

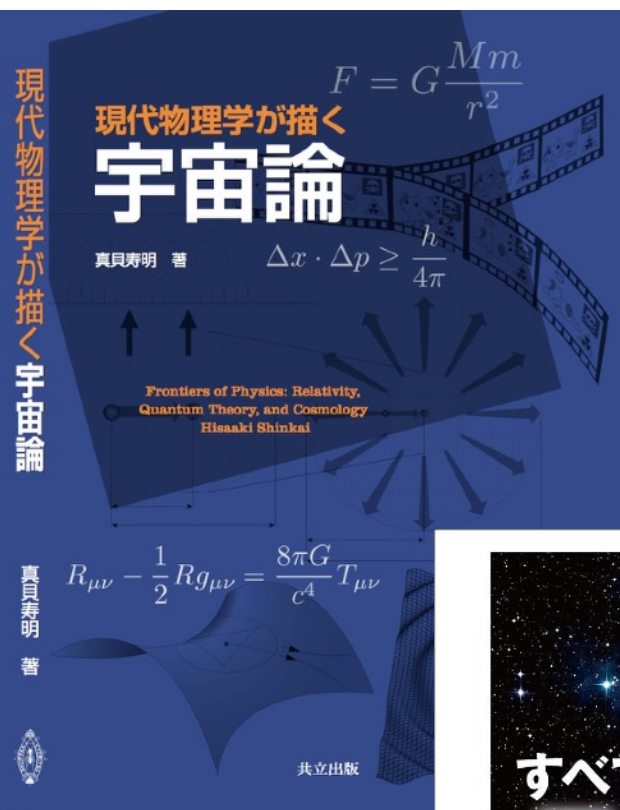
宇宙はどこまで解明されたか

相対性理論（時空の理論）

宇宙が膨張していることがわかるまで

宇宙にはじまりがあったことがわかるまで

宇宙論の未解決問題（ダークマター，ダークエネルギー）



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



<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

宇宙はどこまで解明されたか

相対性理論（時空の理論）

宇宙が膨張していることがわかるまで

宇宙にはじまりがあったことがわかるまで

宇宙論の未解決問題（ダークマター，ダークエネルギー）

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

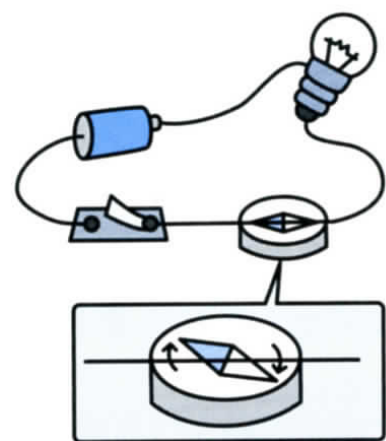
武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

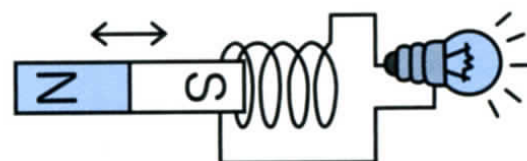


<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

相対性理論(特殊相対性理論)



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

電磁誘導現象の発見(1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ(1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



マクスウェル

Eは電場, Bは磁場
cは光速??

誰が測った光速???

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0.\end{aligned}$$

光の速さは誰が測っても同じ, と考えてみよう

時間の進み方は, 相対的だ. 測定する人の運動状態によって異なる.

⇒ 「時間と空間の概念」を変えた.



相対性理論(特殊相対性理論) $E = mc^2$

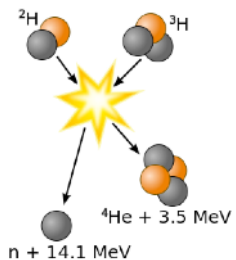


3次元空間と時間をあわせて、**4次元時空で物理を考える。**
エネルギー保存則から、

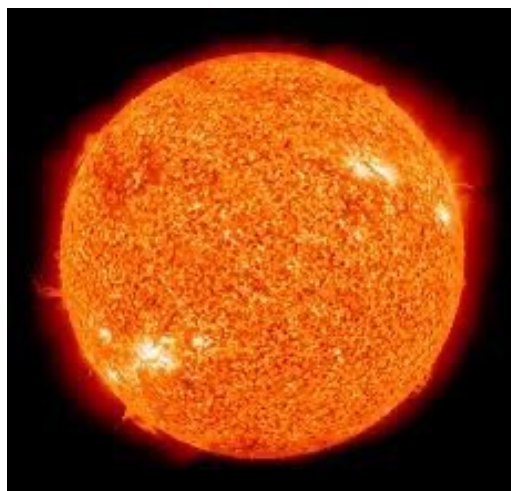
$$E = mc^2$$

質量はエネルギーと等価であることがわかる。

原子核反応によって、わずかな質量が莫大なエネルギーに変化する！

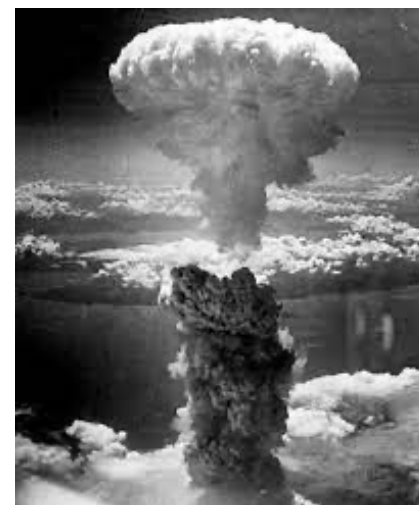
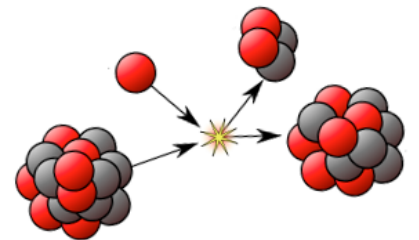


核融合
(nuclear fusion)



星が燃えるメカニズム, 水素爆弾

核分裂
(nuclear fission)



原子爆弾, 原子力発電

これまでの物理学を否定せず、拡張した理論！

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

一般相対性理論

強い重力場での時空の力学
「空間が歪むのが重力の正体である」

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

ニュートン：リンゴはなぜ落ちる？

重力があるからだ！



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



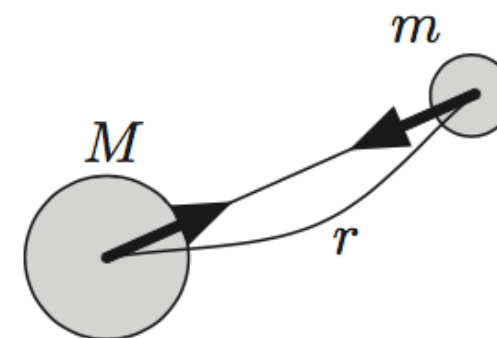
すべてのものは、引力で引き合う
(万有引力がある)と、考えることで解決！

◆ Advanced 万有引力の法則

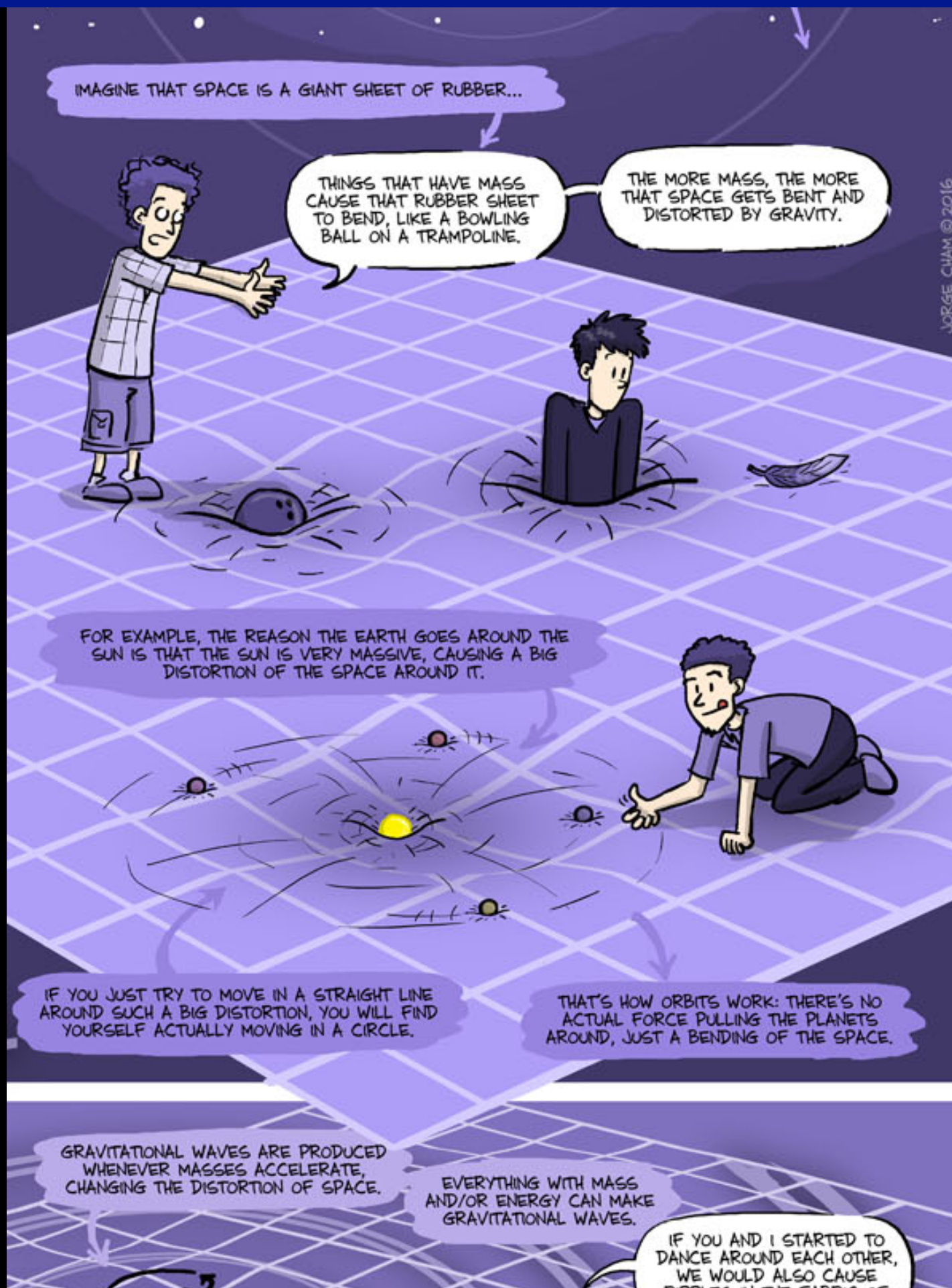
質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



一般相対性理論

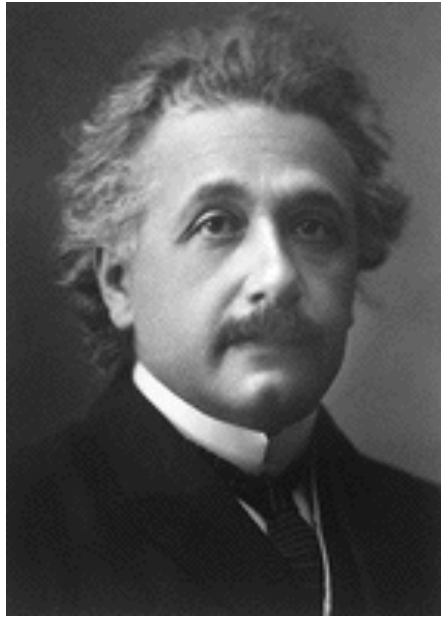


空間のゆがみが重力の原因だ

光や物体は、まっすぐ進んでいるつもりでも、曲がって進む

重力を力ではなく、
場として考える

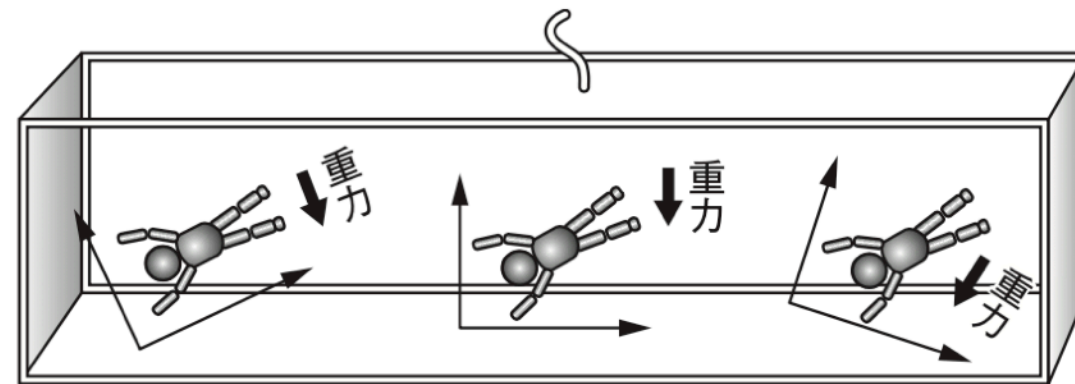
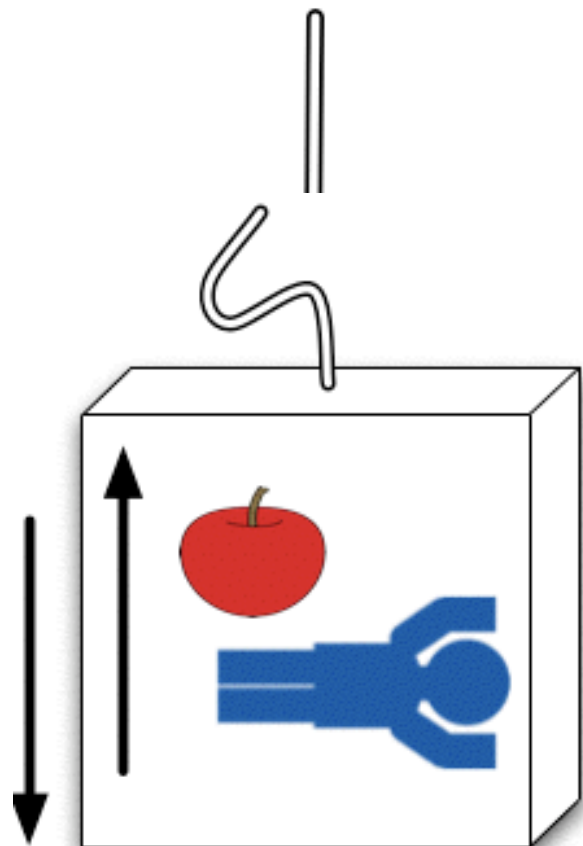
一般相対性理論(1915年)



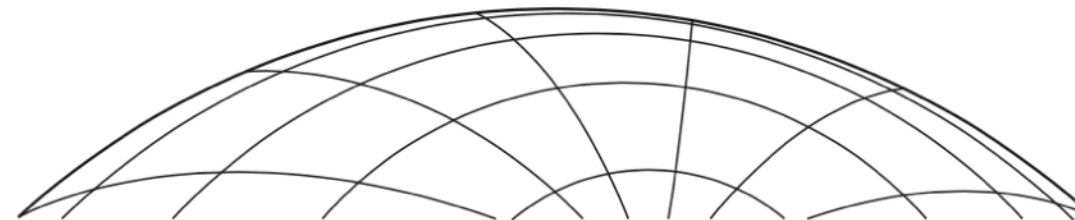
1905年の相対性原理では、等速運動しか扱っていない。
加速度運動する場合の相対性理論はどうなるだろうか。

加速度運動する代表が重力のはたらきだ。
重力の正体はなんだろうか。

自由落下するエレベータ内では、重力がはたらいっていることを感じない。
重力は局所的には消すことができるが、大域的には消せない。



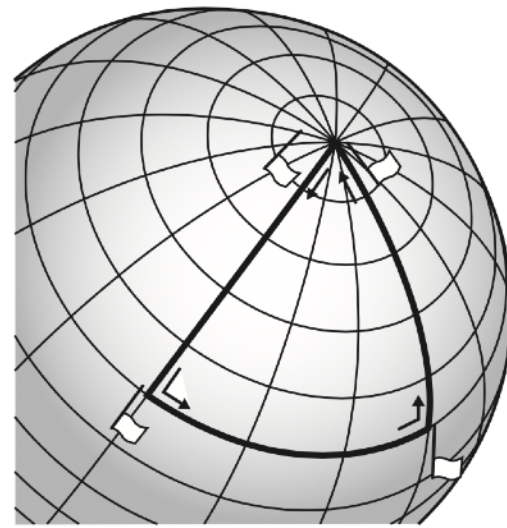
↓ 地球の半径でいどの大きさのエレベータだと重力の向きがちがうので、全体で重力を打ち消すことができない。



重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

一般相対性理論(1915年)



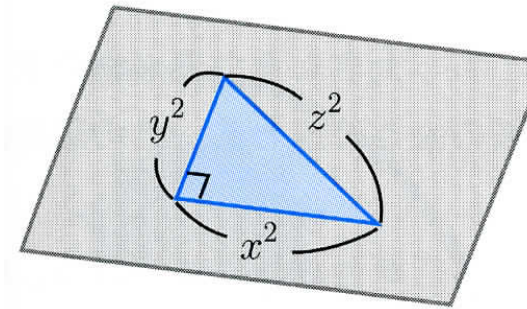
正の曲率 (地球表面)

重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

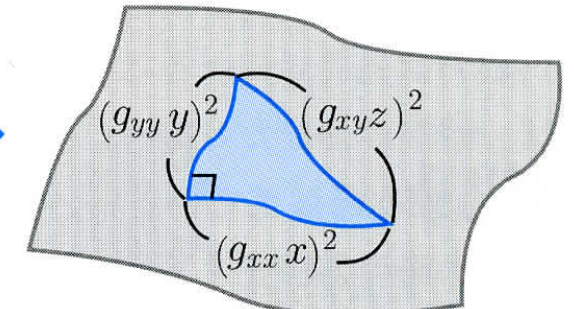
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



$$(g_{xx}x)^2 + (g_{yy}y)^2 - (g_{xy}z)^2 = 0$$

このように、曲がり具合は関数 $g_{\mu\nu}$ に押し付けて表すことができる。
アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり $g_{\mu\nu}$ を解く方程式である。

重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915 年)

重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時空の歪み}} = \frac{8\pi G}{c^4} \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{質量の分布}}$$

左辺はリーマン幾何学にもとづいて時空がどのように曲がっているのかを表している。右辺は物体がどのように分布しているのかを表す量である。

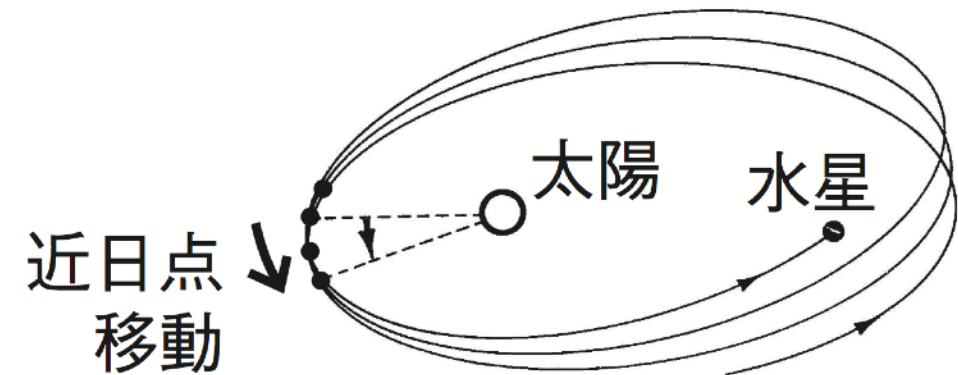
一般相対性理論が説明するもの



水星の近日点移動の問題 (ルベリエ, 1854)

100年で574秒ずれる。2250世紀で完全な「ばら模様」。
→→金星の影響で277秒, 木星で153秒, 地球で90秒,
その他の惑星で10秒分の説明が可能。

残りの43秒は???



重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

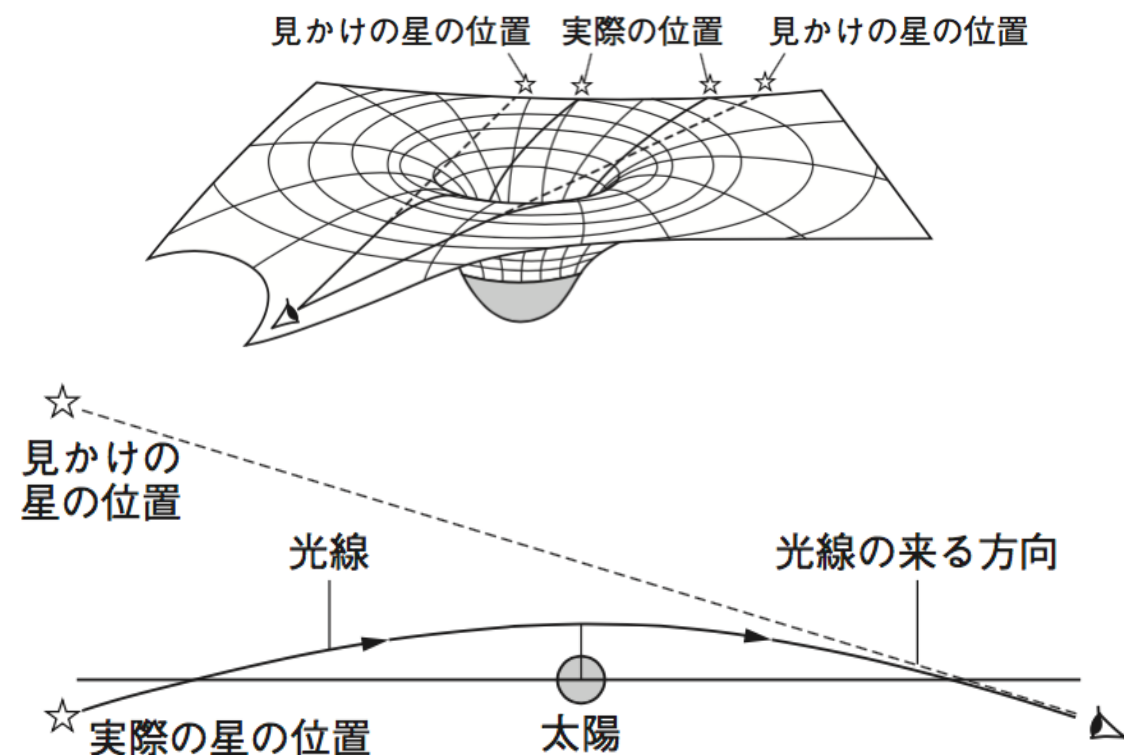
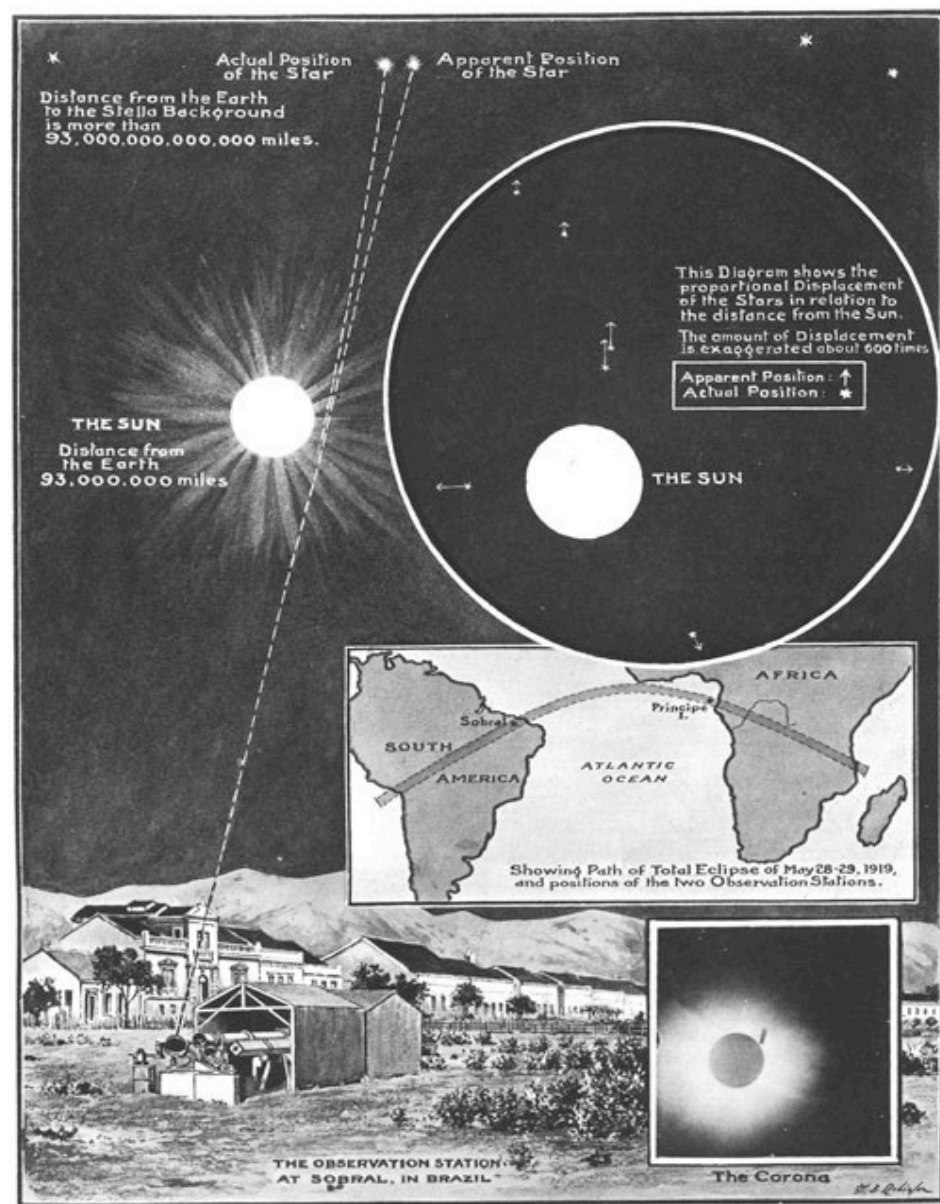
1915年, アインシュタインが, できたばかりの一般相対性理論を適用すると, 「43秒の歳差運動」が出てきた。

一般相対性理論が予言したもの

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる
- 重力によってゆがんだ空間では, 時間の進み方は遅くなる。
- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける。
- 宇宙全体は動的でなければならない。
- 重力波が宇宙空間を伝わる

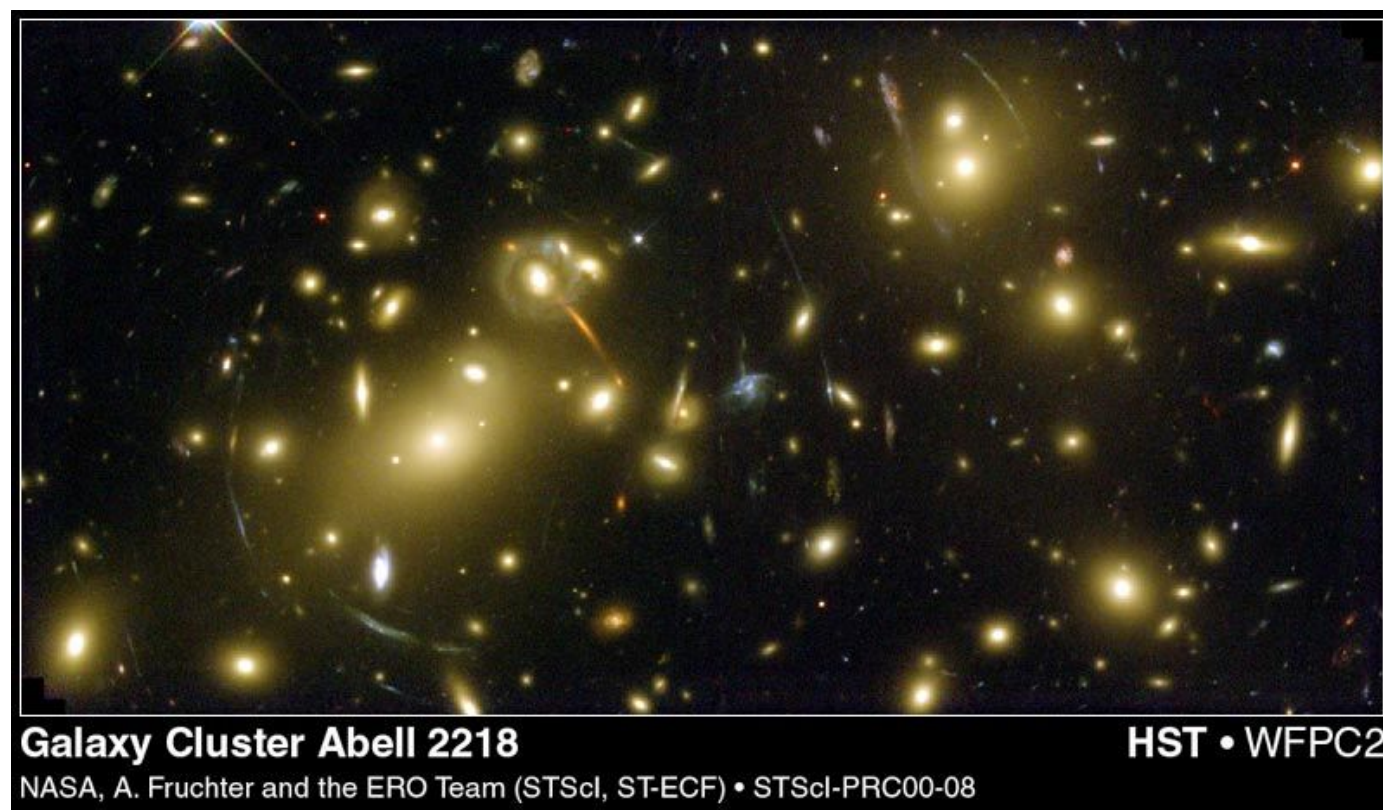
一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

- 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる



1919年5月の皆既日食で
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が
普段の位置とずれていた

重力レンズ効果として観測される▶



一般相対性理論が予言したもの

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる

皆既日食で確認された. 重力レンズ効果としても観測される.

- 重力によってゆがんだ空間では, 時間の進み方は遅くなる.

飛行機, 人工衛星, 地上での検証すすむ.

スカイツリー実験

100年経っても計測は無理

- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける.

ブラックホールの存在

銀河中心のブラックホール

ブラックホールのような
特異点があるはずない

- 宇宙全体は動的でなければならない.

宇宙は未来永劫不変なもの

膨張宇宙の発見

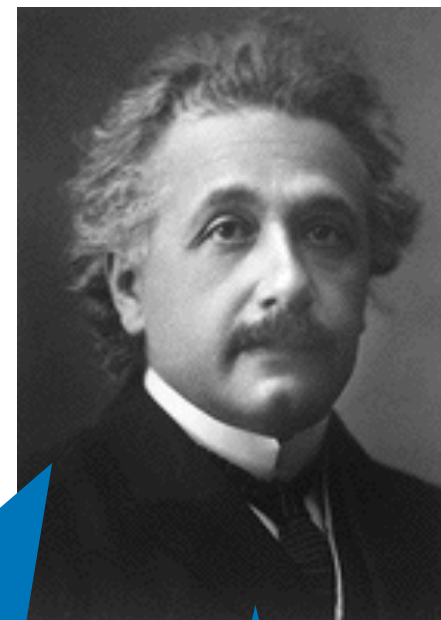
ビッグバン宇宙モデルの成功

- 重力波が宇宙空間を伝わる

時空のさざ波の伝播

重力波観測

重力波なんて存在しないかも



宇宙はどこまで解明されたか

相対性理論（時空の理論）

宇宙が膨張していることがわかるまで

宇宙にはじまりがあったことがわかるまで

宇宙論の未解決問題（ダークマター，ダークエネルギー）

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

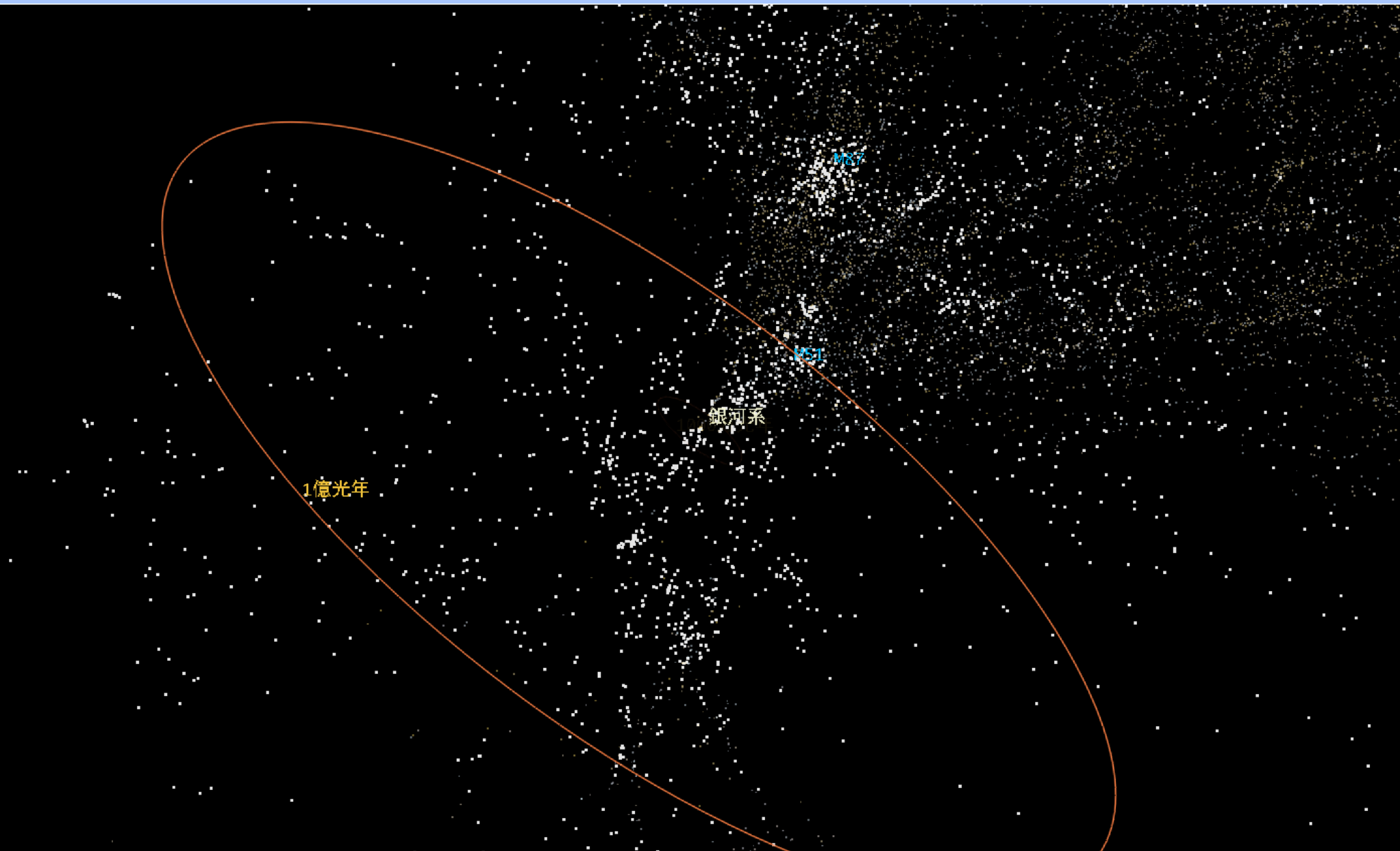


<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

天の川銀河 (our Galaxy)

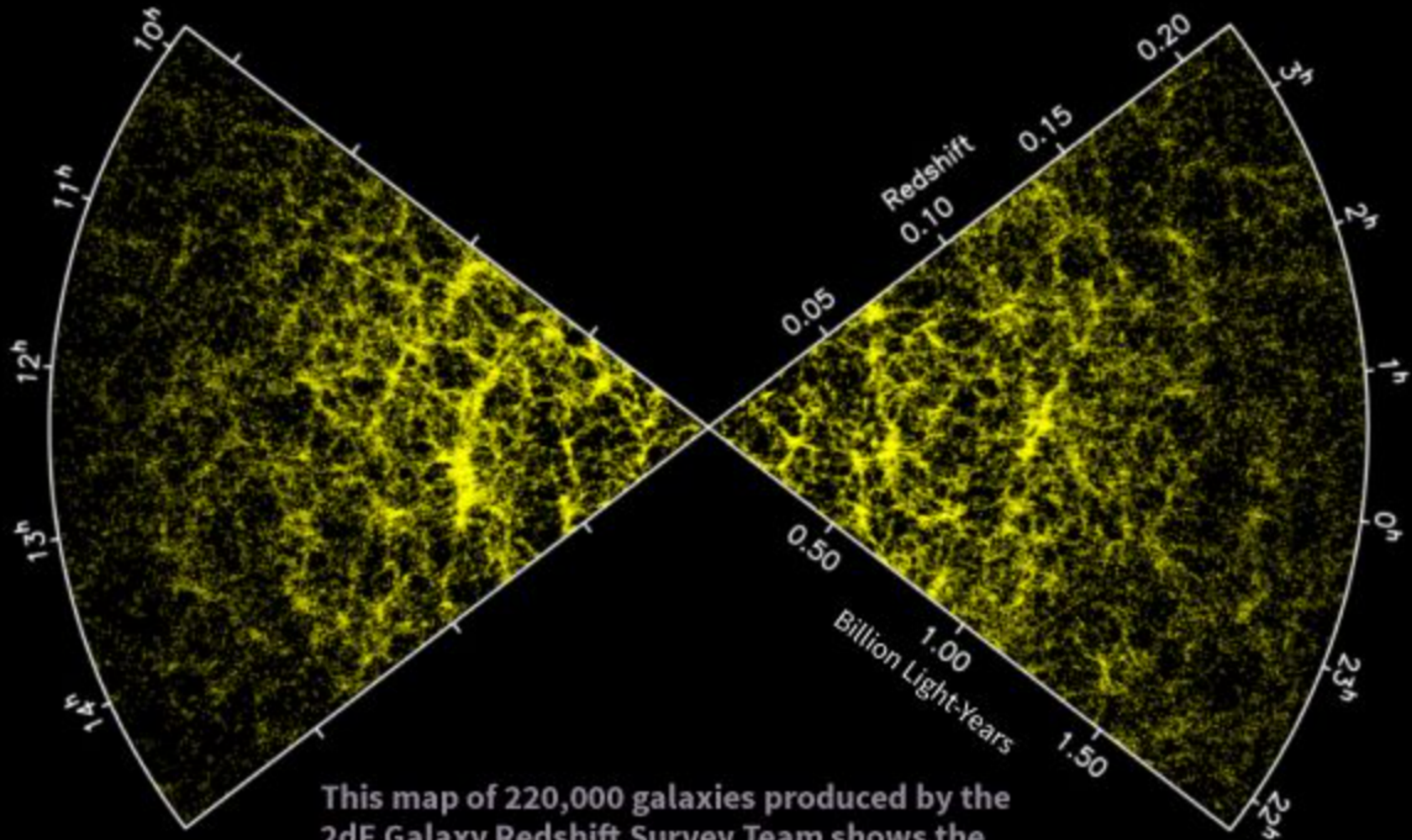


銀河団

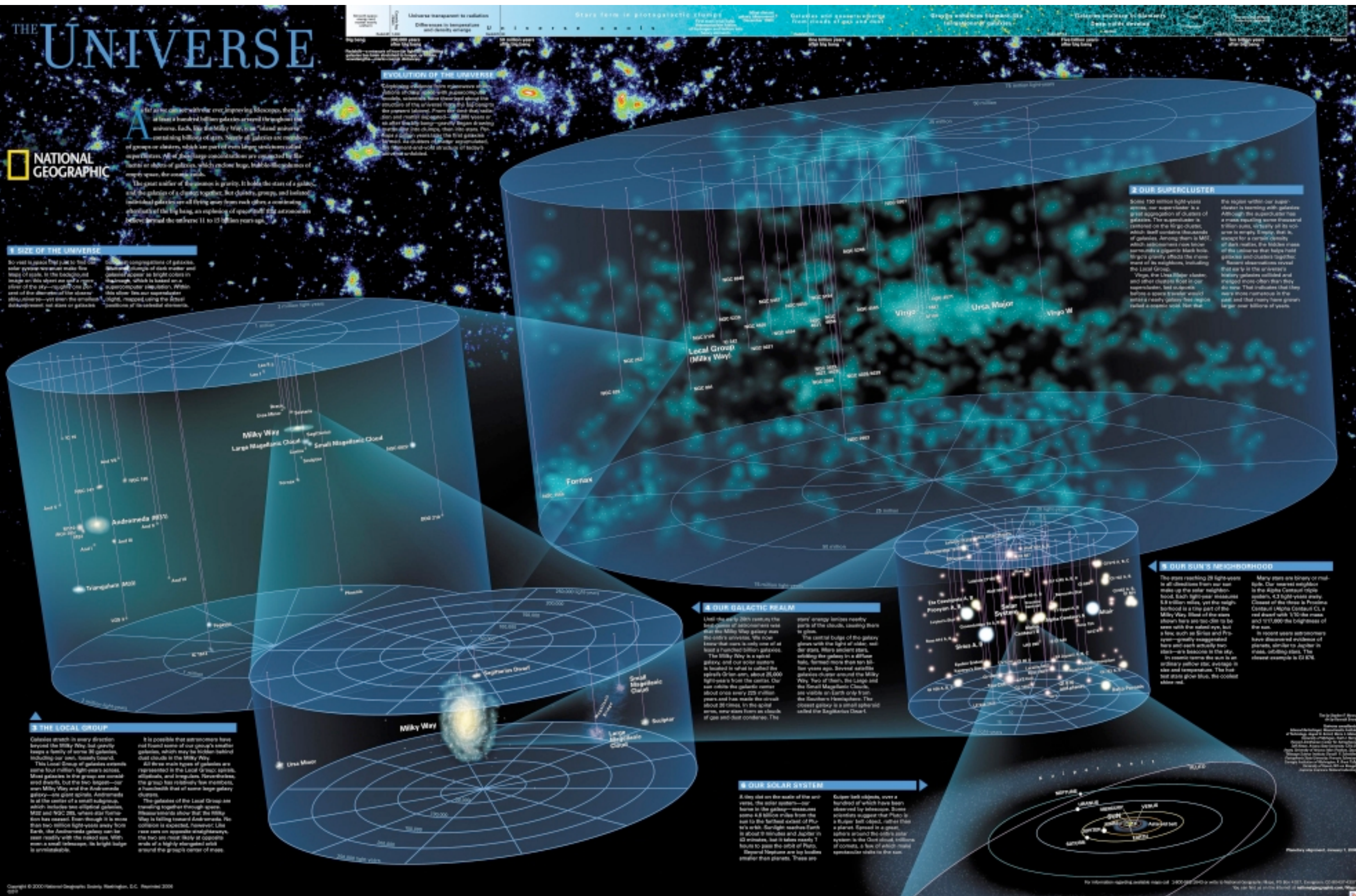


LARGE-SCALE STRUCTURE: GALAXIES ACCORDING TO REDSHIFT

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



EVOLUTION OF THE UNIVERSE

Galaxies and clusters of galaxies have evolved over time. The universe began with a hot, dense state, and as it expanded, it cooled. The first stars formed from the gas and dust in the universe, and they began to cluster together. Over time, these clusters grew into galaxies and superclusters. The universe is still expanding, and it is expected to continue to expand for billions of years.

OUR SUPERCLUSTER

Some 150 million light-years across, our supercluster is a vast aggregation of clusters of galaxies. The supercluster is centered on the Virgo cluster, which itself contains thousands of galaxies. Among them is M87, which astronomers now believe surrounds a gigantic black hole. Virgo's gravity affects the movement of its neighbors, including the Local Group.

THE LOCAL GROUP

Galaxies stretch in every direction beyond the Milky Way, but nearby lie a family of some 30 galaxies, including our own, the Milky Way. This Local Group of galaxies extends some 10 million light-years across. Most galaxies in the group are dwarf galaxies, but the two largest—our own, the Milky Way, and the Andromeda galaxy—are giant spirals. Andromeda is at the center of a small subgroup, which includes two elliptical galaxies, M32 and NGC 205, whose star formation has ceased. Even though it is more than two million light-years away from Earth, the Andromeda galaxy can be seen readily with the naked eye. With even a small telescope, its bright bulge is unmistakable.

OUR GALACTIC REALM

Until the early 20th century, the best guess of astronomers was that the Milky Way galaxy was the only universe. The Milky Way is a spiral galaxy, and our solar system is located in what is called the galactic disk, about 25,000 light-years from the center. Our sun orbits the galactic center about once every 225 million years and has made the circuit about 30 times. In the spiral arms, new stars form as clouds of gas and dust condense. The stars' energy forces nearby gas to glow.

OUR SOLAR SYSTEM

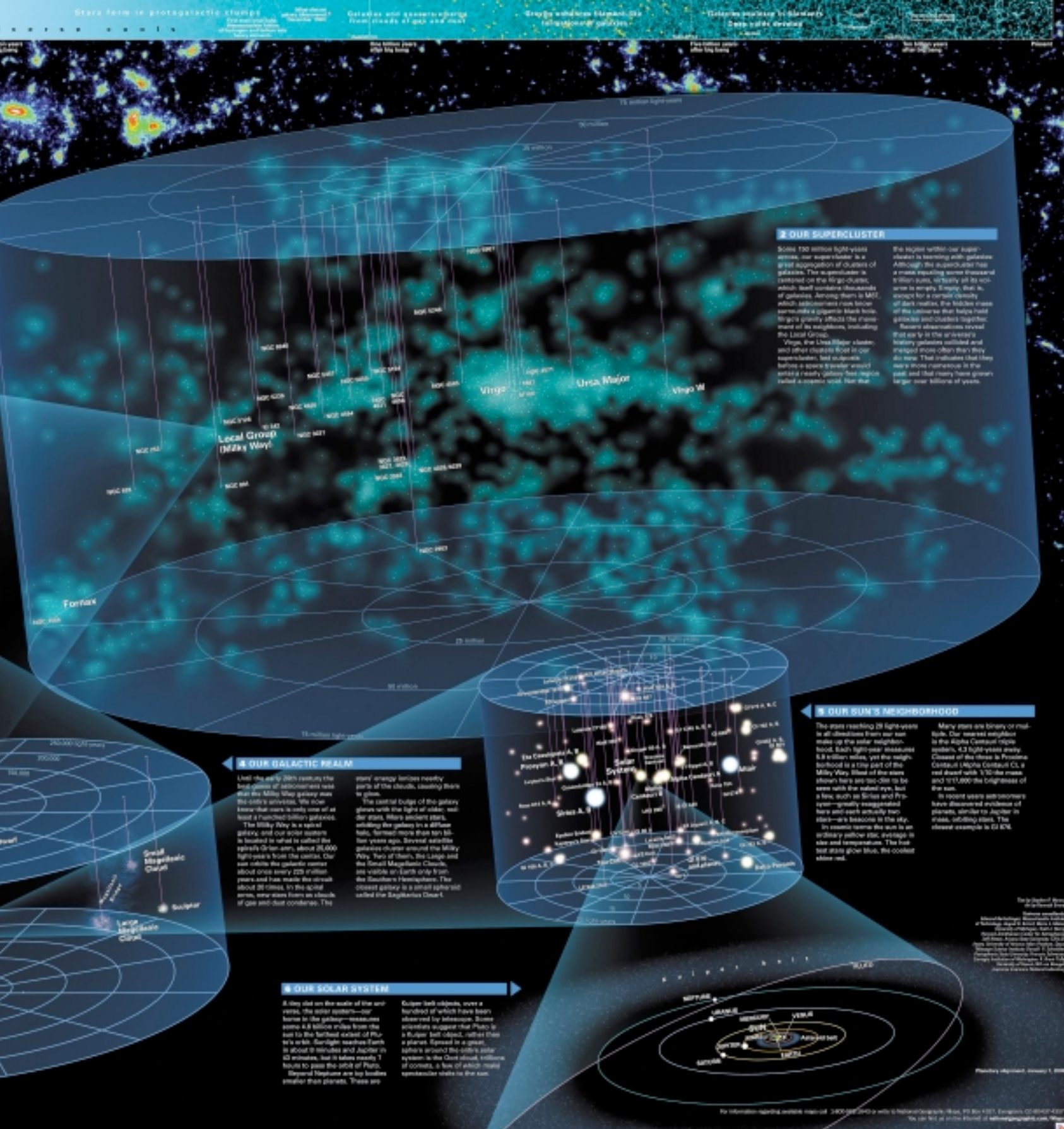
A tiny dot on the scale of the universe, the solar system—our home in the galaxy—measures some 4.8 billion miles from the sun to the farthest orbit of Pluto's orbit. Our light reaches Earth in about 8 minutes and Jupiter in 43 minutes, but it takes nearly 7 hours to pass the orbit of Pluto. Beyond Neptune are icy bodies smaller than planets. These icy

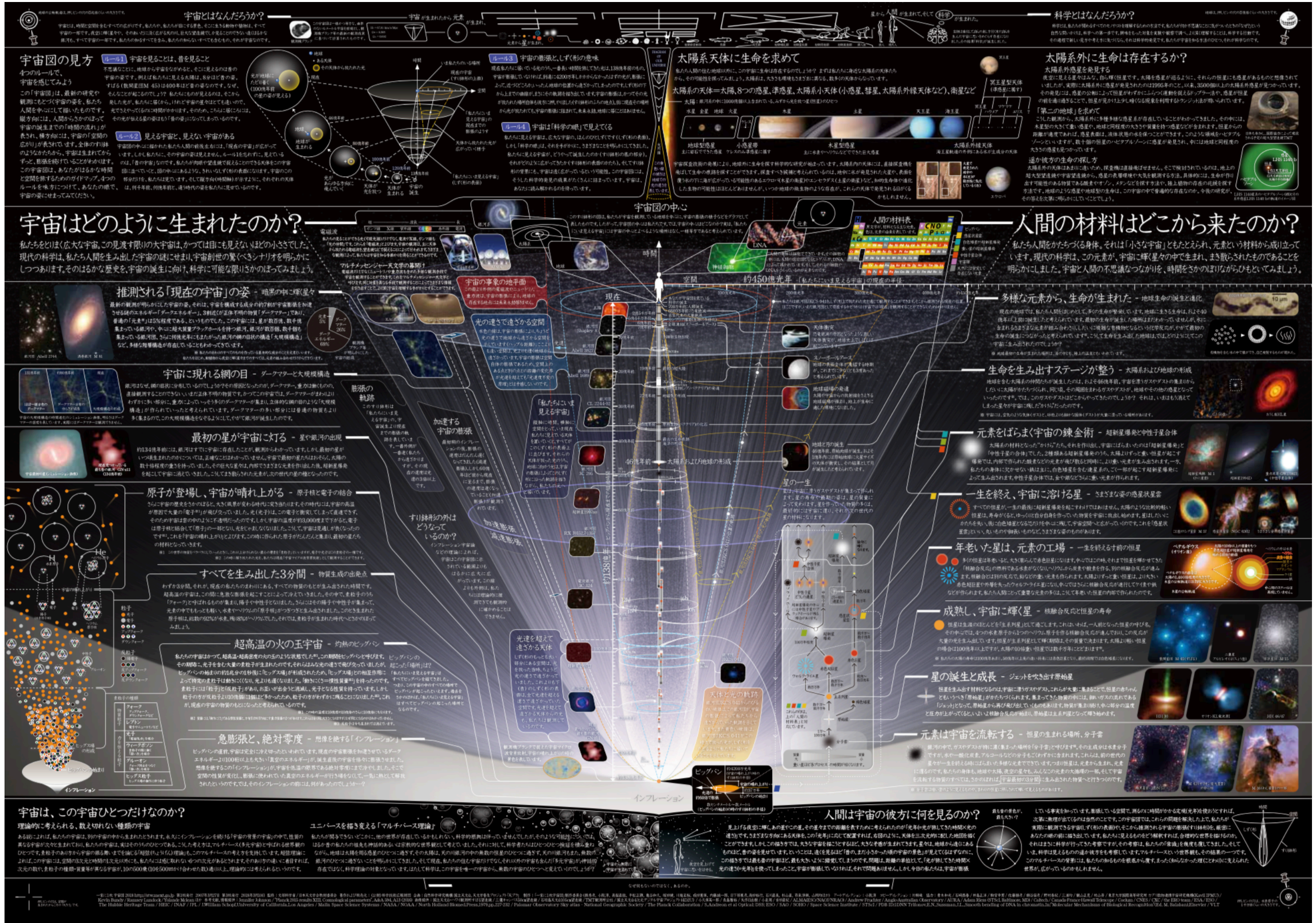
OUR SUN'S NEIGHBORHOOD

The stars reaching 25 light-years in all directions from our sun make up the solar neighborhood. Most stars are red dwarfs, but a few, such as Sirius and Procyon, are much brighter. The solar neighborhood is a tiny part of the Milky Way. Most of the stars shown here are too close to be seen with the naked eye, but a few, such as Sirius and Procyon, are much brighter.

