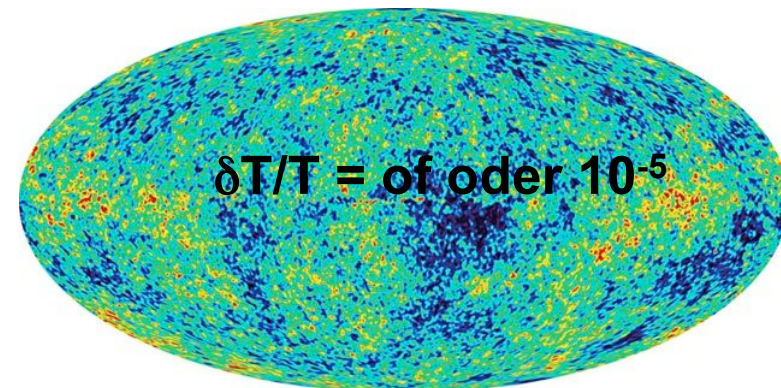
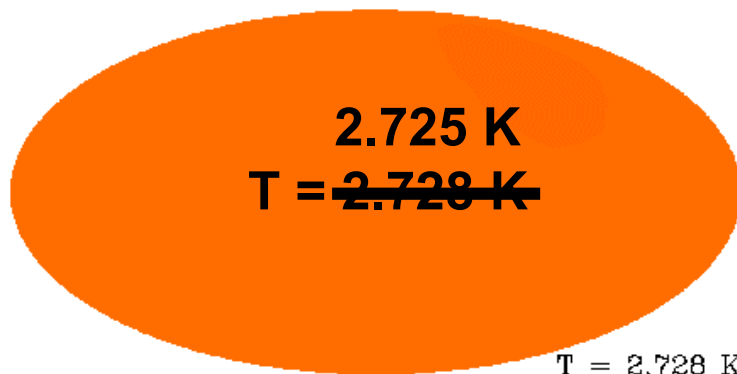
スムート、マザーによる火の玉宇宙の
“ゆらぎ”の発見(1992)

ガモフの予言(1948)の証明！

宇宙の果ての温度ゆらぎを発見！



宇宙開闢から38万年後には、宇宙が晴れて、物質の揺らぎが作られ、
この揺らぎが種となって成長し、星・銀河・大構造(や人間)が作られた！



宇宙は加速的に膨張している！
ダークエネルギーを仮定すると説明可能

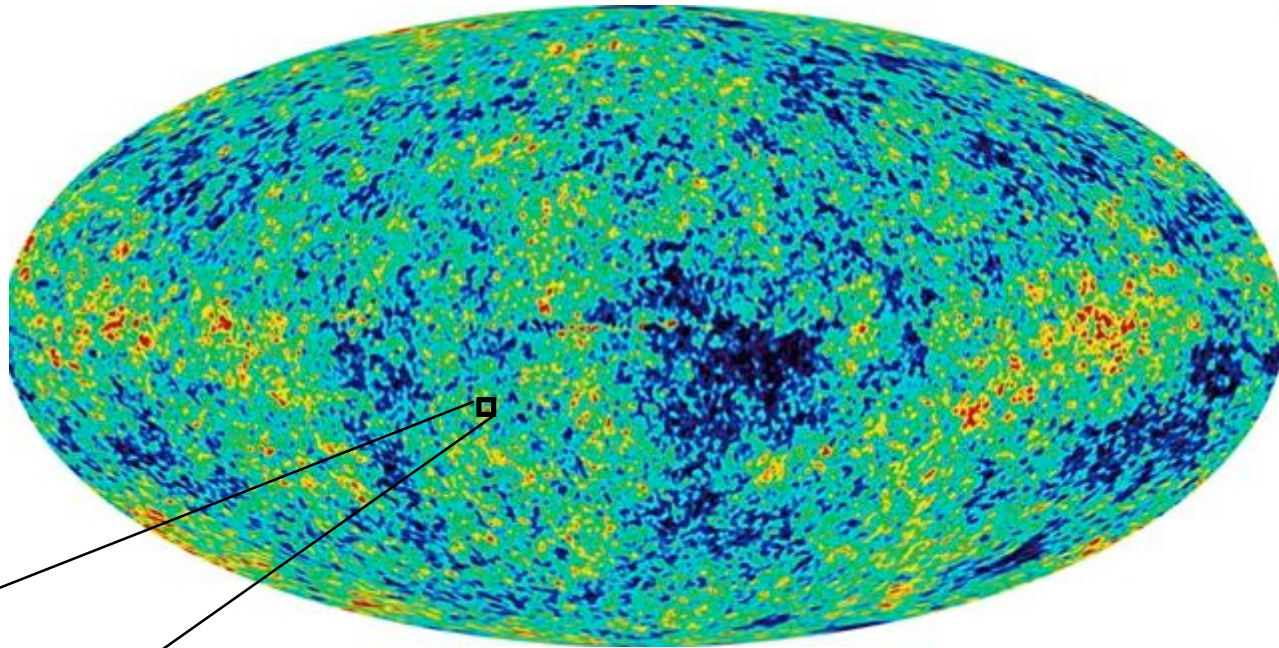


宇宙の
始まり

宇宙の膨張と進化

現在

銀河や星が構造を作る！
暗黒物質を仮定すると説明可能



38万年



137億年

スーパーコンピュータを用いた宇宙構造形成過程のシミュレーション。
観測されている現在の宇宙を再現するためには、未知の暗黒エネルギー73%
と暗黒物質23%を仮定する必要がある。 **これらの正体は何か？**

宇宙のエネルギー・質量は 何が担っているのか？

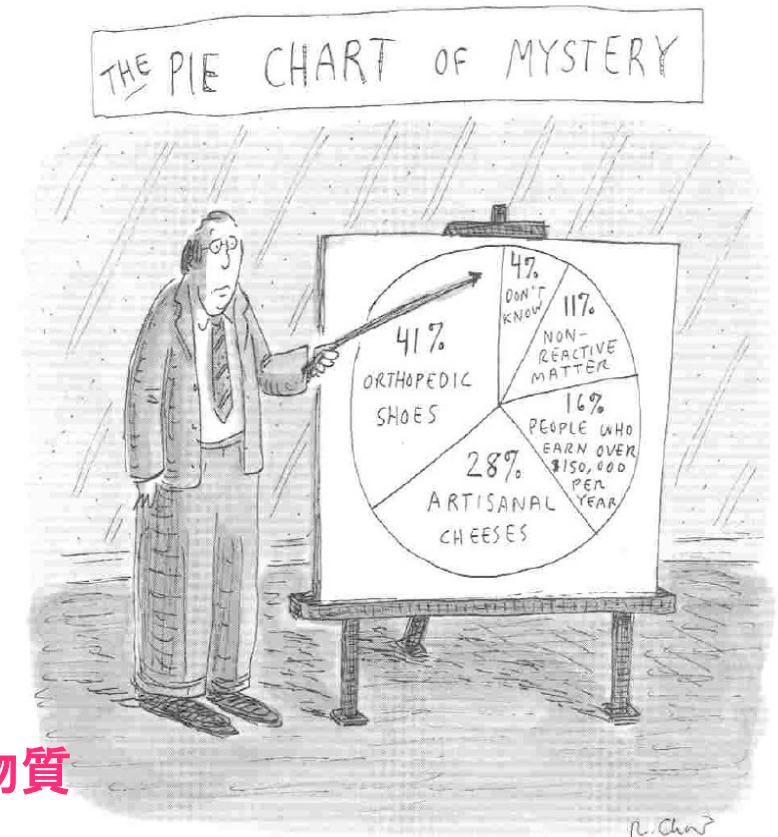
- 暗黒エネルギー(宇宙項)？
- 暗黒物質？
- 普通の物質はたったの4%！

未知の暗黒エネルギー(宇宙項)



