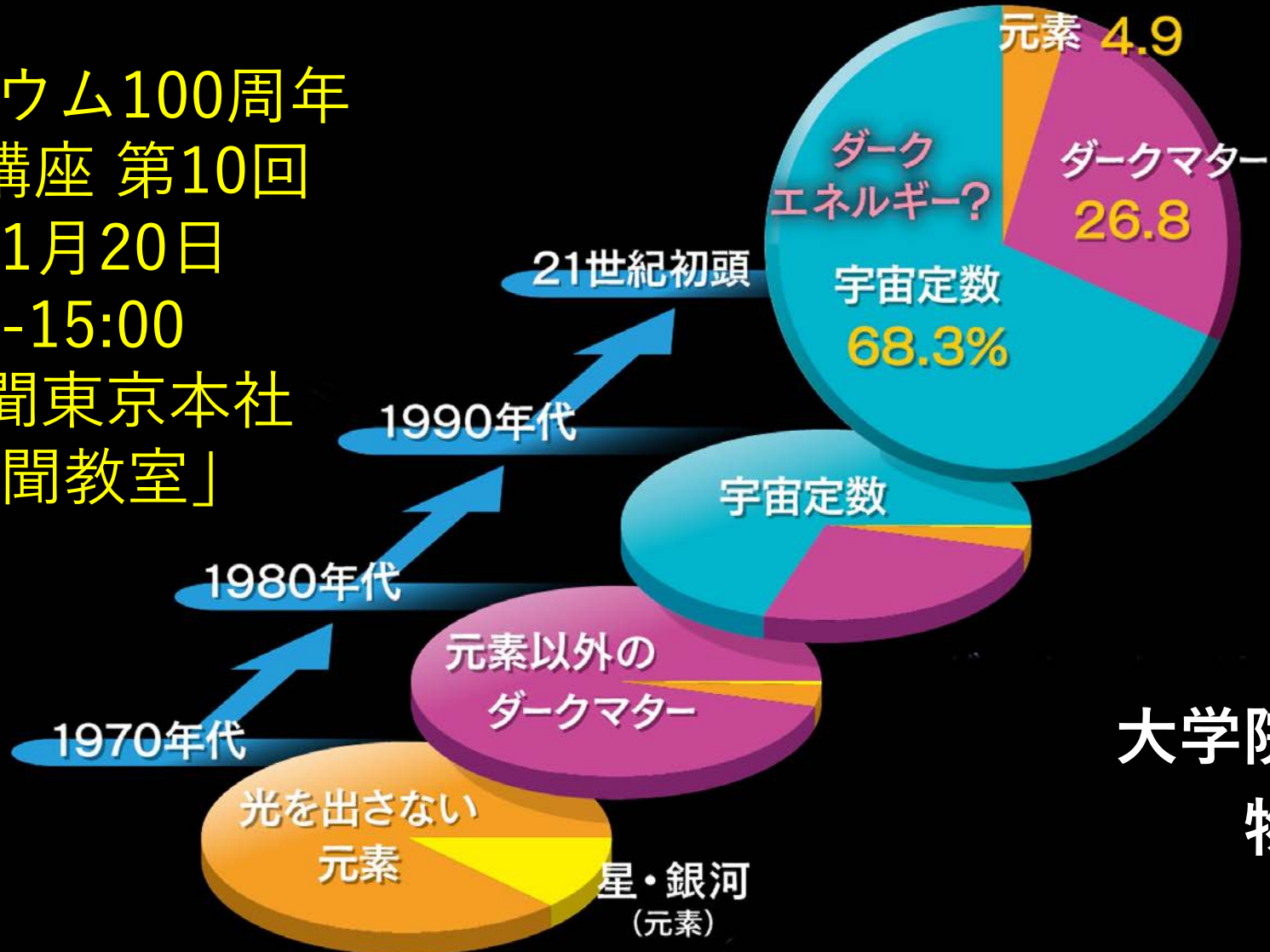


加速する宇宙と加速する宇宙論

プラネタリウム100周年
連続宇宙講座 第10回
2024年1月20日
13:30-15:00
@読売新聞東京本社
3階「新聞教室」



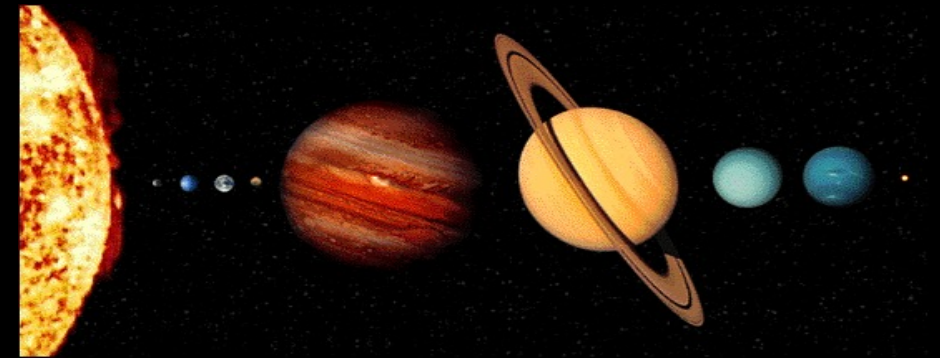
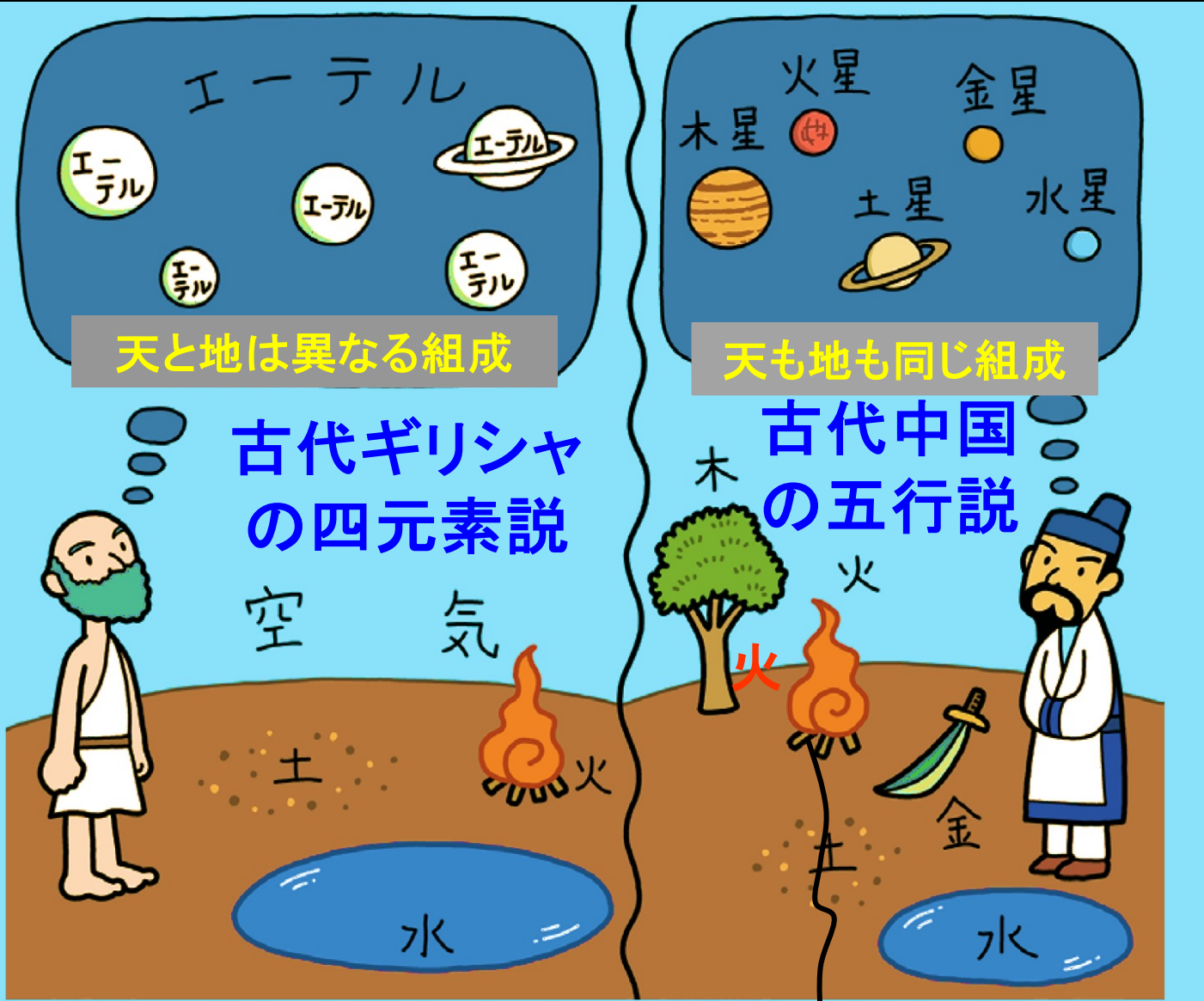
東京大学
大学院理学系研究科
物理学専攻
須藤靖

今日の話の内容

- 1 宇宙 = 天の世界 + 地の世界
- 2 宇宙膨張の発見
- 3 重力が生み出す宇宙の大構造
- 4 宇宙の加速膨張の発見
- 5 宇宙と天体と生命の共進化
- 6 まとめ：さらなる宇宙「論」の加速