THE UNIVERSE

The universe is a vast, expanding space-time continuum. It began with the Big Bang, a rapid expansion from a hot, dense state. The universe is filled with matter, energy, and dark matter. The expansion is accelerating, driven by dark energy.





宇宙図2018

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu2018/>

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。）

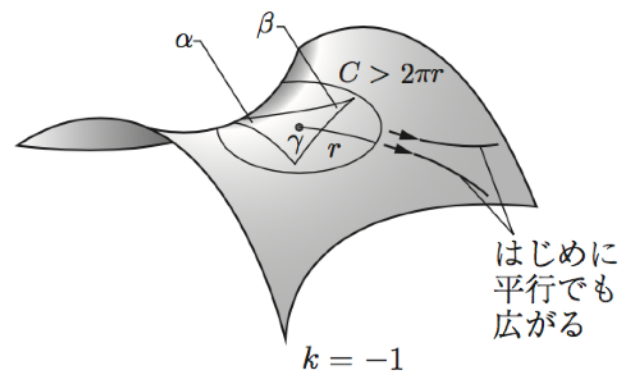
宇宙原理（物理用語バージョン）

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。

（宇宙は空間的にでこぼこがなく，どちらを向いても同じである.）

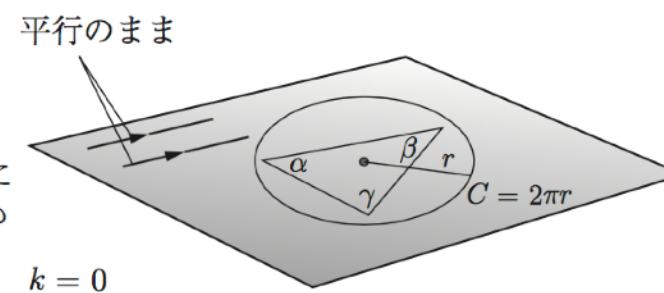
➡ 球対称時空として，3つのタイプが許される

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



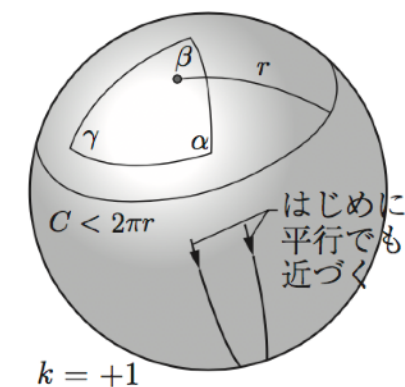
開いた宇宙

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



平らな宇宙

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

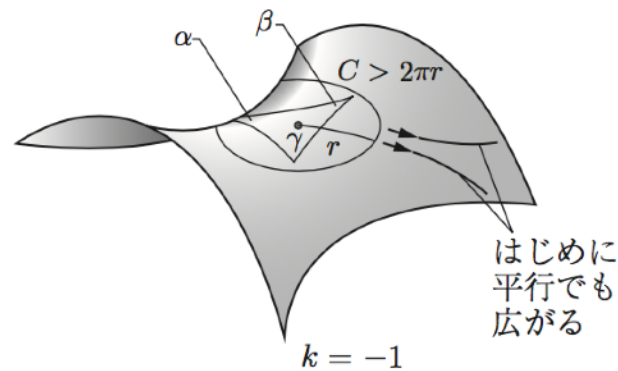


閉じた宇宙

宇宙原理(cosmological principle)

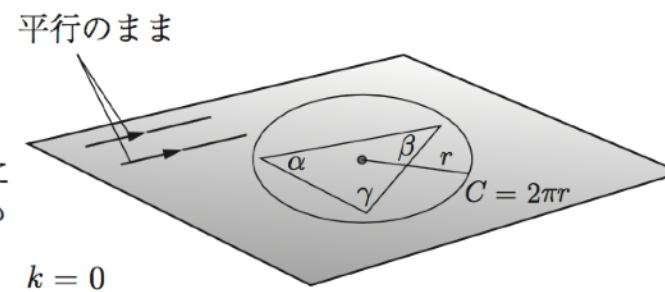
➡ 球対称時空として、3つのタイプが許される

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



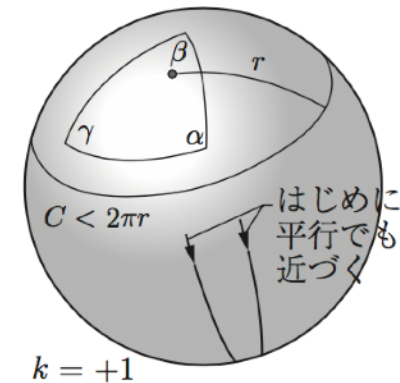
開いた宇宙

(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

➡ アインシュタイン方程式を解くと、大きさが時間と共に変化する時空の解（フリードマン解）が出てくる

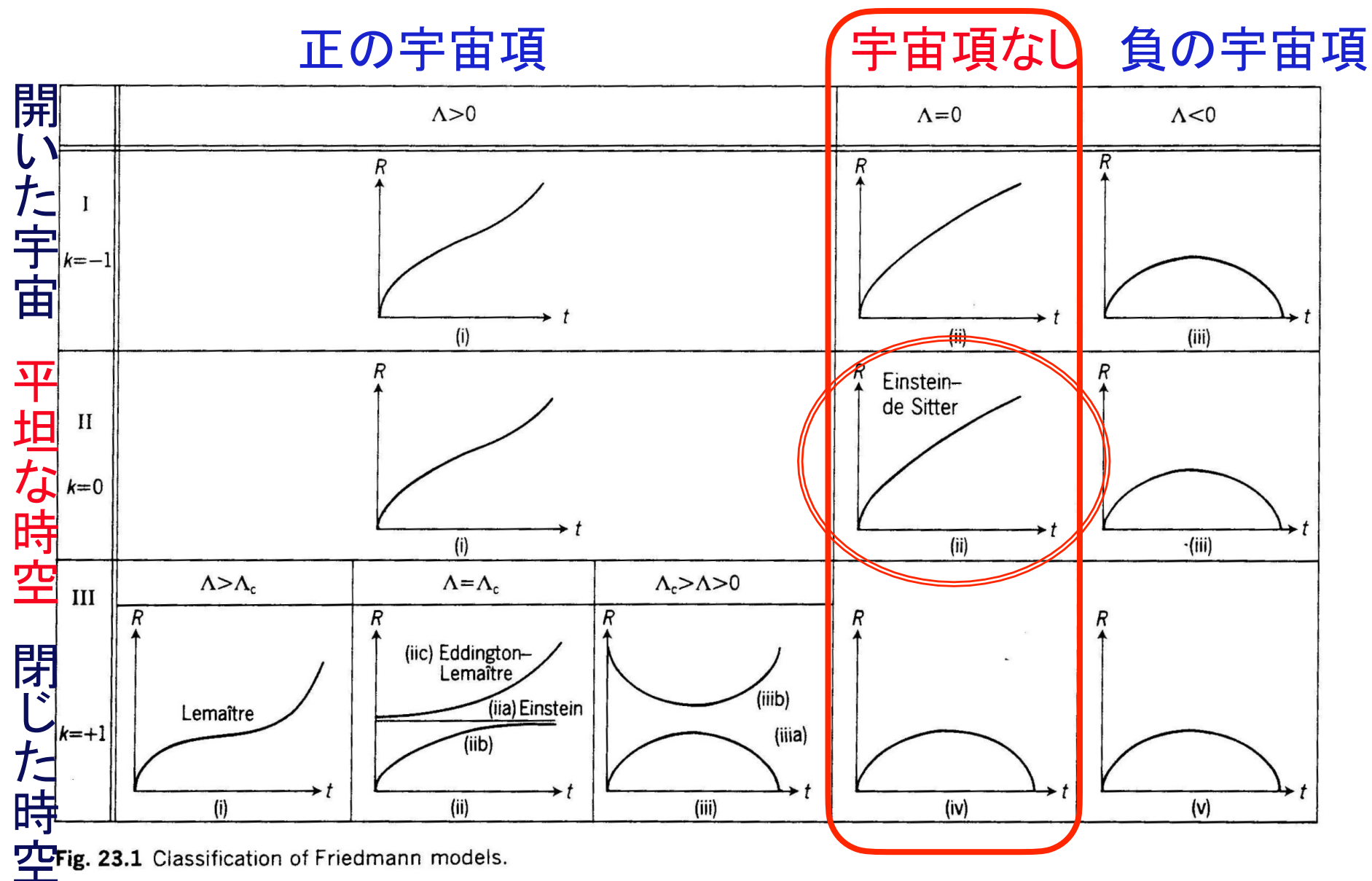
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

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

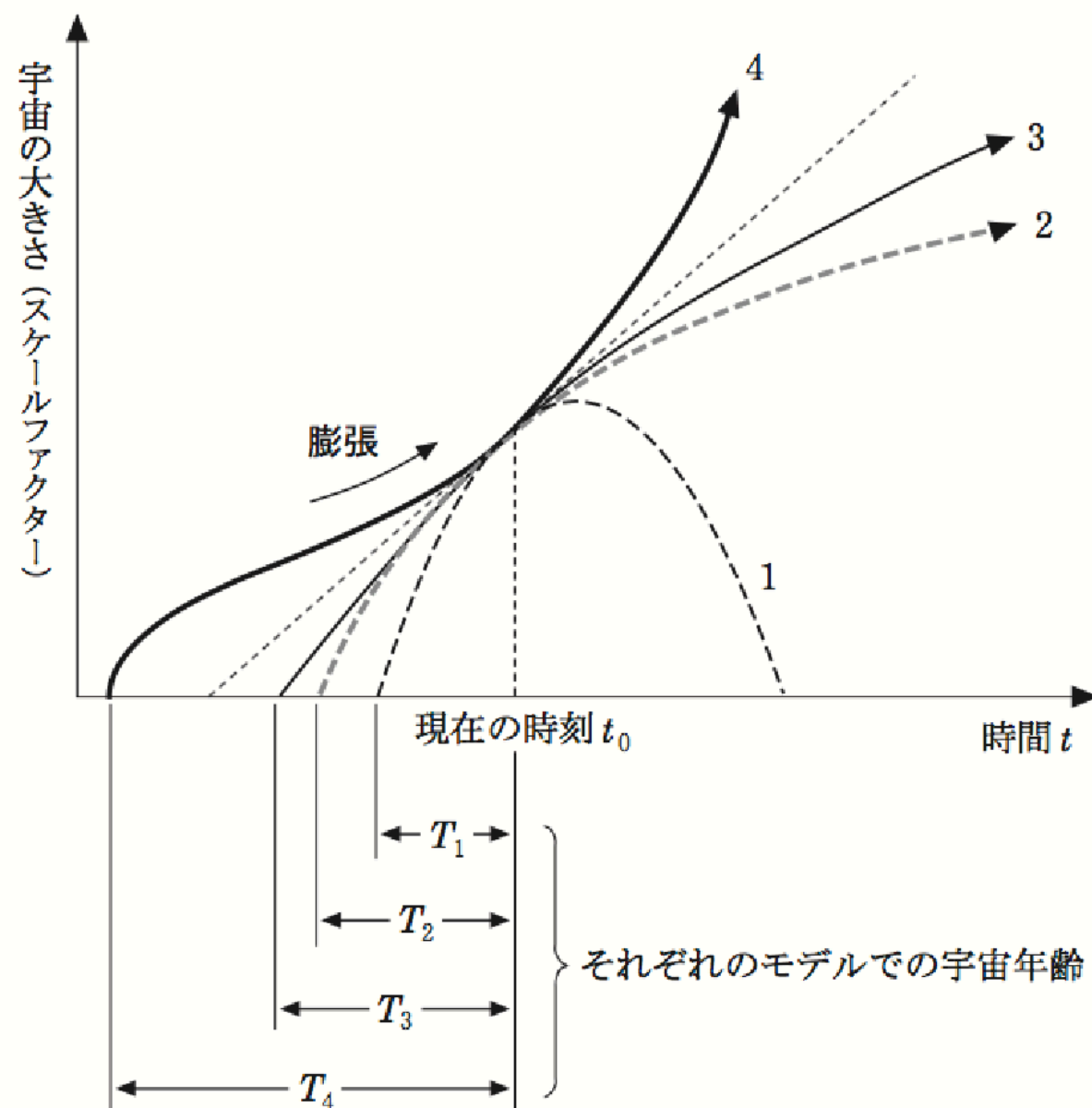
宇宙全体は膨張・収縮する？

➡ 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



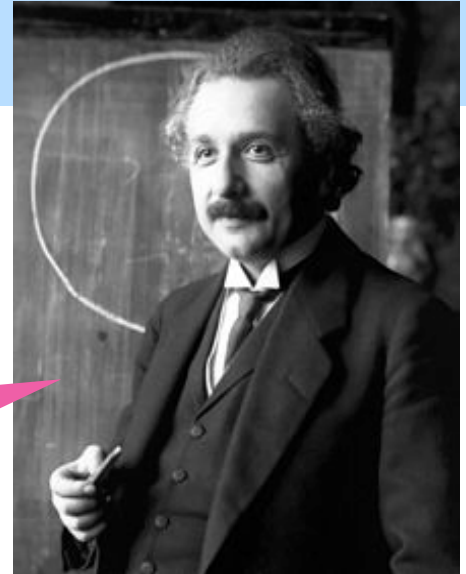
➡ 宇宙は不変のもの，と考えていたアインシュタインは困った

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

アインシュタインは膨張宇宙を信じなかった



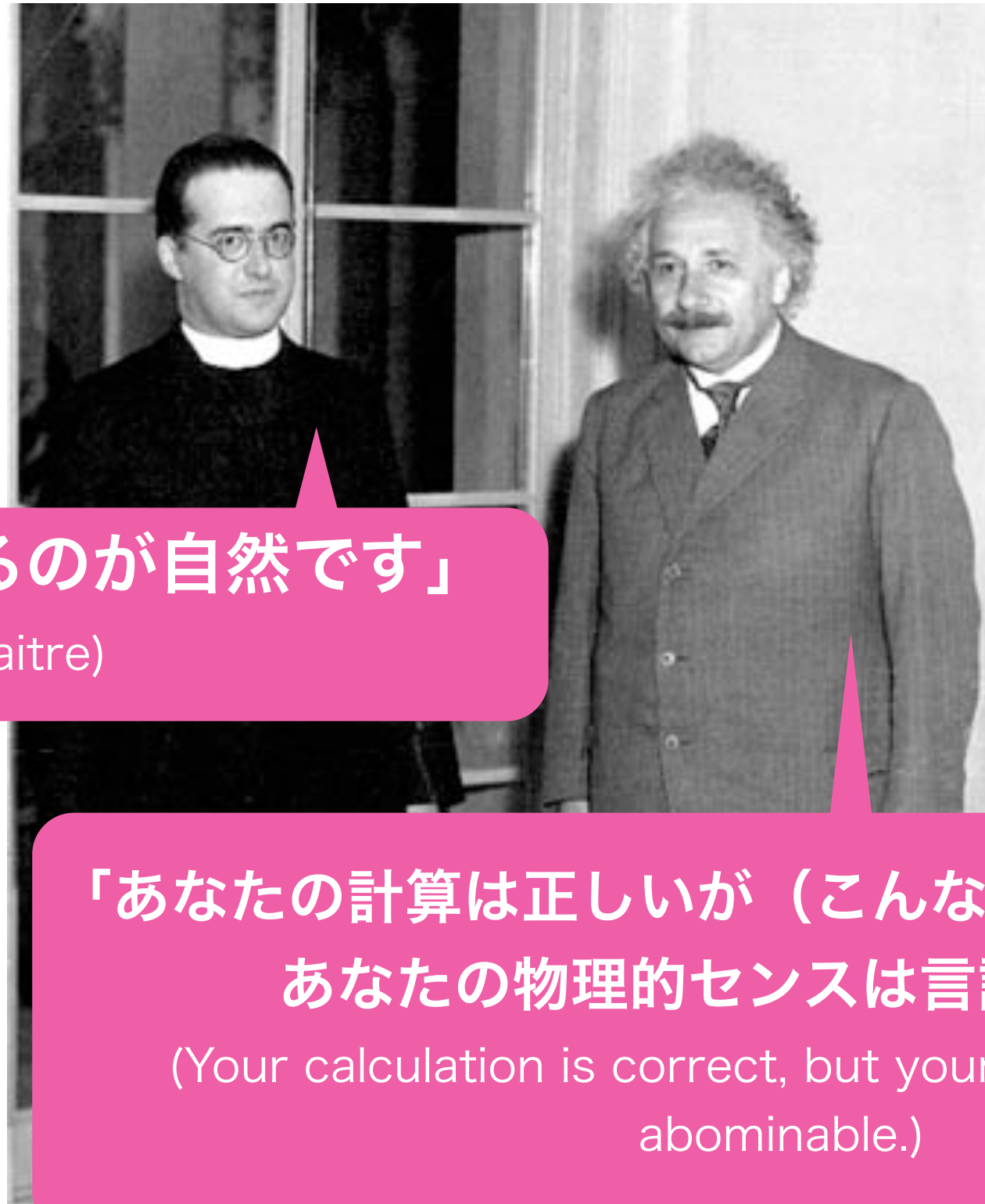
「宇宙は未来永劫不変であるべきだ」

⇒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

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

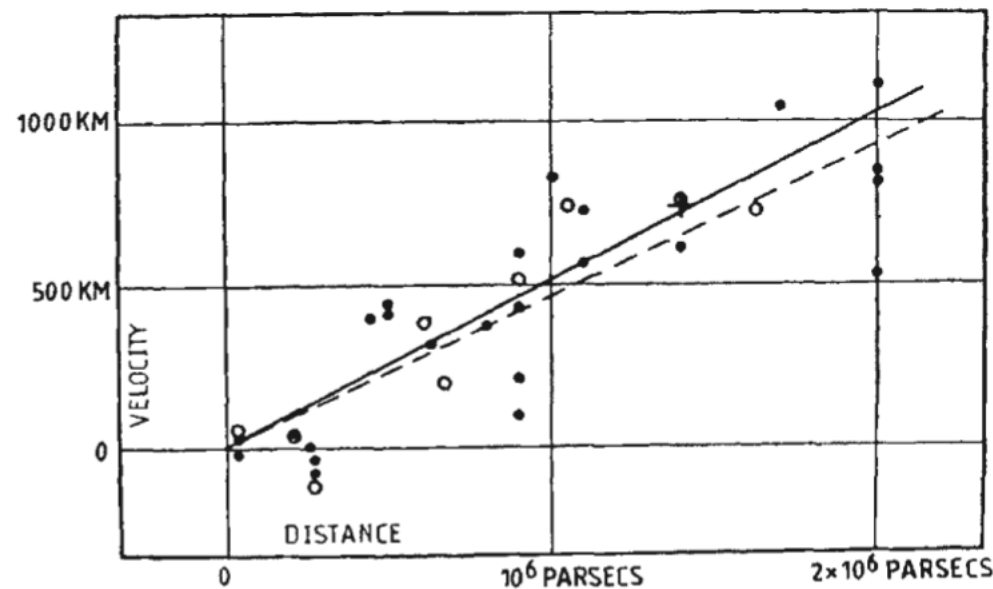
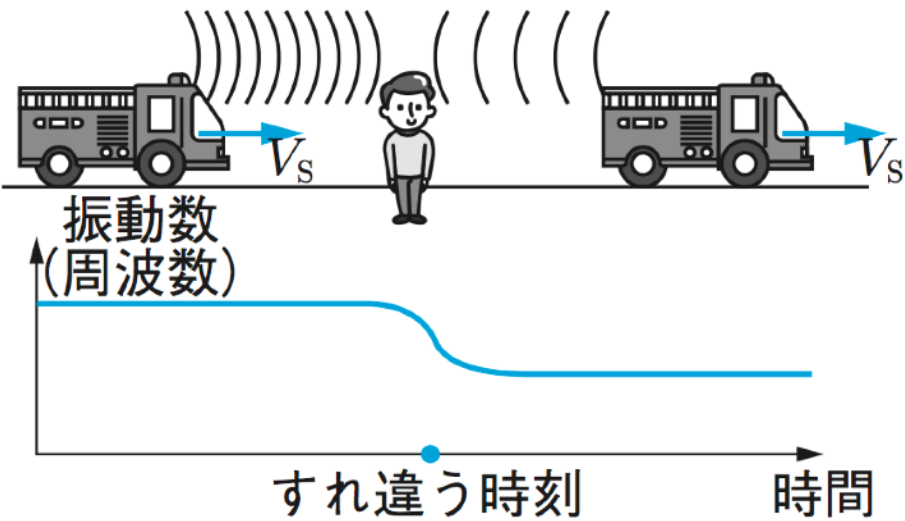
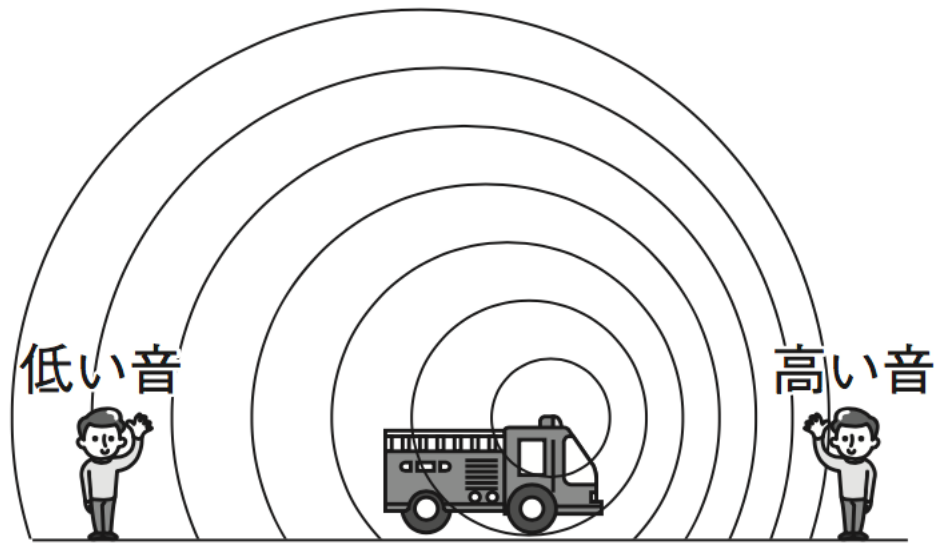


図 5.7 ハッブルが 1929 年に発表した図. 横軸は距離, 縦軸は銀河の後退速度. このグラフの傾きがほぼ一定になることが, ハッブルの法則である. ハッブルが報告した値は, $H_0 = 530 \text{ km/s/Mpc}$ だった. 現在値は $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$.

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

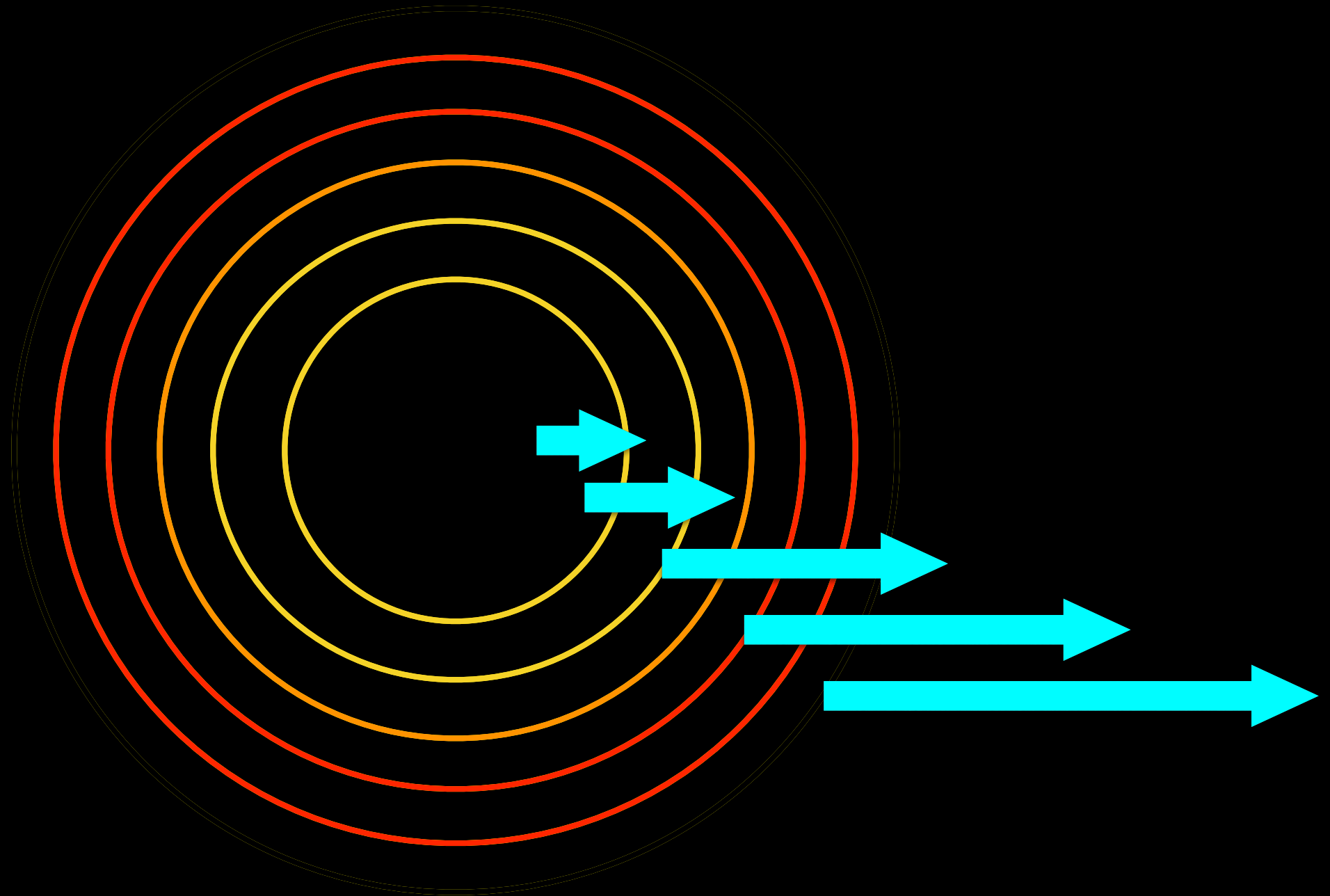
近づくとき

音：高い音

光：青方偏移



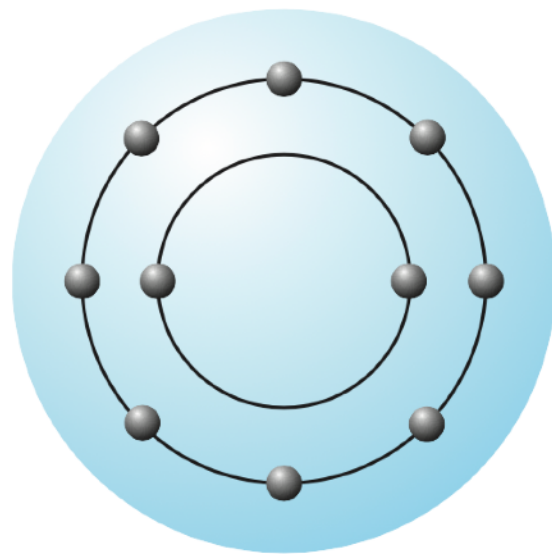
光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない＝宇宙の地平線



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

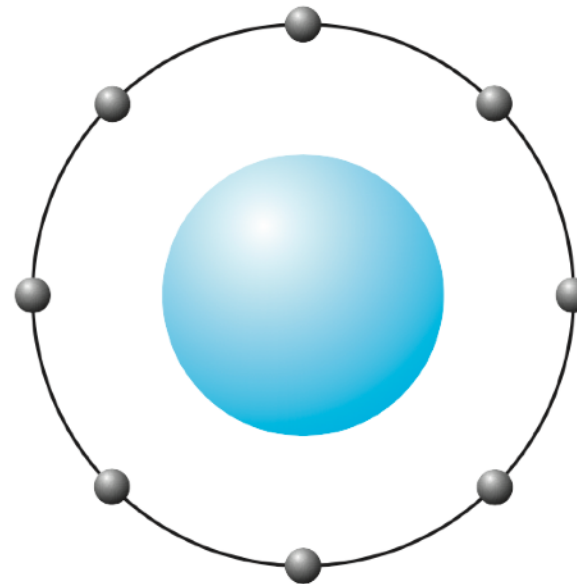
原子模型

トムソン模型
1903



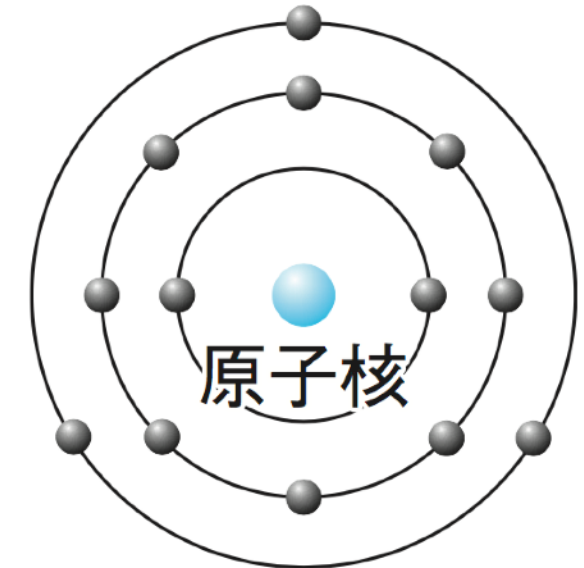
トムソンの
原子模型

長岡模型
1903



長岡の
原子模型

ラザフォード模型
1909



ラザフォードの
原子模型

問題点あり

「加速度をもって飛び回る電子は、電磁波を放射してエネルギーを失っていくはずなのに、何故回り続けていられるのか」

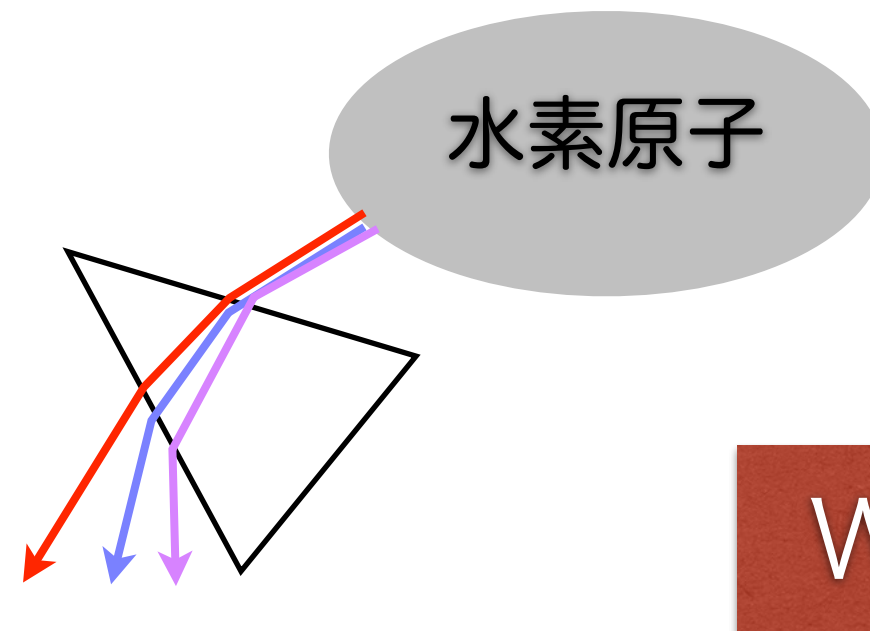
Why?

水素原子から出る輝線



太陽光をプリズムに通すと
連続スペクトルに分解されるが、...

気体から発せられる光は
いくつかの線スペクトルである



水素原子から出る輝線



パッシェン(1908)

バルマー(1885)

ライマン(1906)

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列 $n' = 1$	バルマー系列 $n' = 2$	パッシェン系列 $n' = 3$	...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
$\vdots$				
$n = \infty$	91.2	365	820	

水素原子から出る輝線

$$\lambda = 3.65 \times 10^{-7} \times \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (n = 3, 4, 5, 6, \dots)$$

実験結果を式にすると、
こうなった！

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \left(\begin{array}{l} n' = 1, 2, 3, \dots \\ n = n' + 1, n' + 2, n' + 3, \dots \end{array} \right)$$

表 4.1 水素の線スペクトルの波長 λ [nm].

	ライマン系列 $n' = 1$	バルマー系列 $n' = 2$	パッシェン系列 $n' = 3$	...
$n = 1$				
$n = 2$	122			
$n = 3$	103	656.210		
$n = 4$	97.3	486.074	1870	
$n = 5$	95.0	434.01	1280	
$n = 6$	93.8	410.12	1090	
$\vdots$				
$n = \infty$	91.2	365	820	

Why?

ボーアの原子モデル

ボーアの仮定 1 : 量子条件 (1913 年)

原子には定常状態があり、定常状態では電磁波を出さず安定であって、これまでの力学が成り立つ。定常状態は、電子の角運動量 L が、 n を整数として、

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.9)$$

の条件をみたすときである。

Niels Bohr
1885-1962



ボーアの仮定 2 : 振動数条件 (1913 年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり、そのときには、軌道間のエネルギー差（各軌道のエネルギー準位の差）に相当する光子を吸収あるいは放出する。 n 番目と n' 番目の軌道を遷移するとき、エネルギー差は次式で与えられる。

$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (4.11)$$

ボーアの原子モデル

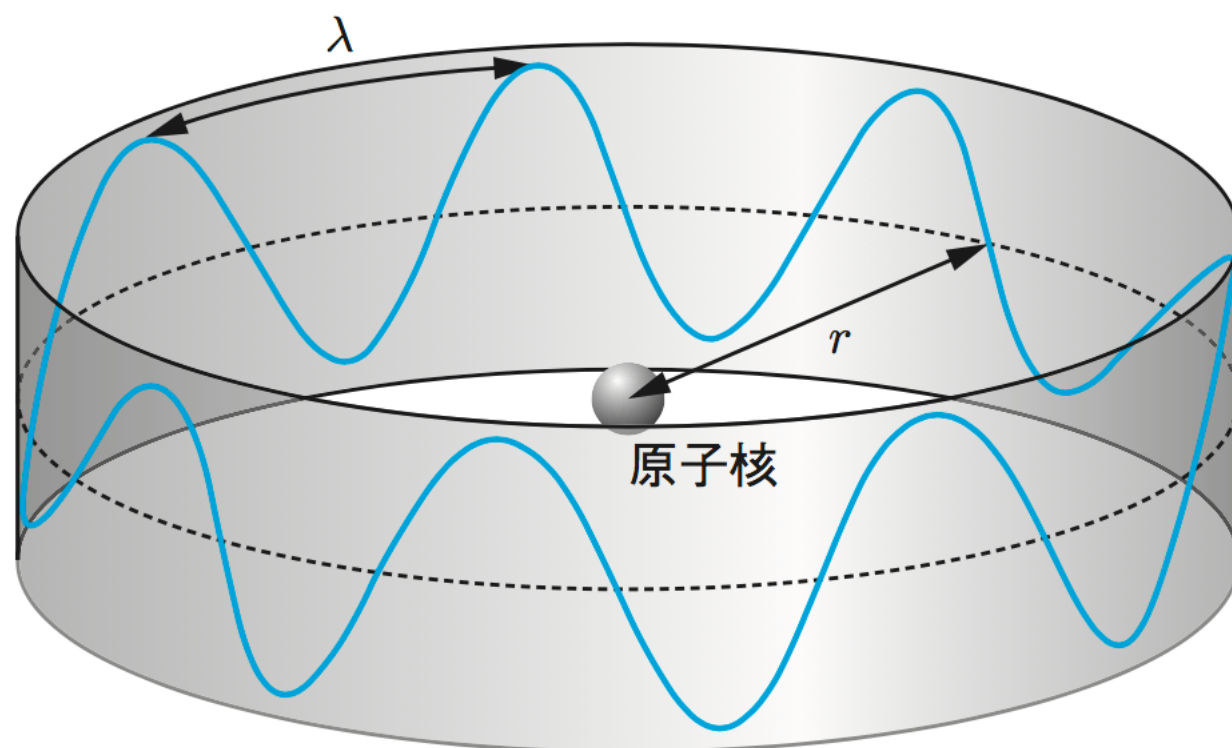
ボーアの仮定 1：量子条件 (1913 年)

原子には定常状態があり，定常状態では電磁波を出さず安定であつて，これまでの力学が成り立つ．定常状態は，電子の角運動量 L が， n を整数として，

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.9)$$

の条件をみたすときである．

Niels Bohr
1885-1962



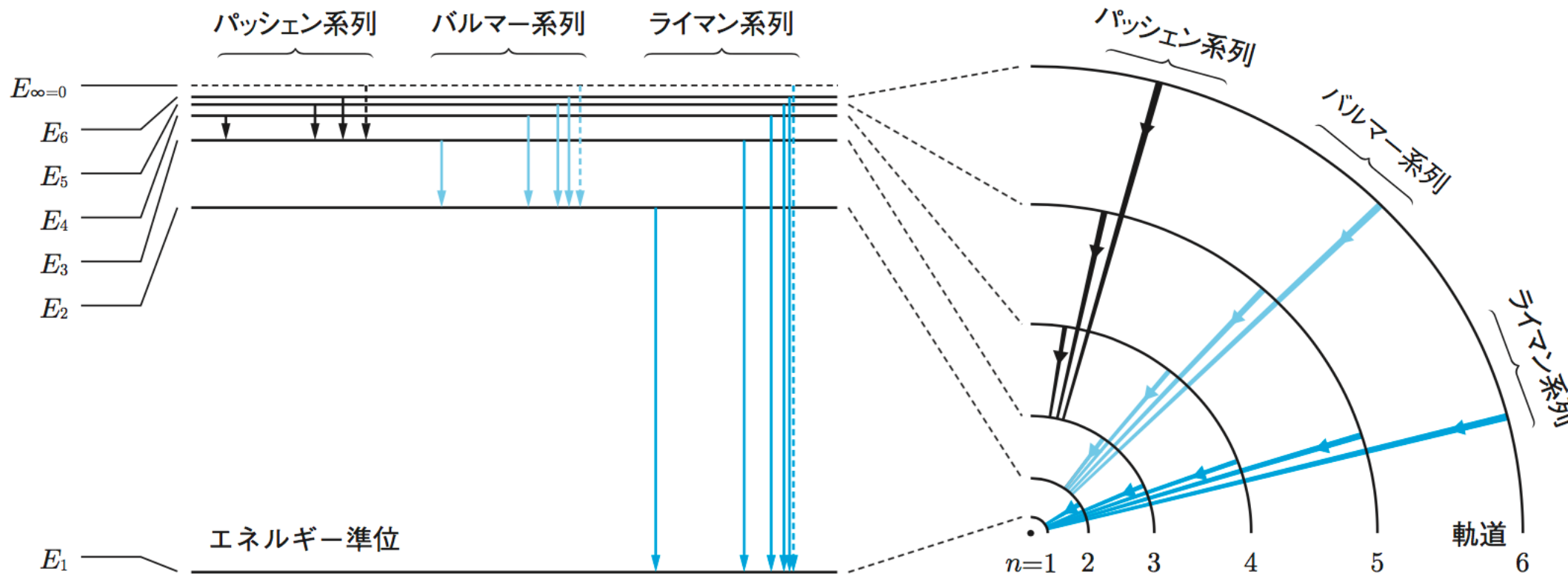
◆ Advanced ボーアの量子条件

ボーアが提案した (4.9) 式は，のちにド・ブロイが提案した「物質波」の考え (1923 年) ($\Rightarrow$ §4.3.2) でようやく意味付けがされた．ド・ブロイは大胆にも電子の運動は波のように振る舞うと考えて，電子の「波長」 λ が $\lambda = \frac{h}{mv}$ で与えられるものとした．この考えを使うと，(4.9) 式は

$$2\pi r = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.10)$$

と書くことができる．これは，電子軌道の 1 周の長さ $2\pi r$ が，電子の「波長」 λ の整数倍である，という式である．つまり，電子に許される軌道半径 r は，図 4.13 のように，「ちょうど 1 周したときに，波形が元の波形につながる」ときだ，ということになる．

ボーアの原子モデル



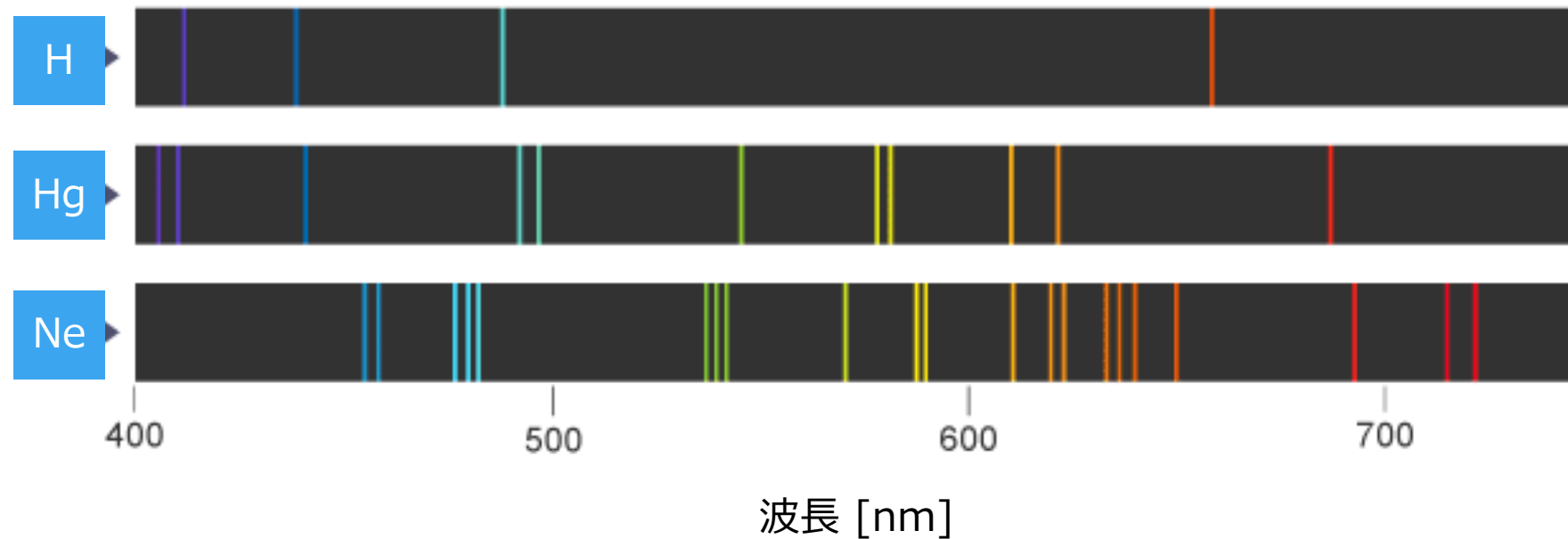
ボーアの仮定 2：振動数条件 (1913 年)

電子はとびとびに存在する軌道間を移ることがあり，そのときには，軌道間のエネルギー差（各軌道のエネルギー準位の差）に相当する光子を吸収あるいは放出する． n 番目と n' 番目の軌道を遷移するとき，エネルギー差は次式で与えられる．

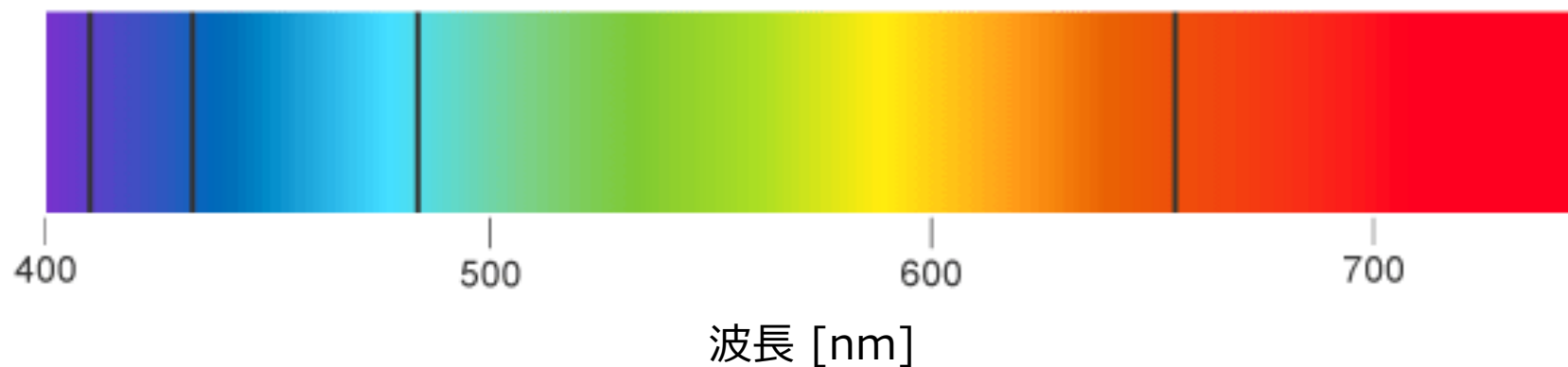
$$E_n - E_{n'} = h\nu \quad (E_n > E_{n'}) \quad (4.11)$$

輝線スペクトル・連続スペクトル

(a) 元素が放つ輝線スペクトル

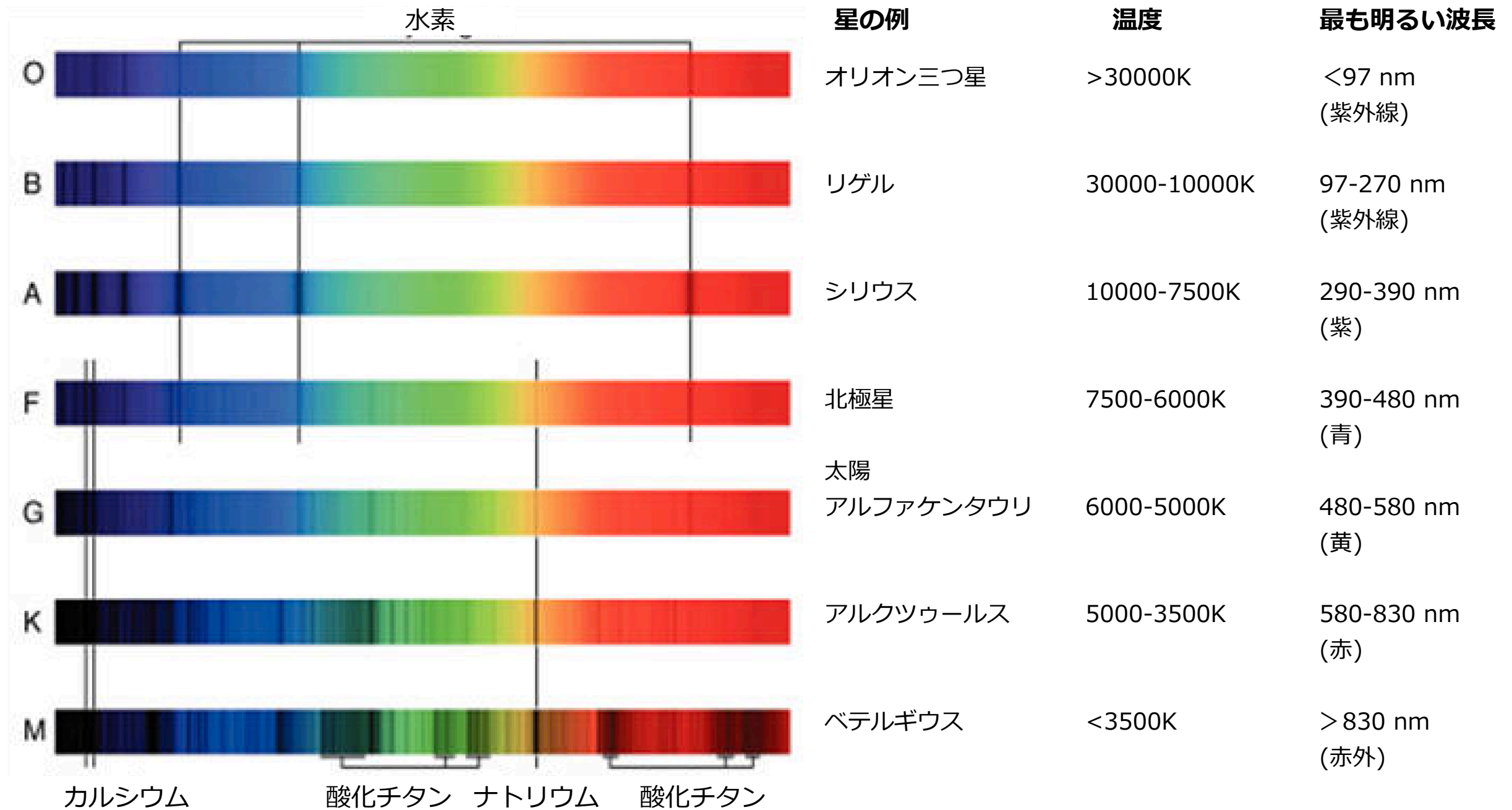


(b) 水素原子による暗線（吸収線）が見られる連続スペクトル



問題 太陽光のスペクトルに暗線（吸収線）がみられる理由は何か。

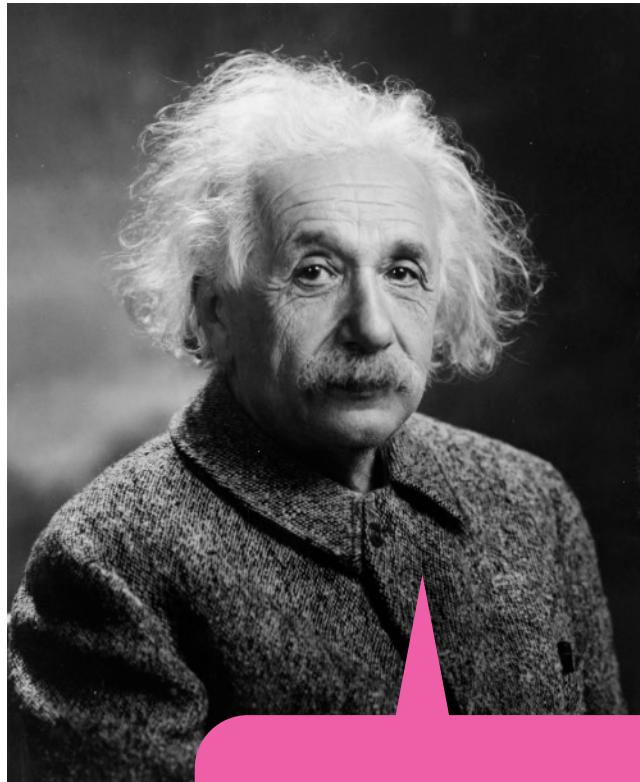
星のスペクトル型 OBAFGKM



問題

遠方の星が赤方偏移していることから宇宙膨張が発見されたが、
遠方（宇宙初期）には赤い星が多い、と考えなかった理由は何か。

アインシュタイン, 膨張宇宙をついに信じる

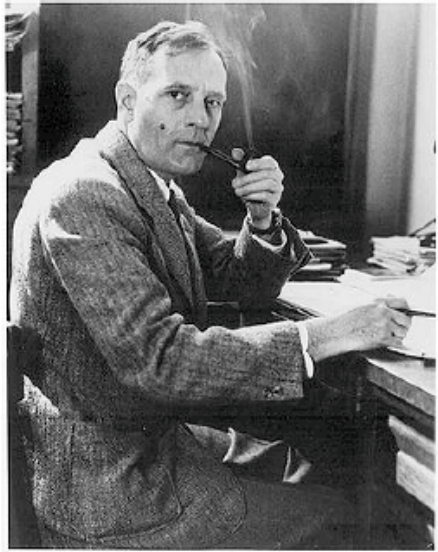


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

「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に紹介したが、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だ。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

宇宙はどこまで解明されたか

相対性理論（時空の理論）

宇宙が膨張していることがわかるまで

宇宙にはじまりがあったことがわかるまで

宇宙論の未解決問題（ダークマター，ダークエネルギー）

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



<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

火の玉宇宙論の誕生

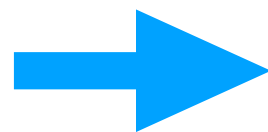
宇宙膨張が本当なら、過去は小さな宇宙だったはず。
宇宙のはじまりは、すべての物質とエネルギーが集まり、
非常に高温で高密度の状態だったことになる。

