

宇宙はどこまで解明されたか

- 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？

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



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

宇宙とはなんだろう？

宇宙とは、すべての物質と現象を包み込み、時間と空間に広がる領域のことです。また、私たち人類もその中に生きています。宇宙は、科学的に探求し、理解しようとする領域です。

宇宙図の見方

この宇宙図は、最新の研究成果に基づいて作成されたもので、宇宙の構造や進化を詳しく解説しています。宇宙の始まりから現在の宇宙までの歴史を、宇宙の膨張や重力の働きなどを解説しています。また、最新の研究成果や、今後の宇宙探査の展望についても詳しく紹介しています。

宇宙を見ることは、星を見ること

宇宙を望遠鏡で見ることは、星を見ることと同じです。望遠鏡は、遠くにある星や天体を近づけて見ることができ、その構造や性質を詳しく観察することができます。

宇宙では、遠くは距離は逆行

宇宙の膨張によって、遠くにある天体は、私たちがいるところから遠ざかっています。これは、宇宙の膨張が、遠くにある天体を引き離しているからです。

見える宇宙と見えない宇宙がある

望遠鏡で見える宇宙は、見える宇宙と見えない宇宙があります。見えない宇宙は、暗黒物質や暗黒エネルギーと呼ばれるもので、その性質はまだ謎に包まれています。

宇宙は「科学の眼」で見えてくる

宇宙の神秘を解明するためには、科学の力を借りていく必要があります。最新の科学技術を使って、宇宙の謎を解き明かすことが、私たちの使命です。

太陽系天体に生命を求めて

地球以外の天体に生命が存在するかどうか、これは人類が最も関心を抱いている問題の一つです。最新の観測技術を使って、太陽系内外の天体を詳しく調べて、生命の存在の可能性を探っています。

もうひとつの地球を探して

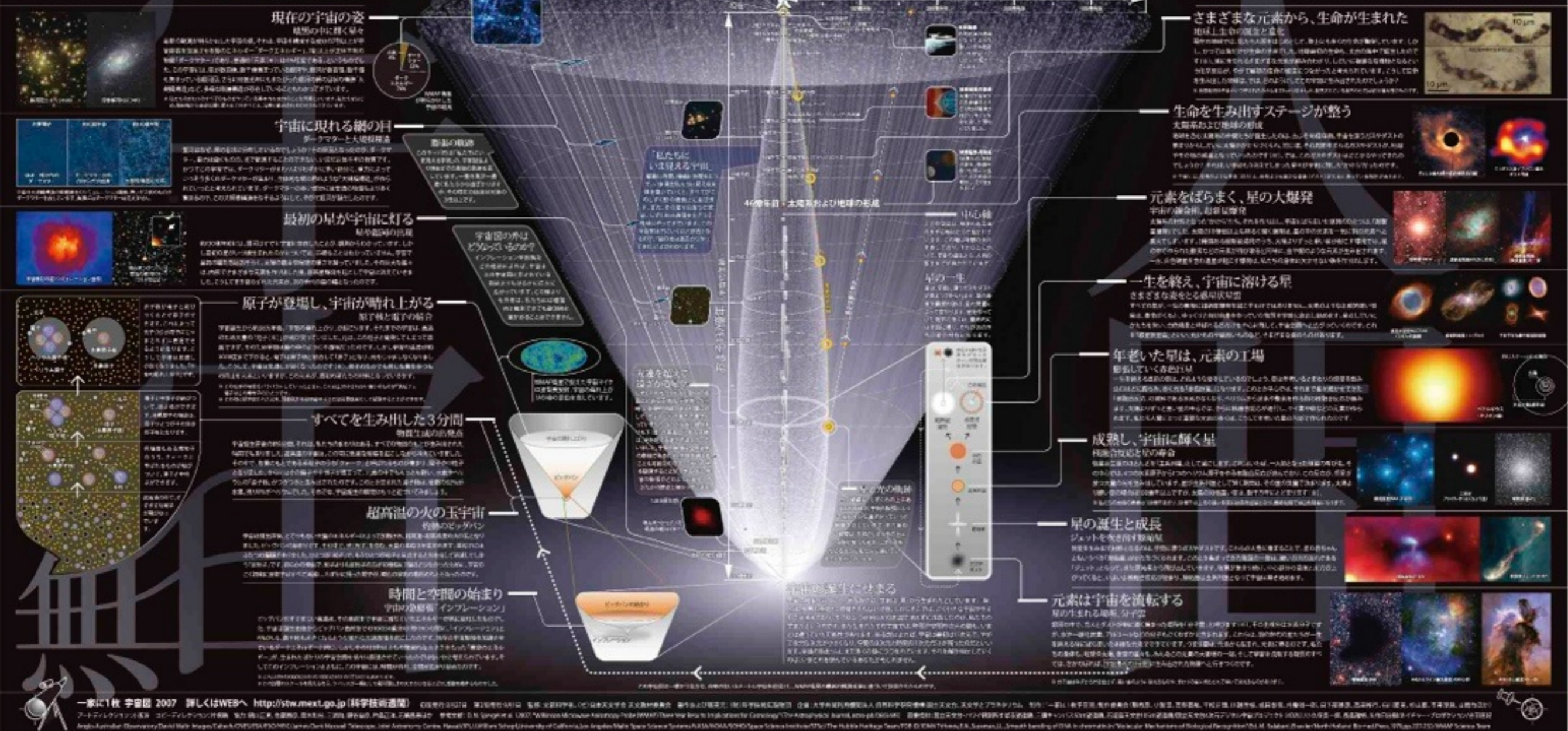
地球以外の天体に生命が存在するかどうか、これは人類が最も関心を抱いている問題の一つです。最新の観測技術を使って、太陽系内外の天体を詳しく調べて、生命の存在の可能性を探っています。

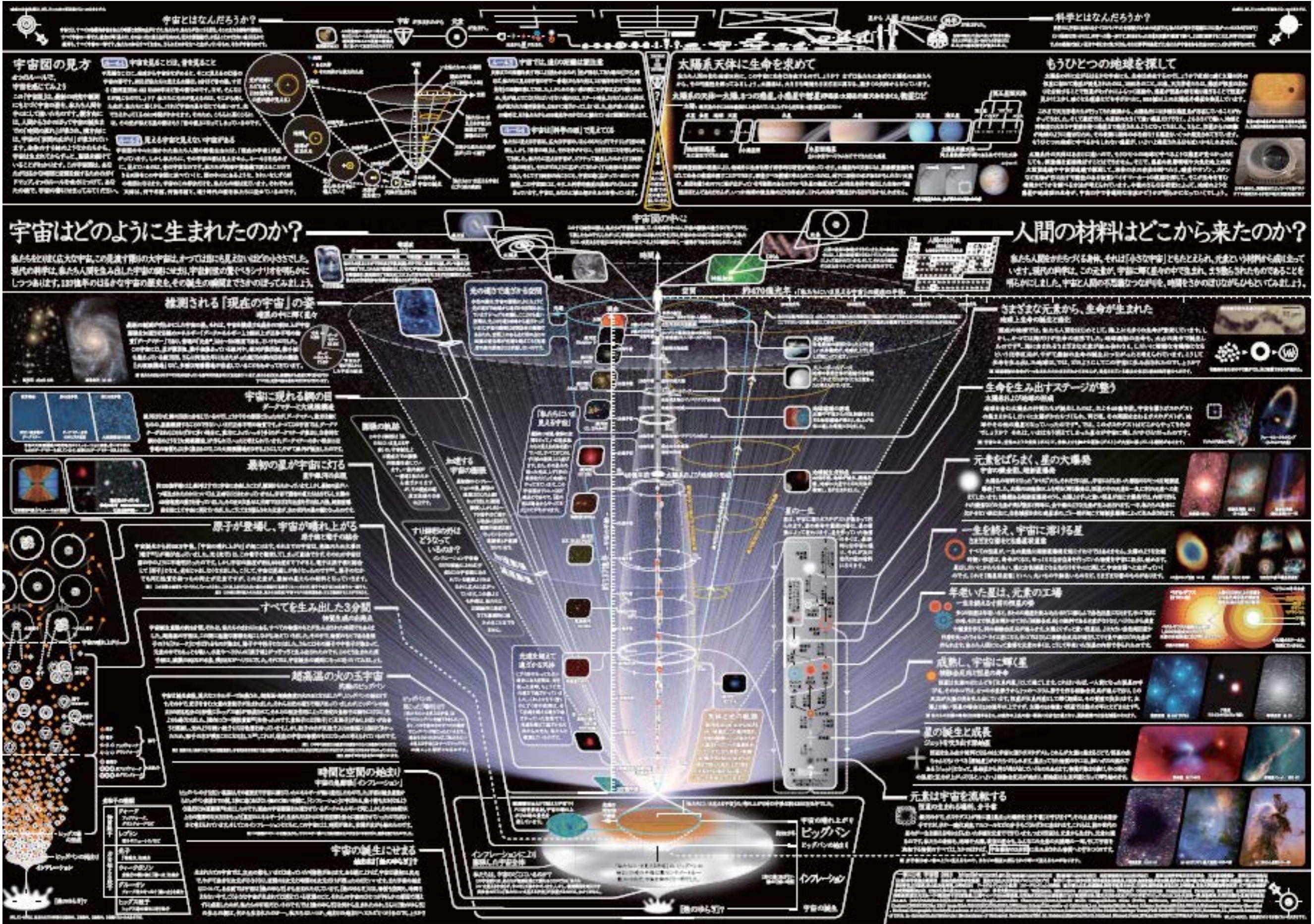
人間は宇宙から来たのか？

人類の起源は、地球上で進化したのか、宇宙から来たのか、これは人類の歴史を語る上で重要な問題の一つです。最新の遺伝子解析技術を使って、人類の起源を探っています。

宇宙はどのように生まれたのか？ 人間の材料はどこから来たのか？

私たちは地球を離れて、宇宙を探索する準備ができています。最新の科学技術を使って、宇宙の謎を解き明かすことが、私たちの使命です。





天の川銀河 (our Galaxy)

THE MILKY WAY

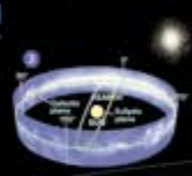
NATIONAL GEOGRAPHIC

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, enveloping 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 planetary nebulae wander the galaxy's halo. Regions of dark matter—invisible but felt through its gravitational effects—extend beyond that.
2. The 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 hazy 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 skewed angle to the galactic plane.



A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the whirlpool 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, less dense, blue.

Massive amounts of energy are released near the center of the Milky Way, producing electrons that race along magnetic field lines, surrounding remnants of stellar explosions. Probing even deeper into the core, a radio image detects a spiral of hot gas that is being heated as well as a black hole some 2.6 million times as massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—our 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
- Halo
- Thick disk star region
- Thin disk
- Galactic bulge or center
- Thin disk region

PLANETARY NEBULA NGC 9

Earth's telescopes of the Milky Way detect nebulae and star clusters as 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 expanded into a red giant and was transformed into the nebula NGC 9 below. At its center shines a small, hot core, which will cool and fade over time to form its stellar remnant of compacted particles, known as a white dwarf.

THE GALAXY'S CORE

Galaxies, however, every star in the cluster is about the same age. Billions of years older than our 4.5-billion-year-old sun.

Being born in the central bulge of the Milky Way, the Hubble Space Telescope focused on a rare star cluster in the Sagittarius star cloud (above right). These long-lived stars, formed at different times, must be older than the sun. They sparkle like an assortment of gems on a jeweler's velvet pad.

THE GALAXY'S SPIN

Light from the hot star is absorbed by and excites the dust, making it glow.

As stars die, they become factories for interstellar dust. Celestial bodies—the remnants of red giant stages—scatter the dust toward the center of the galaxy.

Visible light from the Hubble Space Telescope shows the dust swirling in the spiral arms of the Milky Way. The dust is not dark and smooth but seems to form a glass of beer. Bubbles and shock waves and stellar wind from

THE GALAXY'S SPIN

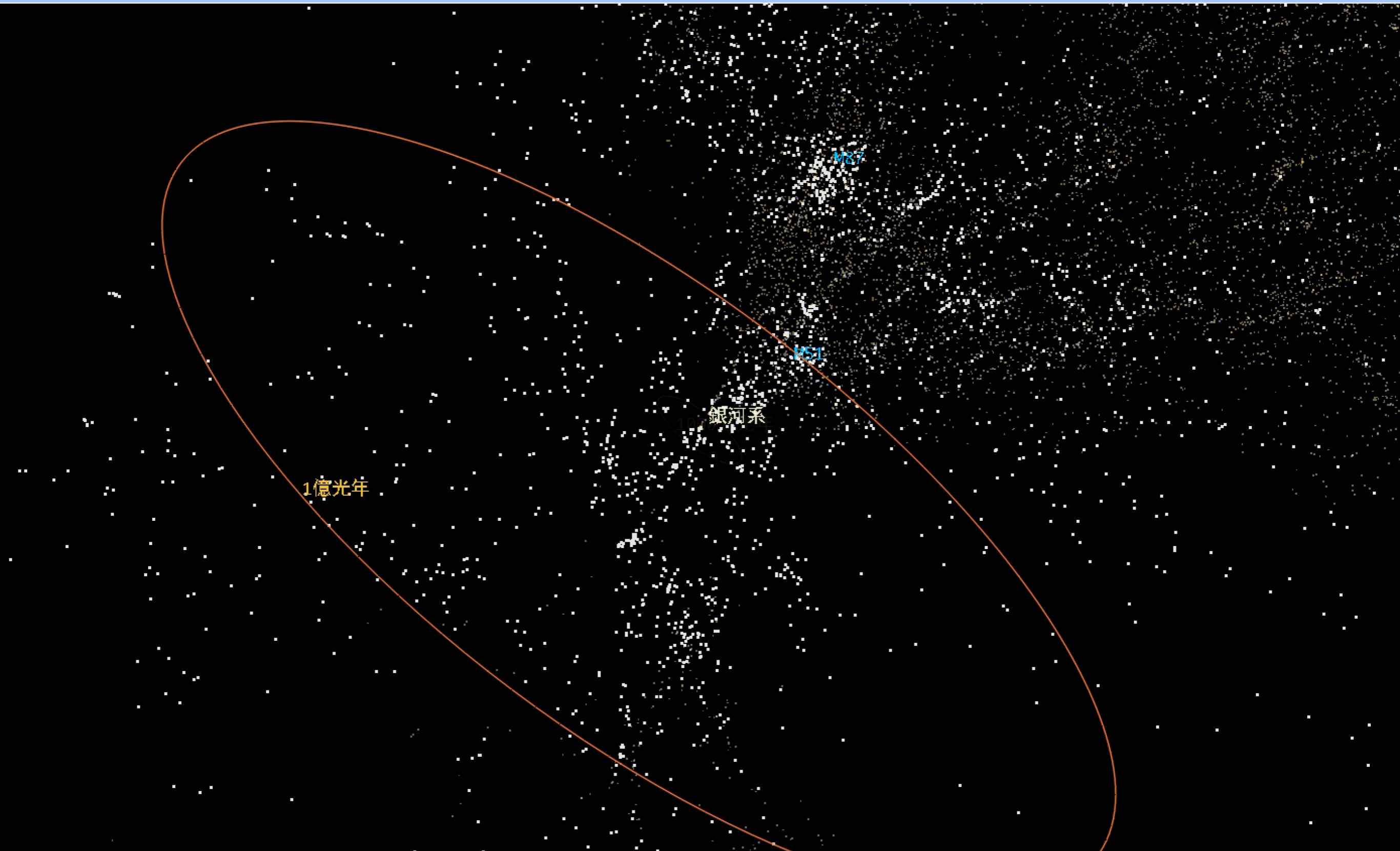
Each clumpy, filamentary clump of hydrogen gas is about 100 light-years across. It is being pulled toward the center of the galaxy by the gravitational pull of the central black hole.

Each clumpy filamentary clump of hydrogen gas is about 100 light-years across. It is being pulled toward the center of the galaxy by the gravitational pull of the central black hole.

LAGOON NEBULA

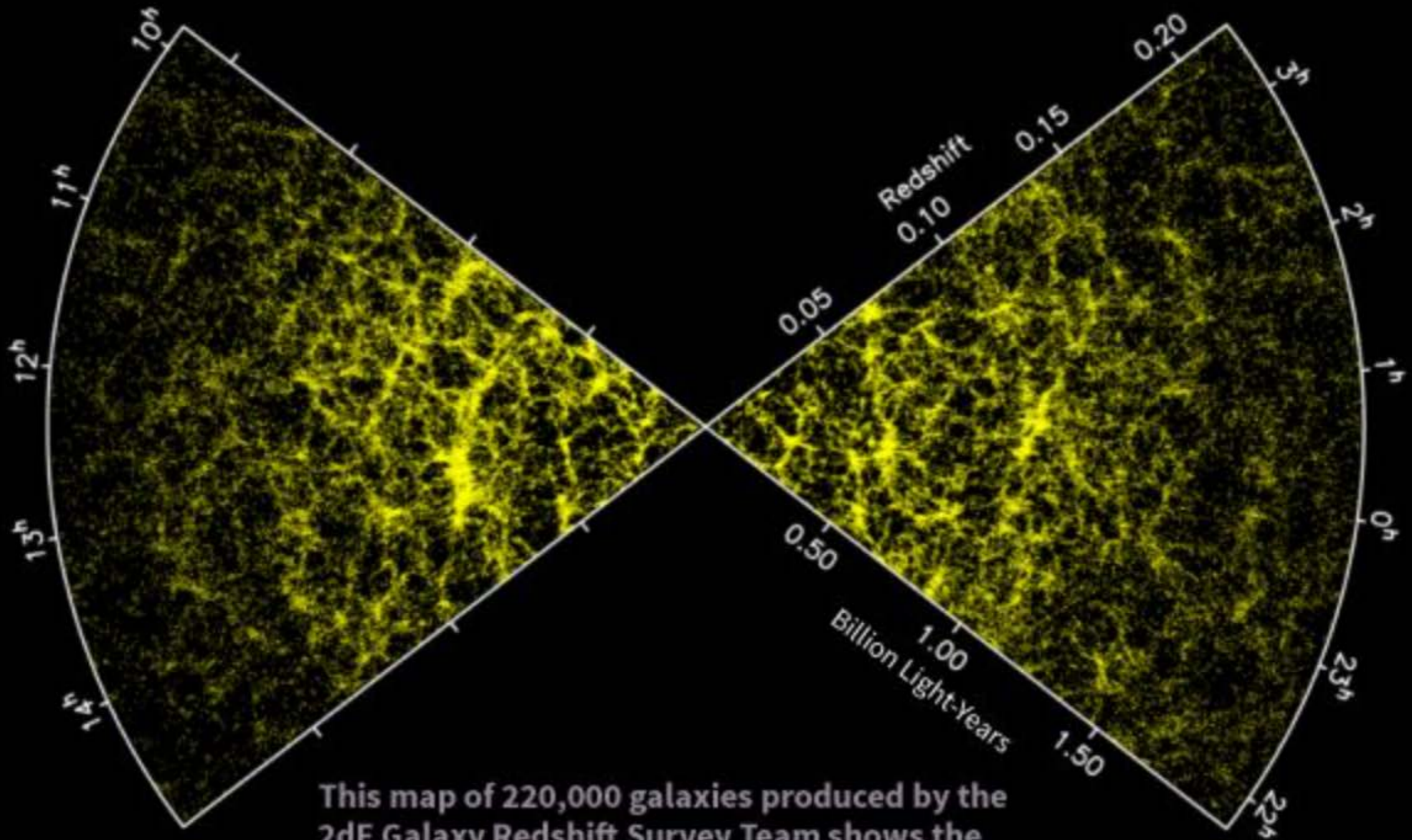
With new tools, astronomers are unraveling the nature of the Milky Way and measuring distances to stars and nebulae with greater accuracy. Still, they ask, how did the Milky Way form in the first place? How many more planets circle nearby stars besides the 112 already discovered? And the deeper question 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

THE UNIVERSE



SIZE OF THE UNIVERSE

To view the universe in its entirety, you would need to travel 93 billion light-years from Earth. The universe is so vast that it is impossible to see its entire extent. However, we can see the farthest objects that have emitted light since the beginning of time, which is about 13.7 billion light-years away.



