

宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論**

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>

天の川銀河 (our Galaxy)

THE MILKY WAY

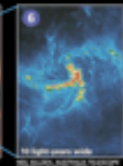
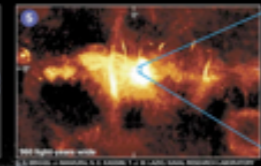
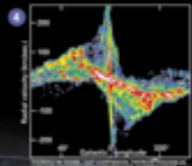
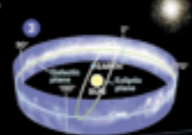


Home galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or expel their outer layers as beautiful planetary nebulae, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may lie a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



GUIDE TO THE GALAXY

- 1 Far beyond the galactic disk, yet drawn by its gravity, some stars and globular clusters wander the galaxy's halo. Regions of dark matter—regions that fall through its gravitational effects—extend beyond that.
- 2 Your clouds of interstellar dust block much of our night sky view of the Milky Way, which from our position in the galactic disk appears as a fuzzy band of light. Infrared satellites can see through the dust to reveal the galaxy's structure.
- 3 Earth's orbit around the sun lies at a vantage angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

- 1 A graph based on a radio survey reveals the turbulent motions of molecular gas in the inner part of our galaxy: gas moving away from Earth (top half) and toward Earth (bottom half). The densest gas appears white, from densest (top).
- 2 Massive amounts of energy are released near the center of the Milky Way, producing electrons that race along magnetic field lines, illuminating remnants of stellar explosions.
- 3 Probing even deeper into the core, a radio image detects a spiral of hot gas that is falling toward what may be a black hole some 2.6 million miles as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—some perspective of a 3-D model newly compiled for National Geographic—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulae.

- Galactic star cluster
 - Interstellar gas and dust
 - Nebulae
 - Thinner star region
 - Thicker star region
 - Subsolar bulge or center
 - Other star region
- Reference numbers for galaxies, nebulae, and star clusters

PLANETARY NEBULA M2-9



Exotic kaleidoscopes of the Milky Way, colorful nebulae and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Even a run-of-the-mill star may eventually produce a nebula of surprising beauty. Just as our sun will do in its death throes some five billion years from now, a dying star engulfs into a red giant and was transformed into the nebula M2-9 (above). At its center shines a small, hot core, which will cool and fade over time to form its stellar wind, streams of charged particles, blown outward in opposite directions, like exhaust from back-to-back jet engines. This glowing remnant is known as the Helix Space Telescope, is common among planetary nebulae. Silhouetted light from the star heats M2-9's gases and makes them glow. Other types of nebulae exist in our galaxy, including dark nebulae rich in microscopic dust that blocks our view of stars beyond. When a star expels a dark nebula, the dust particles reflect starlight and the black

retinas, however, every star in the cluster is about the same age, billions of years older than our 4.6-billion-year-old sun. Seeing clouds toward the center of the Milky Way, the Hubble Space Telescope focused on a rare clear region in the Sagittarius star cloud (above right). These fingerlike stars formed at different times; most are older than the sun. They sparkle like an assortment of gems on a jeweler's velvet pad. In some dark clouds look straight at a European Southern Observatory telescope in Chile and viewed in infrared light (right). A star 25 times as massive as the sun and 10,000 times brighter, it sports a disk of interstellar dust, shown here in false colors, about 20,000 times wider than Earth's orbit. Light from the hot star is absorbed by and warms the dust, making it glow. As stars like the sun die, they become factories for interstellar dust. Celestial bodies—the remnants of their red giant stages—surround the tiny hot central star of NGC 7527 (above right). Blown outward, the dust would obscure our view of the center of NGC 7527 were it not for this remarkable composite image in infrared and

visible light from the Hubble Space Telescope. Clouds of interstellar dust (right), shown over huge regions along the spiral arms of the Milky Way, are not thick and smooth but seem as frothy as the head on a glass of beer. Broomlike shock waves and stellar wind from

swirling stars may have shaped this surprising pattern. When a massive star comes to the end of its nuclear fuel supply, it collapses and then rebounds in a brief, powerful explosion, or supernova. The Chinese named these colorful fireworks "guest stars" and recorded one such event in the early millennium (above right). In the Large Magellanic Cloud 100,000 light-years from

Earth, clumpy filamentary shrouds of hydrogen gas reveal their dusty hearts in a radio image from the Australia Telescope Compact Array. The lower half of the cloud (blue) is spiraling toward the Earth while the top half (red) turns away. Growing along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are being born. The Lagoon Nebula (above), about 5,000 light-years distant, is equally detected with the naked eye as a hazy spot in the southern constellation—Sagittarius. Wide-field images show that it covers more of

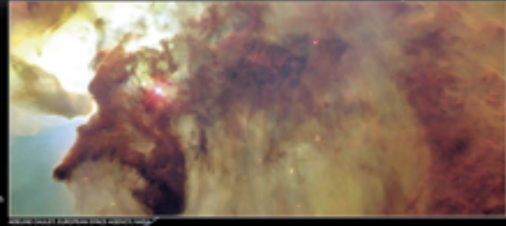
the sky than does the full moon. Where dusts was once only a vast dark cloud, radiation from the brightest and most massive young star in the nebula, Men-22, heats and ionizes the gas around it. The Lagoon Nebula's filaments, about 100,000 light-years long, are equally remarkable celestial phenomena. In the Large Magellanic Cloud 100,000 light-years from

Earth, clumpy filamentary shrouds of hydrogen gas reveal their dusty hearts in a radio image from the Australia Telescope Compact Array. The lower half of the cloud (blue) is spiraling toward the Earth while the top half (red) turns away. Growing along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are being born. The Lagoon Nebula (above), about 5,000 light-years distant, is equally detected with the naked eye as a hazy spot in the southern constellation—Sagittarius. Wide-field images show that it covers more of

the sky than does the full moon. Where dusts was once only a vast dark cloud, radiation from the brightest and most massive young star in the nebula, Men-22, heats and ionizes the gas around it. The Lagoon Nebula's filaments, about 100,000 light-years long, are equally remarkable celestial phenomena. In the Large Magellanic Cloud 100,000 light-years from

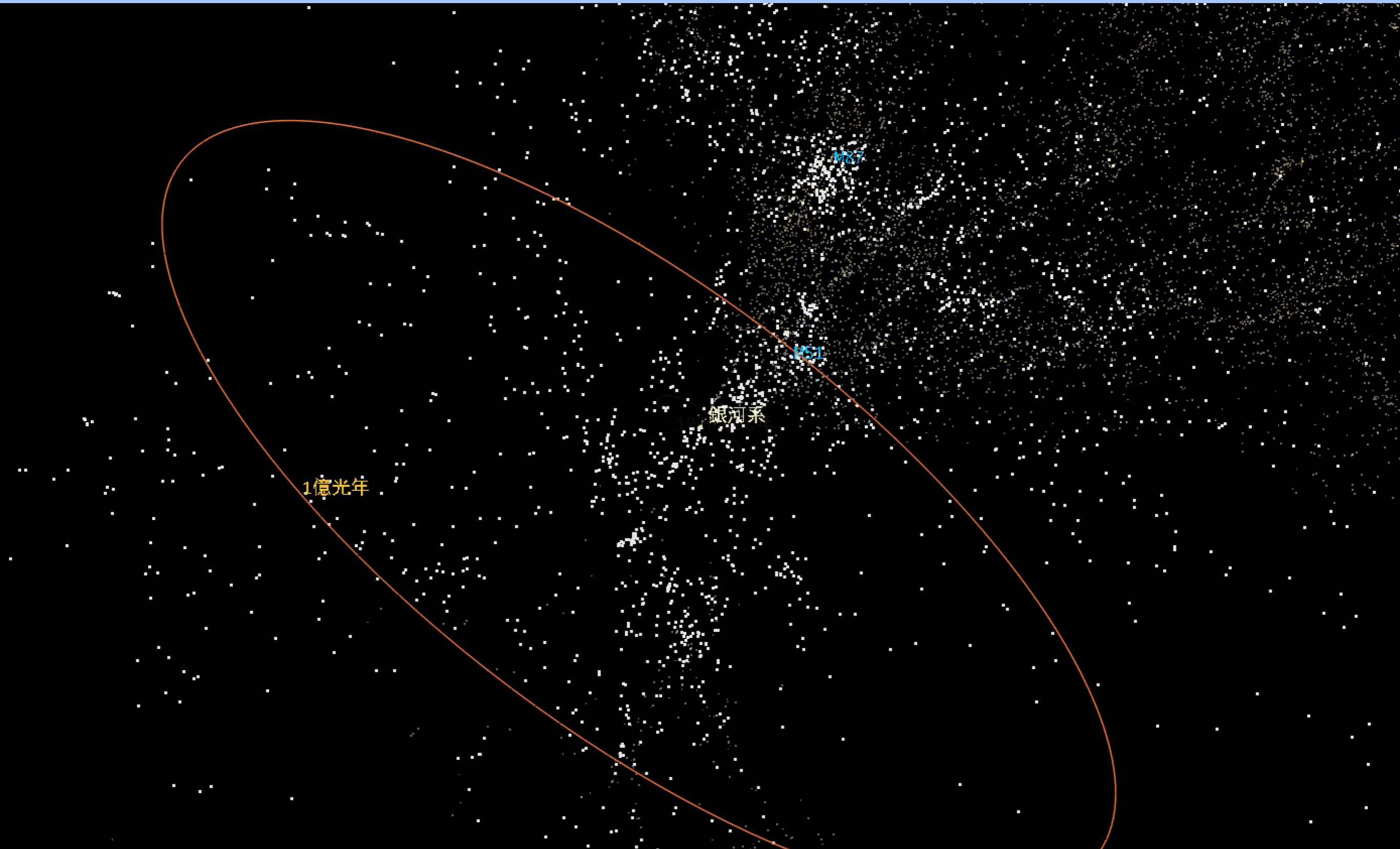
Earth, clumpy filamentary shrouds of hydrogen gas reveal their dusty hearts in a radio image from the Australia Telescope Compact Array. The lower half of the cloud (blue) is spiraling toward the Earth while the top half (red) turns away. Growing along the spiral arms of the galaxy, bright emission nebulae mark regions where new stars are being born. The Lagoon Nebula (above), about 5,000 light-years distant, is equally detected with the naked eye as a hazy spot in the southern constellation—Sagittarius. Wide-field images show that it covers more of

LAGOON NEBULA



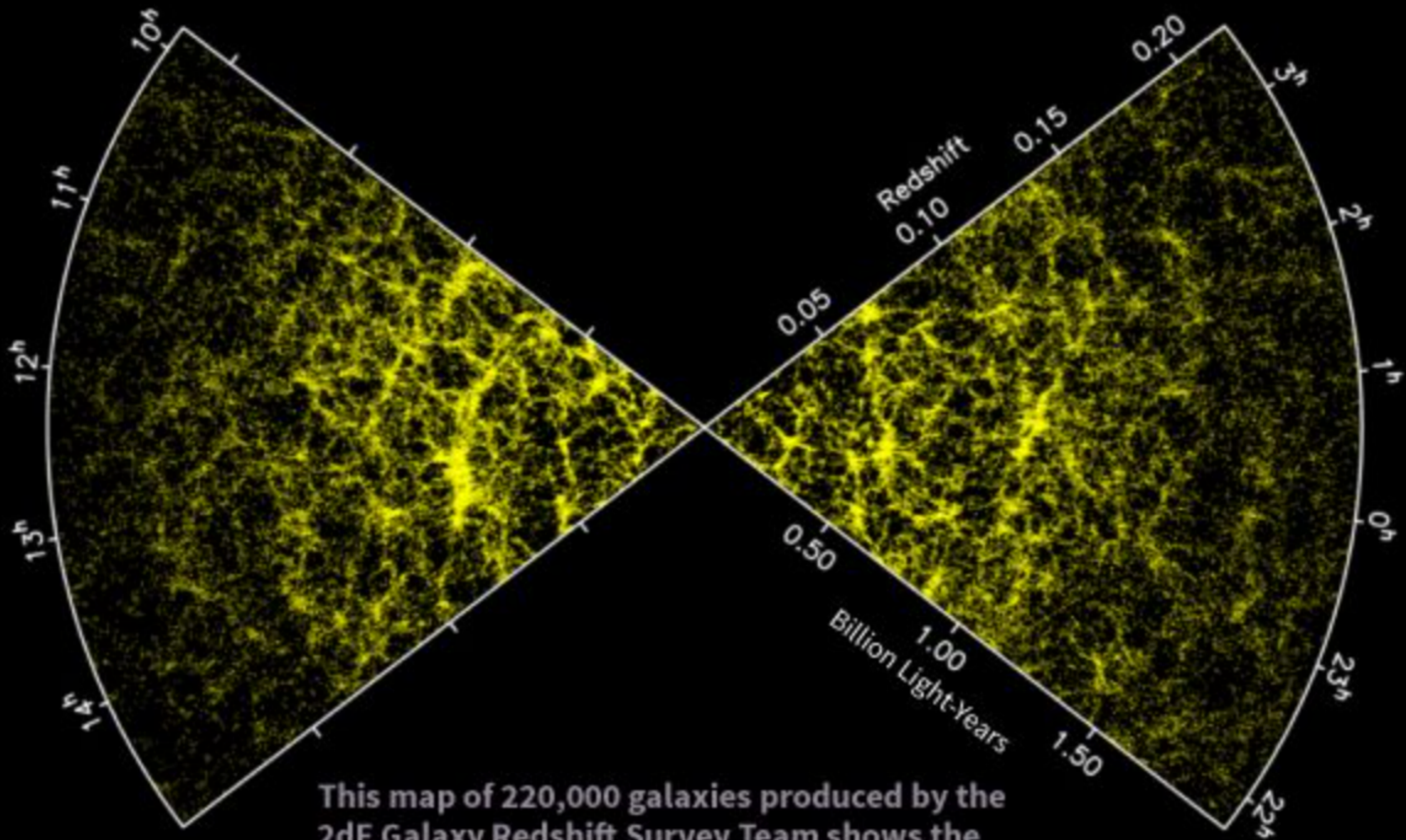
With new tools, astronomers are unraveling the nature of the Milky Way and measuring distances to stars and nebulae with greater accuracy. Still, they ask, how did the Milky Way form in the first place? How and where did the arms form? How many more planets circle nearby stars besides the 102 already discovered? And the deeper question of all: Do any of them harbor life?

銀河団



LARGE-SCALE STRUCTURE: GALAXIES ACCORDING TO REDSHIFT

The deeper astronomers look into the universe, the more they see that the expansion of the universe has stretched light, shifting it toward the red end of the spectrum. By measuring the amount of redshift, astronomers can determine how far away a given galaxy is.



This map of 220,000 galaxies produced by the 2dF Galaxy Redshift Survey Team shows the filamentary structure of the universe, seen when it is considered on a large scale

一般相対性理論

特殊相対性理論

ニュートン力学

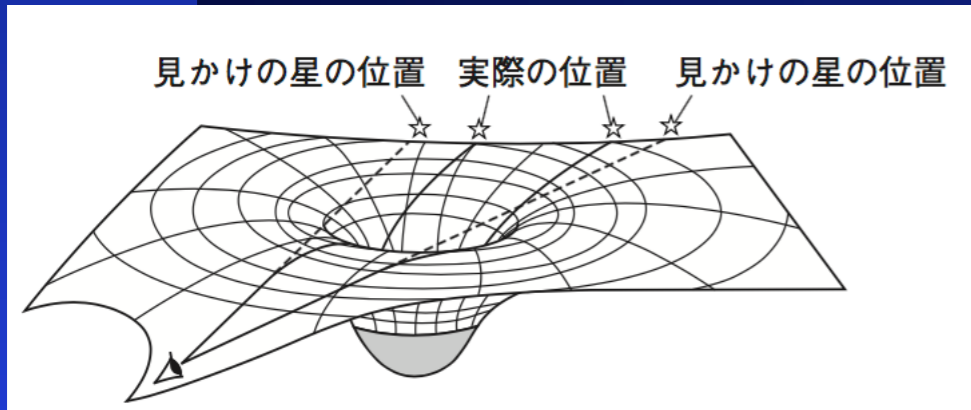
$$F = ma$$

一般相対性理論の予言 【光の曲がり】

重力レンズ



Galaxy Cluster Abell 2218 HST • WFPC2
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



一般相対性理論

特殊相対性理論

ニュートン力学

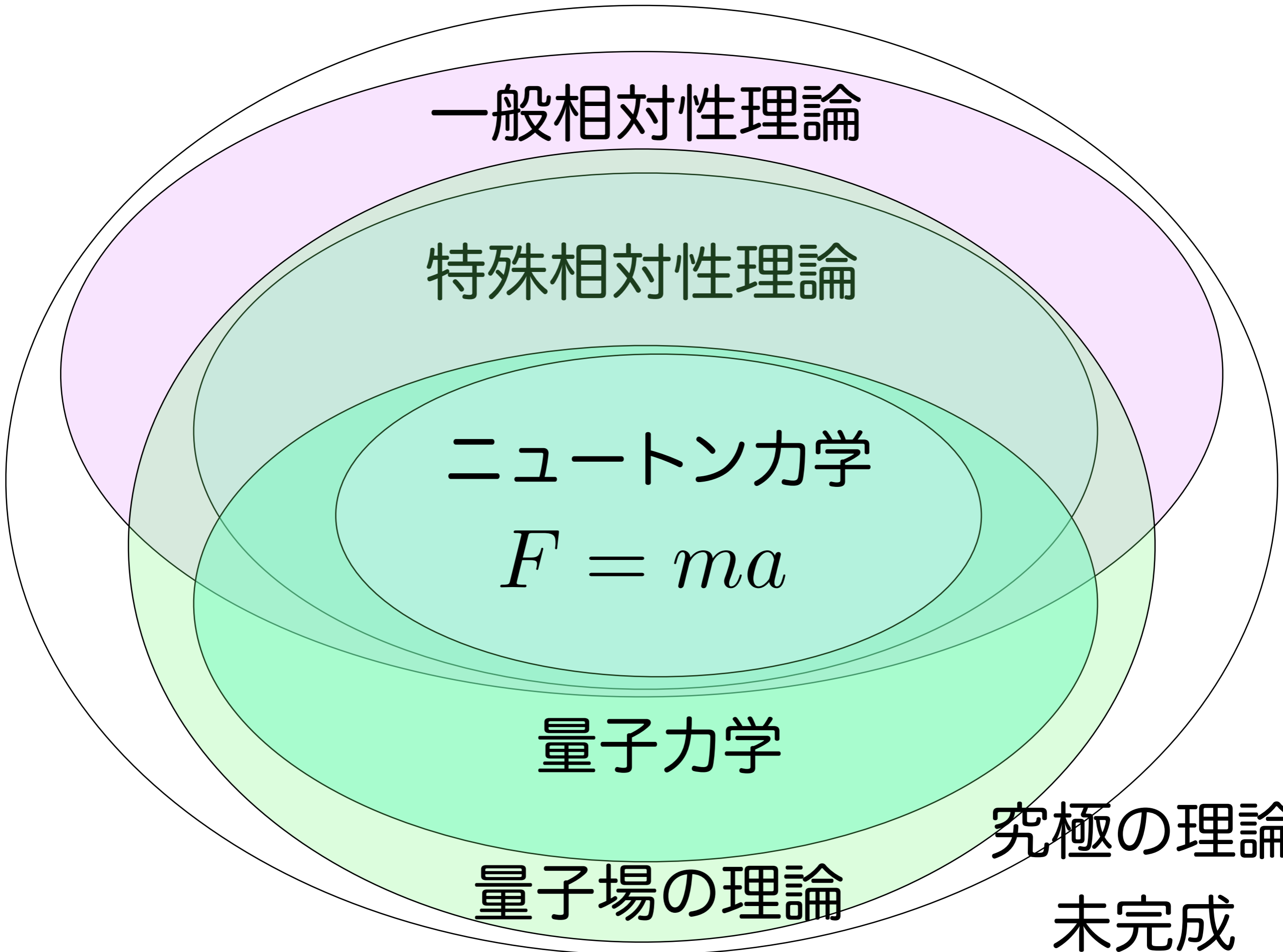
$$F = ma$$

量子力学

量子場の理論

究極の理論

未完成



2重スリット実験

Aを通ったことが確実ならば，干渉縞は生じない。1つの山になる。

AとBのどちらを通過したか不明ならば干渉縞は生じる。

A/Bどちらを通過したのかは確率でしかわからない！

確率解釈 (コペンハーゲン解釈)

物理現象は決定論的ではないのか？

(アインシュタイン)

猫は生きているのか死んでいるのか？

(シュレーディンガー)