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

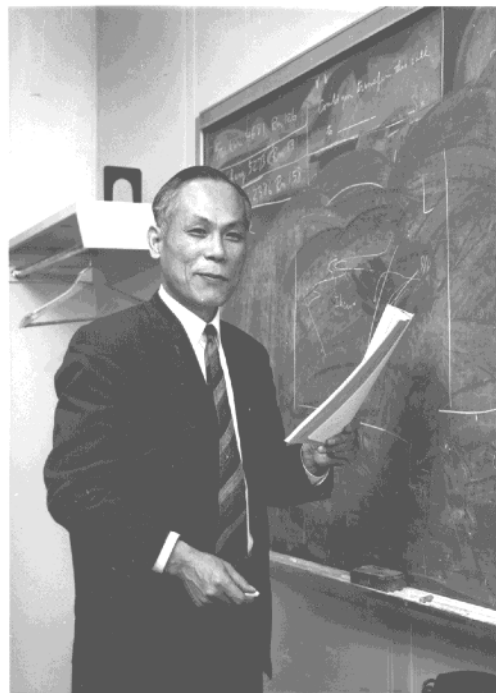
H. BETHE
Cornell University, Ithaca, New York

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

ビッグバン宇宙論

~~火の玉宇宙論~~ vs 定常宇宙論

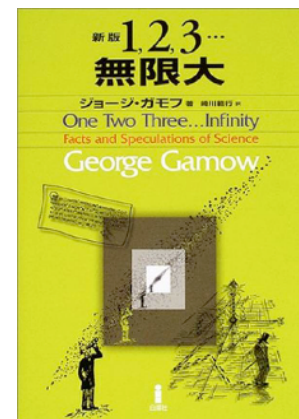
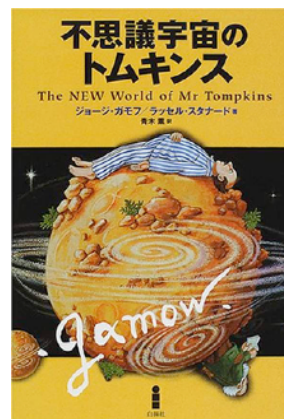
「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成が
された



ガモフ

George Gamow
(1904–1968)



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

「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



ホイル

Fred Hoyle
(1915–2001)



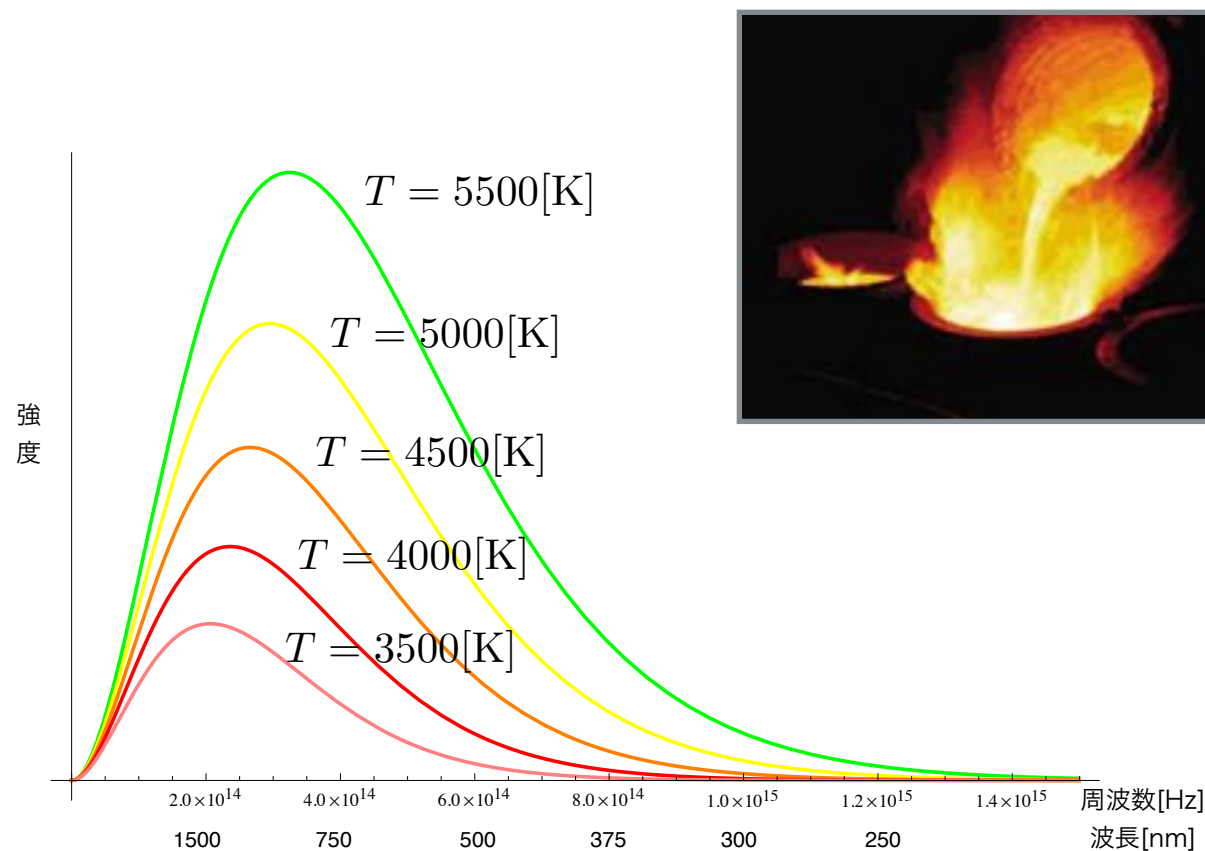
「宇宙には始まりがあった」

「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 5 K ~ 7 K 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



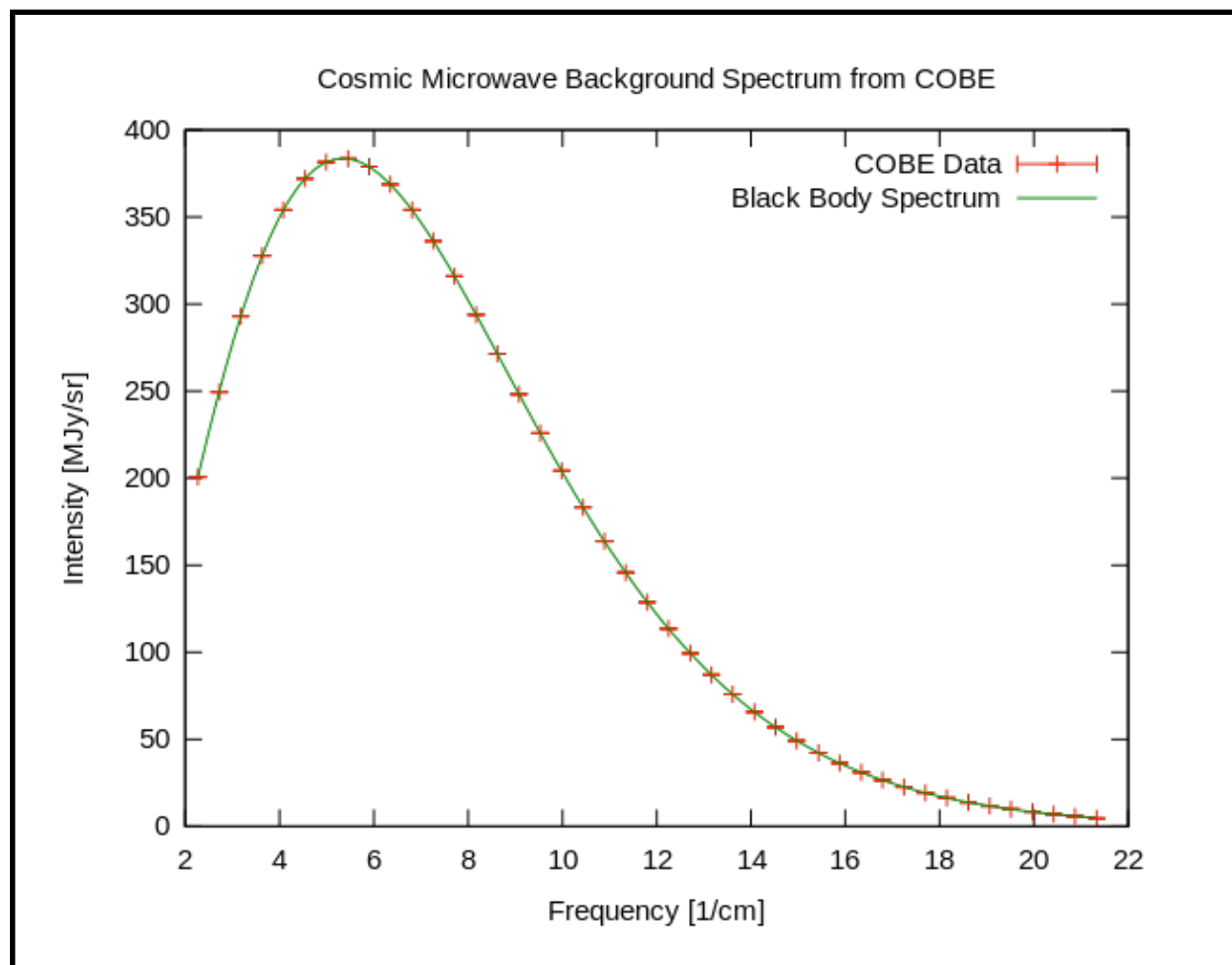
The Sept 29th 1963
Gamow Dacha
785 - 8th Street
Boulder, Colorado

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 & Hermann's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5~~4~~°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 Dirac. 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

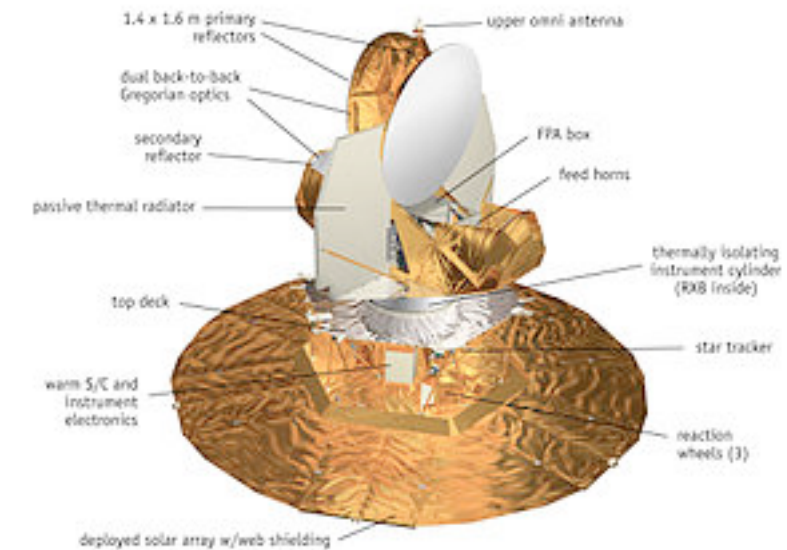
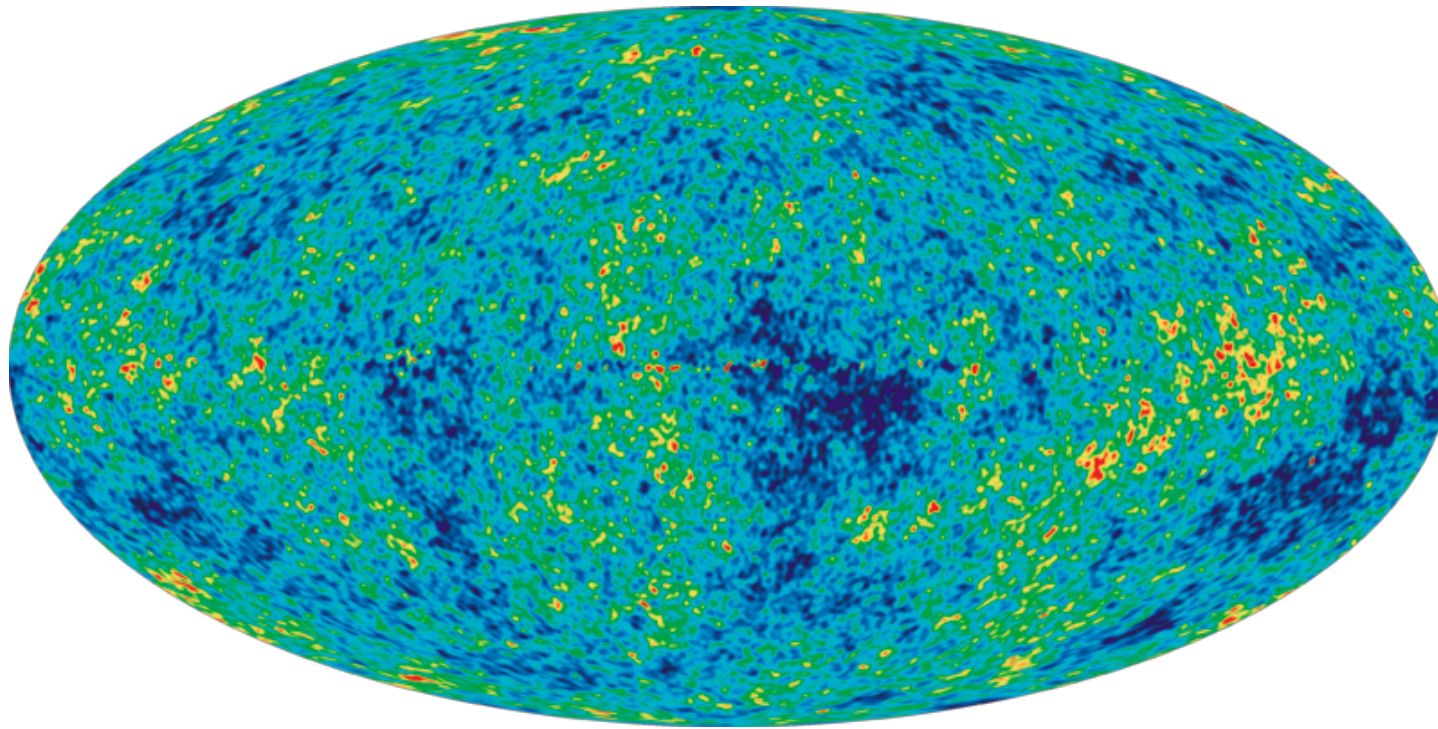
宇宙膨張で温度下がって

~~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、~~90~~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。

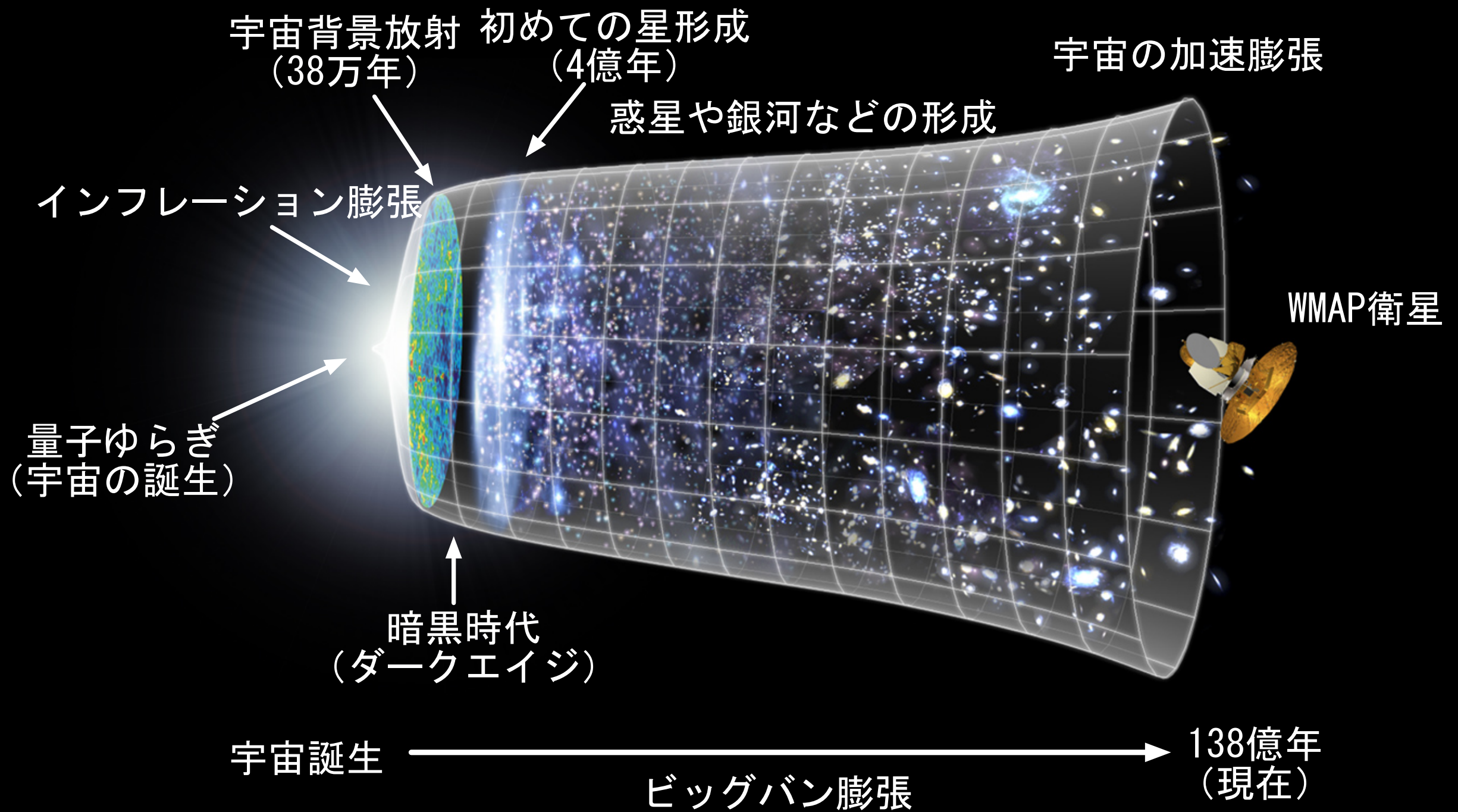
約3000 K

宇宙膨張で温度下がって

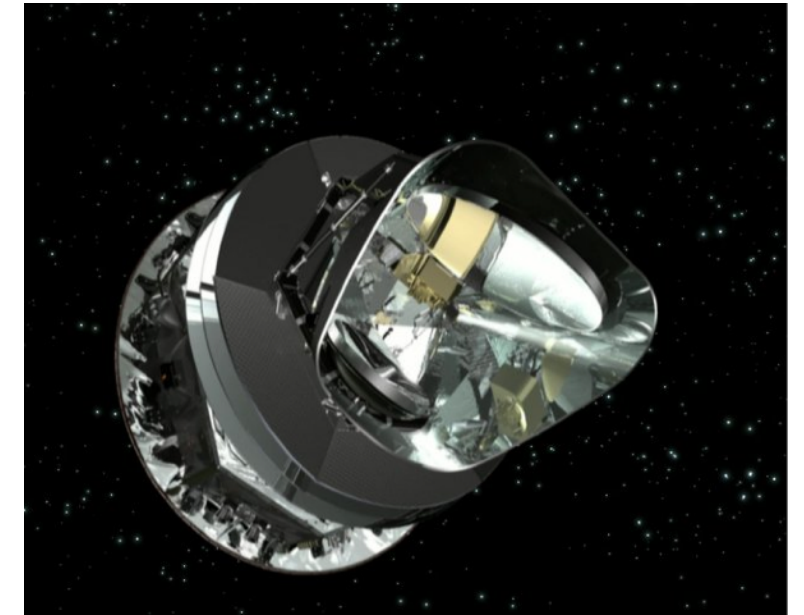
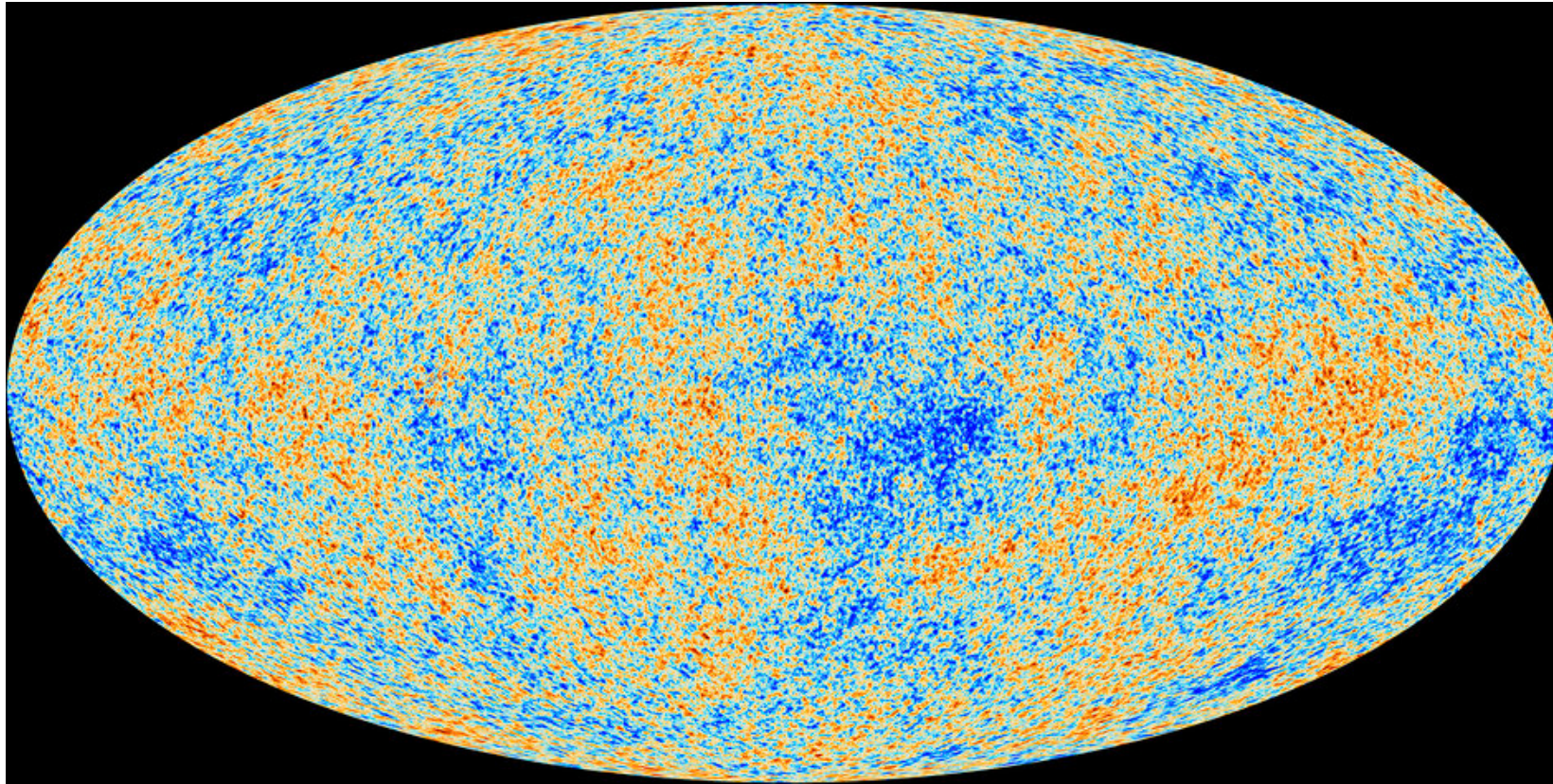
~~2.73 K~~ 位

2.7251





2013年, Planck衛星によるCMBの測定

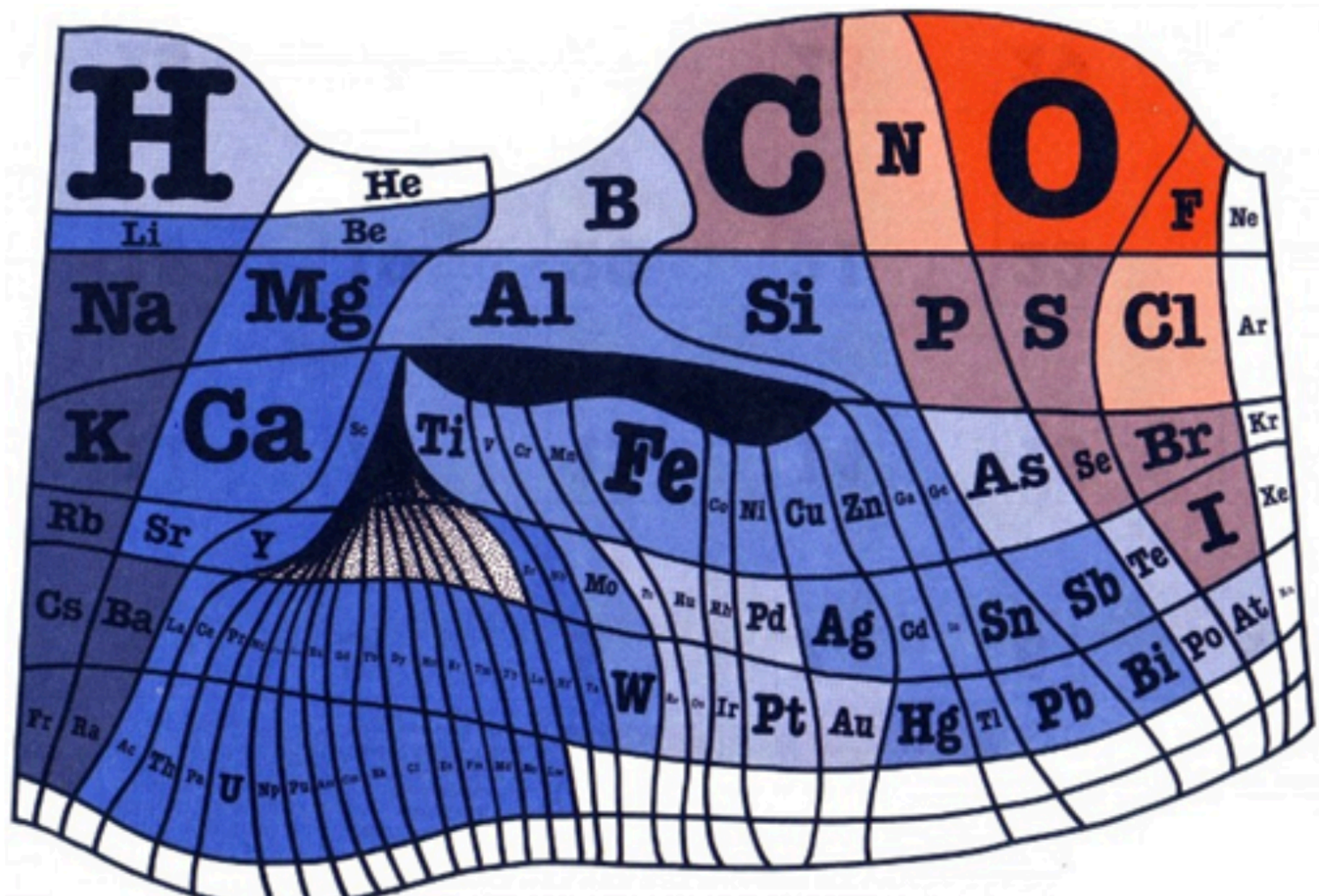


38万年

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 ~~2.725 K~~ 位

$2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$

水素, 重水素の存在比の観測と理論が合う



<http://chemreflux.blogspot.jp>

標準ビッグバンモデル：まとめ

(1) 宇宙膨張の発見 (1929)

遠くの銀河は私たちの銀河からの距離に比例した速度で一様に遠ざかっている。

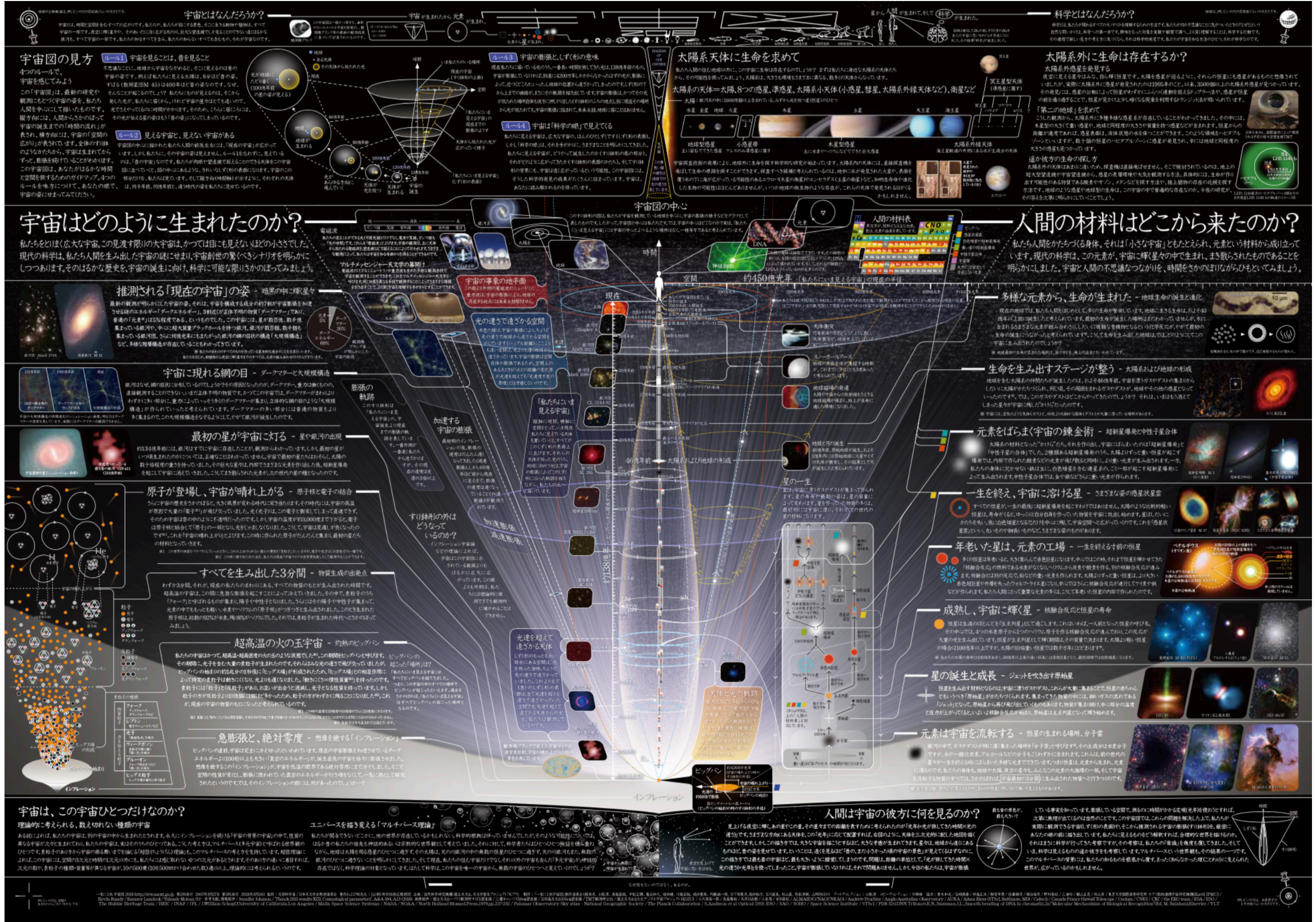
(2) 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の発見 (1964)

等方的に、かつて宇宙が高温だったことを示すマイクロ波が観測された。

(3) He, 重水素の存在比の観測

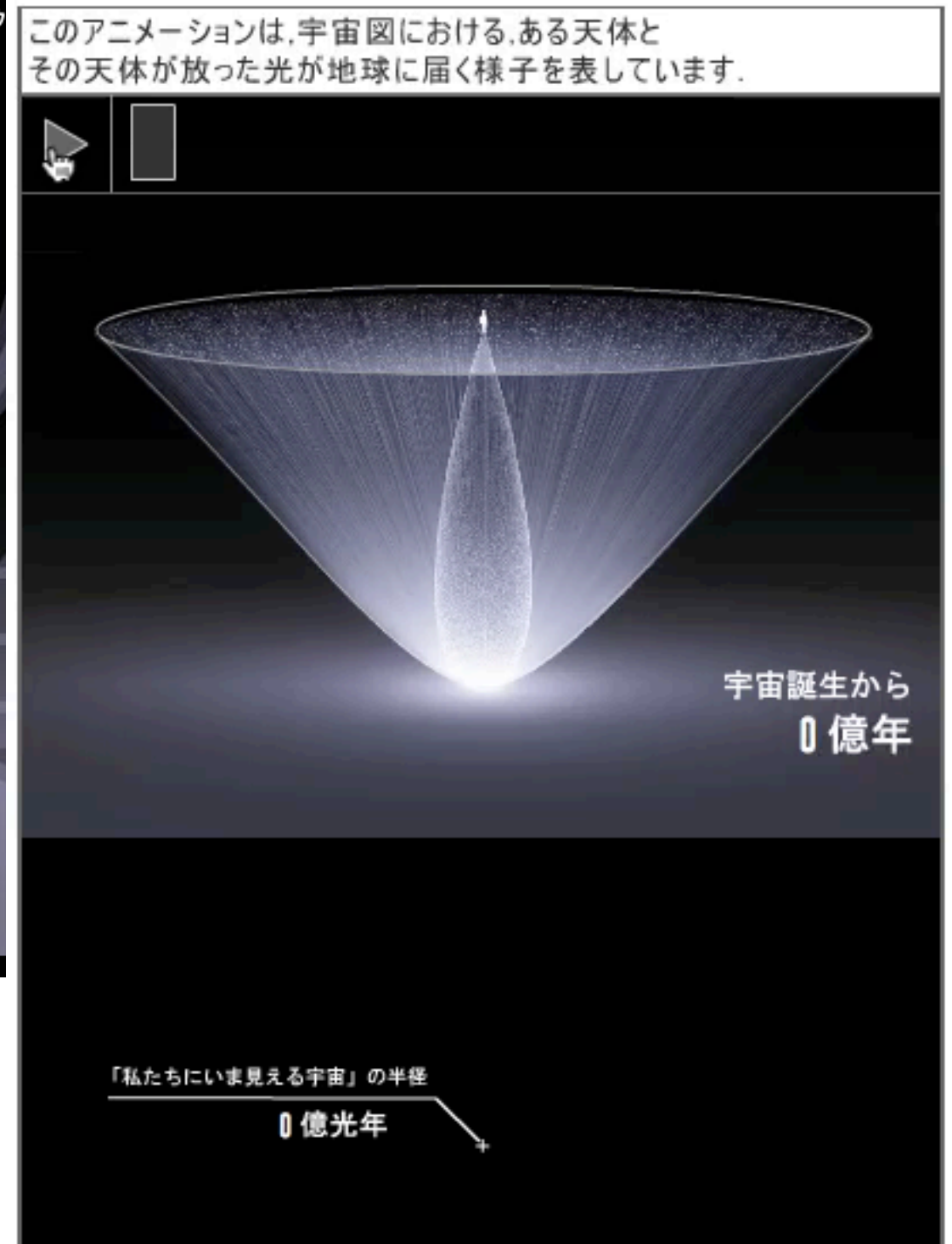
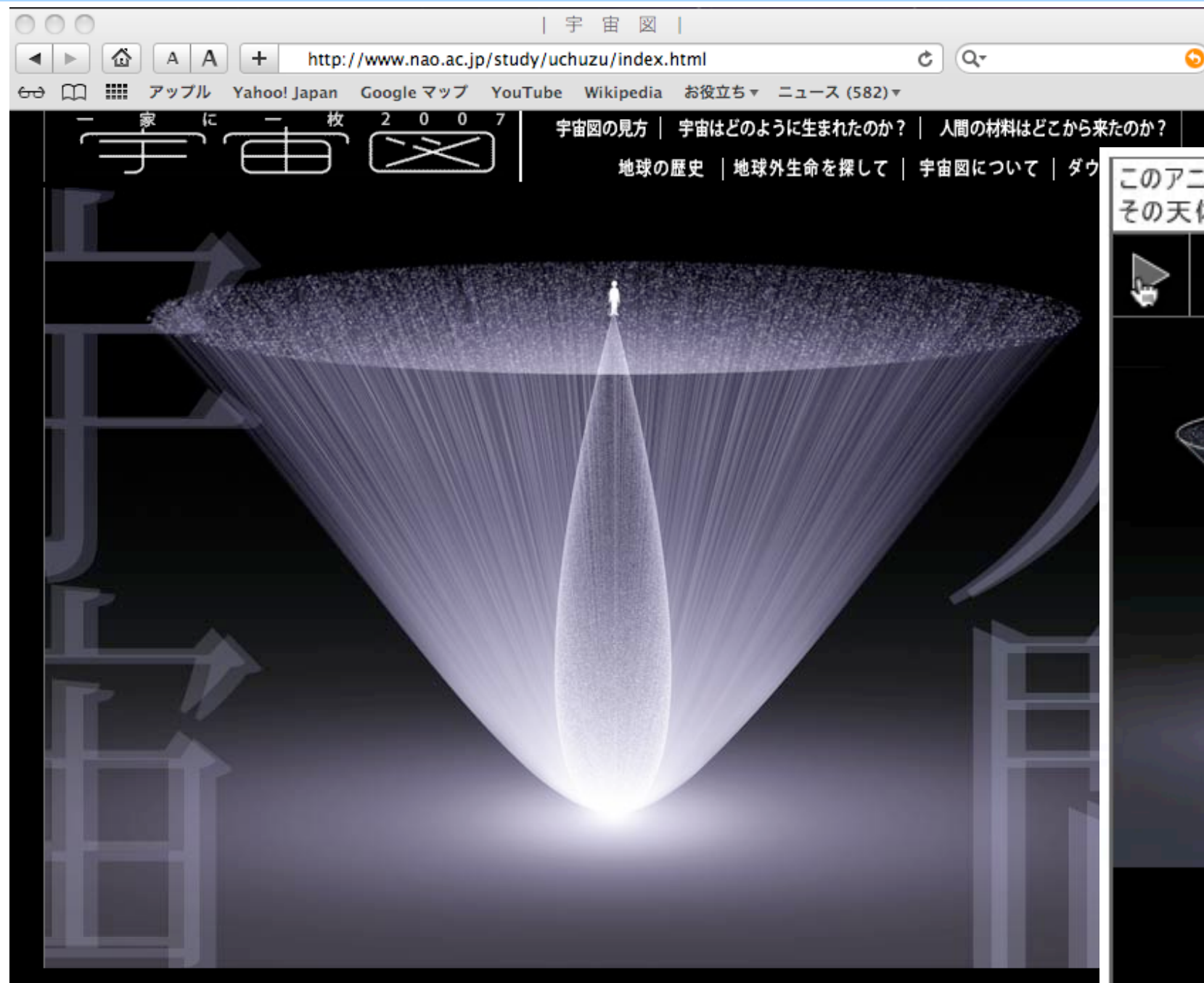
初期宇宙の熱核反応で、陽子と中性子から生成されると考えられる He と重水素の存在比が、星間空間で観測される値とほぼ一致した。

標準ビッグバン宇宙論は正しい



宇宙図の見方

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>



ルール1 宇宙を見ることは、昔を見ること

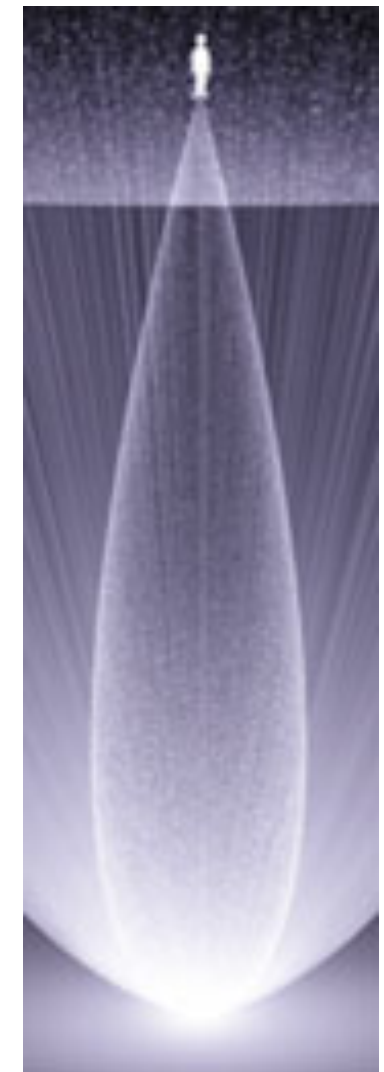
太陽は、8分ほど昔の姿。すばる（散開星団M45）は400年ほど昔の姿。遠くを見るほど、過去の姿をみている。

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

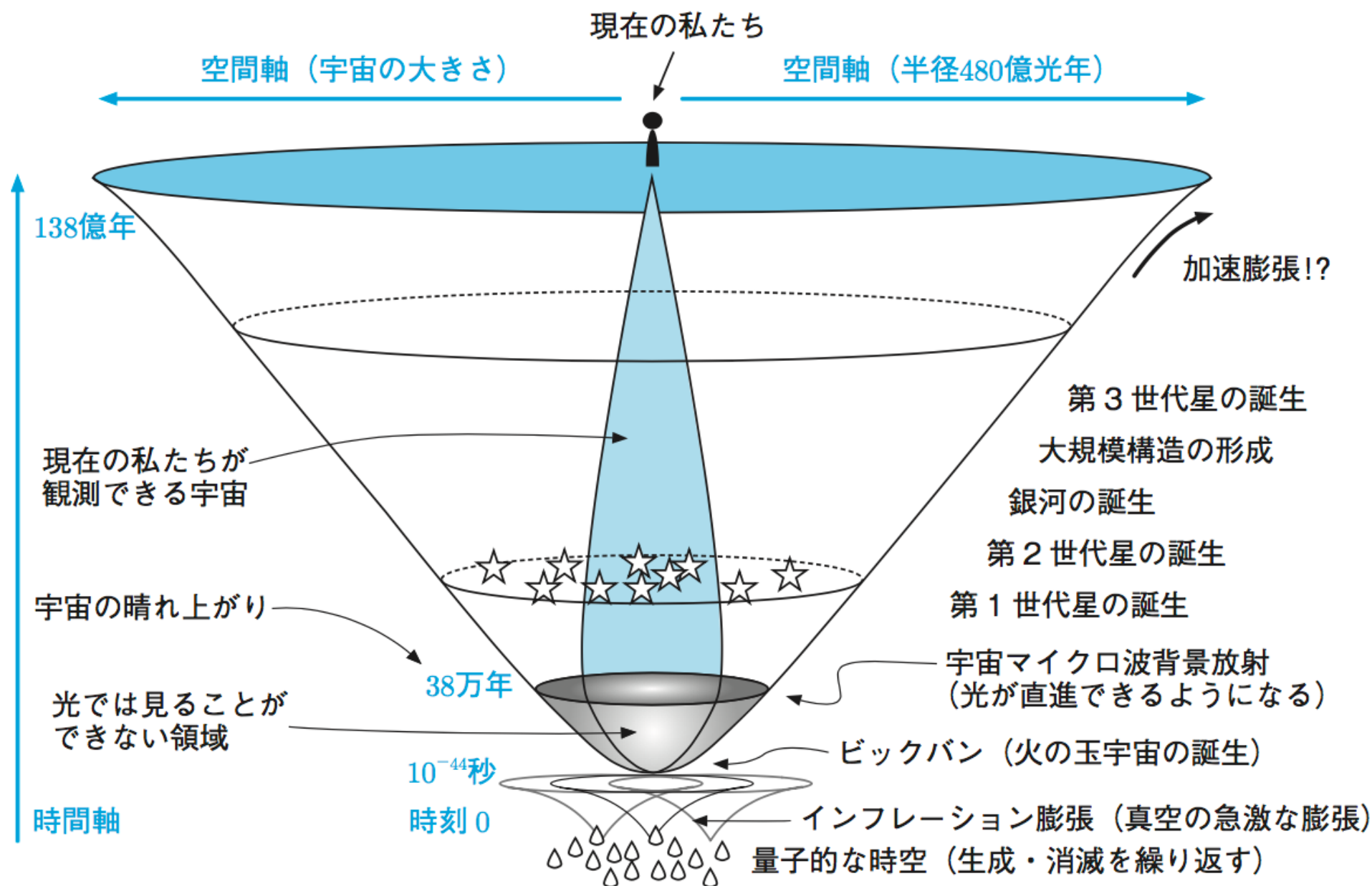


図 5.18 ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がり横軸にして示す。現在の私たちは図の上の中央部分にいる。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38 万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の涙のしずくの部分に限られる。

宇宙図の大きさ 半径480億年

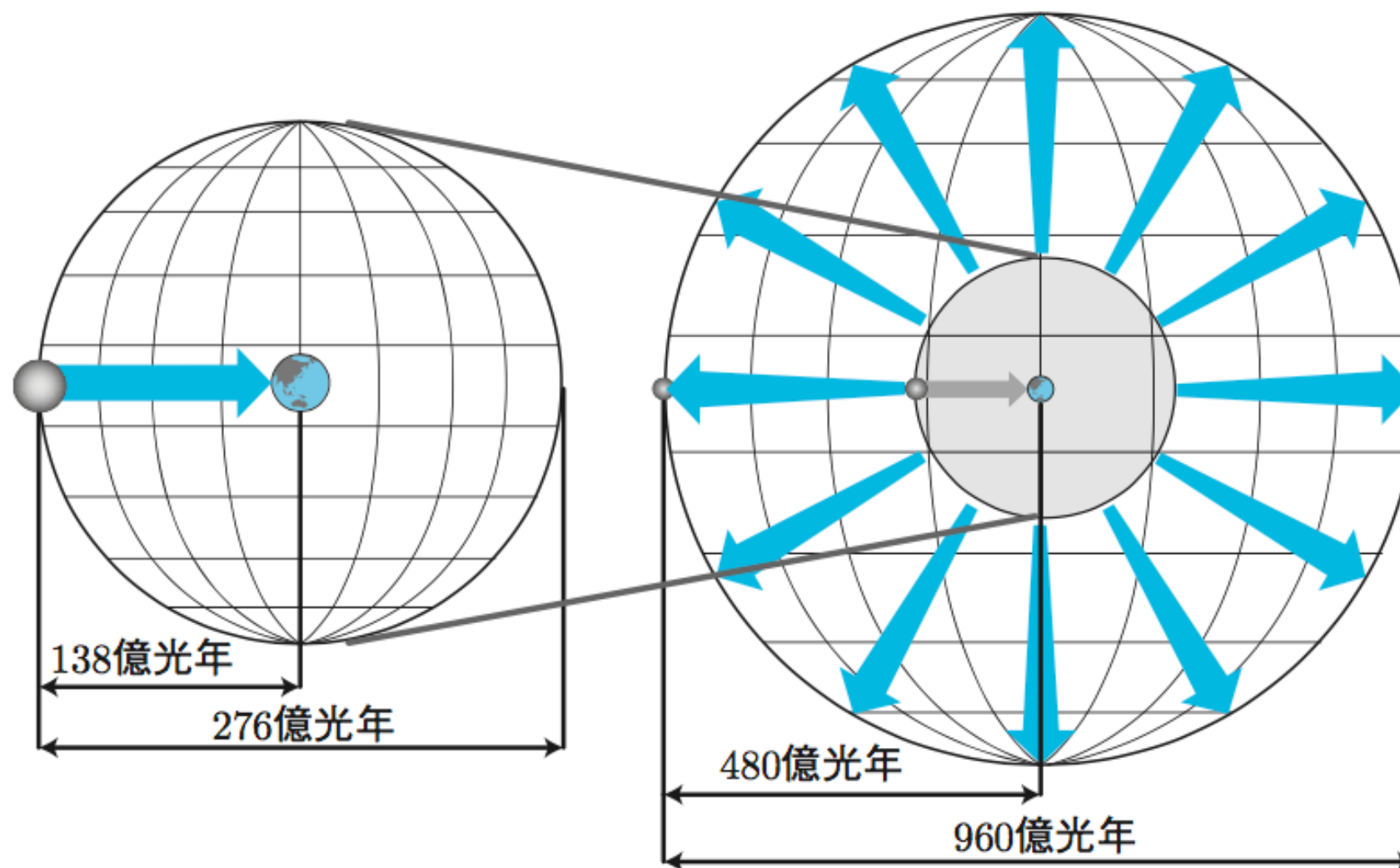


図 5.19 〔左〕宇宙誕生直後から進む光を見て、私たちは宇宙の年齢を 138 億年と理解する。〔右〕しかし、宇宙は膨張しているので、現時点での宇宙の大きさは半径 480 億年になる。

宇宙はどこまで解明されたか

相対性理論（時空の理論）

宇宙が膨張していることがわかるまで

宇宙にはじまりがあったことがわかるまで

宇宙論の未解決問題（ダークマター，ダークエネルギー）

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



<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



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？

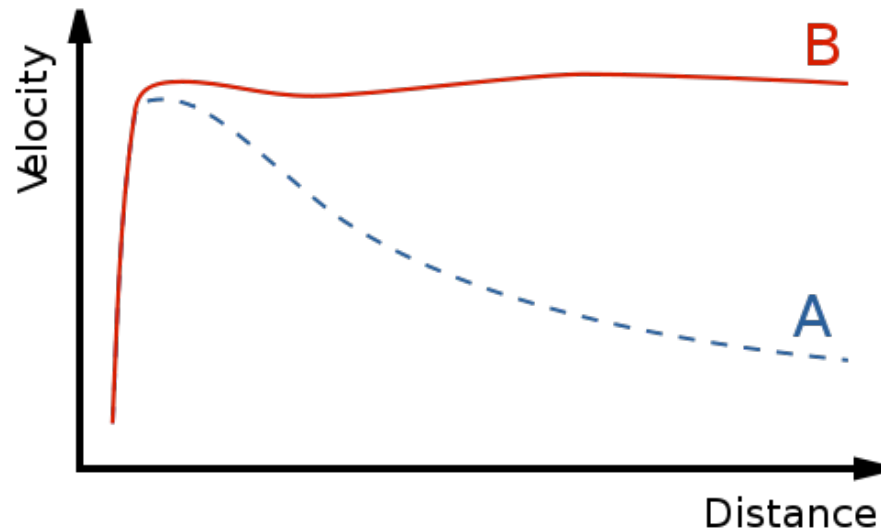
ダークエネルギー問題

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



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)



◆ 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

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。

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。

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

ダークマター探査実験：XMASS

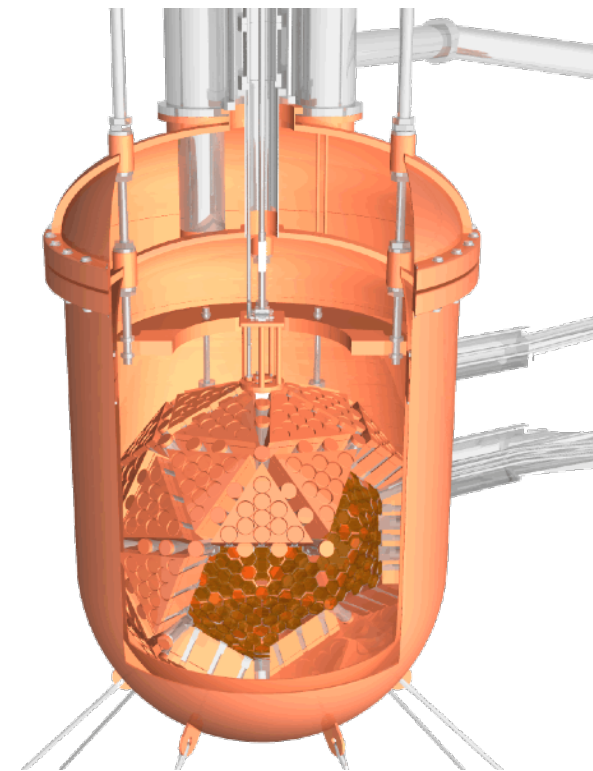
未知の素粒子検出を目指す。

岐阜県神岡鉱山跡に，液体キセノン（約 -100°C ）タンクを設置。



直径10m、高さ10mの水タンク

中央に1トン液体キセノン検出器を設置する



1トンの液体キセノンが
642本の光電子増倍管で囲まれている

ダークマター探査実験：XMASS

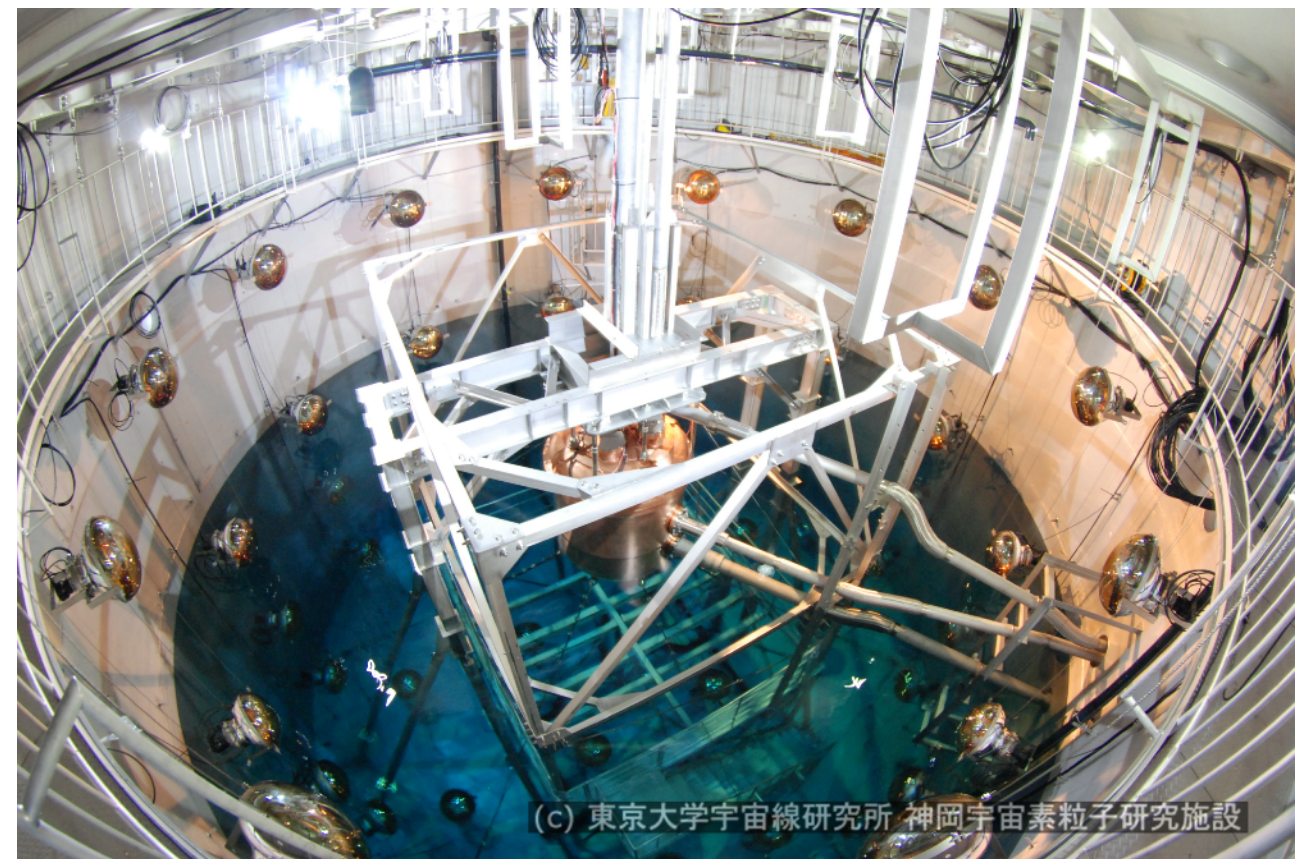
未知の素粒子検出を目指す。

岐阜県神岡鉱山跡に，液体キセノン（約 -100°C ）タンクを設置。



直径10m、高さ10mの水タンク

中央に1トン液体キセノン検出器を設置する



1トンの液体キセノンが
642本の光電子増倍管で囲まれている

「CDMS」 (極低温ダークマター探索)

Cryogenic Dark Matter Search

2013/4/16

Most of the mass of the Universe is unidentified. The **CDMS** Experiment hopes to change that..