1 宇宙 = 天の世界 + 地の世界

天の世界と地の世界



日月火水木金土

■ 宇宙は何によって満たされているのか

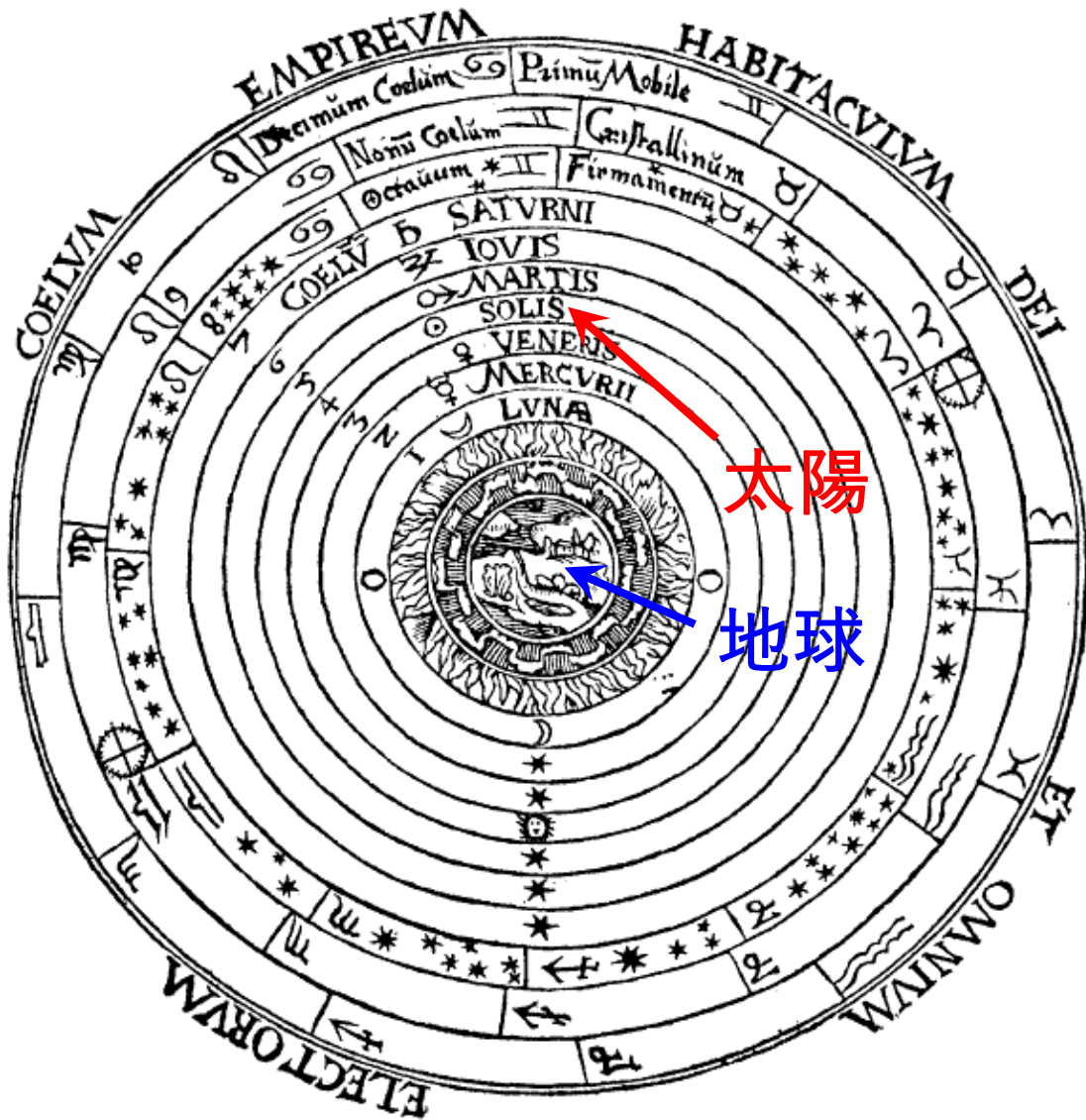
■ 五行説

- 日本の惑星と曜日名の由来
- 古代の素粒子論 かつ宇宙論

	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

(いづもりよう: 須藤靖「ものの大きさ」図1.1)

天動説 = 地球こそ世界の中心である



■ プトレマイオス

「アルマゲスト」

(紀元150年頃)

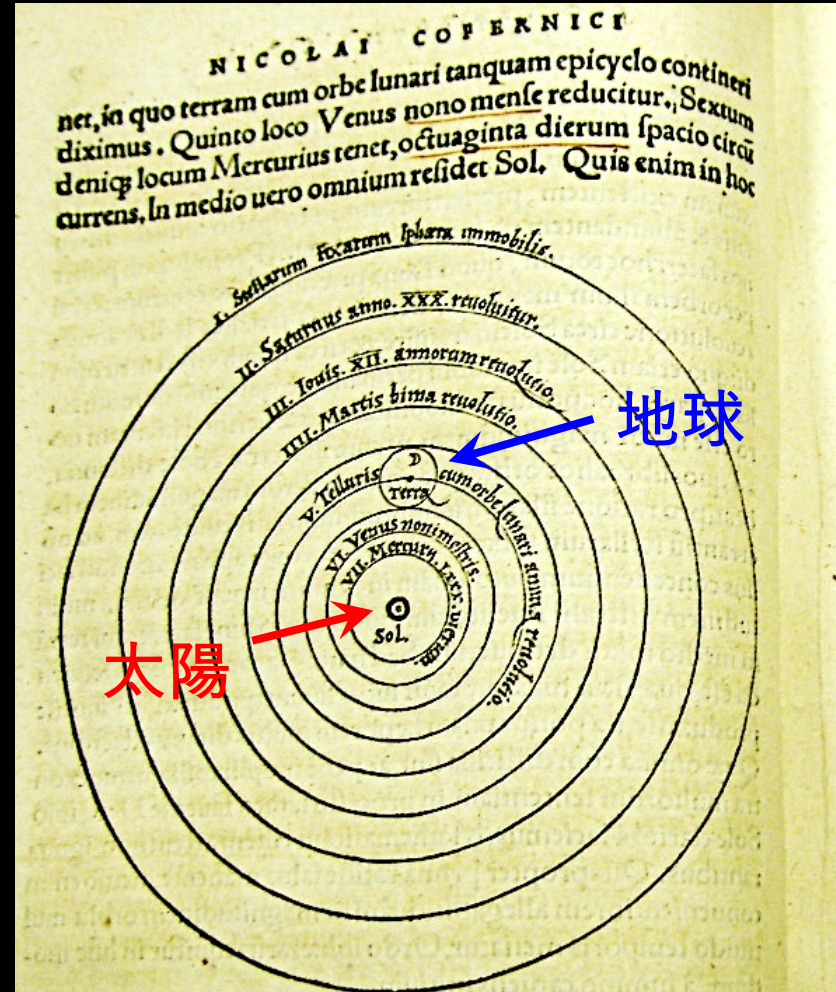
- アリストテレスに代表される古代ギリシャ天文学の集大成
- 地球中心的宇宙論
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

ペトルス・アピアヌス Cosmographia (1539年)
Wikipediaより

地動説 = 地球は世界の中心ではない! (コペルニクス 1543年)



コペルニクス(1473-1543)



天球の回転について (1543)

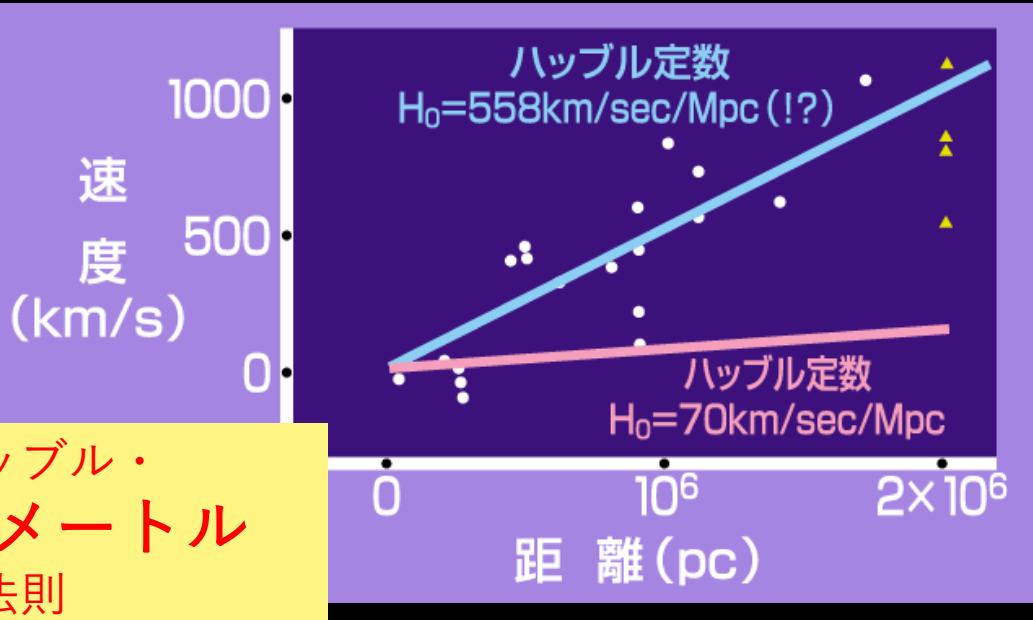


コペルニクス像@トルン (2023)

2 宇宙膨張の発見

宇宙原理 (=宇宙論的コペルニクス原理)

宇宙には中心がない = あらゆる場所が中心である



ハッブル・
ルメートル
の法則

*A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

BY EDWIN HUBBLE PNAS 15(1929)168

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-galactic nebulae have involved a K term of several hundred kilometers which appears to be variable. Explanations of this paradox have been sought in a correlation between apparent radial velocities and distances, but so far the results have not been convincing. The present paper is a revision of the question, based on only those nebular distances believed to be fairly reliable.

UN UNIVERS HOMOGENE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,
RENDANT COMPTE
DE LA VITESSE RADIALE DES NEBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

1. GÉNÉRALITÉS.

Annales Soc. Sci. Bruxelles A47(1927)49

La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon R de l'espace est constant, l'espace est elliptique de

- ハッブルは1929年、宇宙に対する太陽系の運動を決めようとした（自分の発見の宇宙論的意味をよく理解していない！）
- ルメートルは、1927年のフランス語論文で一般相対論的膨張宇宙の文脈で遠方天体の速度距離関係を発見し発表済み

ルメートルのフランス語論文中、英訳版では削除されている箇所

- 555 -

période de la lumière reçue et δt_1 peut encore être considéré comme la période d'une lumière émise dans les mêmes conditions dans le voisinage de l'observateur. En effet, la période de la lumière émise dans des conditions physiques semblables doit être partout la même lorsqu'elle est exprimée en temps propre.