波と粒子を両立させると，物理量の最小値が決まらない！

不確定性原理

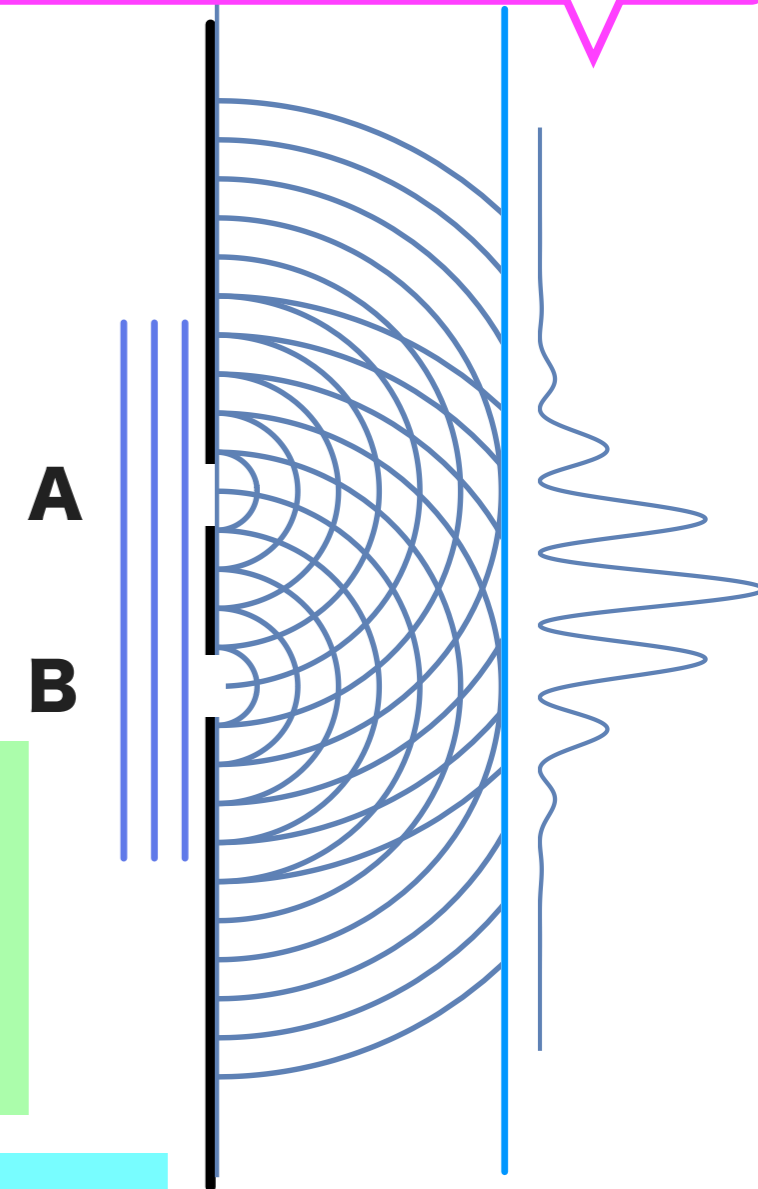
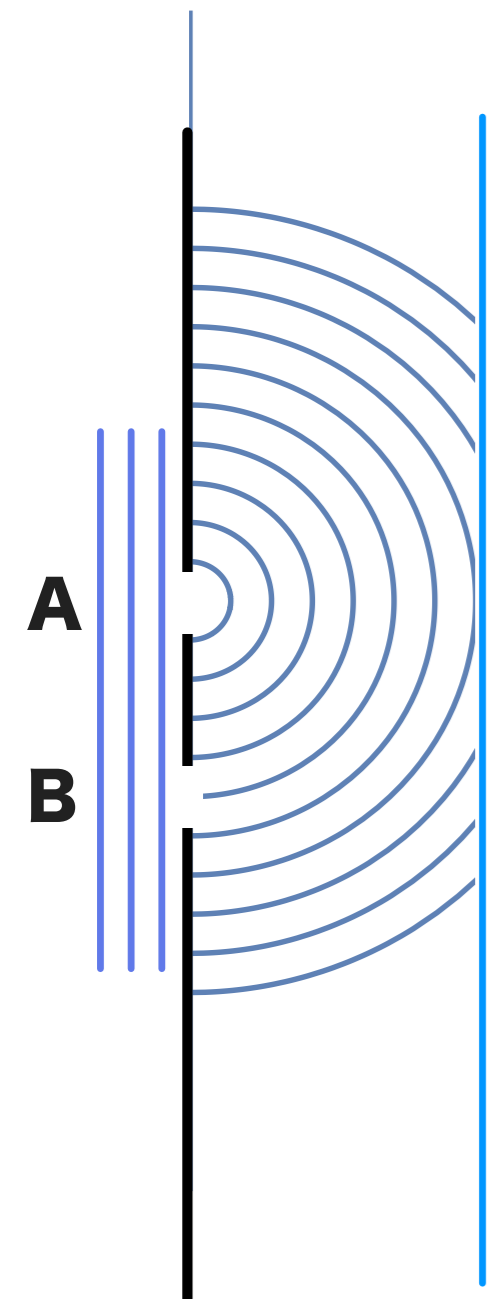
EPRパラドクス (アインシュタイン)

「検知器」を置いたら干渉縞は生じない！

人間が観測する行為が自然界を乱す

観測問題，多世界解釈 (パラレルワールド)

物理現象は観測者によって変わるのか？



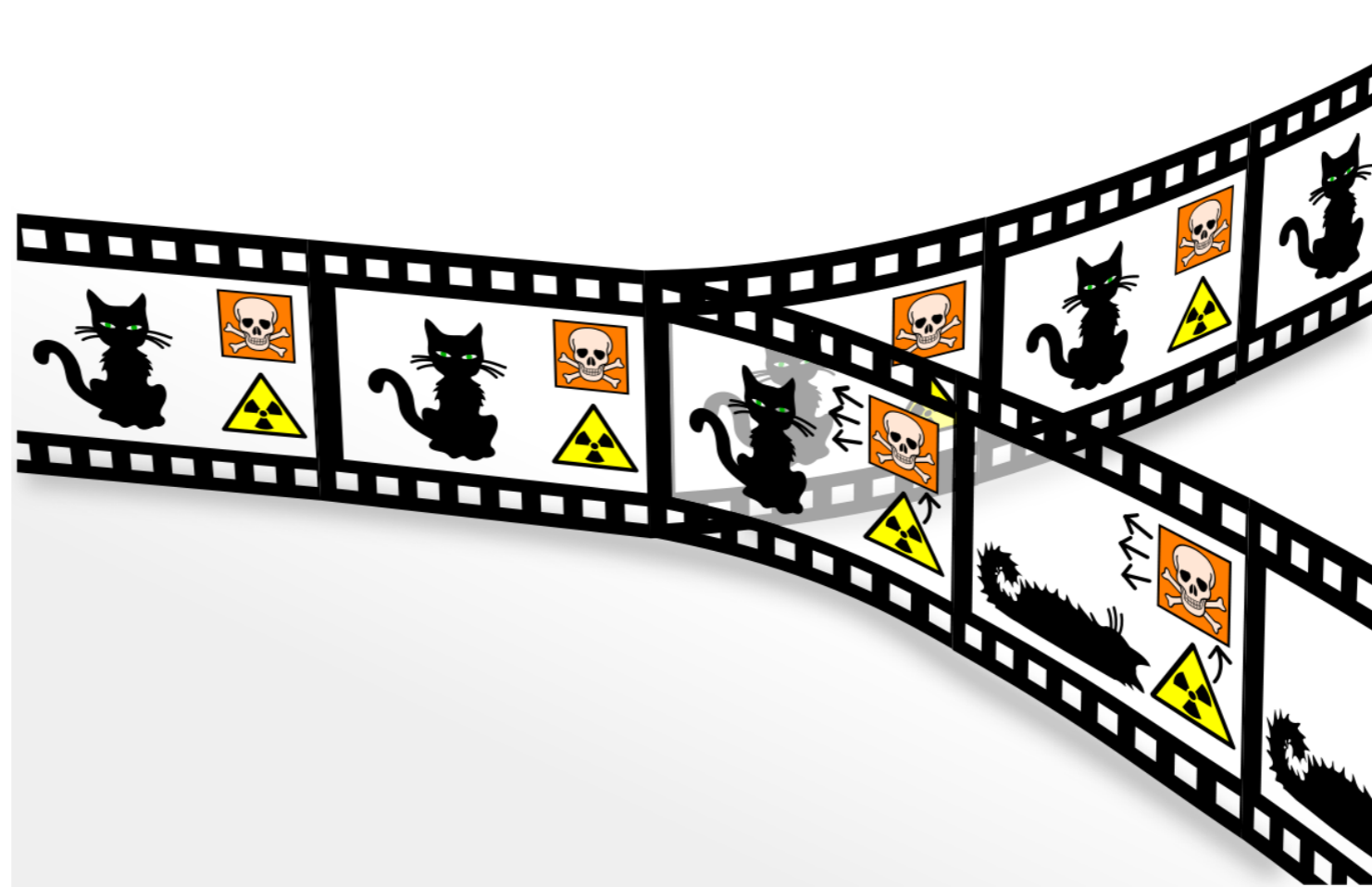
観測問題の解釈の1つ：多世界解釈

Many-worlds interpretation



Hugh Everett
(1930-82)

すべてが決定論的であると考えれば、観測を行うたびに、世界が分岐していくようなものだ。



“Parallel world”

宇宙原理 (cosmological principle)

宇宙を考える上での大前提

宇宙原理 (大意)

私たちは宇宙の中で特別な位置にいるわけではない。(人間が宇宙の中心にいるわけではない.)

宇宙原理 (物理用語バージョン)

宇宙は巨視的なスケールでは空間的に一様・等方である, すなわち宇宙空間のすべての点は本質的に同等である.

(宇宙は空間的にどこどこがなく, どちらを向いても同じである.)

アインシュタイン方程式の解

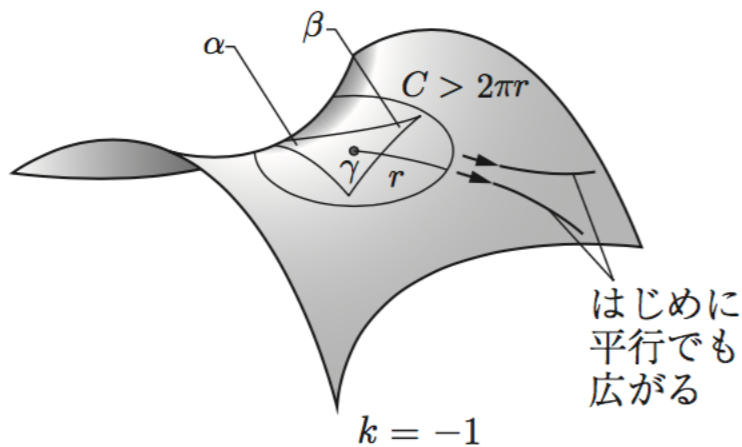
【フリードマン解, FRW解, LFRW解】

Friedmann, Robertson, Walker, Lemaitre (1920s)

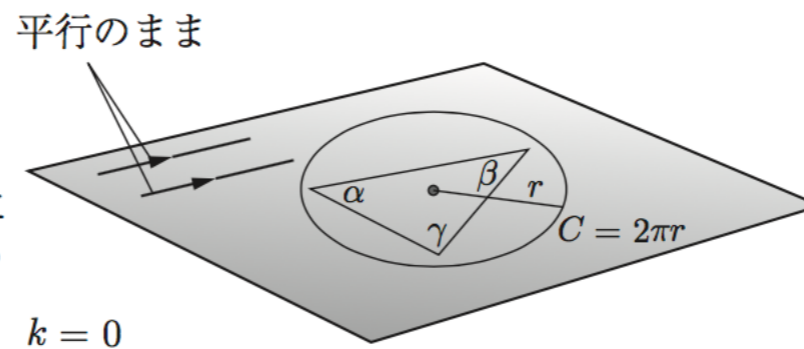
完全流体, 一様等方時空 (球対称) でのEinstein方程式の厳密解

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

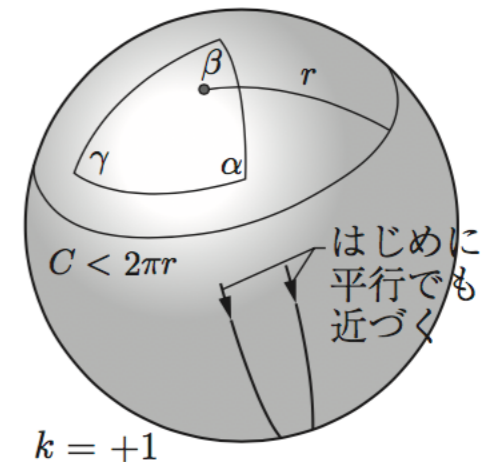
(a) 開いた宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma < 2\pi$



(b) 平坦な宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma = 2\pi$



(c) 閉じた宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma > 2\pi$

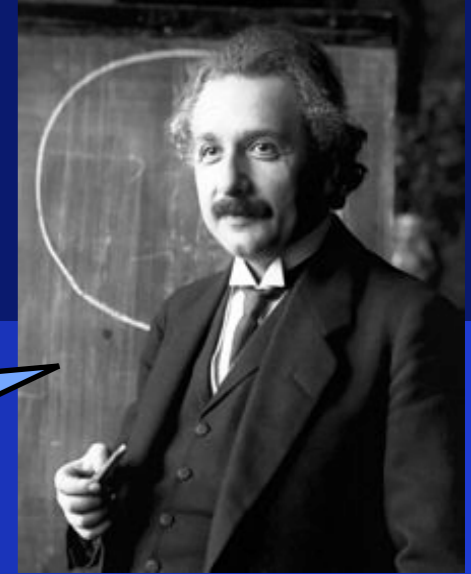


開いた宇宙

平らな宇宙

閉じた宇宙

アインシュタインは 膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は未来永劫不変であるべきだ」

⇒定常的な宇宙モデルをつくるために，方程式を修正
(宇宙項, cosmological constant)

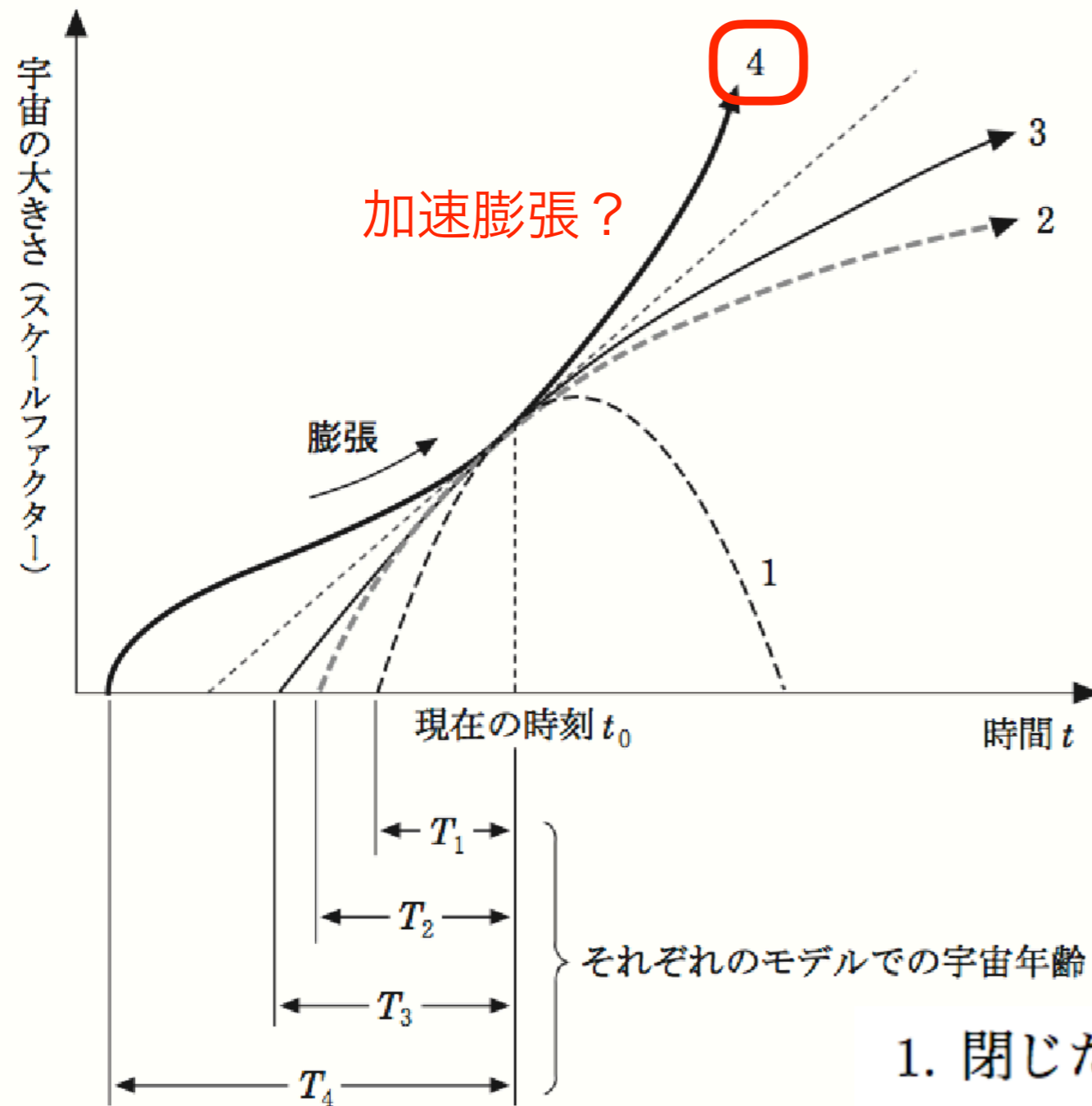
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

⇒重力（引力）作用に反対する斥力を導入

ただし，不安定なつり合いの解でしかない。

アインシュタインらしくない。

膨張宇宙モデル



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = +1$.
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = 0$.
3. 開いた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = -1$.
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり. $\Lambda > 0, k = 0$.

アインシュタインは 膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は膨張するのが自然です」
(Lemaitre)

「あなたの計算は正しいが（こんな解を信じるなんて）あなたの物理的センスは言語道断だ。」
(Your calculation is correct, but your physical insight is abominable.)