DARK MATTER: One of the greatest mysteries in the history of cosmology!

YOU ARE HERE, IN THE THE MILKY WAY GALAXY

AND YOU ARE SURROUNDED BY DARK MATTER

Scientists now recognize that the universe is teeming with an unidentified form of matter. This invisible matter is thought to consist of particles which are distributed throughout the universe. In fact, these dark matter particles constitute **most of the mass of the universe**.

★ **GALAXIES ARE MOSTLY DARK MATTER CLOUDS:** Over the evolution of the Universe, the dark matter particles formed structures, like water vapor forms clouds. These massive collections of dark matter particles became the galaxies. In fact, the **gravitational force of dark matter helps hold galaxies together**. The stars and interstellar dust are just icing on the cake!

★ **WIMPs, A NAME FOR DARK MATTER:** We know that dark matter particles generate gravity, but they interact very weakly otherwise. In our conception they are weakly-interacting, but massive particles. We call them **WIMPs** for short.

How do we hope to see WIMPs?

Since the earth and our Sun are in a galaxy, and we know that our galaxy like all others is full of dark matter particles, then some of those particles must be going through our earth — through you and through everything. Yes, even through our "detectors in the deep Soudan mine!"

Why are we operating in the mine?

We know WIMPs aren't stopped by the dirt and rock of the earth (they go right through it). But the earth above our experiment in the mine blocks cosmic rays and their by-products. **So we go underground to "hide" from the cosmic rays!** Our detectors should still see WIMPs, but the data won't be muddled with cosmic ray effects.



Cosmic rays are blocked by the earth above the experiment.

WIMP

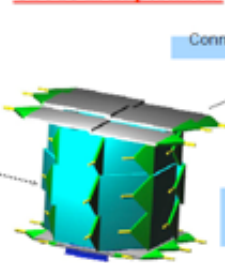
WIMPs pass right on through the earth since they interact so weakly. But, our detectors must therefore be super-sensitive to detect them!

Some background particles generated by Earth's natural radioactivity

Shielding: Even though the experiment is shielded from cosmic rays by the dirt, we surround our detectors with plenty of shielding (lead and polyethylene) to keep out background particles which, by chance, still happen to make it to our experiment. Some are produced by the natural radioactivity of the earth itself (like radon in your homes).

veto: We surround the shielding with scintillators which detect light produced by the few remaining cosmic ray particles which make it through the dirt overhead. This is necessary because these cosmic ray particles can produce neutrons, which look like WIMPs in our detectors.

CDMS II Experiment



Connects to fridge here

The Icebox, in which our towers of detectors are positioned.

Cryogenic Dark Matter Search: DETECTING WIMPs IN THE CDMS EXPERIMENT

Our unique "ZIP" detectors each consist of a crystal "hockey puck" and some sensors attached to it. The crystal receives energy from incoming particles. The sensors give us information about how the particles interact with the crystal.

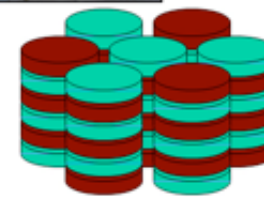
The crystal is made of either silicon or germanium. This is the same material from which transistors and solar cells are made.

The sensors employ state-of-the-art superconducting technology fabricated in a manner similar to computer chips. The sensors on the crystal surface give two sets of signals each time a particle interacts with the crystal:

- [1] **Vibration:** An array of tiny sensors on one side detect vibrations in the crystal produced by an incoming particle. A tiny vibration in a crystal is called a "phonon".
- [2] **Charge:** A metal grid on the other side collects electronic charge which was displaced within the crystal by the incoming particle.



Close-up of the array of sensors which detect vibrations in the crystal caused by an incoming particle



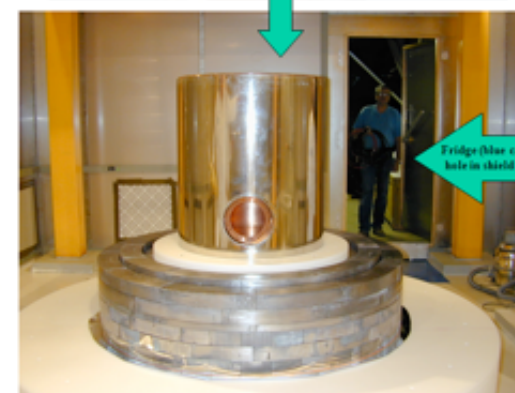
The detectors are assembled into "towers". One tower has 6 detectors. The towers are inserted into the "Icebox", which is really much colder than ice! In fact, the detectors work best at only 0.02 degrees above absolute zero, the temperature where all random thermal motion stops.



CDMS currently operates a complementary experiment at Stanford University at the Stanford Underground Facility. It has produced the strongest limits yet on WIMP interactions with matter. **But, operating in Soudan will dramatically increase our sensitivity!**



The CDMS collaboration enjoys the participation of a diverse group of scientists from many institutions: Brown University, Case Western Reserve University, Fermi National Accelerator Laboratory, Lawrence Berkeley National Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Santa Clara University, Stanford University, University of California at Berkeley, University of California at Santa Barbara, University of Colorado at Denver, University of Minnesota



Fridge (blue box) connects to Icebox through hole in shield (partially constructed, at left)

UNDERSTANDING THE DETECTOR SIGNALS: HOW TO IDENTIFY A WIMP!

The main point: A WIMP (dark matter particle) should produce a vibration signal when it bumps into an atomic nucleus in the detector crystal, but it should NOT produce a significant electronic charge signal since WIMPs themselves have no electronic charge interaction.

The different colored dots (see figure below) represent different types of particles which interacted with one of our detectors. The **purple** dots are **photons** (which are just individual bits of light), the **green** dots represent **stray electrons** (called "beta rays") and the **red** dots were produced by **neutrons**. Each of these particles interacts with our detectors in a different way.

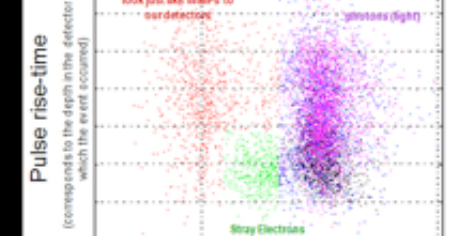
What does this mean?

It shows that we can distinguish among different particles by how much electronic charge they knock loose in the detector crystal.

The good news:

WIMPs should behave very much like **neutrons** (the red dots). They displace very little charge in the crystal. If we can identify **neutrons**, this means that we can also tell which signals are produced by **WIMPs!**

In Soudan there should be almost no neutrons around since we are deep underground. So, anything which looks like a neutron is likely to be a WIMP!



Amount of electronic charge displaced in the detector (Events to the right displaced more charge while the events on the left displaced less)



ダークマター候補「WIMP」の兆候を検出

Dark Matter Search Results Indicate First Hint of WIMP-like Signal

2013/4/16

米Texas A&M大学などの国際研究チーム「CDMS」（極低温ダークマター探索）が、宇宙全体の約4分の1を占めるとされる謎の物質「ダークマター」の兆候を99.8%の確率（3-sigma）で検出したと発表した。

「CDMS」は地下に設置された極低温装置を用い、ダークマターの候補の一つである**WIMP**（Weak Interacting Massive Particles: 弱い相互作用しか及ぼさない粒子）が検出器の結晶の原子にぶつかったときにわずかに揺れ動く「反跳」と呼ばれる現象の検出を目指してきた。以前米ミネソタ州に設置されていた検出器「CDMS-II」のデータ解析を進めたところ、軽量な（15GeV/C2以下）WIMPに対して感度の高いシリコンでこの反跳と思われる事象が3個見つかった、という。まだ、「偶然ではないかもしれない兆候がある」というレベルで、「発見」というの域ではない。

グラフは、WIMP粒子の質量として制限された領域を示す。

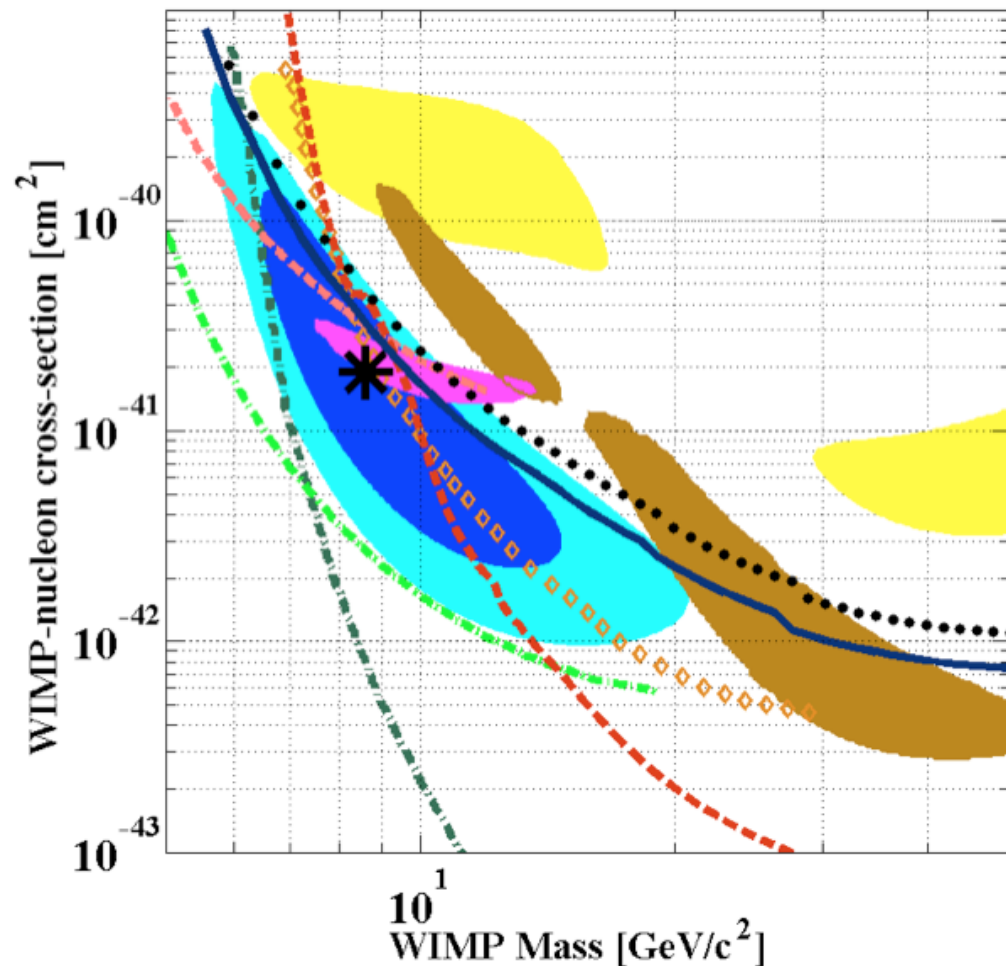


FIG. 4. Experimental upper limits (90% confidence level) for the WIMP-nucleon spin-independent cross section as a function of WIMP mass. We show the limit obtained from the exposure analyzed in this work alone (*black dots*), and combined with the CDMS II Si data set reported in [22] (*blue solid line*). Also shown are limits from the CDMS II Ge standard [11] and low-threshold [27] analysis (*dark and light dashed red*), EDELWEISS low-threshold [28] (*orange diamonds*), XENON10 S2-only [29] (*light dash-dotted green*), and XENON100 [30] (*dark dash-dotted green*). The filled regions identify possible signal regions associated with data from CoGeNT [31] (*magenta*, 90% C.L., as interpreted by Kelso *et al.* including the effect of a residual surface event contamination described in [32]), DAMA/LIBRA [16, 33] (*yellow*, 99.7% C.L.), and CRESST [18] (*brown*, 95.45% C.L.) experiments. 68% and 90% C.L. contours for a possible signal from these data are shown in blue and cyan, respectively. The asterisk shows the maximum likelihood point at (8.6 GeV/c², 1.9 × 10⁻⁴¹ cm²).

<http://www.science.tamu.edu/articles/1052>

<http://arxiv.org/abs/1304.4279>

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

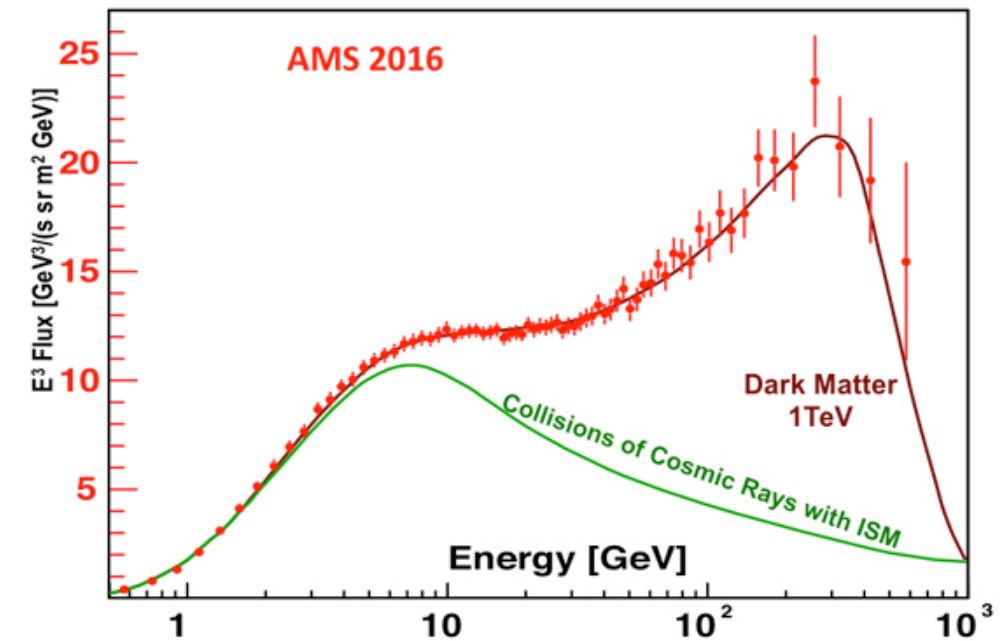


真貝 寿明 Of course, MACHO (a massive chocolate).

いいね！ · 返信 · 👍 4 · 2016年9月27日 6:57

ダークマター 発見か？

諸説紹介



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)

<https://home.cern/about/experiments/ams>

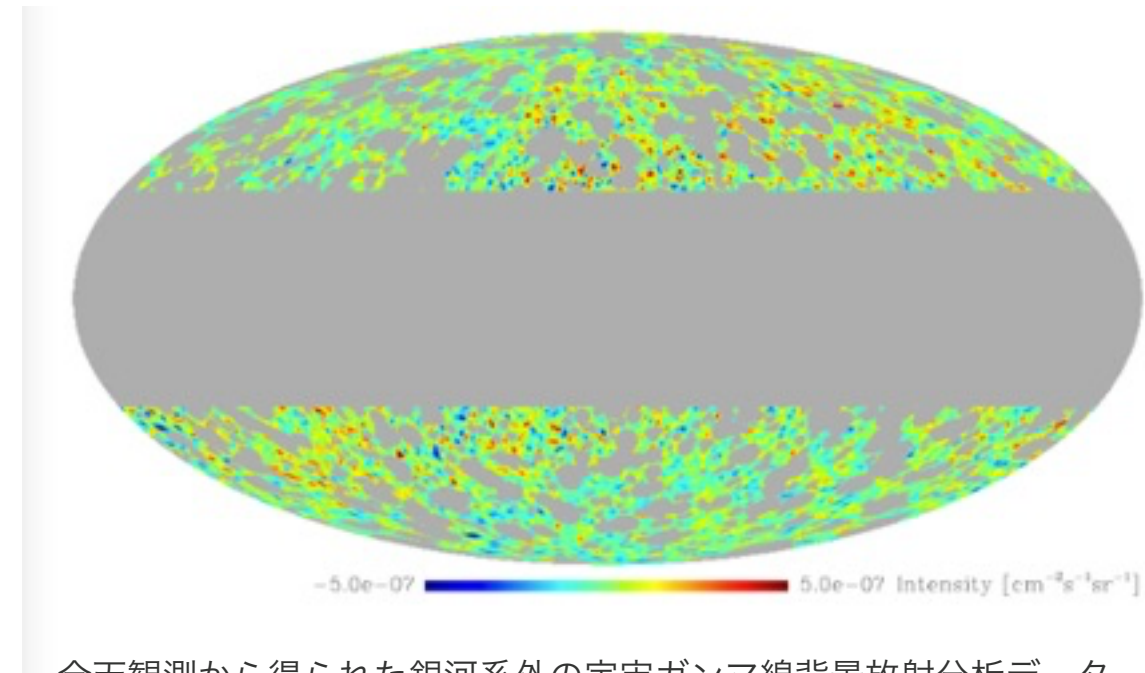
<http://news.mynavi.jp/news/2016/12/13/047/>

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/>



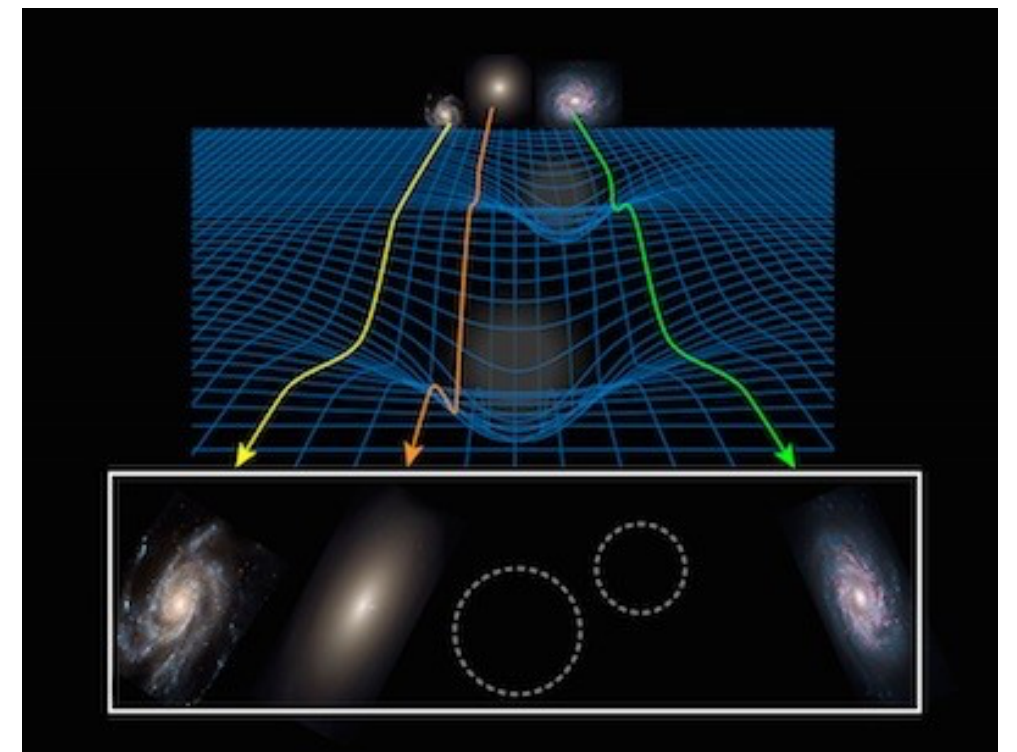
全天観測から得られた銀河系外の宇宙ガンマ線背景放射分析データ。銀河中心面を除いている。（出所: アムステルダム大学）

ダークマター 不要

諸説紹介

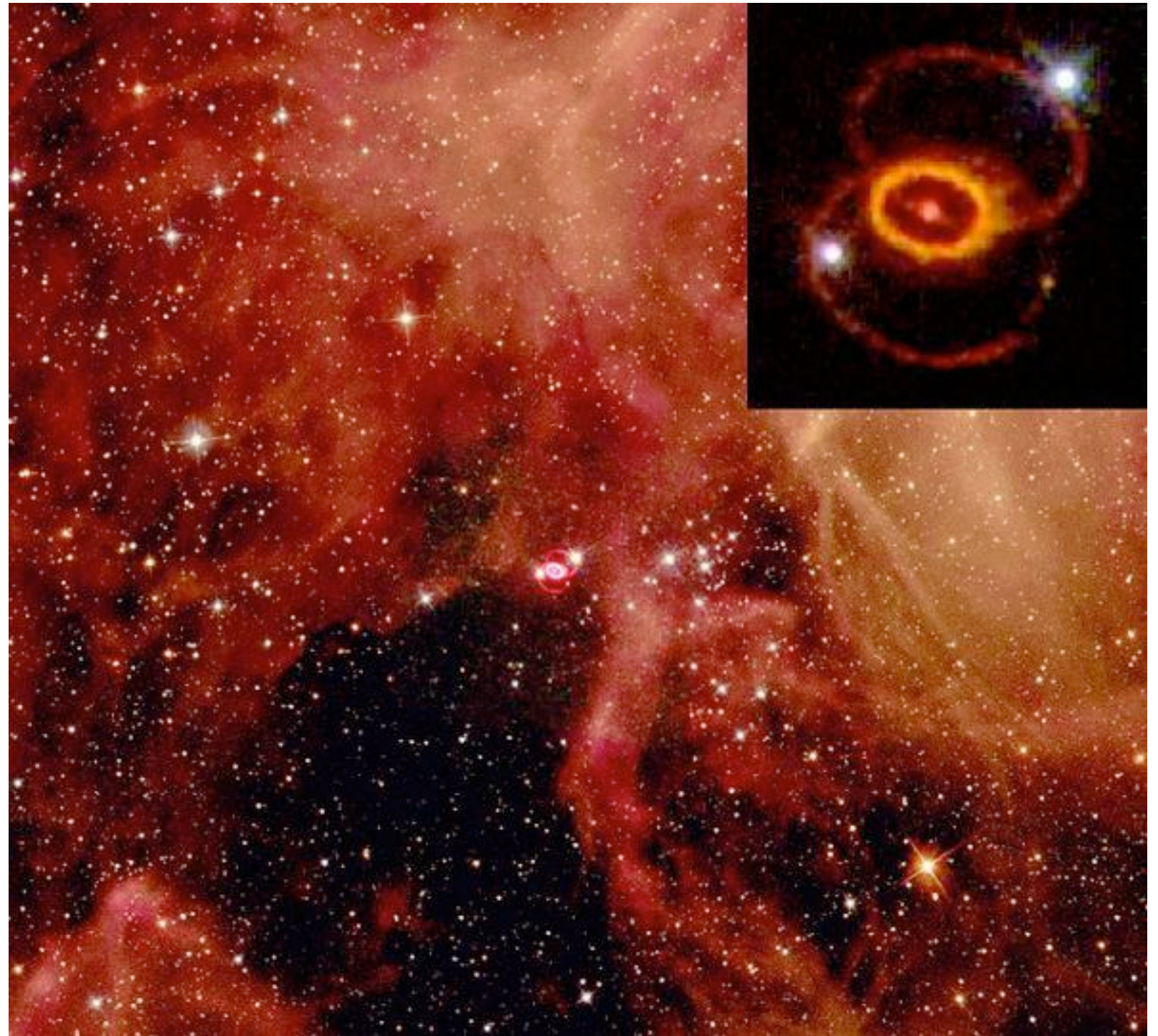
ライデン天文台の研究チームは、宇宙における重力分布の測定データを分析し、「エントロピック重力理論(ヴァーリンデ理論)」と一致する結果を得たと報告した。ダークマターの質量を仮定しなくても、重力レンズ効果が説明できるという。（2016年12月22日発表）

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



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

超新星は、数百年に一度、肉眼で観測されている。

表 2.1 歴史的に有名な超新星. 超新星名には発見された西暦がつく. SN 185 は 185 年に, SN 1987A は 1987 年に発見された一番はじめの超新星である. 最近では, 大型望遠鏡で次々と発見されていて, 統一した番号付けはされなくなった.

超新星	星座	銀河	最大光度	型	備考
SN 185	ケンタウルス座	銀河系	−8		最古の観測記録 (中国『後漢書』)
SN 393	さそり座	銀河系	−1		
SN 1006	おおかみ座	銀河系	−9	I	
SN 1054	おうし座	銀河系	−6	II?	かに星雲
SN 1181	カシオペア座	銀河系	0	II	
SN 1572	カシオペア座	銀河系	−4	I	ティコの新星
SN 1604	へびつかい座	銀河系	−2.5	I	ケプラーの新星, 天の川銀河で最新のもの
SN 1885A	アンドロメダ座	アンドロメダ銀河	5.8	Ia	アンドロメダ座 S 星, 他銀河で初の発見
SN 1987A	かじき座	大マゼラン星雲	2.9	II	肉眼で見えた最新のもの
SN 2002bj	うさぎ座	NGC 1821		Ia	2009 年の解析により新型超新星と確認
SN 2006gy	ペルセウス座	NGC 1260	15.0	II	最大級の超新星
SN 2009dc	かんむり座	UGC 10064		Ia	チャンドラセカール限界を超えた初の爆発

表 2.2 超新星の分類. Ia 型は「いち・え一型」と読む.

I 型	水素の吸収線がない	Ia 型	ケイ素 S の吸収線がある
		Ib 型	ヘリウム He の吸収線がある
		Ic 型	S の吸収線も He の吸収線もない
II 型	水素の吸収線がある		

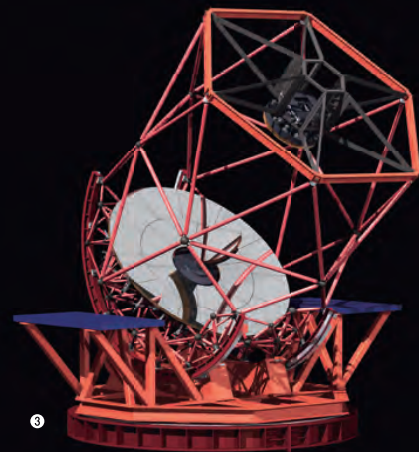
京都大学総合博物館 平成26年度特別展

明月記と最新宇宙像

Meigetsuki and the latest images of our universe

千年を超えて羽ばたく
京の宇宙地球科学者たち

後冷泉院天壽二年丁酉申月下旬後廿時客星
観測度見事方室天同星大々歳星



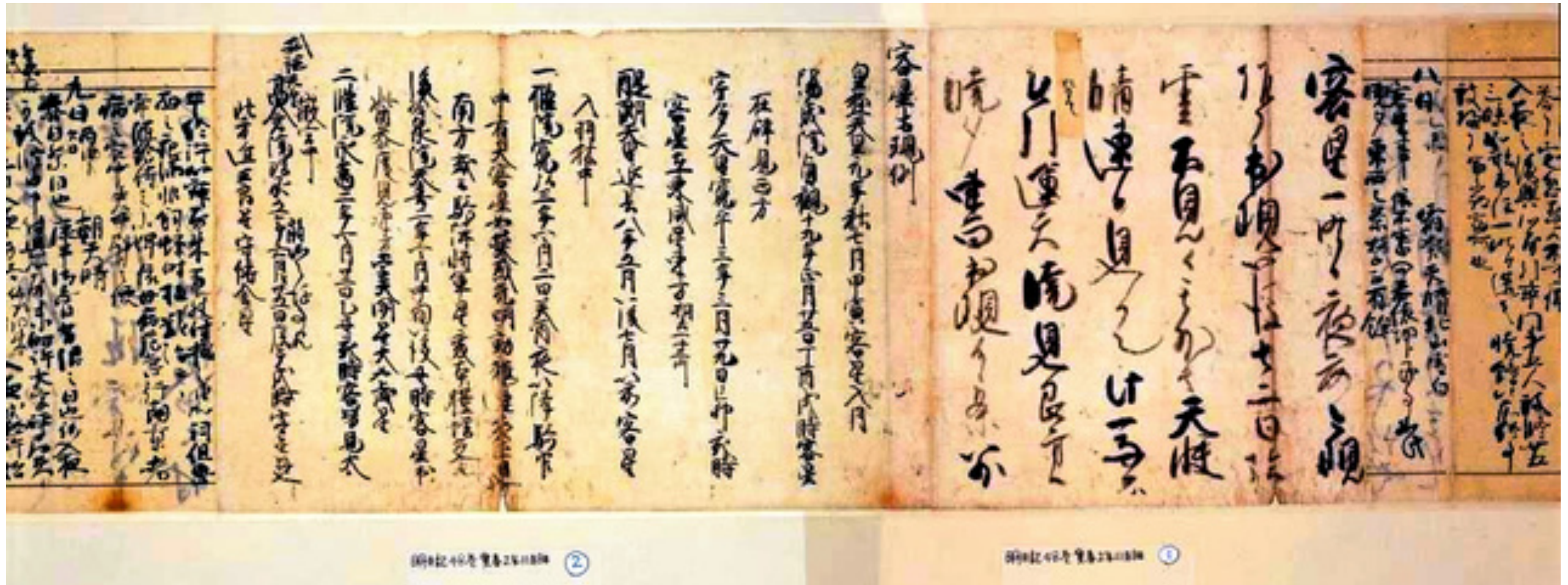
京都大学総合博物館



〒606-8501 京都市左京区吉田本町
TEL (075) 753-3272
<http://www.museum.kyoto-u.ac.jp/>

2014年
9月3日[水]—
10月19日[日]
9時30分—16時30分(入館は16時まで)
休館日●月曜日・火曜日(平日・祝日にかかわらず)
観覧料●一般 400円 高校生 300円
小学生 中学生 200円
※20名以上の場合は団体観覧料が適用されます
※70歳以上の方は身体障害者手帳をお持ちの方は無料
主催●京都大学総合博物館、京都大学大学院理学研究
科附属天文台、京都大学大学院理学研究科地球物理
学教室、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室
共催●NPO法人花山星空ネットワーク、京都大学
宇宙総合学研究所、京都大学研究資源アーカイブ
協力●株式会社西村製作所
後援●冷泉家時雨亭文庫、自然科学研究機構国立
天文台、NHK
後援●京都府教育委員会、京都市教育委員会
ワークショップ・講演会
期間中の土曜日または日曜日に開催します。
4次元デジタル宇宙シアター
3D映像の宇宙の中をナビゲーターとともに旅します。
原則として、期間中の土曜日・日曜日、1日5回、各回30分程度。
※詳細は総合博物館ホームページをご覧ください。
●明月記にむける客星出現古例の記載部分 ●かに星雲 ●3.8m新技術望遠鏡

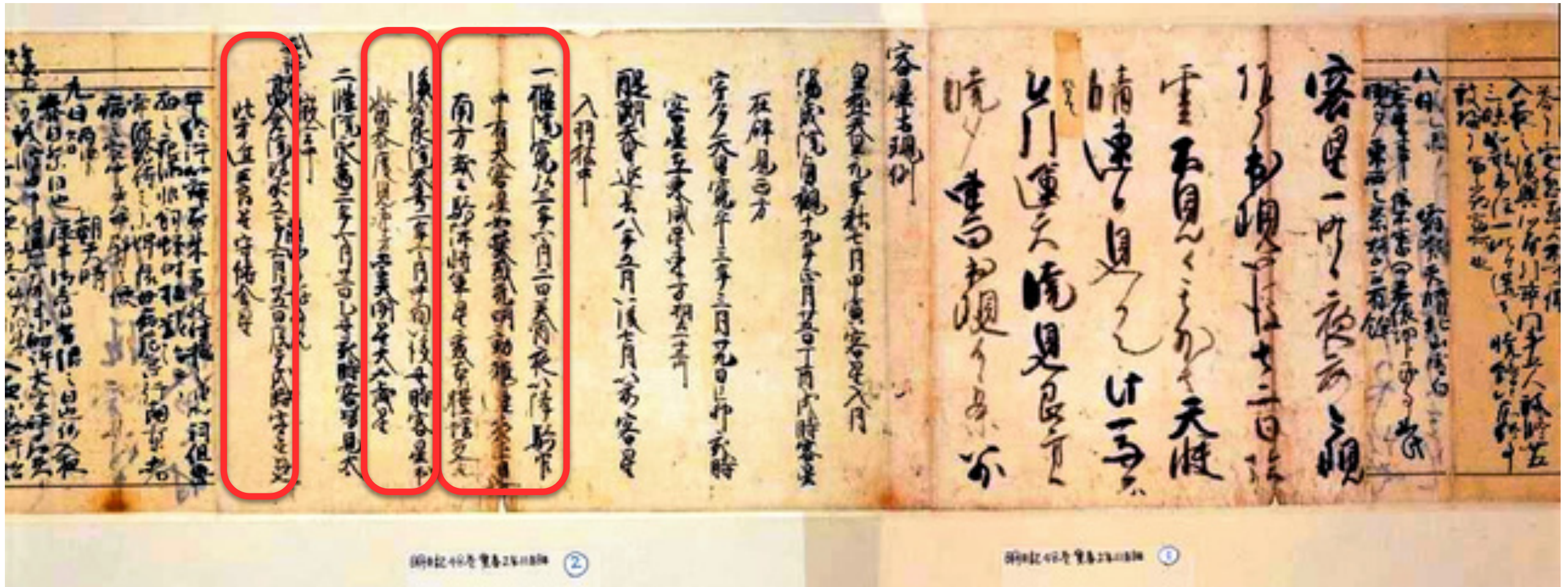
「明月記」の天文現象について書かれた部分



藤原定家(1162-1241)は、陰陽師（天文博士）に調べさせた報告文をそのまま切り貼りした。



「明月記」の天文現象について書かれた部分



1 安倍清明の息子， 安倍吉昌がSN1006を観測

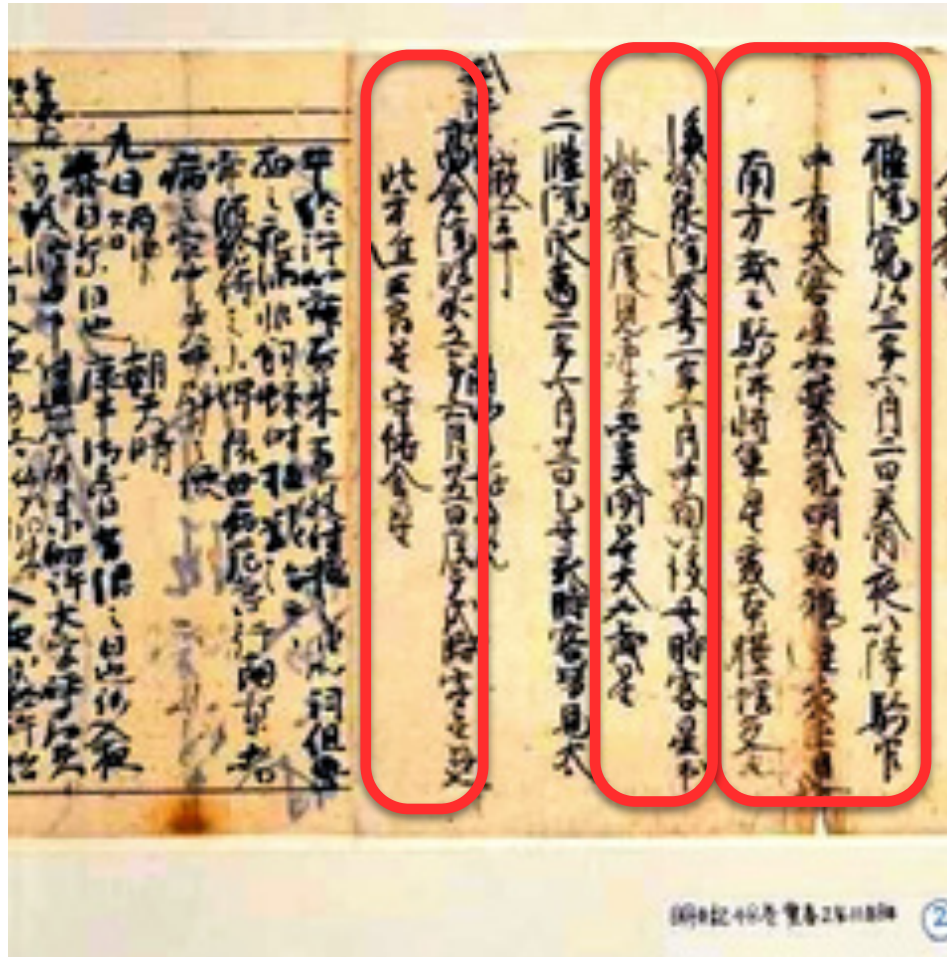
2 清明の子孫（詳細不明）がSN1054を観測

3 清明の子孫（詳細不明）がSN1181を観測

藤原定家本人も見ている可能性あり



1 安倍清明の息子， 安倍吉昌がSN1006を観測



一條院 寛弘三年四月二日 癸酉
夜以降 騎官中 有大客星 如螢惑
光明動耀 連夜正見南方
或云騎陣將軍星變本體：



図2 1006年の大客星

SN 1006

7200光年. 記録に残されている限り、歴史上で最も視等級が明るくなった天体（太陽と月を除く、-7.5等[1]）.

1006年4月30日から5月1日の夜におおかみ座領域に初めて出現したこの「客星」は、スイス、エジプト、イラク、中国、日本、そして恐らくは北アメリカの観察者たちにより記録されている.

SN 1006

Supernova Remnant

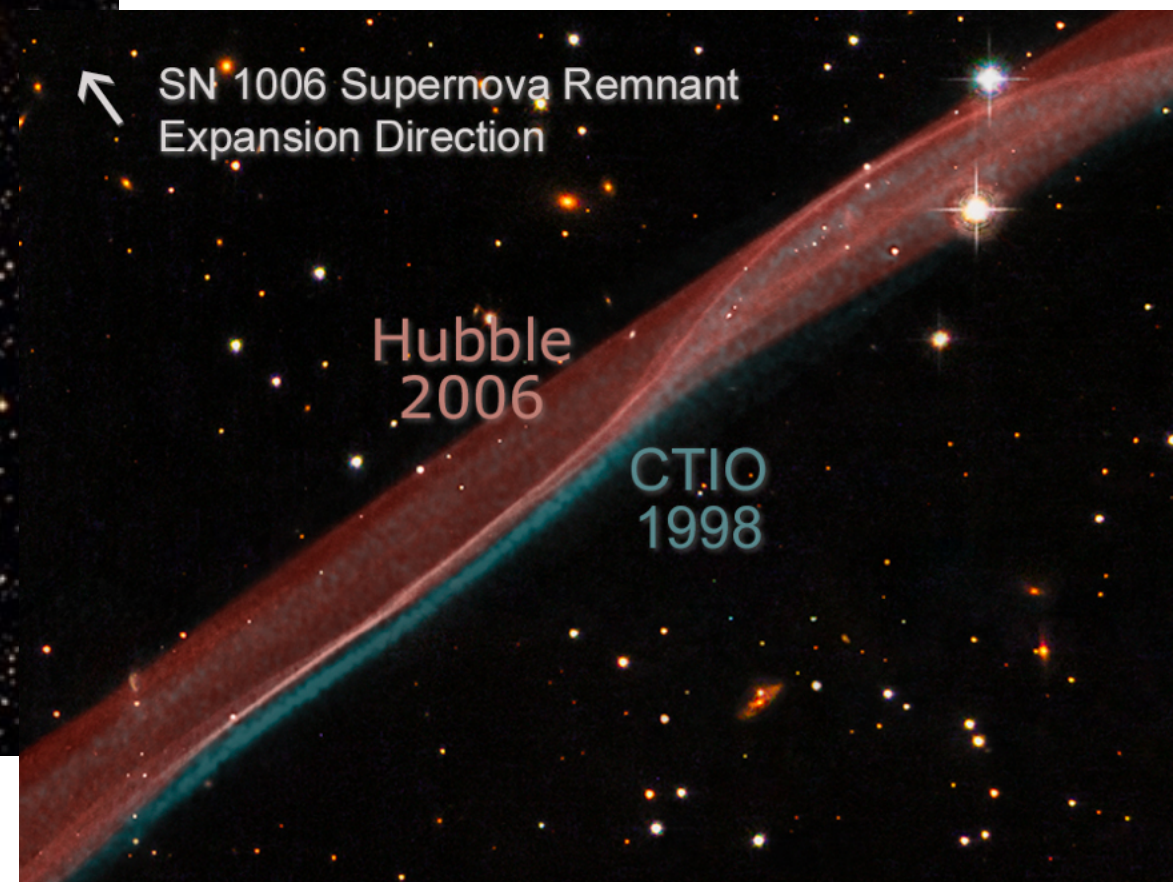
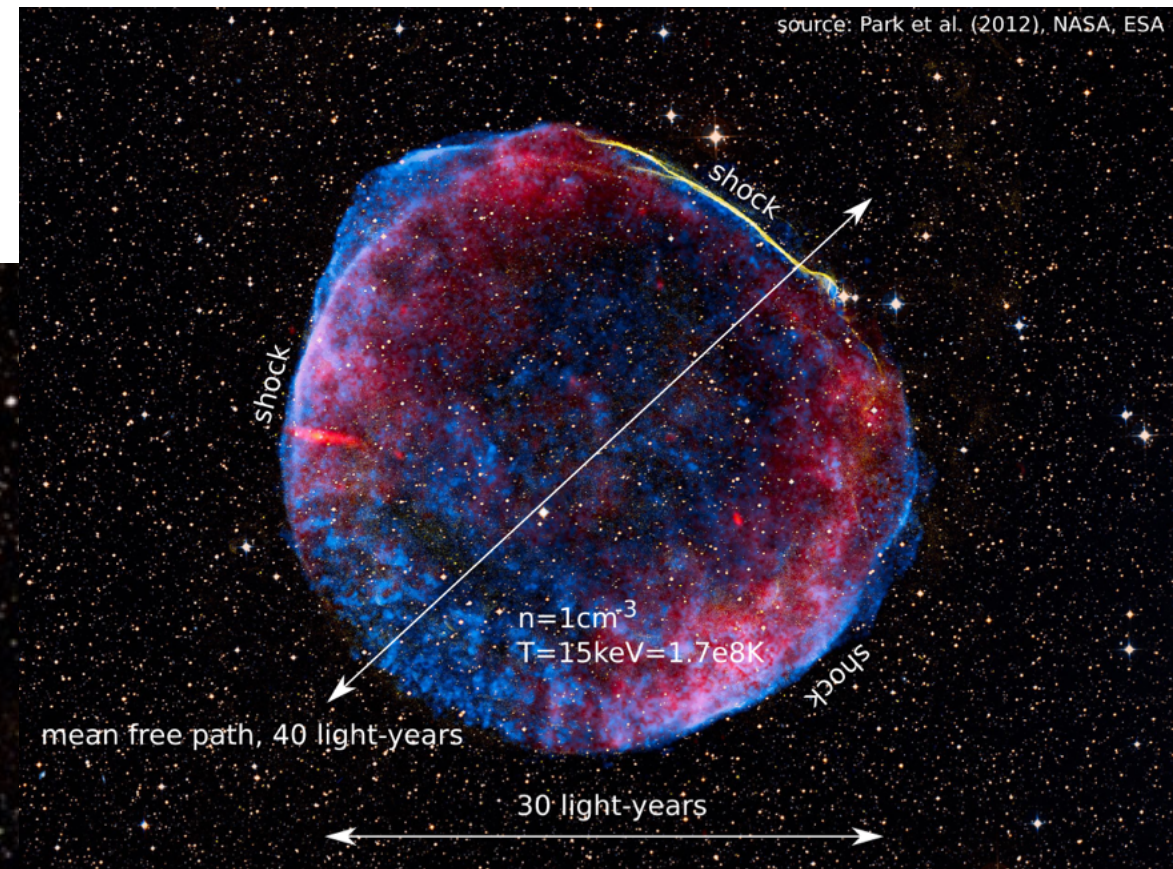
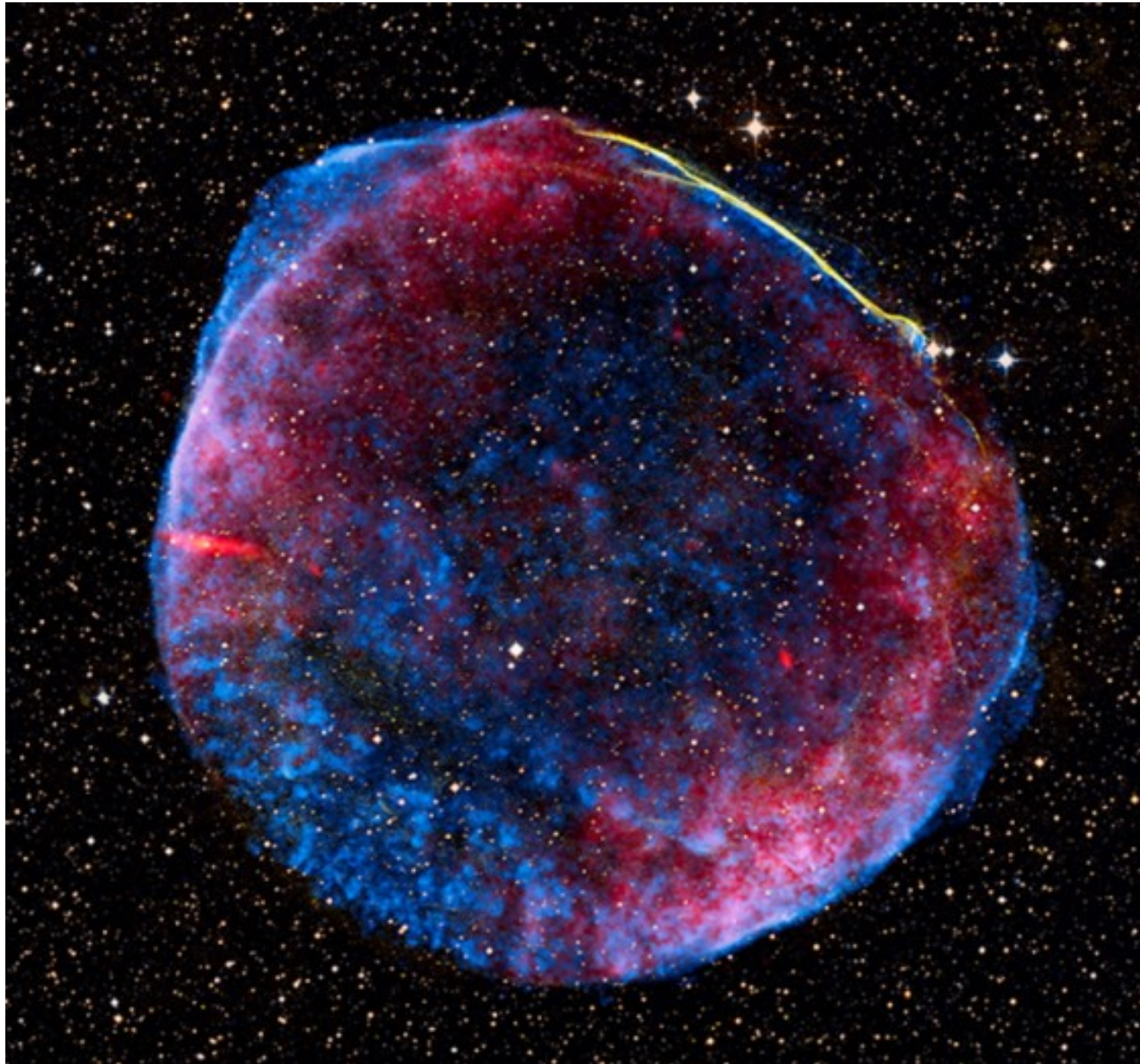
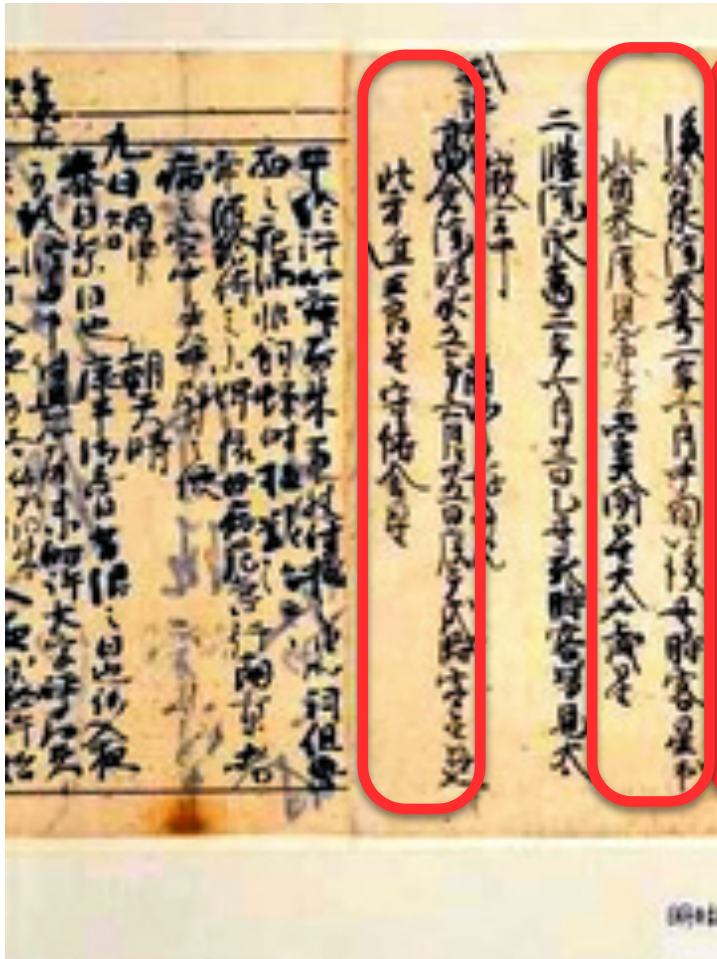


Image credit: Chandra, Hubble, and NRAO teams,
retrieved from heasarc.gsfc.nasa.gov.