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (22)$$

mesure donc l'effet Doppler apparent dû à la variation du rayon de l'univers. Il est égal à l'excès sur l'unité du rapport des rayons de l'univers à l'instant où la lumière est reçue et à l'instant où elle est émise. v est la vitesse de l'observateur qui produirait le même effet. Lorsque la source est suffisamment proche nous pouvons écrire approximativement

$$\frac{v}{c} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{dR}{R} = \frac{R'}{R} dt = \frac{R'}{R} r$$

où r est la distance de la source. Nous avons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{r}{cr} \quad (23)$$

Les vitesses radiales de 43 nébuleuses extra-galactiques sont données par Strömberg⁽¹⁾.

La grandeur apparente m de ces nébuleuses se trouve dans le travail de Hubble. Il est possible d'en déduire leur distance, car Hubble a montré que les nébuleuses extra-galactiques sont de grandeurs absolues sensiblement égales (grandeur - 15,2 à 10 parsecs, les écarts individuels pouvant atteindre deux grandeurs en plus ou en moins), la distance r exprimée en parsecs est alors donnée par la formule $\log r = 0,2m + 4,04$.

On trouve une distance de l'ordre de 10^6 parsecs, variant de quelques dixièmes à 3,3 millions de parsecs. L'erreur probable résultant de la dispersion en grandeur absolue est d'ailleurs considérable. Pour une différence de grandeur absolue de deux grandeurs en plus ou en moins, la distance passe de 0,4 à 2,5 fois la distance calculée. De plus, l'erreur à craindre est proportionnelle à la distance. On peut admettre que pour une distance d'un million de parsecs, l'erreur résultant de la dispersion en grandeur est du même ordre que celle résultant de la dispersion en vitesse. En effet, une différence d'éclat d'une grandeur correspond à une vitesse propre de 300 Km. égale à la vitesse propre du soleil par rapport aux nébuleuses. On peut espérer éviter une erreur systématique en donnant aux observations un poids proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$ où r est la distance en millions de parsecs.

(1) Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebulae. Ap. J. Vol. 61, p. 353, 1925. M^c Wilson Contr. N° 292.

- 56 -

Utilisant les 42 nébuleuses figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg⁽¹⁾, et tenant compte de la vitesse propre du soleil (300 Km. dans la direction $\alpha = 315^\circ$, $\delta = 62^\circ$), on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 Km./sec, soit 625 Km./sec à 10^6 parsecs⁽²⁾.

Nous adopterons donc

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}} = 0,68 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-1} \quad (24)$$

Cette relation nous permet de calculer R_0 . Nous avons en effet par (16)

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{R_0 \sqrt{3}} \sqrt{1 - 3y^2 + 2y^3} \quad (25)$$

où nous avons posé

$$y = \frac{R_0}{R} \quad (26)$$

D'autre part, d'après (18) et (26),

$$R_0^2 = R_E^2 y^3 \quad (27)$$

et donc

$$3 \left(\frac{R'}{R} \right)^2 R_E^2 = \frac{1 - 3y^2 + 2y^3}{y^3} \quad (28)$$

Introduisant les valeurs numériques de $\frac{R'}{R}$ (24) et de R_E (19), il vient :

$$y = 0,0465.$$

On a alors :

$$R = R_E \sqrt{y} = 0,215 R_E = 1,83 \times 10^{28} \text{ cm.} = 6 \times 10^9 \text{ parsecs}$$

$$R_0 = R y = R_E y^{\frac{3}{2}} = 8,5 \times 10^{26} \text{ cm.} = 2,7 \times 10^8 \text{ parsecs} \\ = 9 \times 10^8 \text{ années de lumière.}$$

(1) Il n'est pas tenu compte de N. G. C. 5194 qui est associé à N. G. C. 5195. L'introduction des nuées de Magellan serait sans influence sur le résultat.

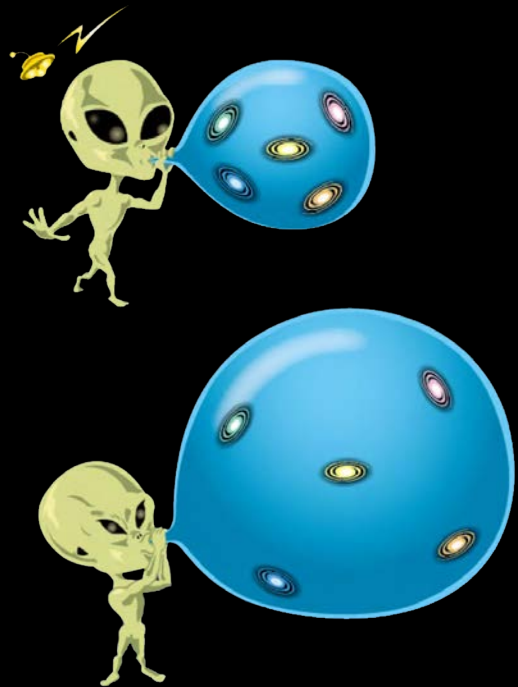
(2) En ne donnant pas de poids aux observations, on trouverait 670 Km./sec à $1,16 \times 10^6$ parsecs, 575 Km./sec à 10^6 parsecs. Certains auteurs ont cherché à mettre en évidence la relation entre v et r et n'ont obtenu qu'une très faible corrélation entre ces deux grandeurs. L'erreur dans la détermination des distances individuelles est du même ordre de grandeur que l'intervalle que couvrent les observations et la vitesse propre des nébuleuses (en toute direction) est grande (300 Km./sec. d'après Strömberg), il semble donc que ces résultats négatifs ne sont ni pour ni contre l'interprétation relativistique de l'effet Doppler. Tout ce que l'imprécision des observations permet de faire est de supposer v proportionnel à r et d'essayer d'éviter une erreur systématique dans la détermination du rapport v/r . Cf. LUNDMARK. The determination of the curvature of space time in de Sitter's world M. N., vol. 84, p. 747, 1924. et STRÖMBERG, l. c.

宇宙は膨張している=ハッブル・ルメートルの法則

- ルメートルがハッブル以前に「ハッブル」の法則を発見していたことが、2012年頃に天文学者の間で話題となった
 - 須藤 靖「ハッブルかルメートルか: 宇宙膨張発見史をめぐる謎」
日本物理学会誌 67 (2012) 311
- 2018年の国際天文連合総会@ウィーンで、ハッブルの法則を「ハッブル・ルメートル」の法則と呼ぶことを推奨する決議が、賛成78%、反対20%、留保2%で可決
- しかし、フランス語原論文(1927)にあった速度距離関係に関する記述を、ルメートルが自ら1931年の英訳版で削除した理由は不明のまま

宇宙膨張に関する誤解 (1)

宇宙膨張をわかりやすく説明する目的で頻繁に用いられるゴム風船の表面のたとえの功罪

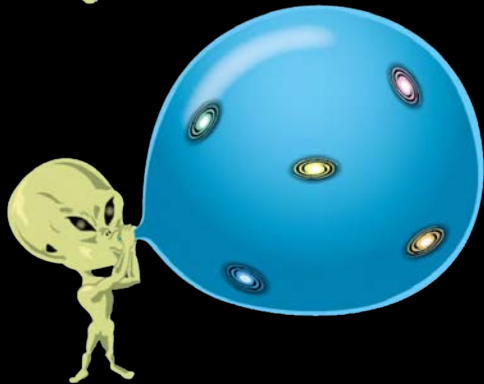


- この風船（宇宙）から受ける印象
 - 宇宙には中心がある
 - 宇宙はその中心に対して膨張する
 - 宇宙には果てがあり、体積は有限
 - 宇宙の外側にも空間は広がっている
- これらはすべて誤解！

宇宙膨張に関する誤解 (2)

風船 = 宇宙空間が2次元面の単純化された場合

風船の表面以外の場所を考えてはいけない！

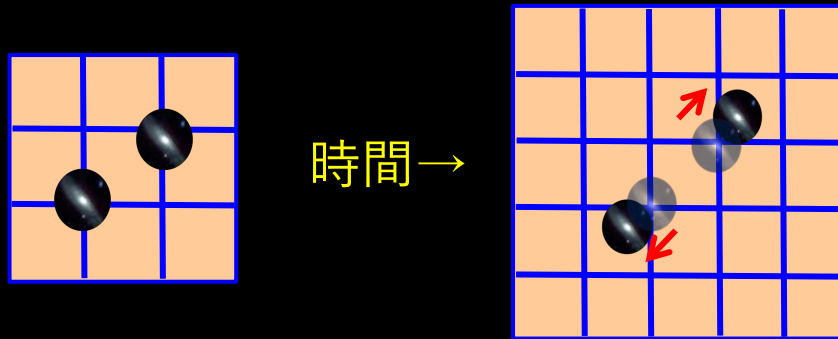


- この風船の2次元表面 (=宇宙)に住んでいる人にとっては
 - 宇宙には中心はない
 - 宇宙は全方向に等しく膨張している
 - 宇宙には果て(空間的な境界)はない
 - 体積 (=表面積) が有限に見えるのはこのたとえの限界に過ぎず、実際には無限であってよい
 - この表面以外の場所はない

宇宙膨張に関する誤解 (3)