宇宙が膨張していることは どうしてわかったのか？

1929年 宇宙膨張の発見

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)



ハッブルの宇宙膨張の法則 (1929年)

$$v = H_0 d \quad (5.9)$$

銀河の後退速度 = ハッブル定数 H_0 × 銀河までの距離

$$H = 530 \text{ km/s/Mpc}$$

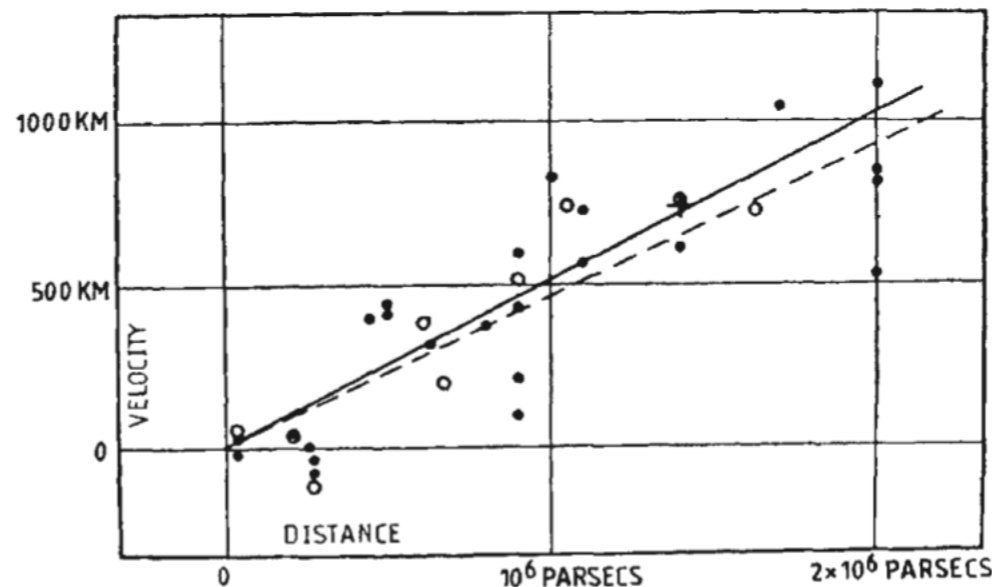
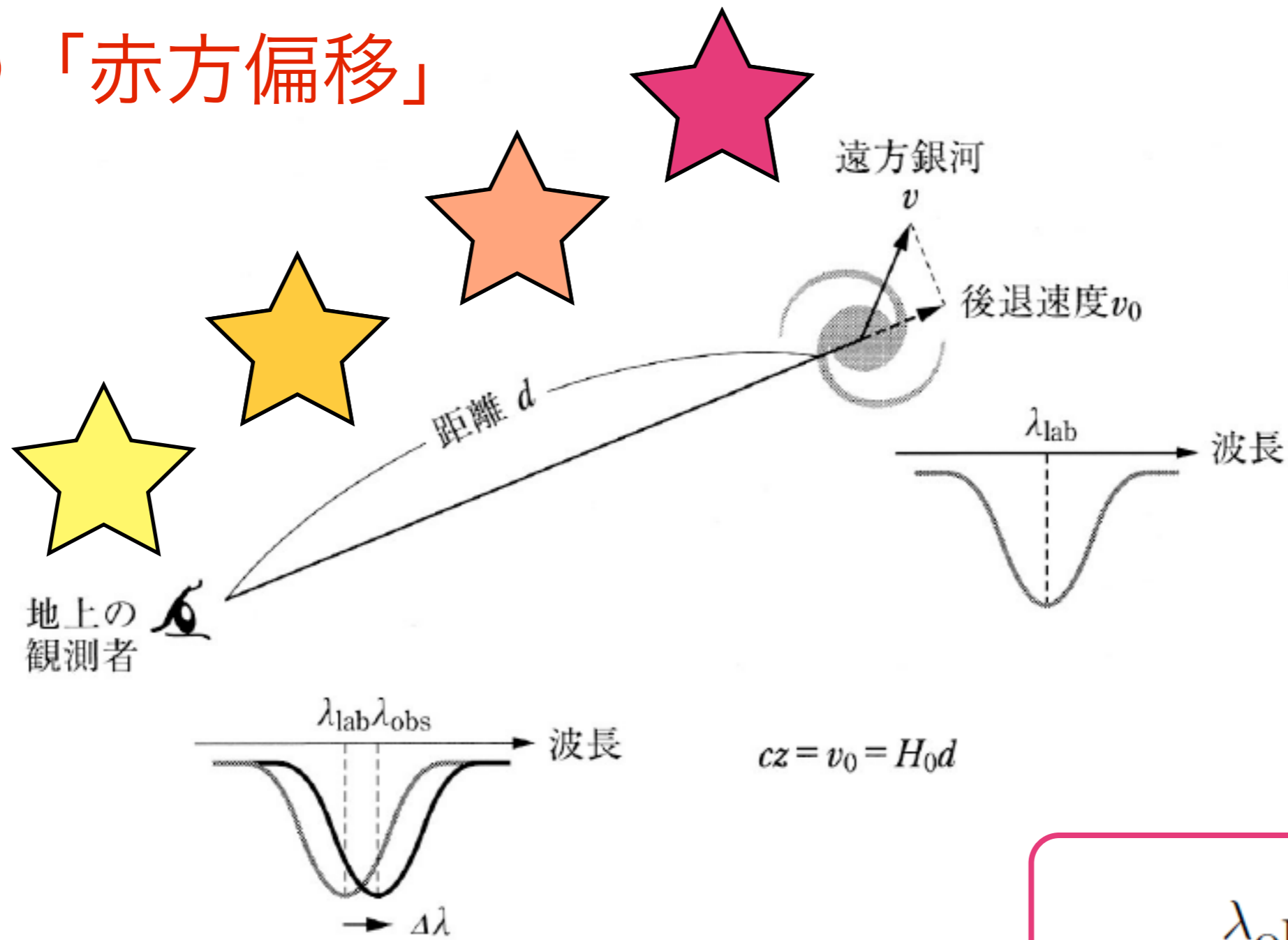


図 5.7 ハッブルが 1929 年に発表した図。横軸は距離，縦軸は銀河の後退速度。このグラフの傾きがほぼ一定になることが，ハッブルの法則である。ハッブルが報告した値は， $H_0 = 530 \text{ km/s/Mpc}$ だった。現在値は $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$ 。

光の「ドップラー効果 (赤方偏移)」から

宇宙が膨張していることは どうしてわかったのか？

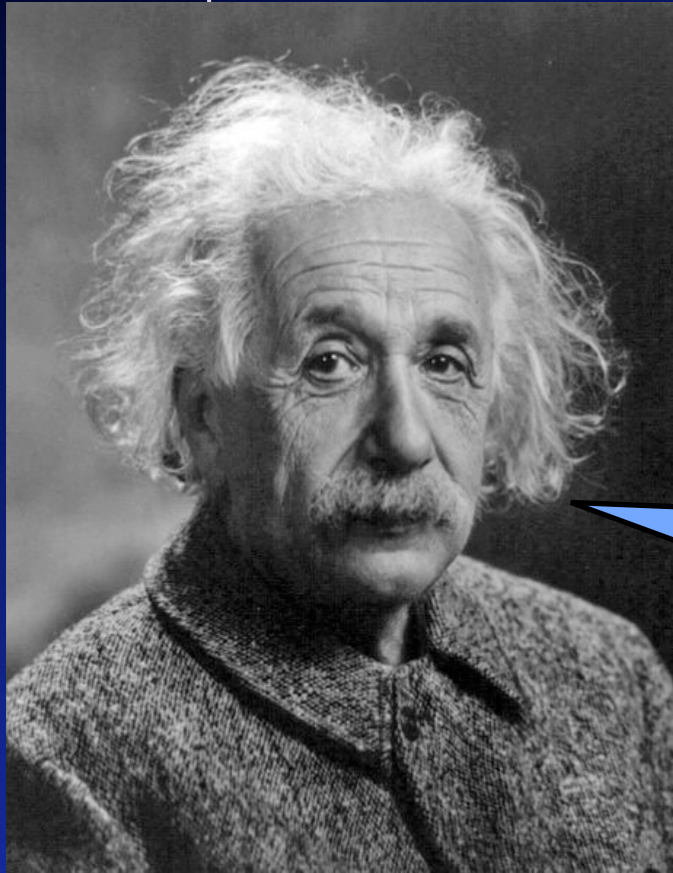
光の「赤方偏移」



赤方偏移パラメータ

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_s}{\lambda_s}$$

アインシュタイン、 膨張宇宙をついに信じる



Einstein, 1947

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

「宇宙項の導入はわが人生最大の過ちであった」
(Introduction of cosmological constant is
the biggest blunder in my life.)

火の玉宇宙論の誕生



ガモフ

1946年、ガモフ、「宇宙が高温高密度の火の玉の状態だったときに、短時間で元素が合成されていった」

1948年、 $\alpha\beta\gamma$ 、「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で、~~す~~べての元素がつくられる」

宇宙膨張が本当なら、過去は小さな宇宙だったはず。宇宙のはじまりは、すべての物質とエネルギーが集まり、非常に高温で高密度の状態だったことになる。

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas

林忠四郎 (1920-2010)

1948年, $\alpha\beta\gamma$, 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, ~~すべての~~元素がつくられる」

ビッグバン理論 = $\alpha\beta\gamma$ -Hayashi の理論

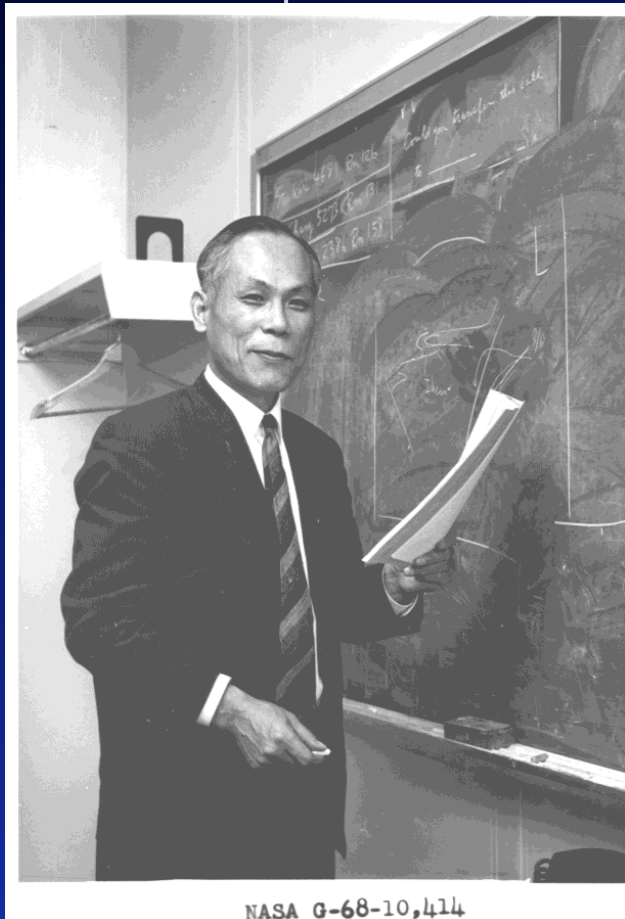
『元素合成ははじめの3分間で終了』

星の進化

恒星が主系列星となる前に, 温度がほぼ一定のまま収縮する時期があることを明らかにした (林フェイズ, 林トラック).
恒星に対する最大半径の制約 (林の限界線).

太陽系形成モデル

恒星・惑星系の全形成過程をモデル化した (京都モデル, 標準モデル)



火の玉宇宙論 vs 定常宇宙論

1948年, $\alpha\beta\gamma$, 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, すべての元素がつくられる」

1950年, 林, 「はじめの3分間で軽元素がつくられる」

しかし,

当時の観測データからは, 宇宙年齢は18億年

vs 地球の岩石からは, 地球年齢は30億年

定常宇宙論

「宇宙に始まりも終わりもない」



Fred Hoyle
(1915–2001)

~~火の玉~~宇宙論 VS 定常宇宙論

ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成がされた

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしていても新たに物質が生成していれば大丈夫



ガモフ

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている

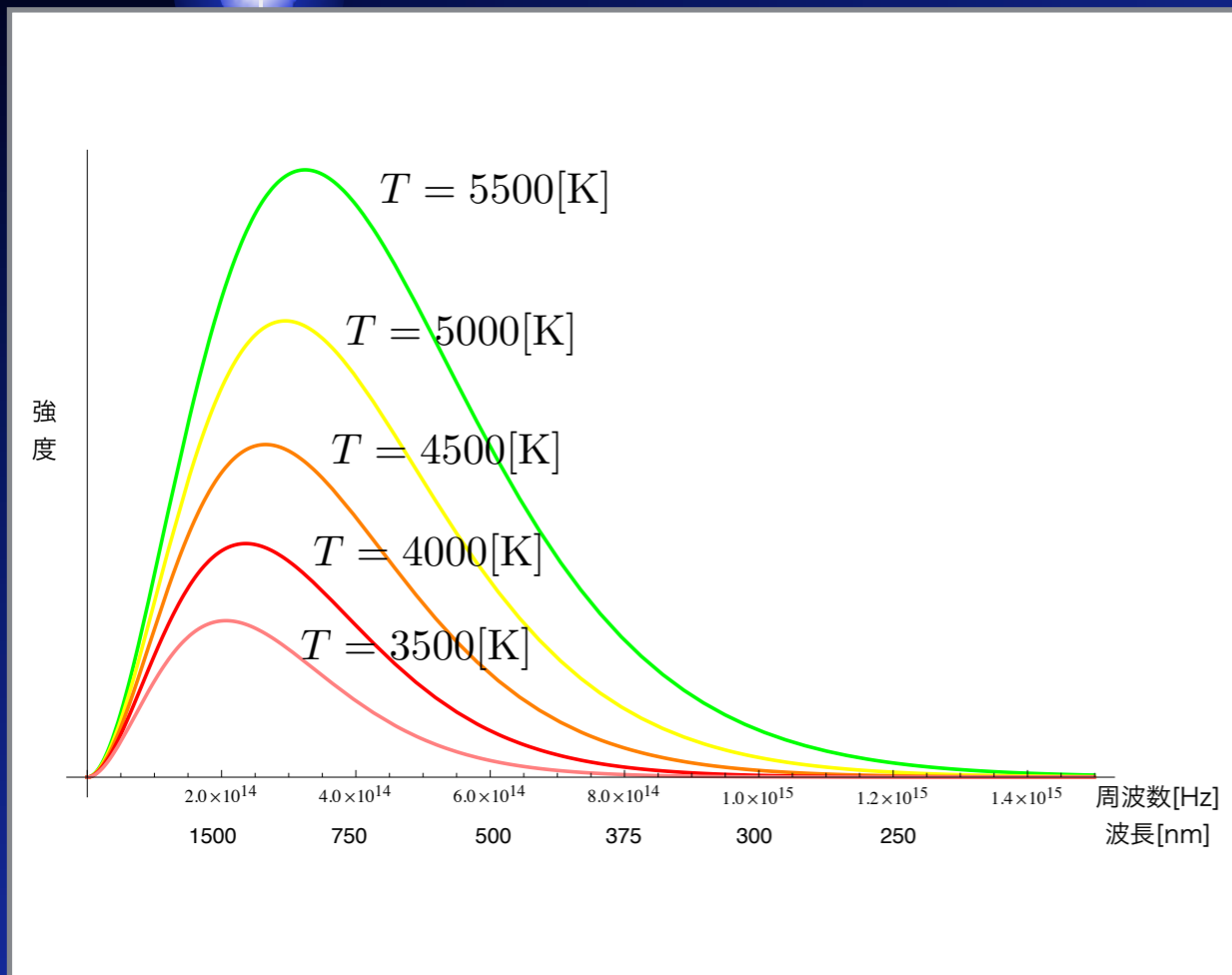
ビッグバン, いい名前だ.
ビッグバン宇宙論, と呼ぶことにしよう



ホイル

宇宙マイクロ波背景輻射

Cosmological Microwave Background Radiation (CMB)



黒体放射（黒体輻射）

= 物体は、温度に応じて
熱を電磁波の形で放射する

過去に宇宙が高温だったら、
その証拠の「放射」があるはず

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K

宇宙膨張で温度下がって

5-7K 位

1964年，宇宙背景輻射の発見

Discovery of CMB, 1964



Arno A. Penzias (1933–)
Robert W. Wilson (1936–)

ベル研究所，電波通信の実験

「どうしても取り除けないノイズがある」

「昼夜によらず，季節によらず，方向によらないノイズがある」



1978年，ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後，30万年ほど経つと，光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K

宇宙膨張で温度下がって

~~5=7K~~ 位
3.5K

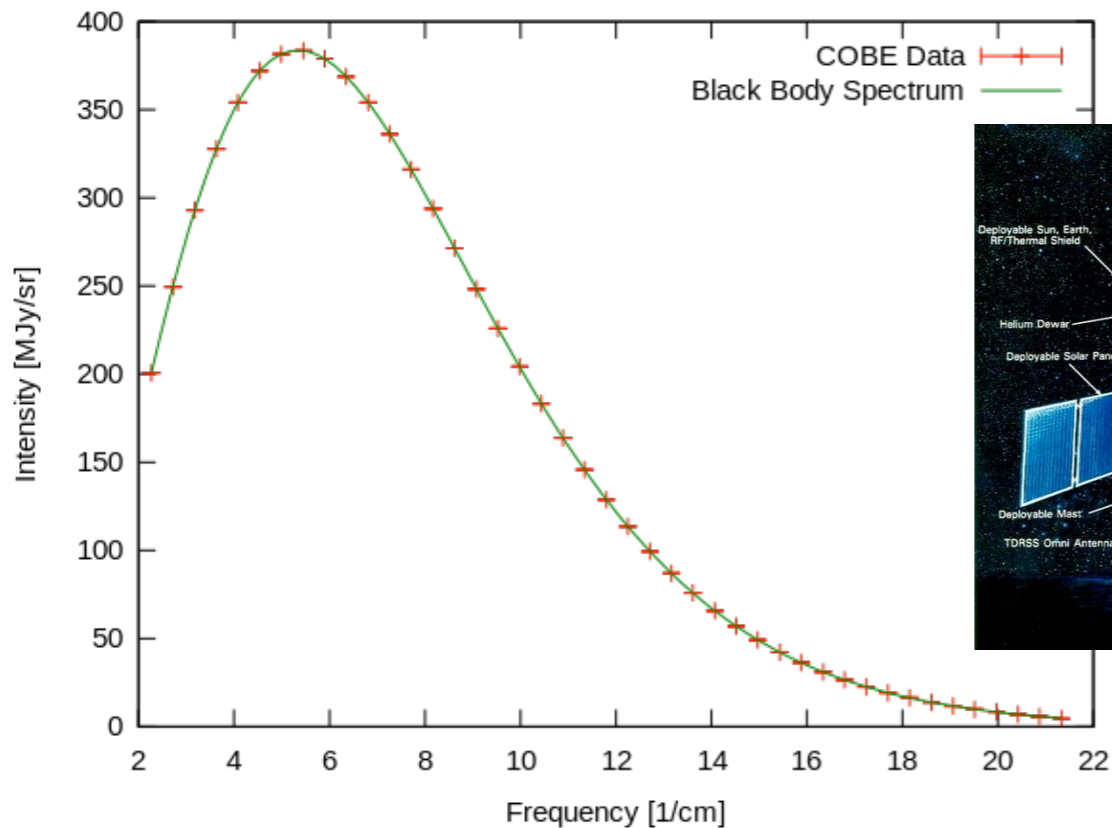
COBE衛星によるCMBの測定

Cosmic Background Explorer, 1992

John C. Mather (1946–)

George F. Smoot III (1945–)

Cosmic Microwave Background Spectrum from COBE



2006年, ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度**が放射されて残っているはず.

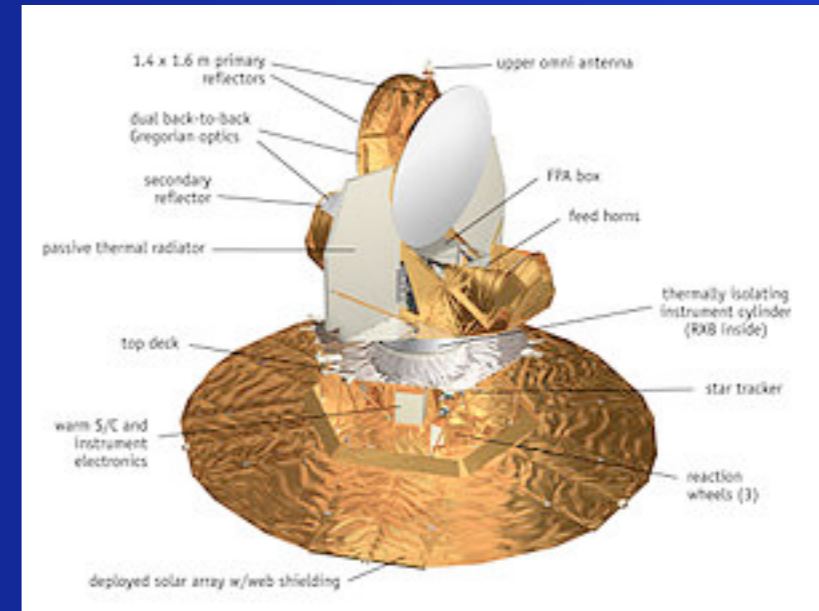
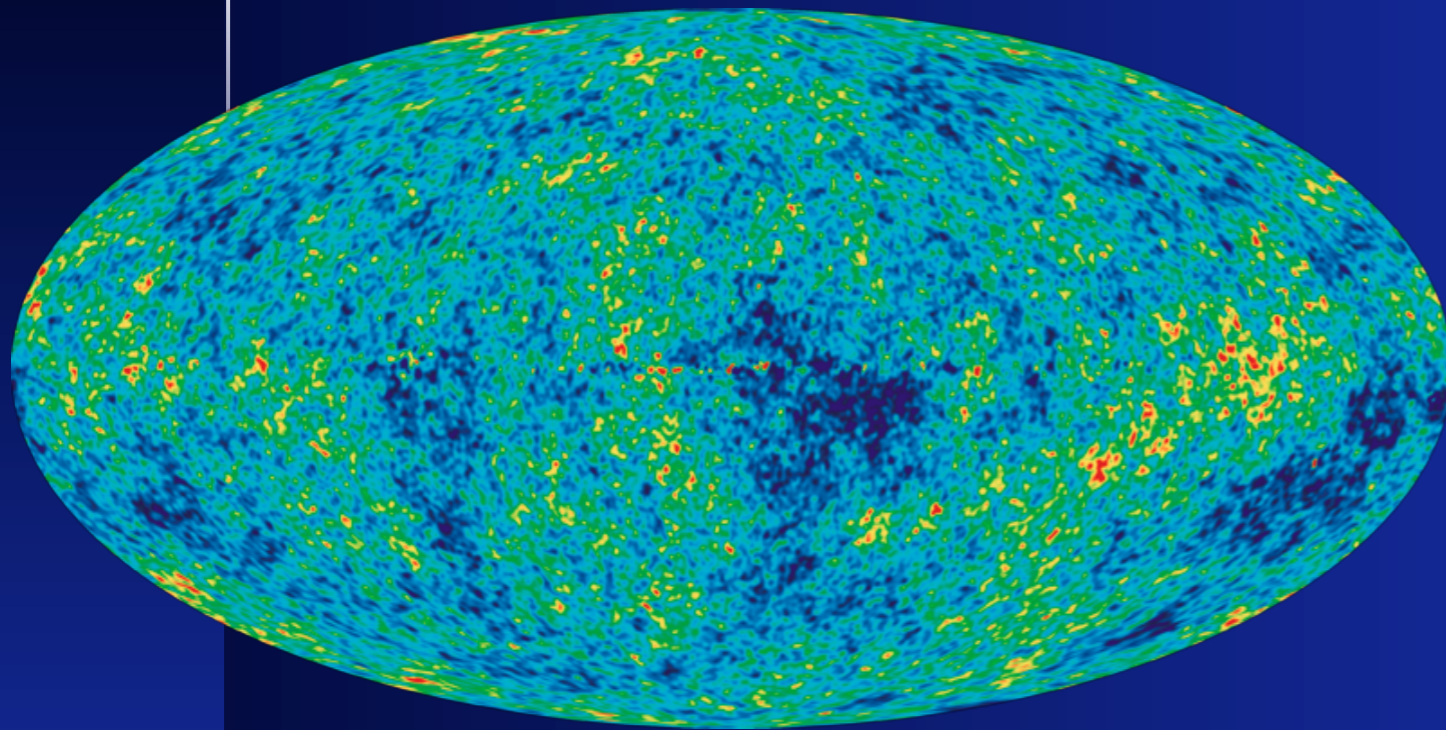
約3000 K