2 清明の子孫（詳細不明）がSN1054を観測



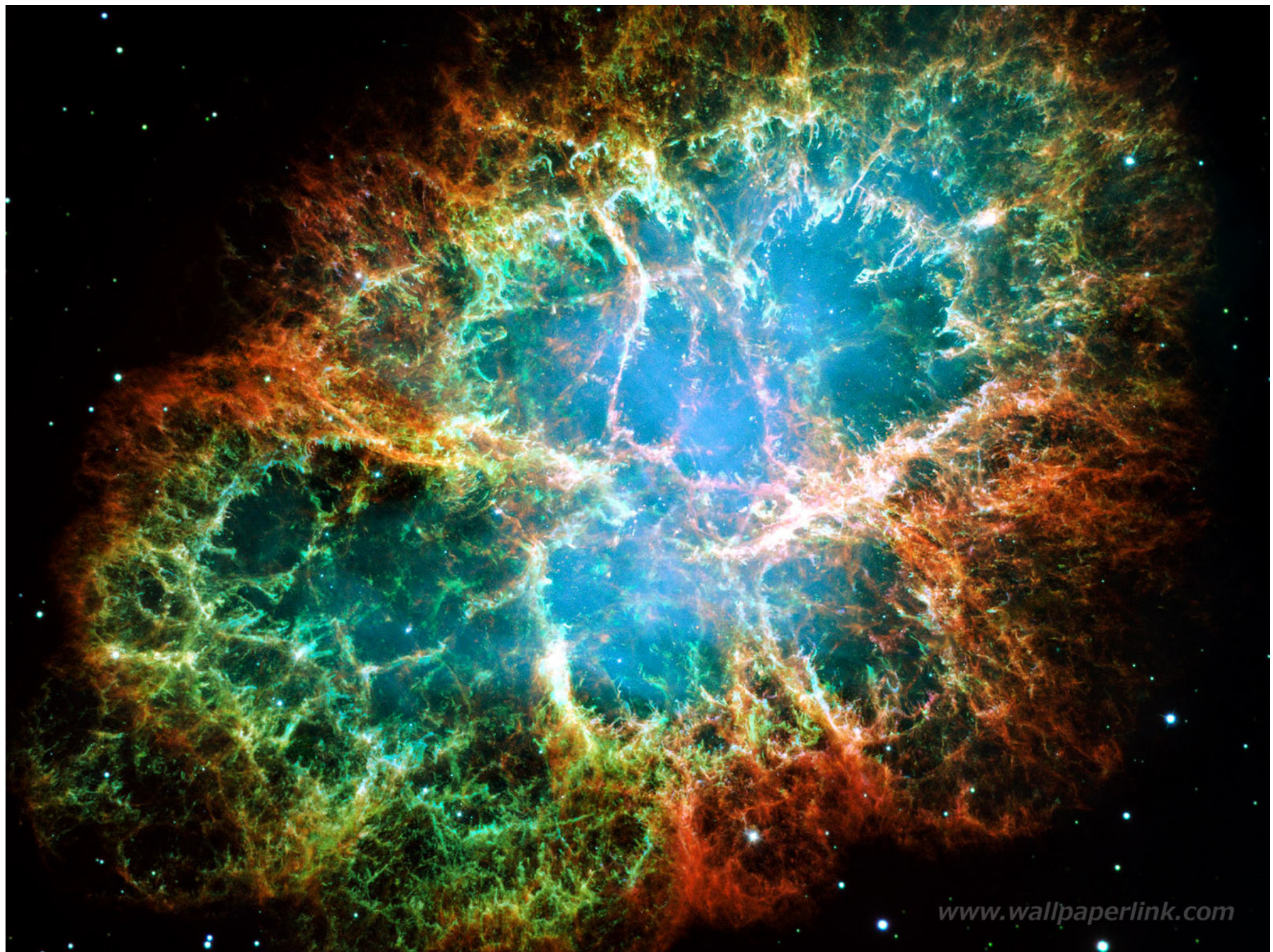
後冷泉院、天喜二年四月中旬以後丑時
客星觜参ノ度ニ出ズ、東方ニ見エ、
天関星ニ孛ス 大キサ歳星ノ如シ



図3 1054年の客星

かに星雲（Crab Nebula, M1, NGC1952）

おうし座にある超新星残骸，距離は7000光年。
超新星の出現当時は金星ぐらいの明るさになり，23日間にわたり昼間でも肉眼で見えた．夜間は後2年間も見えていた．



かに星雲 (Crab Nebula, M1, NGC1952)

中心にある星は、パルサー（中性子星）で、1969年発見.

直径は約10km. 光度は16等級. 1秒間に30回という高速回転をしており、33msの周期で電波やX線を出し、また可視光線で星雲全体を照らしている.

3 清明の子孫（詳細不明）がSN1181を観測 藤原定家本人も見ている可能性あり



SN 1181

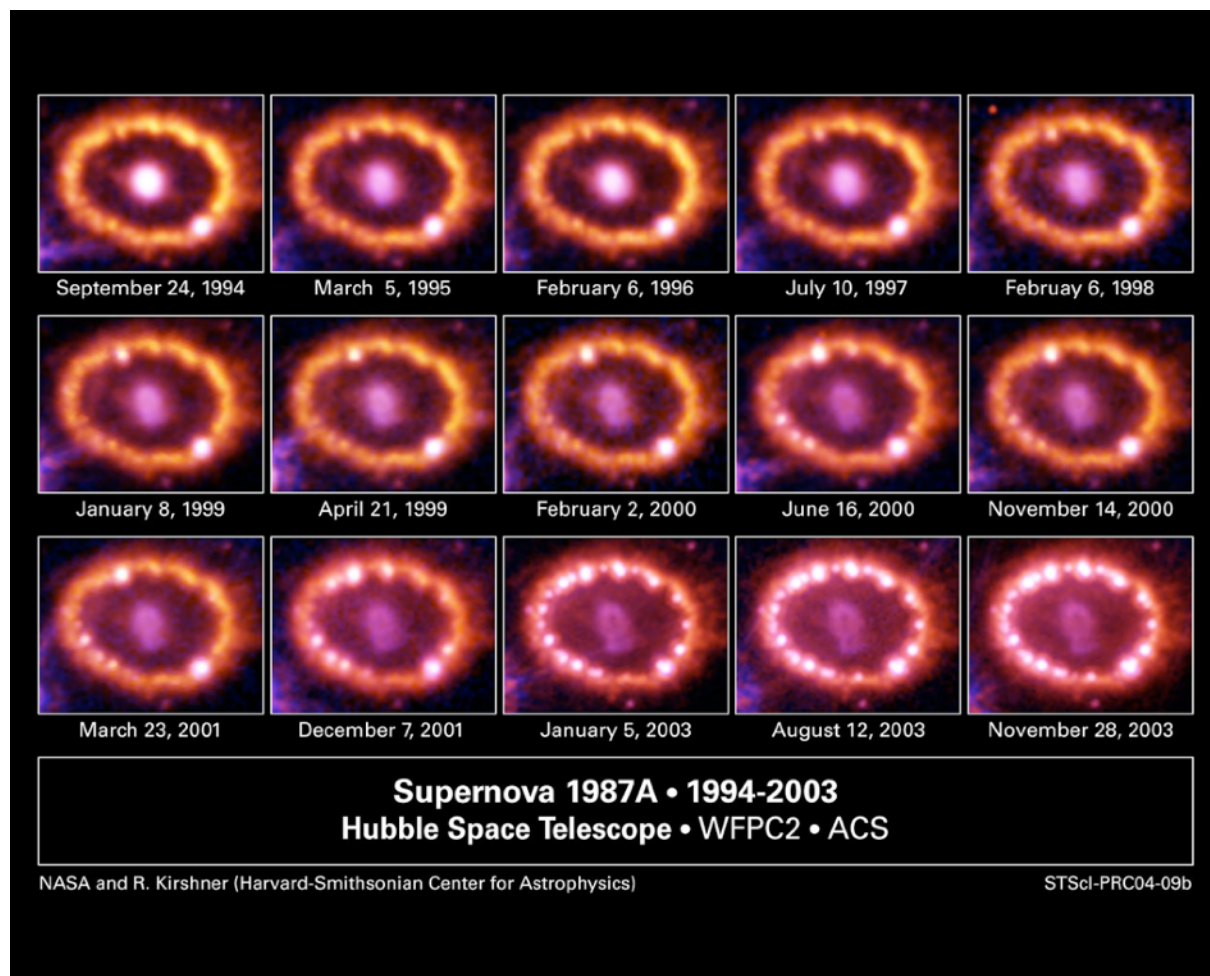
1181年8月4日から8月6日の間にカシオペヤ座で観測され始め、約185日間に渡って夜空に見えた。中国と日本の天文学者により8つの独立した文献に記録された。

12世紀のイギリスの科学者アレクサンダー・ネッカムがこの超新星に気づき、『Liber Ymaginum Deorum』に記したといわれている。日本においては、吾妻鏡に「治承五年六月廿五日（1181年8月7日）庚午。戌尅。客星見良方。鎮星色青赤有芒角。是寛弘三年出見之後無例云々。」とあり、他にも明月記や宋史などの史料に記録されている。

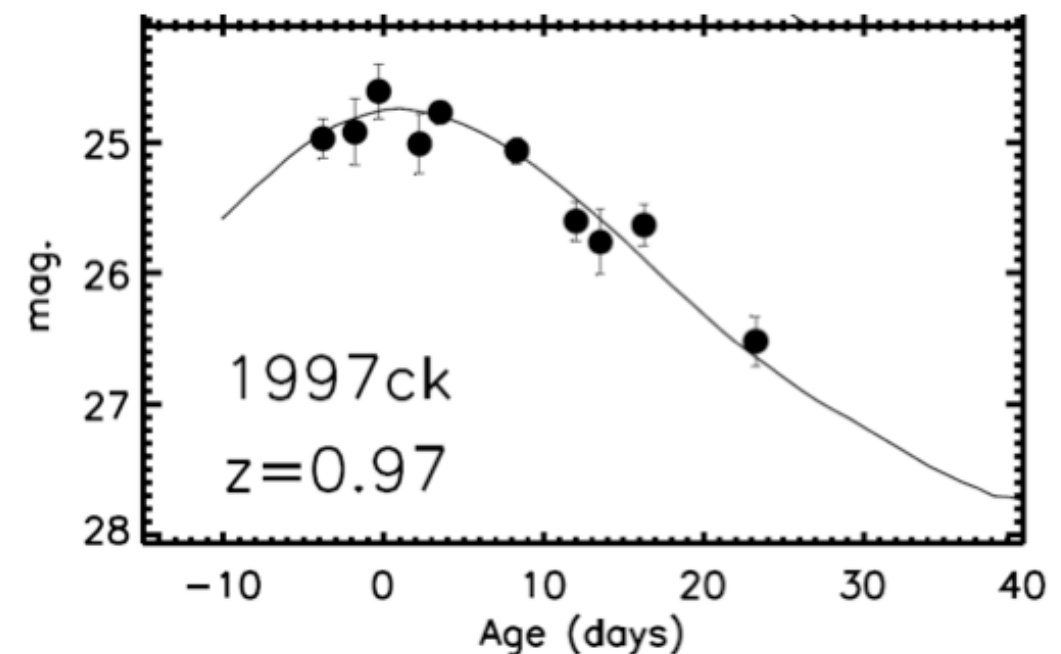
超新星爆発＝スタンダードキャンドル

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。

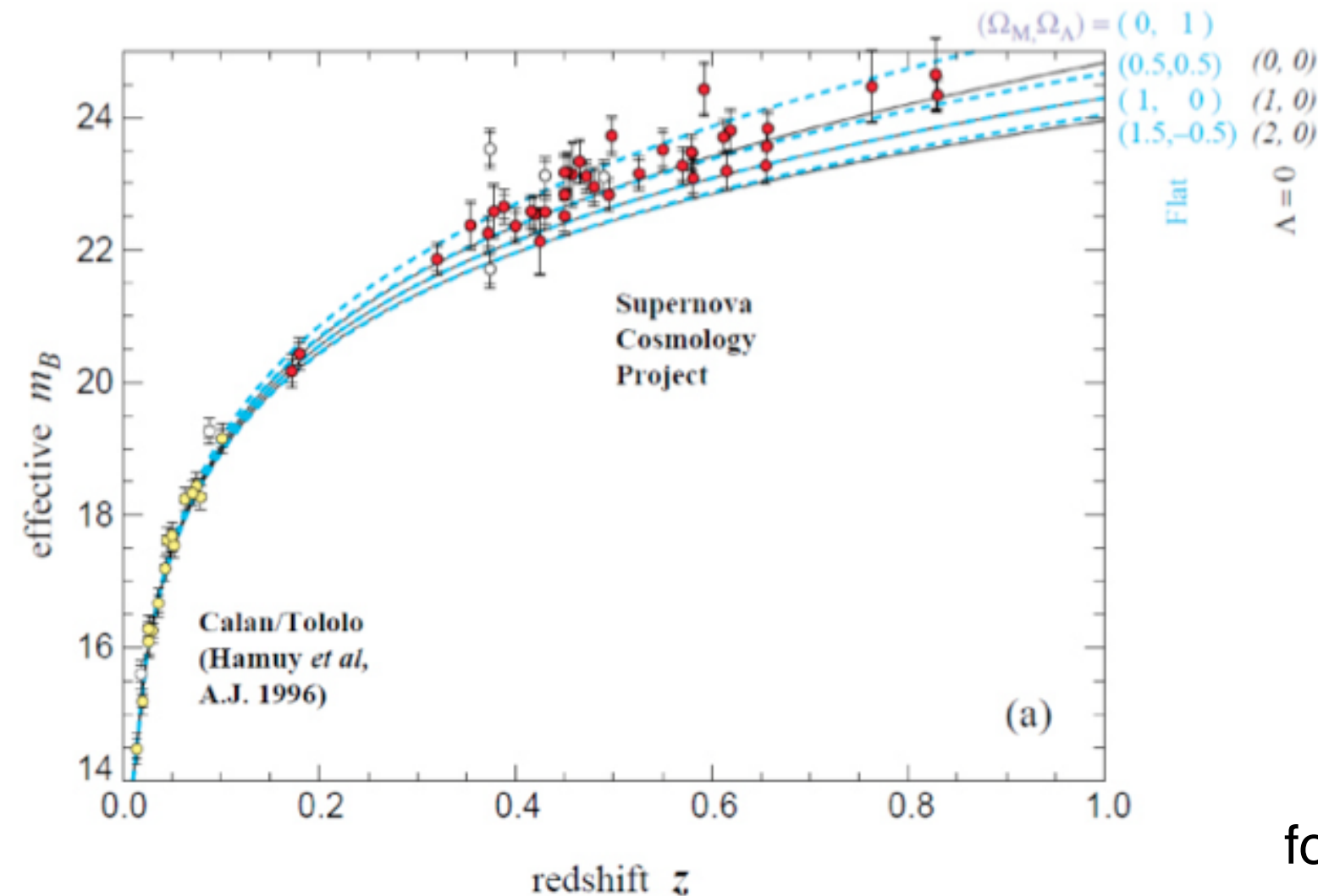


観測される明るさから
距離が正確に判定できる



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)

空間の曲がりがモノの運動を決める $\Leftrightarrow$ 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

膨張宇宙の解

①斥力を及ぼす特殊な物質を考える.

ダークエネルギー

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)

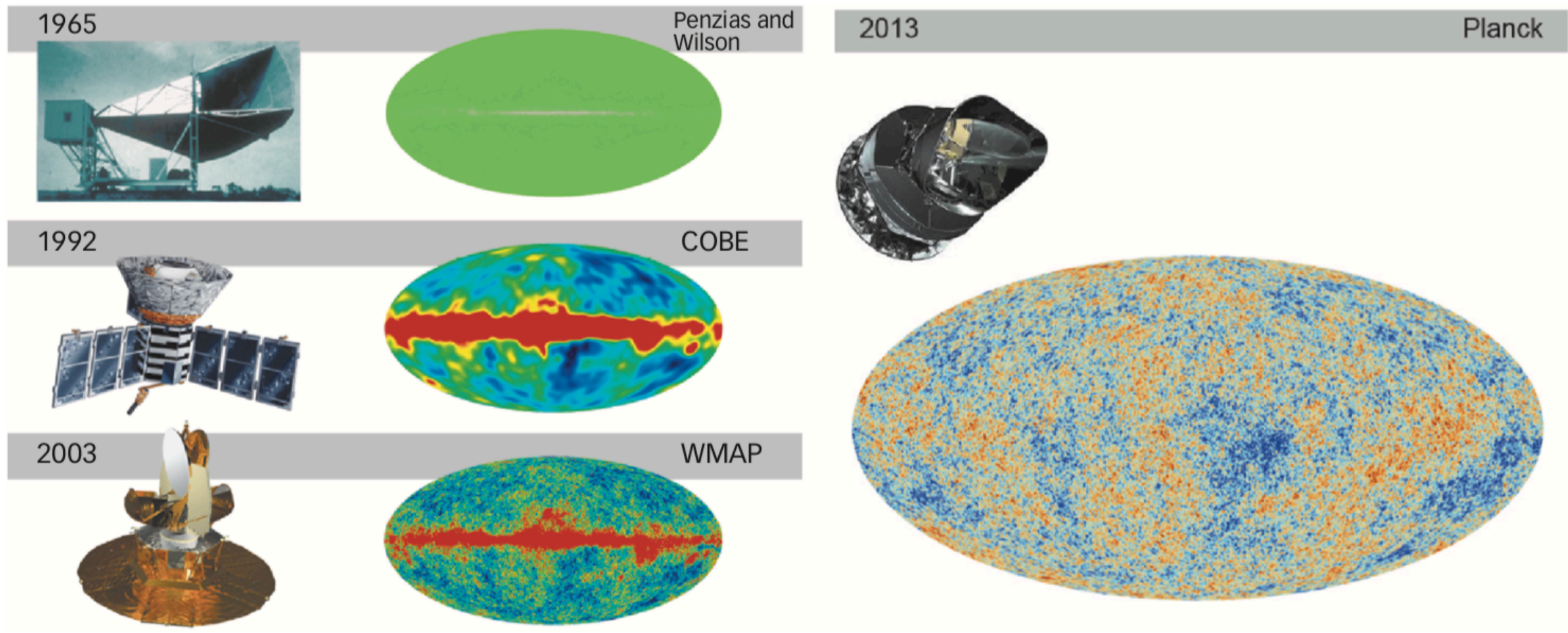
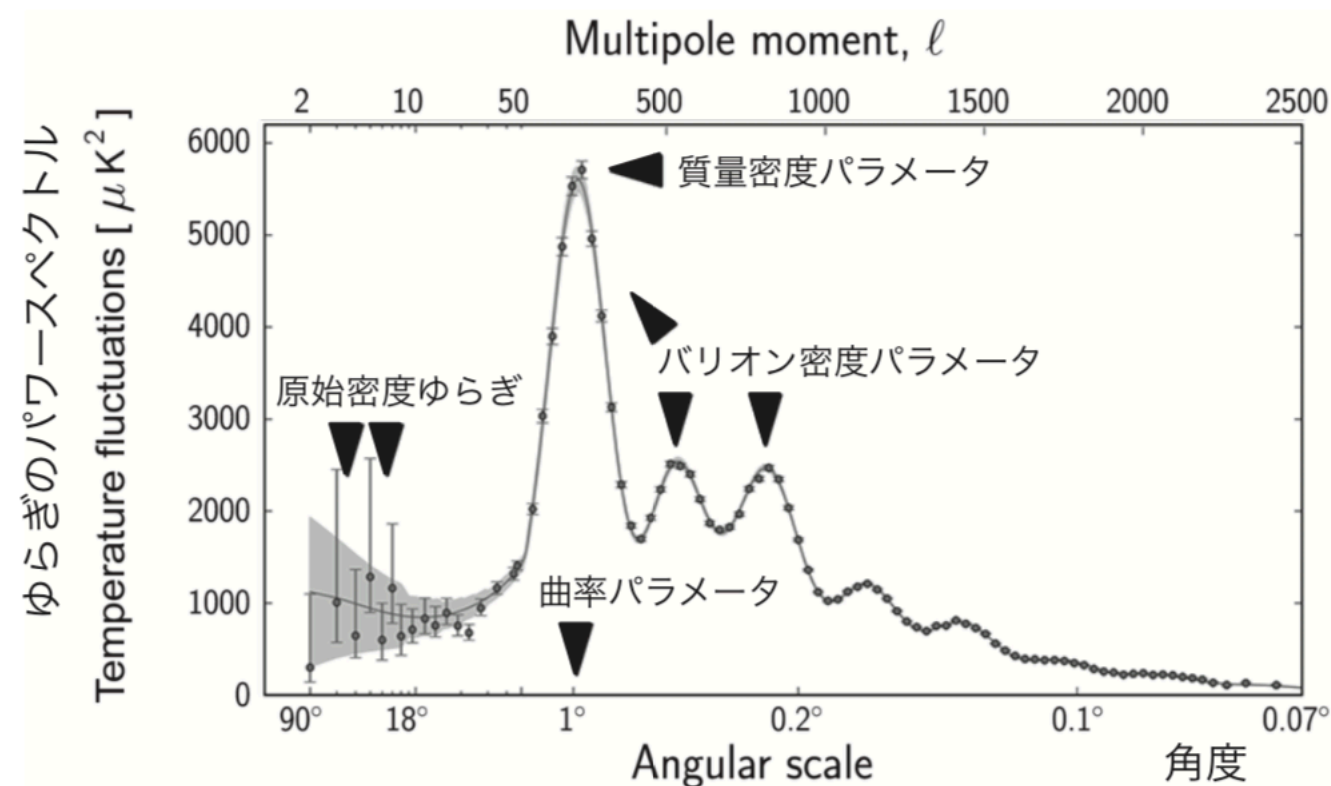


図 5.38 (本文 186 ページ)

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



宇宙の幾何的な構造がCMB観測で判定される

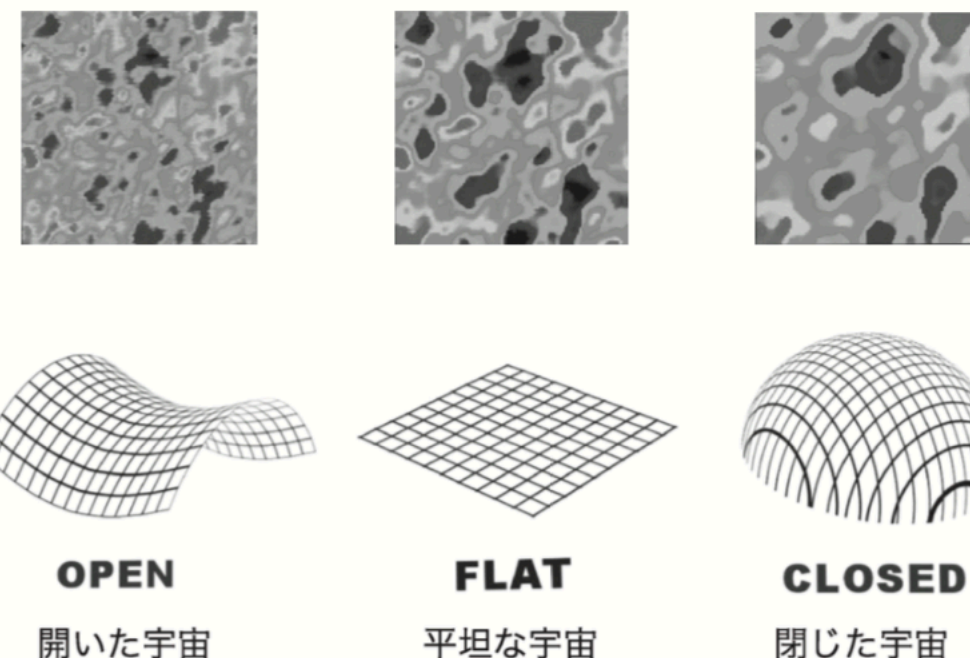


図 5.39 〔左〕 CMB の角度相関関数を理論曲線に重ねて示した図. 1 度スケールにピークがあり, この大きさから質量密度パラメータ, この位置から曲率パラメータがわかる. 〔右〕 CMB の温度ゆらぎを統計解析することで, 宇宙の曲率が, 開いている・平坦・閉じているのいずれかが判定できる. 結果は, 「平坦」であった. (NASA/ESA のサイトで得られる図を加工した)

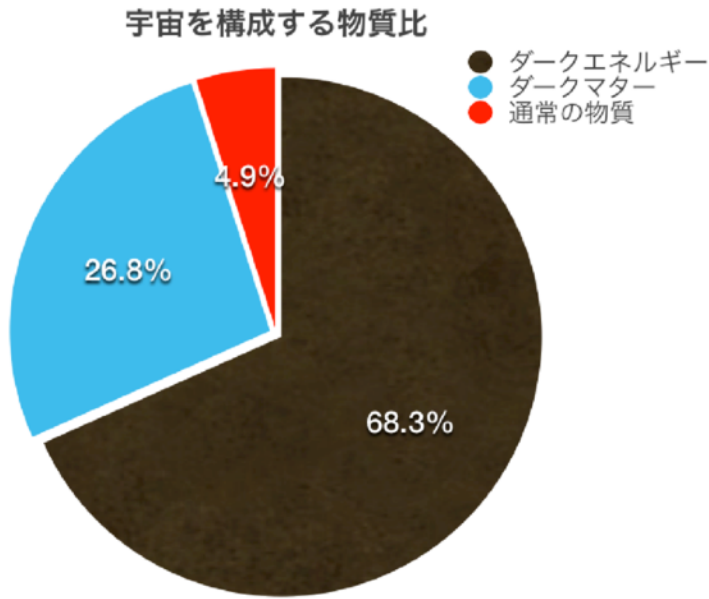
CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する

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.

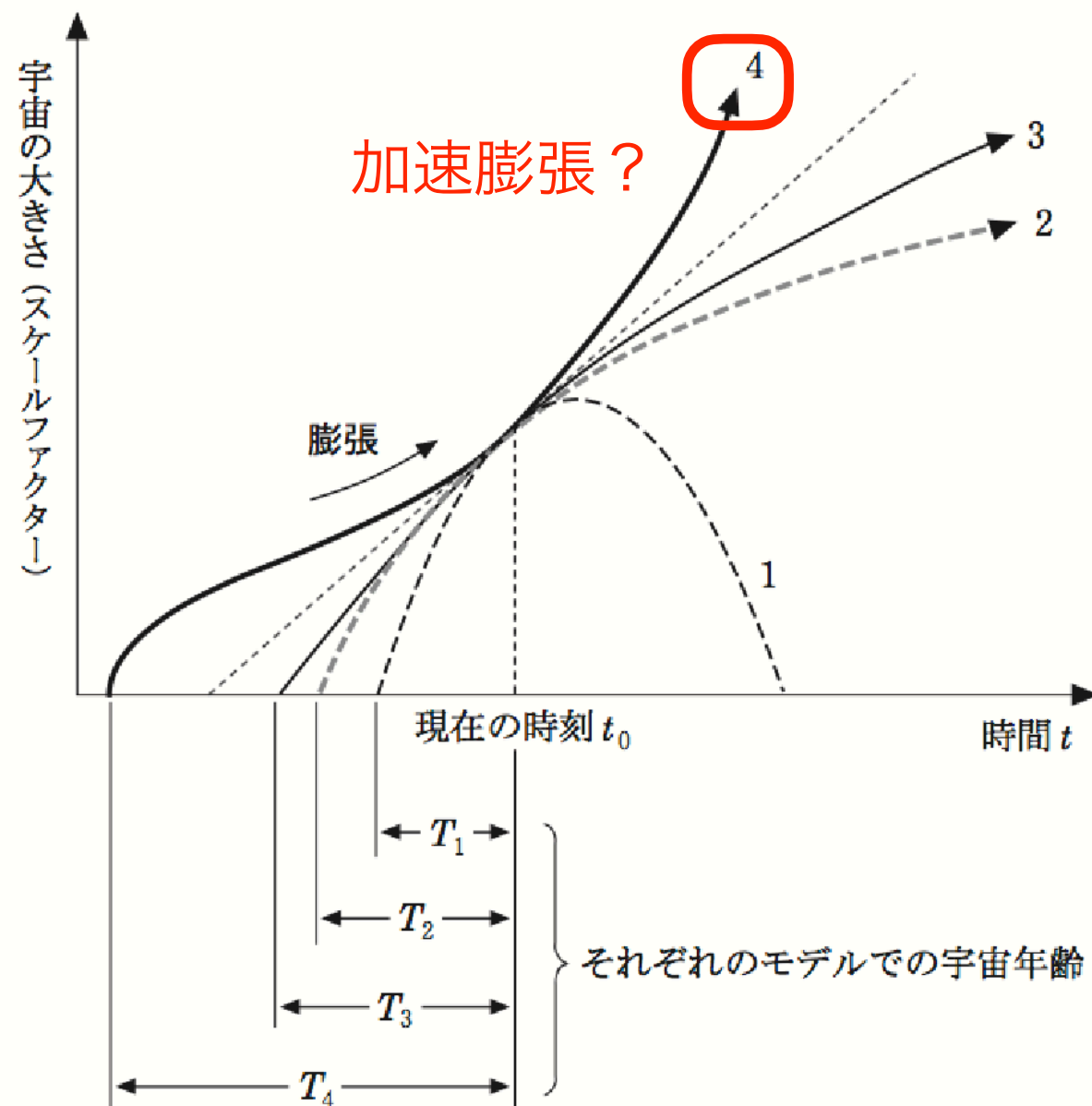
パラメータ	記号	値	
P. バリオン密度	$\Omega_b h^2$	0.02230 ± 0.00014	
P. ダークマター密度	$\Omega_c h^2$	0.1188 ± 0.0010	
P. 曲率ゆらぎ振幅	Δ_R^2	$2.441^{+0.088}_{-0.092} \times 10^{-9}$	
P. 宇宙年齢	t_0	137.99 億年 $\pm$ 2100 万年	
P. CMB 放射の光学的深さ	τ	0.066 ± 0.012	
P. スカラスpekトル指数	n_s	0.9667 ± 0.0040	
C. ハッブルパラメータ	H_0	67.74 ± 0.46 [km/s/Mpc]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

ビッグクラッチ

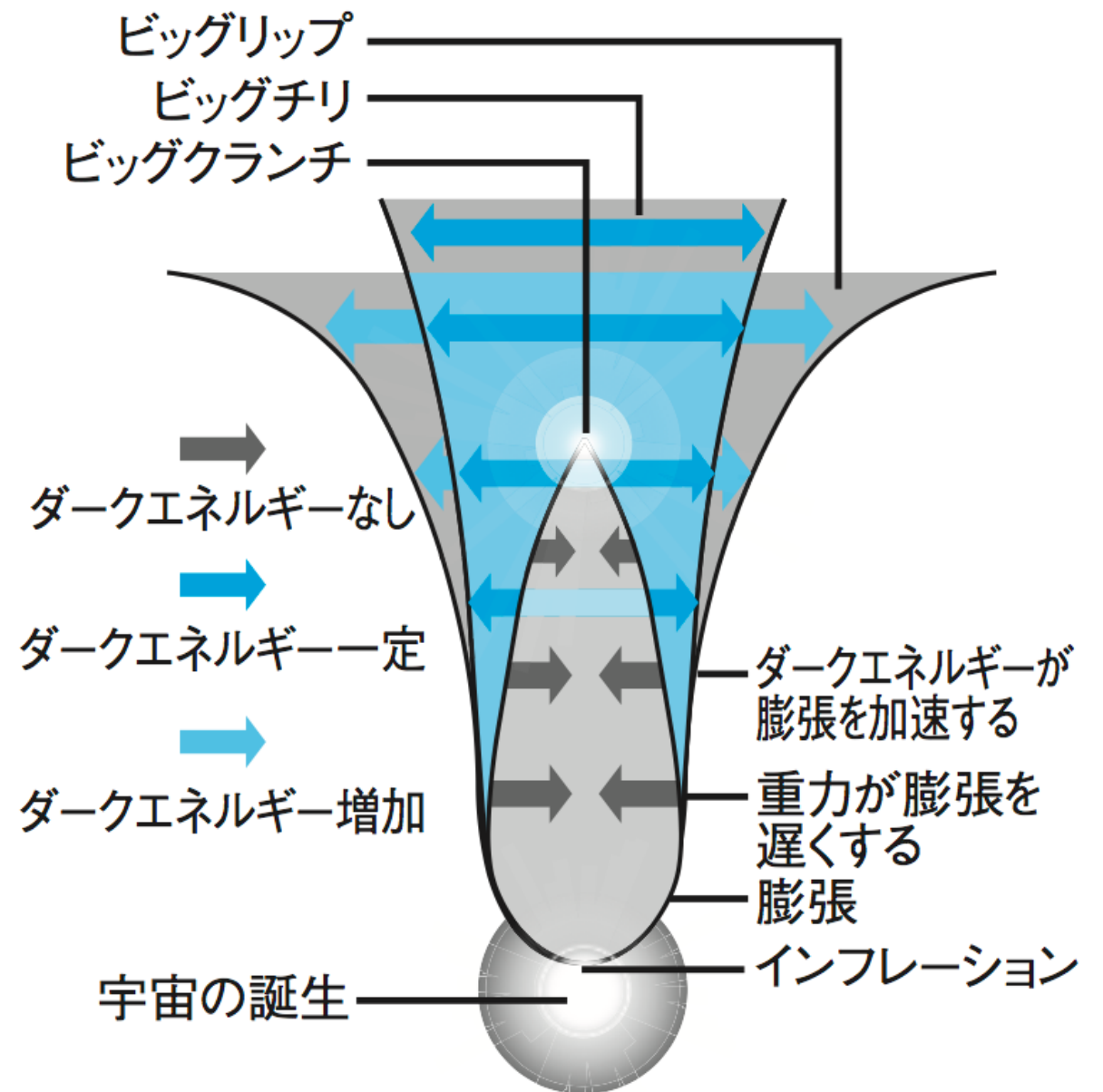
どこかで加速膨張が終わり、やがて重力が強くなって最期には再び収縮する。
ビッグバンの逆戻りとなって、すべてが再び融合する。

ビッグフリーズ、ビッグチリ

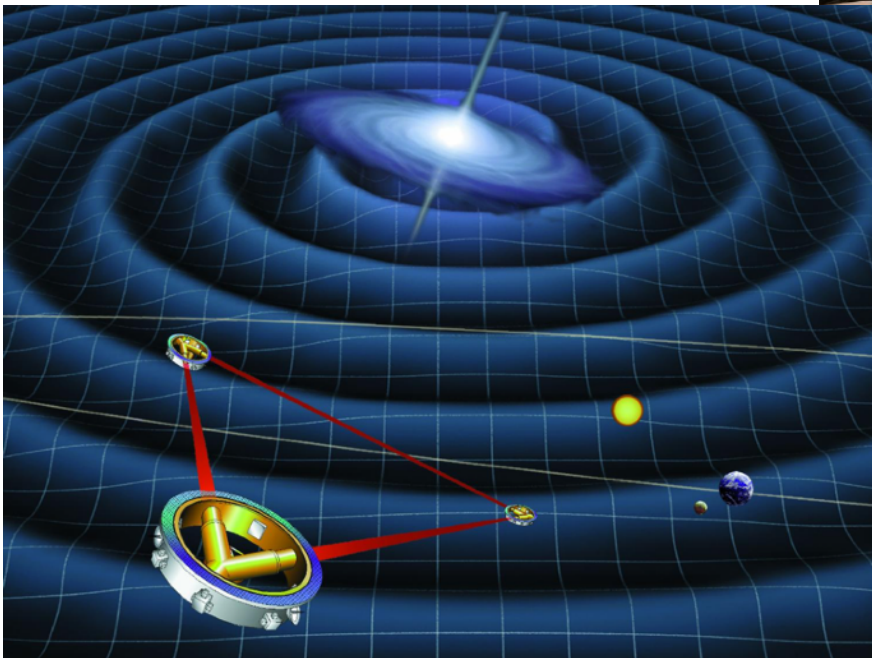
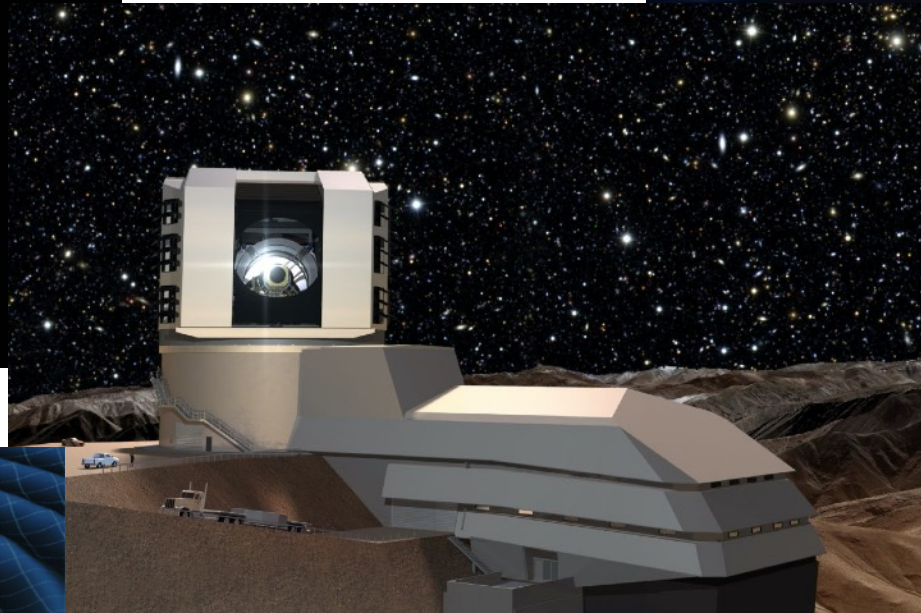
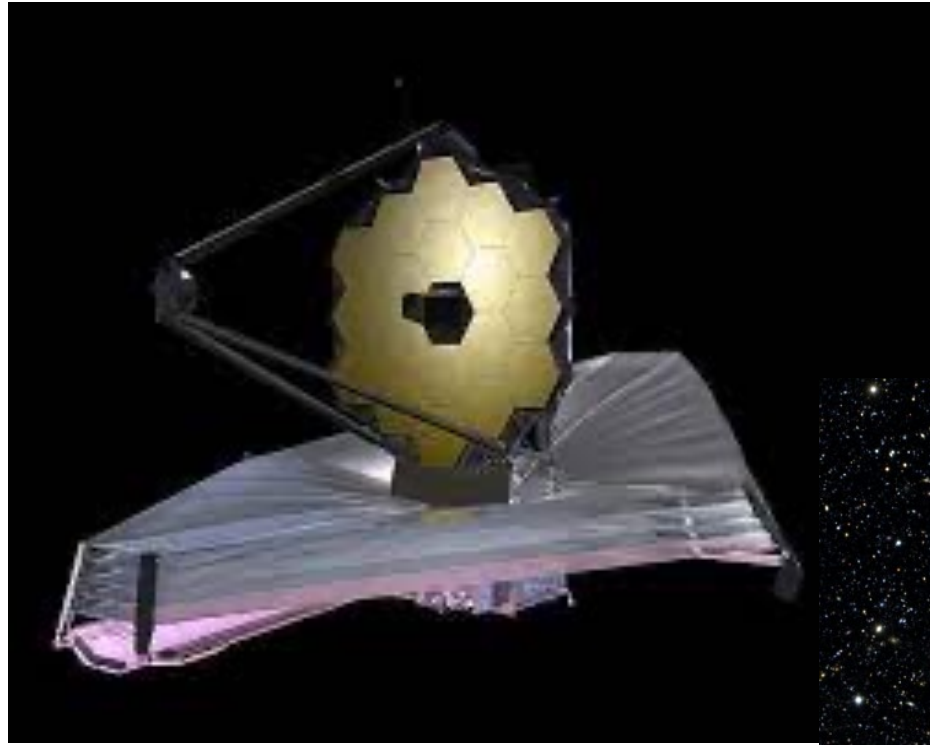
現在のまま宇宙は永遠に膨張を続け、すべての銀河が孤立し、やがて星は燃え尽きて温度ゼロ状態の「熱的な死」へ。

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。



Finale これからの宇宙論研究



より遠くまで より広範囲に より詳細に より広いエネルギー幅で

大気の窓

▶▶▶ 重力波

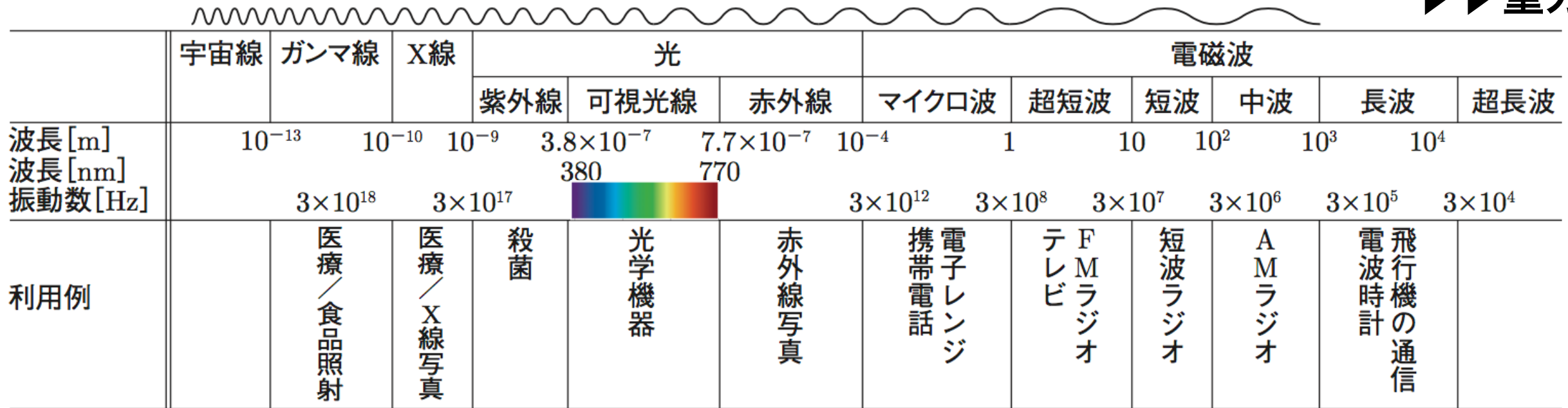


図 A.11 電磁波の波長域と，可視光の範囲.

大気の窓

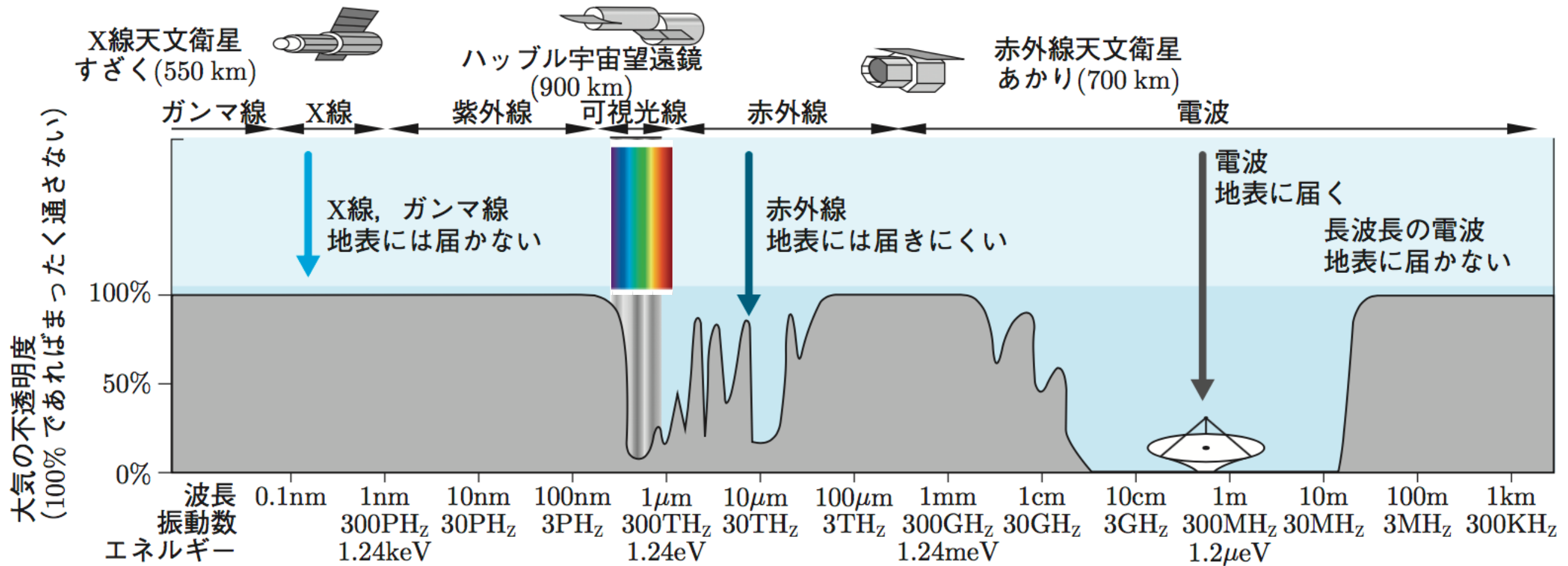
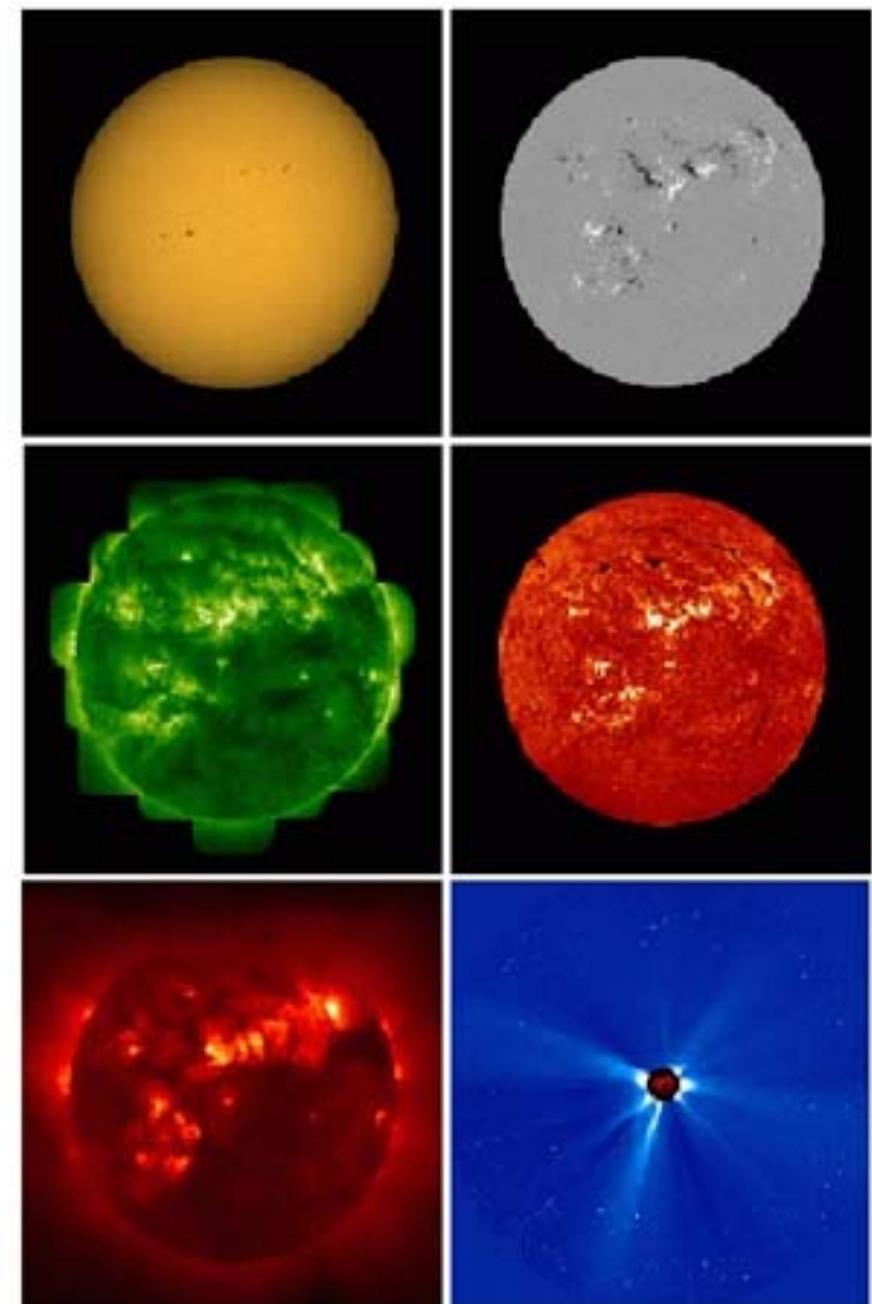
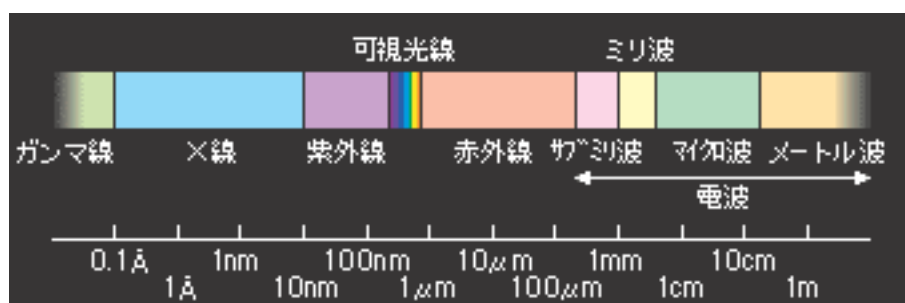
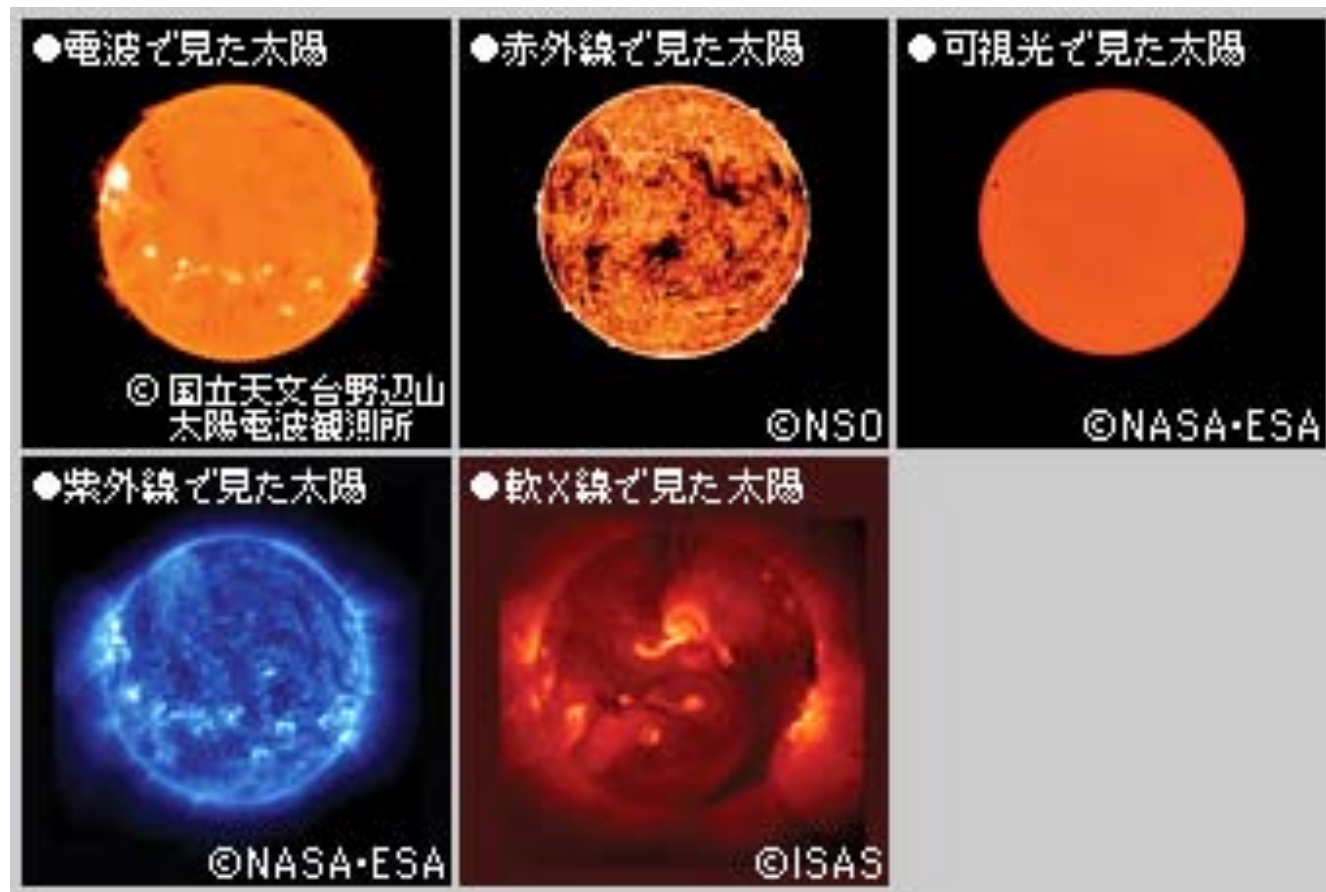


図 A.12 大気の窓. 電磁波にとって大気を通過できるのは可視光と電波の領域である. したがって, 可視光と電波の観測は地上で可能だが, ガンマ線・X線・赤外線での観測は不可能である.