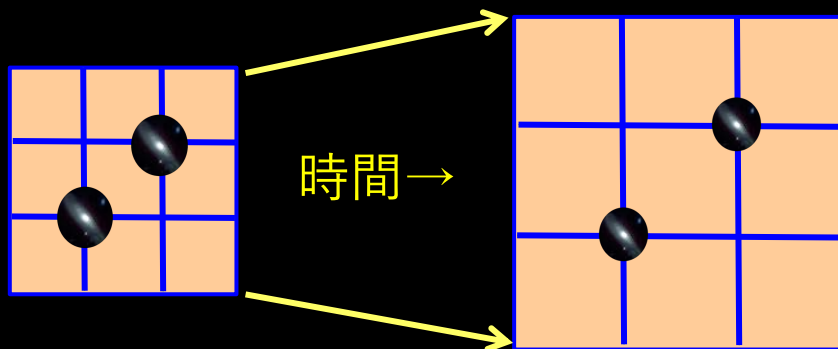
宇宙そのものの膨張と 宇宙のなかの天体の運動とは違う

- 固定された空間（座標）内の天体の相対的距離変化（=**天体の運動**）



天体同士の相対速度は光速を超えてはならない

- 拡大する空間（座標）に貼付いた天体間の距離変化（=**宇宙膨張**）



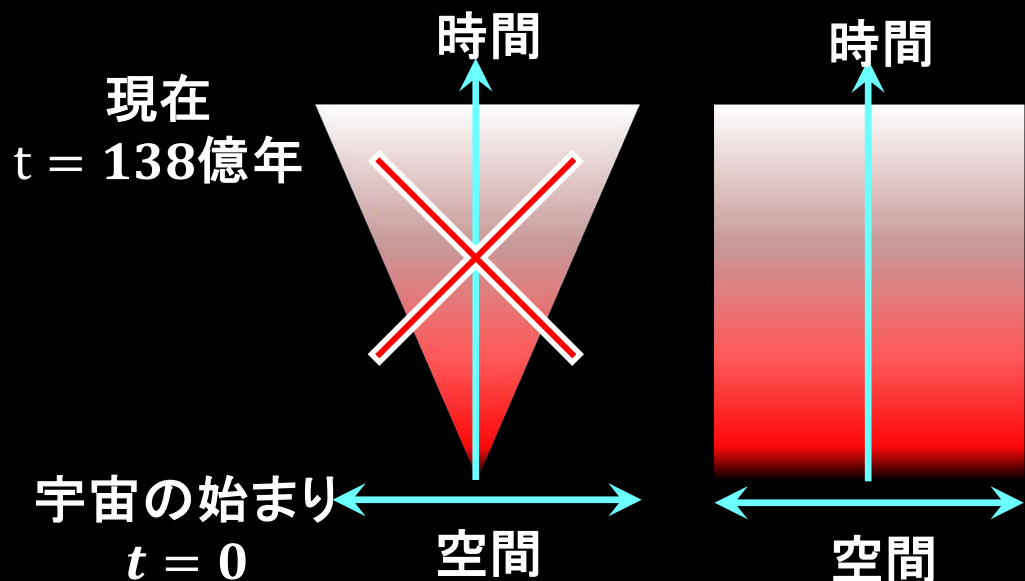
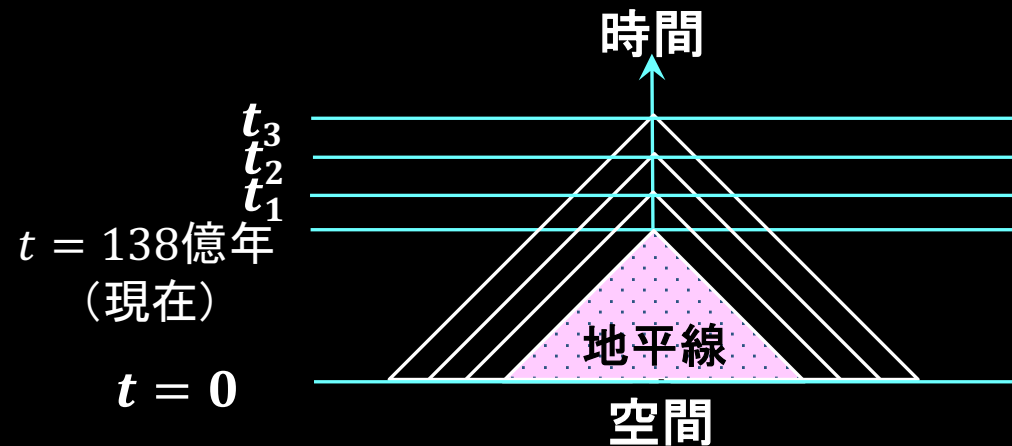
宇宙膨張そのものは情報を伝達しないので、その見かけの速度は光速を超えてもよい

基本的には、膨張する宇宙の中で天体は動いておらず静止している

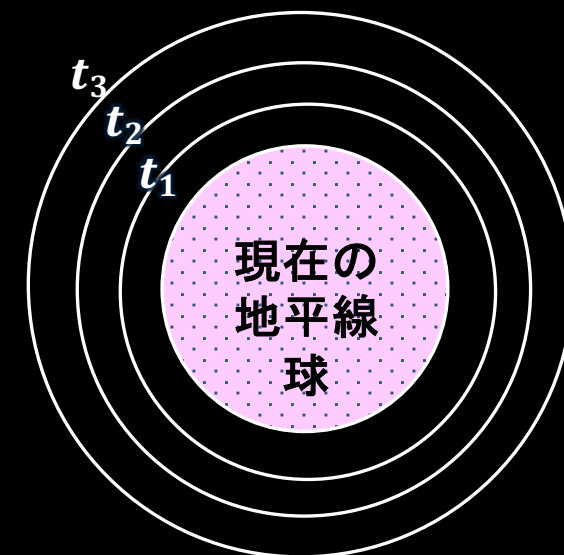
ビッグバン＝宇宙初期の高温高密度「状態」 宇宙のなかで起こった大爆発「現象」ではない！

■ 宇宙の地平線

- 誕生直後の宇宙は点ではなくむしろほぼ無限に広がっていると考えるべき



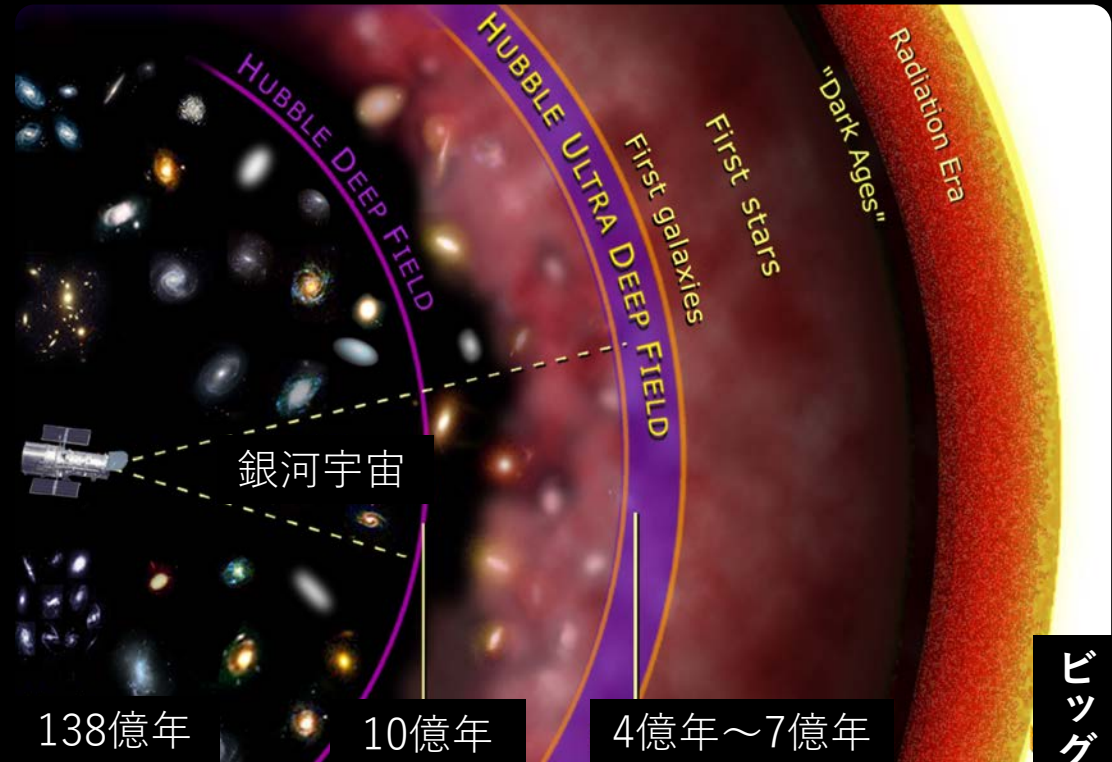
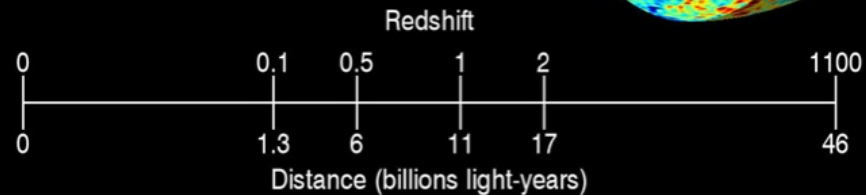
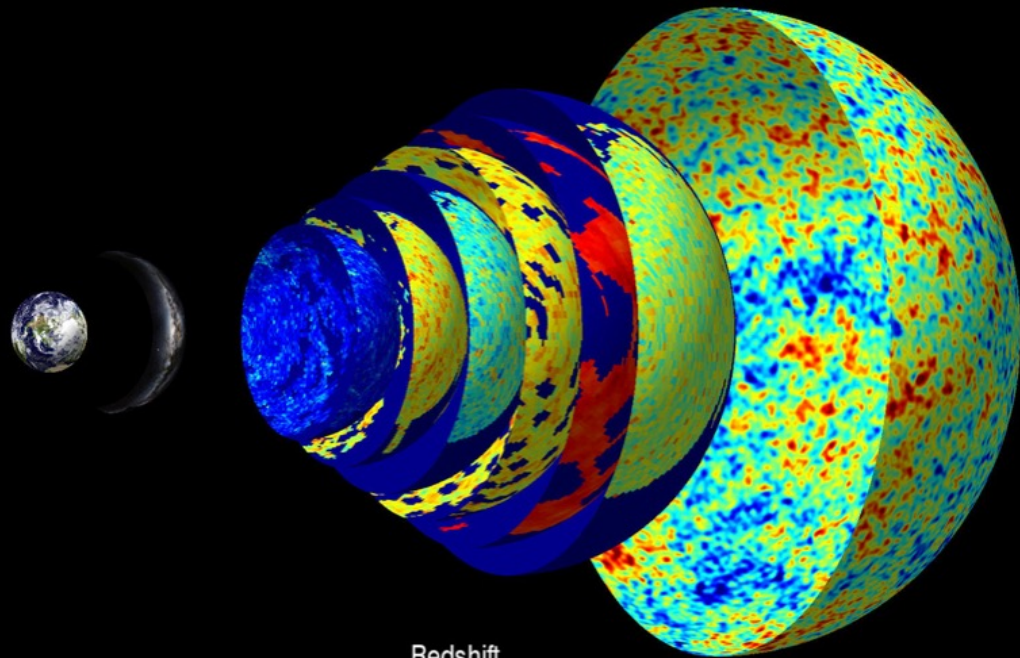
宇宙の地平線の半径は時間とともに増大
⇒ 高い山に登るとより遠くの平地が見えてくるのと同じ