宇宙膨張で温度下がって

~~5=7K~~
~~3.5K~~
2.73 K 位

WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



37万9000年

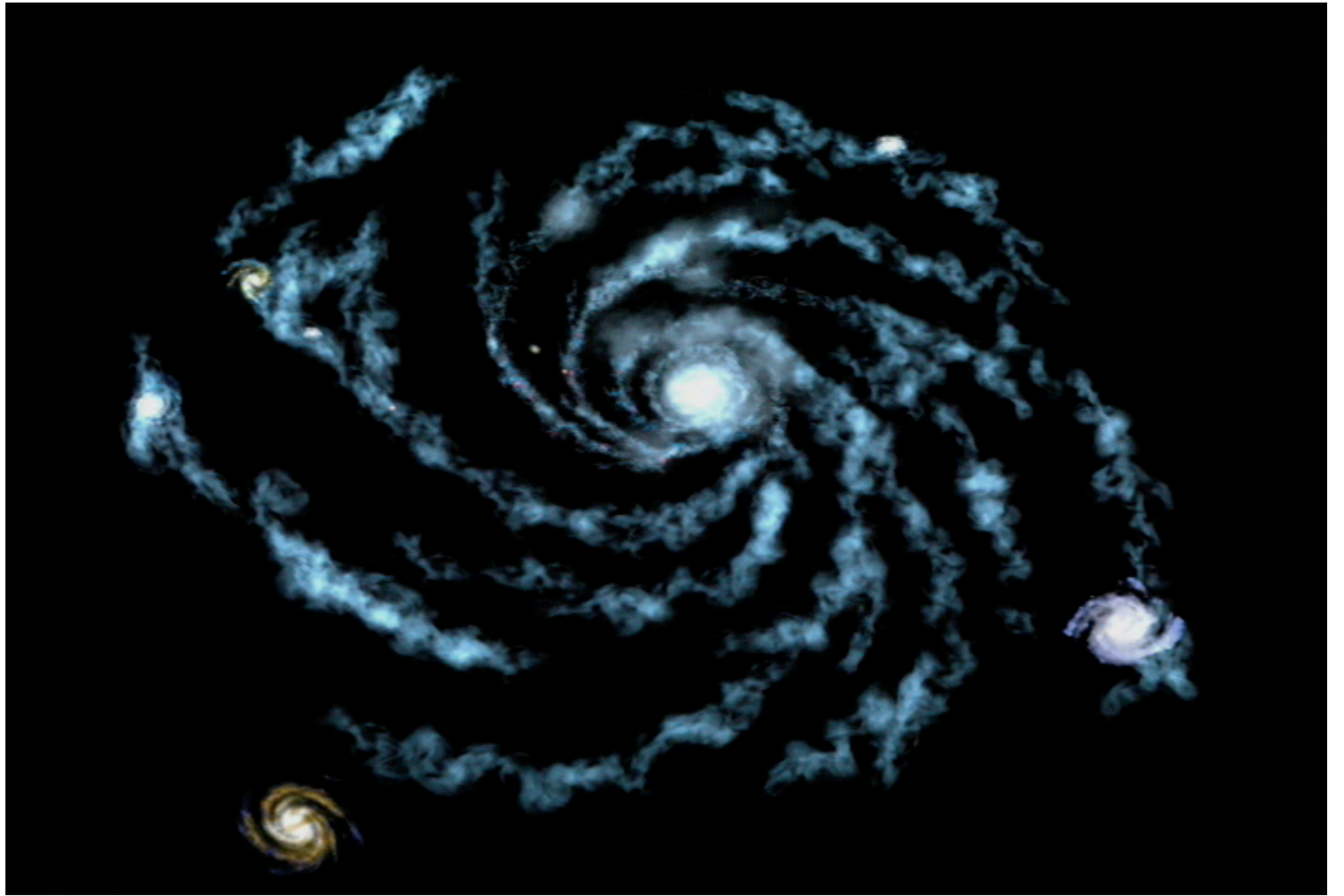
宇宙誕生後、~~30~~万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K

宇宙膨張で温度下がって ~~2.73~~ K 位

2.72548±0.00057 K

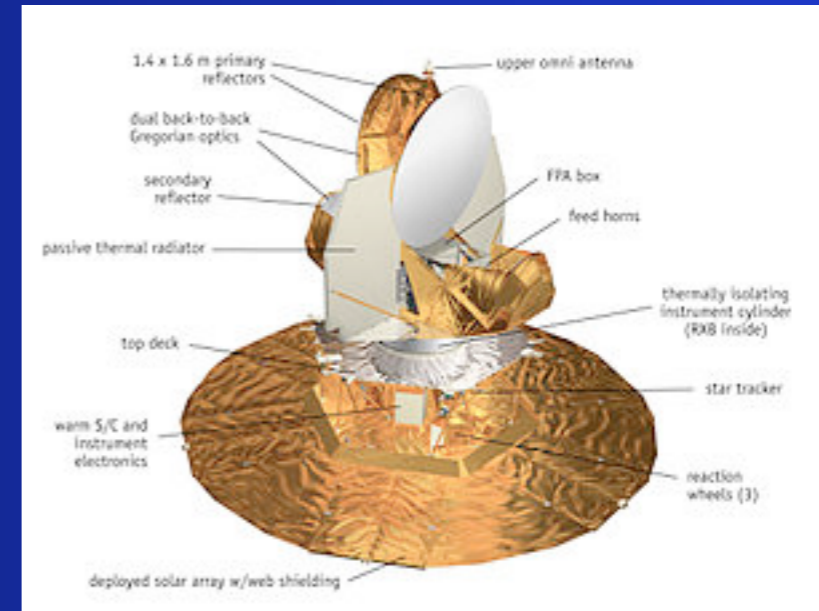
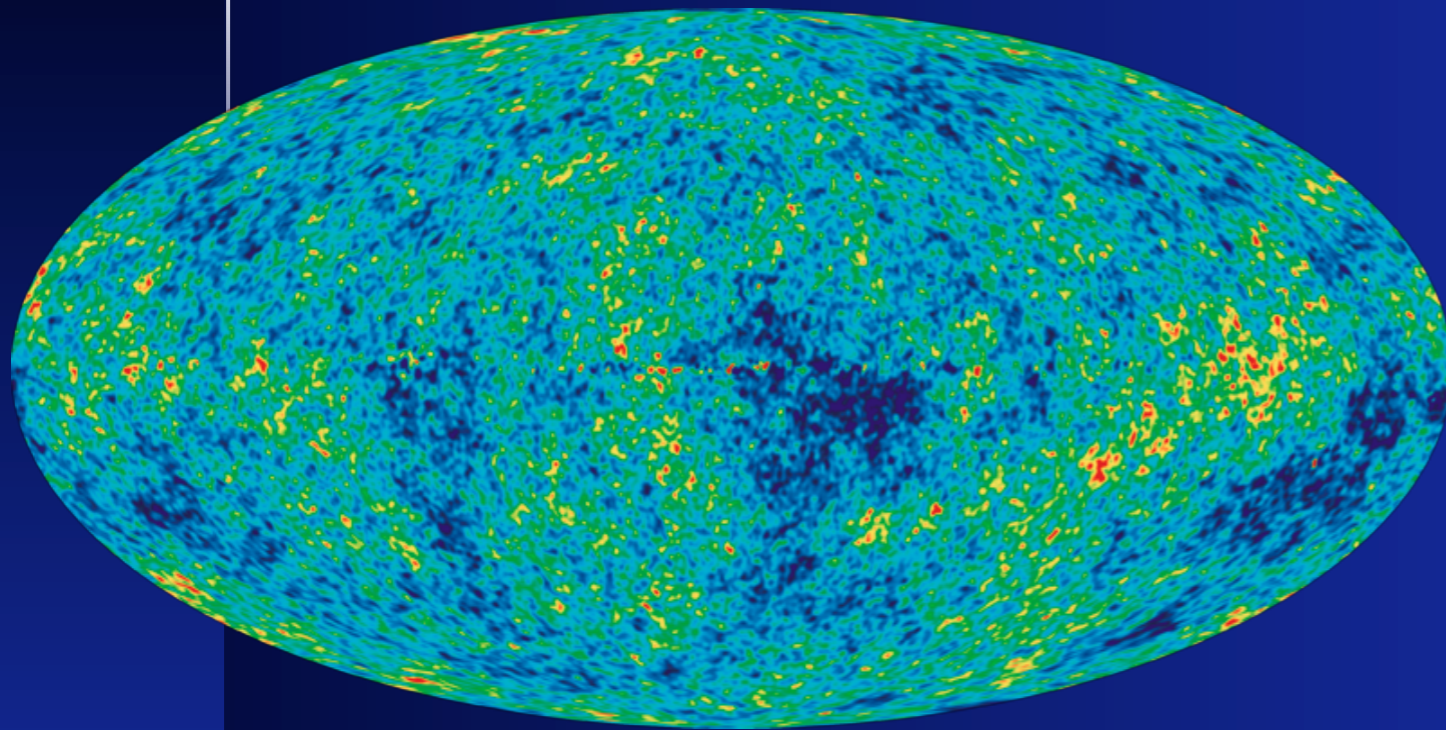
WMAP Measures Microwaves From the Universe



- The mean temperature of photons in the Universe today is 2.725 K
- WMAP is capable of measuring the temperature *contrast* down to better than **one part in millionth**

WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



37万9000年

宇宙誕生後、~~30~~万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

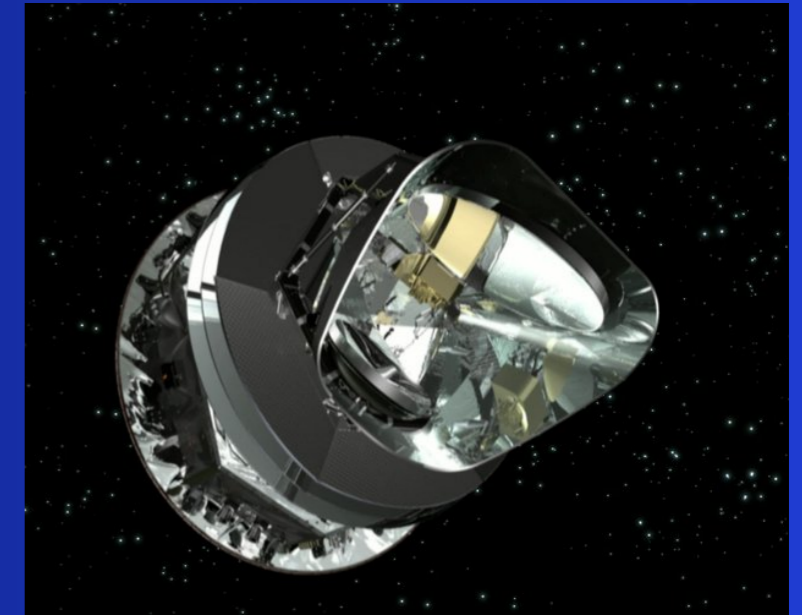
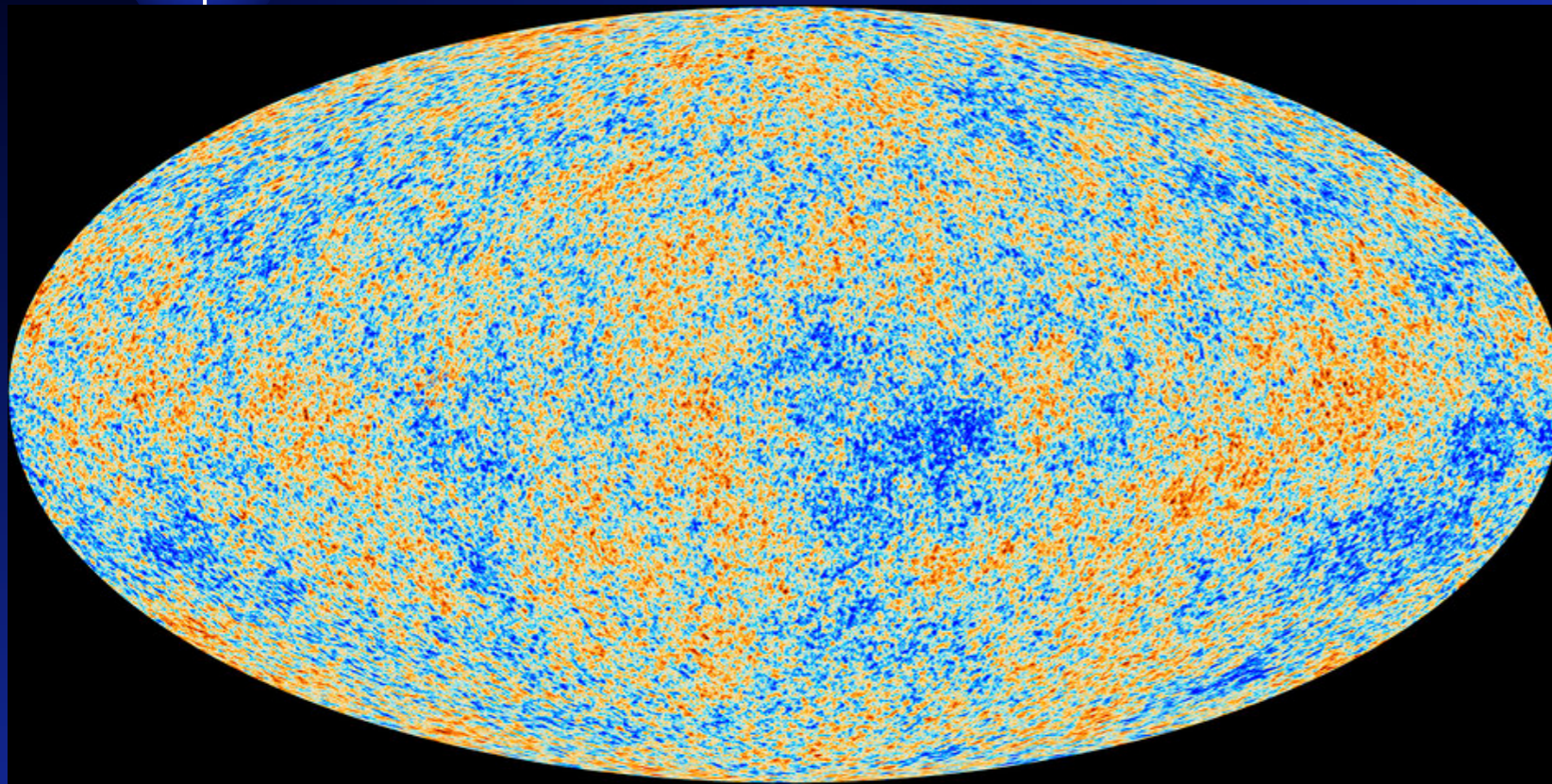
約3000 K

宇宙膨張で温度下がって ~~2.73~~ K 位

2.72548±0.00057 K

Planck衛星によるCMBの測定

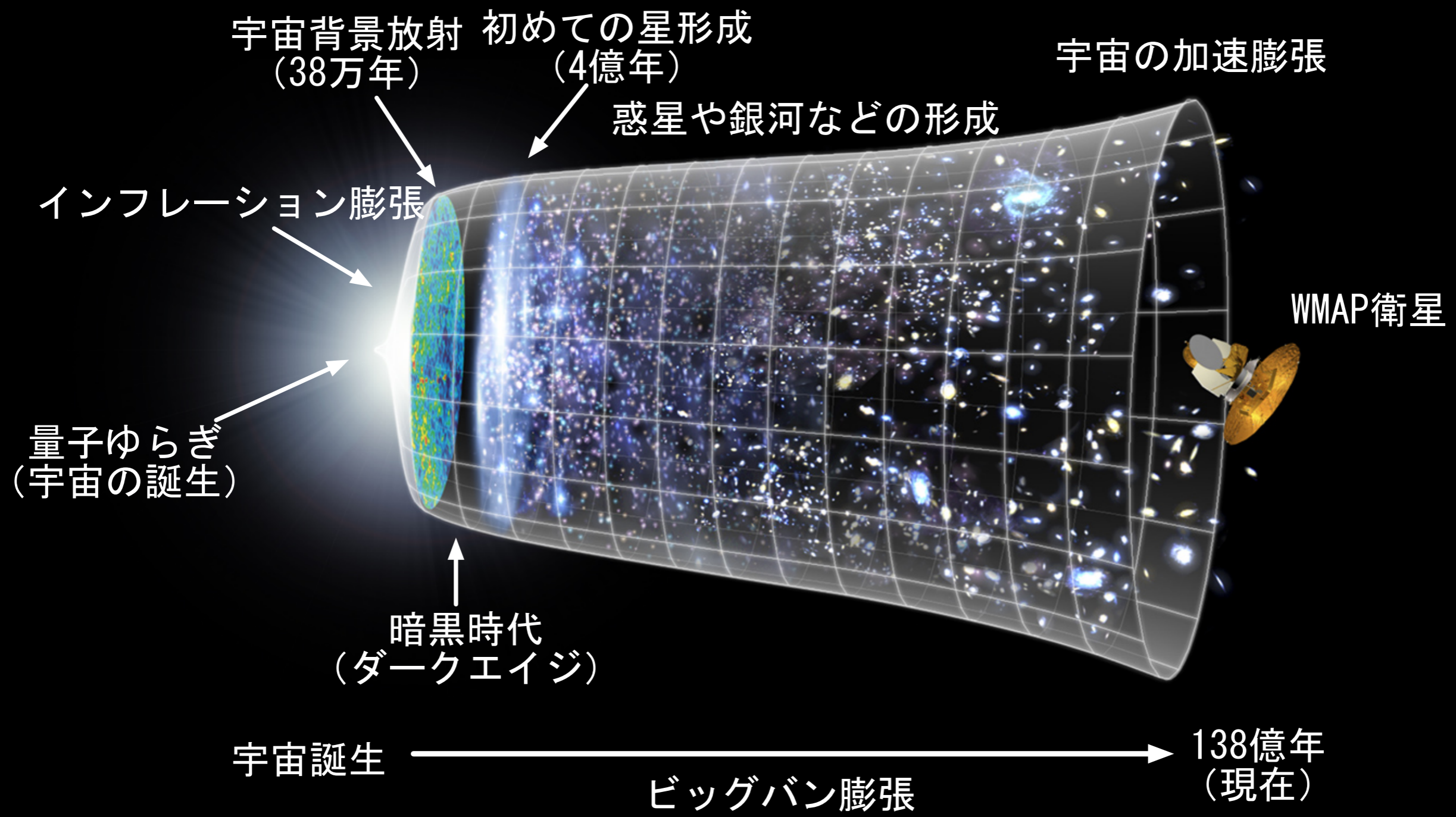
Planck, ESA, 2013



38万年

宇宙誕生後、~~37万9000~~年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K 宇宙膨張で温度下がって ~~2.72548±0.00057~~ K
2.72548±0.00057 K



ビッグバン宇宙モデルの問題点

- (A) 地平線問題. なぜ, CMB は全天で一様に近い温度分布を示すのか.
- (B) 平坦性問題. なぜ, 現在の宇宙は平坦 (曲率が 0) に見えるのか.
- (C) 構造形成の種問題. 星や銀河など物質ができるためのゆらぎはどうやって生まれたのか.
- (D) モノポール問題. 宇宙初期の相転移で生じる位相欠陥のうち, とくにモノポールはどのように消滅していくのか.
- (E) バリオン数生成の問題. なぜ, 宇宙には物質だけ存在して反物質が存在しないのか.
- (F) 宇宙の初期特異点問題. 時刻 0 のとき, 宇宙は密度が無限大の特異点になる. 物理的にどうやって説明するのか.
- (G) 時空の次元問題. 私たちの住む時空は, なぜ, 4 次元であって 3 次元や 5 次元でないのか.