いろいろな波長で見た太陽

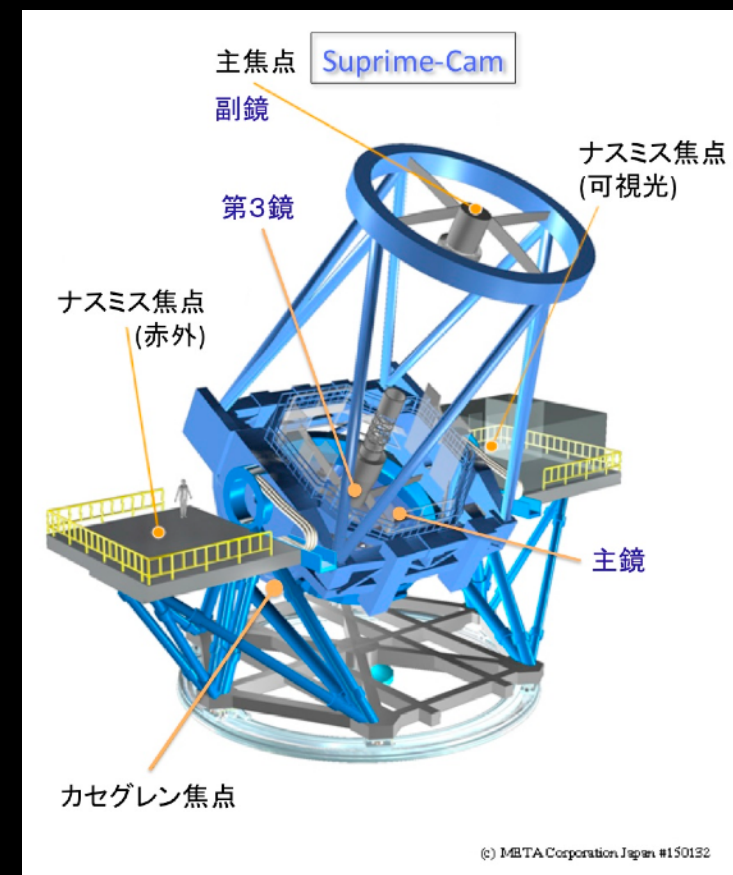
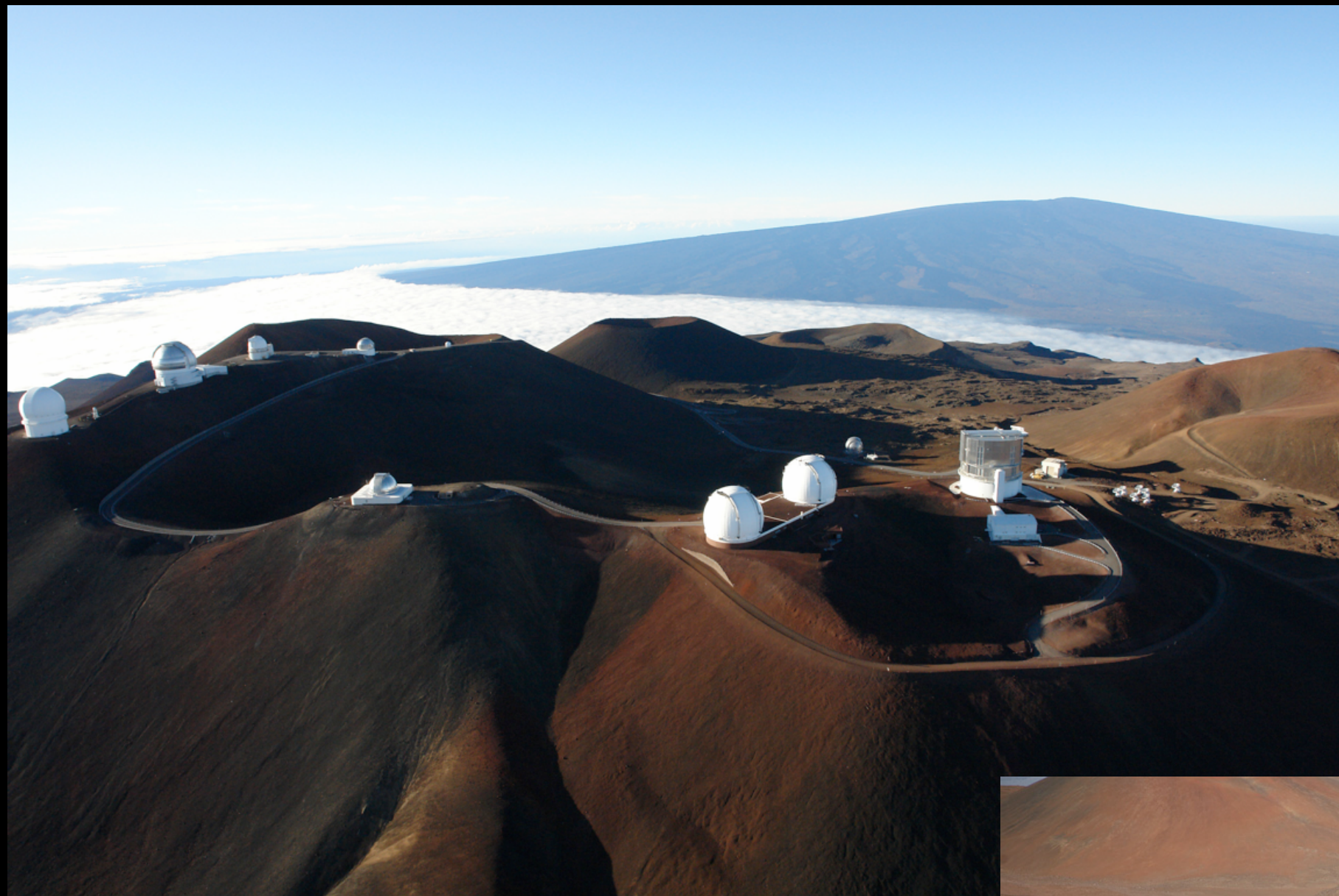


左列、上から順に、可視光（光球）、紫外線（低温コロナ）、X線（高温コロナ）。
右列、上から順に、光球面磁場、水素輝線（彩層）、コロナグラフ写真。

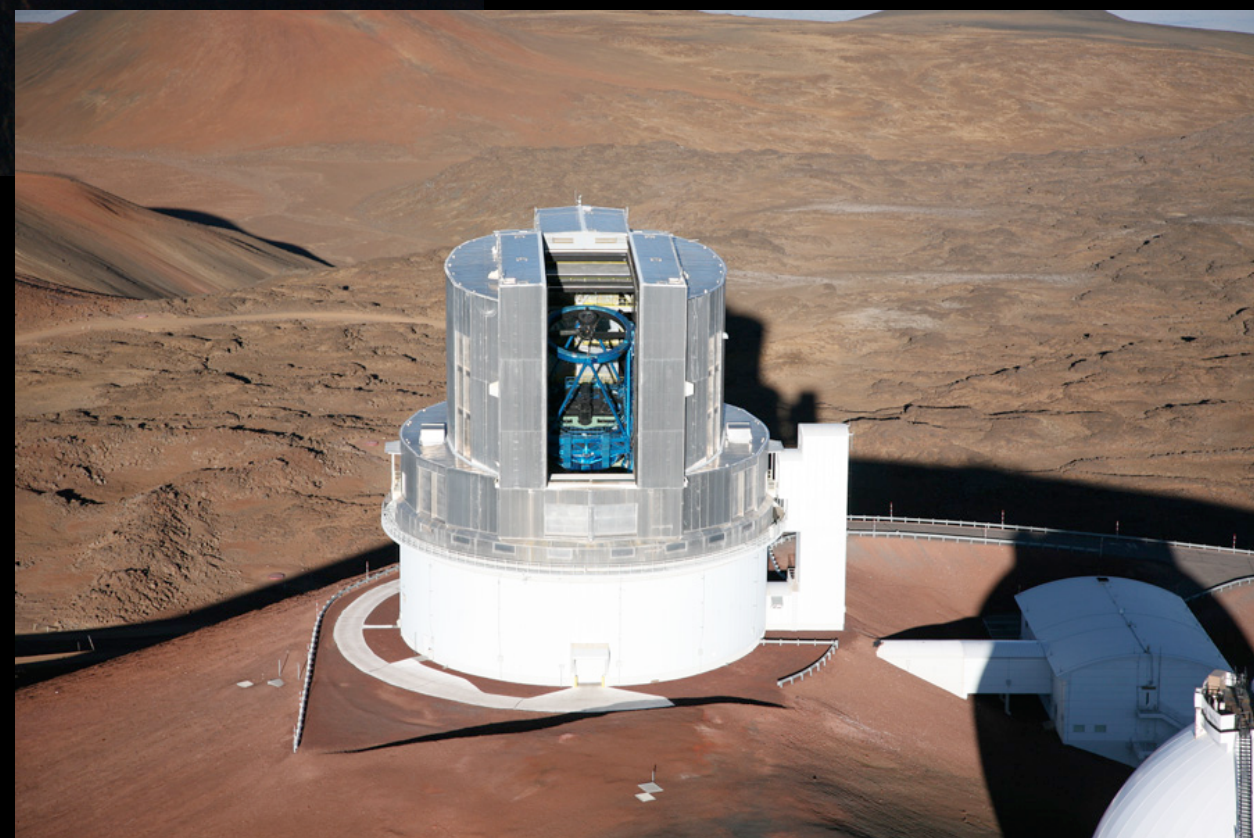
（BBSO、NASA、宇宙航空研究開発機構提供）

http://edu.jaxa.jp/materialDB/html/materials/advanced/chapter1/1_2/1_2_1_a.html

<http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/ste-www1/naze/sun/sun52.html>

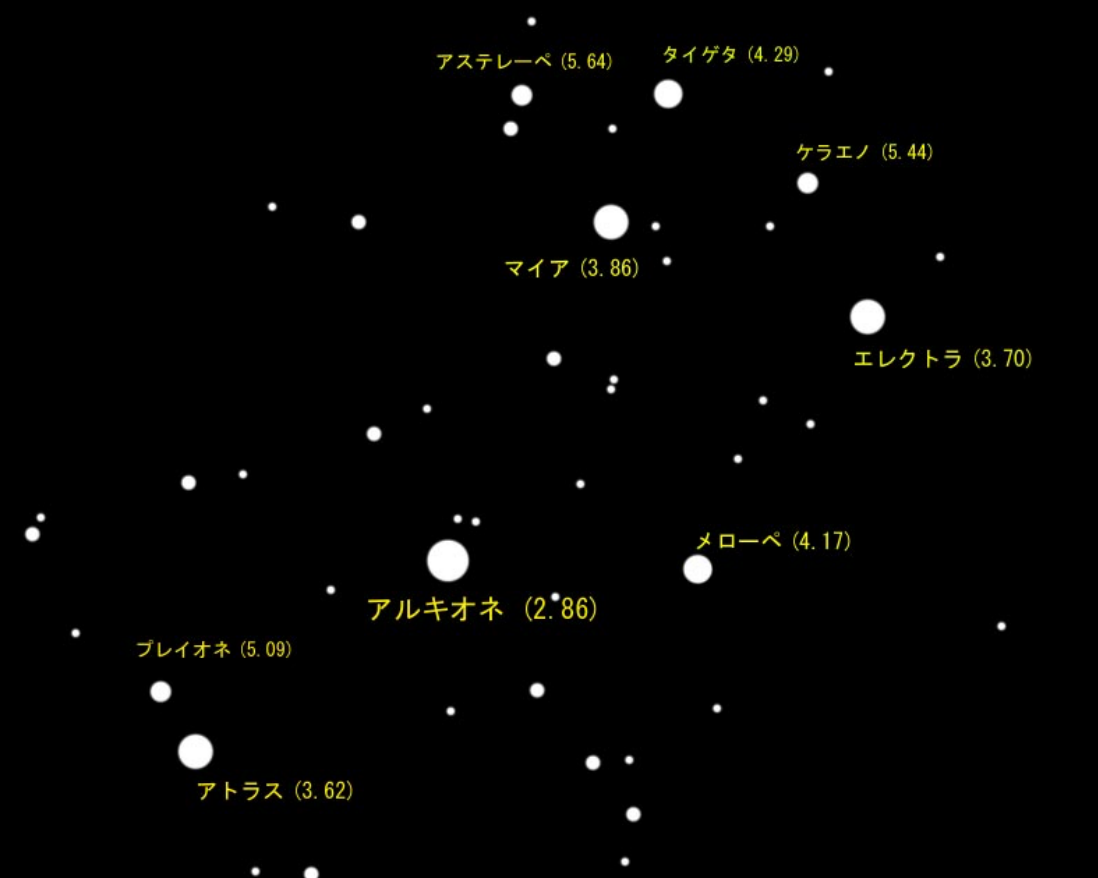


ハワイにある日本の
すばる望遠鏡





すばる (昴)
プレアデス星団



枕草子 229段

星は

すばる。ひこぼし。ゆふづゝ。
よばひほし、すこしおかし、
おだになからましかば、まいて

星はすばるがいいわよね。彦星も。宵の明星も。
流れ星も少し趣があってオススメ。
尾を引かなければもっと良いのに（笑）



寒昴 季語

【寒昴】（かんすばる） 冬昴 六連星（むつらぼし）

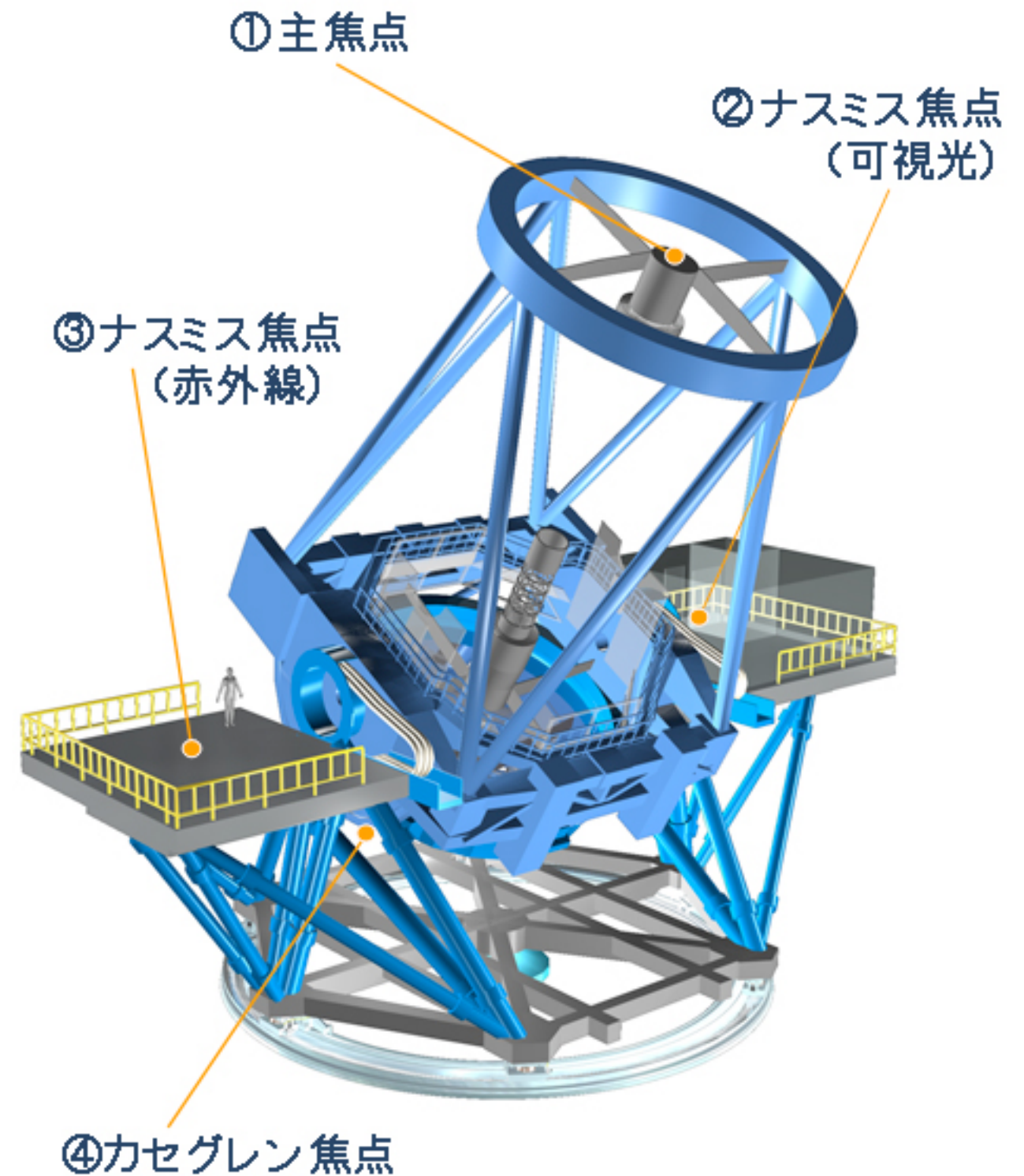
おうし座プレアデス星団の和名「昴」は1月24日深夜に南中するので「寒昴」と呼ばれ冬の季語。肉眼では六星と見えるので「六連星」ともいわれる。

『寒昴 天のいちばん上の座に』山口誓子

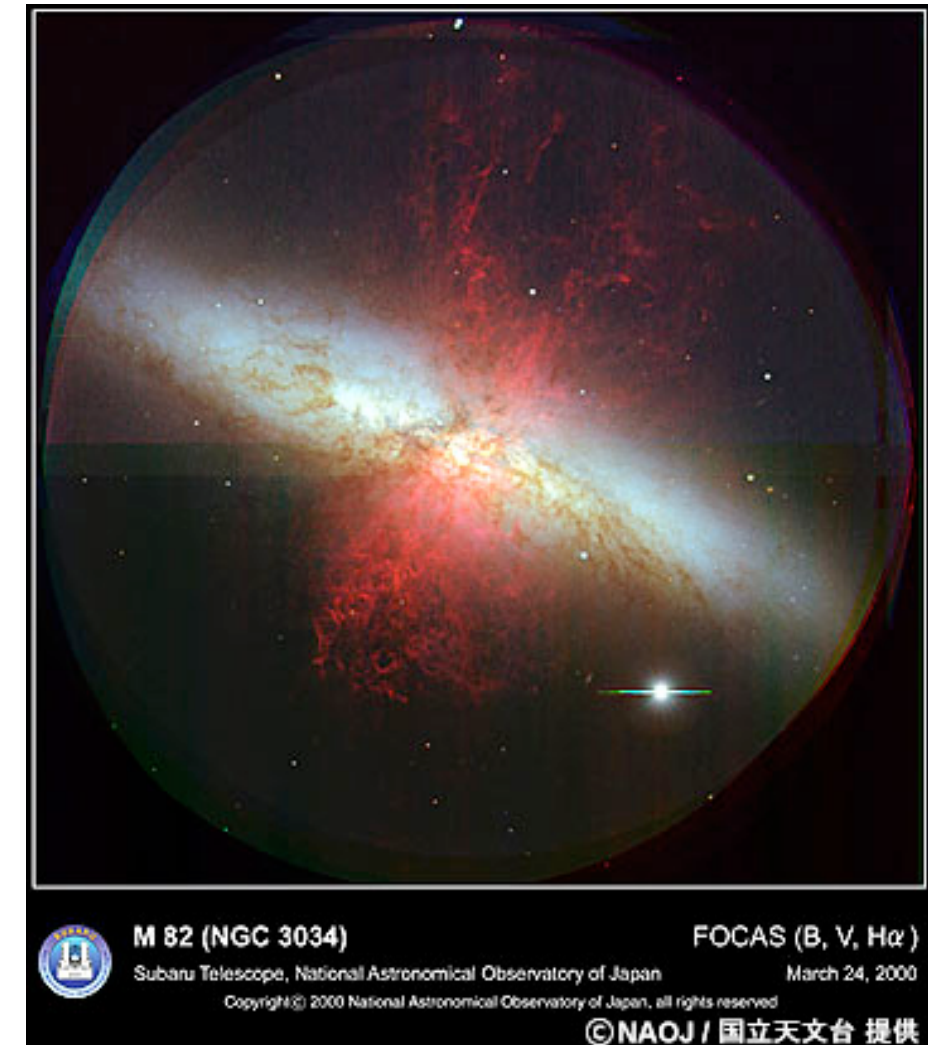
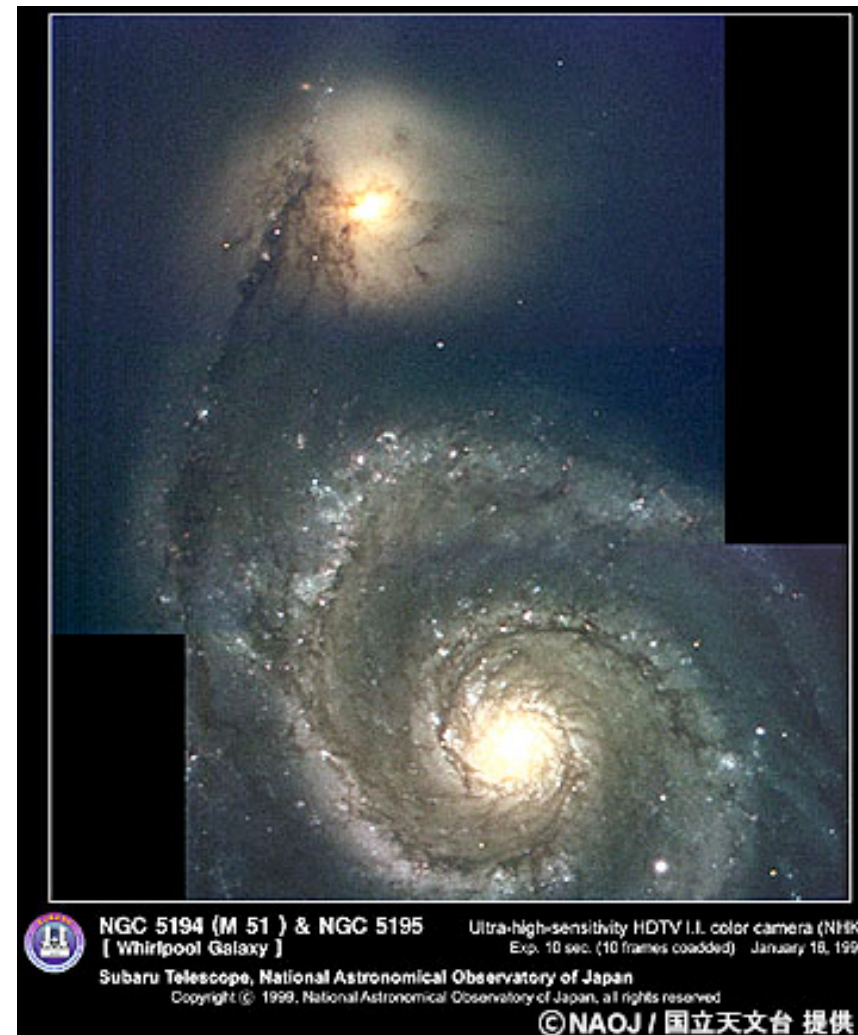
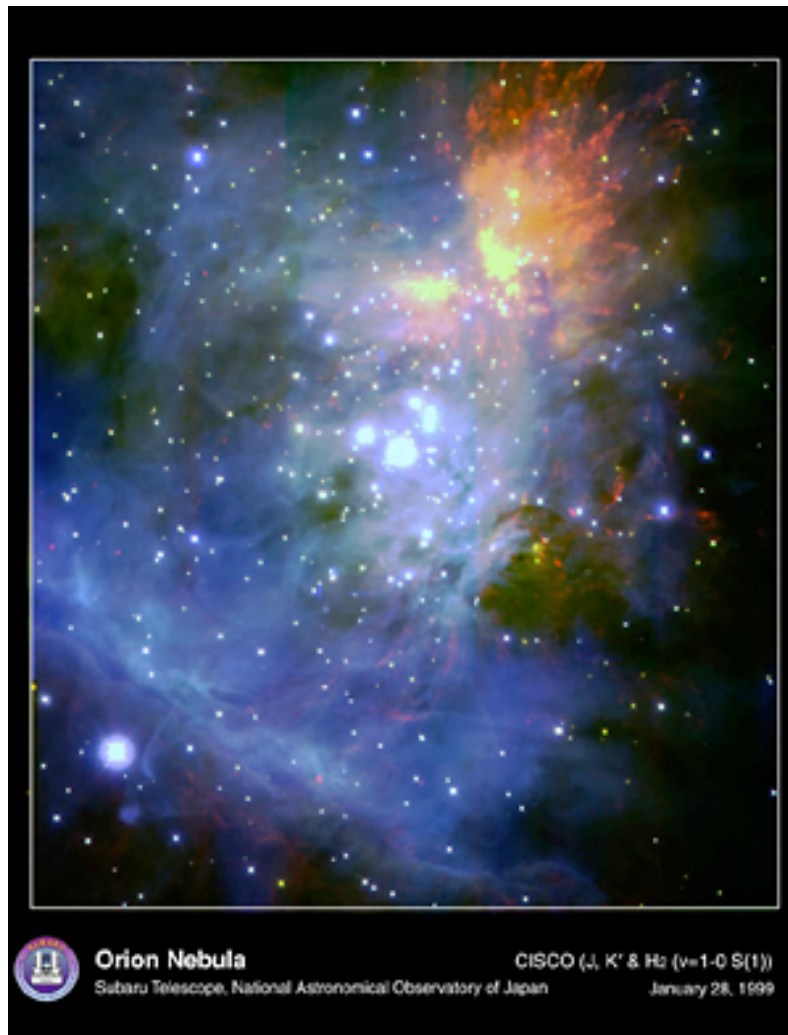
すばる望遠鏡 (SUBARU telescope)



ハワイのマウナケア山
(4200m)
主反射鏡の口径が 8.2m
(一枚鏡で厚さ20cm, 重さ
22.8 トン) .



すばる望遠鏡 (SUBARU telescope)



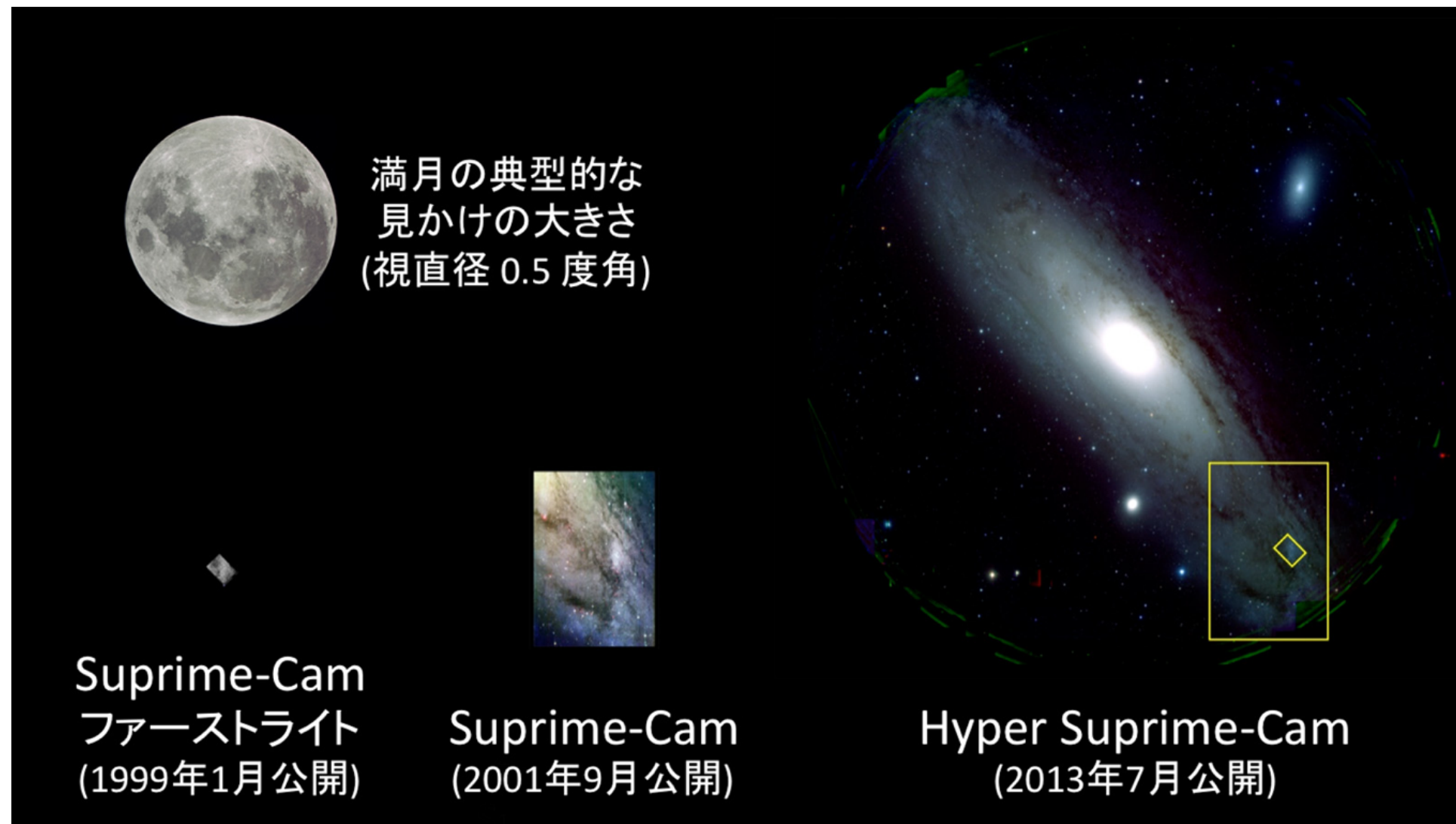
SUMIRE (Subaru Measurement of Images and Redshifts)プロジェクトが進行中. 宇宙の詳細な3次元マップを作成し, 宇宙膨張やダークマターの分布などを明らかにする.

9億ピクセル・重量約4トンのカメラと, 同時に数千の遠方銀河を観測できる分光器を製作・取り付け, 数十億光年離れた銀河を観測して宇宙の起源に迫る.

すばる望遠鏡, 新型の超広視野カメラがファーストライト

Subaru telescope revised. First Light of HSC.

2013/7/30



超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (ハイパー・シュプリーム・カム, HSC) がファーストライト.
満月 9 個分の広さの天域を一度に撮影できる世界最高性能の超広視野カメラ.

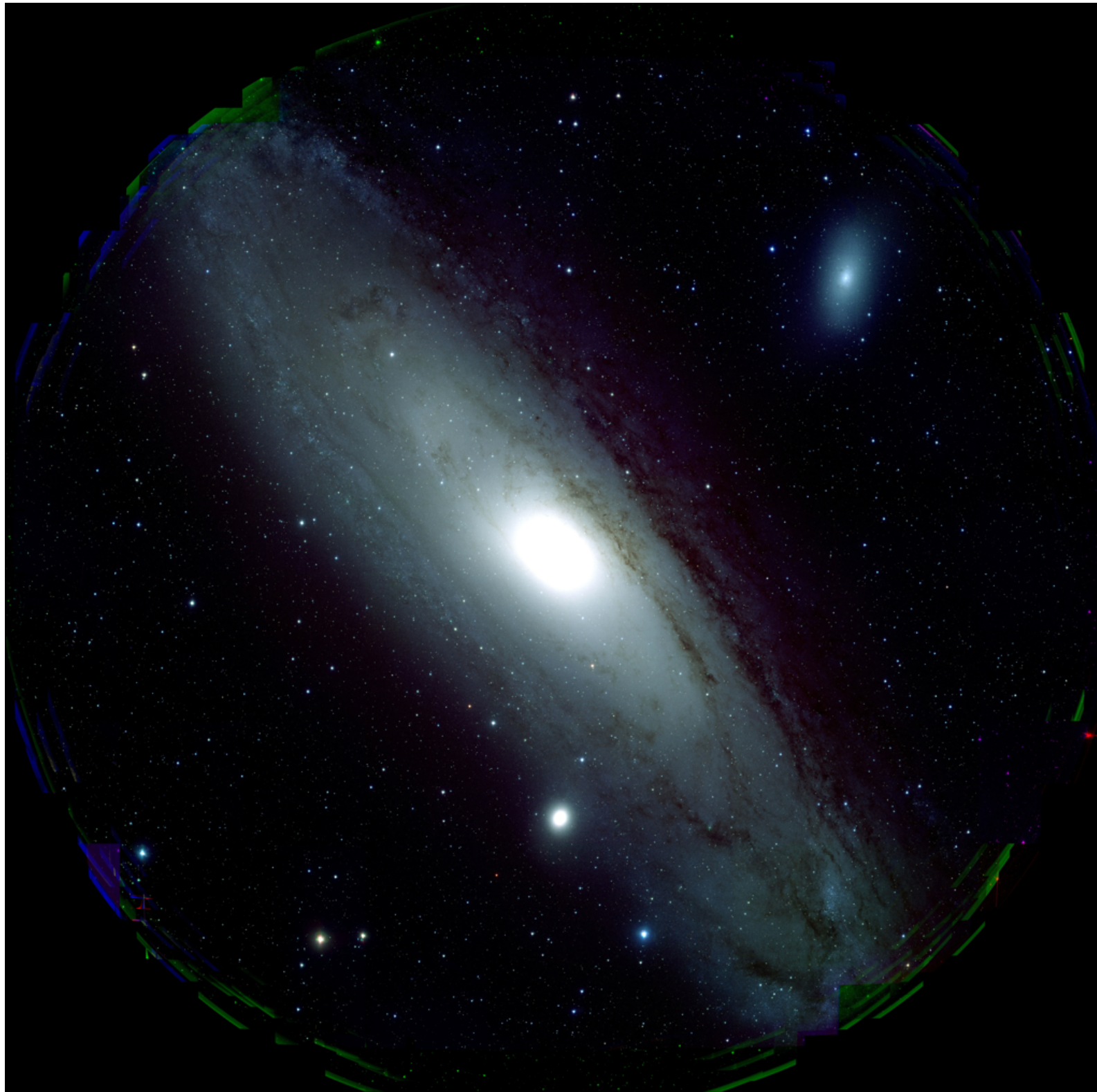
独自に開発した 116 個の CCD 素子を配置し, 計 8 億 7000 万画素を持つ巨大なデジタルカメラ.

アンドロメダ銀河のほぼ全体を 1 視野で捉えることに成功. すばる望遠鏡に当初から搭載されている Suprime-Cam (シュプリーム・カム) では, アンドロメダ銀河の一部 (満月よりやや広い視野) をシャープに撮影できていましたが, HSC の登場により観測の効率がさらに大きく高まった.

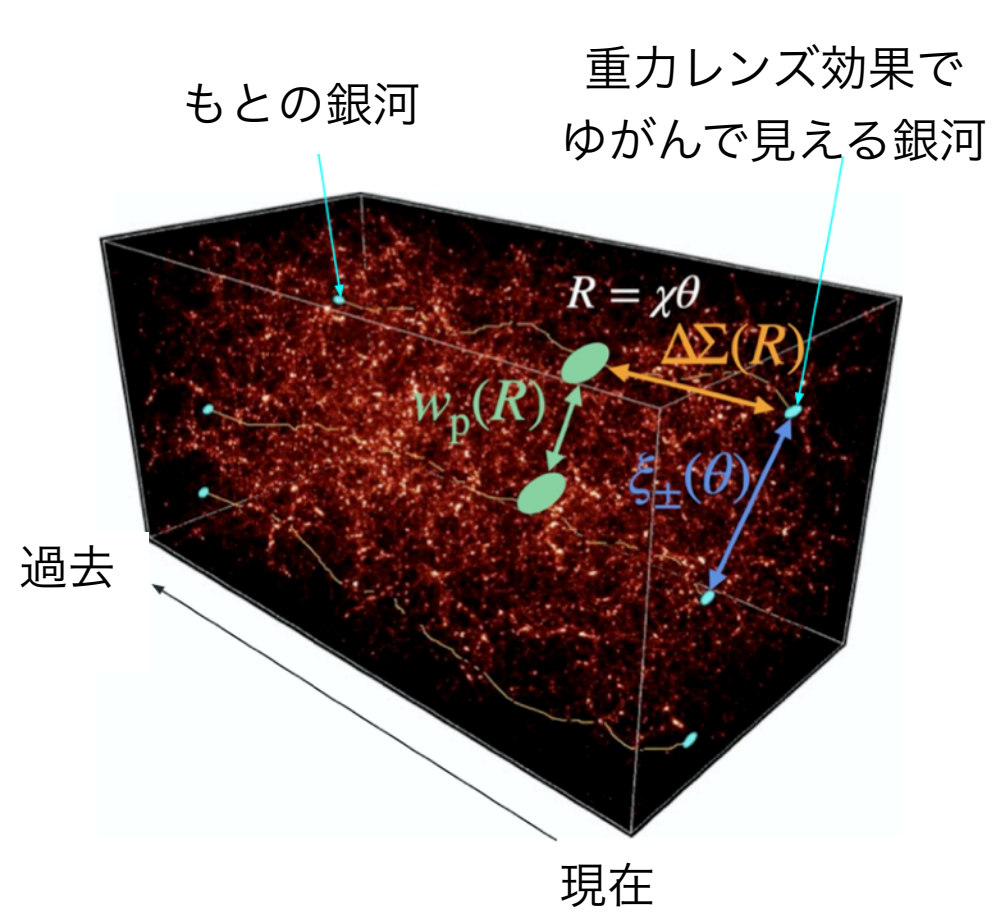
すばる望遠鏡, 新型の超広視野カメラがファーストライト

Subaru telescope revised. First Light of HSC.

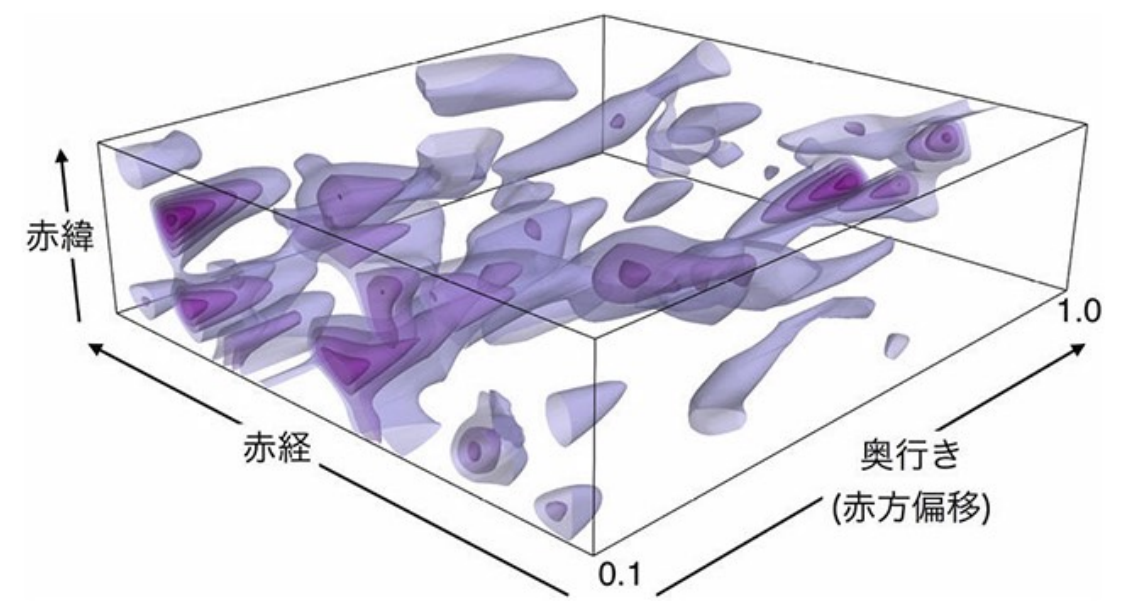
2013/7/30



すばる望遠鏡に搭載された HSC がとらえたアンドロメダ銀河 M31 の姿。g, r, i バンドの画像が青、緑、赤色に対応し、それぞれ 10 分積分 (露出) です。(クレジット: HSC Project / 国立天文台)

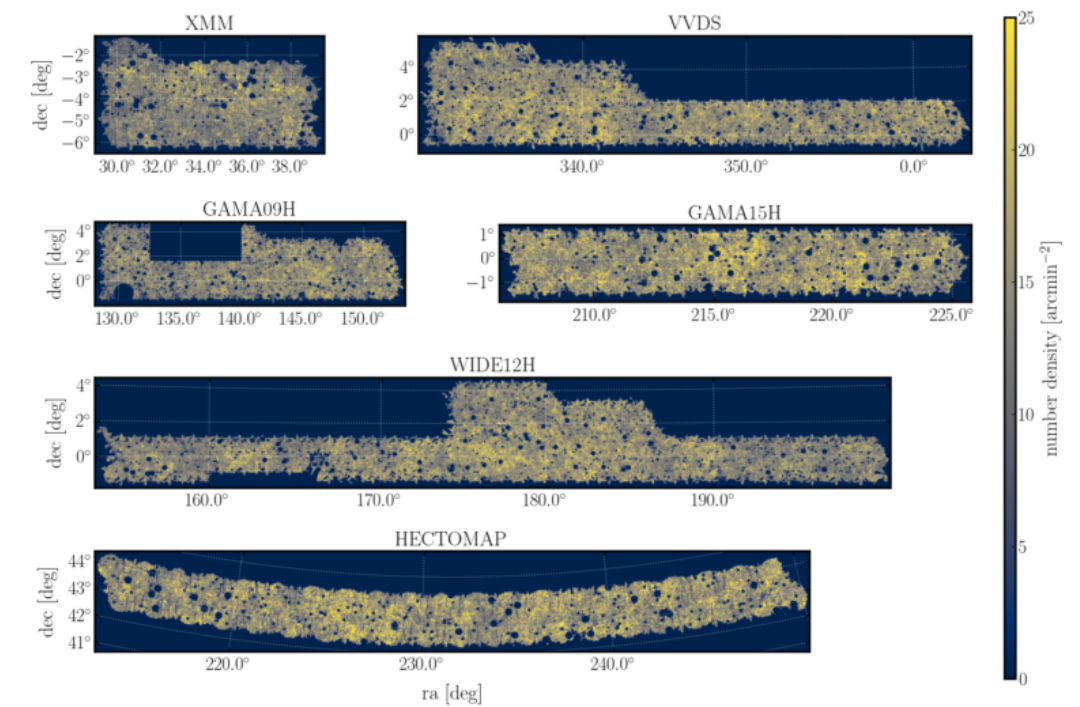
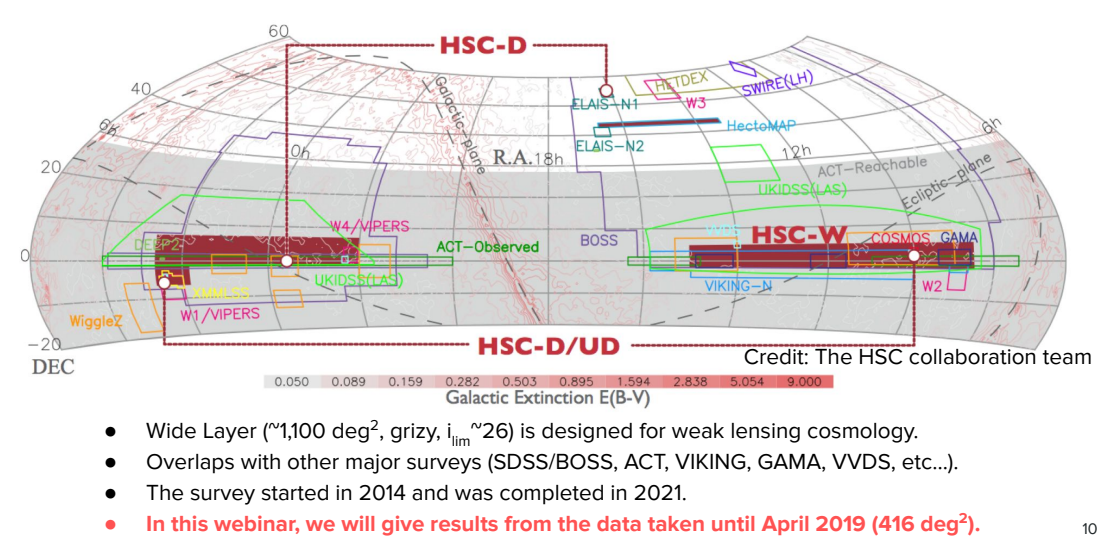


Subaru HSCの3年目のデータを解析した結果が報告された。416平方度におよぶ深宇宙の銀河（約2500万個）とダークマター分布の結果は、従来の宇宙モデルの基礎に異議を唱えるものとなった。



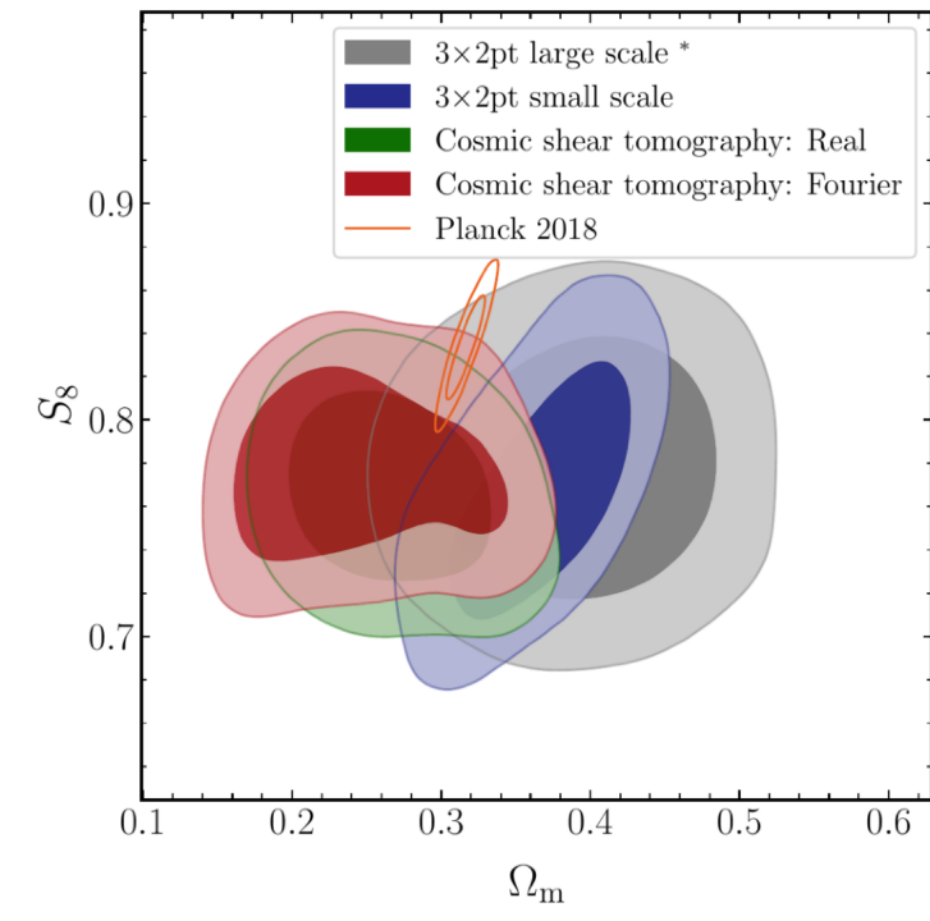
HSC-SSPで得られたダークマターの3次元分布の例
http://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/12997_darkmatter

HSC Subaru Strategic Program (SSP) Survey



<https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/doc/index.php/wly3/>

銀河密度分布



Testing Λ CDM using S_8

$$S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m / 0.3}$$

- σ_8 : Clumpiness of cosmic structure today.
- Ω_m : Energy density of matter (incl. dark matter).

S_8 tension?

Most **large scale structure probes** (weak lensing, galaxy clustering, galaxy clusters, etc...) prefer smaller S_8 compared to **CMB**, if we assume Λ CDM is correct.

CMB

Large Scale Structure (LSS)

The plot shows S_8 values for various cosmological probes. The x-axis is $S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m / 0.3}$ ranging from 0.2 to 1.2. The y-axis is divided into 'Early Universe' (CMB) and 'Late Universe' (LSS). The CMB probes (Planck TT, TE, EE+lowE, Planck TT, TE, EE+lowE+lensing, ACT+WMAP) are clustered around $S_8 \approx 0.83$. The LSS probes (KIDS, DES, HSC, CFHTLenS, BOSS, SDSS, XMM-XXL, ROSAT, SPT, Planck tSZ, RSD) show a wider distribution, with many values falling below $S_8 \approx 0.8$, indicating a preference for smaller S_8 values compared to the CMB.