EVOLUTION OF THE UNIVERSE

Following inflation from the beginning of time, the universe expanded rapidly. As it cooled, matter and energy clumped together, eventually forming the first stars and galaxies. The universe has been expanding ever since, and is expected to continue to expand for billions of years to come.

OUR SUPERCLUSTER

Some 100 million light-years across, our supercluster is a vast collection of clusters of galaxies. The supercluster is bounded by the Local Group, the Local Supercluster, and the Virgo Supercluster. It contains some 100 billion galaxies and is moving toward the Great Attractor, a massive concentration of matter in the universe.

OUR SUPERCLUSTER

Some 100 million light-years across, our supercluster is a vast collection of clusters of galaxies. The supercluster is bounded by the Local Group, the Local Supercluster, and the Virgo Supercluster. It contains some 100 billion galaxies and is moving toward the Great Attractor, a massive concentration of matter in the universe.

THE LOCAL GROUP

Galaxies stretch in every direction beyond the Milky Way, but galaxy groups are fairly common. The Local Group is a collection of galaxies, including our own, located in the Virgo Supercluster. It contains about 30 galaxies and is moving toward the Great Attractor.

It is possible that astronomers have not found some of our group's smaller galaxies, which may be hidden behind dust clouds in the Milky Way. All three main types of galaxies are represented in the Local Group: elliptical, irregular, and irregular. The group has relatively few members, a fact that is due to its location in the Virgo Supercluster.

OUR GALACTIC NEIGHBORHOOD

Like the early 20th century, the population of our galaxy was once much smaller. The Milky Way is a spiral galaxy and our solar system is located in what is called the spiral's Orion arm, about 26,000 light-years from the center. Our sun orbits the galactic center about once every 225 million years and has made the circuit about 18 times. In the local area, our stars form as clouds of gas and dust collapse. The stars' energy heats nearby gas, causing it to glow.

OUR GALACTIC NEIGHBORHOOD

The central bulge of the galaxy glows with the light of stars, and the stars' heat causes stars, including the galaxy in a diffuse halo, formed more than 100 billion years ago. Several satellite galaxies orbit around the Milky Way. Two of them, the Large and the Small Magellanic Clouds, are visible in Earth's sky from the Southern Hemisphere. The closest galaxy is a small galaxy called the Sagittarius Dwarf.

OUR SOLAR SYSTEM

As they did on the scale of the sun, the solar system's size is tiny. The solar system is a collection of objects that orbit the sun. The objects include planets, moons, asteroids, and comets. The solar system is located in the Orion arm of the Milky Way galaxy.

OUR SOLAR SYSTEM

As they did on the scale of the sun, the solar system's size is tiny. The solar system is a collection of objects that orbit the sun. The objects include planets, moons, asteroids, and comets. The solar system is located in the Orion arm of the Milky Way galaxy.

OUR SOLAR SYSTEM

As they did on the scale of the sun, the solar system's size is tiny. The solar system is a collection of objects that orbit the sun. The objects include planets, moons, asteroids, and comets. The solar system is located in the Orion arm of the Milky Way galaxy.

宇宙原理(cosmological principle)

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。)

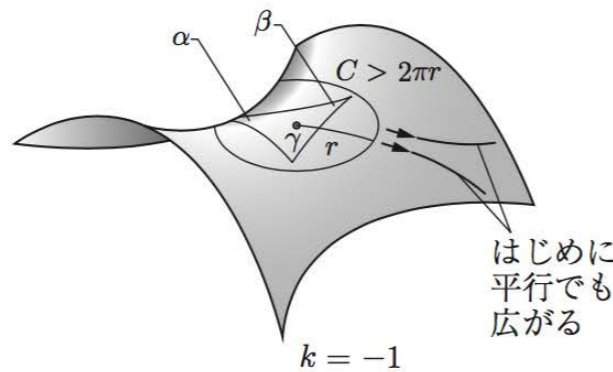
宇宙原理 (物理用語バージョン)

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.)

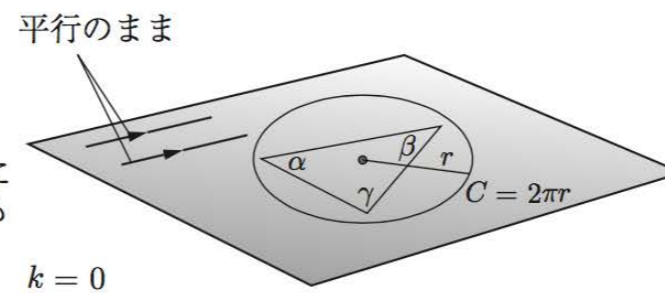
➡ 球対称時空として, 3つのタイプが許される

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



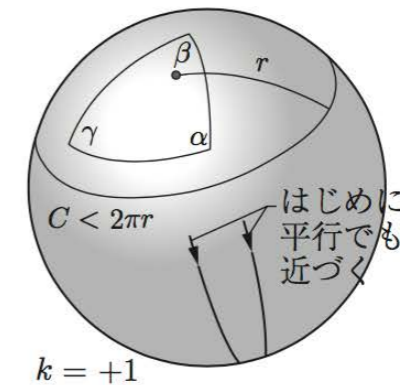
開いた宇宙

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



平らな宇宙

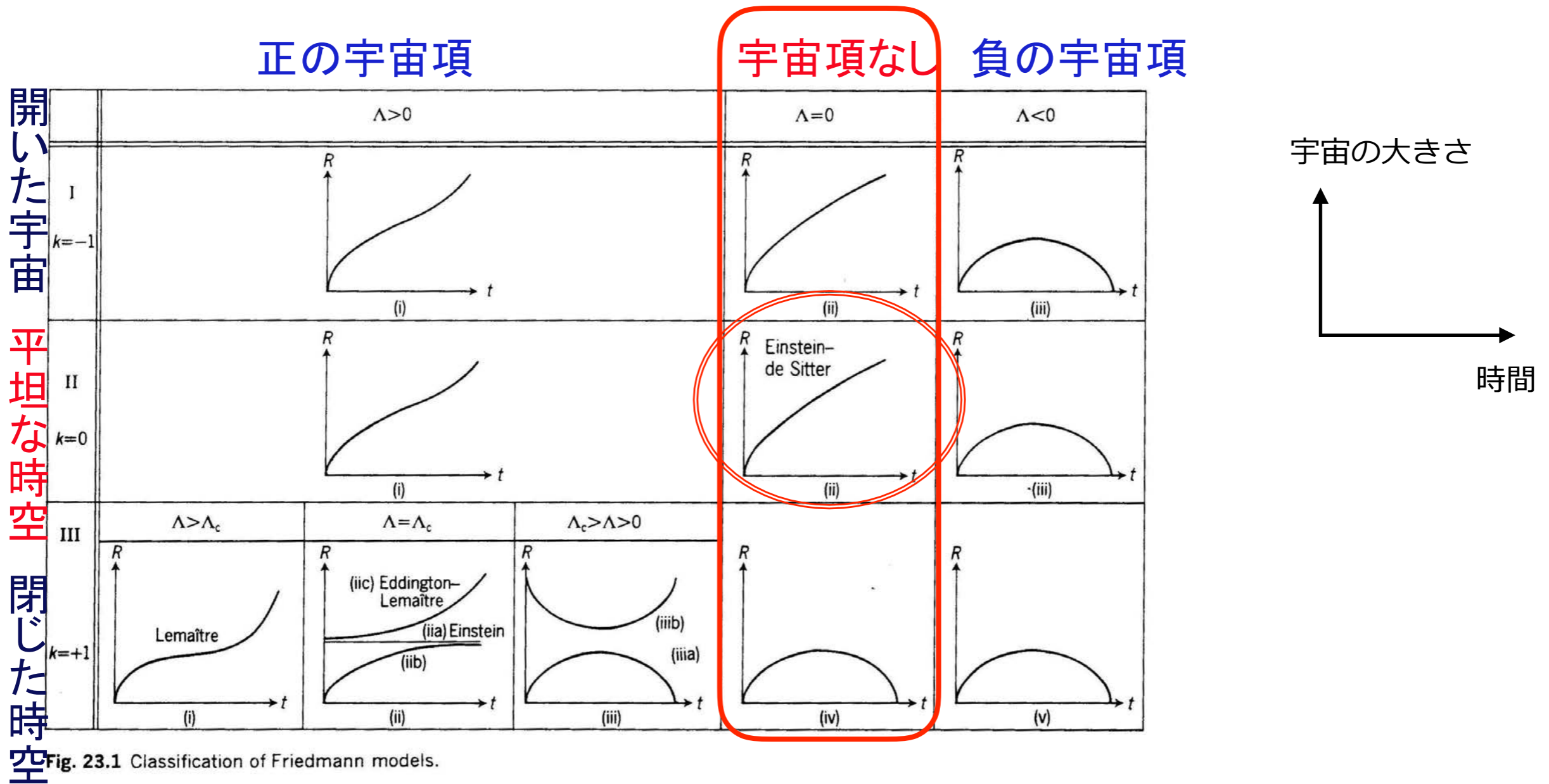
(c) 閉じた宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma > 2\pi$



閉じた宇宙

宇宙全体は膨張・収縮する？

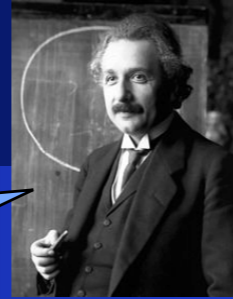
➡ 一般相対性理論（時空の方程式）を使って、3つのタイプを計算すると、膨張したり収縮したりする宇宙の解になった



➡ 宇宙は不変のもの、と考えていたアインシュタインは困った

宇宙全体は膨張・収縮する？

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。

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.)

ハッブル・ルメートルの法則 (遠方天体ほど赤方偏移)

宇宙膨張の発見!

「遠方の星ほどドップラー効果で赤方偏移している」

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

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

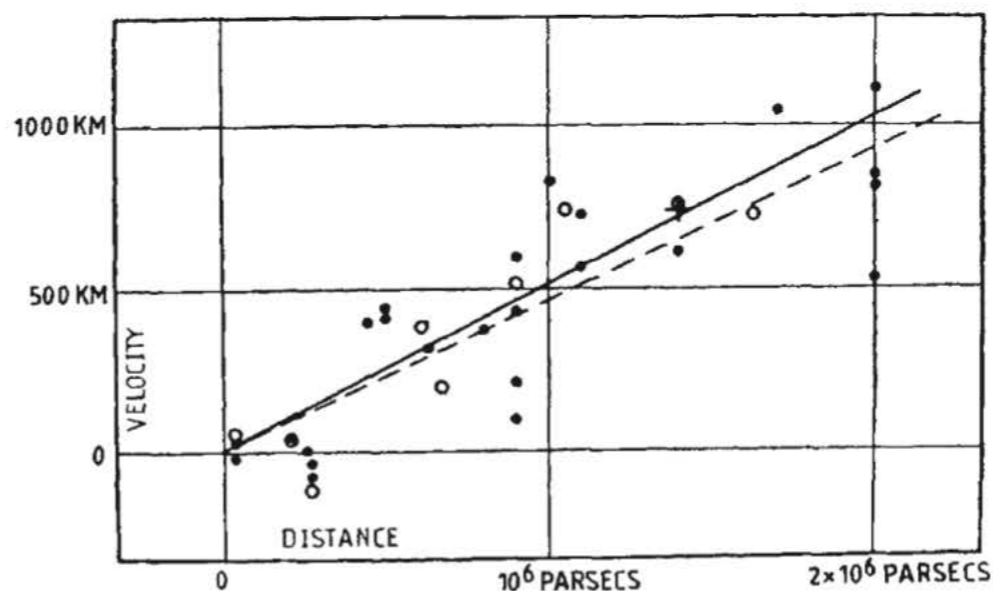
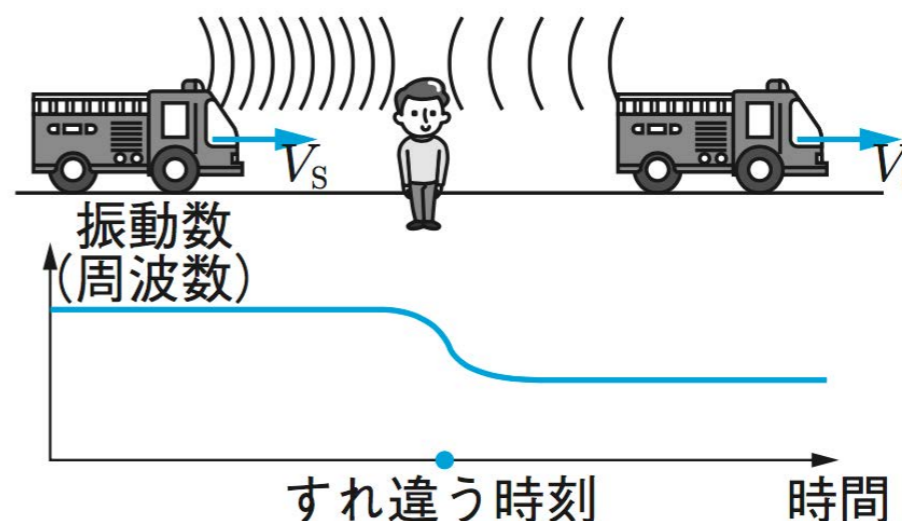
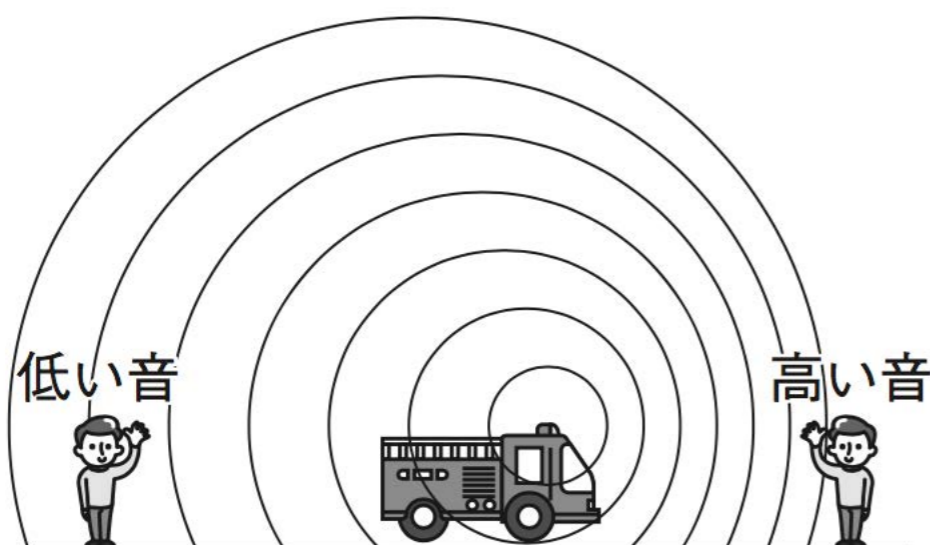


図 5.7 ハッブルが 1929 年に発表した図. 横軸は距離, 縦軸は銀河の後退速度. このグラフの傾きがほぼ一定になることが, ハッブルの法則である. ハッブルが報告した値は, $H_0 = 530 \text{ km/s/Mpc}$ だった. 現在値は $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$.

距離の単位 【赤方偏移, red shift parameter z 】

名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年周視差が ± 1 秒角
▶ 赤方偏移	z		本来の光の波長のずれの比