インフレーション宇宙モデル

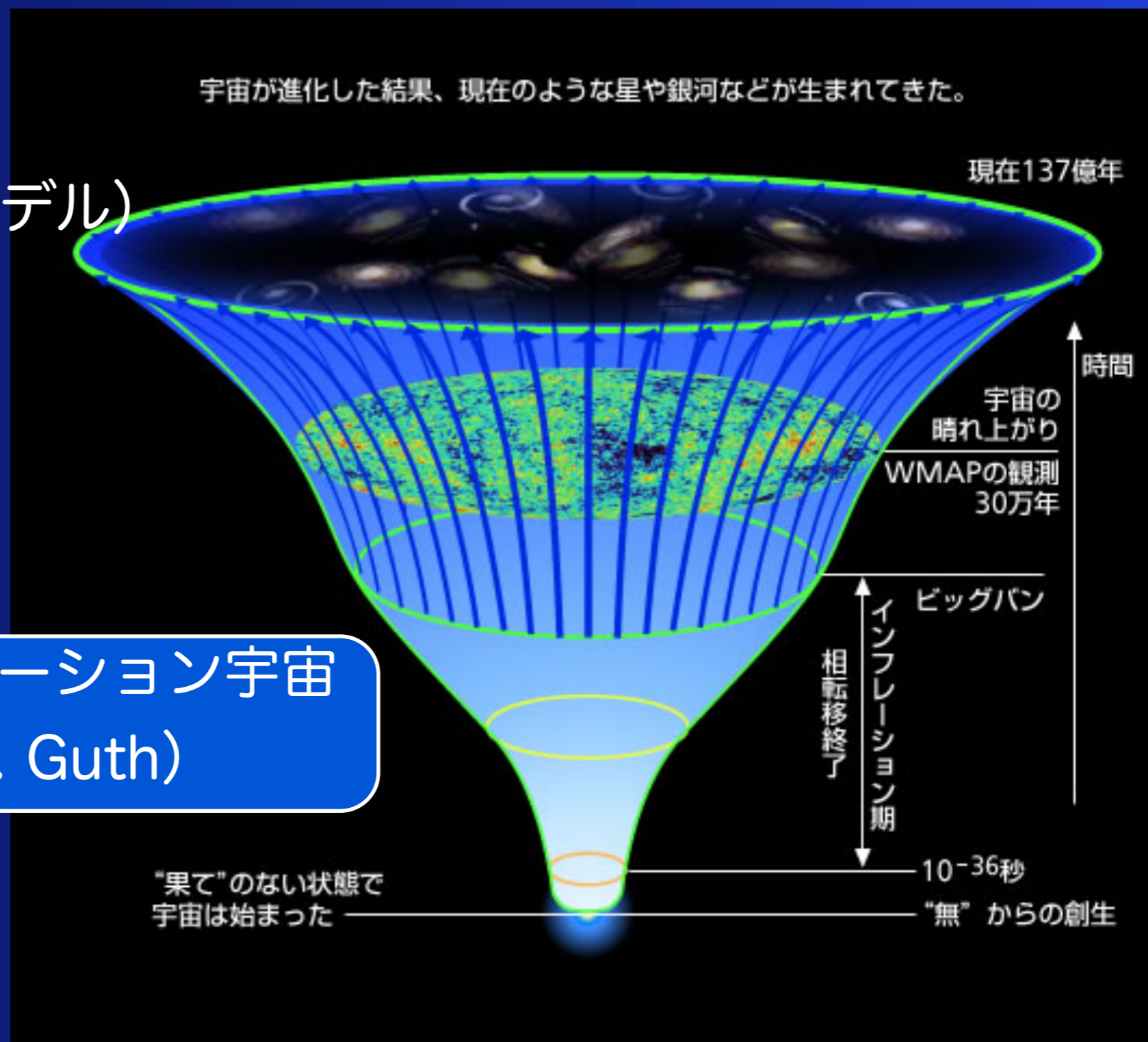
1981年

宇宙の初期に急激な膨張
(インフレーション宇宙モデル)



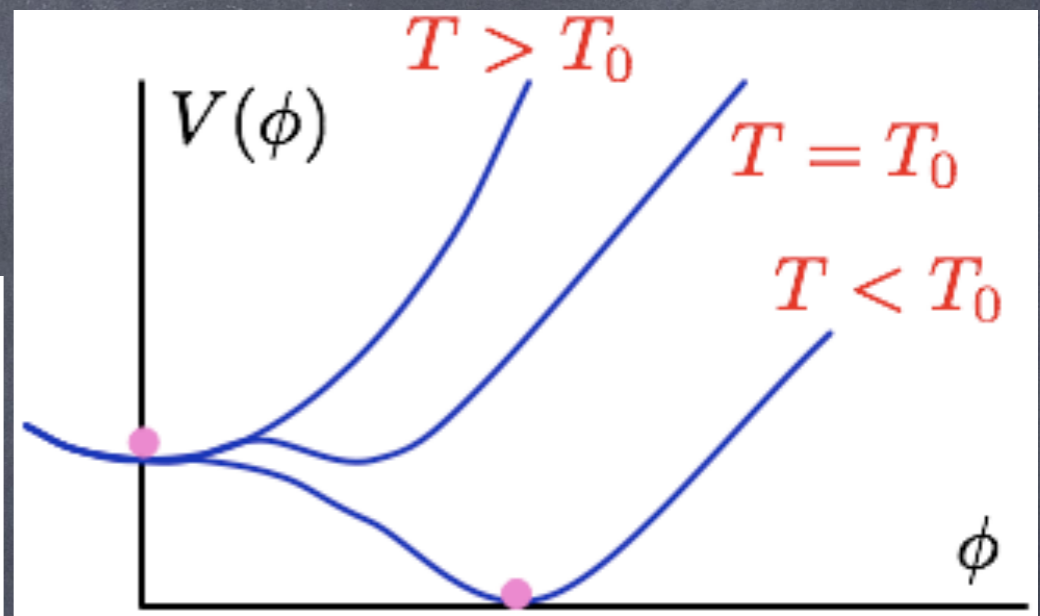
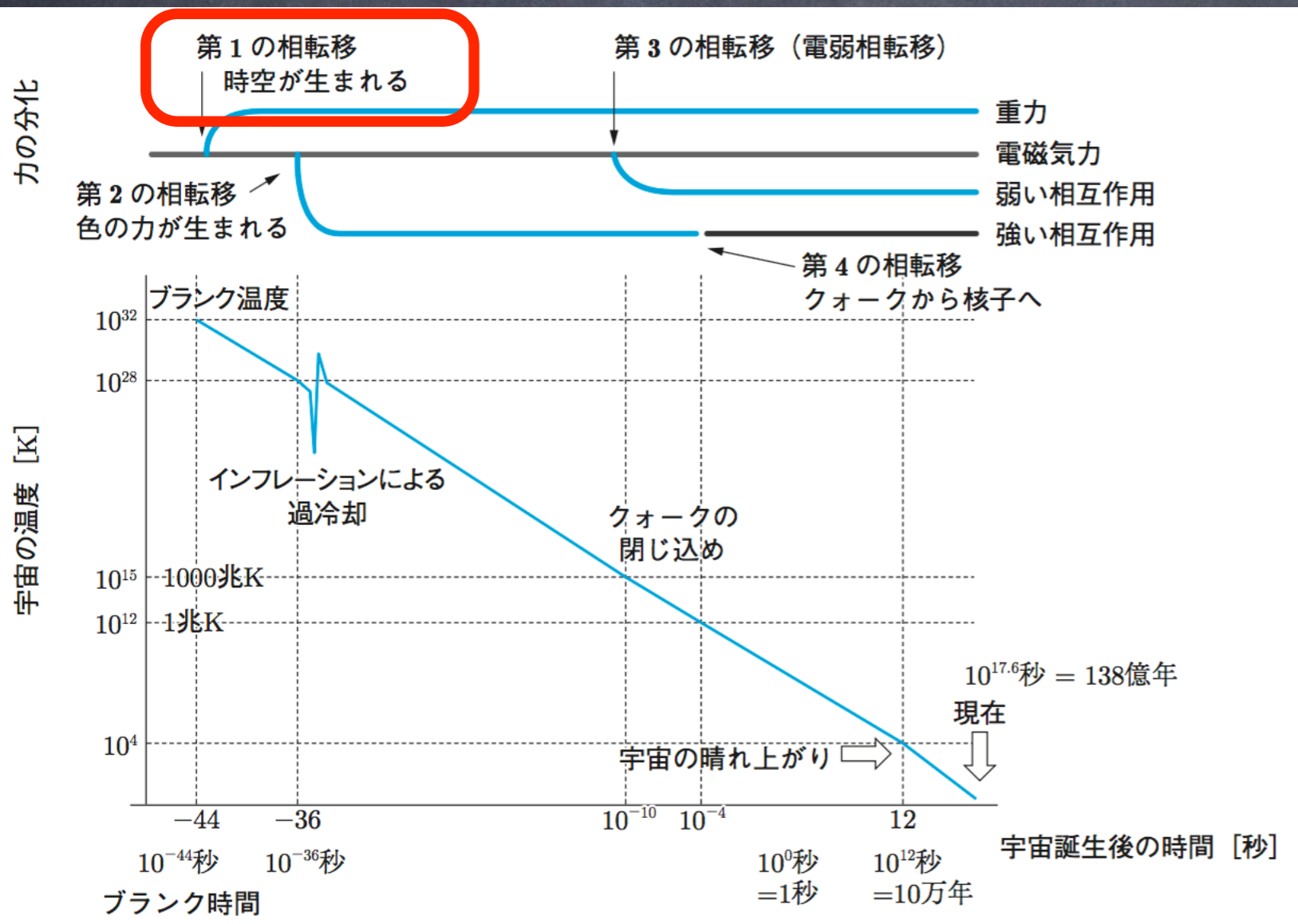
インフレーション宇宙
(A. Guth)

初期の宇宙は
指数関数的膨張
(佐藤勝彦)



宇宙初期の相転移現象

物質の状態が変化すること
例) 温度が下がると, 水→氷



水の状態

氷の状態

日本人のノーベル物理学賞 受賞者 (2008)

Nobel Laureates in Physics: Japanese Laureates



南部陽一郎 (米国籍) (2008)

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



小林誠



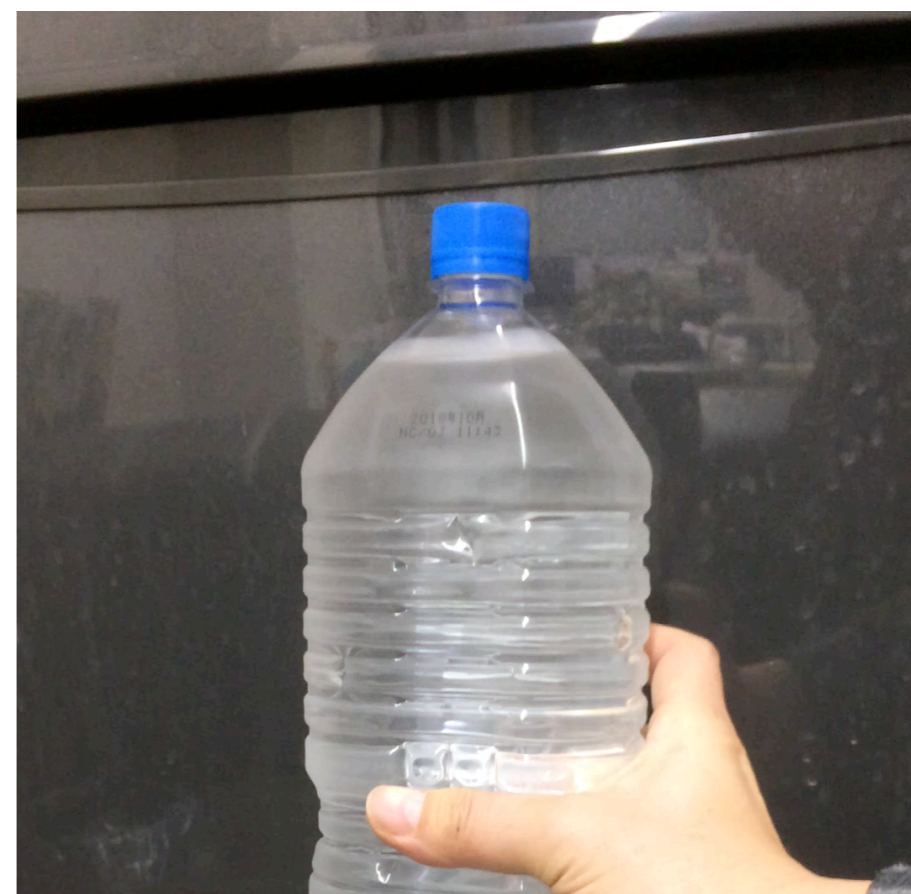
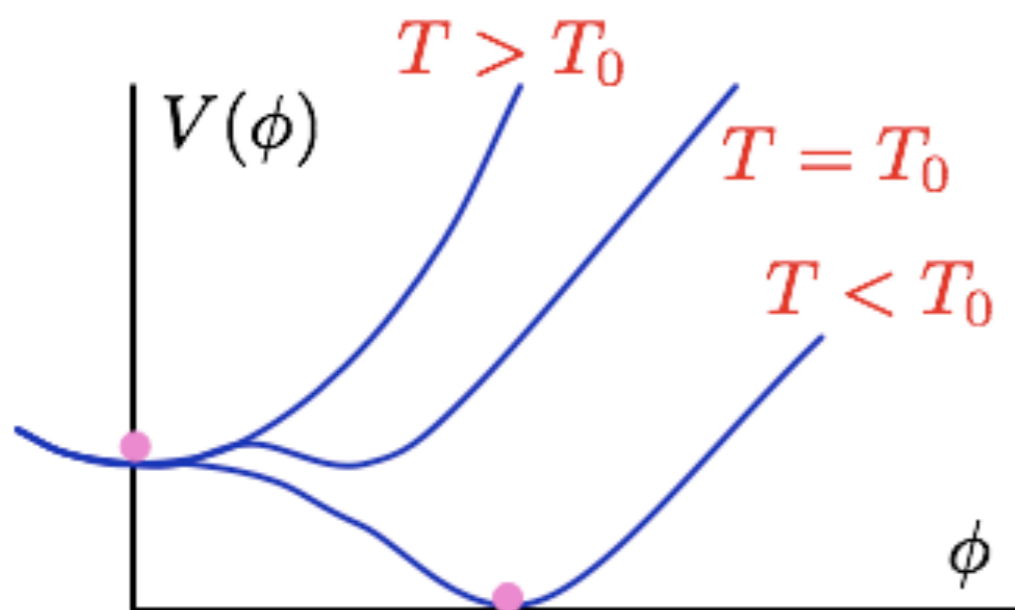
益川敏英 (2008)

クォークの世代数を予言する対称性の破れの起源の発見

one half awarded to Yoichiro Nambu "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics", the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature".

冷蔵庫にいていたペットボトルの水を出すと、一瞬で凍った。

= 過冷却現象



Topic 過冷却と樹氷

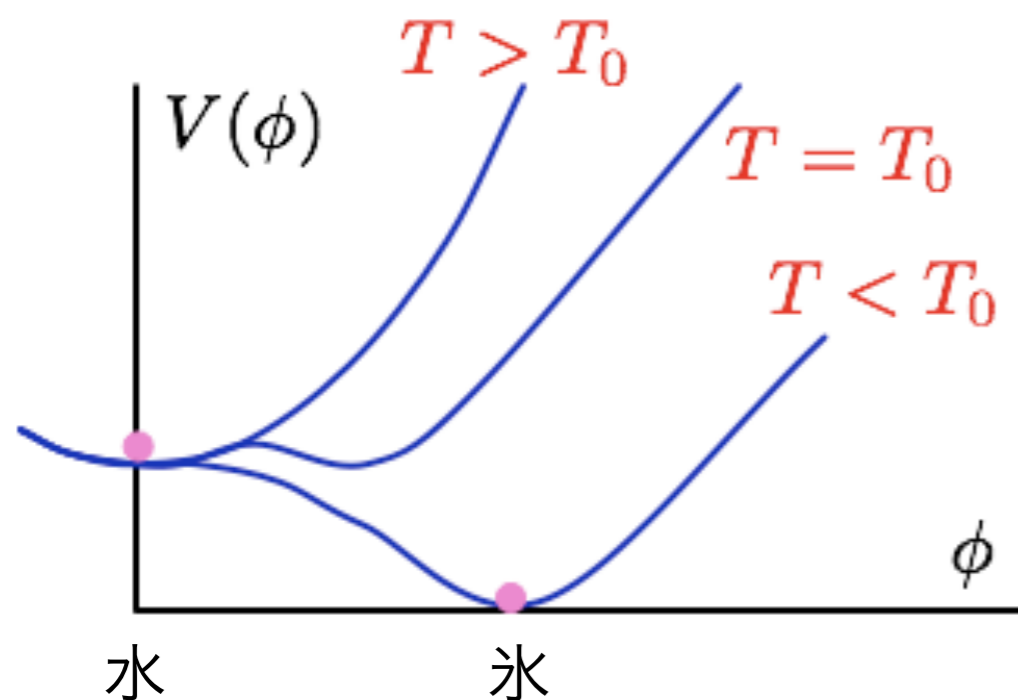
水が凍ったり，沸騰したりするきっかけは，不純物の混入による．精製水をゆっくりと -5°C の冷蔵庫で凍らせようとしても，液体のまま（過冷却状態）であり，外気に触れた瞬間に凍りつくことになる．雪国などでみられる樹氷は，過冷却状態の水滴が木にぶつかって，一瞬で凍ることが一つの理由だという．



図 4.8 ぶつかると凍る過冷却の風

冷蔵庫にいていたペットボトルの水を出すと、一瞬で凍った。

= 過冷却現象



横軸 ϕ は、状態を表す変数

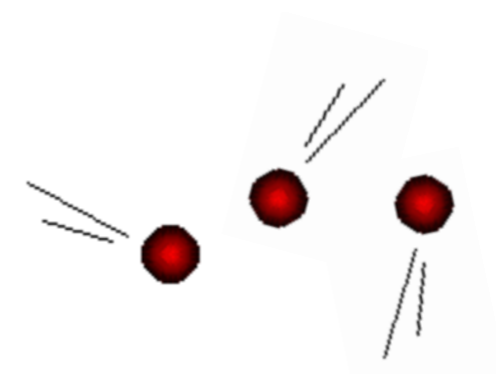
縦軸 $V(\phi)$ は、エネルギー。

(下へ行くほど安定な坂道)

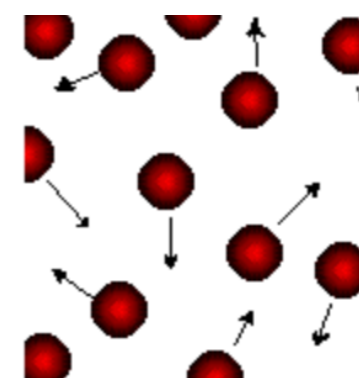
固体から液体へ = 相転移現象

phase transition

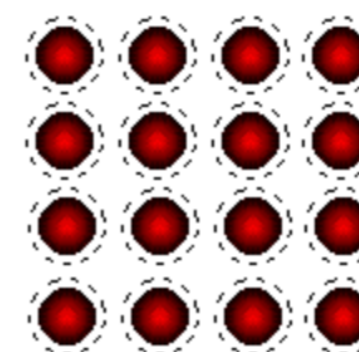
気体 (気相)



液体 (液相)



固体 (固体相)



自発的対称性の破れ

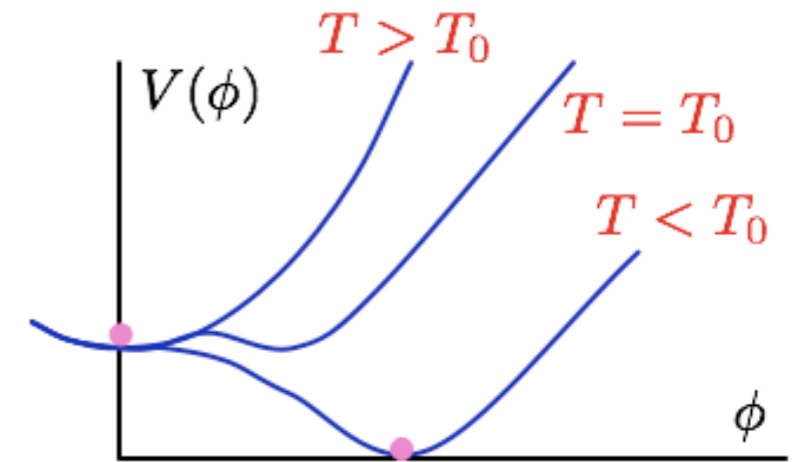


南部陽一郎 (米国籍)