未知の暗黒物質

宇宙というパイの作り方

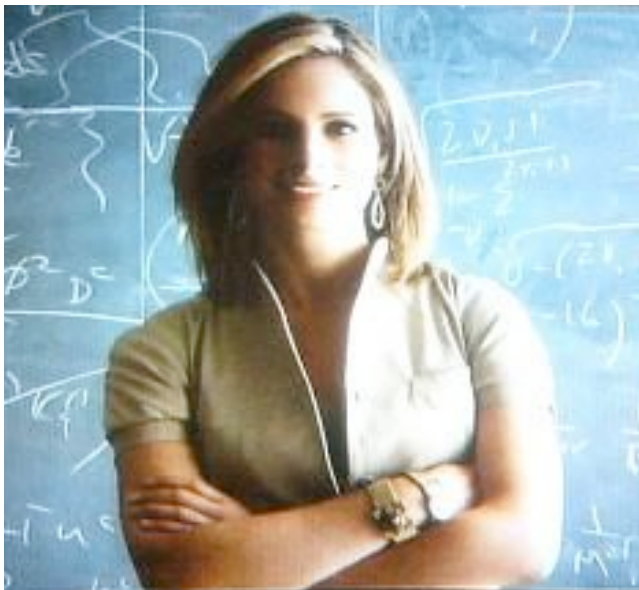


普通の物質

未知の暗黒エネルギーと暗黒物質で満ちた宇宙に生きることは、得体の知れない素材でできたパイを食べるようなもの。

科学者は「暗黒の謎」を解きたい

高次元宇宙モデル

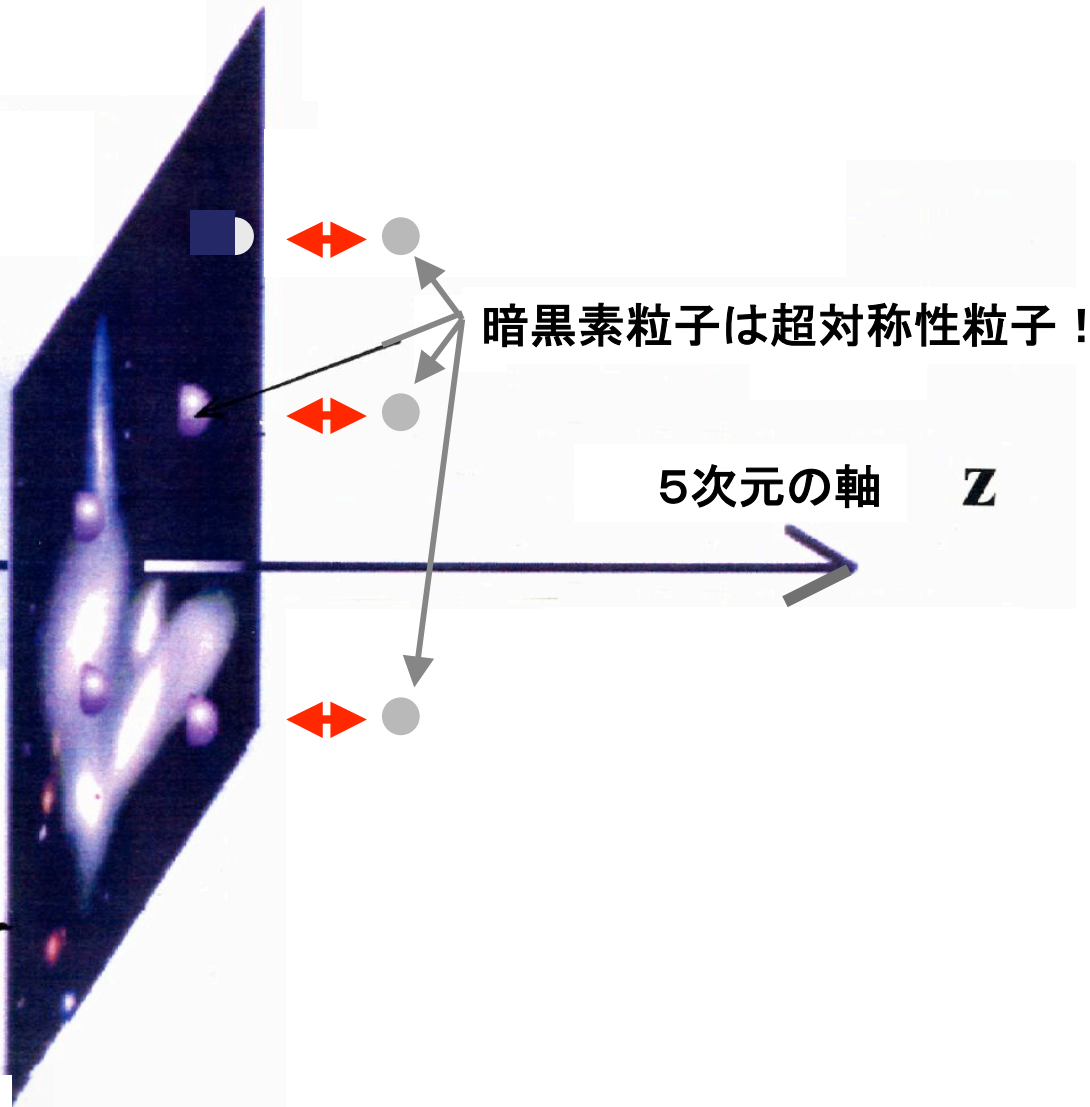


リサ ランドール
(ハーバード大、1999)

私たちの宇宙は、5次元の宇宙
のなかの一断面にすぎない。

ブレーン
(Brane)
II

4次元アインシュタイン宇宙



5次元ブレーン宇宙モデル



八尋正信・九大教授

5次元宇宙モデルでは、ダークエネルギー=0
でも観測(宇宙の加速膨張)を説明することが
できる。(東大+九大グループ、2006)

暗黒物質一元論の提唱

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}(\bar{\rho} + \rho + \rho_\chi) - \frac{k}{a^2}$$

Dark Radiation term

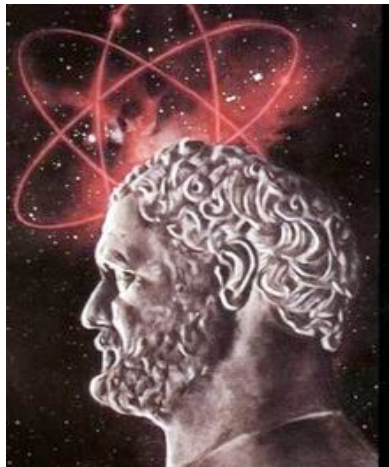
$$\dot{\rho}_\chi + 4H\rho_\chi = -\alpha/a^q \times \rho_{cr}H,$$

現代宇宙物理学の到達点、究極の問い！

基本的な力の統一理論を構築し、宇宙開闢と物質創生の謎、宇宙進化の謎を解明したい！

- 電気力、磁気力の統一
マクスウェル(1864)
 - 電磁気力、弱い力の統一
ワインバーグ、サラム(1973)
 - 電弱力、強い力の大統一
ゲージ理論 完成まじか！
 - 重力の超大統一???
- 超ひも、超対称、超重力学理論・・・



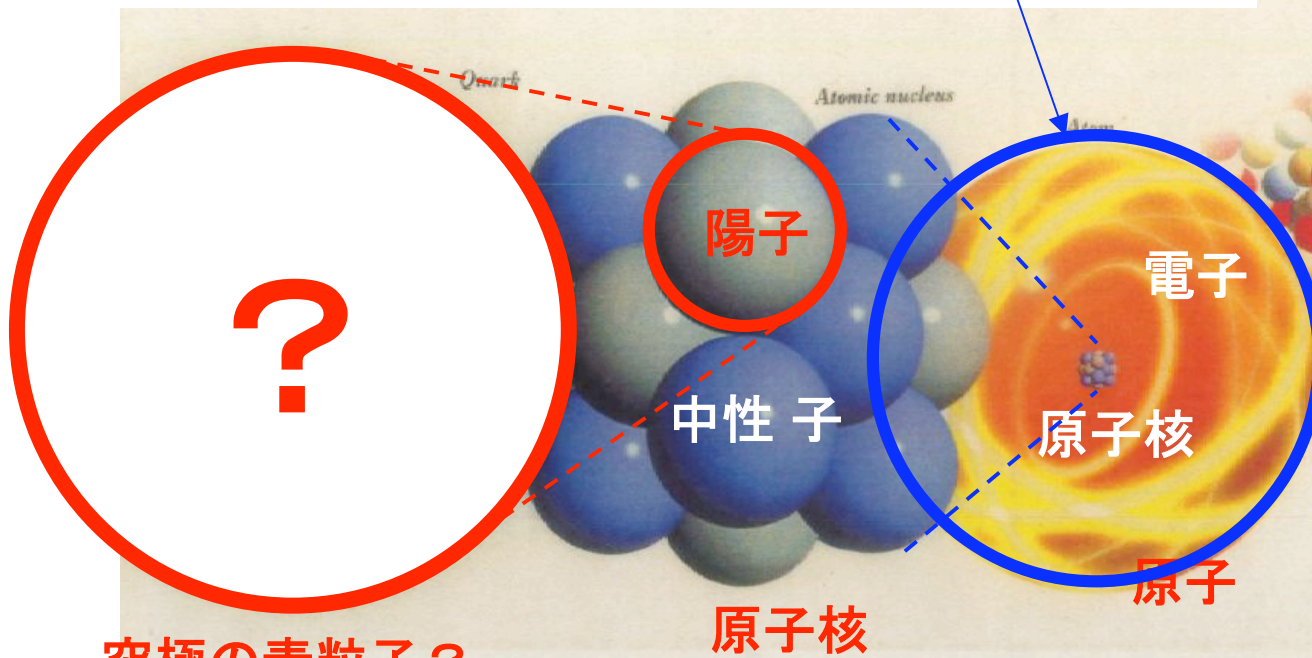
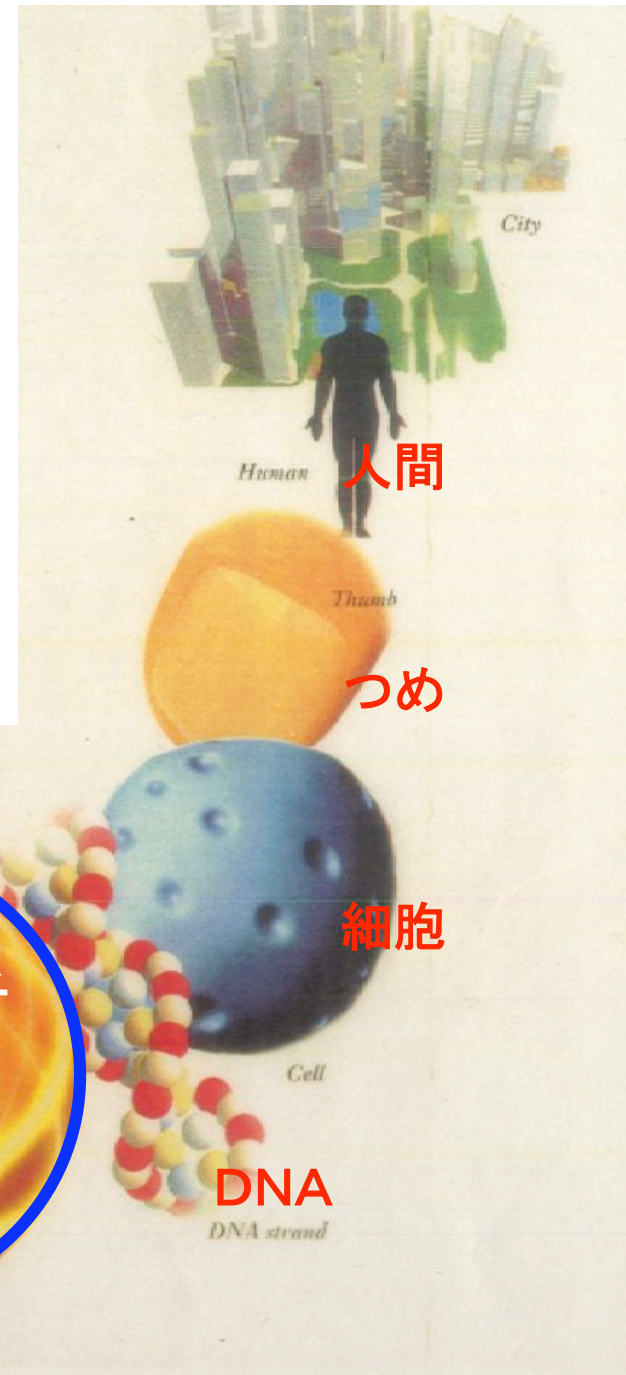