光のドップラー効果から星の遠ざかり方を知り, 宇宙膨張則から距離を測る



遠ざかるとき

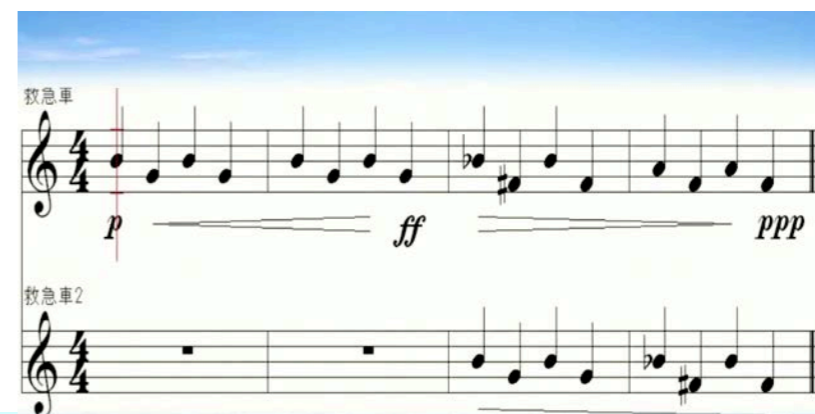
音：低い音

光：赤方偏移

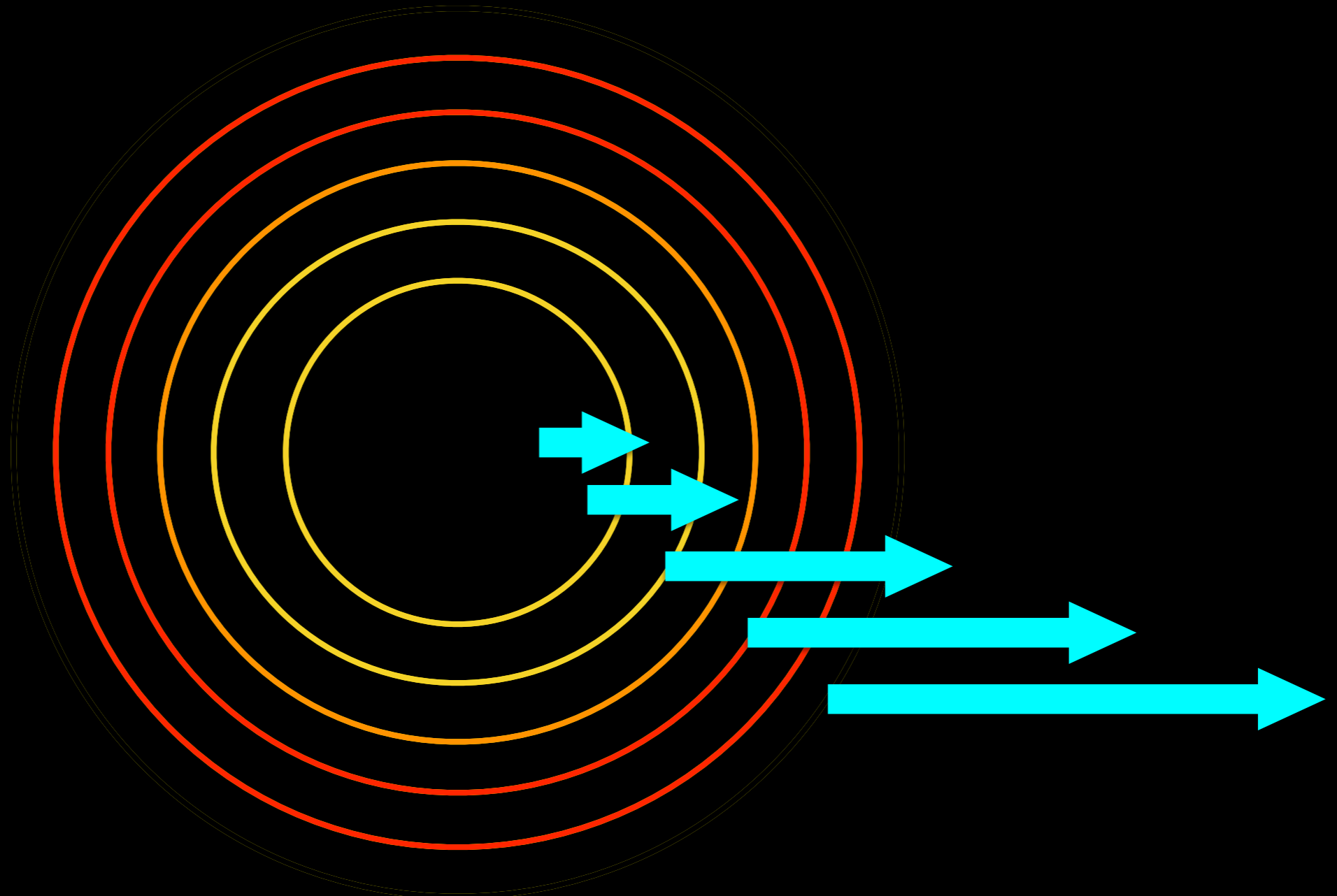
近づくとき

音：高い音

光：青方偏移

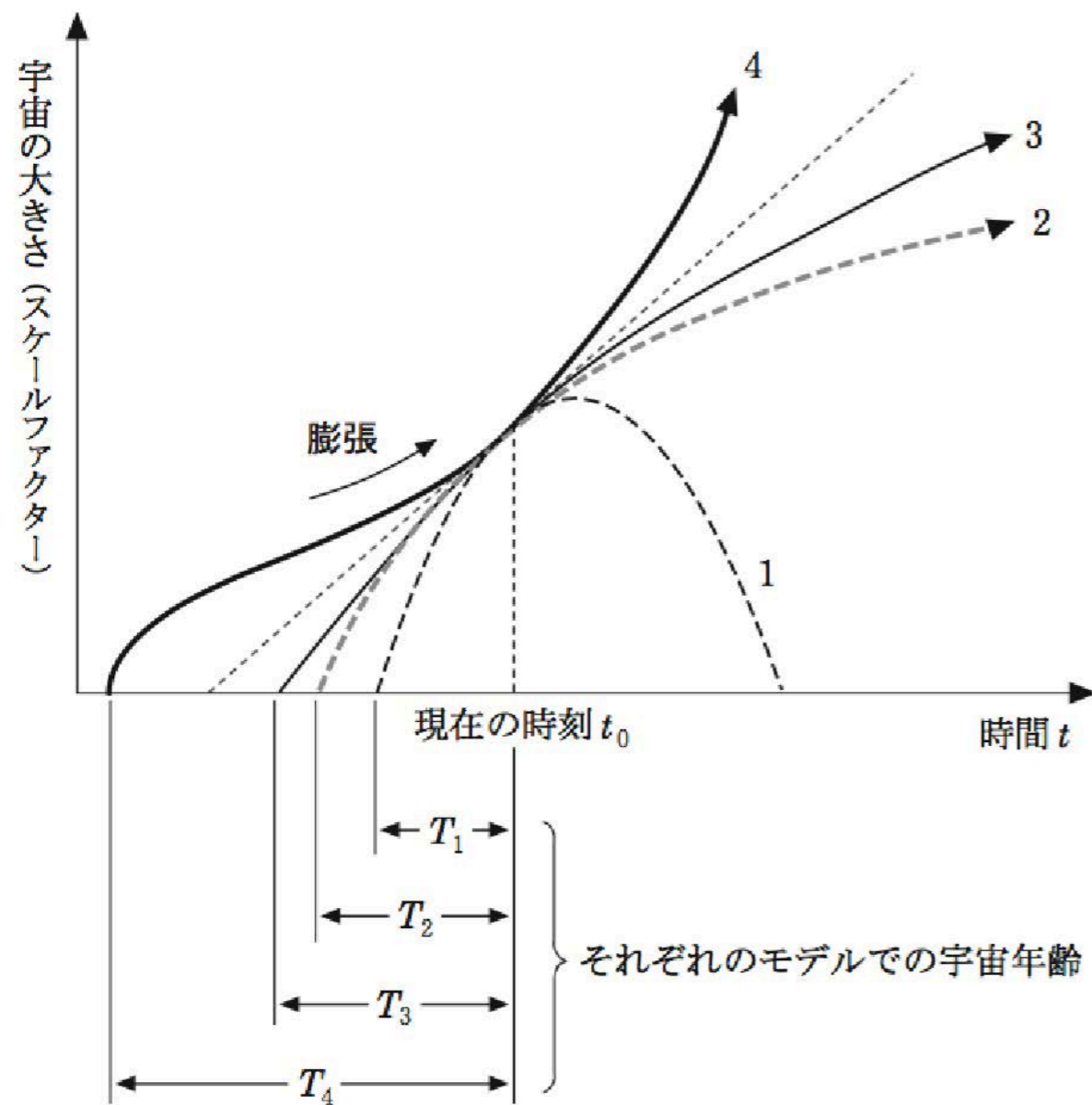


光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない = 宇宙の地平線



光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない = 宇宙の地平線

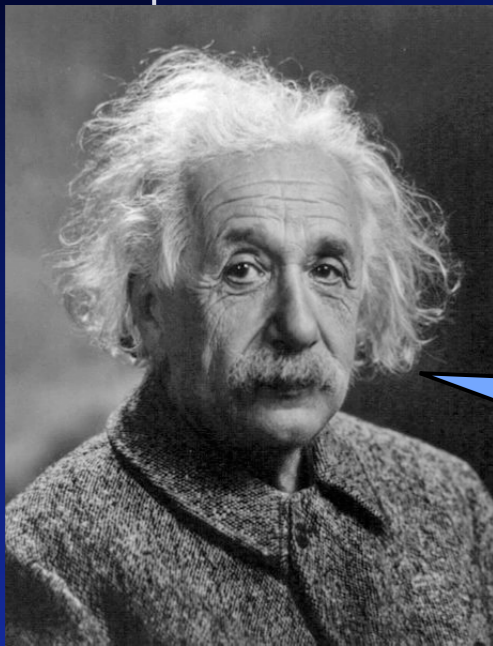
膨張宇宙モデル，現在考えられているのは？



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. $\Lambda > 0, k = 0$.

宇宙全体は膨張・収縮する？

アインシュタイン、 膨張宇宙をついに信じる



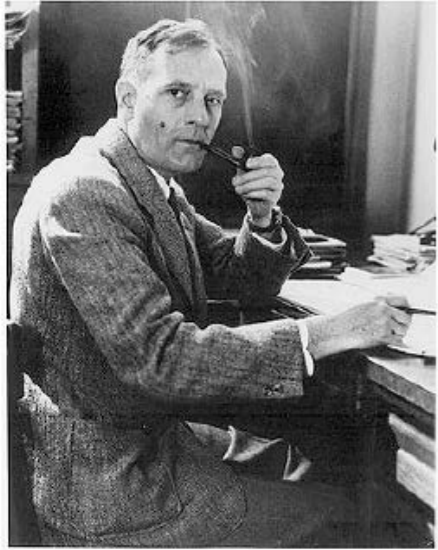
Einstein, 1947

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

「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.)

宇宙膨張はハッブルの発見か

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)



Georges Lemaitre
(1894-1966)



コラム 30 宇宙膨張はハッブルの発見か

宇宙膨張を報告したのは1929年のハッブルの論文だというのが通説だ。速度と距離の比例定数をハッブル定数 H_0 というのも広く知れ渡っている。しかし、ルメートルの1927年のフランス語の論文では、すでに銀河の後退速度が宇宙膨張によるものだと述べられていて、「ハッブル定数」がほぼ同じ値で計算されていた、という事実が、2011年になって研究者間で話題になった。

ルメートルの論文はほとんど知られていなかったが、1931年に英訳されて英国王立天文学会誌に掲載されている。だが、その際に、ハッブルの業績と重なる部分は故意に訳されずに、抜け落ちていることも指摘された。ハッブル定数の計算に関する式の一部と、本文および脚注がすっぽりと抜け落ちているのである。

ハッブルの観測結果は、図5.7で紹介したが、以前から「これだけまばらなデータから、宇宙膨張をすぐに結論したのはなぜか」という疑問は物理学者の間でよく話題になっていた。ハッブルの慧眼だ、と説明されることも多かったが、直前にルメートルの業績を知っていたなら理解できる。ルメートルは神父でもあったので、「謙虚で超越した聖人 vs 科学発見の先取権に強欲な悪人」という構図も考えられ、かくして、ハッブル本人の悪人説や、ハッブルを怒らせることを恐れた英国王立天文学会悪人説などいろいろな憶測が飛び交うことになった。

2011年の最後になって、この騒動に終止符を打つ報告があった。英訳したのは、ルメートル本人であり、該当箇所を削除したのもルメートルだというのが、その理由については不明であるが、ハッブル悪人説は誤解だったことになる（悪人ではなかったことが証明されたわけではないが）。いずれにせよ、ルメートルの業績について再評価が進んでおり、1927年の彼の論文の引用件数も増加している。

参考：須藤靖，日本物理学会誌，2012年5月号，p311

火の玉宇宙論の誕生

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。

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」

1950年，宇宙初期はじめの3分間で，
H, Heまで合成される。（林忠四郎）

→ 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**

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

Physical Review, 1948/4/1



NASA G-68-10,414

「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

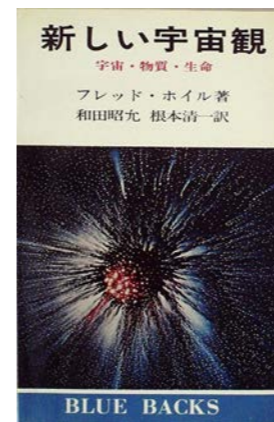
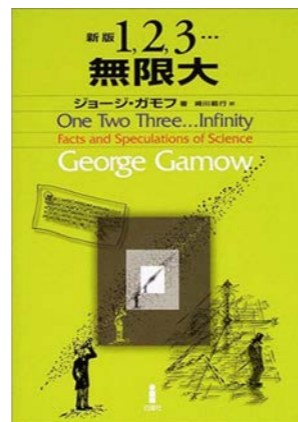
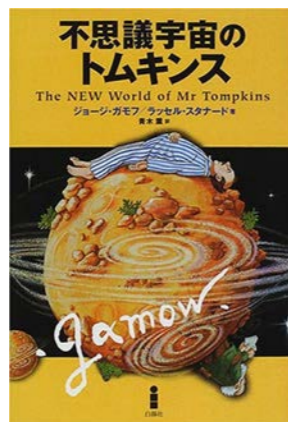


彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている

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

ガモフ

George Gamow
(1904–1968)



「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしても新たに物質が生成していれば大丈夫



ホイール

Fred Hoyle
(1915–2001)

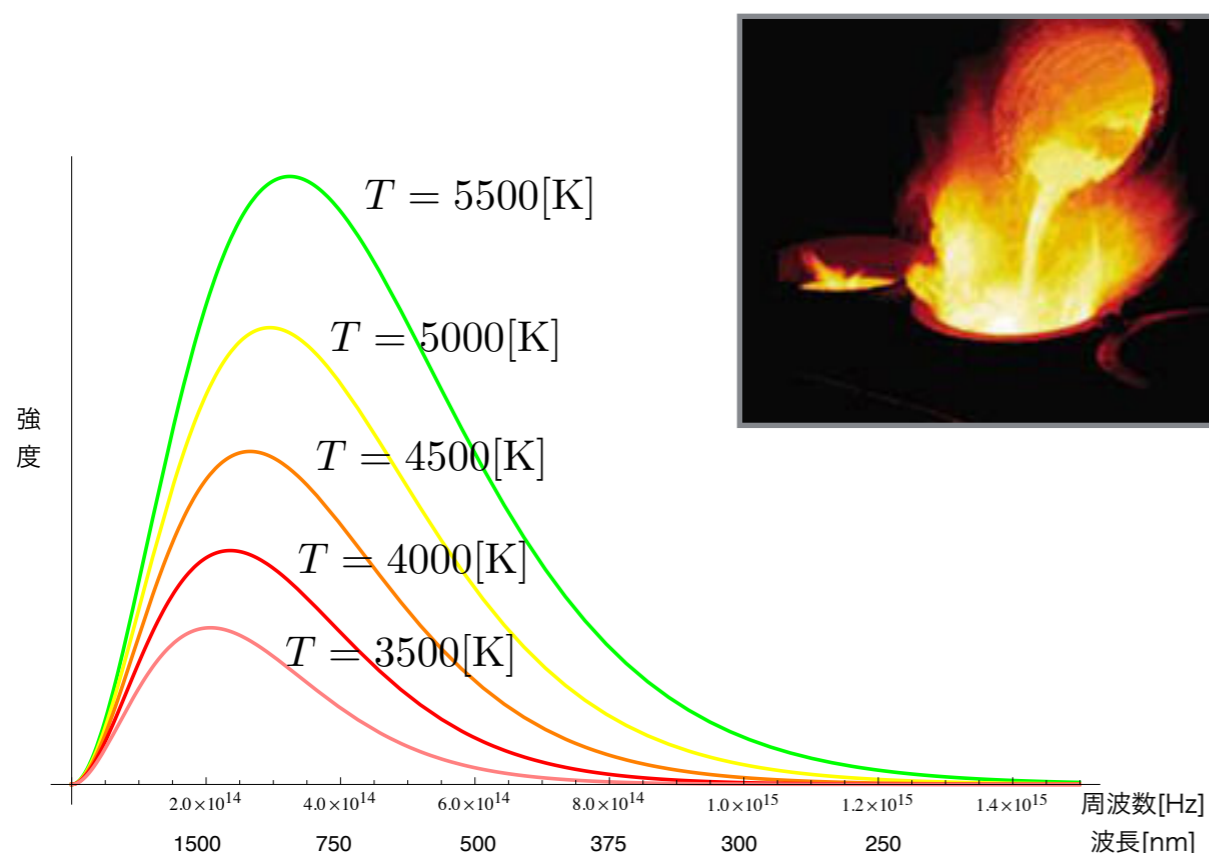
「宇宙には始まりがあった」

「宇宙に始まりも終わりもない」

表 5.1 ビッグバン宇宙モデルと定常宇宙モデルの比較.

	ビッグバン宇宙モデル	定常宇宙モデル
宇宙膨張	宇宙全体が1点からはじまり、膨張を続けている。過去は高温高密度の火の玉だったが、現在は膨張のため、温度が低下した。	膨張を続けているが、物質生成がつねに行われているので、宇宙の物質密度は一定である。宇宙の姿は、過去も現在も不変である。
宇宙マイクロ波背景放射	過去の火の玉宇宙の名残りとして5K～7Kで存在するはずだ。	存在する必要はない。
元素の存在比	元素合成の理論から、軽元素(H, He)の存在比は説明できた。それ以外はまだできていない。	(説明せず)
宇宙年齢	宇宙膨張を観測することによって、宇宙年齢が決まる。	宇宙は大局的に不変なので、宇宙年齢を考える必要はない。
宇宙誕生	宇宙はある時刻にはじまった。しかし、そのメカニズムを説明できない。	議論する必要はない。

宇宙背景マイクロ波背景放射 (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 **5-7 K** 位

273 K (ケルビン) = 0°C; 0 K = -273°C

1964年, 宇宙背景マイクロ波背景放射 (CMB) の発見



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

273 K (ケルビン) = 0°C; 0 K = -273°C

1964年，宇宙背景マイクロ波背景放射（CMB）の発見

ガモフがペンジアスとウィルソンに宛てた手紙



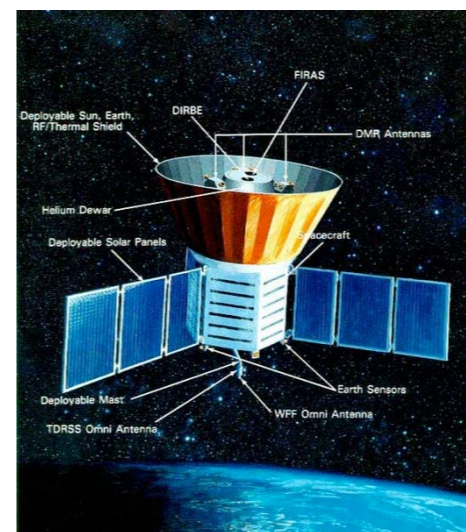
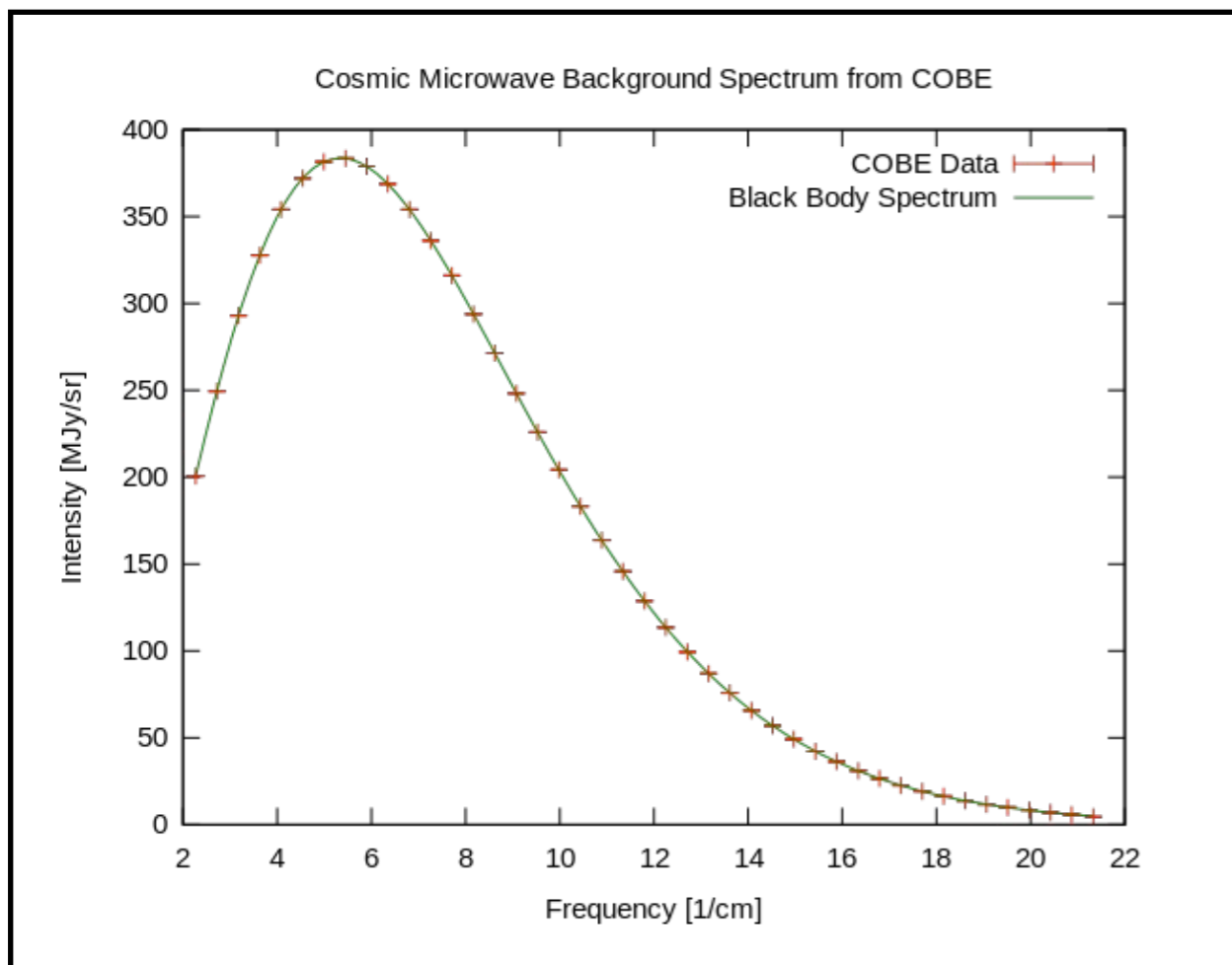
The Sept 29th 1963
 Gamow Dacha
 785 - 6th Street
 Boulder, Colorado