3 重力が生み出す宇宙の大構造

遠くの宇宙には宇宙進化史が刻まれている

光の速度は有限なので現在観測される遠くの宇宙は過去の宇宙
(宇宙論は考古学)



138億年

10億年

4億年～7億年

現在

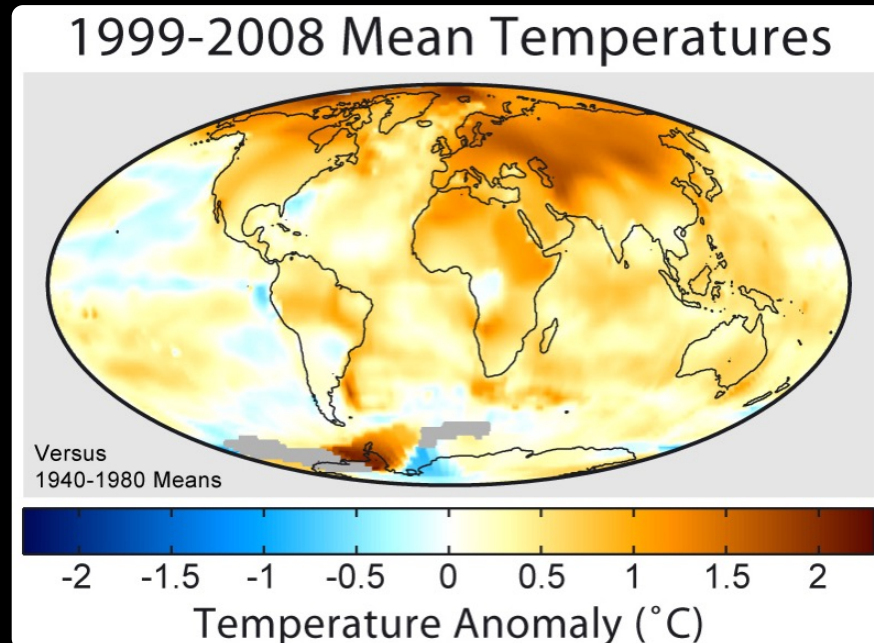
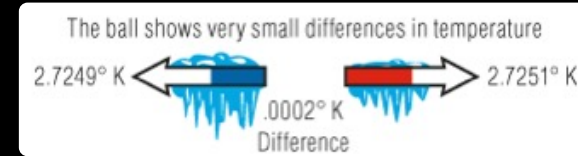
← 時間

過去 (= 遠方)

ビッグバン

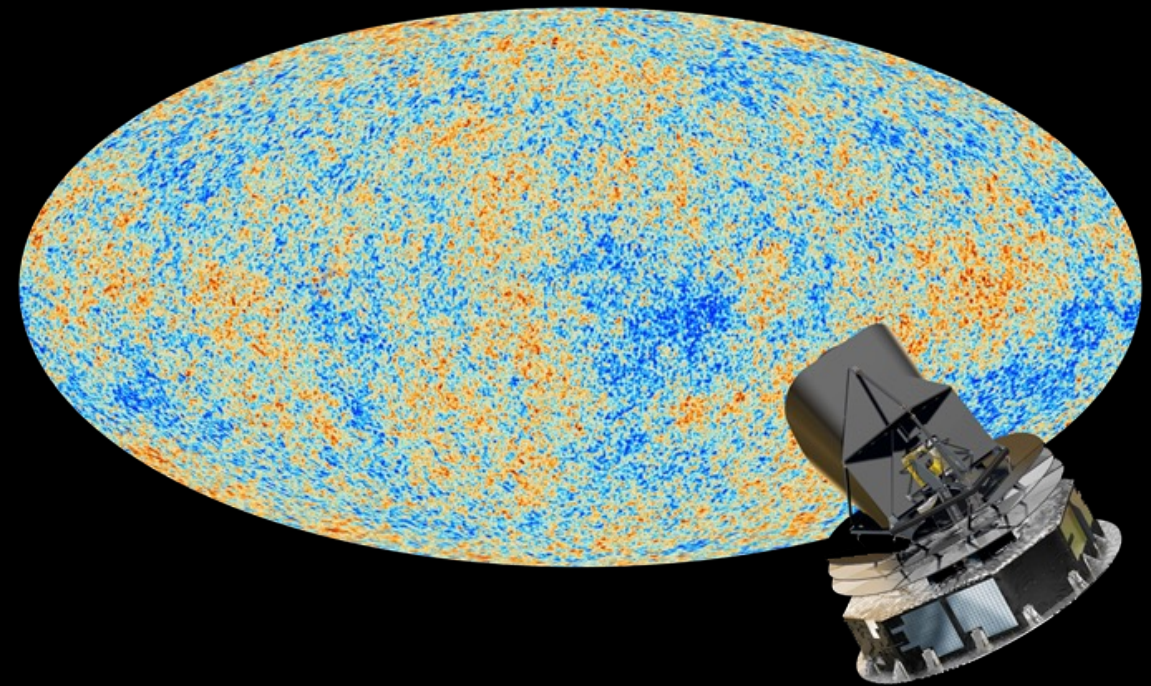
宇宙を満たすビッグバンの残光（光の化石） 宇宙マイクロ波背景輻射温度地図

宇宙は高い精度で一様かつ等方である



Robert A. Rohde

地球の温暖化を表す温度地図

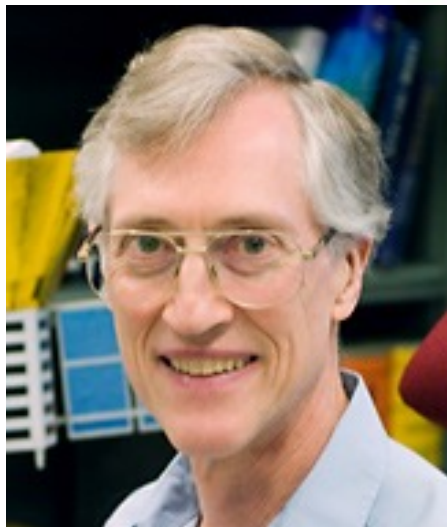


ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros

プランク衛星のデータ(2013)