古代ギリシャ (デモクリトス)

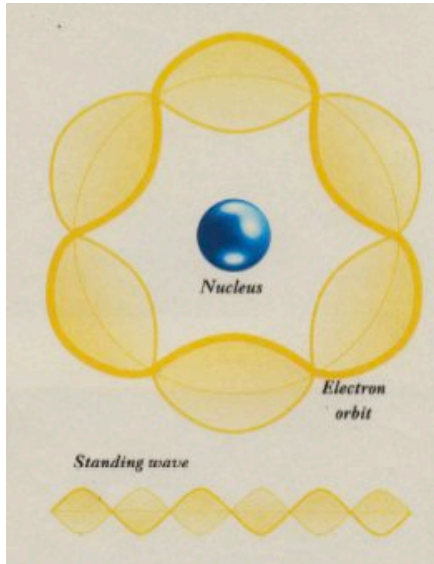
目に見えないがそれ以上分割でき

20世紀

原子は、原子核(陽子+中性子)
と電子からなり、分割できる。

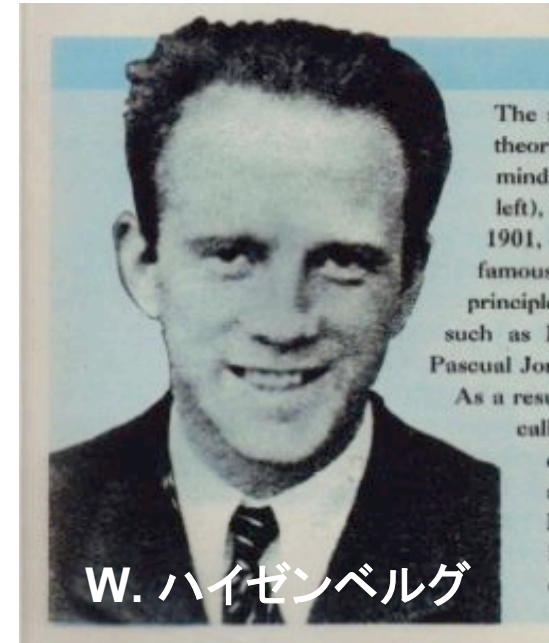


究極の素粒子?



Quantum
jump

電子は陽子の周りの軌道を滞在波として運動し、雲のように広がって存在する。



W. ハイゼンベルグ

E. シュレディンガー



量子力学の原理

陽子も電子も存在が確率的に空間に分布する波として振舞う。

粒子 = 存在確率の波

元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている

ドナツト・メンツェンデレーフ (1834-1907) は、1869年、ロシアのウラシムカツトに在りて、元素の性質を系統的に整理し、元素周期律を提唱した。彼の提唱した元素周期律は、元素の性質を系統的に整理し、元素周期律を提唱した。彼の提唱した元素周期律は、元素の性質を系統的に整理し、元素周期律を提唱した。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
[H]	[He]	[Li]	[Be]	[B]	[C]	[N]	[O]	[F]	[Ne]	[Na]	[Mg]	[Al]	[Si]	[P]	[S]	[Cl]	[Ar]
[K]	[Ca]	[Sc]	[Ti]	[V]	[Cr]	[Mn]	[Fe]	[Co]	[Ni]	[Cu]	[Zn]	[Ga]	[Ge]	[As]	[Se]	[Br]	[Kr]
[Rb]	[Sr]	[Y]	[Zr]	[Nb]	[Mo]	[Tc]	[Ru]	[Rh]	[Pd]	[Ag]	[Cd]	[In]	[Sn]	[Sb]	[Te]	[I]	[Xe]
[Cs]	[Ba]	[La]	[Ce]	[Pr]	[Nd]	[Pm]	[Sm]	[Eu]	[Gd]	[Tb]	[Dy]	[Ho]	[Er]	[Tm]	[Yb]	[Lu]	[Rn]
[Fr]	[Ra]	[Ac]	[Th]	[Pa]	[U]	[Np]	[Pu]	[Am]	[Cm]	[Bk]	[Cf]	[Es]	[Fm]	[Md]	[No]	[Lr]	[Og]

鉄・コバルト・ニッケル

森田浩介グループ
(理化学研究所)
新元素113番を発見。

梶野敏貴
(東大・天文台グループ)
超新星で合成されることを証明

トリウム ウラン

113



一家に1枚周期表

Copyright © 2013 by the IUPAC Commission on Nomenclature of Inorganic Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Organic Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Bioinorganic Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Polymer Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Medicinal Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Environmental Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Food Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Materials Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Physical Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Analytical Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Applied Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Interdisciplinary Chemistry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Education, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Safety, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Information, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Heritage, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Industry, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Research, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Society, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Union, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical World, the IUPAC Commission on Nomenclature of Chemical Future.



George Gomow (ジョージ ガモフ) の予言

私は、宇宙が火の玉宇宙から始まった
と思う。もしこれが本当なら、

1. 宇宙は、火の玉の名残である5Kの
宇宙背景放射で満ちているはずだ。
2. 火の玉初期宇宙は巨大な核融合炉。
水素、ヘリウムからウランまでの重い
元素が作られていたはずだ。

第2の予言は正しかったのか？

- ・ロシア、オデッサ生まれ。
- ・原子核物理学者、作家。「不思議の
国のトムキンス」
- ・24歳で、 α 崩壊の理論(ウランの
量子透過理論)を作る。
- ・44歳で、宇宙は大爆発から始まった
とするビッグバン(火の玉)初期宇宙
仮説を提唱。(1948)

ペンジャス、ウィルソンによる宇宙背景放射
の発見(1965)の17年前の予言！

George Gamow の夢 (1948)

火の玉宇宙は巨大な核融合炉。
水素からウランまで全ての元素を作りたい！

“重水素やヘリウム等の軽い元素しか作ることができない”
夢、破れる！

梶野の夢 (1989)