Dear Dr. Penzias,
 Send Thank you for sending me your paper on 3°K radiation. It is very nicely written except that "early history" is not "quite complete". The theory of, what is now known as "primordial fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946; 74, 505, 1948; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present (residual) temperature could ~~can~~ be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5~~7~~°K, and ~~in~~ in my paper (Kong Dansk. Ved. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (p. 42) the formula $T = 1.5 \cdot 10^{-10} / t^{1/2}$ °K, and the upper limit of 50°K. Thus, you see the word did not start with mighty Dicke. Sincerely G. Gamow



3 Kの論文は素晴らしいが，初期の歴史の部分が完全ではありません。現在「火の玉宇宙論」として知られている理論は1946年の私の業績です。

1992年, COBE衛星によるCMBの測定



John C. Mather (1946-)

George F. Smoot III (1945-)

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

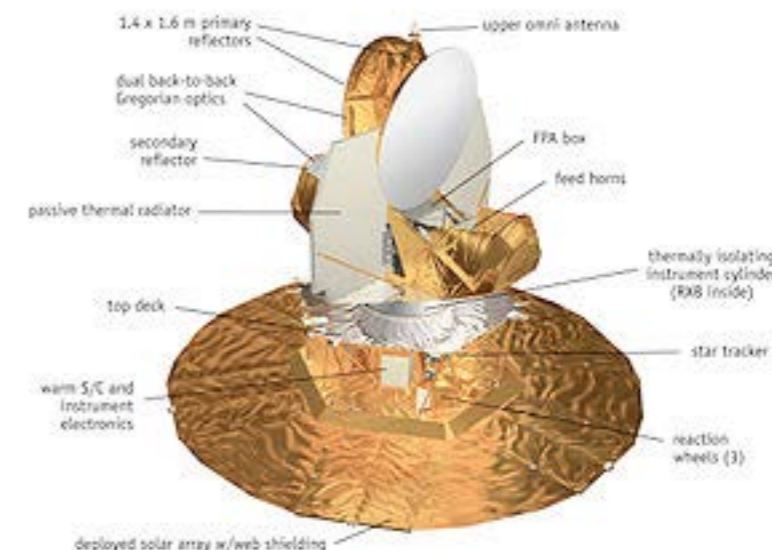
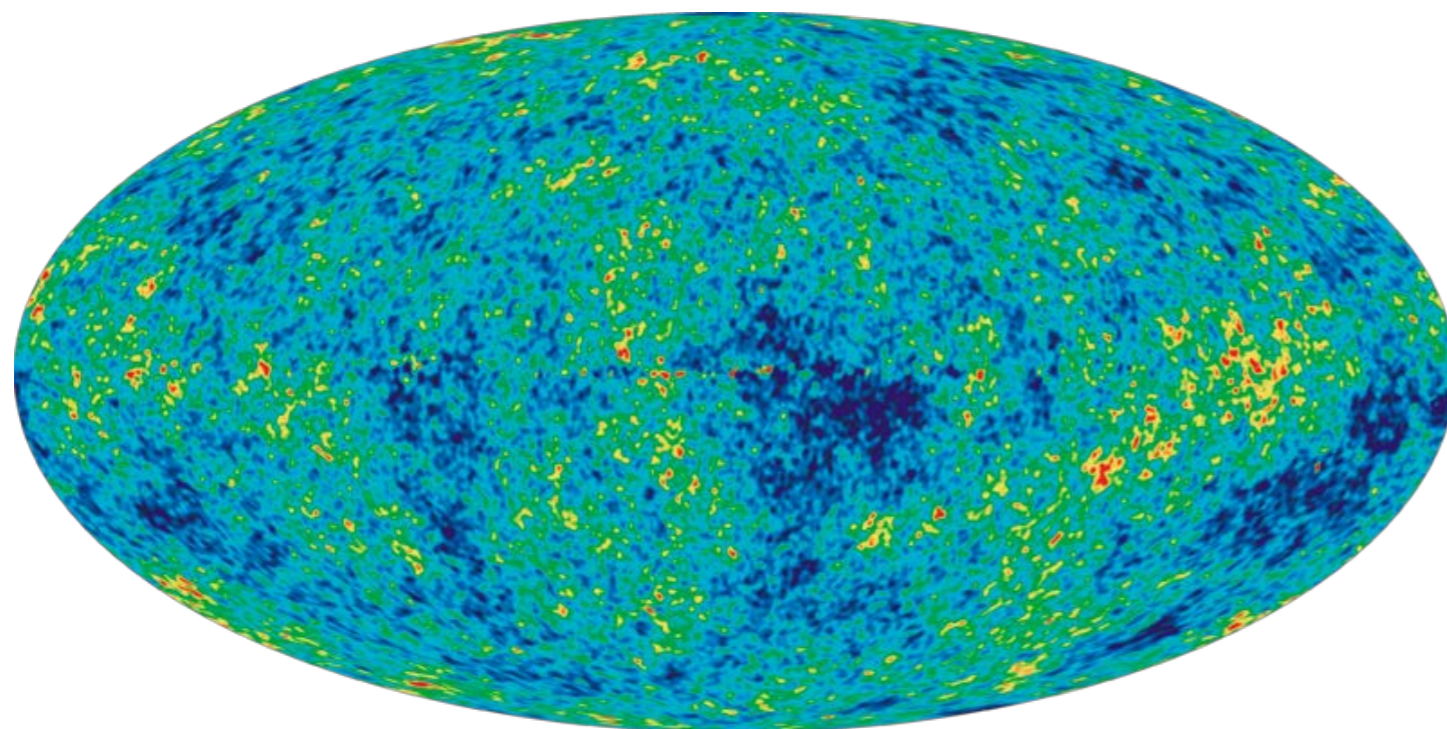
宇宙膨張で温度下がって

~~3.5 K~~

273 K (ケルビン) = 0°C; 0 K = -273°C

2.73 K

2002年, WMAP衛星によるCMBの測定



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。

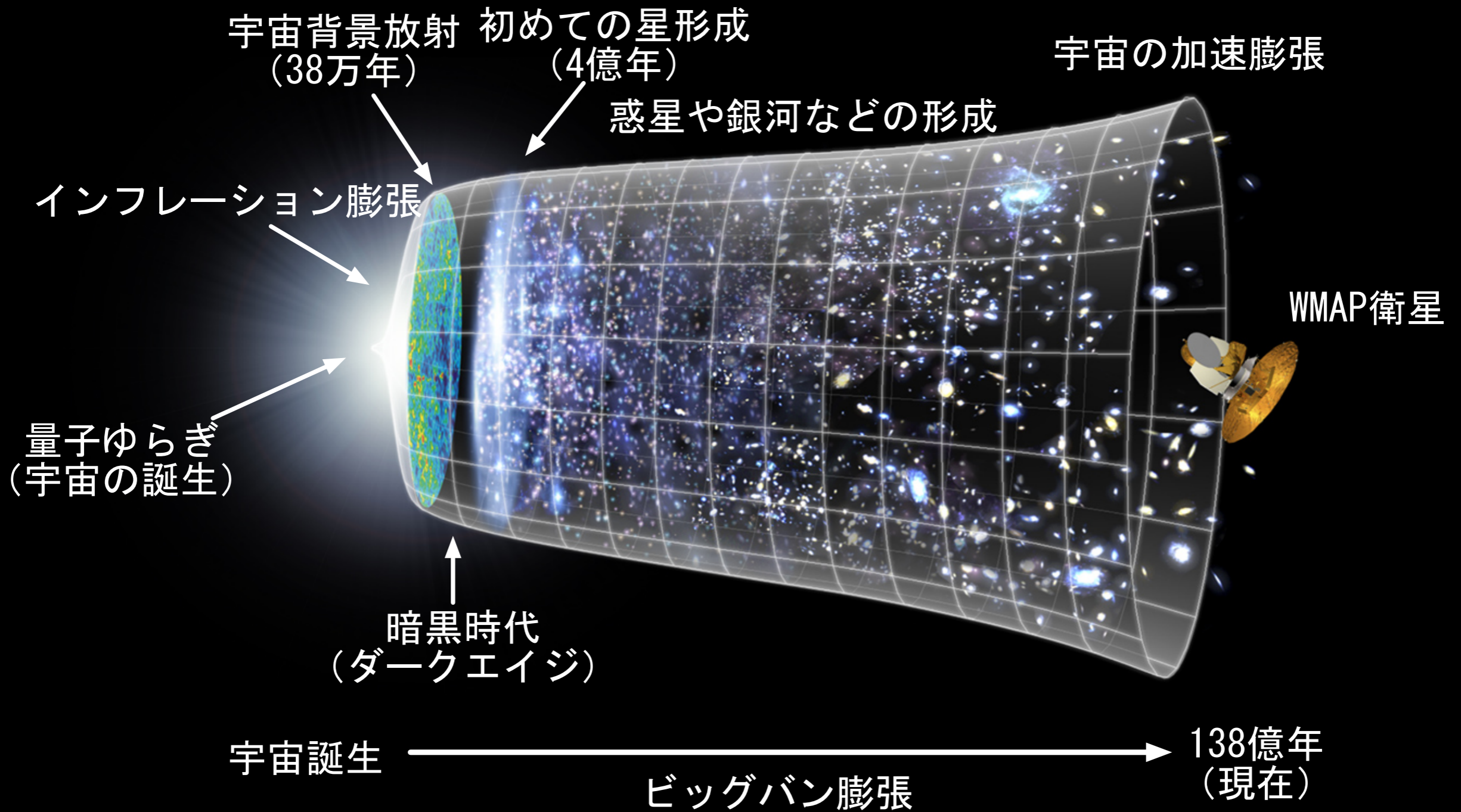
約3000 K

宇宙膨張で温度下がって

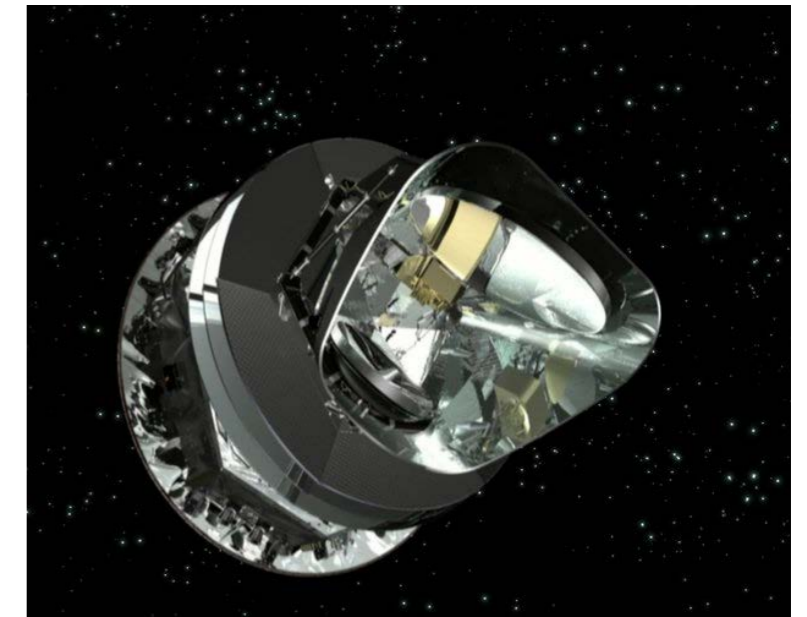
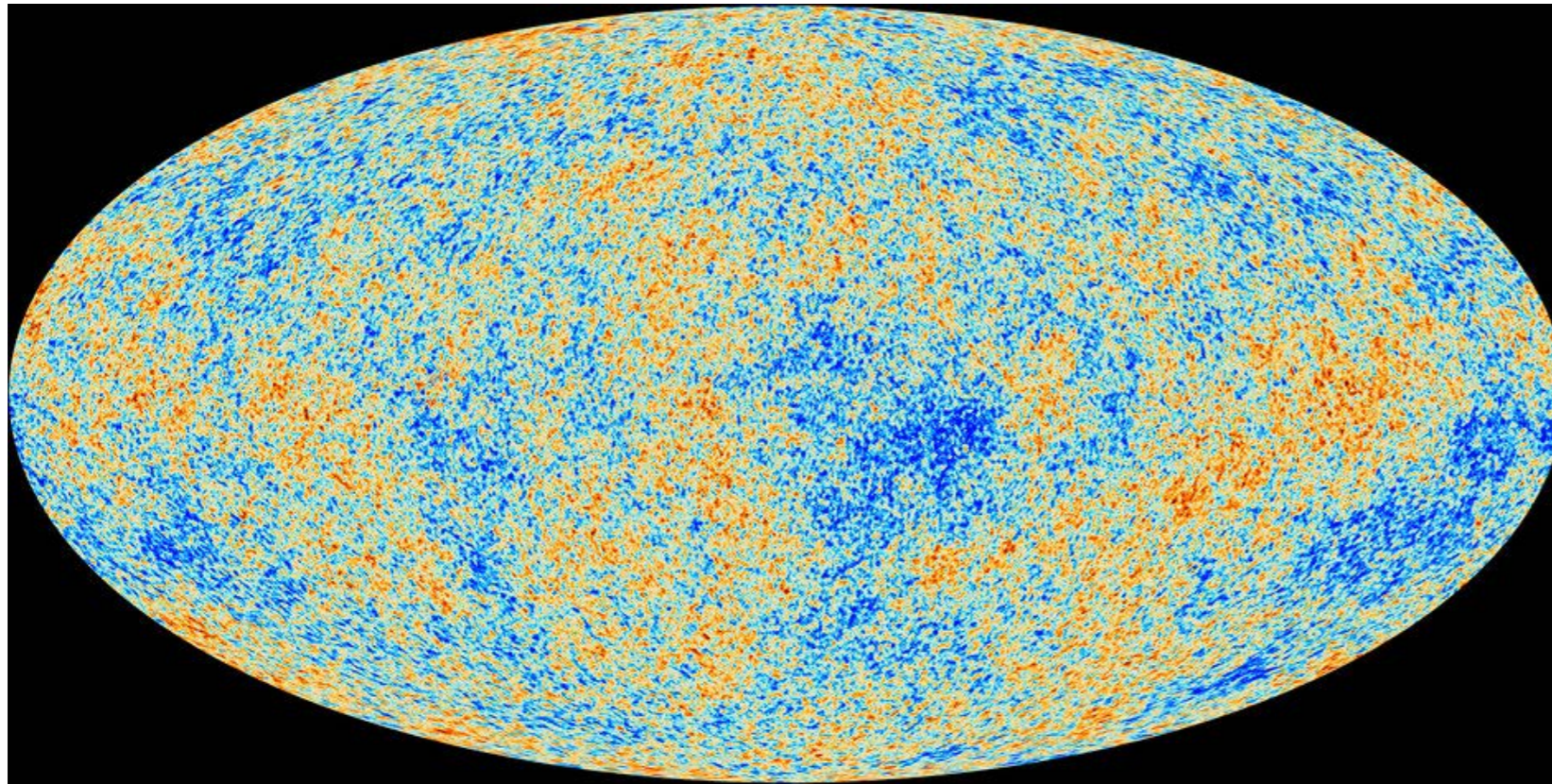
~~2.73~~ K 位