<https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/doc/index.php/wly3/>

SNOWMASS 2021 Summer study: Abdalla et al. (2022)

7

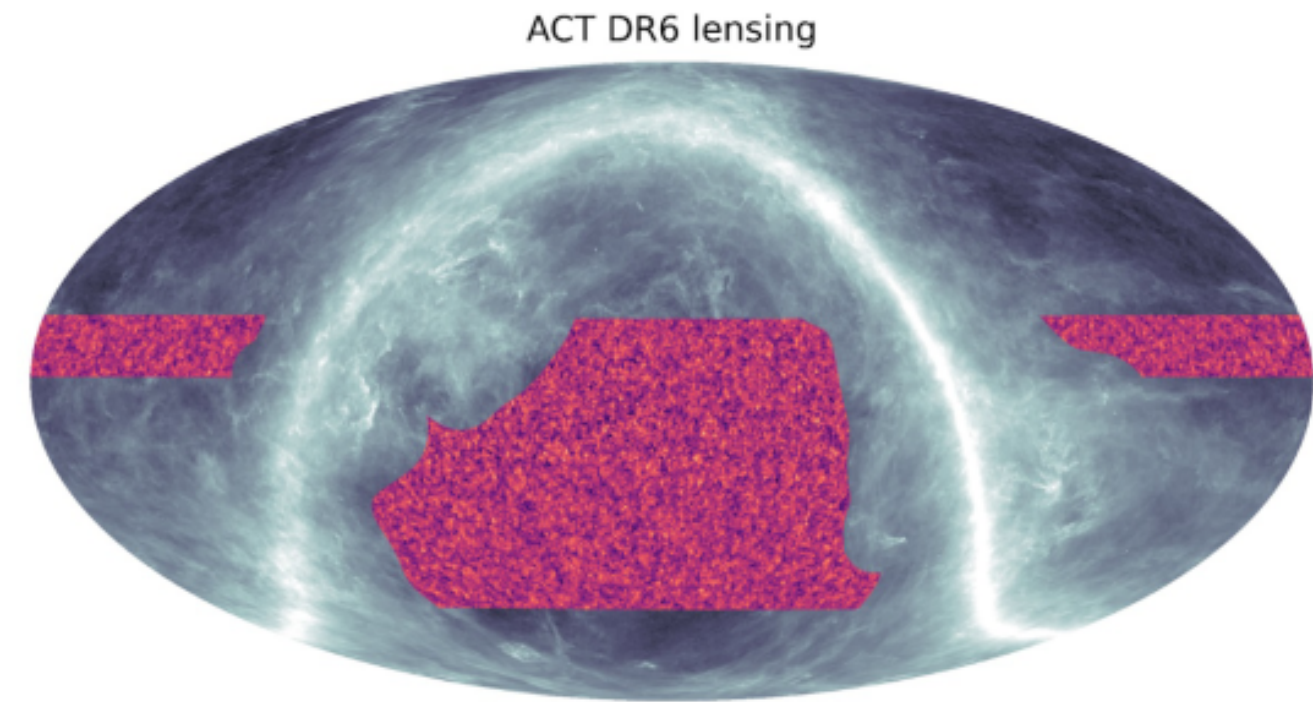
宇宙の物質密度とその分布集中度を乗じたパラメータS₈は、宇宙モデルを議論するうえでの主要な6つのパラメータの1つ。Planck衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測から得られた値と異なることがほぼ確定的になった。

アタカマ宇宙論望遠鏡：CMBからダークマター分布図

The Atacama Cosmology Telescope: Mitigating extragalactic foregrounds for CMB lensing analysis

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) が参加するアタカマ宇宙論望遠鏡 (Atacama Cosmology Telescope ; ACT) の国際共同研究グループは、2017年から2021年にかけて宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を観測したデータを用いて、CMB が我々に届くまでの間にどの程度、重力レンズ効果の影響を受けているかを解析した。そして、全天の約4分の1にあたる天域をカバーするダークマターの分布図を新たに作成した。

宇宙の大規模構造の成長の過程や最近の宇宙の膨張速度を見積もったところ、**アインシュタインの一般相対性理論に基づく宇宙の標準理論 (標準宇宙論) の予言値と一致**しており、標準宇宙論の正しさを裏付ける結果となった。

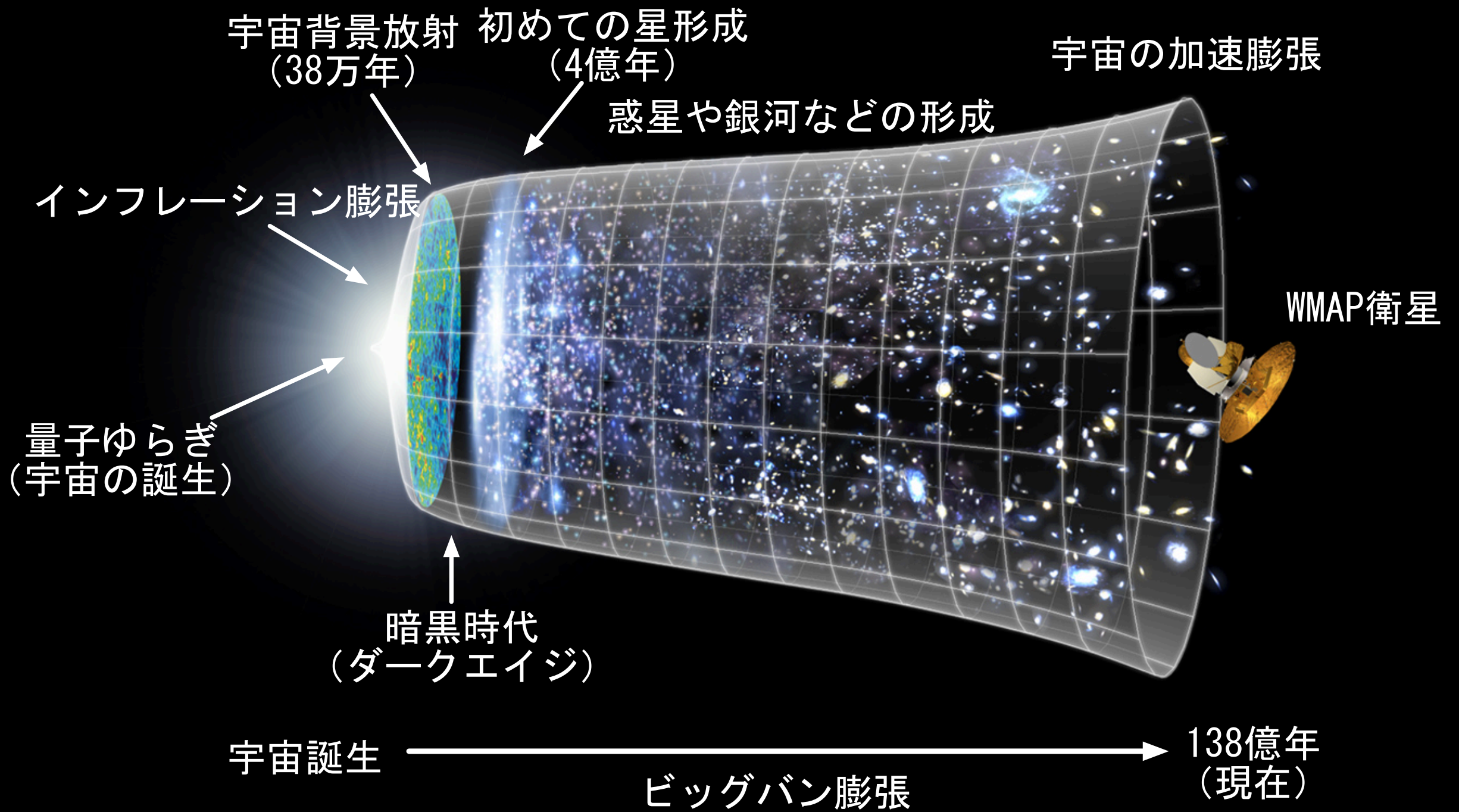


CMBの重力レンズ効果から得られた新しいダークマターの分布図。オレンジ色の領域はダークマターの質量が多いところ、紫色の領域はダークマターの質量が少ない領域を示す。このダークマターの分布は、奥行き数億光年にわたる。灰色と白で示された領域は、Planck衛星によって測定された天の川銀河のダストからの光で、CMB 観測を妨げている領域を示す。

<https://www.ipmu.jp/ja/20230502-ACT>

http://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13025_darkmatter

<https://arxiv.org/abs/2304.05196>



未知の問題

ダークエイジ

dark age

ダークマター

dark matter

ダークエネルギー

dark energy



アメリカの22の大学・研究機関の共同プロジェクト。
チリの標高2660mの高さに建設。2024年観測開始予定。口径 8.4 m
当初はLarge Synoptic Survey Telescope (LSST) という望遠鏡名で
呼ばれていたが、2020年に名称決定

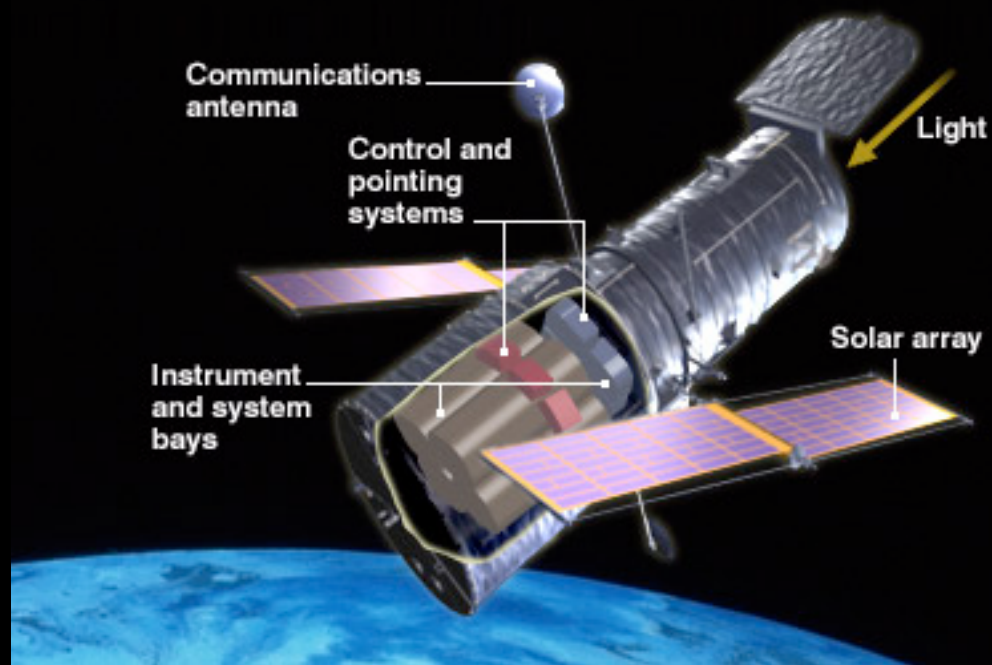


Vera C Rubin
(1928–2016)

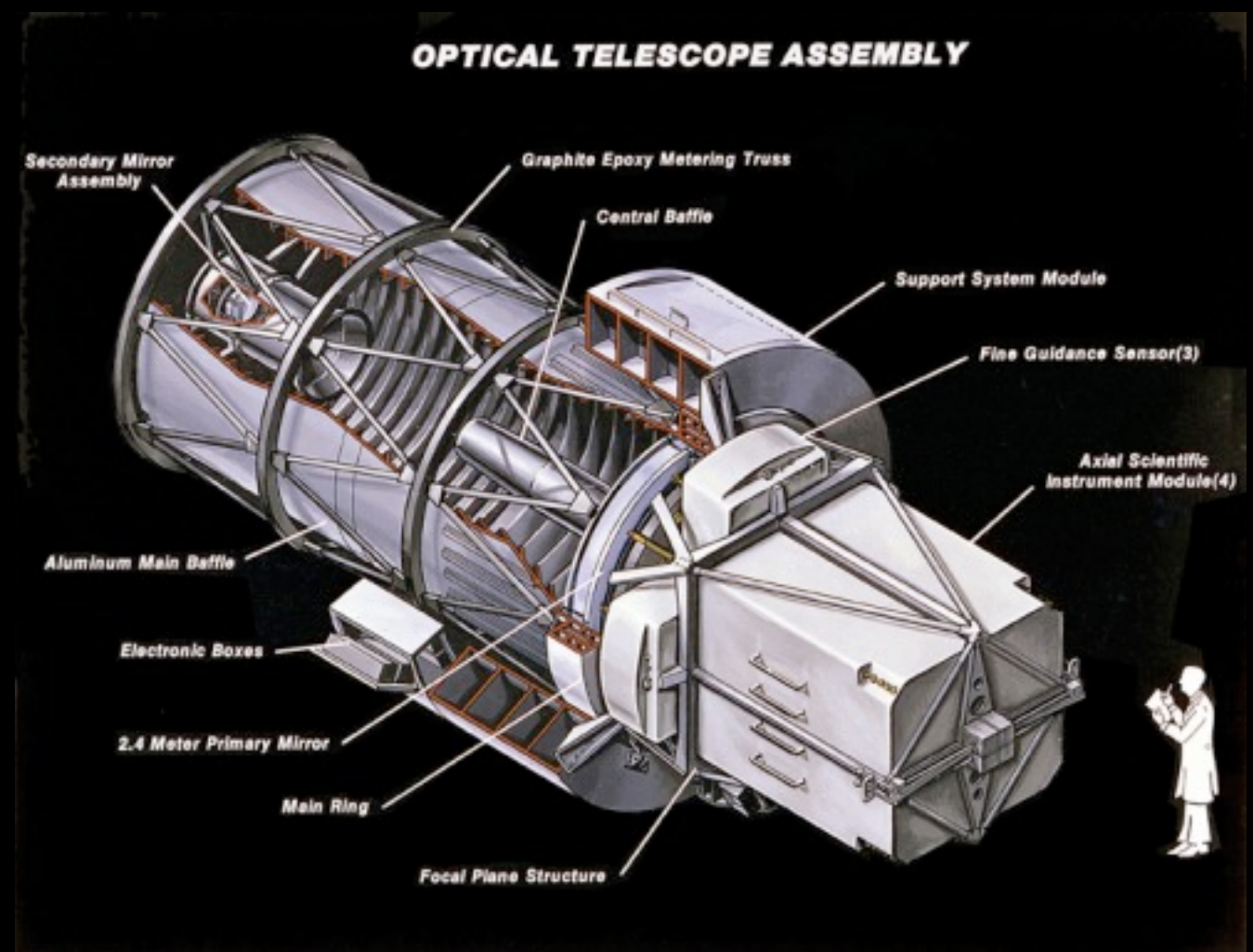


<https://www.lsst.org>

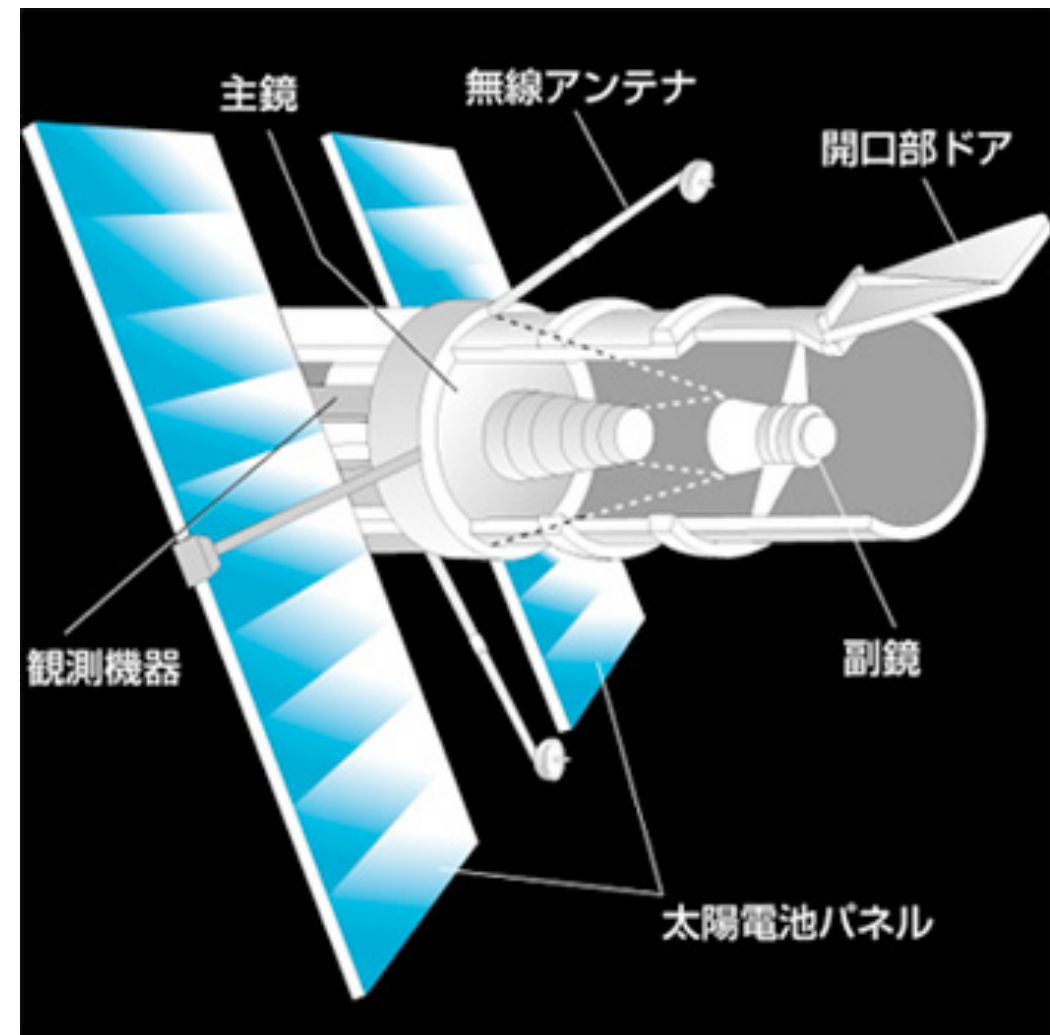
<https://www.youtube.com/watch?v=9aQY6f1Bcpk>



宇宙にある ハッブル望遠鏡 (1990-)



ハッブル宇宙望遠鏡 Hubble Space Telescope (HST)



アメリカが1990年，宇宙空間に打ち上げた望遠鏡.

衛星は長さ 13.1m の筒型，重さは 11トン

反射望遠鏡の主鏡直径は 2.4 m .

宇宙空間にあるため，大気の影響を受けず，鮮明な画像が得られる.

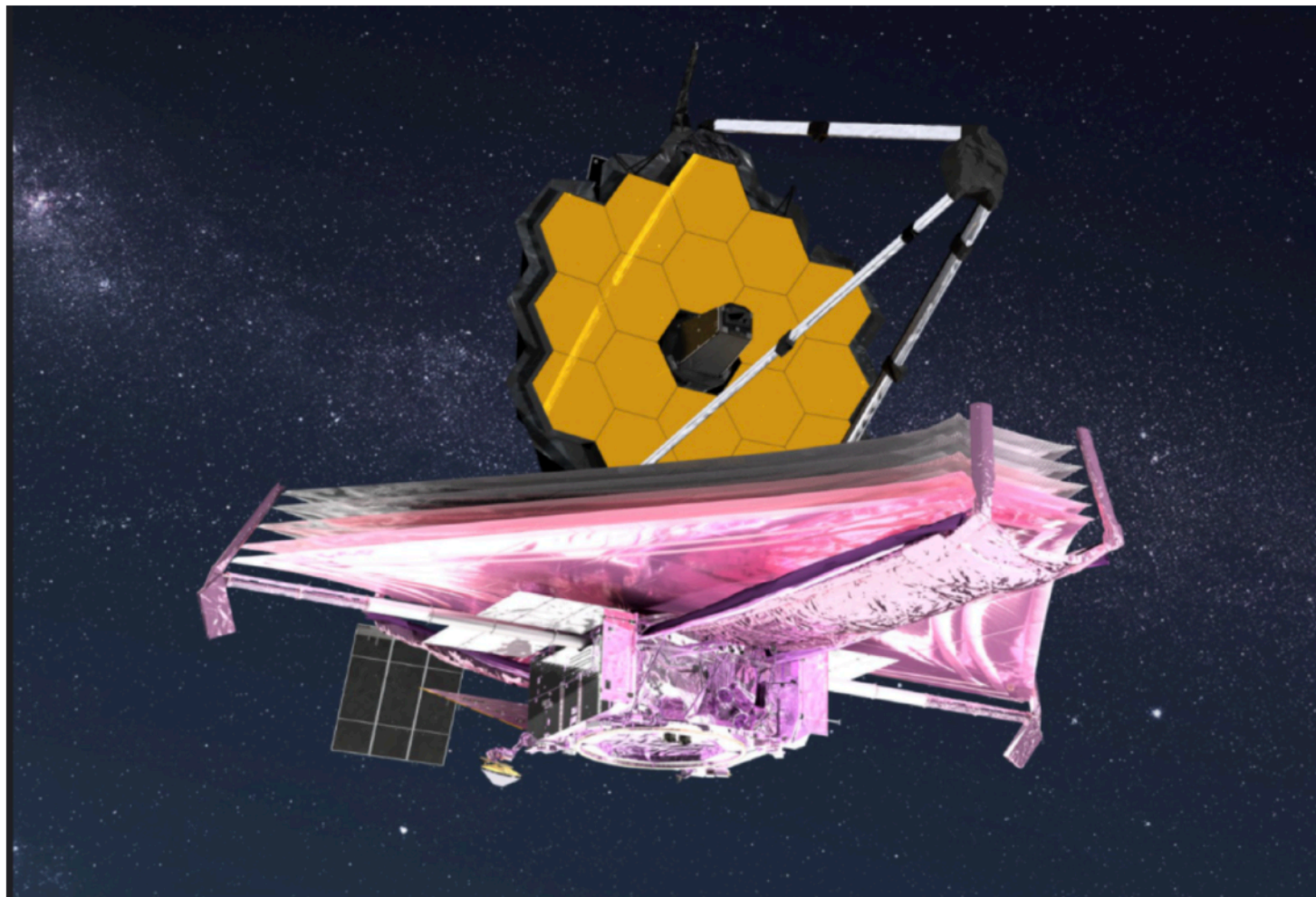
James Webbは1960年代のNASA長官。 アポロ計画を推進した

Webb Telescope

Jan 9, 2022

RELEASE 22-004

NASA's Webb Telescope Reaches Major Milestone as Mirror Unfolds



<https://www.jwst.nasa.gov>

Quick Facts

PRIMARY MIRROR SIZE: 21.3 feet (6.5 meters) across

MIRROR SHAPE: The mirror is comprised of 18 gold-plated hexagonal deployable segments

SUNSHIELD: Webb's five-layer deployable sunshield is the size of a tennis court

INSTRUMENTS: Webb has four science instruments: Near-Infrared Camera (NIRCam), Near-Infrared Spectrograph (NIRSpec), Mid-Infrared Instrument (MIRI), and Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph (NIRISS) with the Fine Guidance Sensor (FGS)

WAVELENGTHS: Visible, Near Infrared, Mid Infrared (0.6-28.5 micrometers)

TRAVEL DISTANCE: 1 million miles (1.5 million kilometers) from Earth

LOCATION IN SPACE: Orbiting the Sun around the second Lagrange point (L2)



THE JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

on click, 1'27"

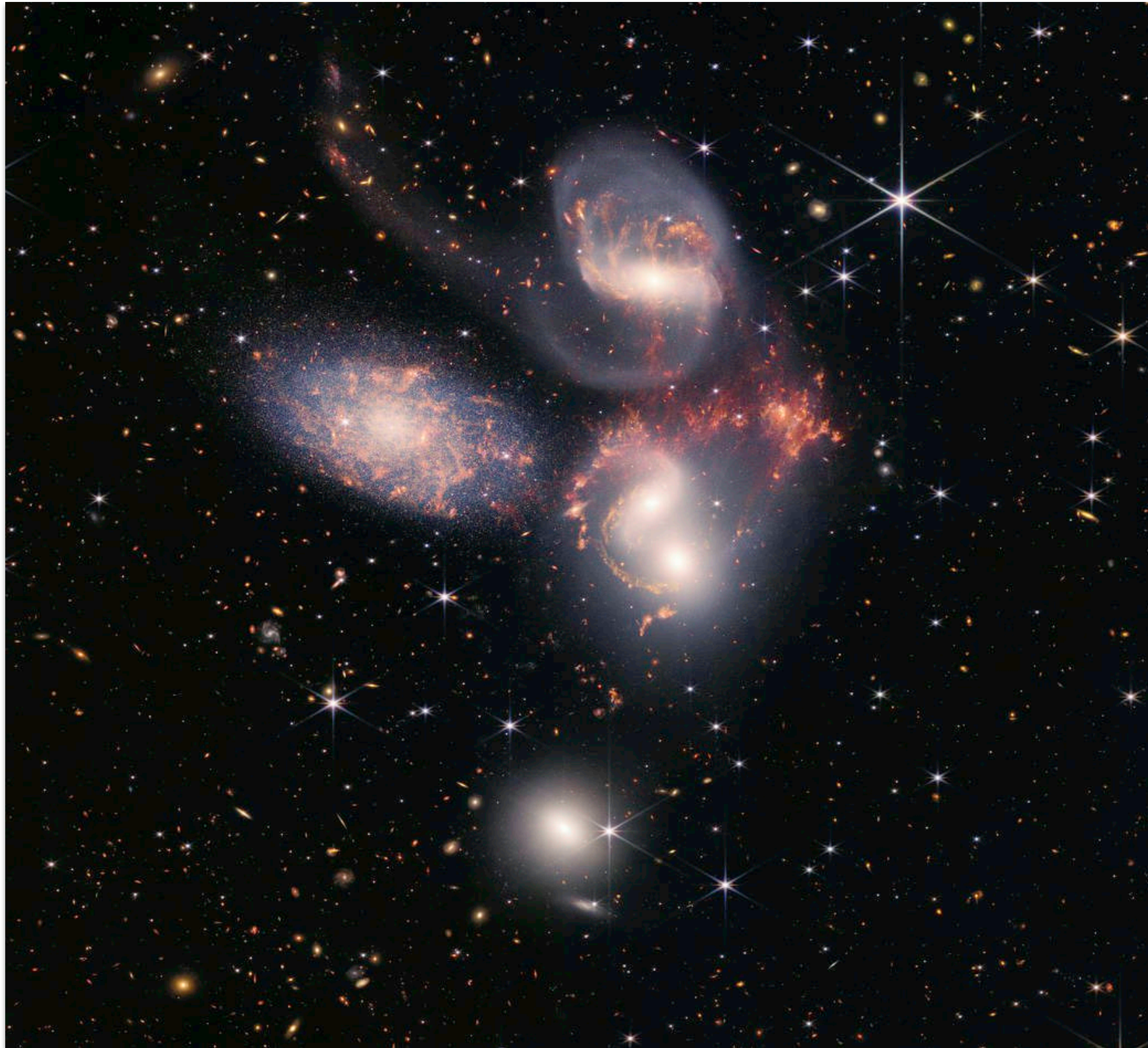
#UnfoldTheUniverse

NASA's James Webb Space Telescope – Official Mission Trailer

472,631 回視聴 • 2021/12/21

👍 2.8万 💬 低評価 ➦ 共有 ≡+ 保存 ...

<https://www.youtube.com/watch?v=69uT90tEJdE>



Stephan's Quintet, a visual grouping of five galaxies, is best known for being prominently featured in the holiday classic film, "It's a Wonderful Life." Today, NASA's James Webb Space Telescope reveals Stephan's Quintet in a new light. This enormous mosaic is Webb's largest image to date, covering about one-fifth of the Moon's diameter. It contains over 150 million pixels and is constructed from almost 1,000 separate image files. The information from Webb provides new insights into how galactic interactions may have driven galaxy evolution in the early universe.



NASA's James Webb Space Telescope has produced the deepest and sharpest infrared image of the distant universe to date. Known as Webb's First Deep Field, this image of galaxy cluster SMACS 0723 is overflowing with detail.

Thousands of galaxies – including the faintest objects ever observed in the infrared – have appeared in Webb's view for the first time. This slice of the vast universe covers a patch of sky approximately the size of a grain of sand held at arm's length by someone on the ground.



This landscape of “mountains” and “valleys” speckled with glittering stars is actually the edge of a nearby, young, star-forming region called NGC 3324 in the Carina Nebula (カリーナ星雲, りゅうこつ座). Captured in infrared light by NASA’s new James Webb Space Telescope, this image reveals for the first time previously invisible areas of star birth.

<https://www.nasa.gov/webbfirstimages>

Astronomy Picture of the Day

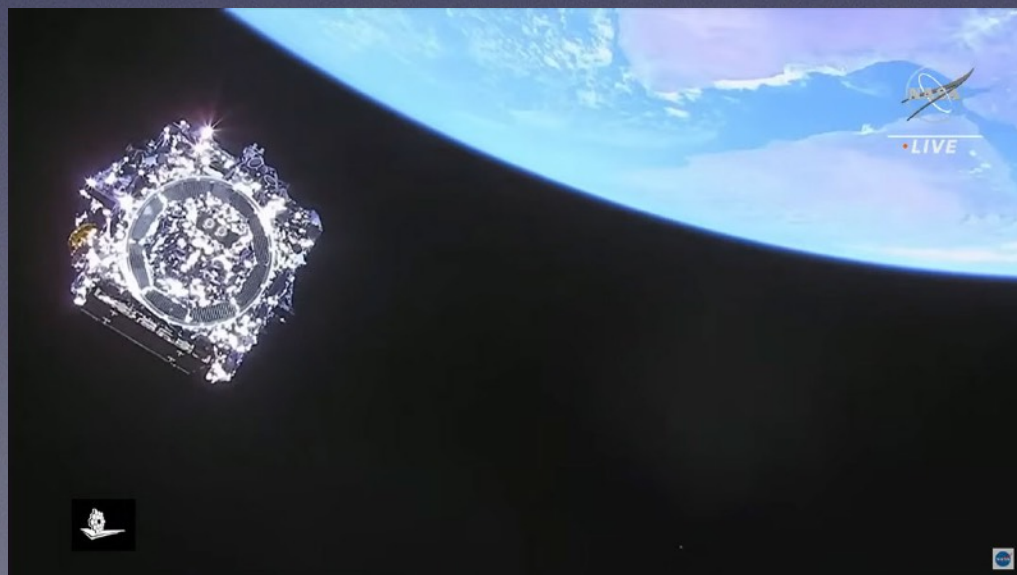
<https://apod.nasa.gov/apod/astropix.html>



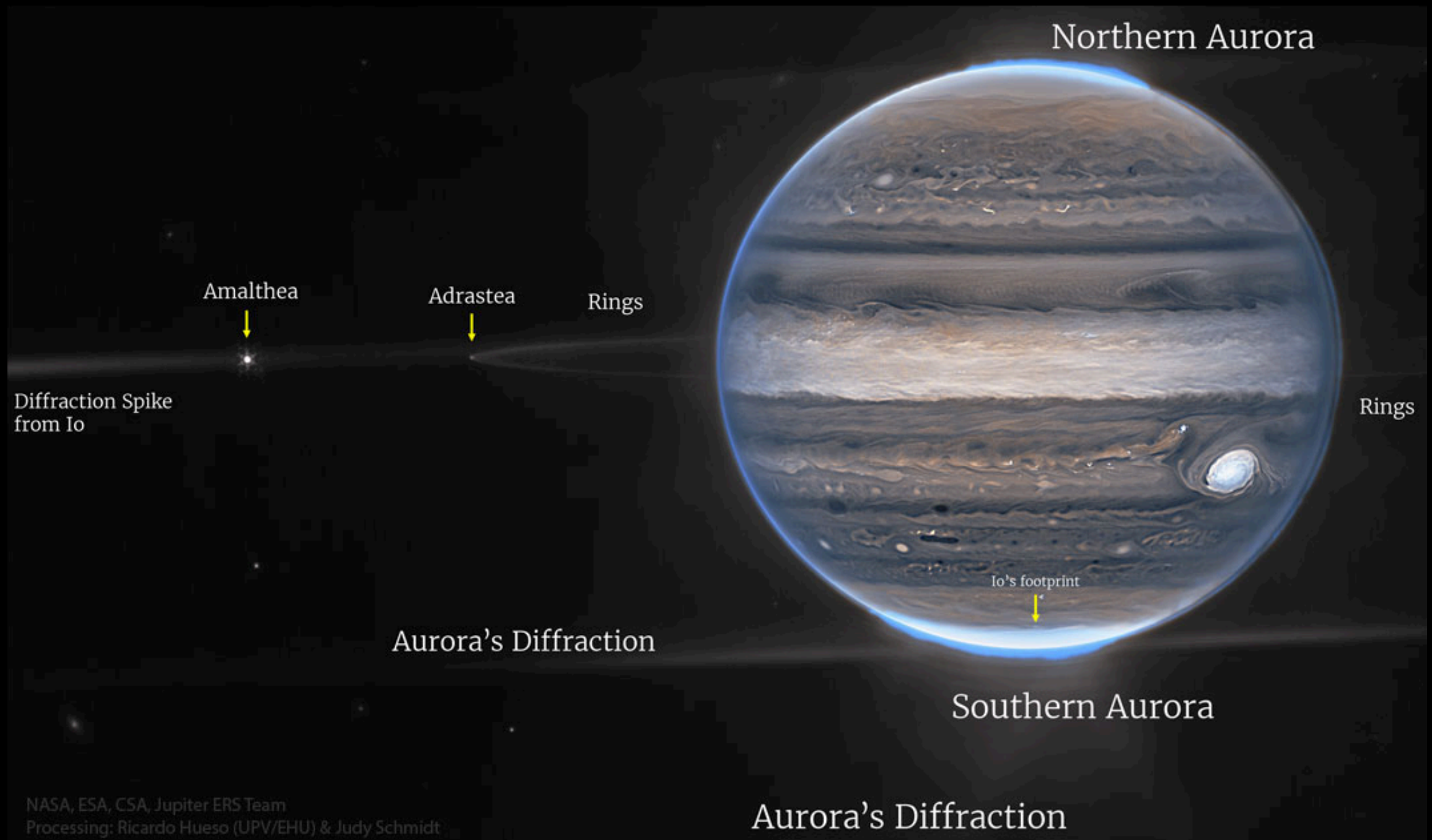
Star Forming Region NGC 3582 without Stars
2022/Sep 20



September Sunrise Shadows
2022/Sep 24



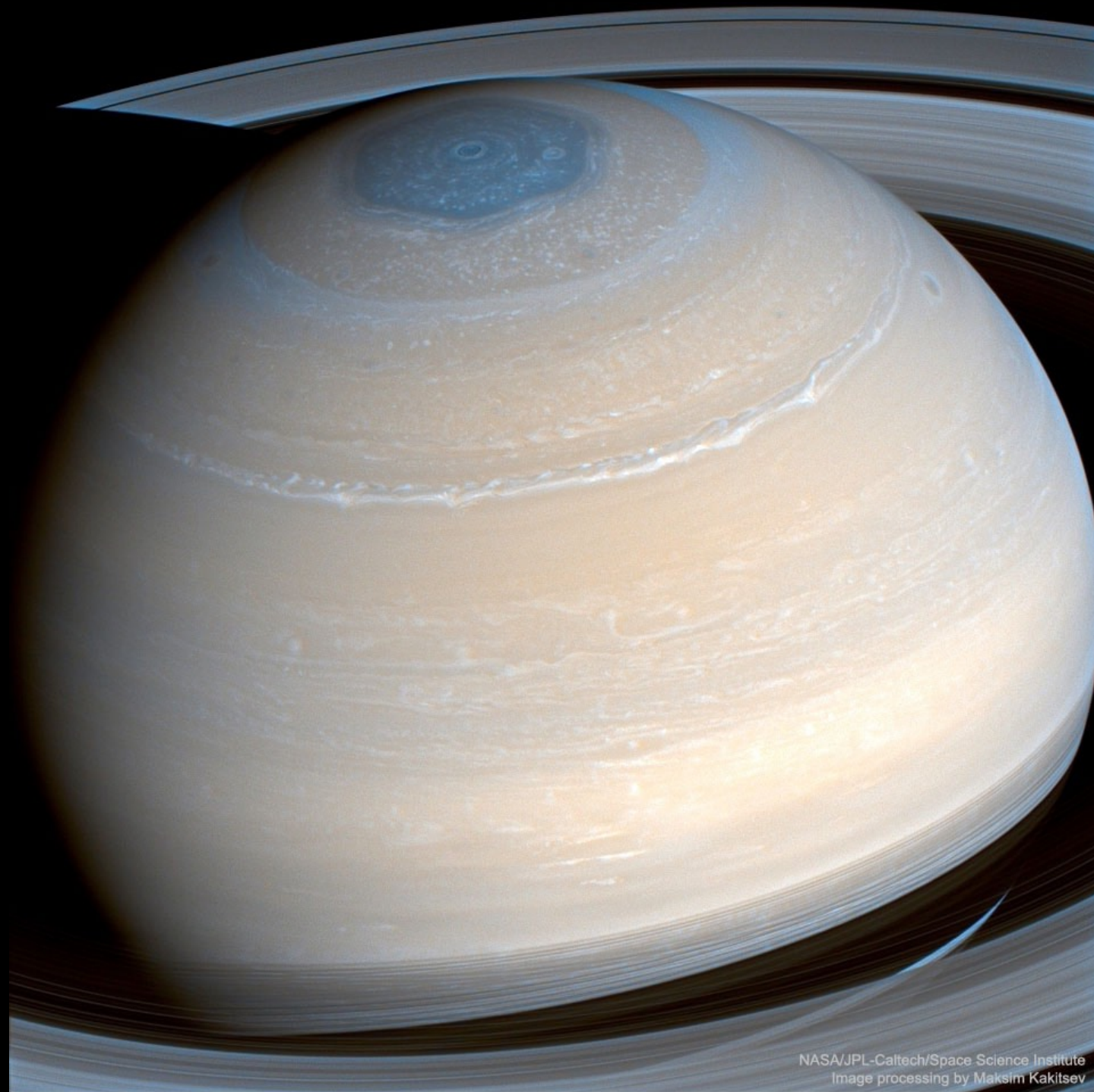
James Webb Space Telescope over Earth
2021/Dec 26



Jupiter from the Webb Space Telescope

This new view of Jupiter is illuminating. High-resolution infrared images of Jupiter from the new James Webb Space Telescope (Webb) reveal, for example, previously unknown differences between high-floating bright clouds -- including the Great Red Spot -- and low-lying dark clouds. Also clearly visible in the featured Webb image are Jupiter's dust ring, bright auroras at the poles, and Jupiter's moons Amalthea and Adrastea. Large volcanic moon Io's magnetic funneling of charged particles onto Jupiter is also visible in the southern aurora. Some objects are so bright that light noticeably diffracts around Webb's optics creating streaks. Webb, which orbits the Sun near the Earth, has a mirror over six meters across making it the largest astronomical telescope ever launched -- with over six times more light-collecting area than Hubble.

<https://apod.nasa.gov/apod/ap220830.html>



Saturn in Infrared from Cassini

Many details of Saturn appear clearly in infrared light. Bands of clouds show great structure, including long stretching storms. Also quite striking in infrared is the unusual hexagonal cloud pattern surrounding Saturn's North Pole. Each side of the dark hexagon spans roughly the width of our Earth. The hexagon's existence was not predicted, and its origin and likely stability remains a topic of research. Saturn's famous rings circle the planet and cast shadows below the equator. The featured image was taken by the robotic Cassini spacecraft in 2014 in several infrared colors. In 2017 September, the Cassini mission was brought to a dramatic conclusion when the spacecraft was directed to dive into ringed giant.

インフレーション宇宙モデル

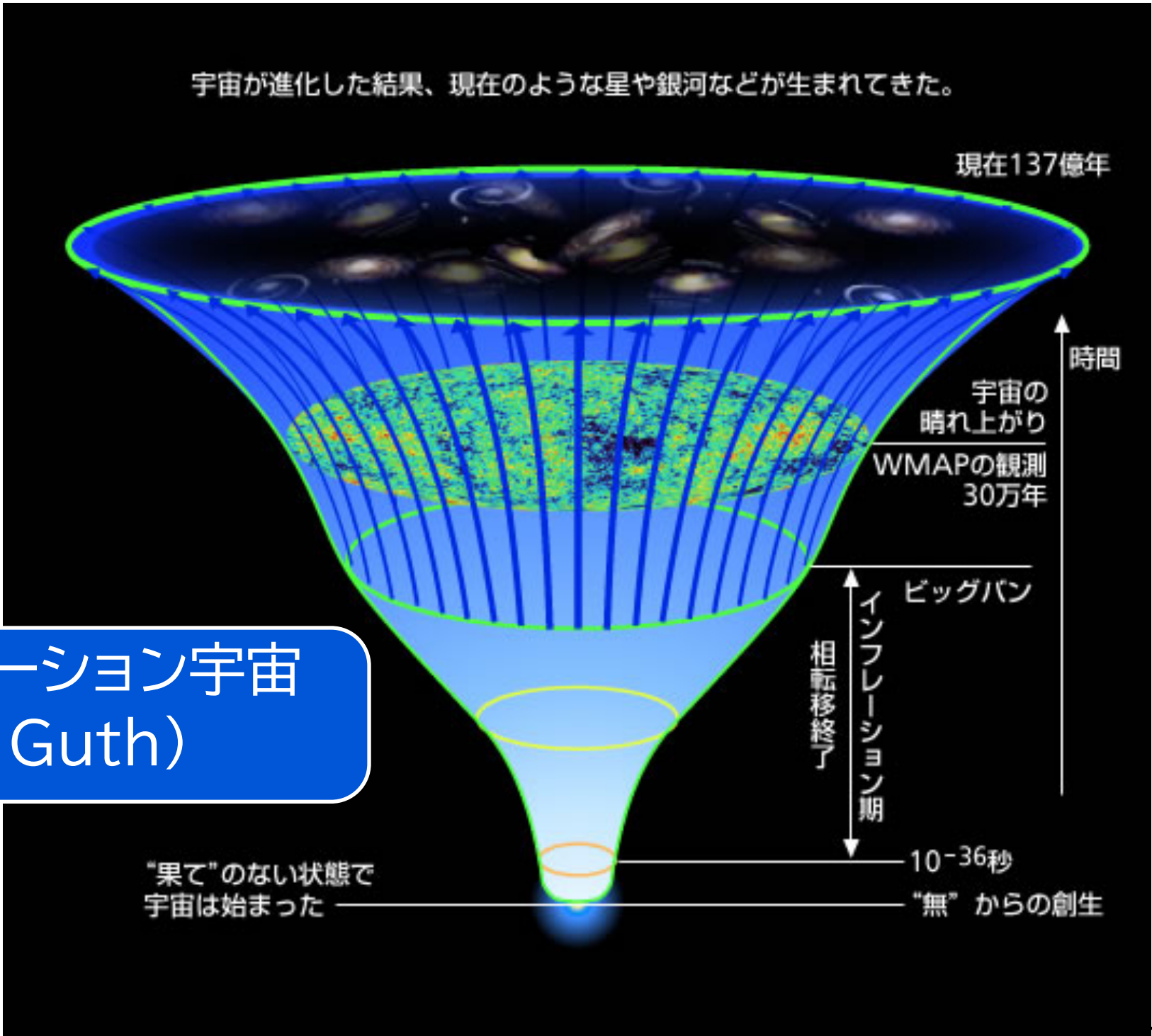
宇宙の初期に急激な膨張があった, と考える
(インフレーション宇宙モデル 1981年)



初期の宇宙は
指数関数的膨張
(佐藤勝彦)



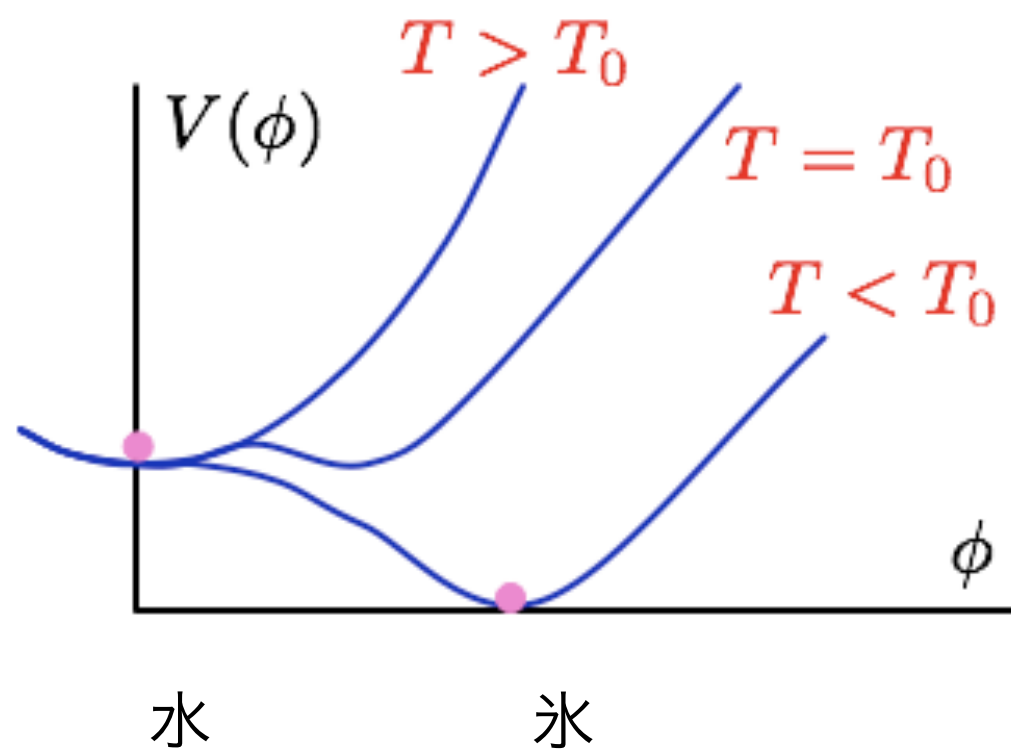
インフレーション宇宙
(A. Guth)



相転移現象

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

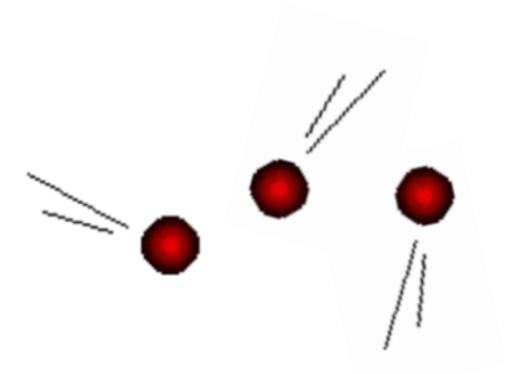
縦軸 $V(\phi)$ は、エネルギー。

(下へ行くほど安定な坂道)

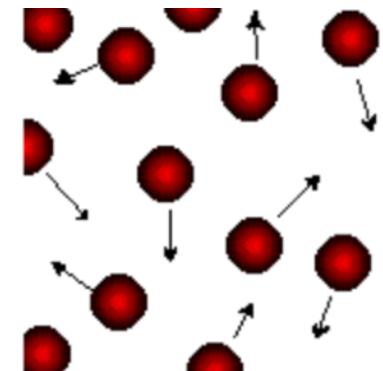
固体から液体へ = 相転移現象

phase transition

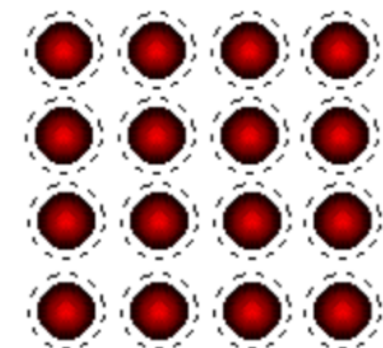
気体 (気相)



液体 (液相)



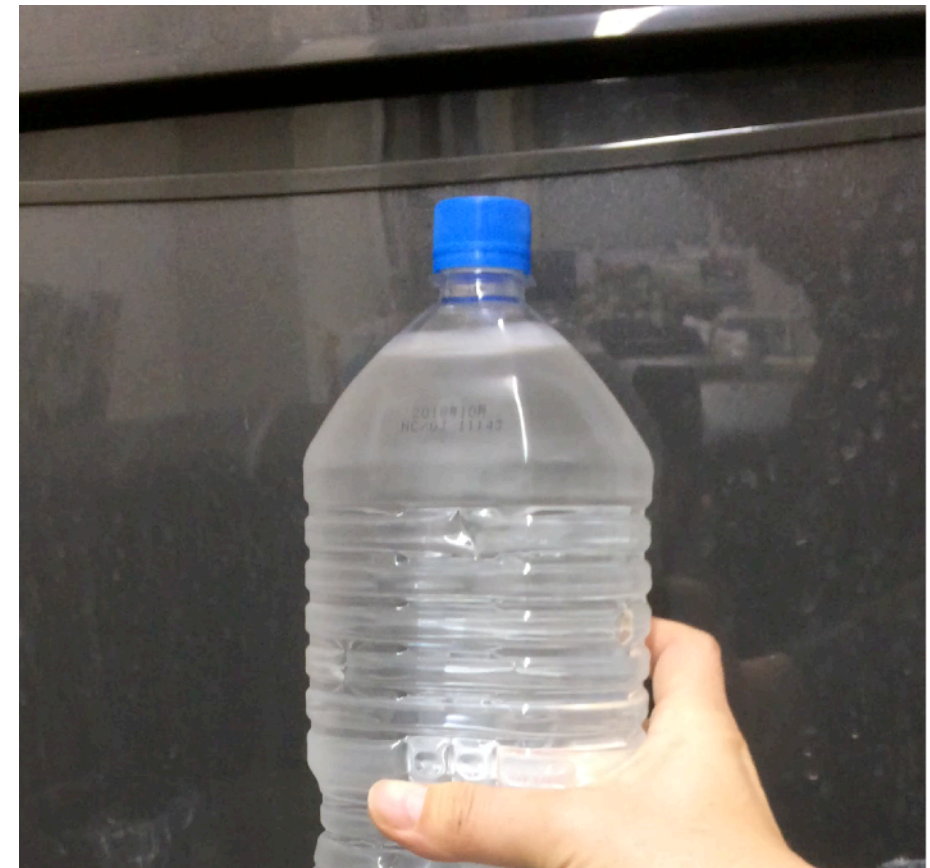
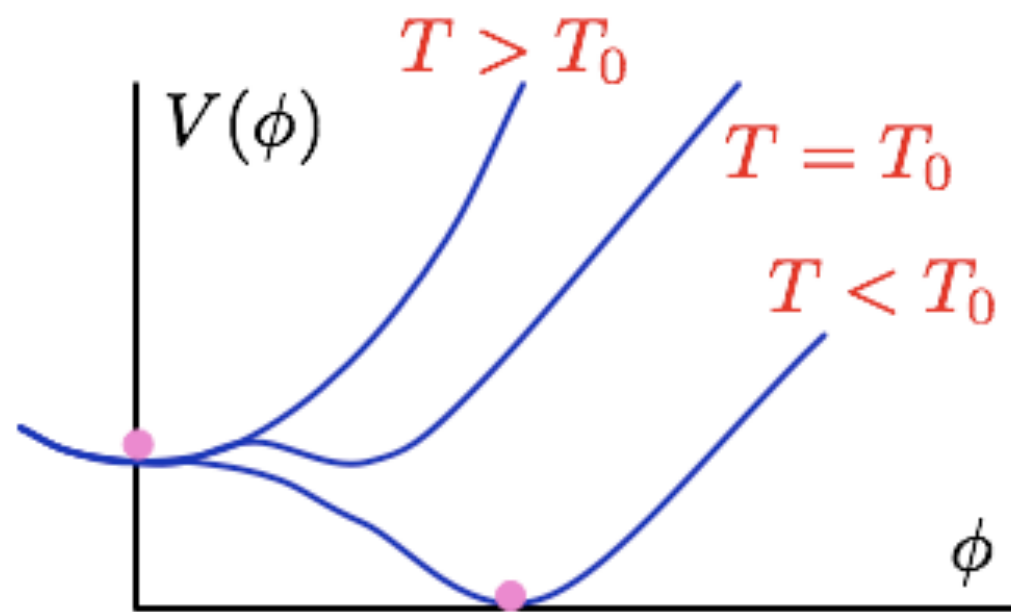
固体 (固体相)



過冷却現象 = 相転移は同時に一様に生じるわけではない

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

自発的対称性の破れ

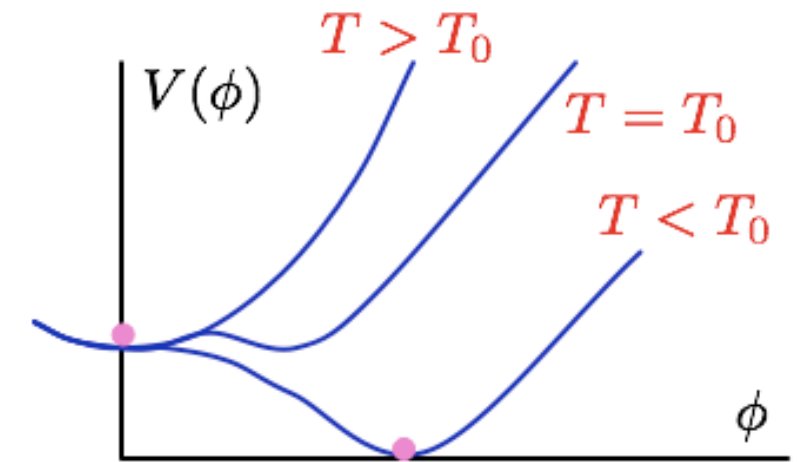


南部陽一郎（米国籍）

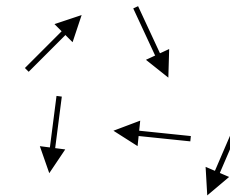
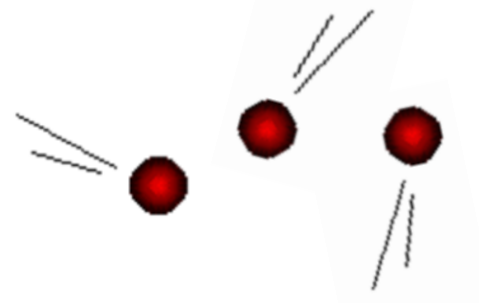
（ノーベル物理学賞 2008）

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*

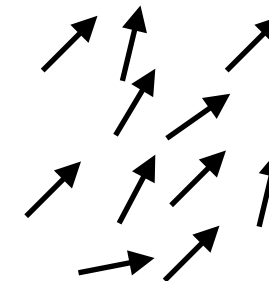
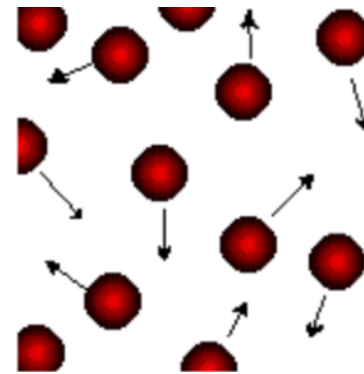


気体（気相）

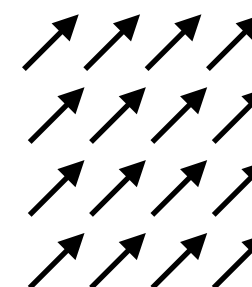
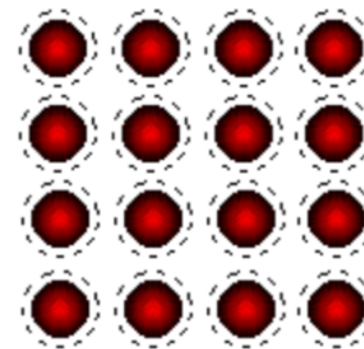