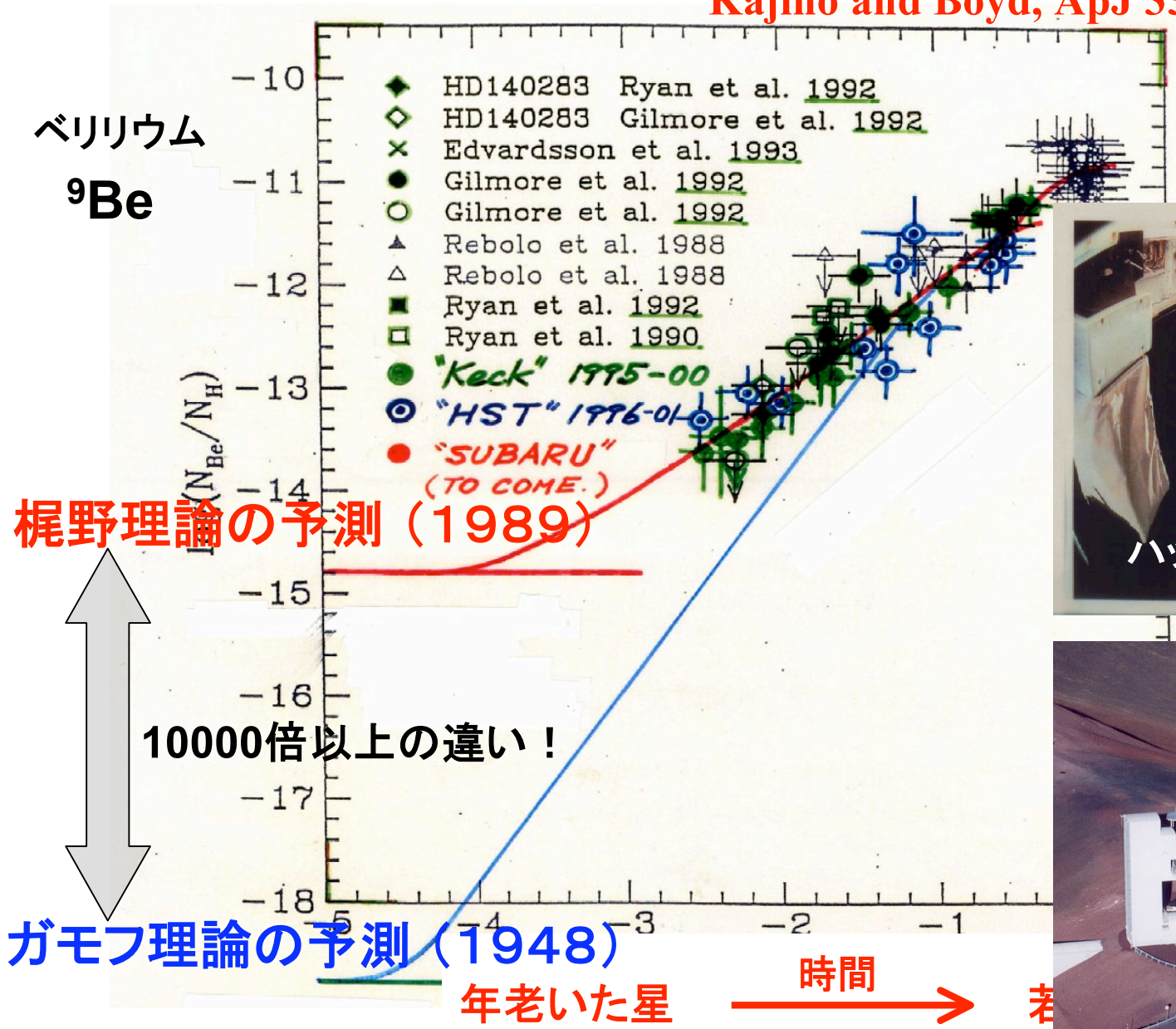
...

ゆらぐ火の玉宇宙でウランまでの重元素を作りたい！
宇宙背景放射ゆらぎの発見 (1992) の3年前の予言。

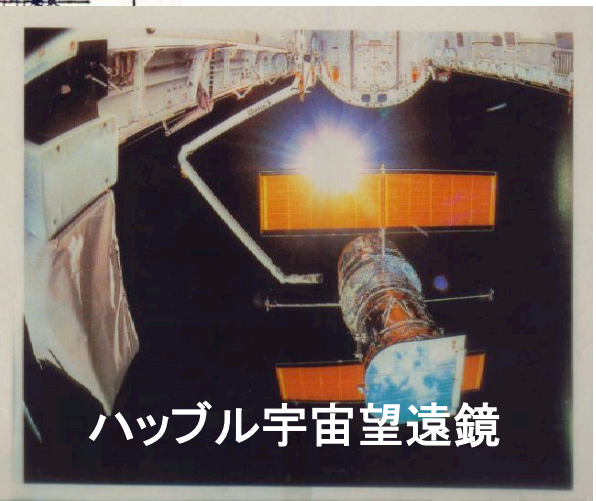
予言は正しいか？

ゆらぐ火の玉宇宙の中での核融合

Kajino and Boyd, ApJ 359 (1989, 1990) 267



太陽近くの若い星々



ブローア城で開催された国際会議「宇宙論と元素の起源論」にて

梶野 敏貴

ゆらぐ宇宙での
重元素合成仮説
(1989年)

ジョージ・スムート

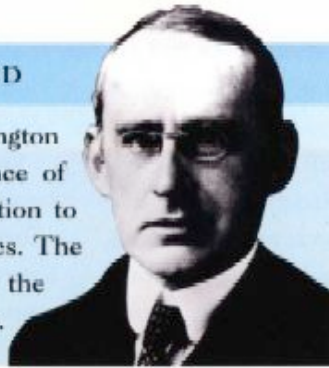
2006年度
ノーベル物理学賞受賞
宇宙背景放射ゆらぎの発見
(1992年)



Arthur Eddington 卿 (1882–1944)

ARTHUR EDDINGTON - EINSTEIN CONFIRMED

The British physicist and astronomer Sir Arthur Eddington (1882-1944) was one of the first to see the importance of Einstein's theories of relativity. He planned an expedition to observe the 1919 solar eclipse, only visible in the tropics. The observations showed light from distant stars bent by the Sun's gravity and put Einstein's name into the headlines.



1919年の日食を利用し、星からの光が太陽の重力で曲げられていることを観測し、アインシュタインの一般相対性理論が正しいことを証明。

1911 Rutherford

ヘリウム原子核 (α 線) の発見

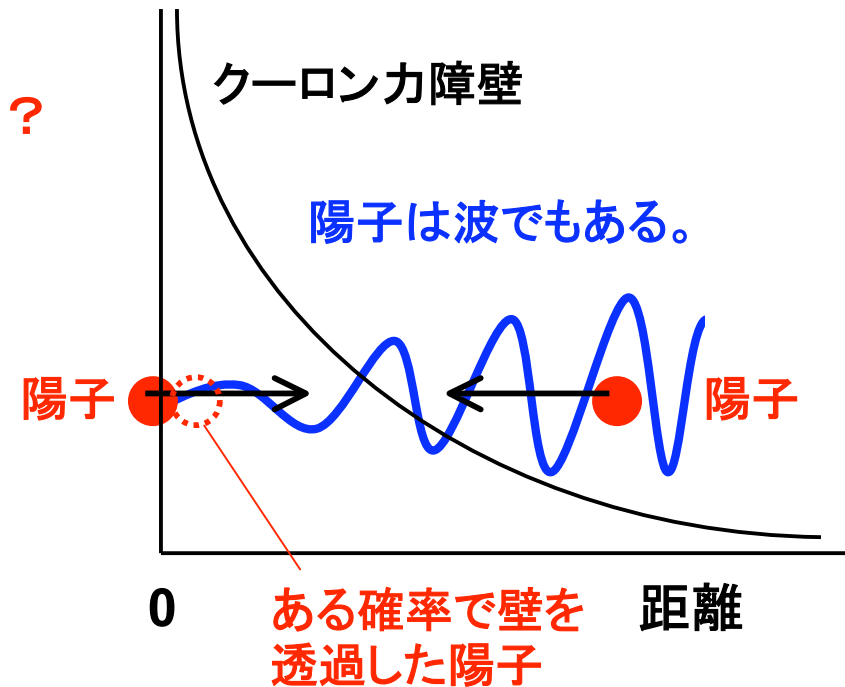
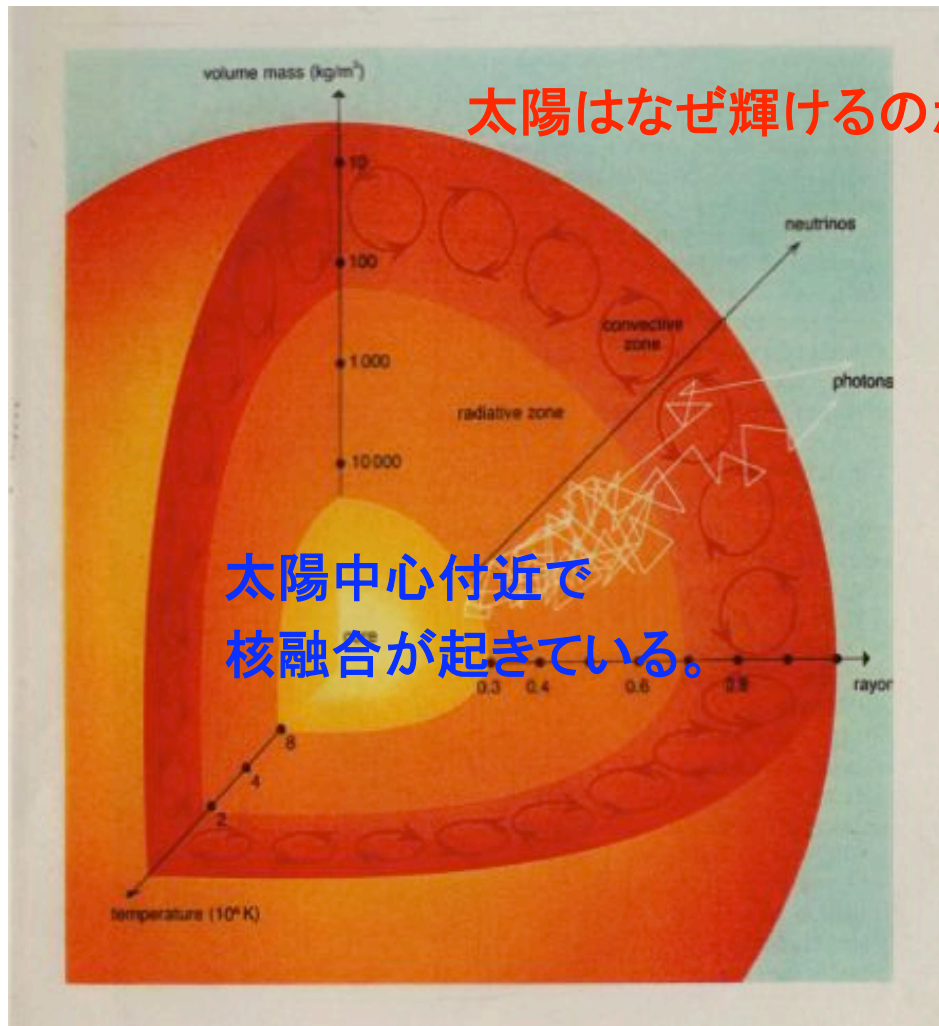
Eddington quickly guessed:

The Sun gets its energy by somehow burning hydrogen into helium.

4個の陽子(水素原子核)が核融合して α 粒子(ヘリウム原子核)ができ、原子核エネルギーが解放されているに違いない。

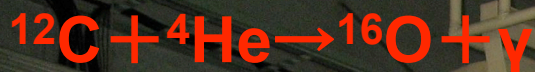


太陽は巨大な核融合炉であり、人類にとって天恵である。
ミクロな世界の法則“量子論「粒子＝確率波」”が、太陽内部で
核融合を引き起こし、人間を形づくるさまざまな元素を作りだす。



陽子どうしの間にはクーロン反発力によるポテンシャルの壁ができ、ある距離以内に近づけないけれども、波としてある確率で壁を透過し核融合を起こす。

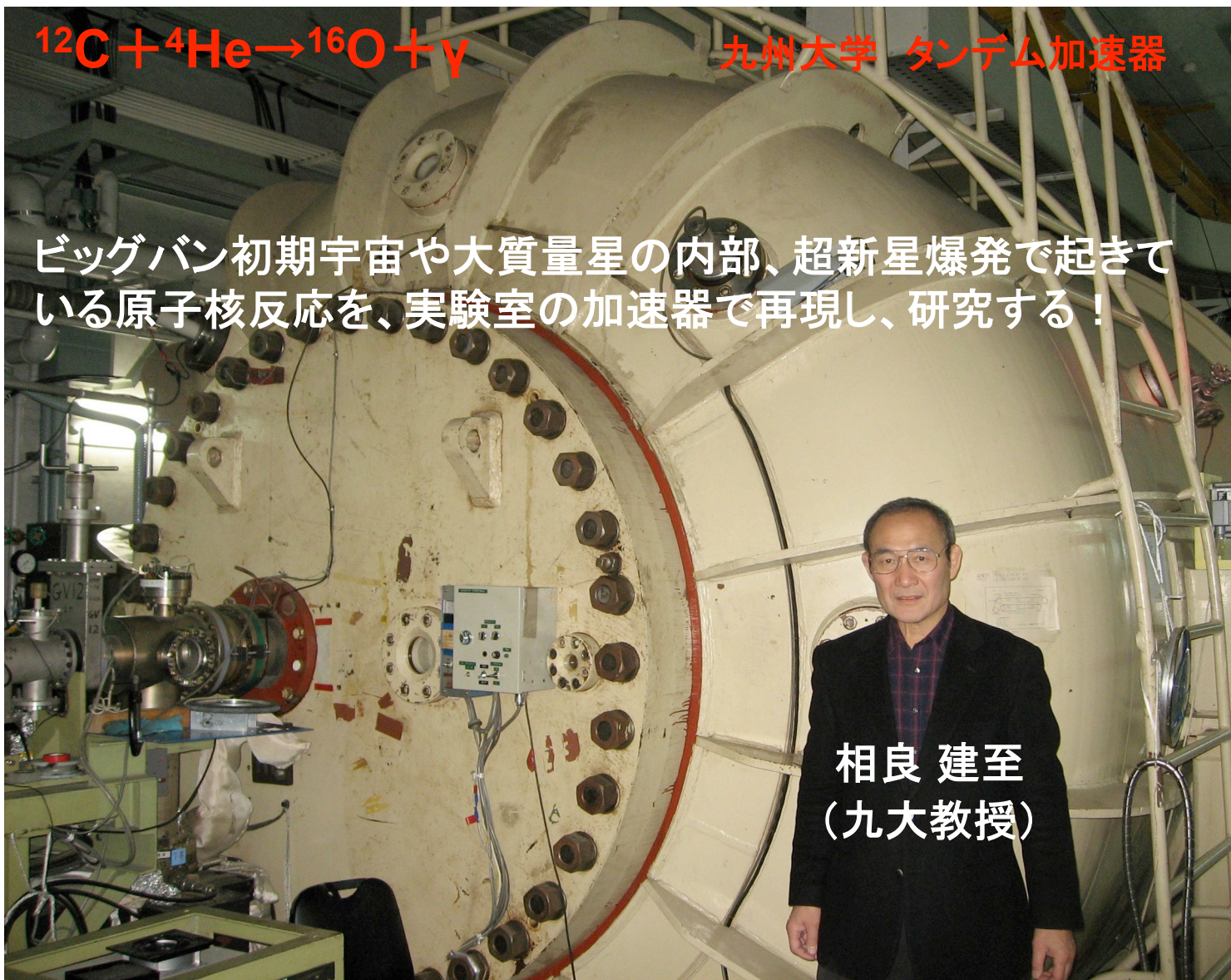
私たちの体を構成する炭素(^{12}C)や酸素(^{16}O)は、 宇宙のどこで、いつ、どのようにして作られてきたのか？



九州大学 タンデム加速器

ビッグバン初期宇宙や大質量星の内部、超新星爆発で起きている原子核反応を、実験室の加速器で再現し、研究する！

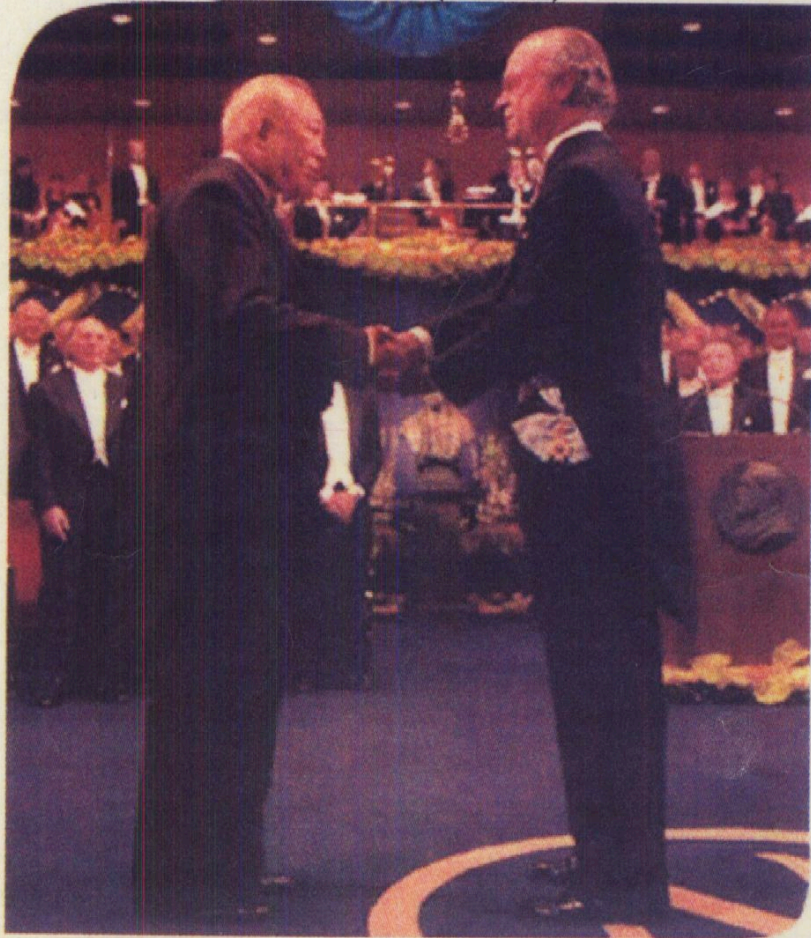
相良 建至
(九大教授)