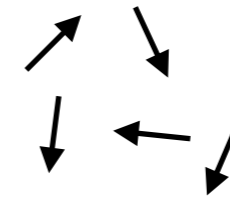
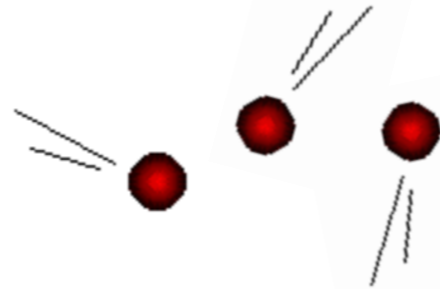
(ノーベル物理学賞 2008)

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

*for the discovery of the mechanism of
spontaneous broken symmetry in subatomic physics*

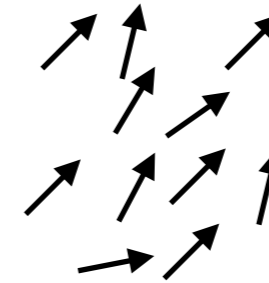
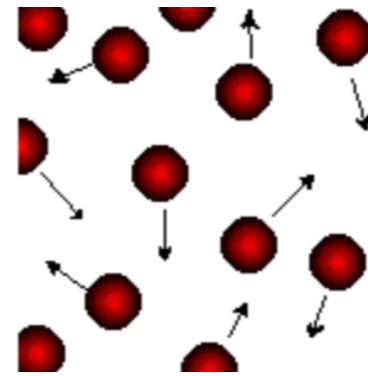


気体 (気相)



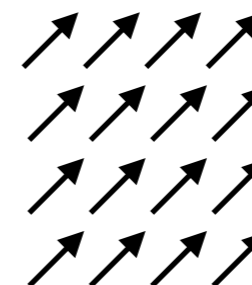
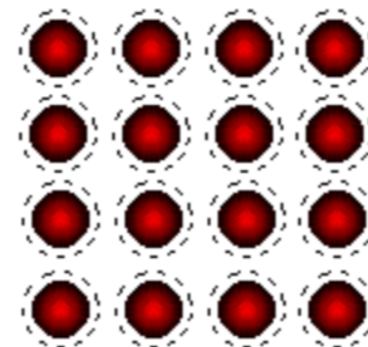
対称性の高い状態
(平均すればゼロ)

液体 (液相)

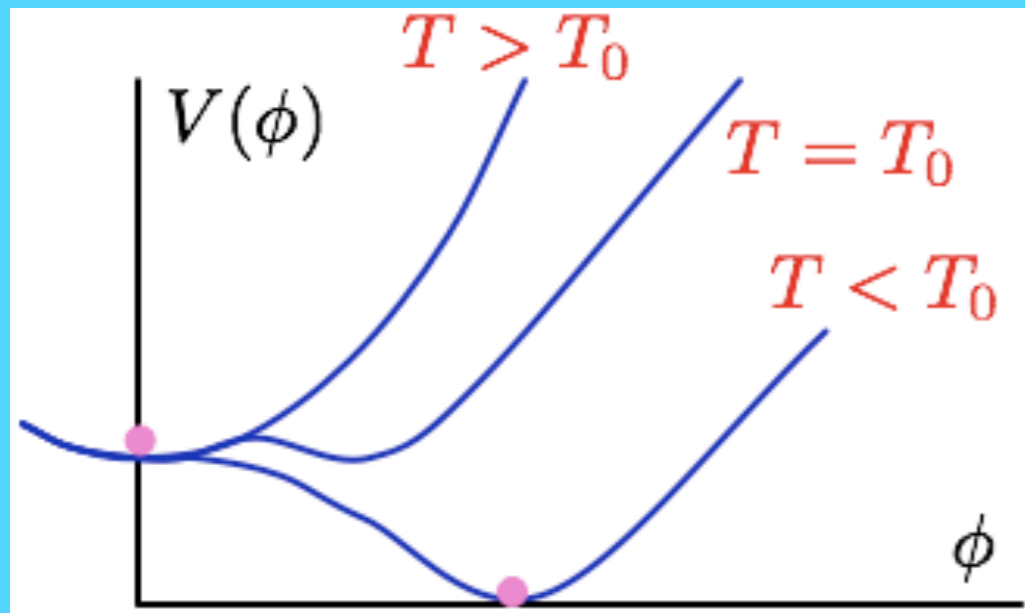


対称性の破れた状態

固体 (固体相)



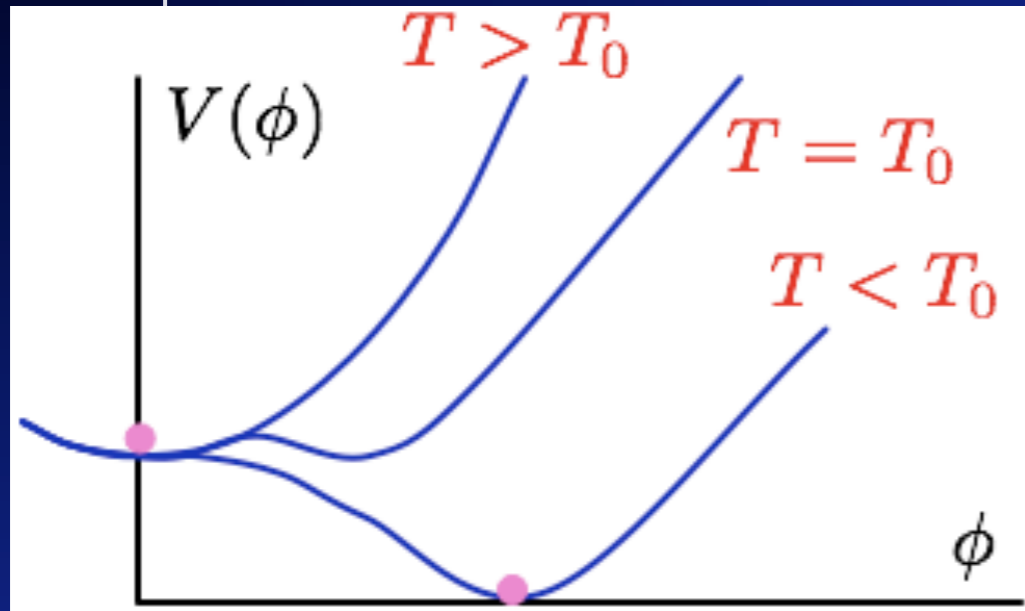
インフレーション宇宙モデル



偽真空 **真の真空**

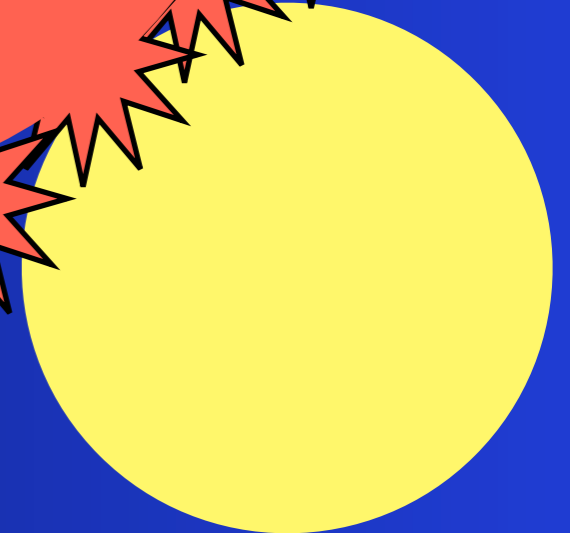
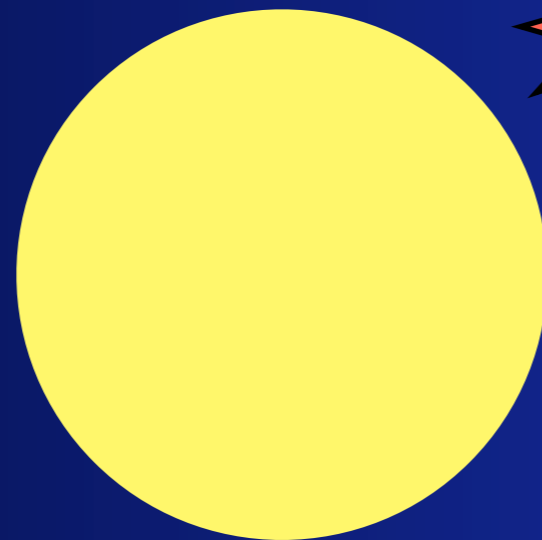
インフレーション膨張

インフレーションは偽真空の 泡の衝突で終わる。

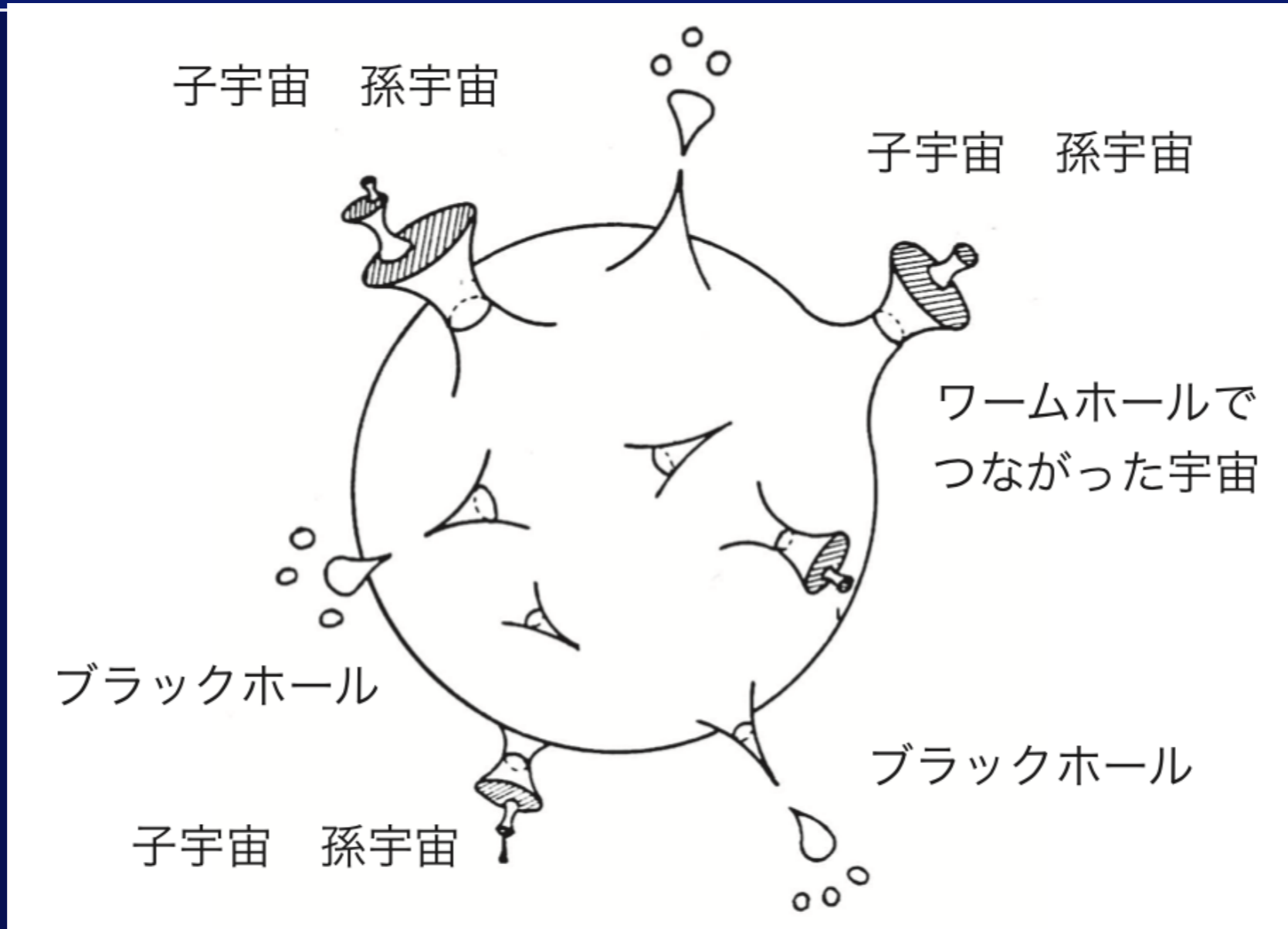


**超高温超高密度の
ビッグバンのはじまり**

偽真空

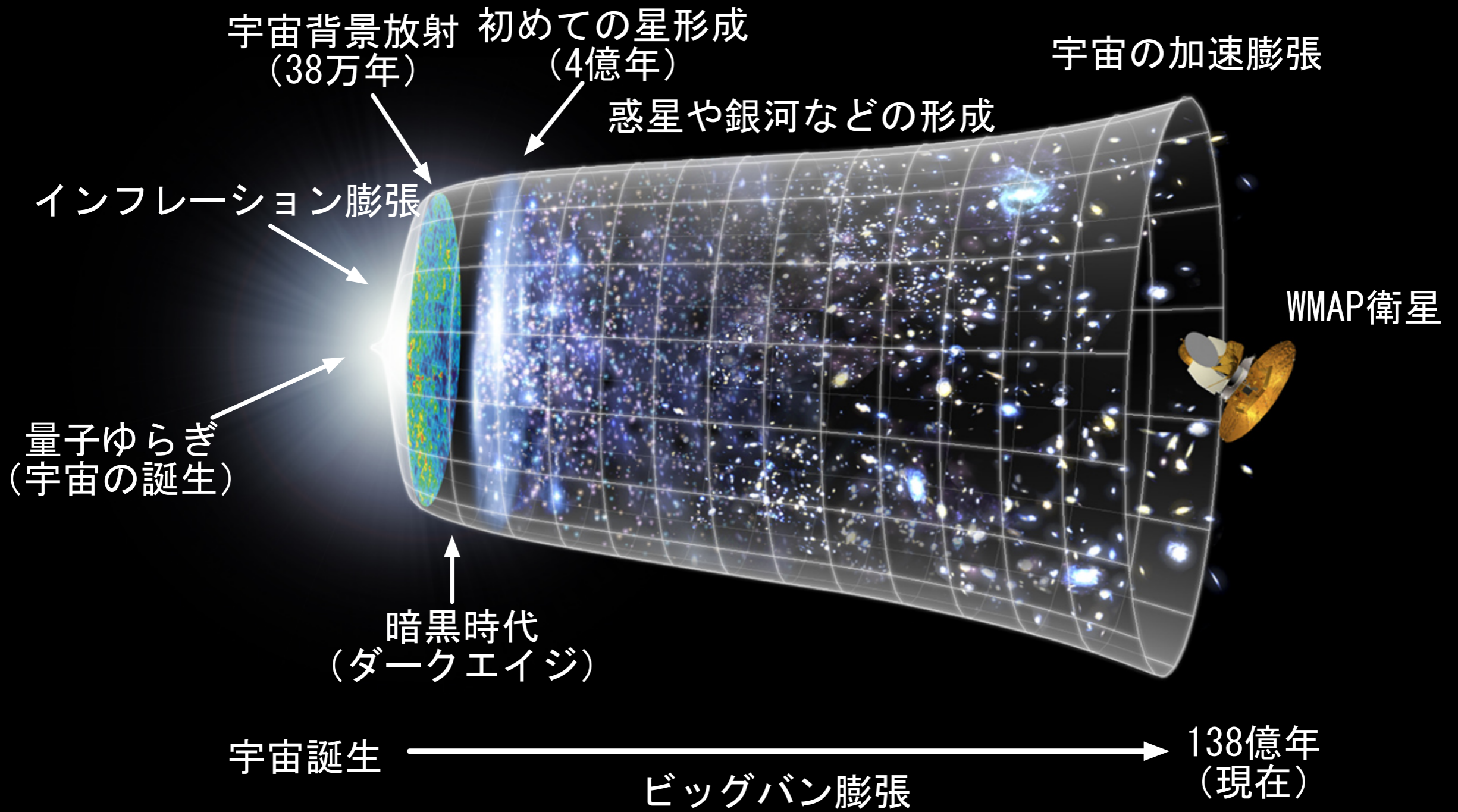


宇宙は我々の宇宙だけではなかった



~~universe~~

multiverse



2014年3月 宇宙背景輻射にBモードのゆらぎを発見！

→ インフレーション宇宙を確認！！



2014年6月 結論は尚早. 他のグループでの確認必要.

6.5.1 ダークマター：見えていない質量

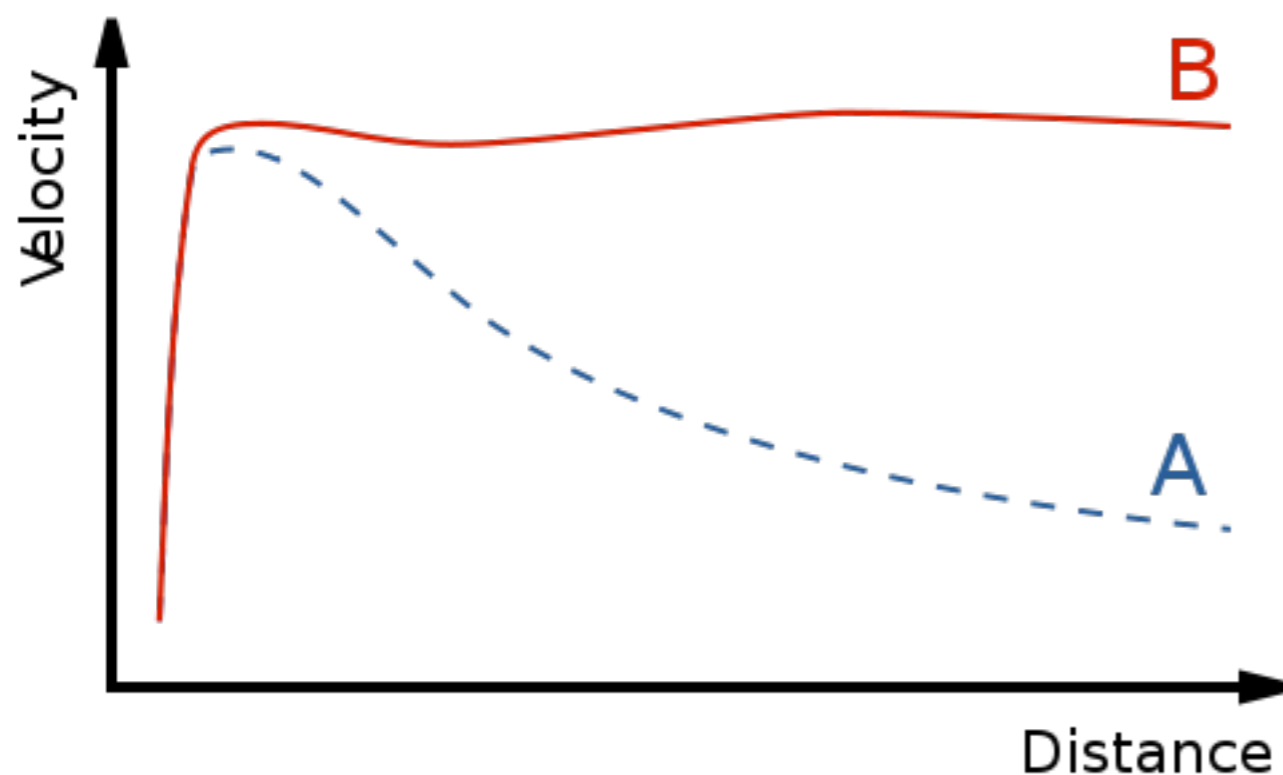
p113



ミッシングマス問題

楕円銀河の回転速度は、

「光る星の6倍以上の質量が存在する」ことを示す。



Vera C Rubin (1928--2016)

重力レンズによるダークマターの検出

p115



図 6.11: 〔左〕 銀河団のシミュレーション結果に、光の進む様子を描き込んだ図。ダークマターを含んだ銀河によって、光の経路が歪む様子がわかる。

[<http://www.cfht.hawaii.edu/News/Lensing/>]

〔右〕 銀河団の衝突による質量分布。ピンク色が高温ガスの分布、青い部分がダークマターの分布を表す。ダークマターが銀河と重なって分布していることがわかる。

[<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2015/10/full/>]

素粒子論からのダークマターの候補

ニュートリノ

○微小な質量を持つことがわかっている

×宇宙全体では量が不足，銀河形成モデルとも合致せず

ニュートラリーノ

○超対称性理論を仮定すれば自然に登場する粒子

×未発見.

アキシオン

温度ゼロの仮想の粒子 ×未発見.

天体物理学からのダークマターの候補

ブラックホール・白色矮星・中性子星

恒星進化の最後の姿だが，どの位存在するのかが未知.

褐色矮星・惑星

恒星へなれなかった小さな星. これも存在量が未知.

結局，不明のまま.