対称性の高い状態
（平均すればゼロ）

液体（液相）

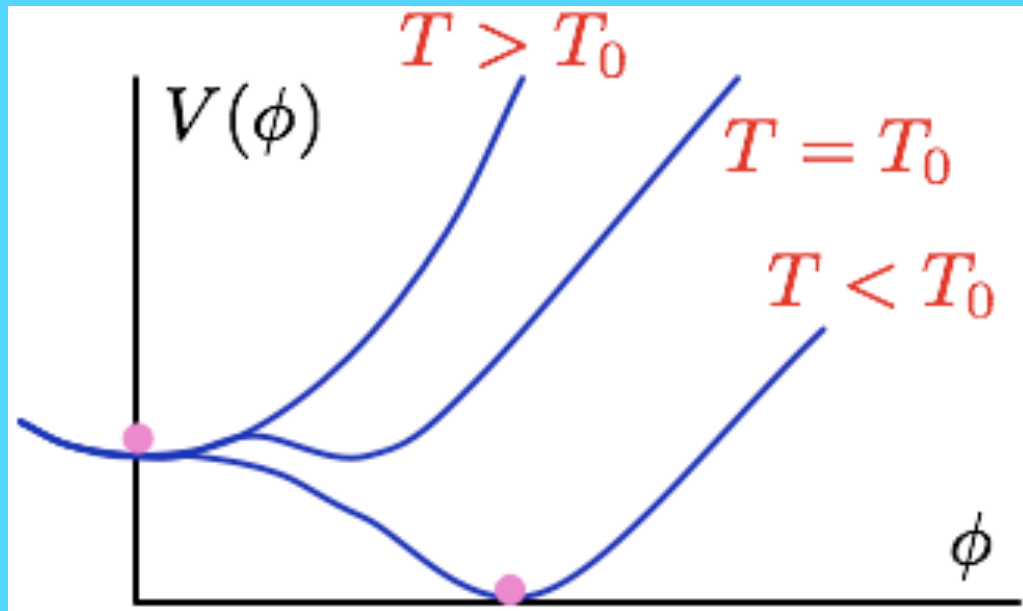


固体（固体相）



対称性の破れた状態

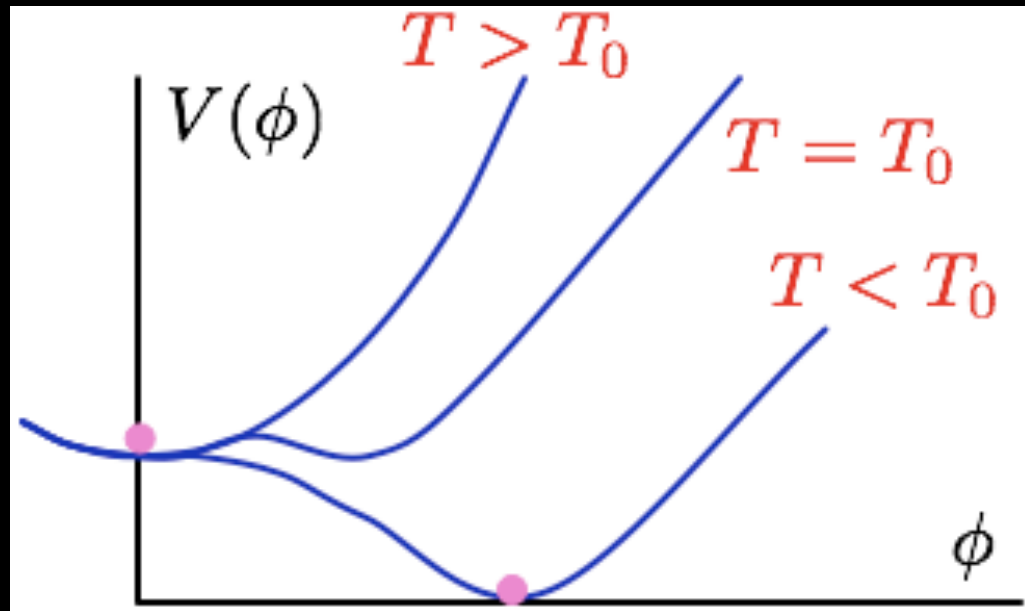
インフレーション宇宙モデル



偽真空 真の真空

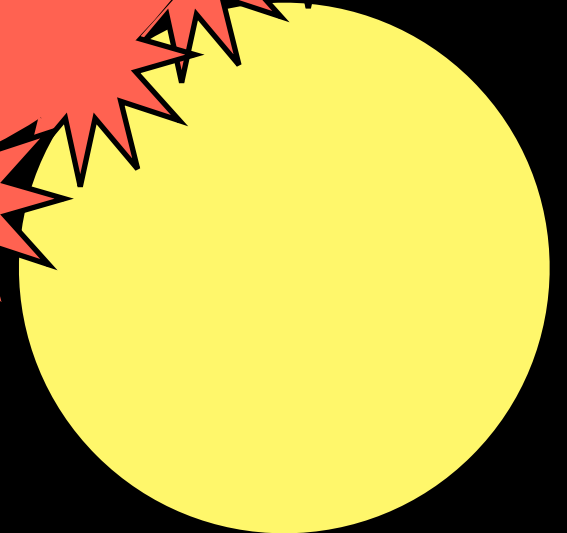
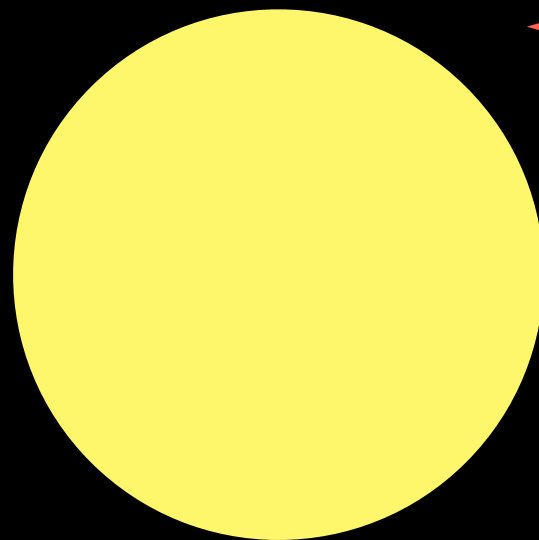
インフレーション膨張

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



インフレーション宇宙モデル

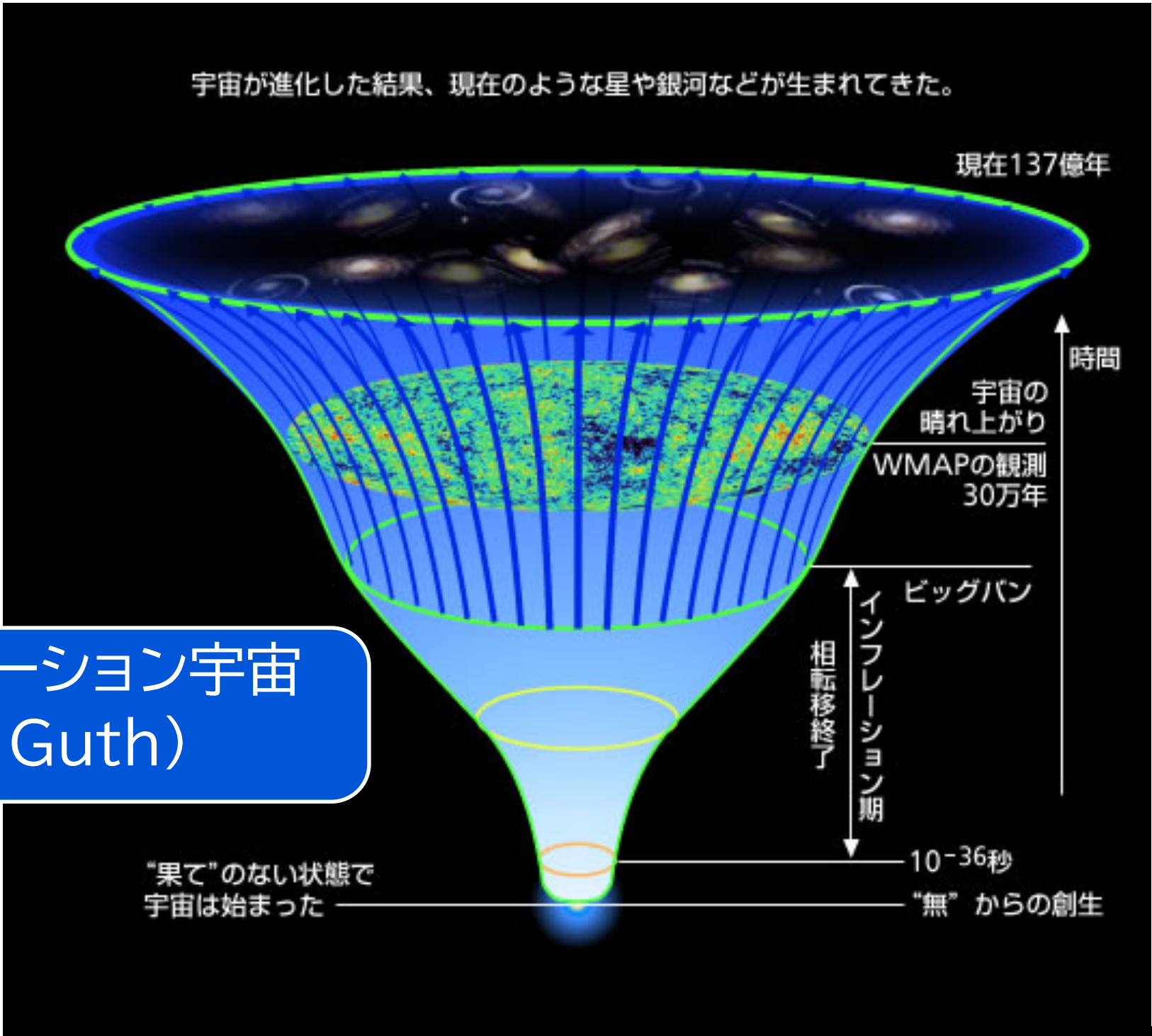
宇宙の初期に急激な膨張があった, と考える
(インフレーション宇宙モデル 1981年)



初期の宇宙は
指数関数的膨張
(佐藤勝彦)



インフレーション宇宙
(A. Guth)



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.

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

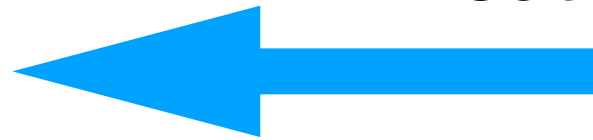
economy_Y 経済学

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

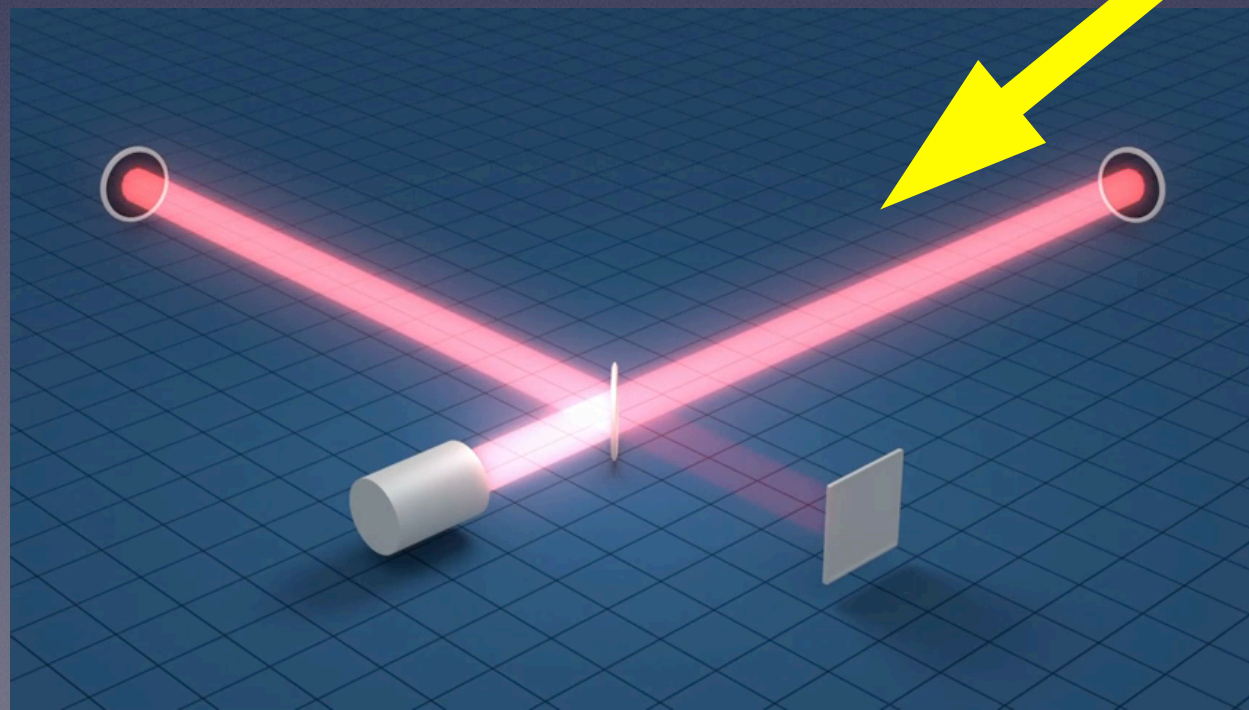
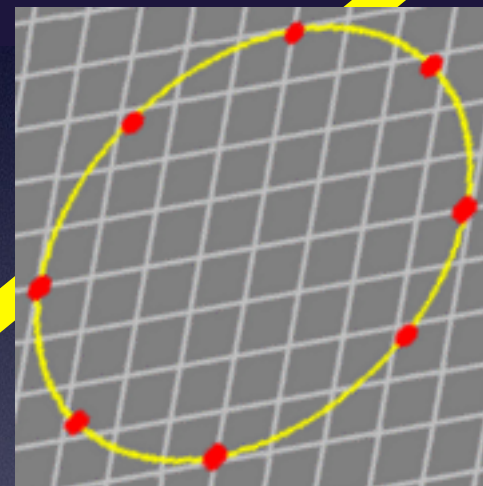
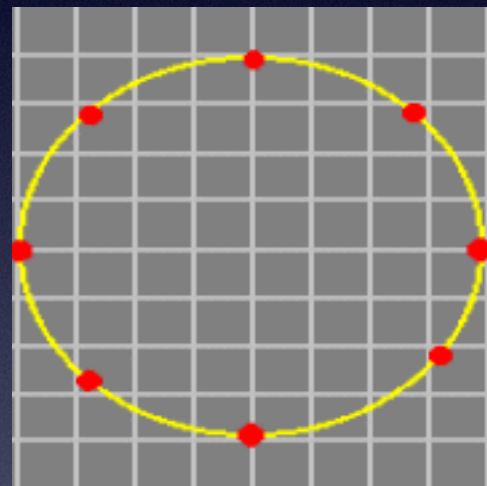
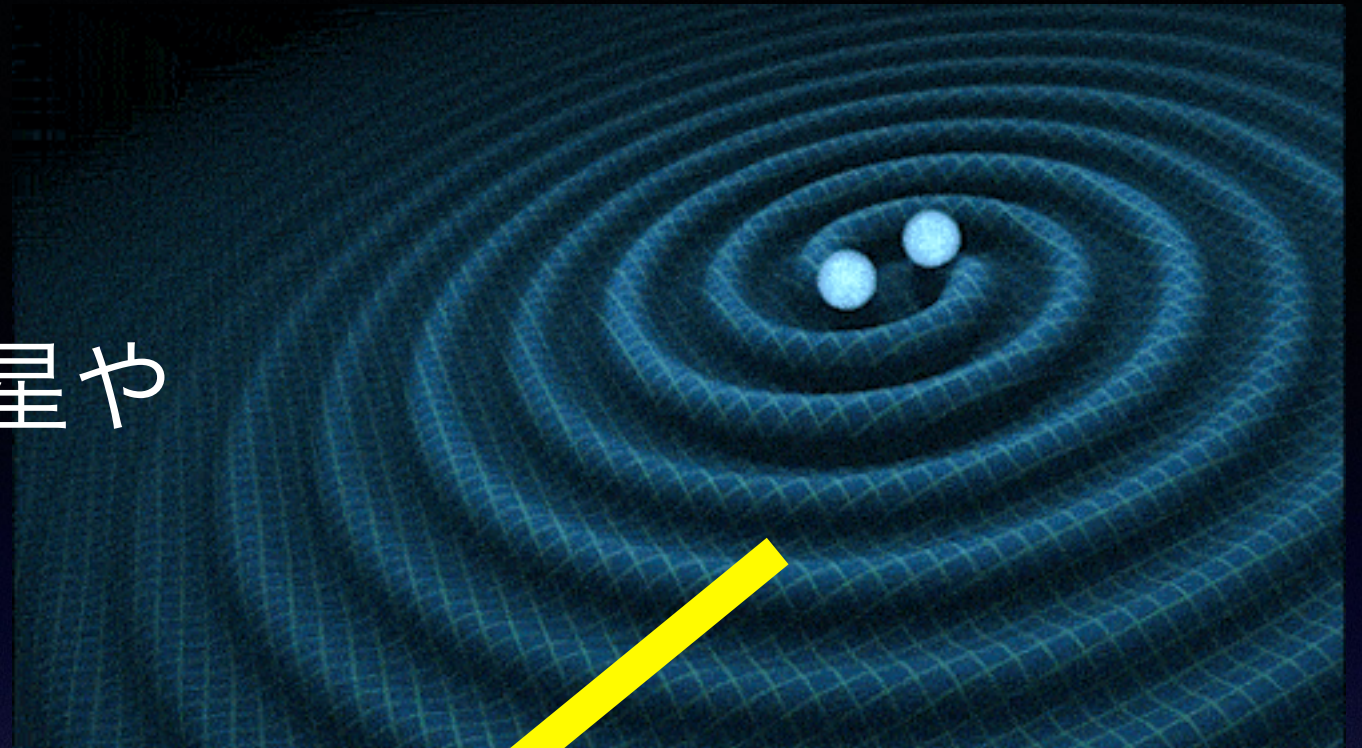
膨張宇宙

重力波

重力波の話

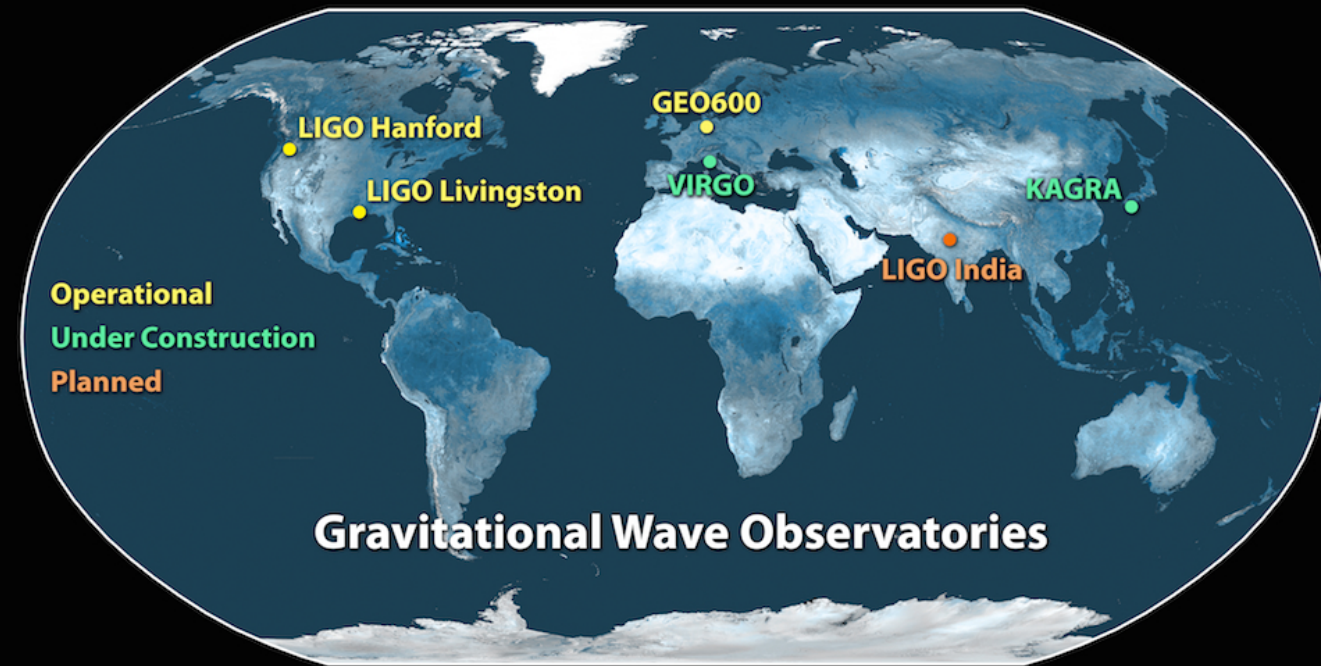
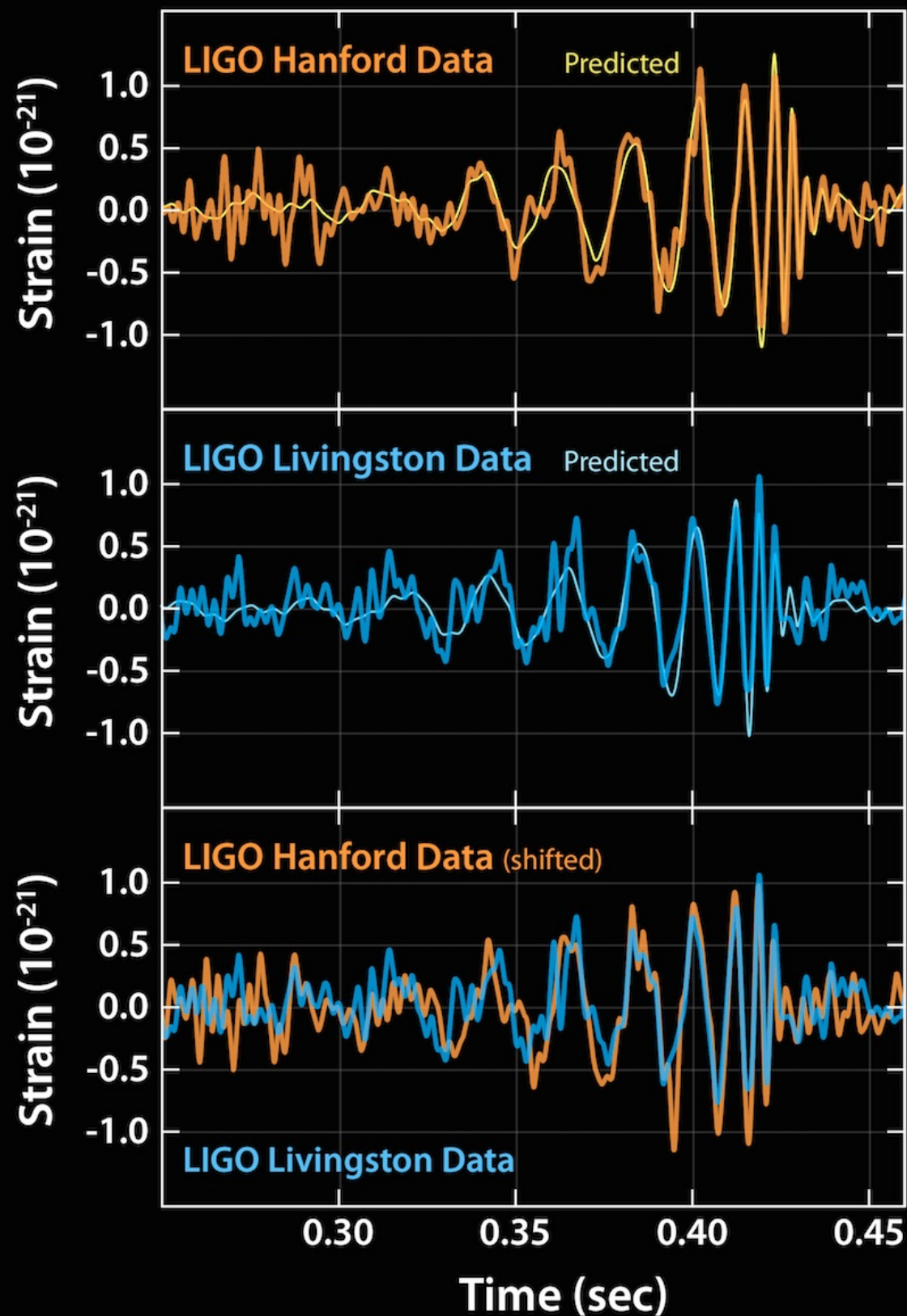
重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



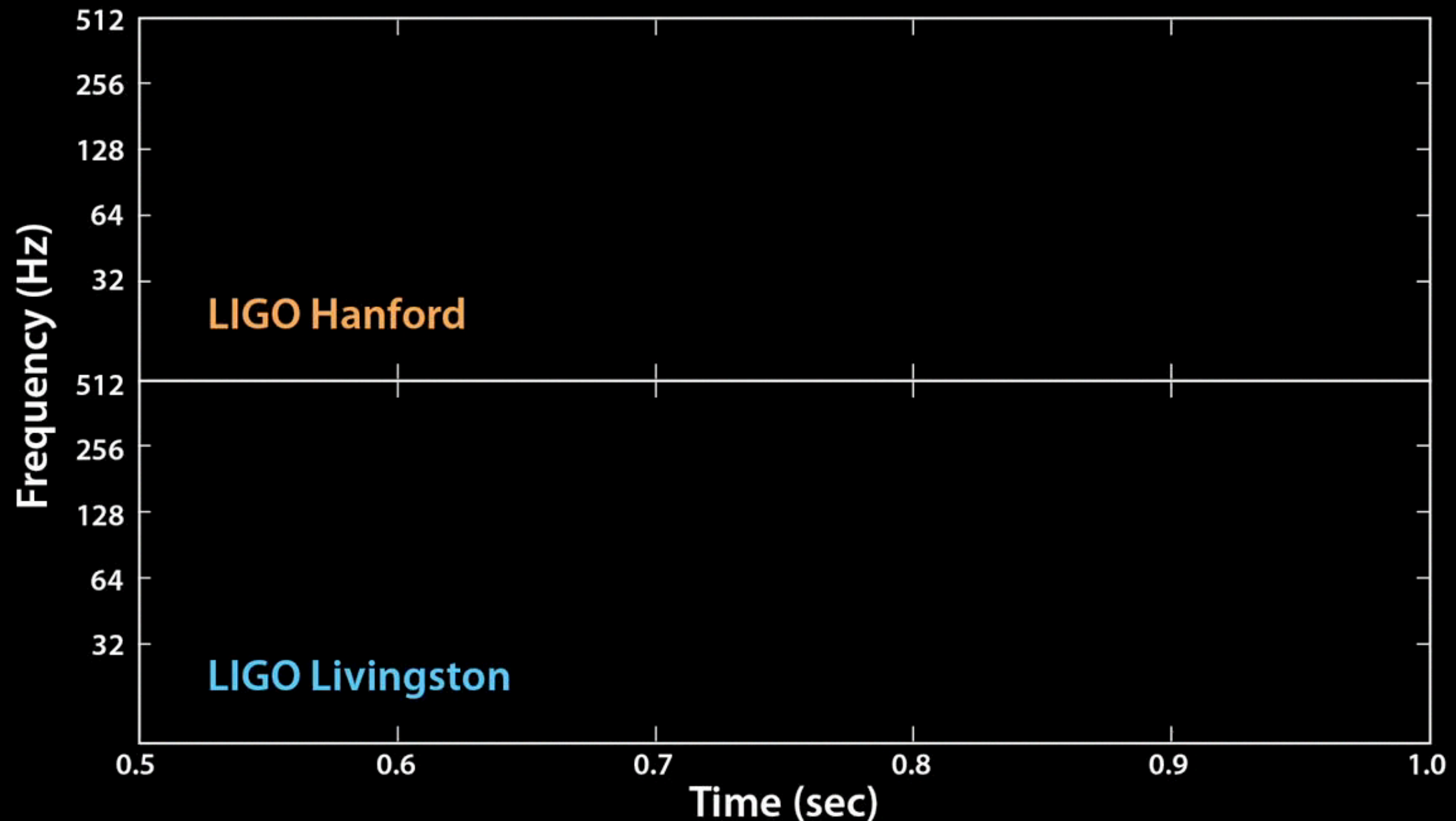
レーザー干渉計

2015年9月14日



ブラックホール連星の合体
によって生じた重力波だった

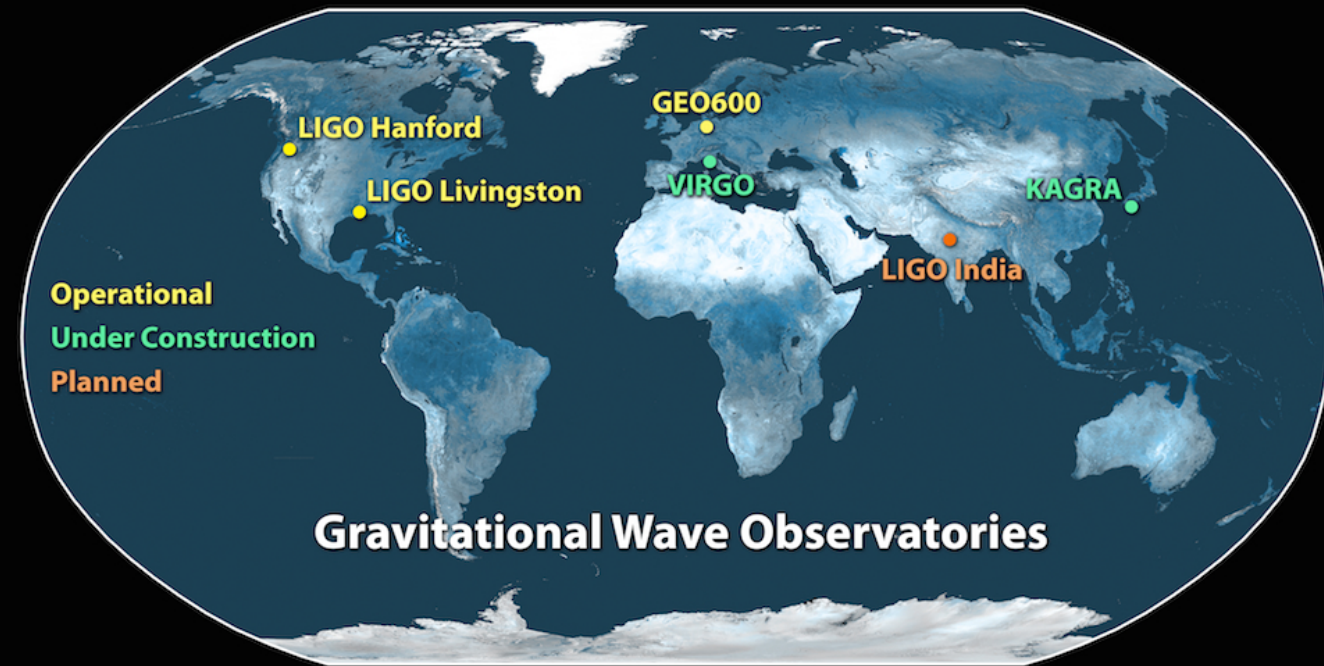
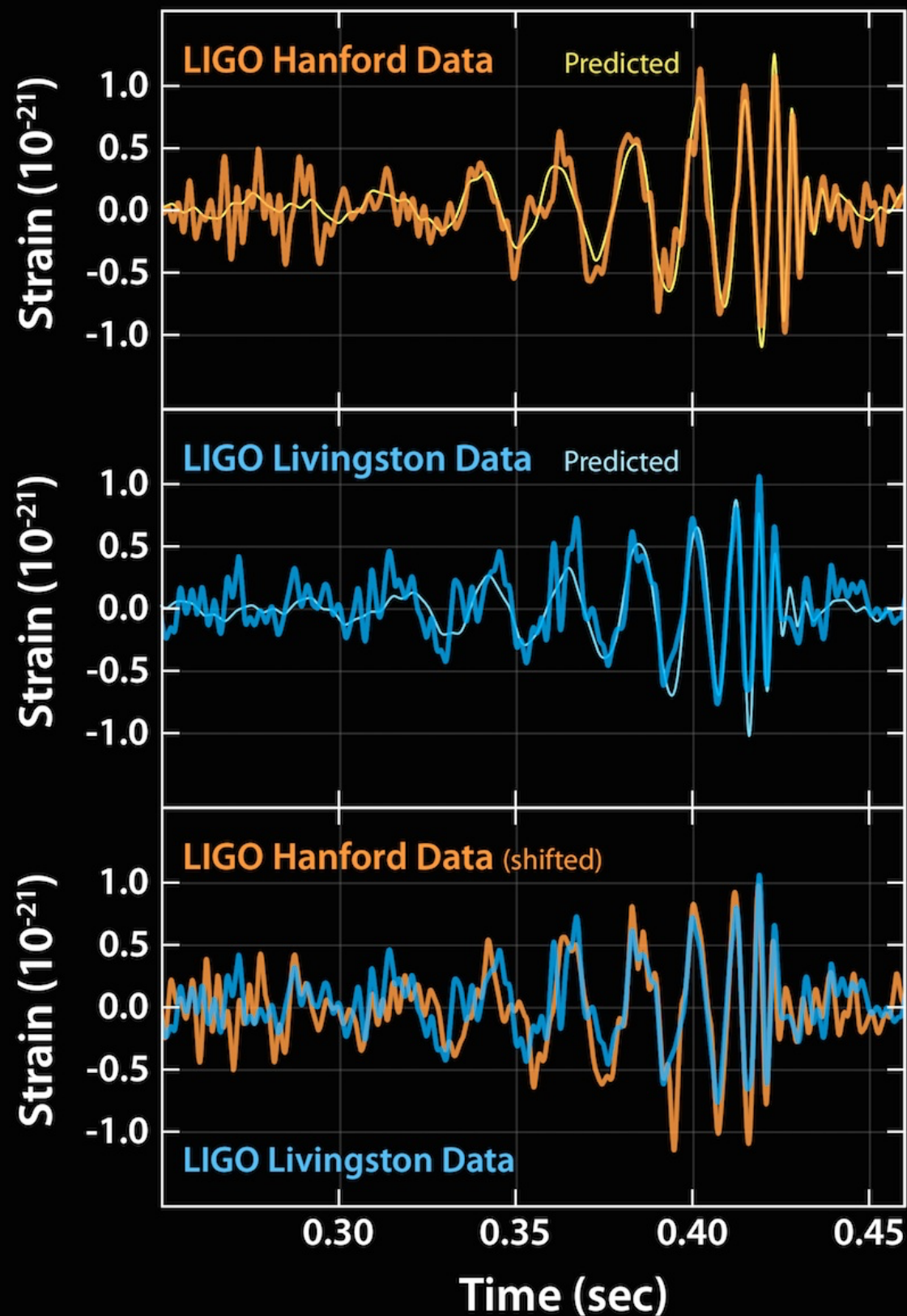
重力波波形を音にすると. . .



はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>

2015年9月14日



太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

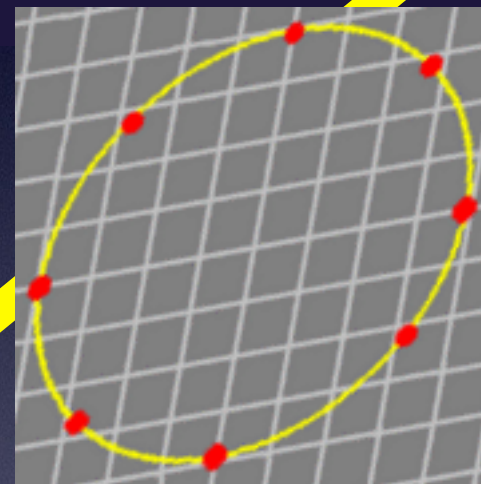
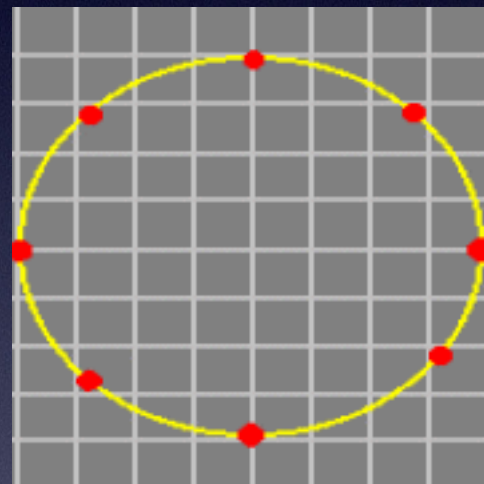
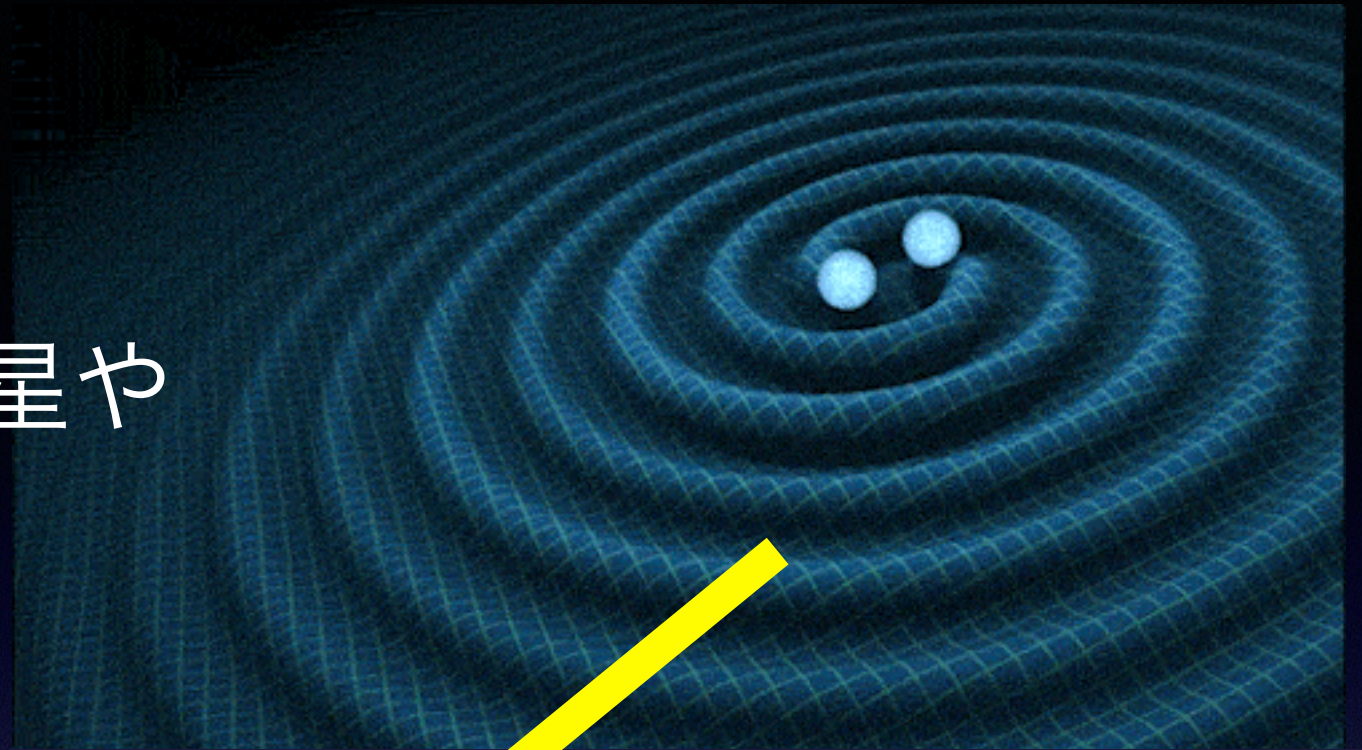
3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星

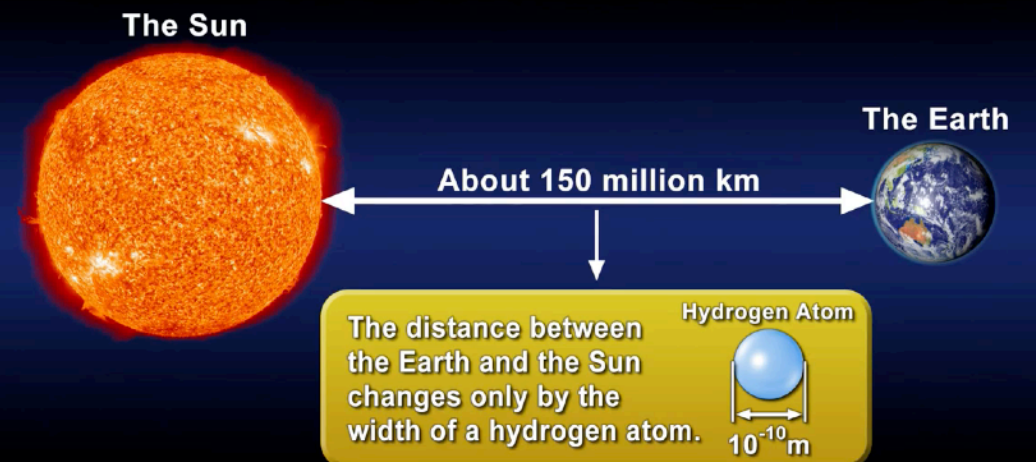


レーザー干渉計



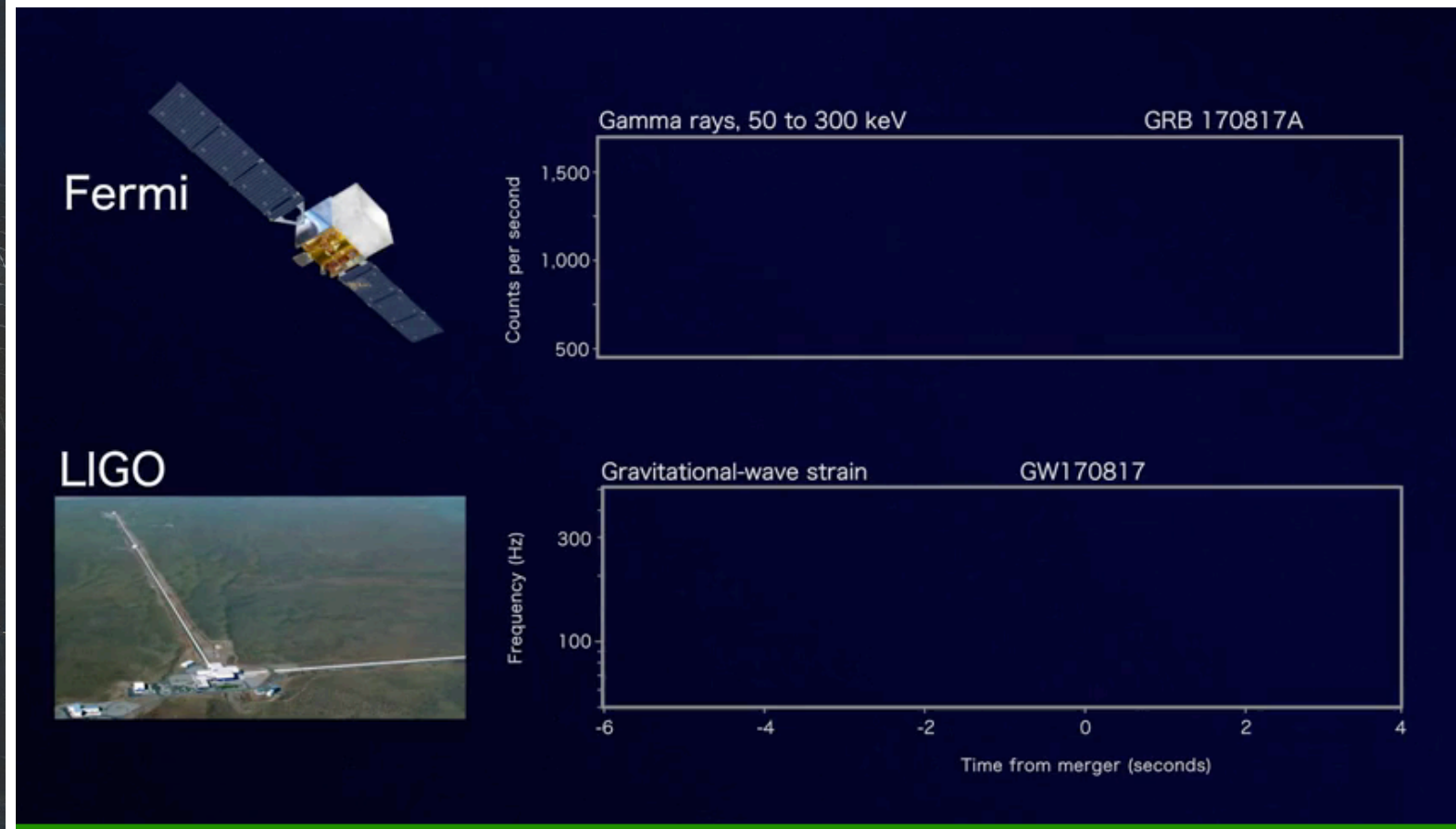
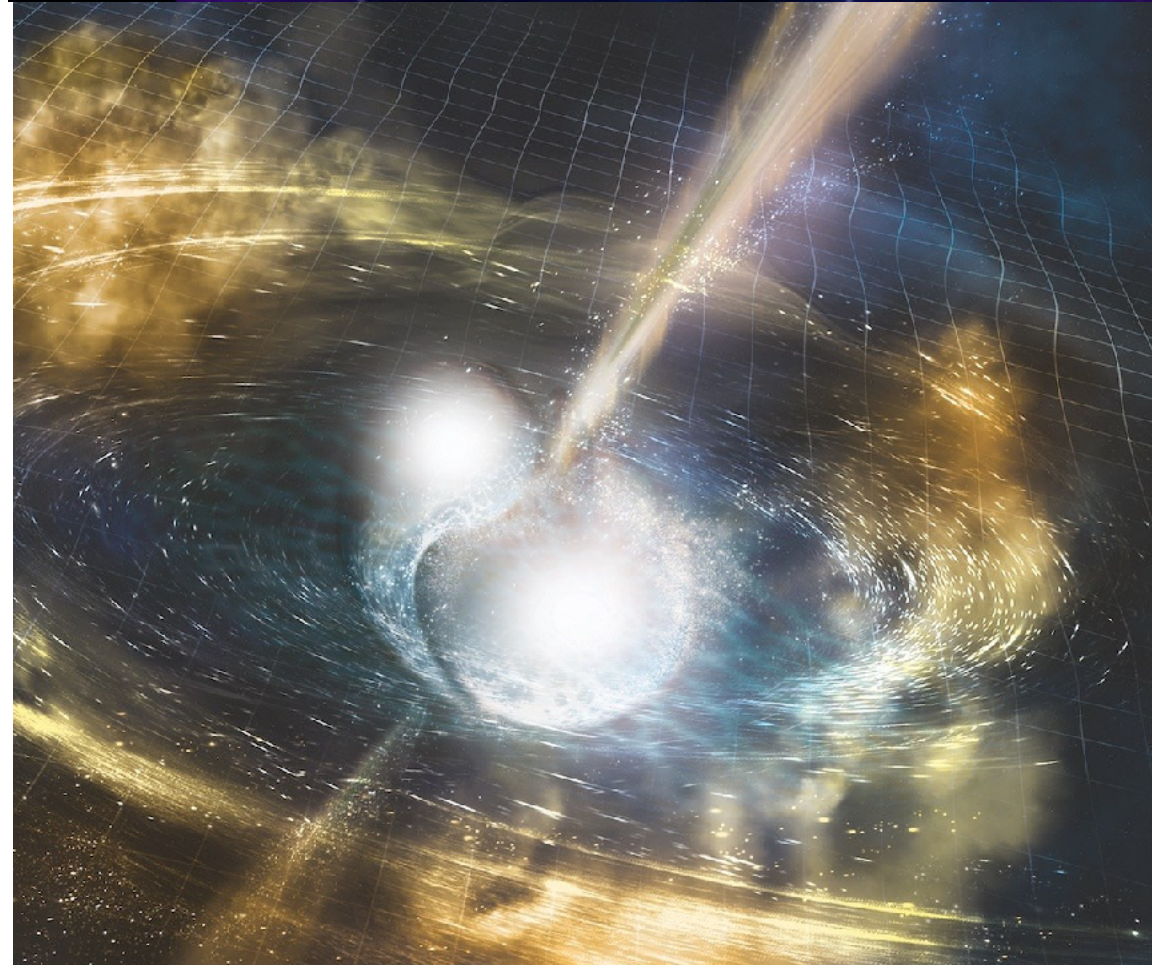
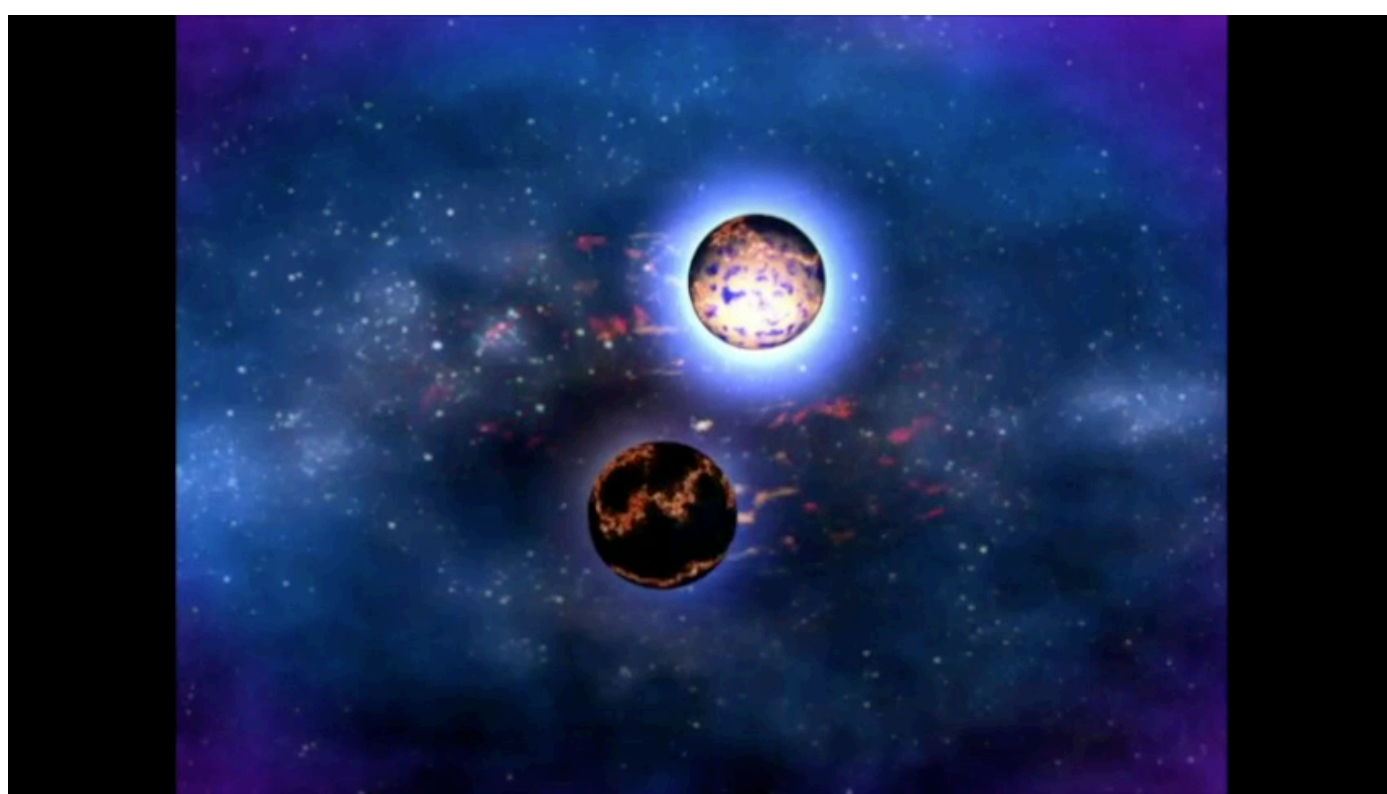
典型的な振幅は 10^{-22}

Effect of Gravitational Waves

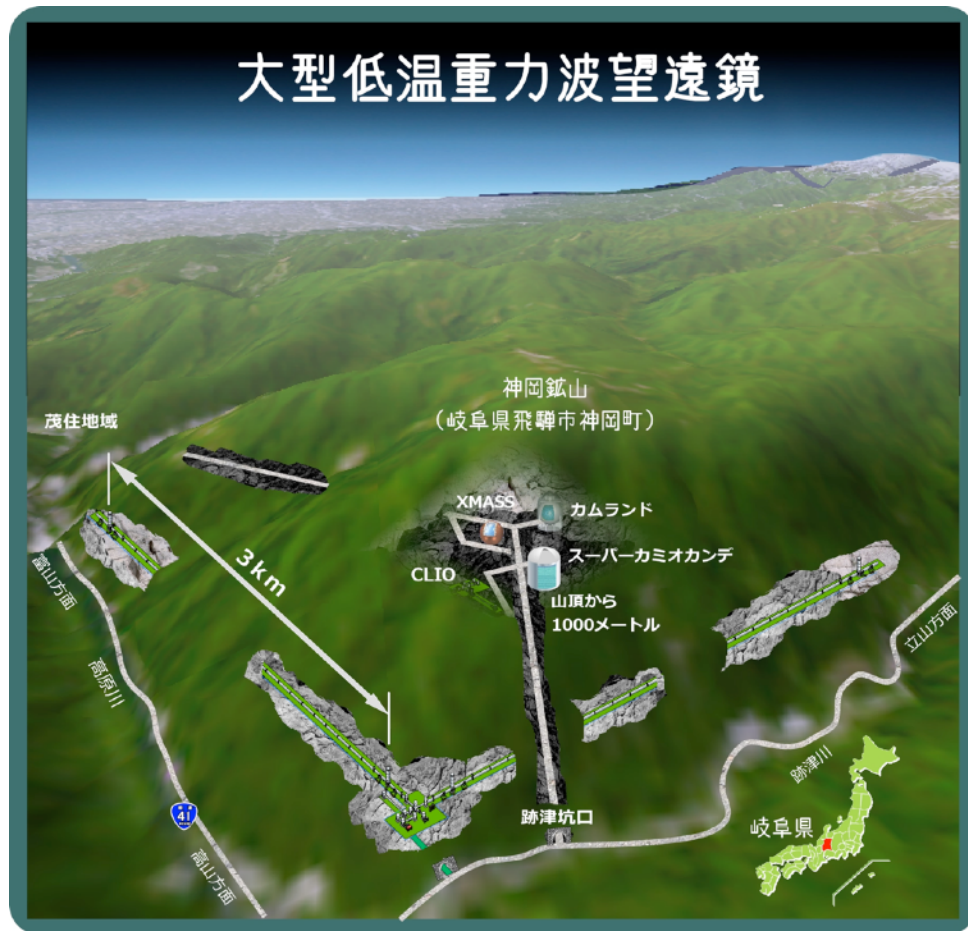


連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