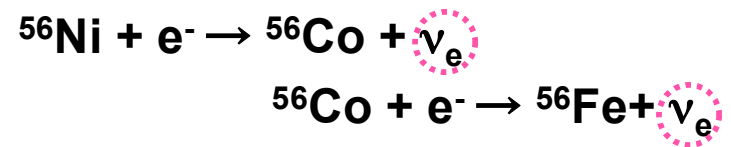
小柴昌俊東京大学名誉教授 2002年ノーベル物理学賞受賞

超新星1987Aからの素粒子ニュートリノを人類史上
初めて補足。ニュートリノ天文学を拓いた功績に対して。

▼ ノーベル賞を受ける小柴名誉教授 (12月10日)



ニュートリノは超新星内部で起きた
原子核・素粒子反応の確かな証拠！



超新星1987A



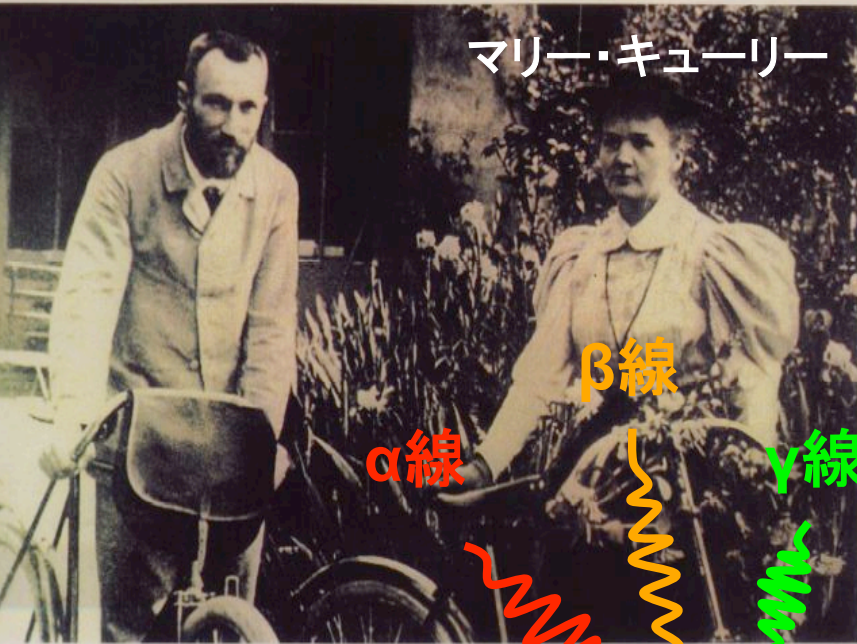
約100年前のラジウムやウランウムからの放射能の発見が、量子論を生み出し、現代科学(原子核・素粒子物理学、固体物理学など)の基礎を拓いた。

→ 20世紀の物質文化を
開花させ、発展させた。

大きな疑問

重い元素・ウランウムは、宇宙のどこでどのように作られたのか？

100年間の疑問を
21世紀のいま説明！



URANIUM - A USELESS METAL?

Uranium, the element that revealed radioactivity, was discovered in 1789 and named after the planet Uranus, discovered eight years earlier. Apart from its high density, almost twice that of lead, there seemed to be nothing special about uranium. For a long time it was an oddity at the end of the periodic table with the highest known atomic weight of all the naturally occurring elements; it was known as "the useless metal" as it

seemed to have no practical value. Mainly composed of the variety (isotope) uranium-238, natural uranium contains about 0.7 per cent uranium-235, a raw material for atom bombs and nuclear reactors. Uranium is found naturally in yellowish guminite and in black tar-like pitchblende (right), which also contains uranite and traces of radium and polonium.



超新星爆発で、ニュートリノとの
反応から作られた！

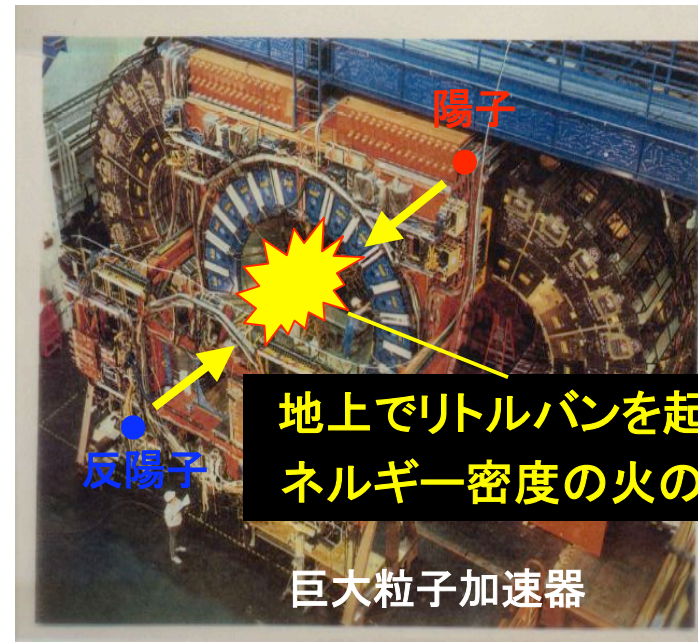
ガリレオ・ガリレイ (1610)



ロバート・フック (1665)