2006年ノーベル物理学賞

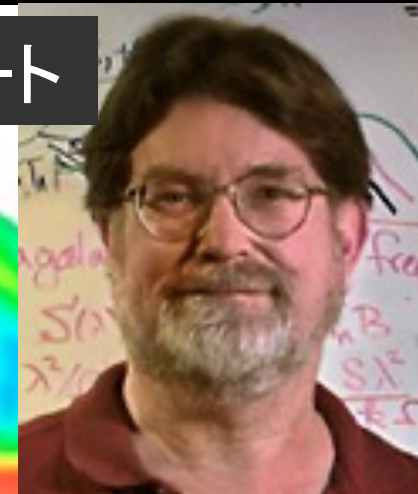
COBE衛星による宇宙マイクロ波背景輻射温度ゆらぎの発見



ジョン・マザー



ジョージ・スムート



COBE

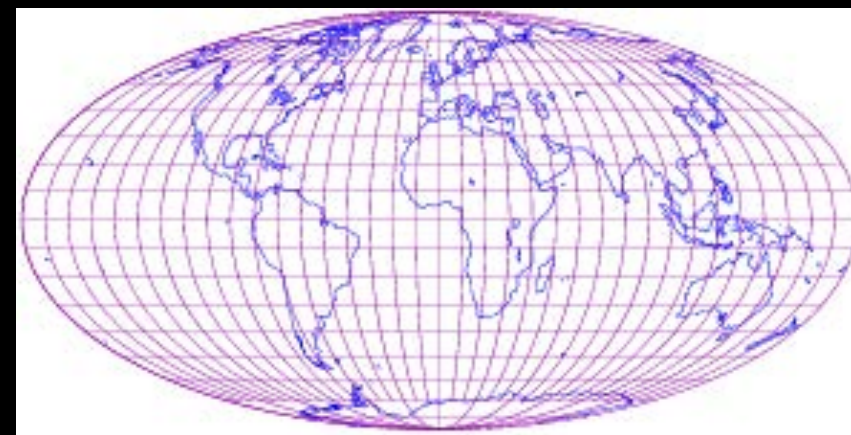
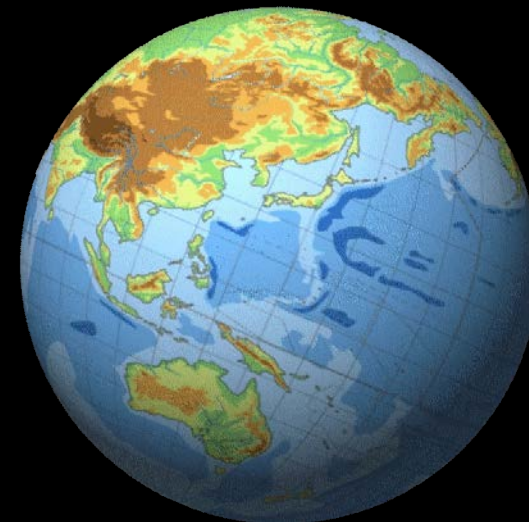
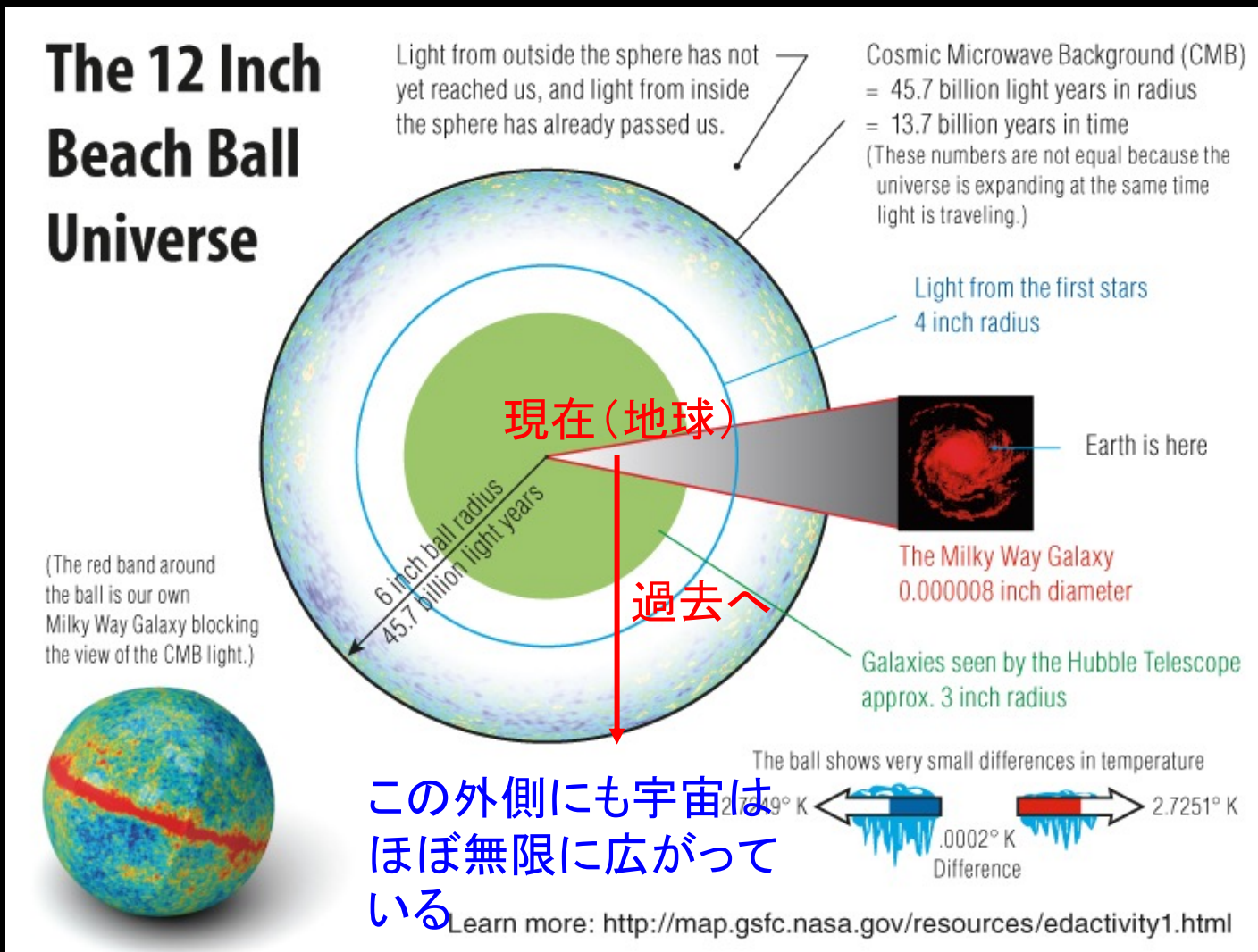
Cosmic Background Explorer



電磁波で現在観測できる宇宙の果て

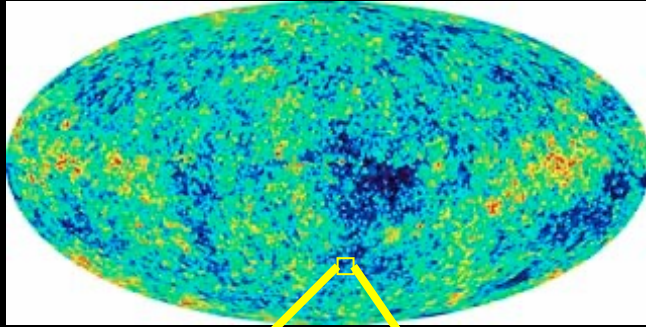
宇宙マイクロ波背景輻射 = ビッグバン時の光の化石

地球から天球面での温度地図を逆転させて表現した天球儀

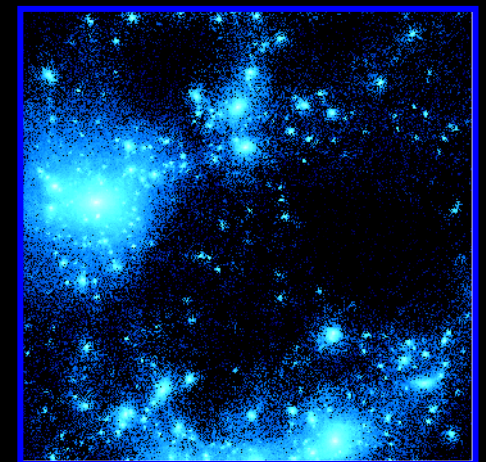
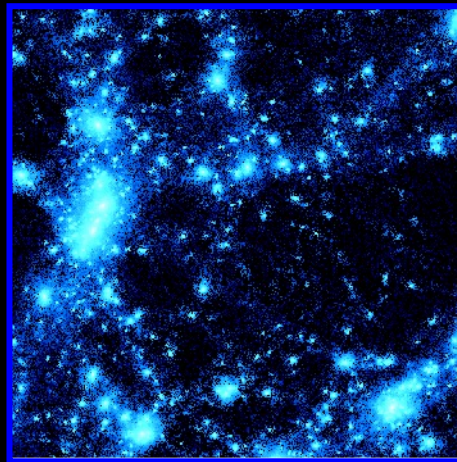
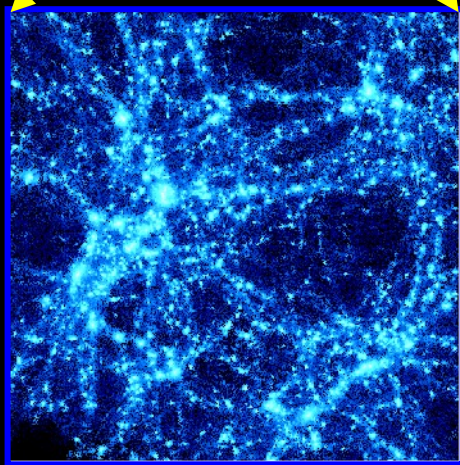


宇宙における銀河・星・惑星の形成と進化

宇宙初期の空間ゆらぎ



- はじめに小さな構造が形成され、時間とともにより大きなスケールの構造へ進化する
- 小さな天体の中で時間をかけてより複雑な構造（生物！）が誕生する
- 天体のみならず生物もまたゆらぎから生まれた



万有引力(重力)によってでこぼこ度合いがどんどん成長する

天体の形成：ゆらぎと重力とダークマター



宇宙の
構造形成
シミュレーション

吉川 耕司
樽家 篤史
景 益鵬
須藤 靖

- 初期宇宙に存在した空間的密度のゆらぎが、宇宙の膨張とともに成長し現在の宇宙を満たす多様な天体諸階層を生み出した
- 天体は重力によって成長、重力を支配するのはダークマター

4 宇宙の加速膨張の発見

≡ 宇宙を満たす主成分が宇宙定数
(ダークエネルギー) であることの発見？

あるいは一般相対論が厳密には正しくない？

2011年 ノーベル物理学賞

■ **Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess**

- 1998年に、遠方の超新星の観測を通じて、宇宙の膨張が加速していることを発見（≠宇宙定数あるいはダークエネルギーの発見）
 - 宇宙の加速膨張を説明する最も有力な仮説が宇宙定数（ダークエネルギー）



宇宙は何からできている？

- 光っているものだけが世界のすべてではない
 - ダークマターは宇宙を非一様に満たしている
 - 重力のために集団化し光輝く天体の周りをみたしている
- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たす成分は存在しないのか
 - 「真空」には本当に何も無いのか
- ダークエネルギー
 - ダークマターとは異なり、引力（重力）ではなく互いに退け合う斥力を及ぼし合う（負の圧力と呼ばれることもある）
 - そのため、宇宙膨張を減速させず加速させる（加速膨張）