未知の素粒子は何か，に期待が高まっている

ダークマター 発見か？



真貝 寿明

2016年9月26日 · 🌐 ▼

先週物理学会会場で衝撃を与えた話題になったダークマターが、勤務先でも100円で売られていた。

"Dark Matter" is now available everywhere in Japan.



👍 いいね!

💬 コメントする

➦ シェアする

👍 😄 横山恵理さん、林有利恵さん、他30人



Guido Fawkes Is it for wimps or machos?

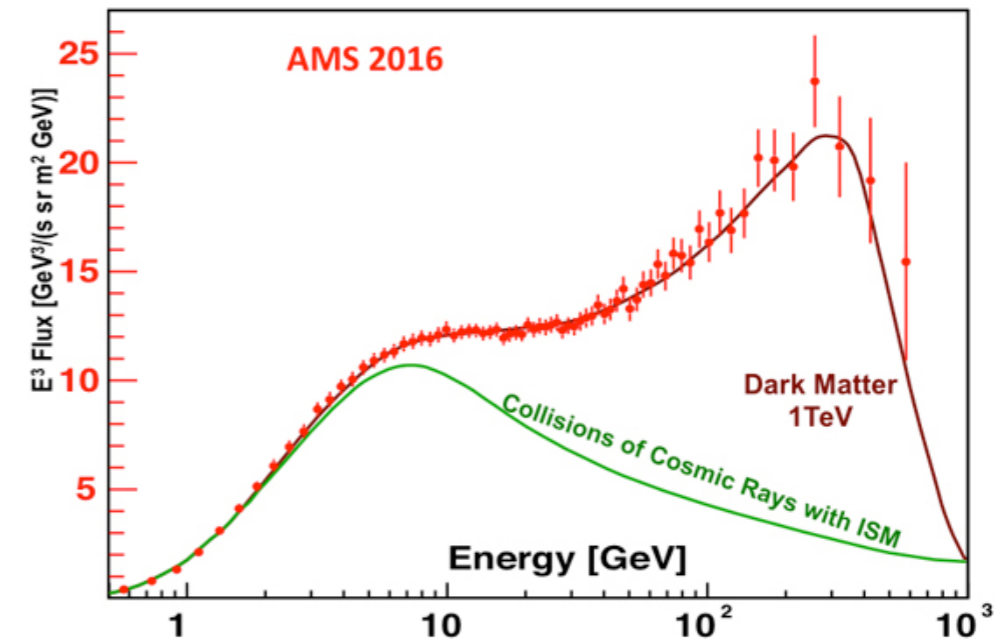
いいね! · 返信 · 2016年9月27日 3:13



真貝 寿明 Of course, MACHO (a massive chocolate).

いいね! · 返信 · 👍 4 · 2016年9月27日 6:57

ダークマター 発見か？



陽電子フラックスの観測データと理論モデルの比較
(出所: AMS Collaboration)

国際宇宙ステーションISSにヨーロッパの研究グループが設置したAMS（アルファ磁気検出器）が反陽子・陽電子を捉えたが、これまでのモデルでは説明できず、ダークマター由来のモデルだと合致する。

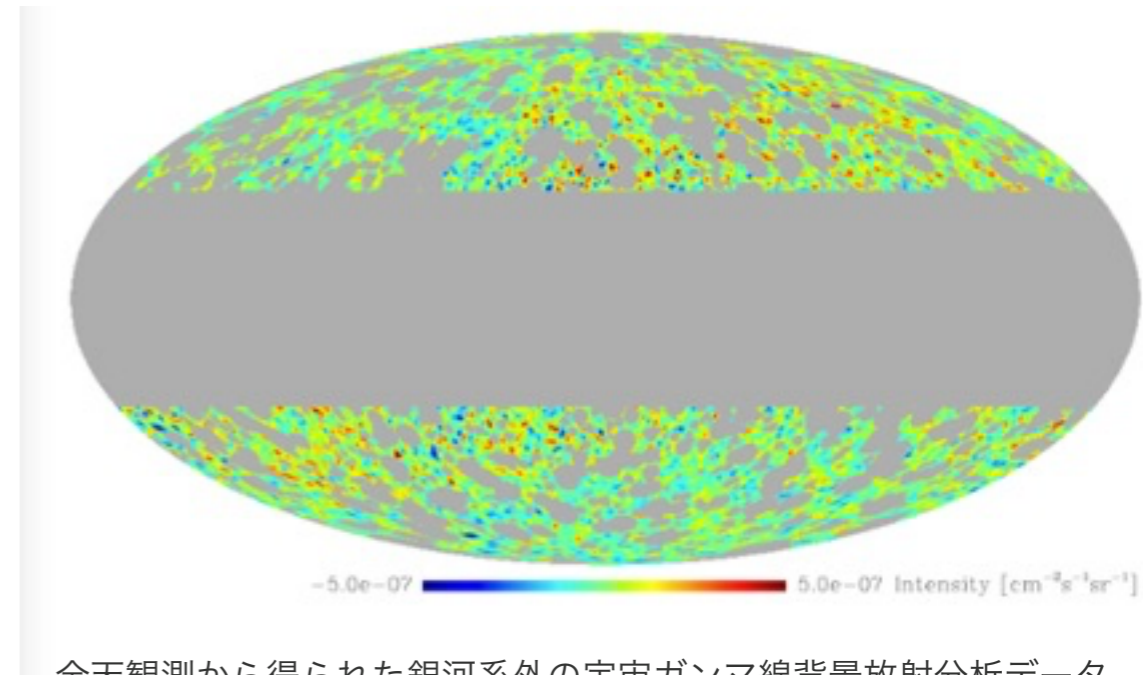
(2016年12月8日発表)

ダークマター 発見できず

諸説紹介

アムステルダム大学の研究チームは、天文観測衛星「フェルミガンマ線宇宙望遠鏡」が収集した宇宙ガンマ線背景放射のデータを精密解析した結果、ダークマター粒子の存在証拠は見つからなかったと発表した。(2016年12月28日発表)

<http://news.mynavi.jp/news/2016/12/28/189/>



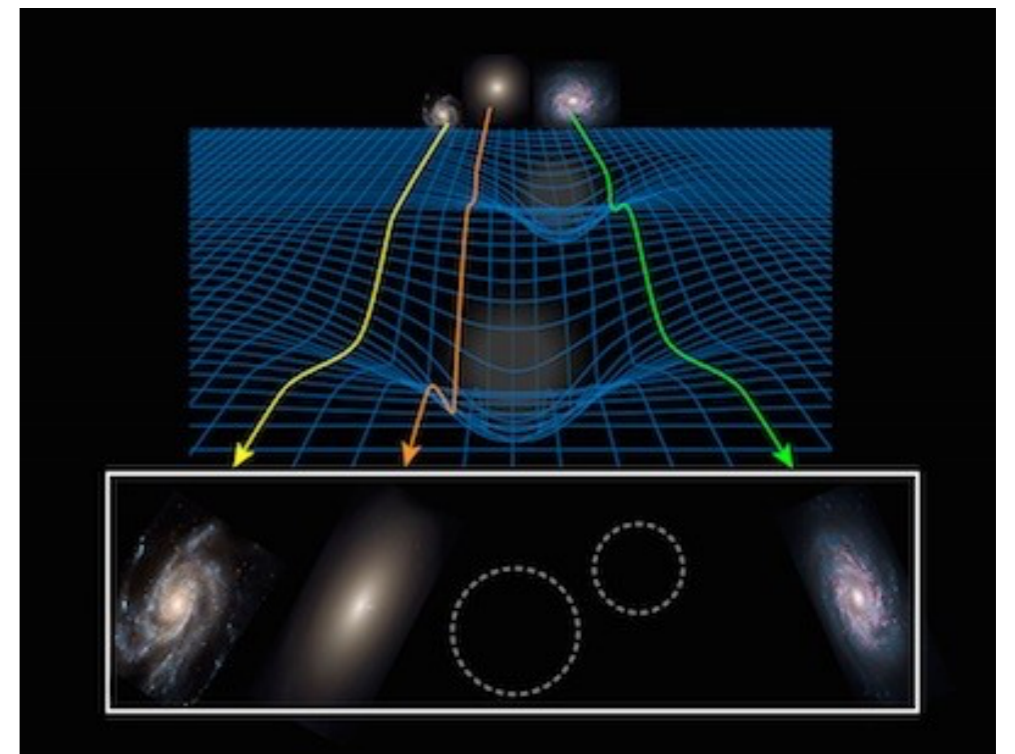
全天観測から得られた銀河系外の宇宙ガンマ線背景放射分析データ。銀河中心面を除いている。(出所: アムステルダム大学)

ダークマター 不要

諸説紹介

ライデン天文台の研究チームは、宇宙における重力分布の測定データを分析し、「エントロピック重力理論(ヴァーリンデ理論)」と一致する結果を得たと報告した。ダークマターの質量を仮定しなくても、重力レンズ効果が説明できるという。(2016年12月22日発表)

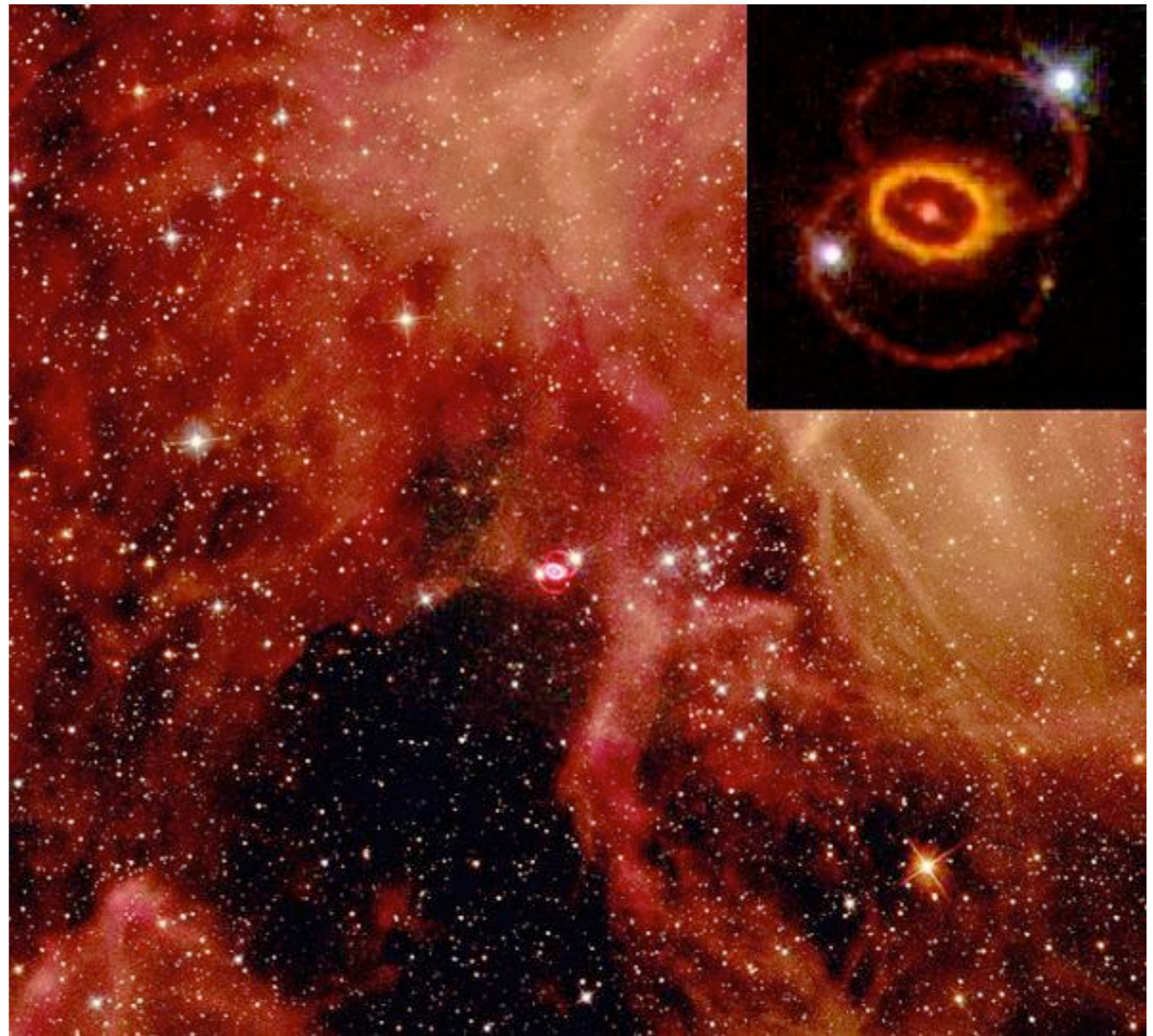
<http://news.mynavi.jp/news/2016/12/22/230/>



6.5.2 超新星による加速膨張の観測・ダークエネルギー？

超新星爆発

= 燃え尽きた星の
最後の爆発



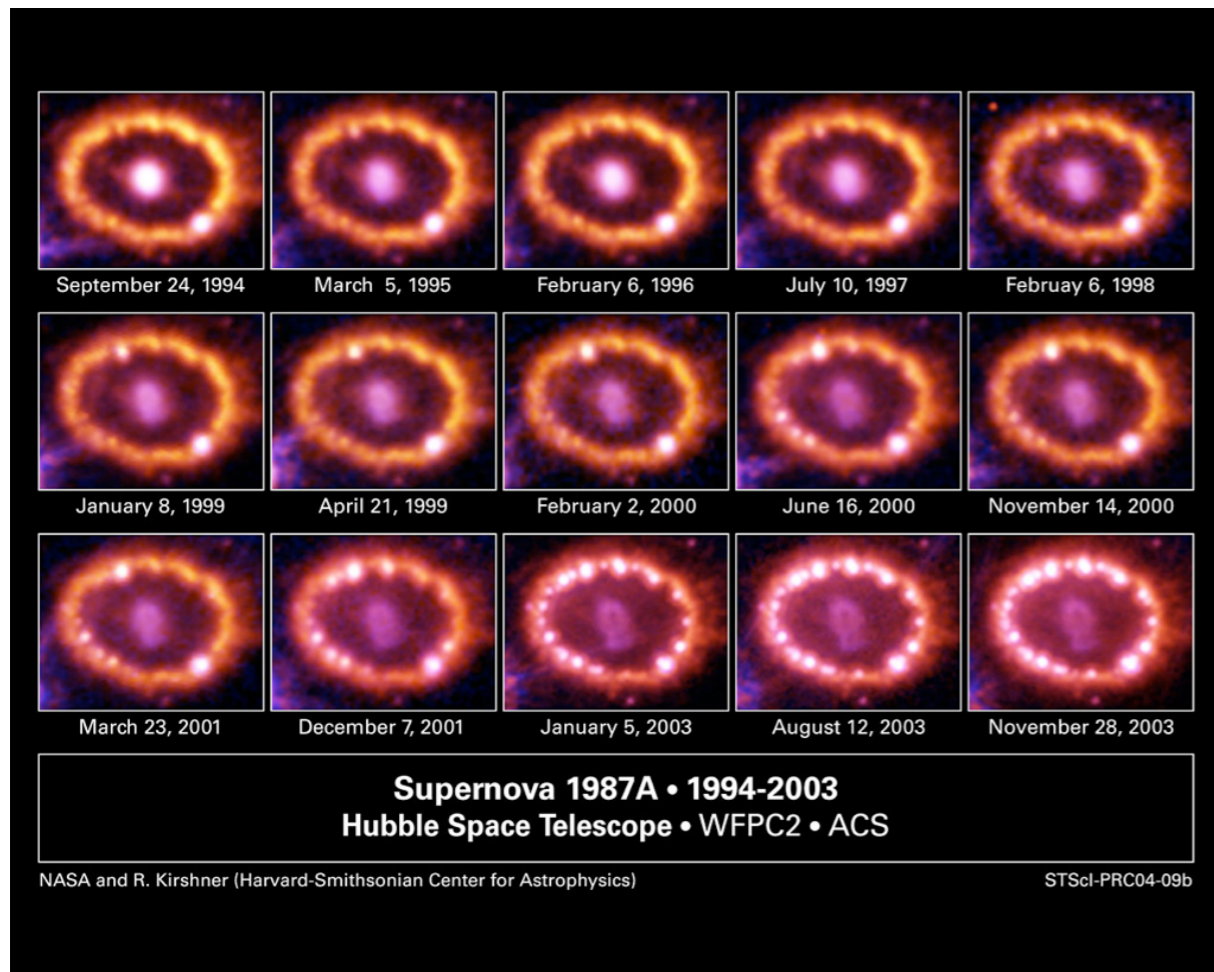
SN1987Aの2007年の画像

6.5.2 超新星による加速膨張の観測・ダークエネルギー？

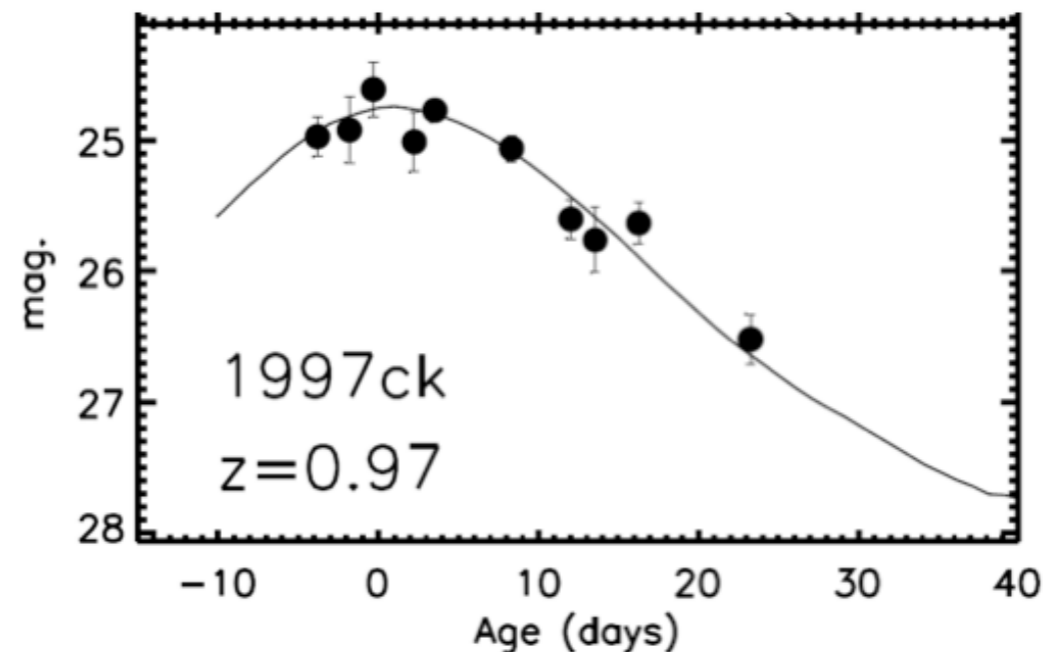
超新星爆発 = スタンダードキャンドル

爆発のメカニズムは物理的に決まっている。どの超新星爆発もほぼ同じ質量の星が爆発するので、放出されるエネルギーも同じ。

爆発後の減光のしかたも同じ。超新星爆発ではカルシウムや鉄、ニッケルなど、重い元素がどんどん作られるが、その変化のしかたも同じになる。スペクトルから元素の構成比を観測することで、爆発後のどの時期に相当するののかもわかる。