巨大望遠鏡と巨大粒子加速器が、宇宙および極微の世界を覗く科学的な道具！



陽子(=人間の体を構成する要素)
の中から、赤・青・緑の3種類の色を
持つ素粒子“クォーク”が飛び出して
きた！ クォークは6種類の香りを
持っている。



陽子の中の真空！

$$E = mc^2$$

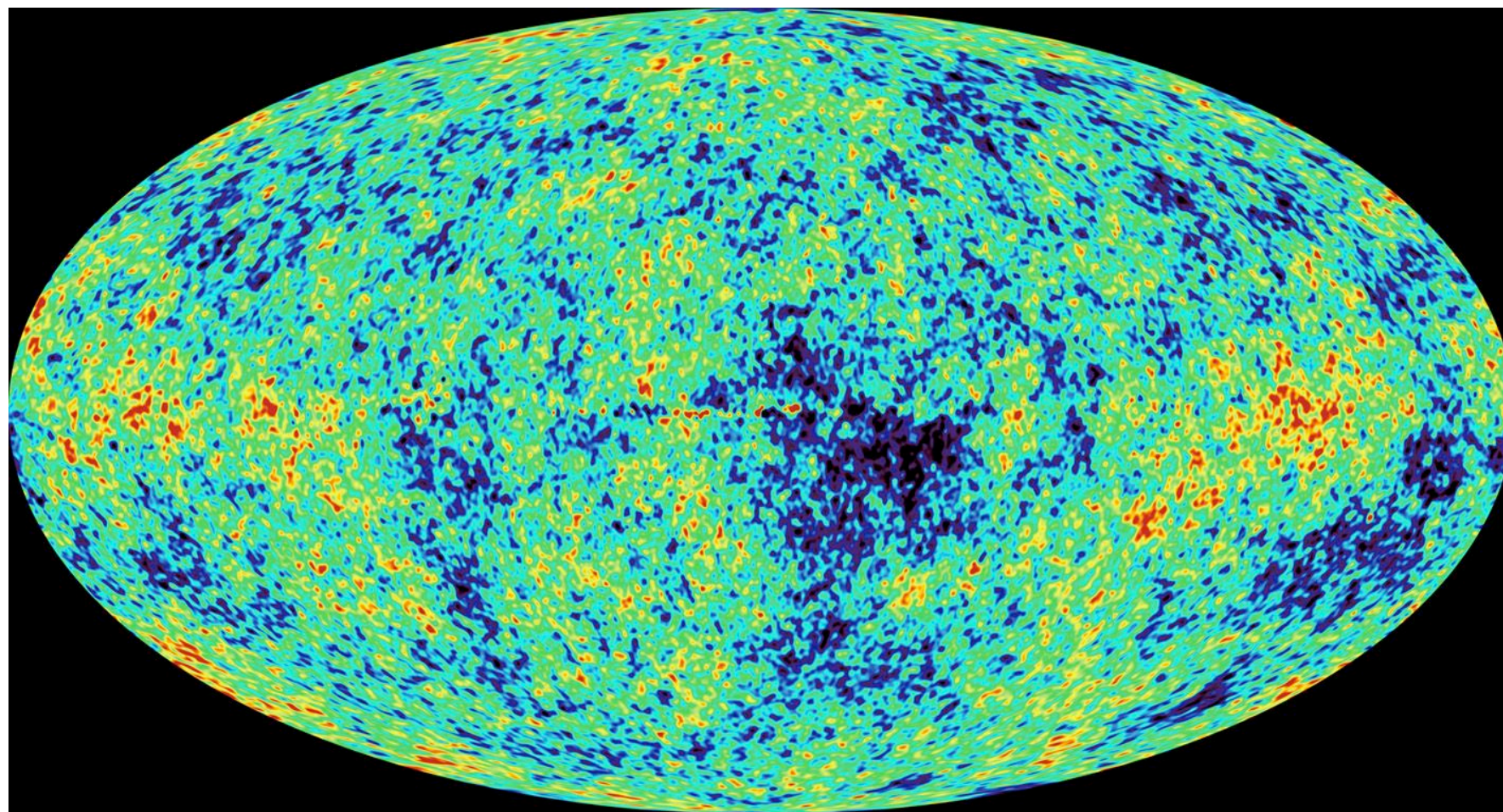


陽子の真空中に広がる世界

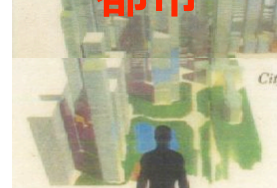
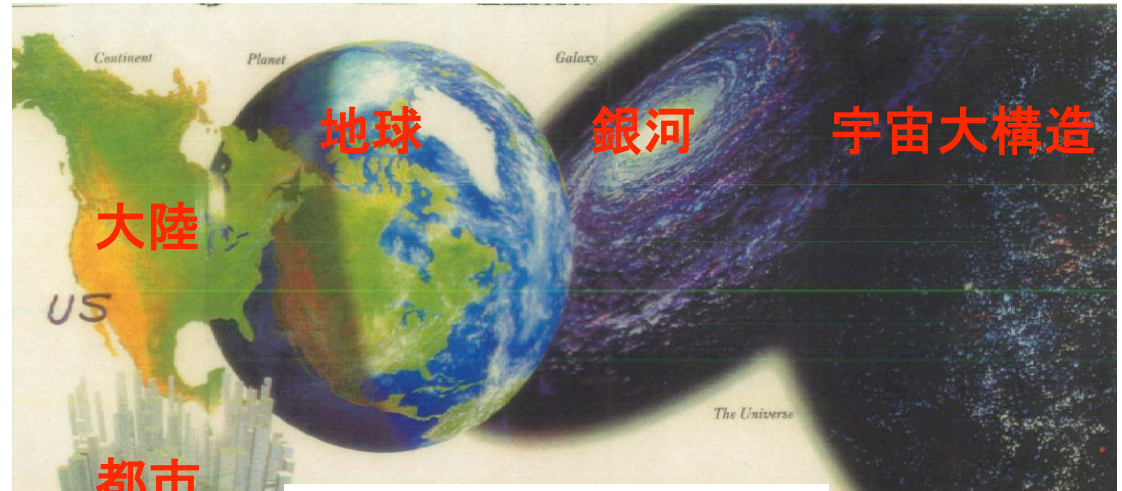
上は陽子の構造を示す図。三つのクォークがグルーオンによって結びついている。これ以外の部分は真空である。四角で囲った部分を拡大した世界のイメージが、両ページにまたがってえがかれている。波のような構造は、真空中のエネルギーの高さを示している。最もエネルギーの高い波の頂点から、クォークと反クォークが対になって飛び出す。クォークの大きさは 10^{-16} メートル以下で、それぞれが光の三原色（赤、青、緑）で表現される色電荷をもっている。反クォークの色電荷は光の三原色の補色であるシアン、イエロー、マゼンタであらわされる。青い色電荷をもったクォークの反クォークは、イエローの色電荷をもっている。このように補色の関係にあるクォークと反クォークがぶつくと白色になって消滅し、そこからパイ中間子が生まれる。赤と緑のように補色の関係にないクォークどうしがぶつかったら、たんにね返るだけである。

陽子の中の小宇宙では、量子力学の原理によって、究極の素粒子クォークやグルーオンのエネルギー密度が揺らいでいる。また、クォーク閉じ込め対称性、カイラル対称性(π中間子の質量の起源)などが回復している。 **真空の性質が、ビッグバン宇宙の初期にそっくり！**

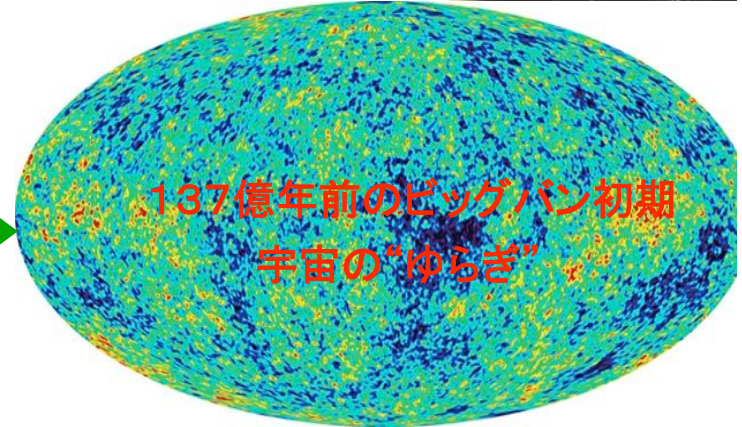
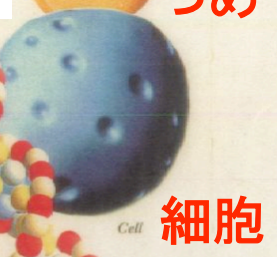
137億年前に開闢した宇宙
年齢38万年の頃のビッグバン火の玉宇宙“ゆらぎ”