普通の重力では宇宙は加速膨張できない！

■ ニュートンの重力の逆二乗則

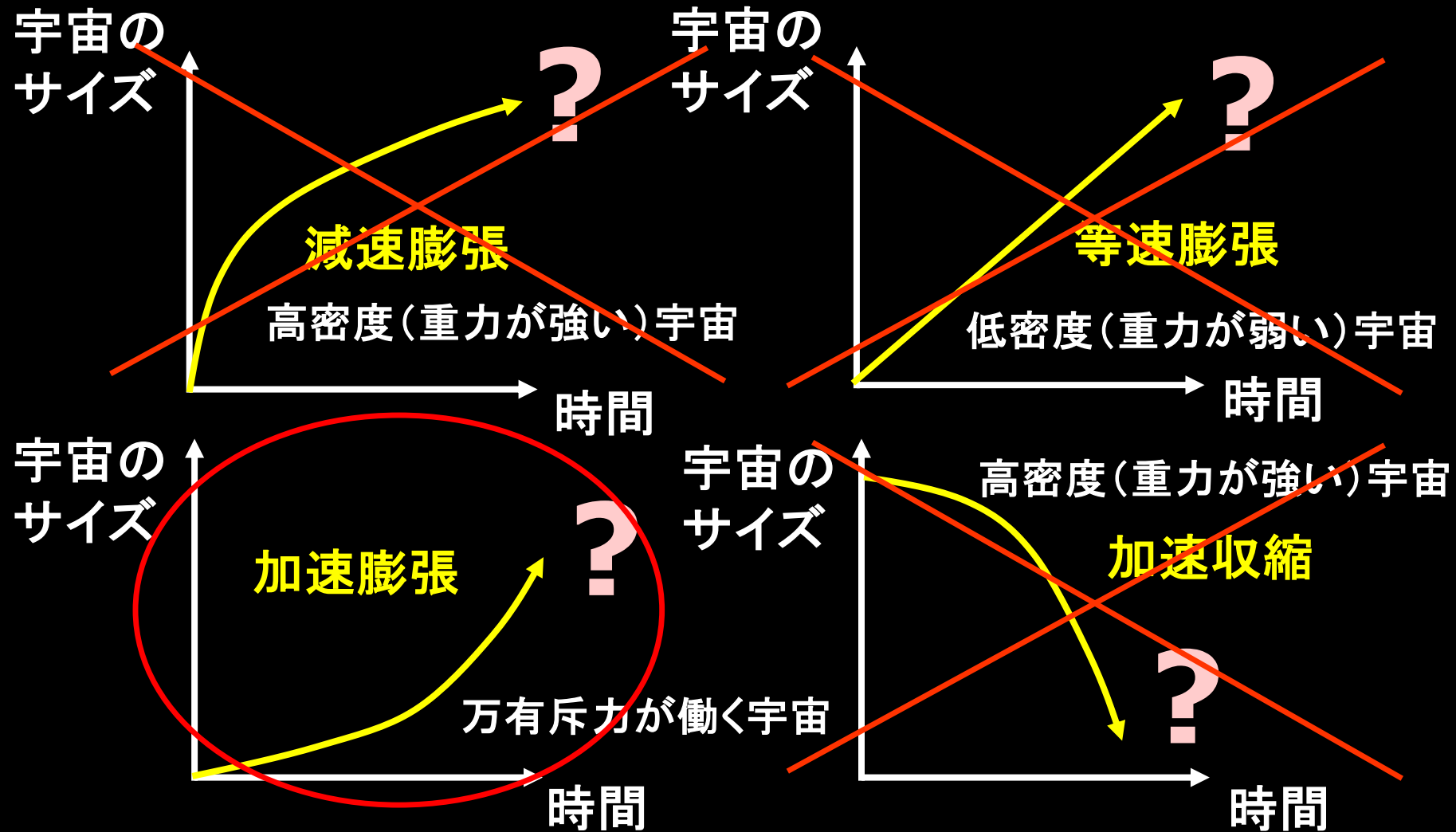
$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{GM(<a)}{a^2} = -\frac{G}{a^2} \left(\frac{4\pi}{3} \rho a^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho a < 0$$

■ 一般相対論による宇宙膨張の式

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p)a$$

- 圧力も重力源として寄与する
- 負の加速度を説明するには、負の質量あるいは負の圧力を仮定するしかない
 - アインシュタインの宇宙定数： $p = -\rho$
 - より一般化したのがダークエネルギー： $p = w\rho$ (定数 $w < -1/3$)
- あるいは、そもそも宇宙論スケールでは一般相対論が正しくないのかも（修正重力理論）？

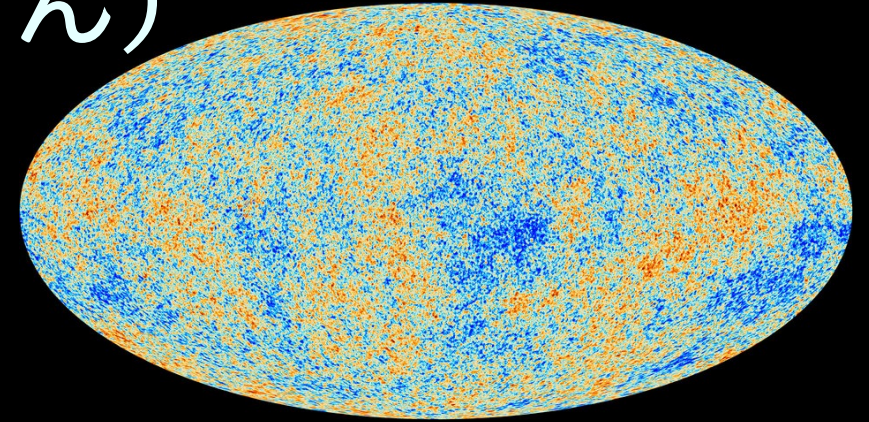
ダークエネルギーと宇宙膨張の未来



138億年前の古文書の暗号解読方法 (ここは難しいです、すいません)

■ 暗号化された状態の古文書

- 宇宙マイクロ波全天温度地図



■ 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

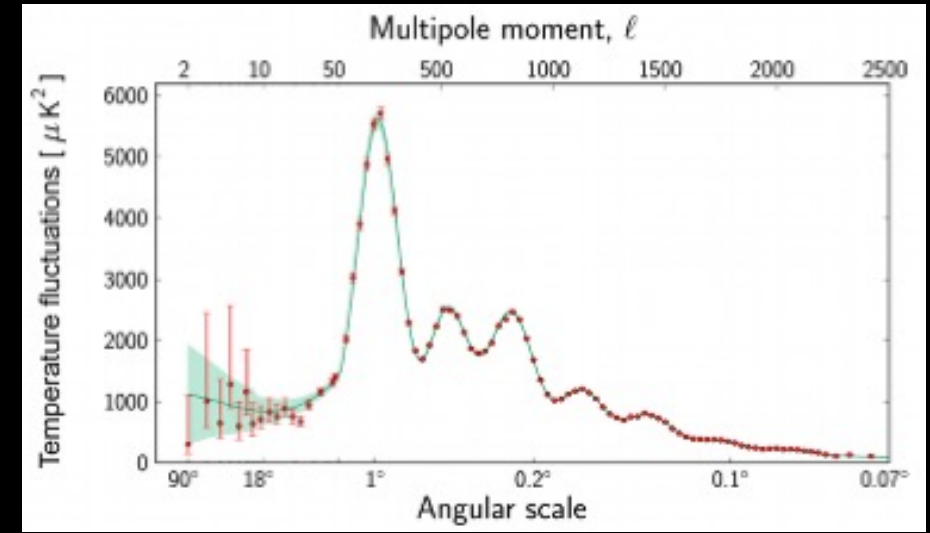
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ 古文書を理解するための文法

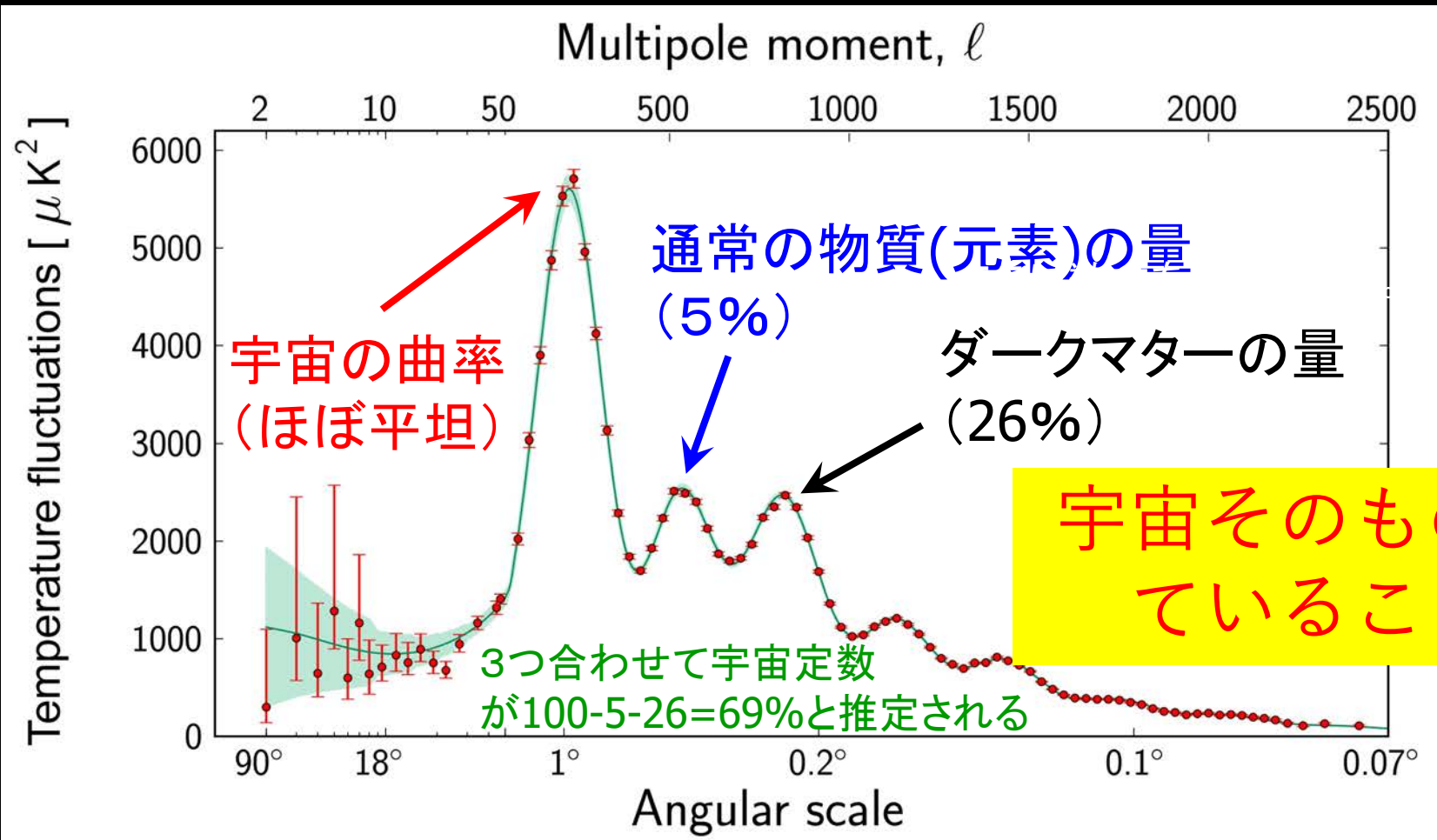
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