観測される明るさから
距離が正確に判定できる



6.5.2 超新星による加速膨張の観測・ダークエネルギー？



Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



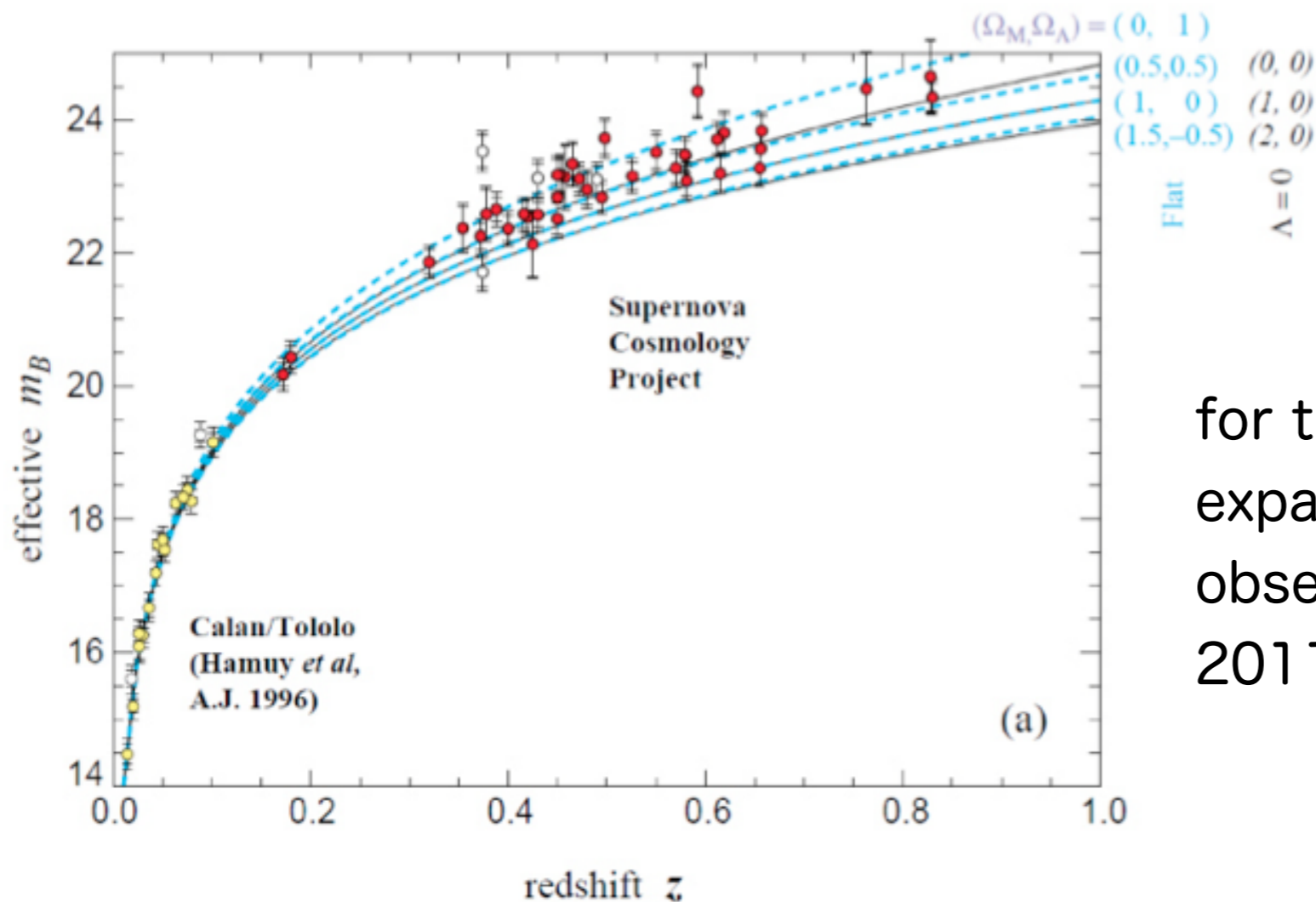
Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



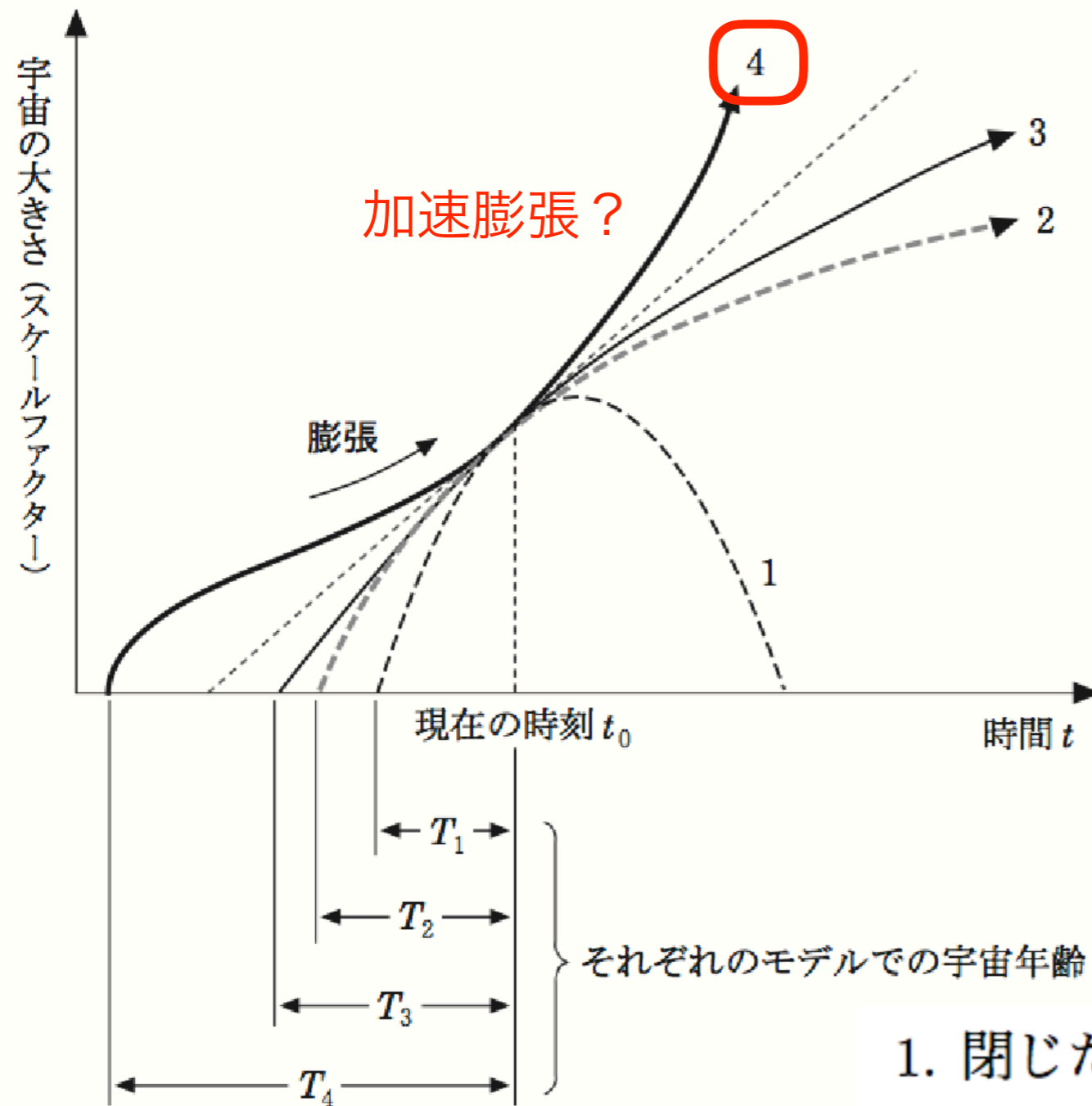
Photo: U. Montan

Adam G. Riess



for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae.
2011年ノーベル物理学賞受賞

膨張宇宙モデル



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = +1$.
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = 0$.
3. 開いた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = -1$.
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり. $\Lambda > 0, k = 0$.

宇宙が加速膨張している原因は何か???

重力場の方程式 (一般相対性理論)

空間の曲がりかモノの運動を決める ⇔ モノがあると空間が曲がる

<空間の歪み>

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

<モノの分布>

② アインシュタインの理論を修正する

修正重力理論

我々は特殊な位置

③ フリードマン宇宙モデルの前提となった「宇宙原理」を疑う

① 斥力を及ぼす特殊な物質を考える。

ダークエネルギー

膨張宇宙の解

ビッグバンモデル

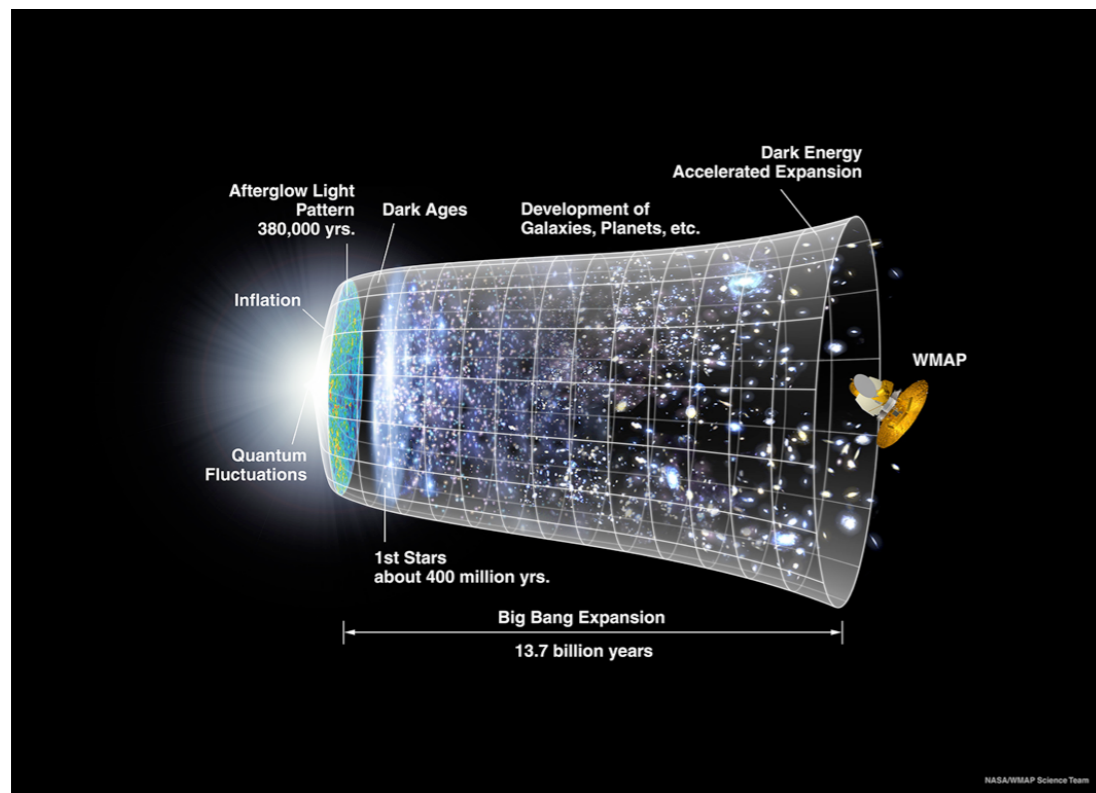
④ 観測結果を疑う

加速膨張の発見

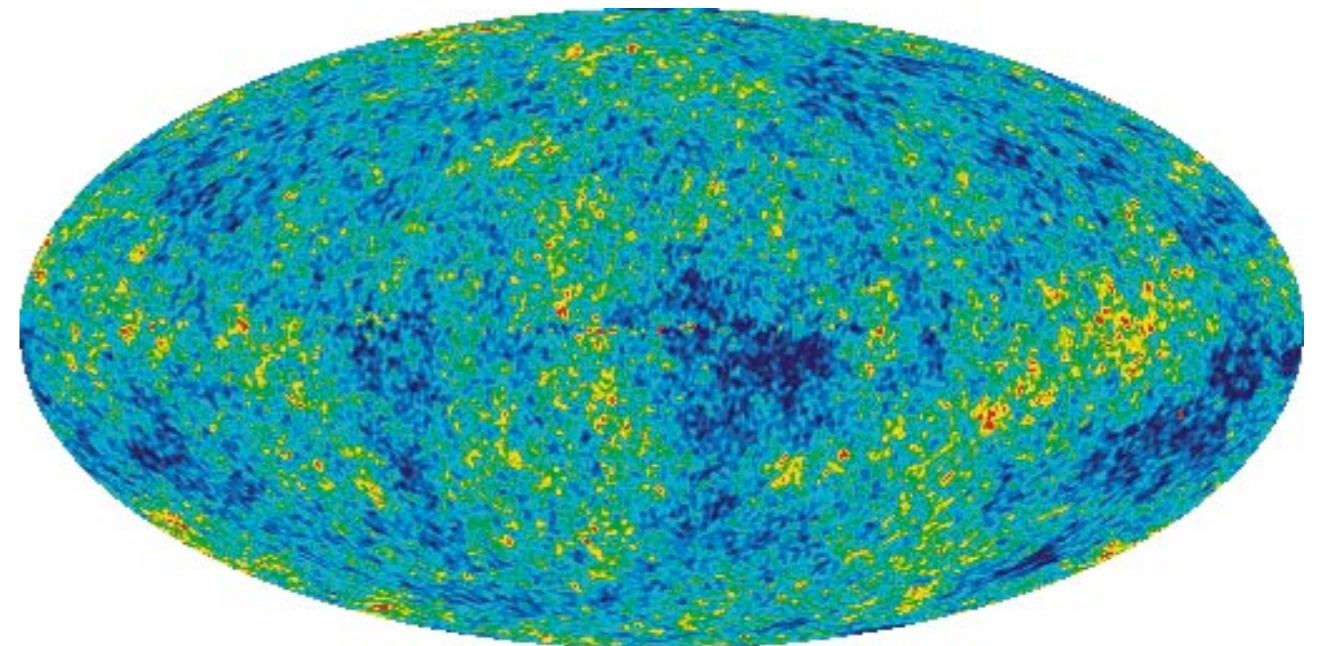
6.5.3 宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)の観測

Cosmic Microwave Background (CMB)

宇宙誕生後、38万年のとき、温度の低下によって物質が形成されはじめ、光が直進できるようになった。このときの光が、宇宙全体を満たしており、CMBと呼ばれる。



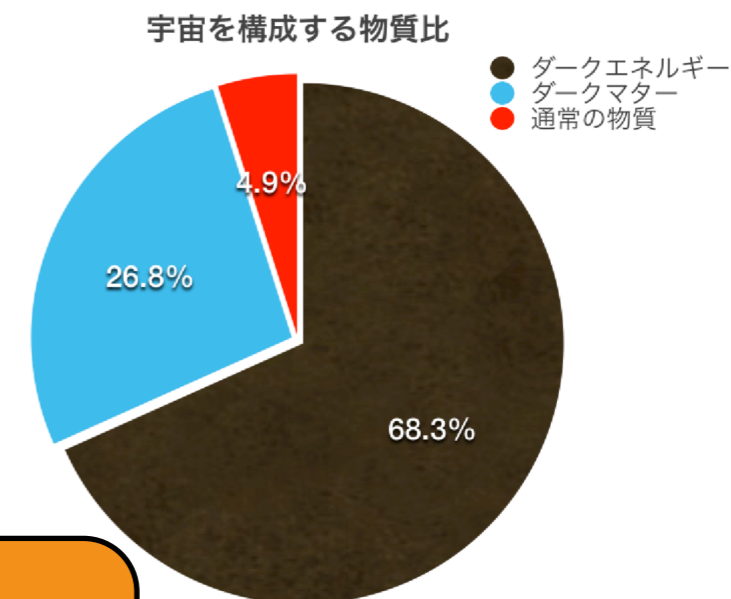
現在では、温度 2.7K に相当する完璧な Planck分布の電磁波であることが知られていて、そのスペクトルのゆらぎなどから、宇宙論パラメータのフィッティングが行われている。



6.5.3 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測

表 6.1: Planck 衛星による観測チームが発表した宇宙論パラメータ (2015 年). 左欄の P. は Λ CDM モデルを決める 6 つのパラメータ, C. はモデルを決めると計算されるパラメータ, F. はモデルを決めるために設定したパラメータを示す.

パラメータ	記号	値	
P. バリオン密度	$\Omega_b h^2$	0.02230 ± 0.00014	
P. ダークマター密度	$\Omega_c h^2$	0.1188 ± 0.0010	
P. 曲率ゆらぎ振幅	Δ_R^2	$2.441^{+0.088}_{-0.092} \times 10^{-9}$	
P. 宇宙年齢	t_0	137.99 億年 \pm 2100 万年	
P. CMB 放射の光学的深さ	τ	0.066 ± 0.012	
P. スカラスペクトル指数	n_s	0.9667 ± 0.0040	
C. ハッブルパラメータ	H_0	67.74 ± 0.46 [km/s/Mpc]	(F.3)
C. バリオン (通常物質)	Ω_b	$4.86 \pm 0.10\%$	(F.4)
C. 冷たいダークマター	Ω_{CDM}	$25.89 \pm 0.57\%$	
C. ダークエネルギー	Ω_Λ	$69.11 \pm 0.62\%$	(F.5)
C. 臨界密度	$\rho_{\text{crit.}}$	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{kg/m}^3$	
C. CMB 放射の赤方偏移	z_{eq}	1089.90 ± 0.23	
C. CMB 放射時の宇宙年齢	t_{eq}	37 万 7700 年 \pm 3200 年	
C. 再イオン化の赤方偏移	z_{red}	$8.5^{+1.0}_{-1.1}$	
C. $8h^{-1}\text{Mpc}$ でのゆらぎ振幅	σ_8	0.8159 ± 0.0086	
F. 状態方程式パラメータ	w	-1	(-1 なら宇宙項)
F. テンソル・スカラー比	r	0	
F. 全密度パラメータ	Ω_{tot}	1	



宇宙年齢は,
137.98億年 \pm 3700万年

正体不明のダークエネルギーは,
69.2%

銀河団 (cluster), 宇宙の大規模構造

(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

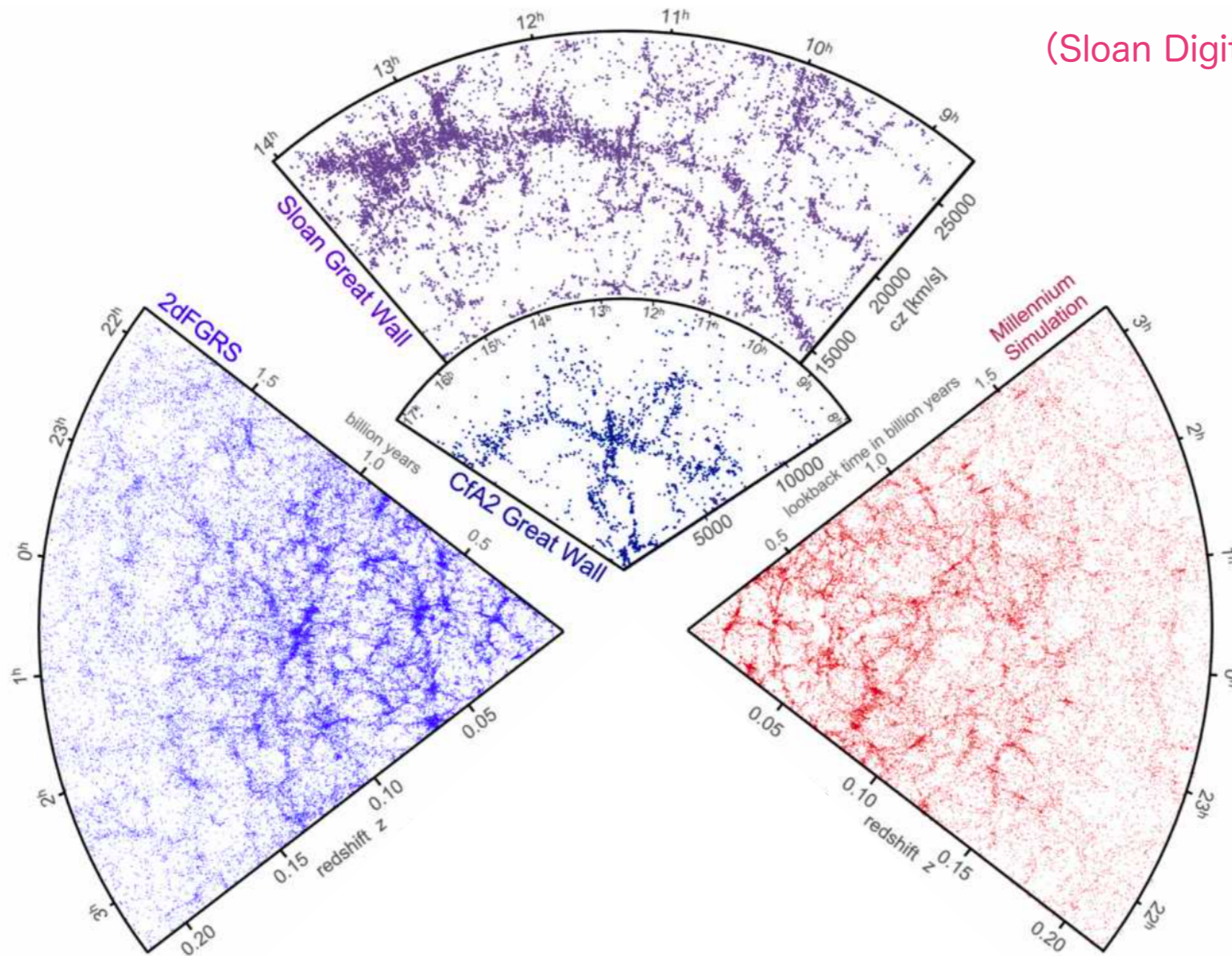


図 1.35 銀河の分布観測とシミュレーションによる疑似分布を並べたもの。〔上〕SDSS サーベイによる銀河の分布図と図 1.34 を重ねたもの。SDSS は、北天から見える 65 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグレートウォール (万里の長城) も新たに発見された。〔左〕2dFGR サーベイによる銀河の分布図。南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している。〔右〕ミレニアム・シミュレーションという数値計算結果を似せて示したもの。[Springel, Frenk, White の論文 (2006) を加工]

65万個の銀河分布を観測 (2006)



メン・イン・ブラック
(1997)



宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論**

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>

宇宙はどこまで解明されたか

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何が先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>