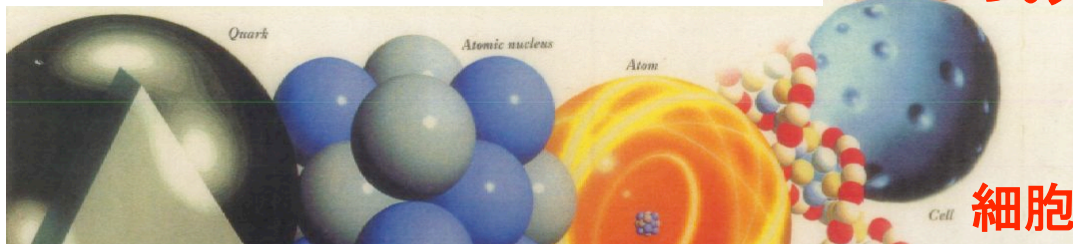
人間を形づくる究極の “エレメント”は何か？



人間



宇宙の果てに見つかった
“ゆらぎ”の起源は何か？



火の玉小宇宙の量子的ゆらぎが宇宙の膨張で引き伸ばされた！
私たち人間はビッグバン宇宙のかけらで作られている！

素粒子

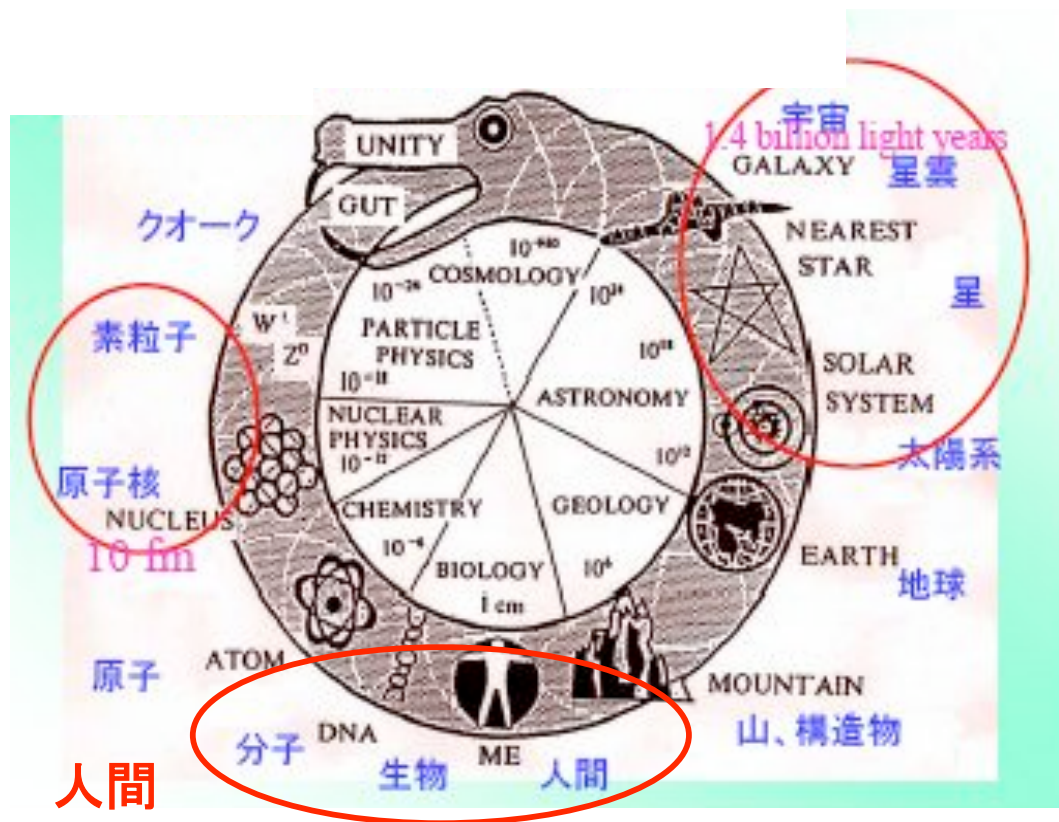
原子核

原子

自然の階層性

宇宙の法則はどこまでもミクロな世界の法則で成り立っている。自然は、ちょうどウロボロスの蛇が自分の尾を飲み込むような形で作られている。（グラシヨウ）

小さな物質
世界の法則



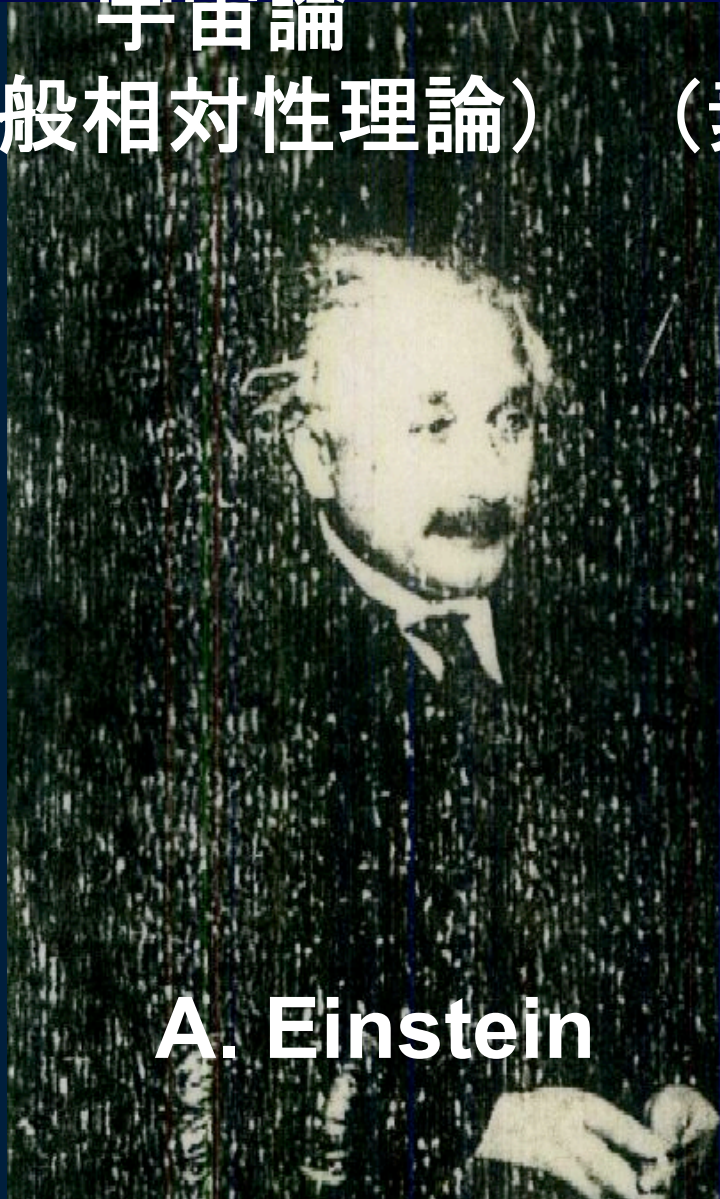
宇宙の法則

物質世界(人間)と宇宙(時間・空間)の統一

時間・空間と物質、ビッグバン宇宙論として統一

宇宙論

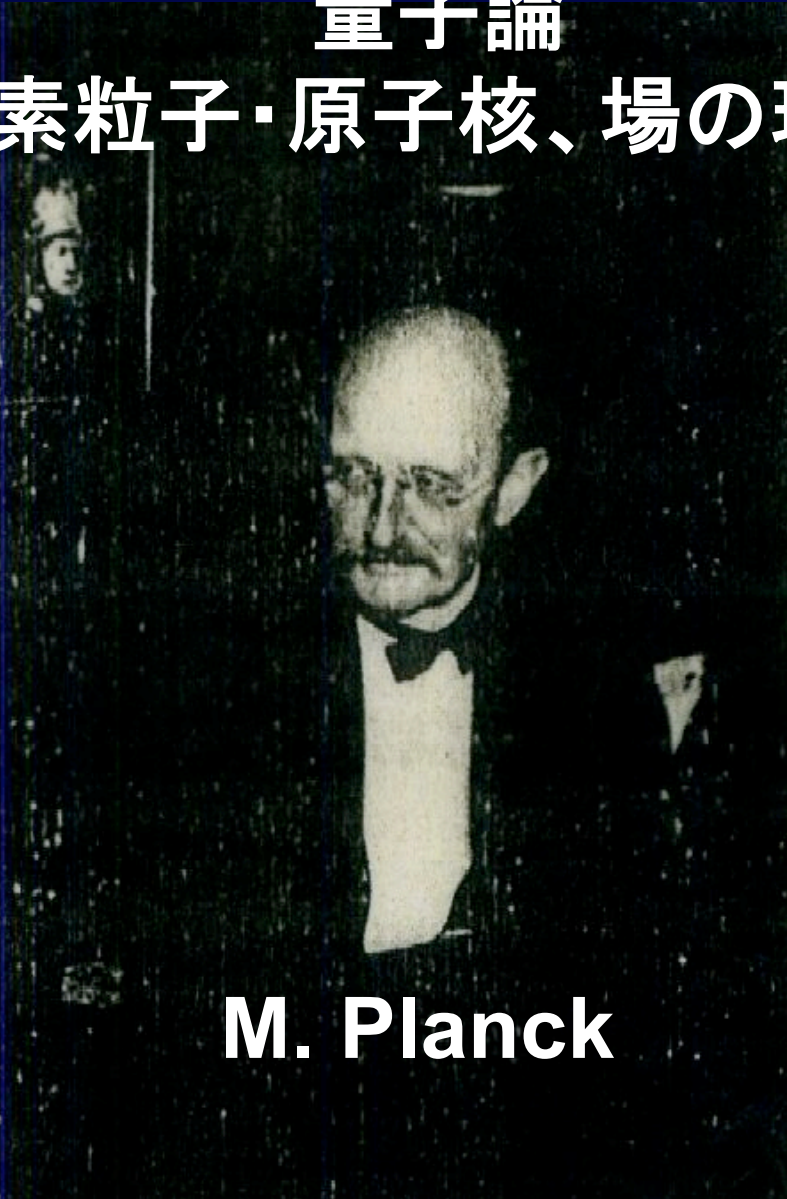
(一般相対性理論)



A. Einstein

量子論

(素粒子・原子核、場の理論)



M. Planck

四つの力は統一 ゆらぐ初期宇宙 → 対称性が破れる → 四つの力が分岐 → 豊かな宇宙構造形成

時間の始まり

宇宙進化

現在(137億年)

0

→ 時間

力が低下する過程で、はたらく力は四つに分れていってそれぞれ効力をあらわしはじめ、つくられていった。

はじまり

光に満ちた火の玉宇宙
 2γ (光) → 物質 + 反物質
 対称性の破れ: 物質 > 反物質
 物質でできた宇宙

物質粒子である陽子も
 10^{30} 年で崩壊する。

さまざまな種類の分子や、固体と液体に集む固体が形成されていく過程が生まれ、その上でさまざまな形の一つである生命が誕生する。は人間や社会へと、より複雑化して

イン
強い力
最初の物質が生まれる。

強い力、電磁気力が分かれ、ここで四つの力がそろろう。だが高温のため、力はまた形をつくる効果をおこなっている。

強い力で陽子と中性子が結合して水素の原子核、さらにヘリウム原子核ができる。

水素とヘリウム原子核に電子が結合し、原子という新しい形ができる。このときから宇宙は透明になり、光は伝送しはじめる。ここから発せられた3000~4000度Kの光は、現在3度Kの宇宙放射として観測できる。重力がはたらくはじめるのもこのころである。

密度のゆらぎから超新星やブラックホールが誕生する。重力の効果による星雲の巨大化、すなわち天体の誕生である。ばらばらだった原子がまとって分子を形成しはじめる。

10^{-11} 秒

$10^{-5} \sim 10^{-4}$ 秒

1~100秒

10万年

10~10億年

100~150億年