2.7251





2013年, Planck衛星によるCMBの測定

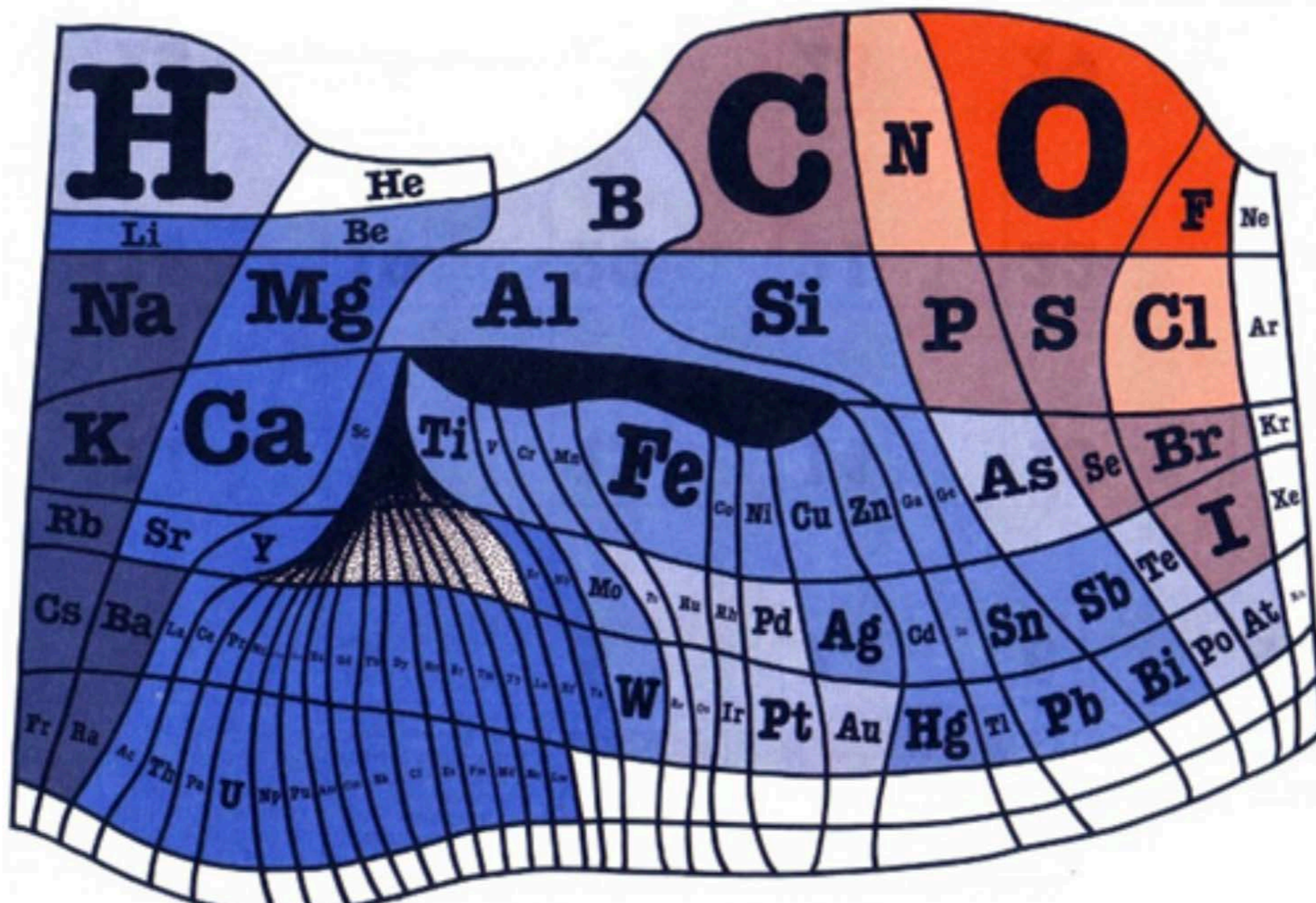


38万年

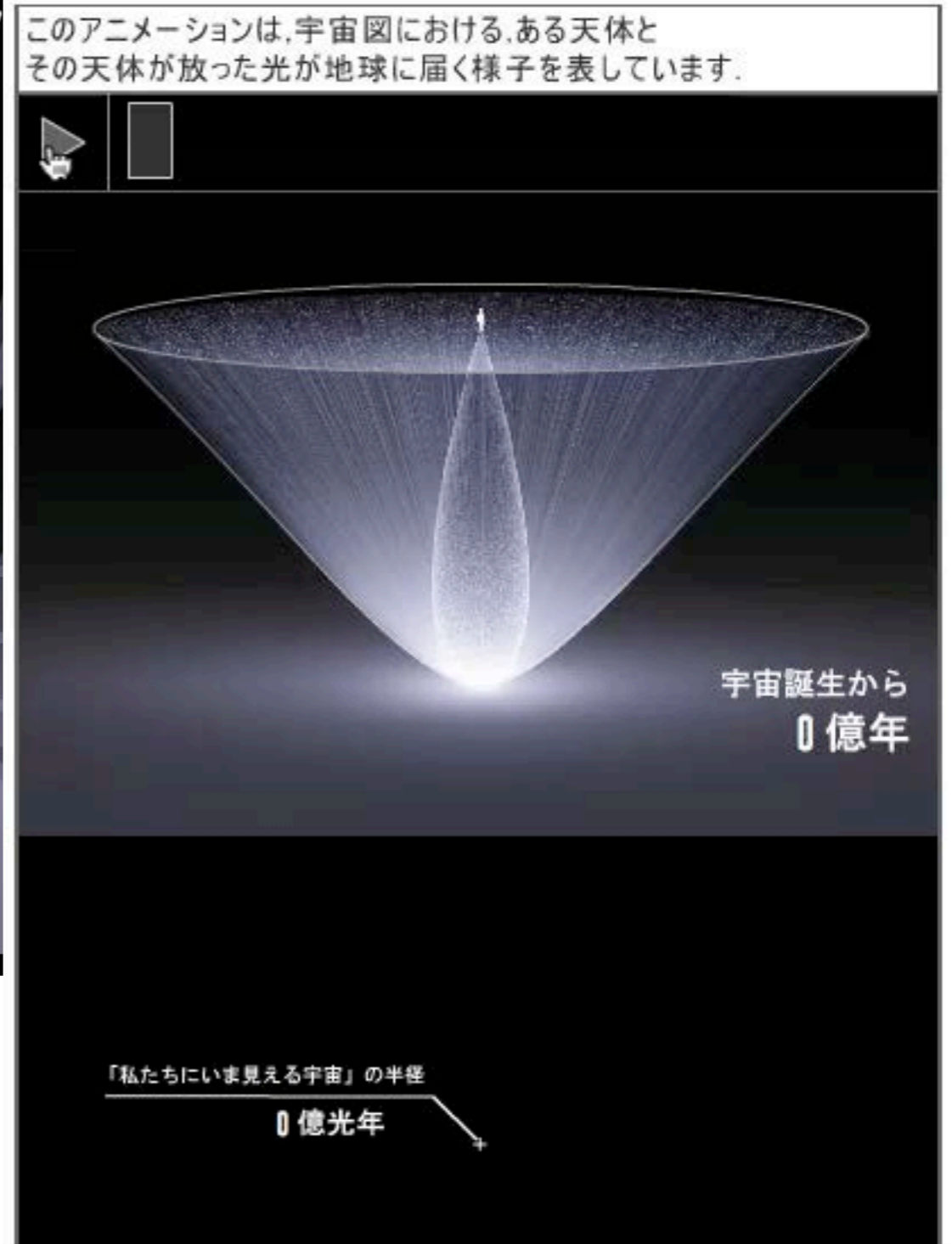
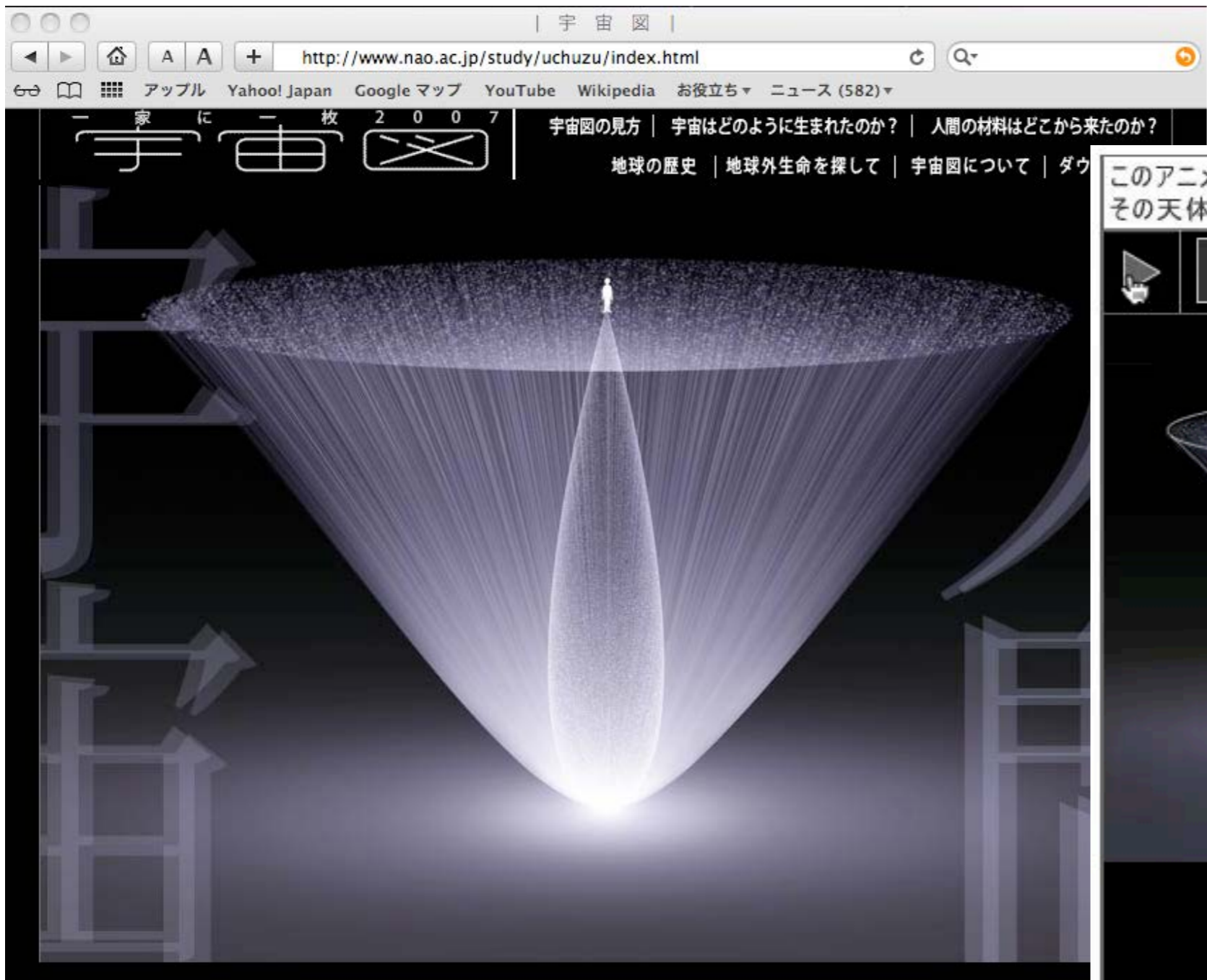
宇宙誕生後、~~37万9000~~年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。
約**3000 K** 宇宙膨張で温度下がって ~~2.7251~~ K 位

2.72548 ± 0.00057 K

水素, 重水素の存在比の観測と理論が合う



<http://chemreflux.blogspot.jp>



ルール1 宇宙を見ることは、昔を見ること

太陽は、8分ほど昔の姿。すばる（散開星団M45）は400年ほど昔の姿。遠くを見るほど、過去の姿をみている。

ルール2 見える宇宙と見えない宇宙がある

我々は「現在の宇宙」を見ることはできない。見えるのは、中央の「しずく」の部分。

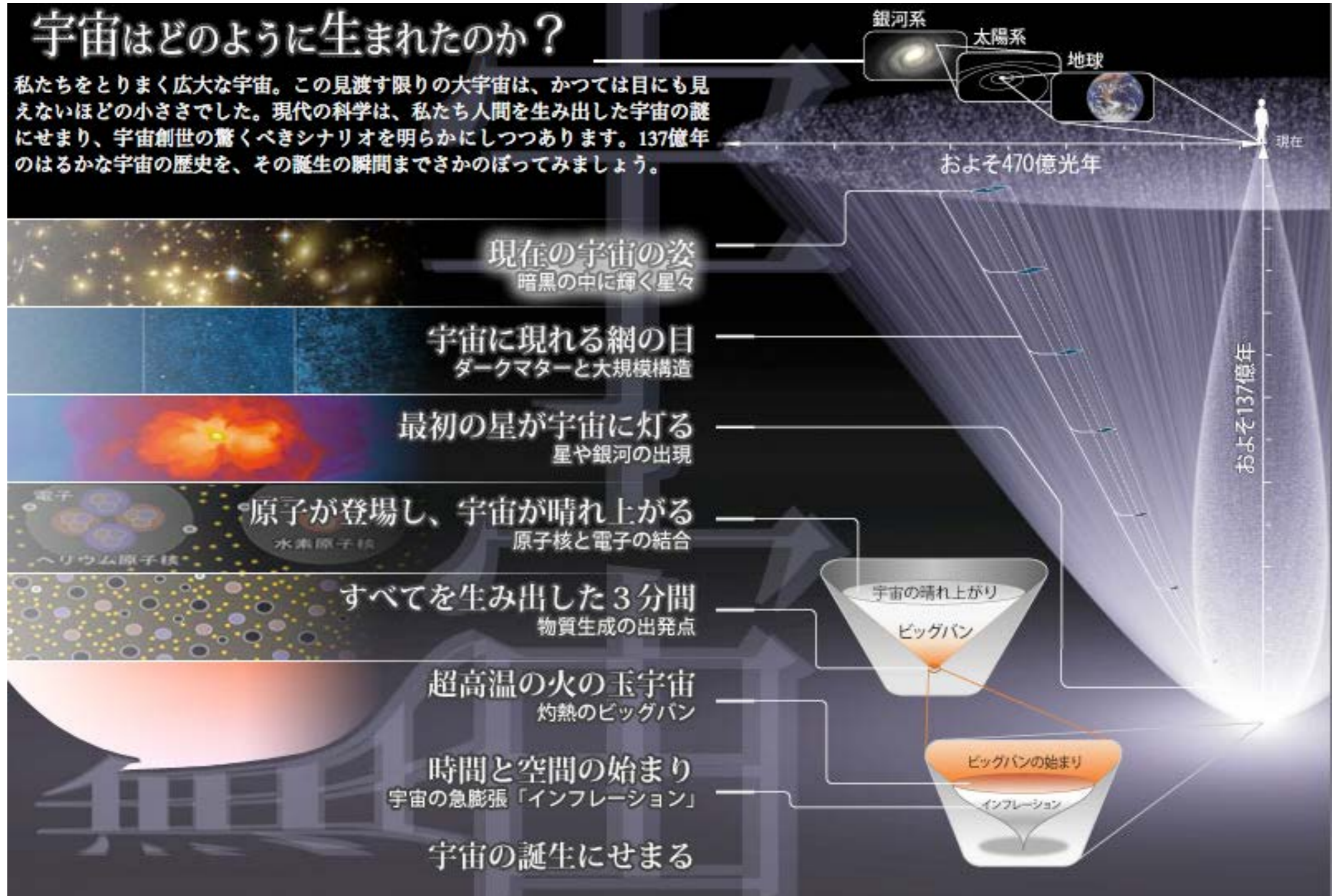
ルール3 宇宙では、遠くの距離は要注意

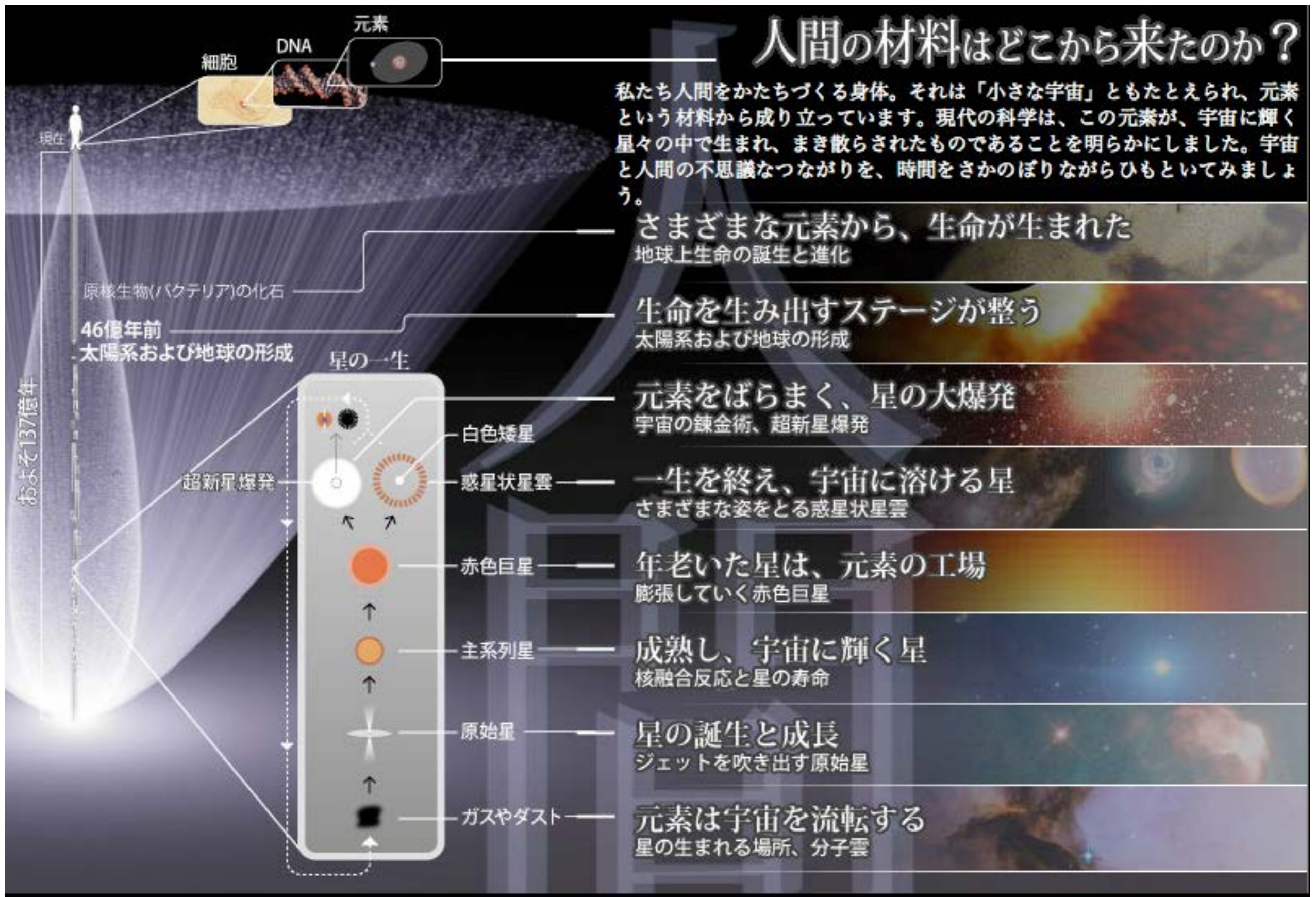
我々が見える一番遠くからきた光は、「138億光年」先。しかし、そのときに放たれた光源は、宇宙膨張によって、470億光年のかなた。

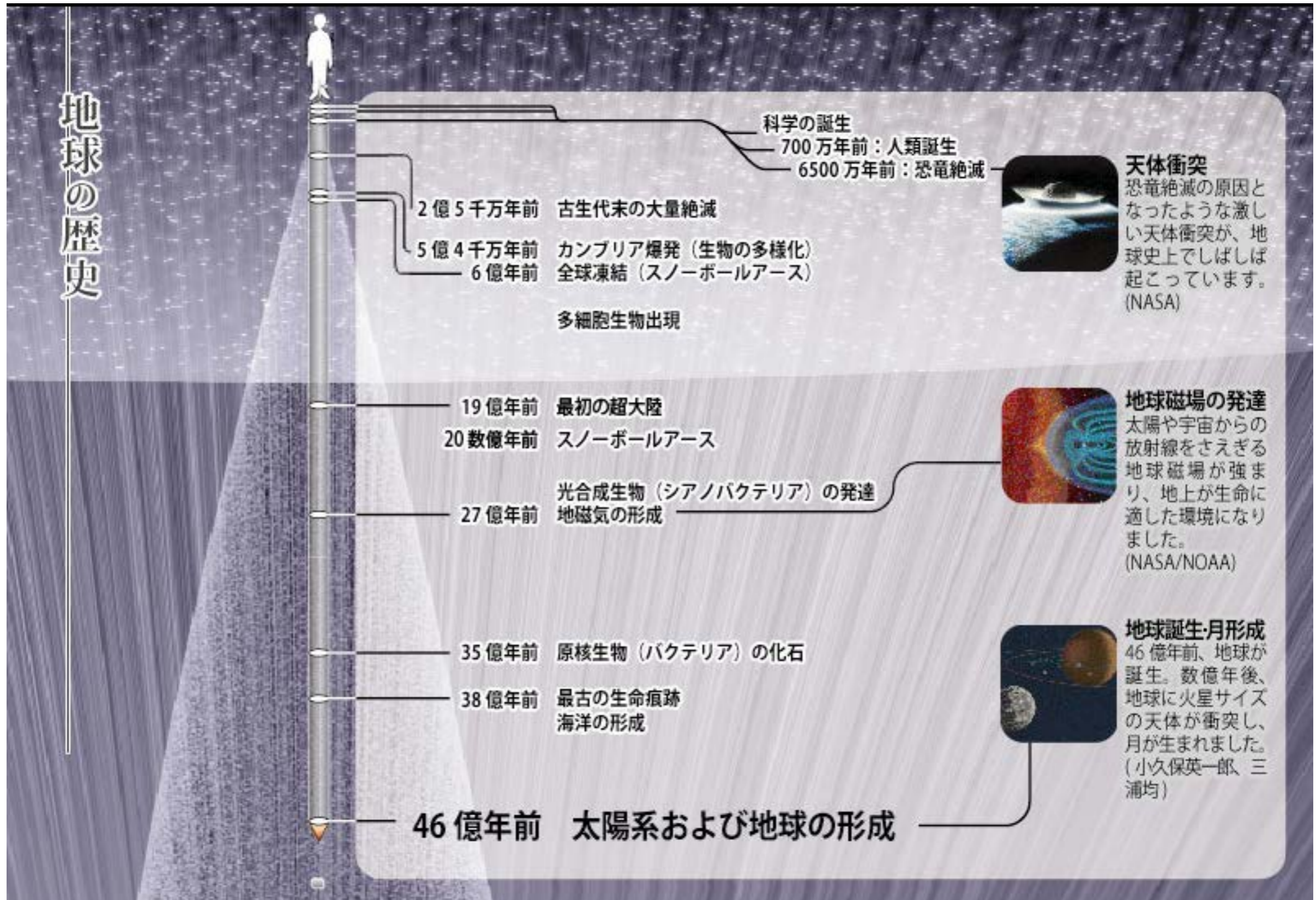


私たちに見える宇宙＝しずく形の表面。

宇宙がどうやって誕生したのか = ラッパ形の底の部分がどうなっているのか。
宇宙がどのように広がってきたか = ラッパ形の表面の形はどうなっているのか。
宇宙は我々の宇宙だけか = ラッパ形の向こうにも宇宙は他にあるのか。







宇宙図の見方

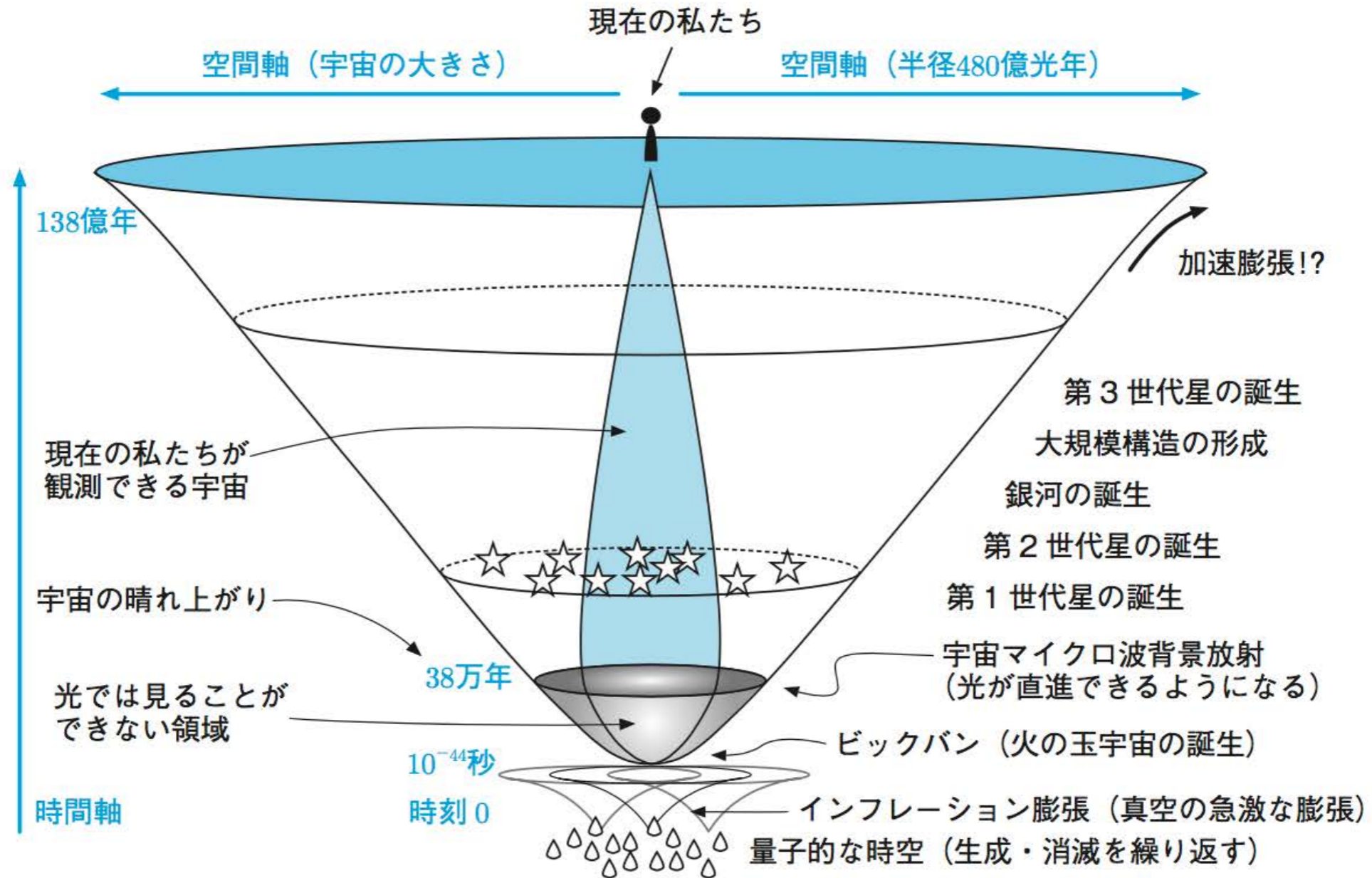


図 5.18 ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がり方を横軸にして示す。現在の私たちは図の上の中央部分にいる。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の涙のしずくの部分に限られる。

宇宙図の大きさ 半径480億年

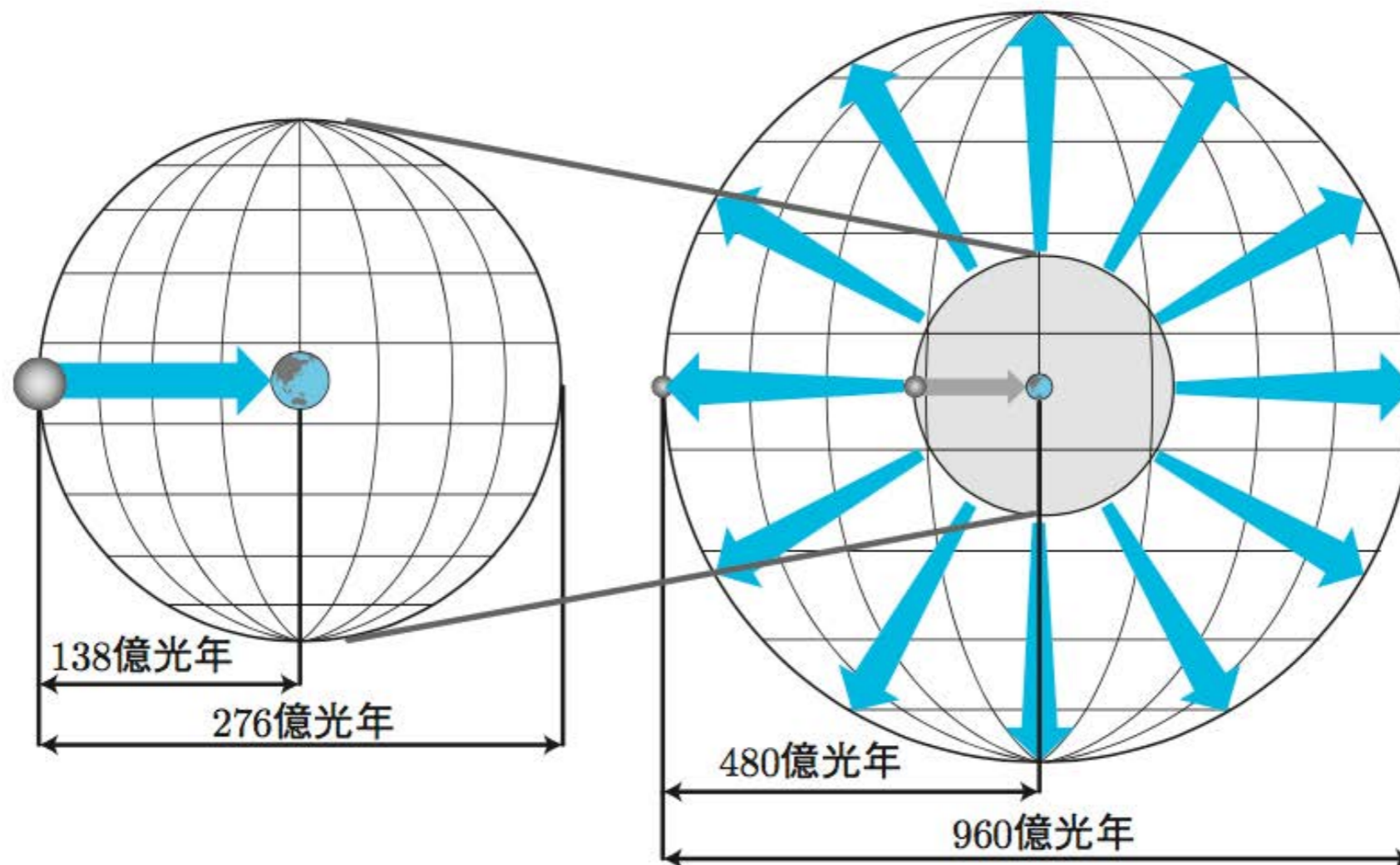


図 5.19 [左] 宇宙誕生直後から進む光を見て、私たちは宇宙の年齢を 138 億年と理解する。[右] しかし、宇宙は膨張しているのです、現時点での宇宙の大きさは半径 480 億年になる。



宇宙はどうやってはじまったのか.

宇宙に終わりはあるのか.

宇宙は何でできているのか.

宇宙の法則は何か.

宇宙にどうして我々がいるのか.

ダークマター問題

未知の物質？

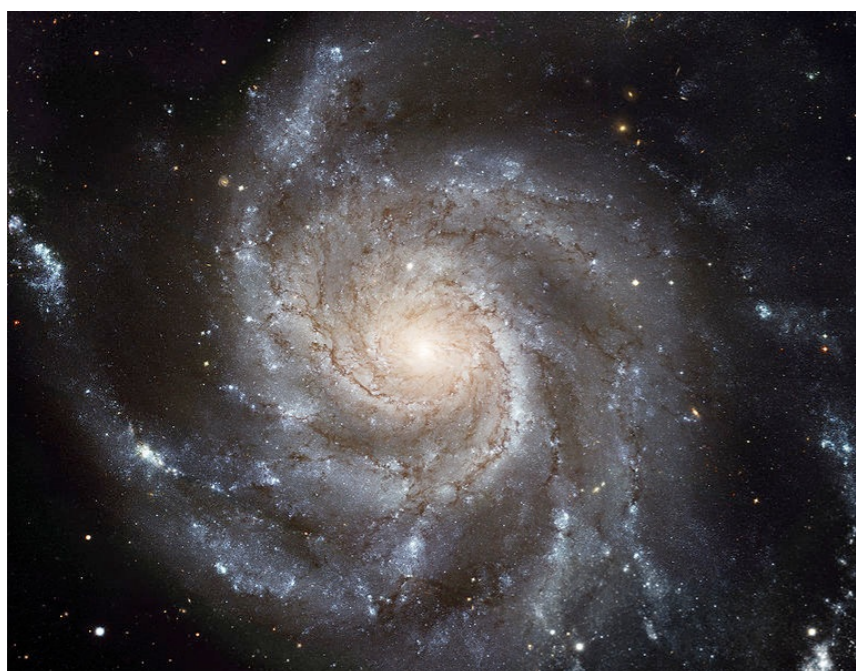
ダークエネルギー問題

加速膨張の原因？

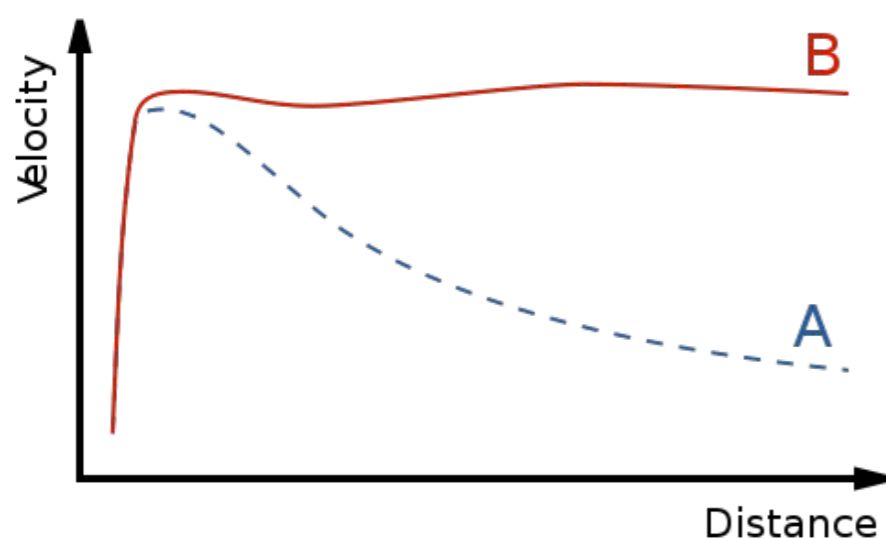
ダークエイジ問題

初代の星はどうやってできた？

見えていない質量が存在する



Vera C Rubin (1928--2016)



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。

◆ Advanced 人工衛星の動きから地球の質量がわかる

ダークマターの存在は、銀河系の星の運動から推測された。その理由はニュートン力学で説明できる。質量 m の人工衛星が地球 (質量 M) の万有引力を受けながら、速度 v で半径 r の円運動をしているとき、運動方程式

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} \quad (5.10)$$

より、 $v = \sqrt{GM/r}$ の関係が得られる。つまり、 v は人工衛星の質量に無関係で、 M と r によってのみ決まる。このことは人工衛星の動きから地球の質量がわかることを意味している。

同じことを銀河系で行ったのが、図 5.33 [右] の (A) のグラフである。見えている星は中心部分に集中しているなのでこのグラフになりそうだが、実際に観測すると (B) のグラフになった。これはダークマターの質量が銀河全体に広がっているため、と考えられている。

重力レンズによるダークマターの検出

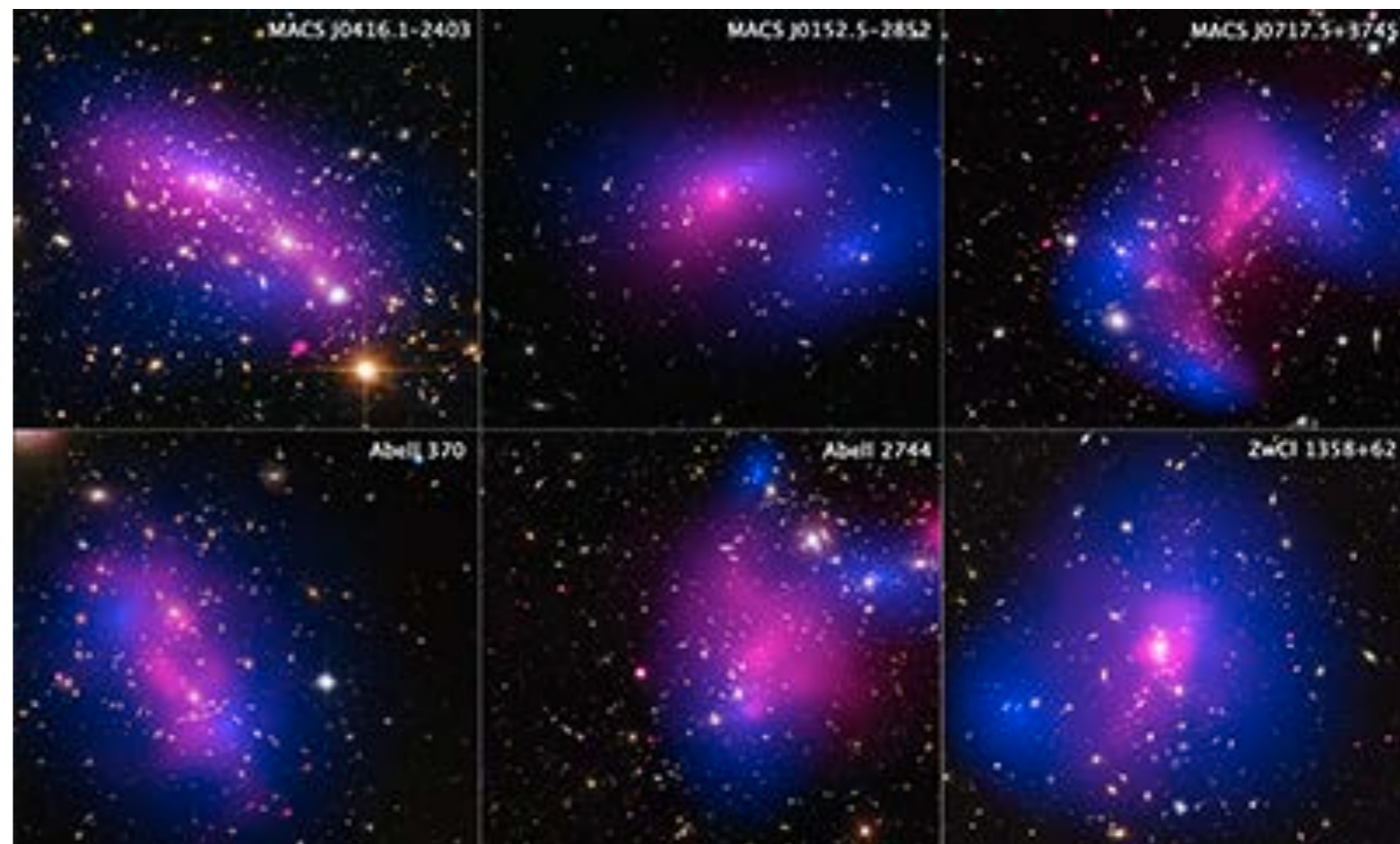
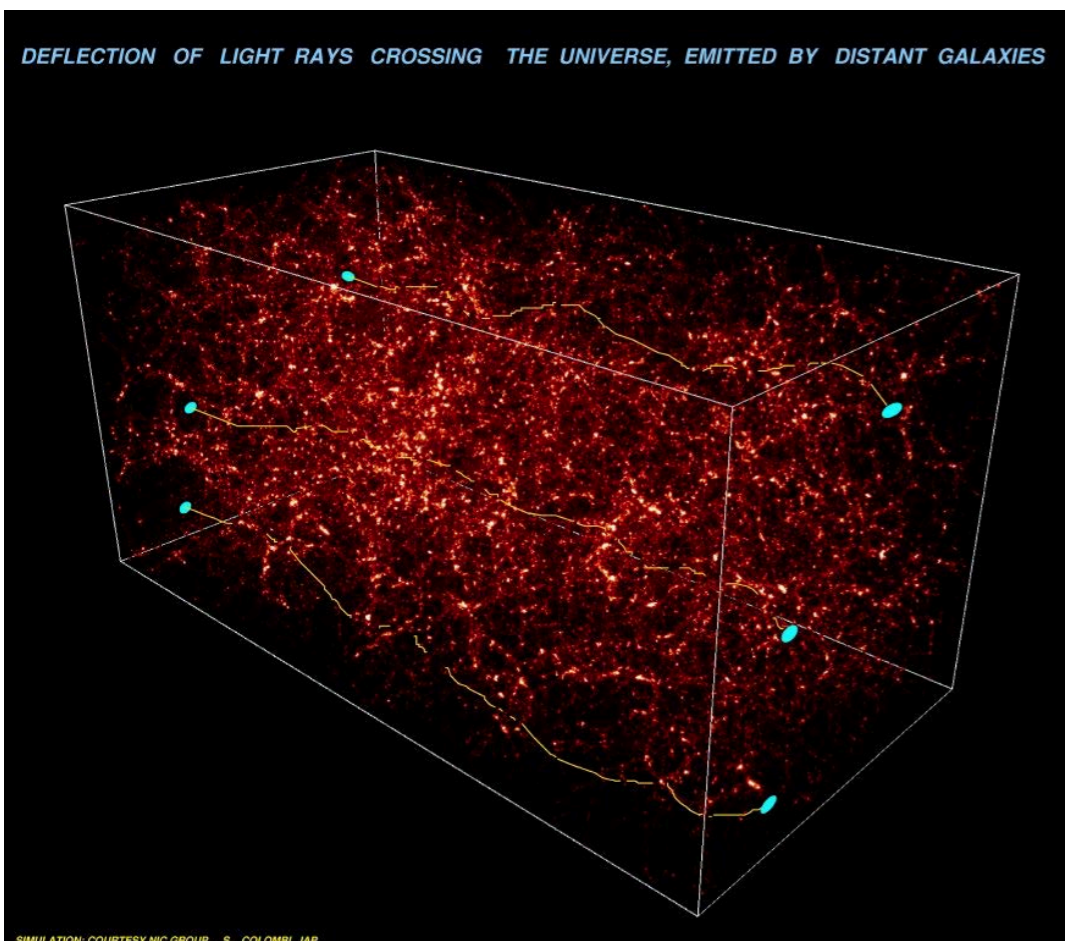


図 6.11: 〔左〕 銀河団のシミュレーション結果に、光の進む様子を描き込んだ図。ダークマターを含んだ銀河によって、光の経路が歪む様子がわかる。

[<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/>]

ダークマターの候補

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

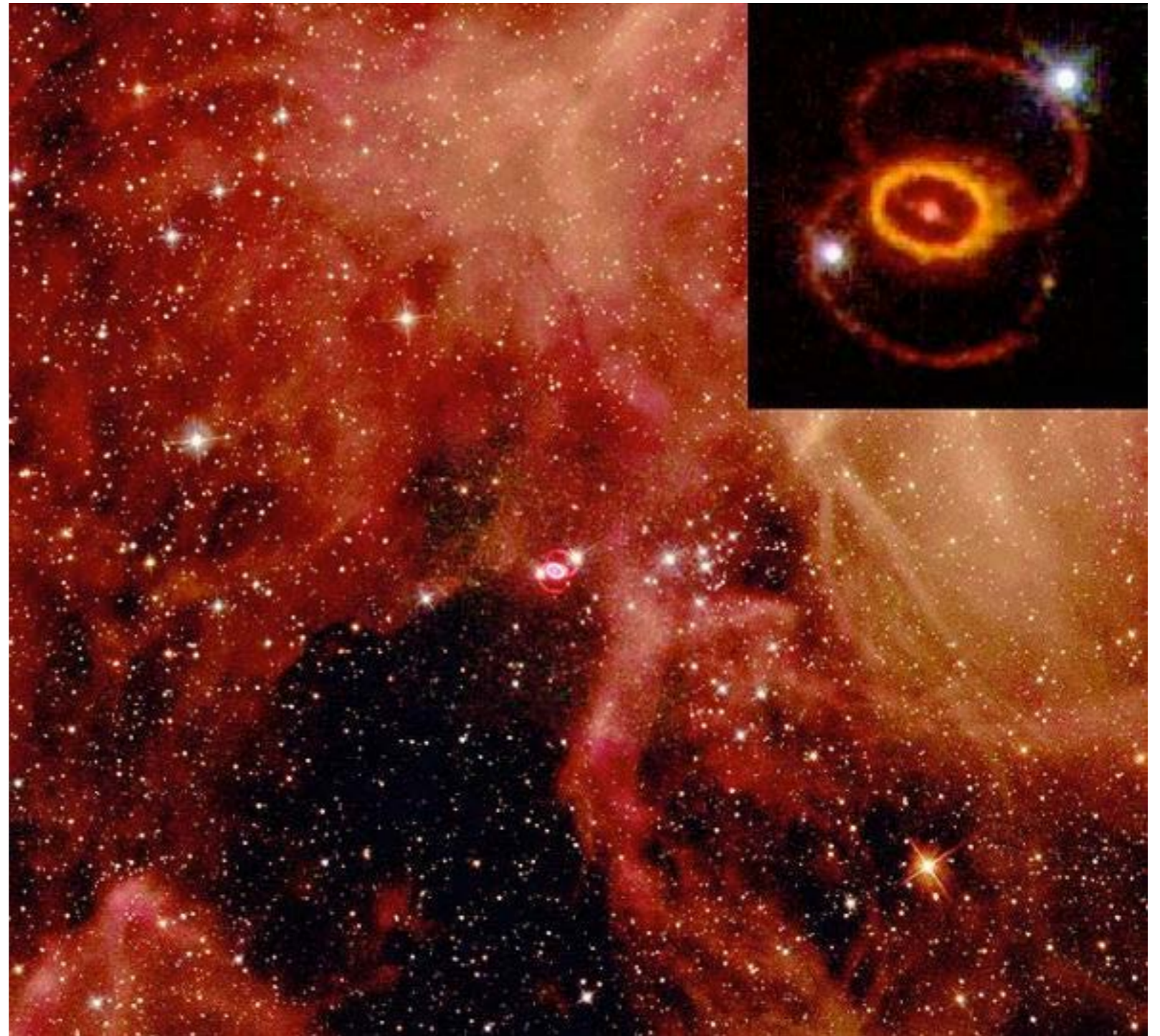
恒星へなれなかった小さな星. これも存在量が未知.

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

超新星爆発統計による宇宙の加速膨張の発見

超新星爆発
= 燃え尽きた星の
最後の爆発

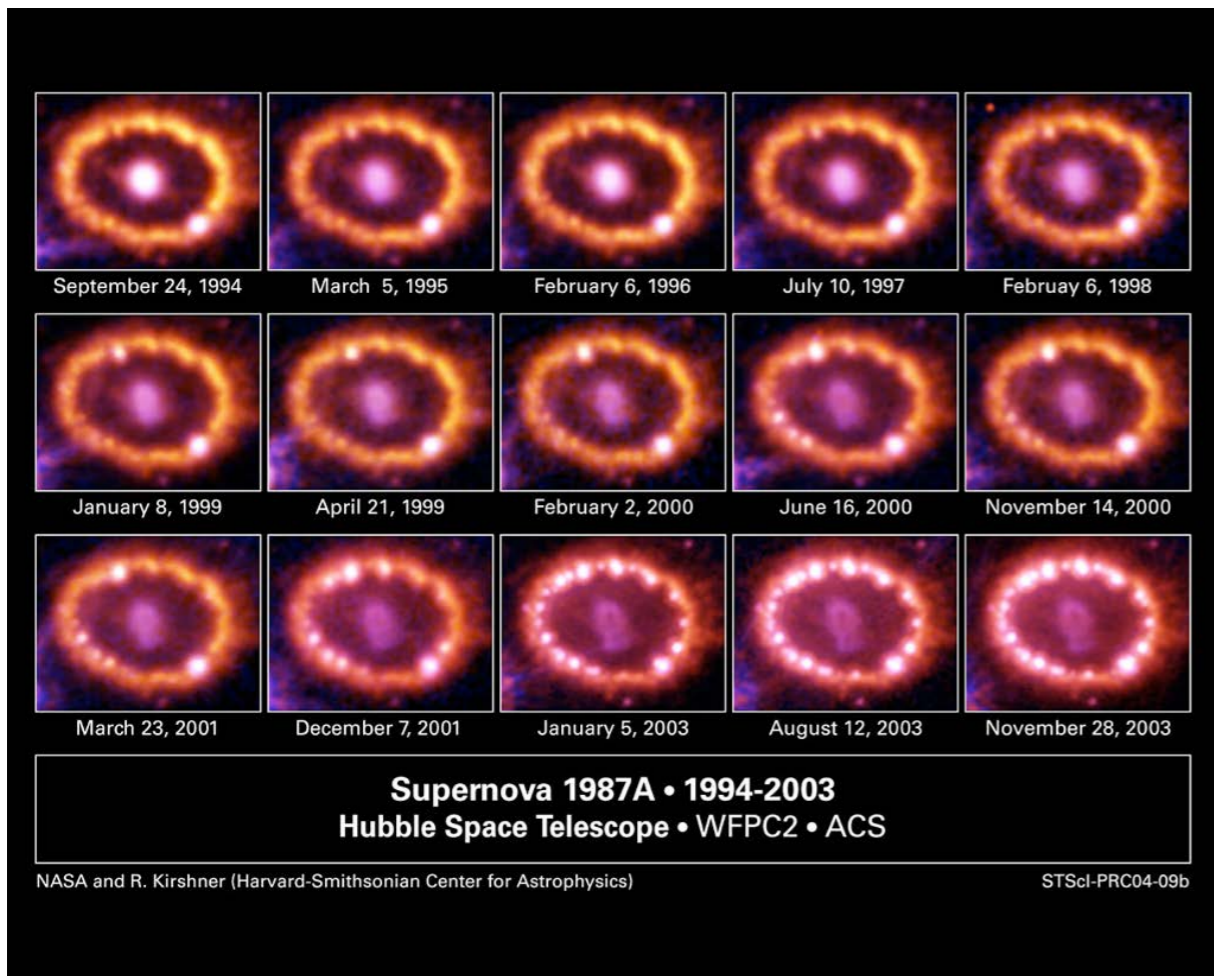


SN1987Aの2007年の画像

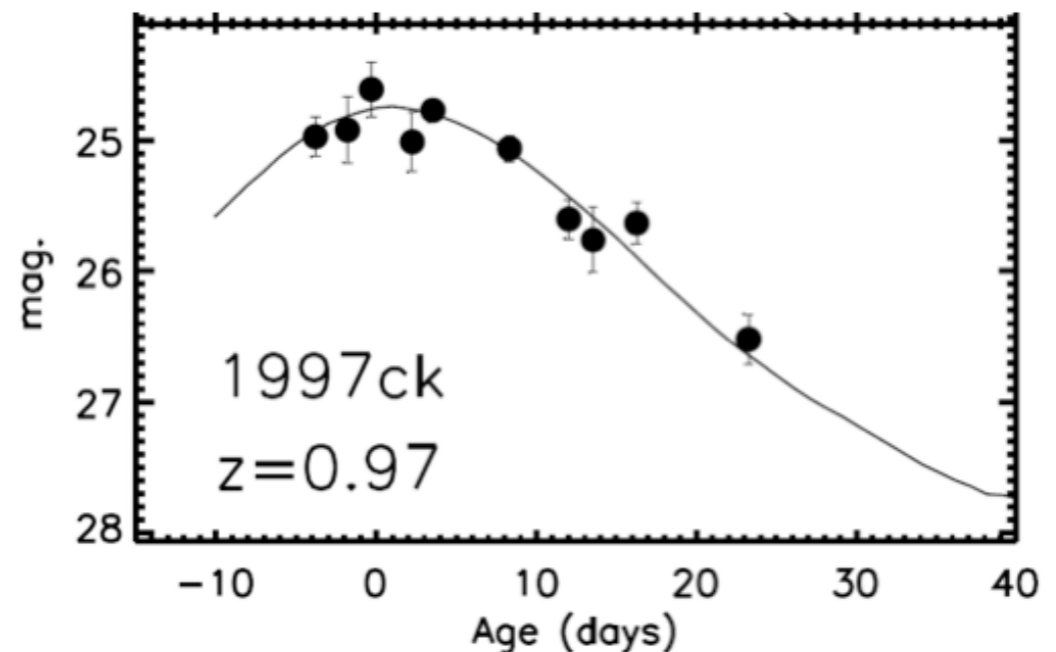
超新星爆発 = スタンダードキャンドル

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。

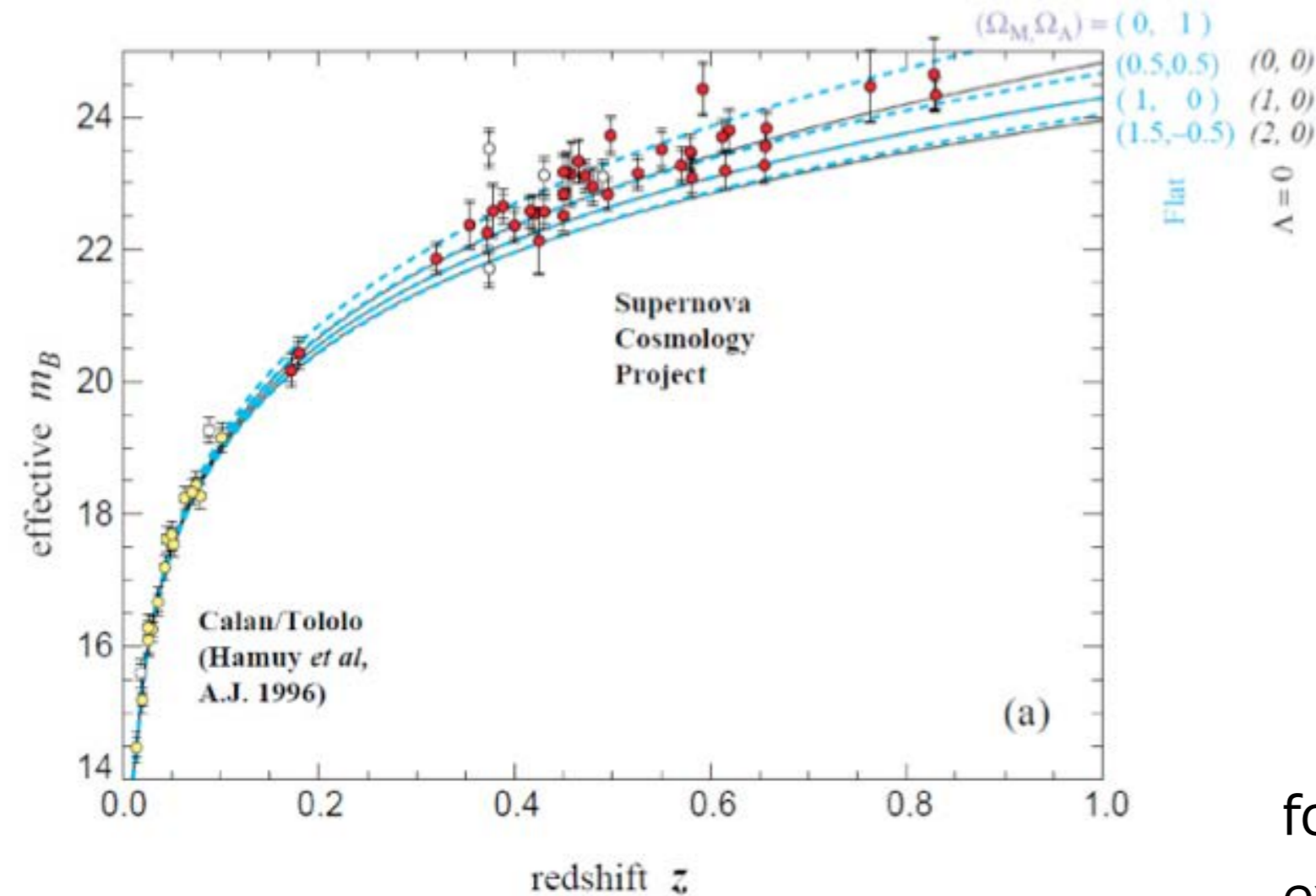


観測される明るさから
距離が正確に判定できる



超新星爆発 = スタンダードキャンドル

超新星爆発が起きている距離を並べると
宇宙が加速膨張していると考える方が、
分布曲線がフィットする。



現在

7億年前

77億年前



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

加速膨張の原因は何か？

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

COBE衛星 (1992), WMAP衛星 (2003), Planck衛星 (2013)

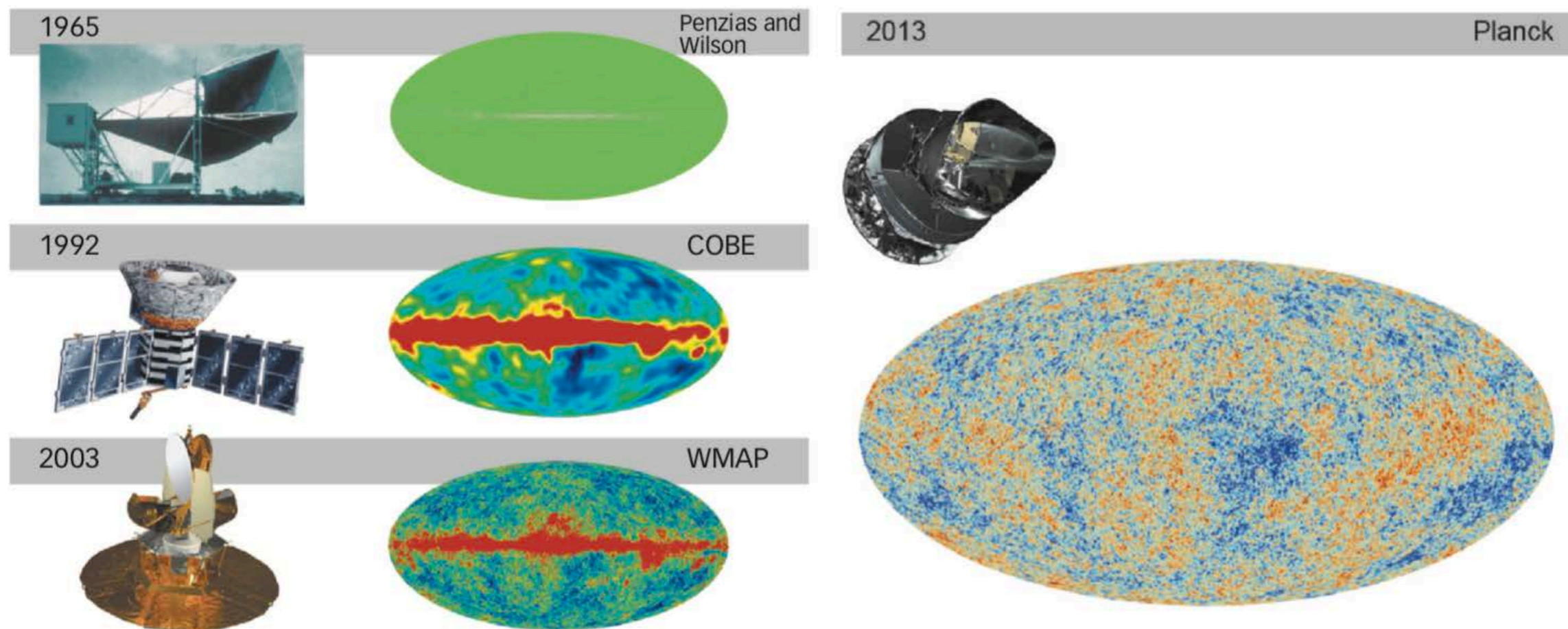


図 5.38 (本文 186 ページ)

CMB で描いた全天図を観測年代ごとに比較したもの。中心の水平軸は天の川銀河面を示す。1965 年のペンジアスとウィルソンの観測では「全天から一様な CMB」、1992 年の COBE 衛星は「10 万分の 1 程度のゆらぎ」が報告された。2003 年の WMAP 衛星、2013 年の Planck 衛星の観測結果は、ゆらぎの観測の角度分解能が格段に上がり、より精密なデータが得られるようになった。

CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する

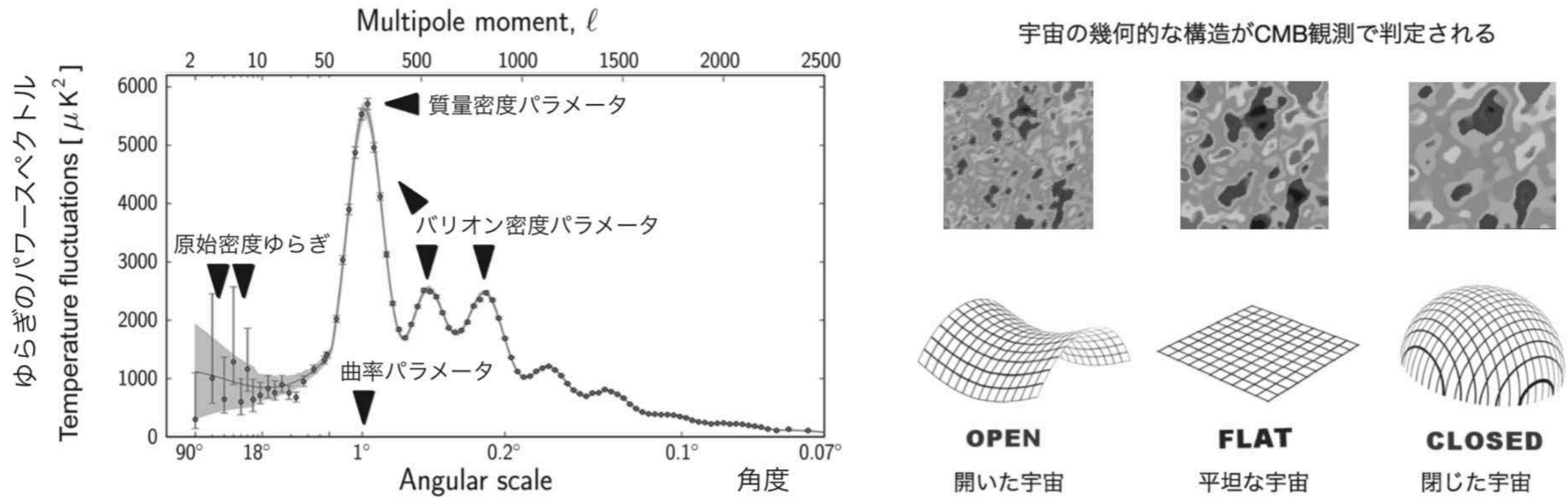


図 5.39 [左] CMB の角度相関関数を理論曲線に重ねて示した図. 1 度スケールにピークがあり, この大きさから質量密度パラメータ, この位置から曲率パラメータがわかる. [右] CMB の温度ゆらぎを統計解析することで, 宇宙の曲率が, 開いている・平坦・閉じているのいずれかが判定できる. 結果は, 「平坦」であった. (NASA/ESA のサイトで得られる図を加工した)

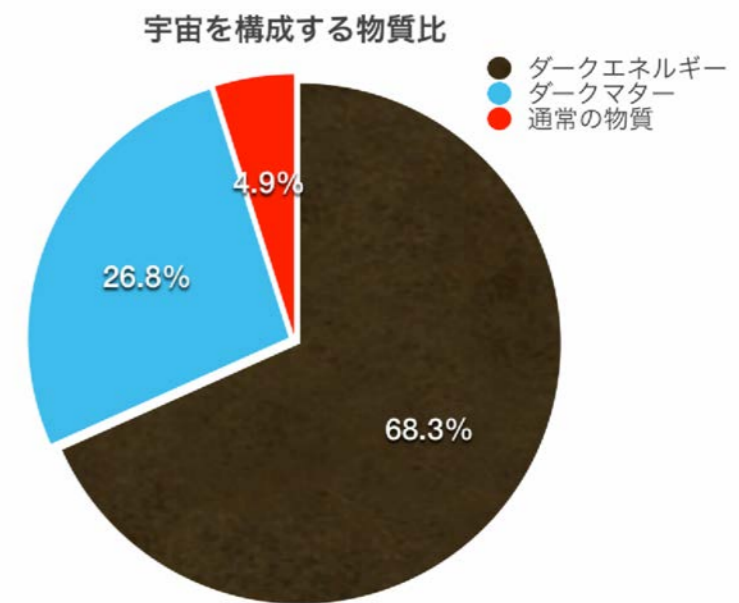
CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する

表 5.3 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 つの基本的なパラメータ, 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.

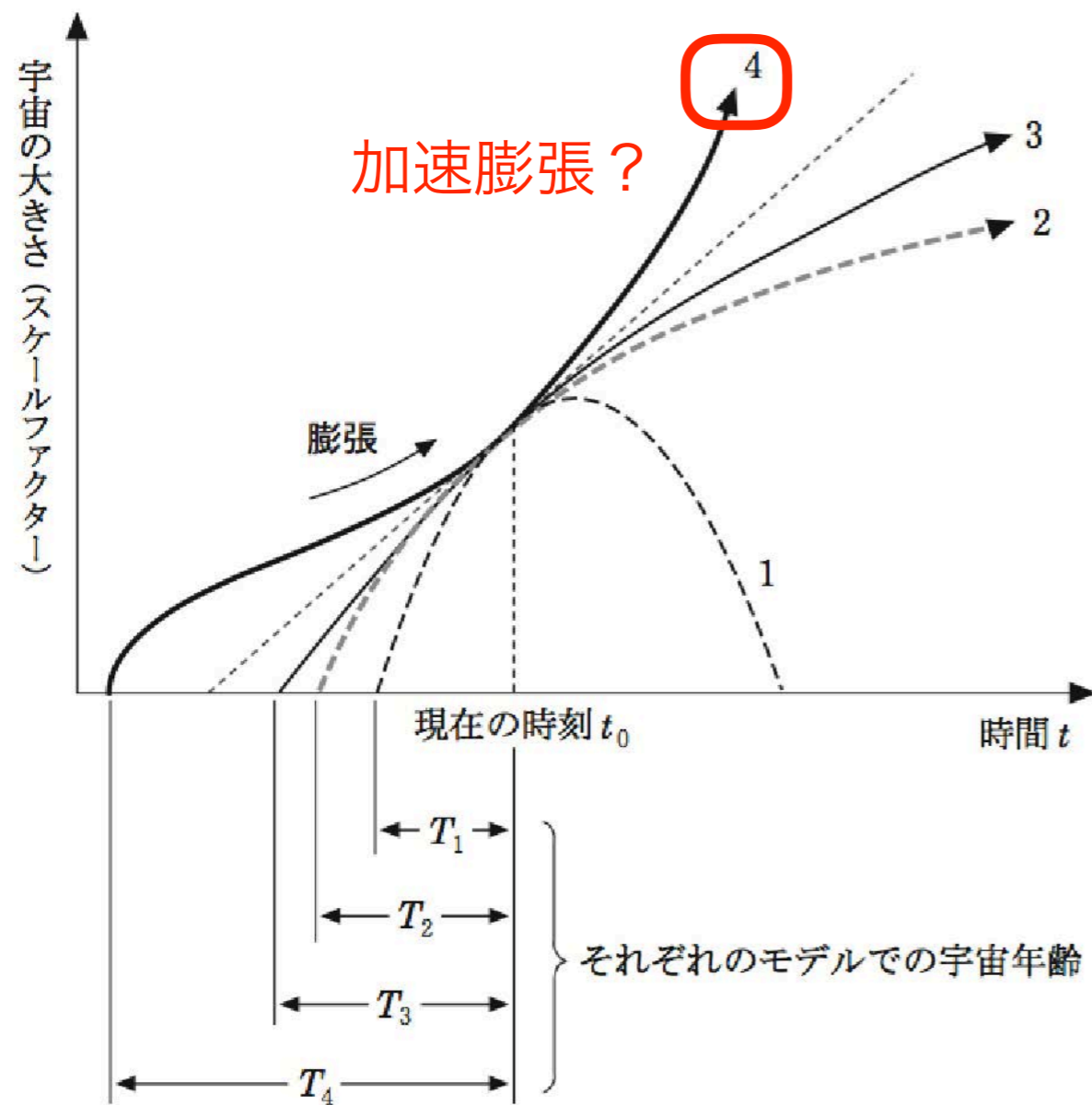
パラメータ	記号	値	
P. バリオン密度	$\Omega_b h^2$	0.02230 ± 0.00014	
P. ダークマター密度	$\Omega_c h^2$	0.1188 ± 0.0010	
P. 曲率ゆらぎ振幅	Δ_R^2	$2.441^{+0.088}_{-0.092} \times 10^{-9}$	
P. 宇宙年齢	t_0	137.99 億年 \pm 2100 万年	
P. CMB 放射の光学的深さ	τ	0.066 ± 0.012	
P. スカラスpekトル指数	n_s	0.9667 ± 0.0040	
C. ハッブルパラメータ	H_0	67.74 ± 0.46 [km/s/Mpc]	(5.5) 式
C. バリオン (通常物質)	Ω_b	$4.86 \pm 0.10\%$	(5.6) 式
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	$69.11 \pm 0.62\%$	(5.7) 式
C. 臨界密度	$\rho_{\text{crit.}}$	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27}$ 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. $8h^{-1}$ 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,
137.99億年 \pm 2100万年

正体不明のダークエネルギーは,
68.3%



膨張宇宙モデル，現在考えられているのは？



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. $\Lambda > 0, k = 0$.

宇宙の最期

ビッグクランチ

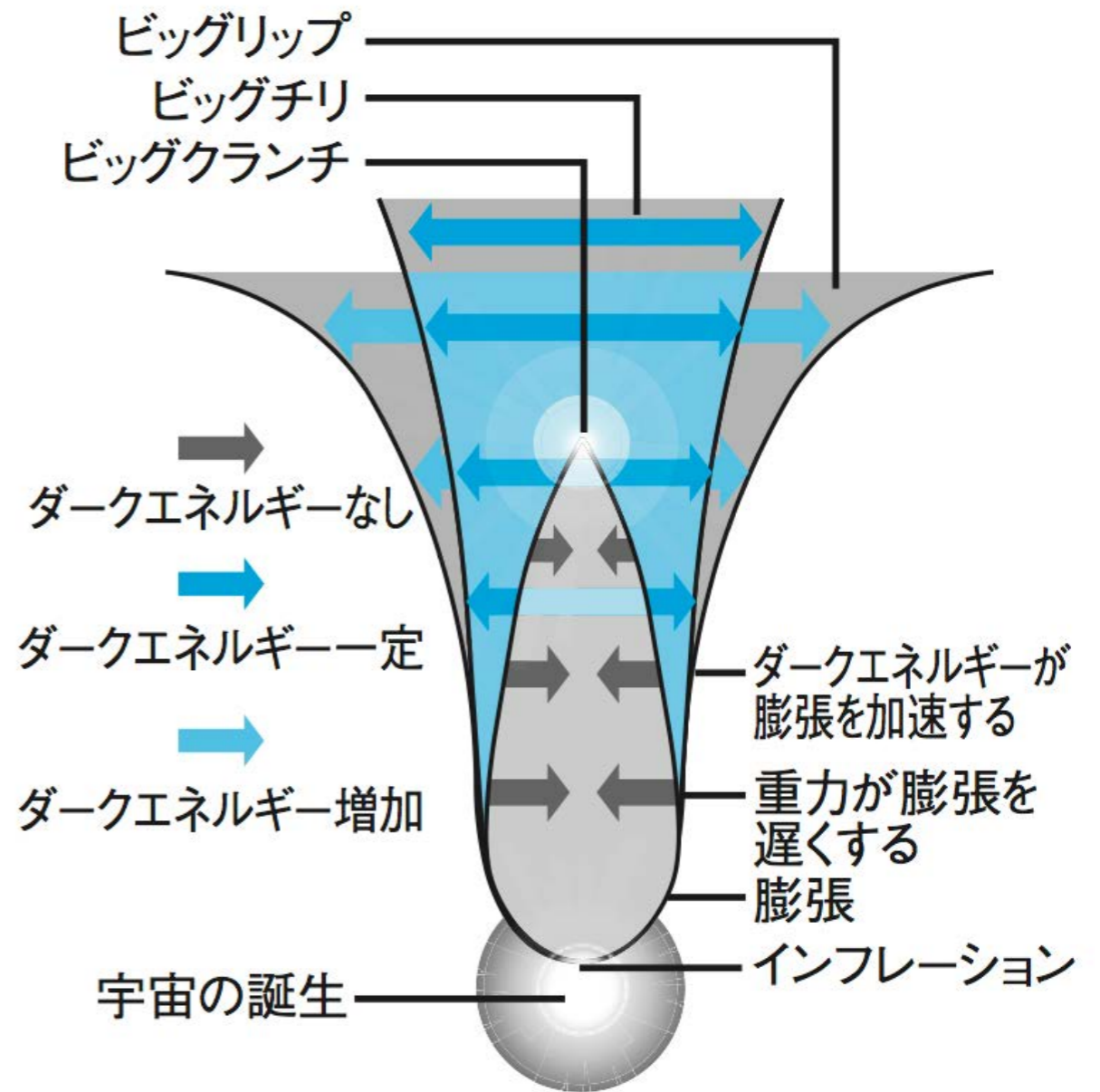
どこかで加速膨張が終わり，やがて重力が強くなって最期には再び収縮する。
ビッグバンの逆戻りとなって，すべてが再び融合する。

ビッグフリーズ，ビッグチリ

現在のまま宇宙は永遠に膨張を続け，すべての銀河が孤立し，やがて星は燃え尽きて温度ゼロ状態の「熱的な死」へ。

ビッグリップ

今後ますます加速膨張をつづけ，やがては時空自体が引き裂かれ，銀河も星も何も構造が残らない。



宇宙はどこまで解明されたか

- 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？

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

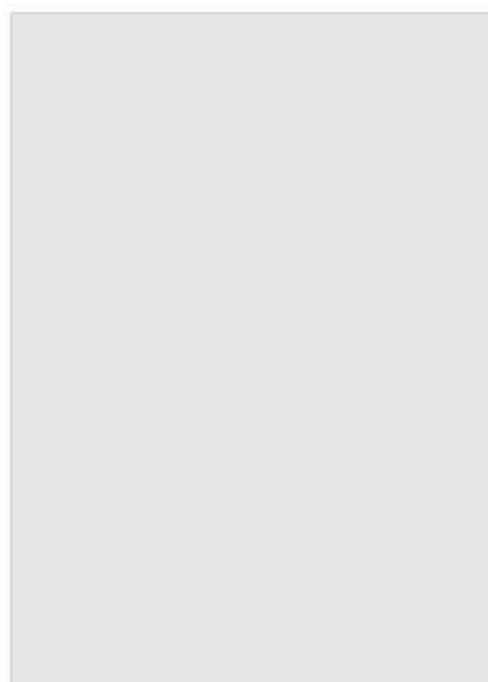


<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>

ジャンル別一覧 > 現代思想 > 現代思想2019年8月号 特集=アインシュタイン

現代思想2019年8月号 特集=アインシュタイン

-量子情報・重力波・ブラックホール…生誕140周年-



定価 本体1400円+税

発売日 2019年7月29日

ISBN 978-4-7917-1384-4

購入する

相対論からブラックホール撮影成功まで…物理学の巨人、生誕140周年記念特集！

2019年4月10日——奇しくもアインシュタイン生誕140周年にあたるこの節目の年に、一般相対性理論に基づき存在を予言されていたブラックホール撮影成功の報が世界中を興奮させた。本特集ではブラックホールや重力波、量子情報などをめぐる最先端の知見から、歴史・哲学・倫理まで多様な観点をもって巨人の足跡を辿り直し、そのアクチュアリティを探る。

目次予定＊【討議】佐藤文隆＋細谷暁夫【インタビュー】本間希樹【エッセイ】江沢洋／小沼通二／池内了【論考】安孫子誠也／伊藤憲二／稲葉肇／岡本拓司／小澤正直／北島雄一郎／近藤和敬／真貝寿明／杉尾一／田中祐理子／筒井泉／野内玲／古谷紳太郎／宮本道人＋麦原遼…

ブラックホール理論とその周辺

真貝寿明

はじめに

アインシュタインが一般相対性理論を完成させたのは、一九一五年一月である。重力の起源が時空の曲率であることを看破したこの理論は、光の経路が重力源によって湾曲することを予言し、燃え尽きた大質量の星の最期がブラックホールになり得ることを予言した。また、宇宙全体が膨張することを予言し、時空のゆらぎが波として伝播する重力波の存在を予言した。本稿では、ブラックホールの学説史を概観し、現在の周辺の話題について紹介する。

私は、一般相対性理論が一〇〇周年を迎える節目に、「ブラックホール・膨張宇宙・重力波」と題した新書¹⁾を出版させていただく機会を得た。そして、その書では「運が良ければ数年以内

念のためカッコで
入れさせていただきます。
よろしくです。

は、さらに検出器の感度を上げた観測を始めており、詳細な結果は未発表であるが、一週間に一度の頻度でブラックホール連星合体の重力波を、一ヶ月に一度の頻度で中性子星連星の合体による重力波を検出している模様である。日本の重力波検出器KAGRA(かぐら)も本年末には観測を開始する。日米欧の共同観測体制に入れば、複数台の情報を使って、重力波発源天体の位置の特定精度が良くなり、天文学者によるフォローアップ観測も効率良く進められることになる。

また、本年四月には、電波天文学の国際研究プロジェクト「イベント・ホライズン・テレスコープ」が、ブラックホールの直接撮像に初めて成功したことを発表した。地球上のあちこちに置かれた電波望遠鏡を一齐に銀河M87の中心に向け、銀河中心にあるブラックホールの姿が、本当に黒い穴に見えることを私たちに示し、そのブラックホールの質量が太陽の六五億倍であることを報告した。例えこの写真が示されなくても、ブラックホールの存在を疑う研究者は皆無であったのだが、一枚の写真がもつ説得力の大きさに改めて感銘を受ける。

いまや、ブラックホールと言われれば、誰もが「光さえも抜け出せない、重くてコンパクトな天体」と理解しているが、その概念が現実のものと認められるまでには五〇年以上を必要とした。ブラックホールという言葉が使われ始めたのは一九六七年のことであり、アインシュタインの没後である。ブラックホールは、時空特異点と呼ばれる曲率無限大の点をもっている。アインシュタ

とこそ？
たい座り

スク!

に「ついに重力波を直接検出」というニュースが流れることになるだろう。そうなれば、発見したグループのノーベル賞受賞は確実であろう」と記載した。しかし、実際の進展はもっと速かった。新書が本屋に並んだときには、すでにアメリカの重力波干涉計LIGO(ライゴ)が初の重力波を検出しており、二〇一六年二月に「ブラックホール連星の合体で生じた重力波を初観測」したことを発表した。そして、ノーベル財団はその翌年に(異例の速さで)重力波プロジェクトを牽引した三人のアメリカ人研究者にノーベル物理学賞を授賞した。

二〇一八年一月末には、米欧のグループは、二度にわたる合計一六六日間の観測で、重力波の検出が一例あったことを発表している²⁾。一〇例はブラックホール連星の合体であり、一つは中性子星連星の合体である。本年四月からは、米欧のグループ

イン方程式の解として理論的に得られる時空なのだが、時空特異点の存在は、アインシュタイン方程式の適用限界を示していることにもなる。理論が自分自身で破れることを予言しているのだ。このような物理理論は他にない。以下では、歴史的な流れを見た後に、現在の物理学者が研究テーマにしている課題を紹介している。

ブラックホールの概念が市民権を得るまで

シュヴァルツシルト解の発見

ニュートン力学では、すべての質量のある物体の間には万有引力がはたらいている、と考える。この万有引力は、地球上の重力の源になつており、天体の運動を説明する力でもある。大きな質量をもつ天体は強い重力を及ぼすので、その天体から脱出するためには大きな初速度が必要となる。とてつもなく大きな質量が、小さくコンパクトなサイズになっていると、光さえも脱出できないことになる。このような、現代のブラックホールにつながる最初の考えは、一七八四年に自然哲学者ミッチェルによって記されている。

一九一五年、アインシュタインは一般相対性理論を発表し、重力の源は力ではなく、時空の幾何学的な構造(時空の歪み)であることを定式化した。

彼が導いた重力場の方程式(アインシュタイン方程式)は、時間と空間がどのように歪んでいるのかを解く方程式である。一〇本

Sの科学

physics **s** 物理
mathematics **s** 数学
statistics **s** 統計学
genetics **s** 遺伝学

Yの科学

astronomy **y** 天文学
economy **y** 経済学
biology **y** 生物学
archaeology **y** 考古学
anthropology **y** 人類学
sociology **y** 社会学



体系化の学問

対象物の性質を理論で説明

発見の学問

対象物を分類し記載

相対性理論



ブラックホール
膨張宇宙
重力波