■ 宇宙最古の古文書に隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



標準宇宙モデル：わずか6つのパラメータ でぴったり説明できる



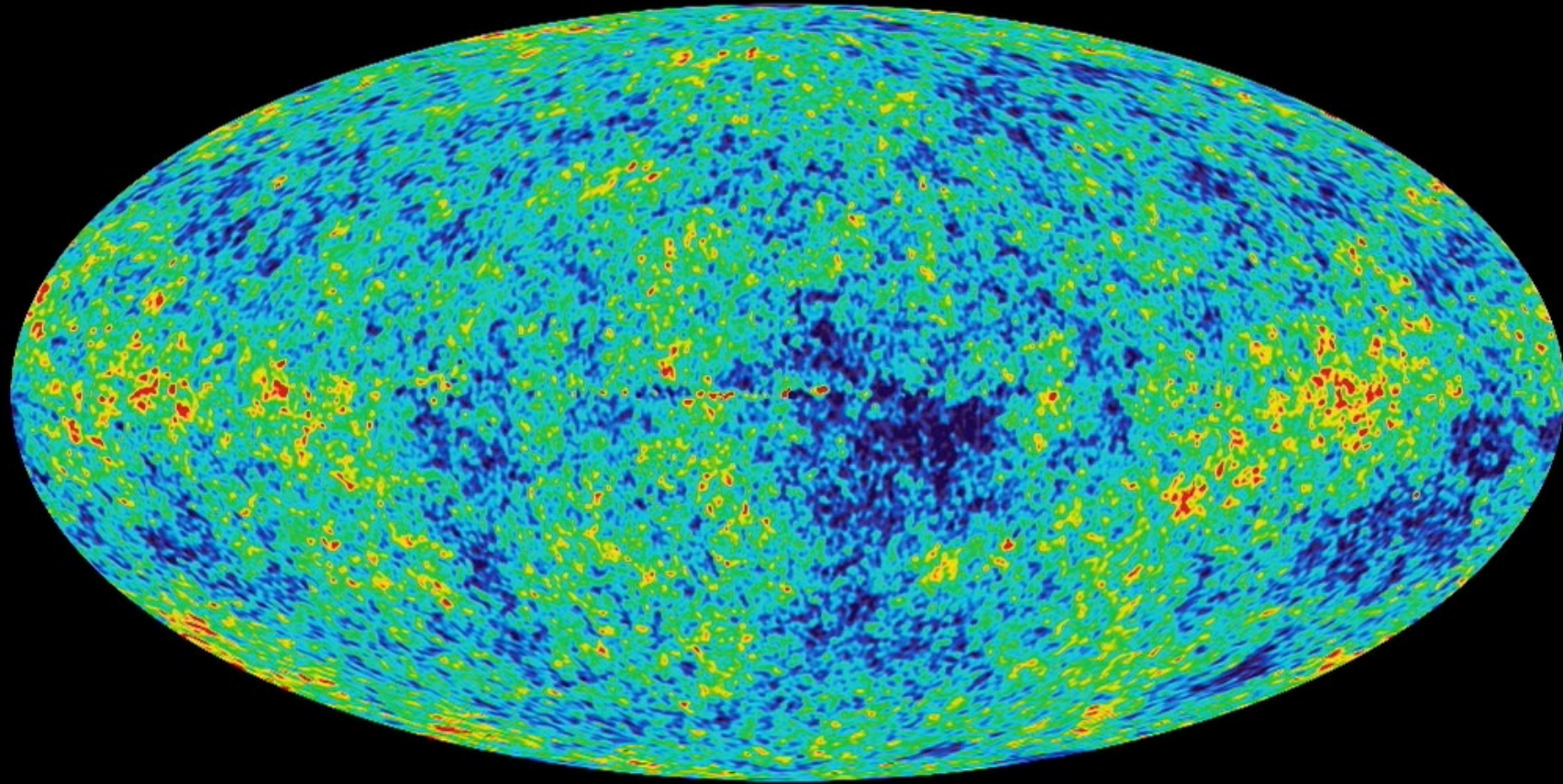
$$\begin{array}{l} \Omega_b h^2 \\ \Omega_{\text{cdm}} h^2 \\ \theta_* = \frac{r_*}{D_M} \end{array} \quad \begin{array}{l} A_s \\ n_s \\ \tau \end{array}$$

宇宙そのものが物理法則に従っていることが実感できる！

現在の標準宇宙モデル (空間的に平坦な Λ CDM)

- 主成分は、**元素**(普通の物質)、**ダークマター**(見えない物質)、**宇宙定数**(負の圧力をもち宇宙を一様に満たす)の3つ
 - それ以外にも、光(電磁波)、ニュートリノ、重力波も宇宙を満たしているが、それらの割合は上記の3成分に比べるとほぼ無視できる
- ユークリッド幾何にしたがう空間 (**平坦**、曲がっていない)
- 一般相対論を仮定して、6つの自由度 (パラメータの値) をうまく選べば、ほぼすべての観測データを見事に説明する
- 宇宙定数(Λ)と冷たいダークマター(Cold Dark Matter)を組み合わせると**平坦な Λ CDMモデル**と呼ばれる

宇宙マイクロ波背景輻射から銀河宇宙へ 宇宙誕生後38万年から138億年への構造進化



5 宇宙と天体と生命の共進化

138億年の宇宙の進化史

■ t~3分: ビッグバン元素合成

- 陽子と中性子からヘリウムの原子核が合成される

■ t=38万年: 宇宙の中性化

- 陽子と電子が結合して荷電中性の水素原子になる
- その当時の光が現在観測されている宇宙マイクロ波背景放射

■ t=数億年: 第一世代天体（ファーストスター）の誕生

- 誕生した星の中心で重元素が合成され、それらが星の進化とともに宇宙空間に撒き散らされる。この過程を何度も繰り返すことで宇宙に元素が蓄積される（宇宙の元素循環）

■ t=138億年: 惑星・恒星・銀河からなる階層的構造の宇宙

宇宙は物理法則にしたがって進化する

物理法則



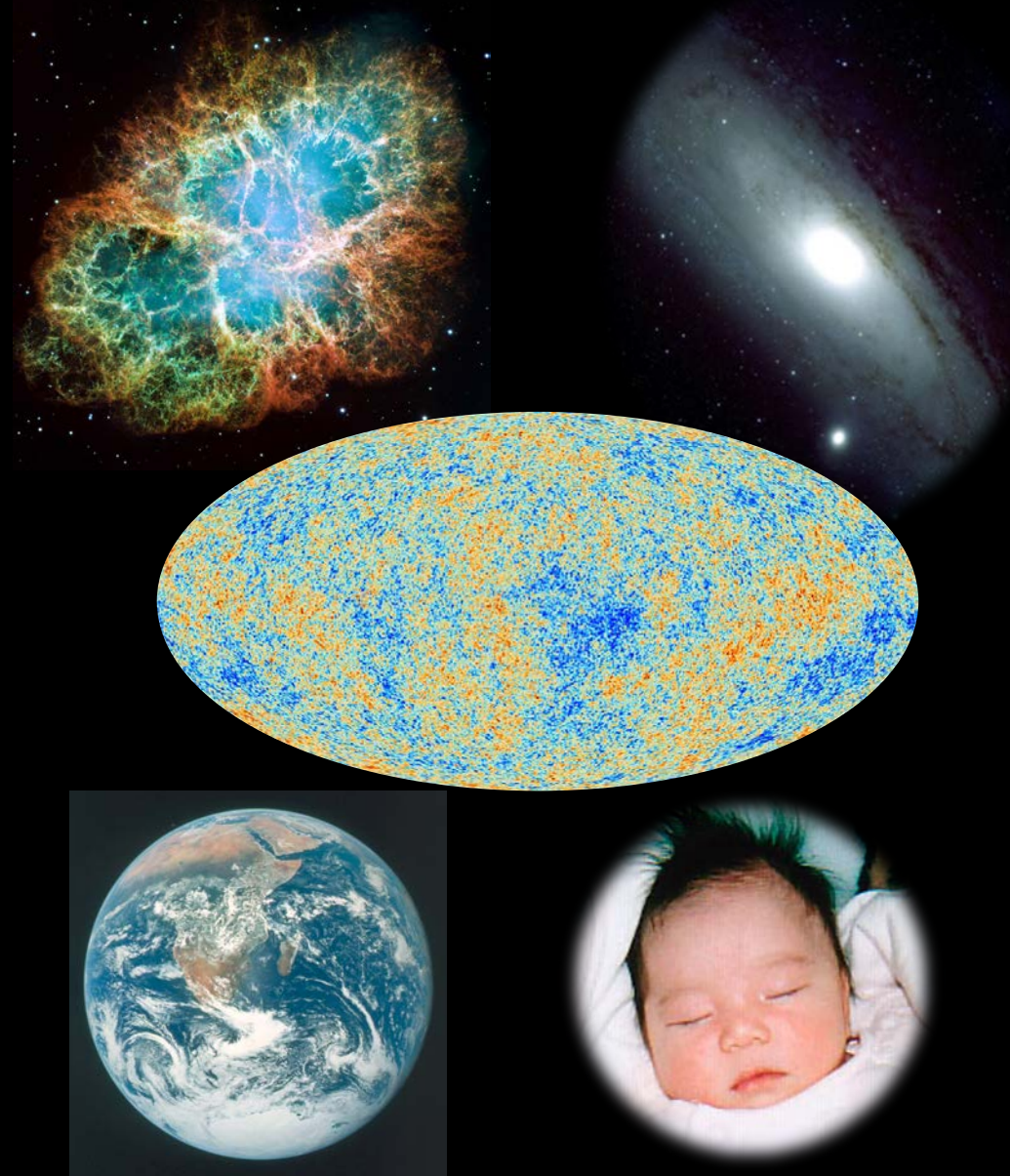
初期条件

光

光

高温高密度(ビッグバン)

ミクロの世界とマクロの世界をつなぐ



自然界の4つの力と宇宙の元素合成

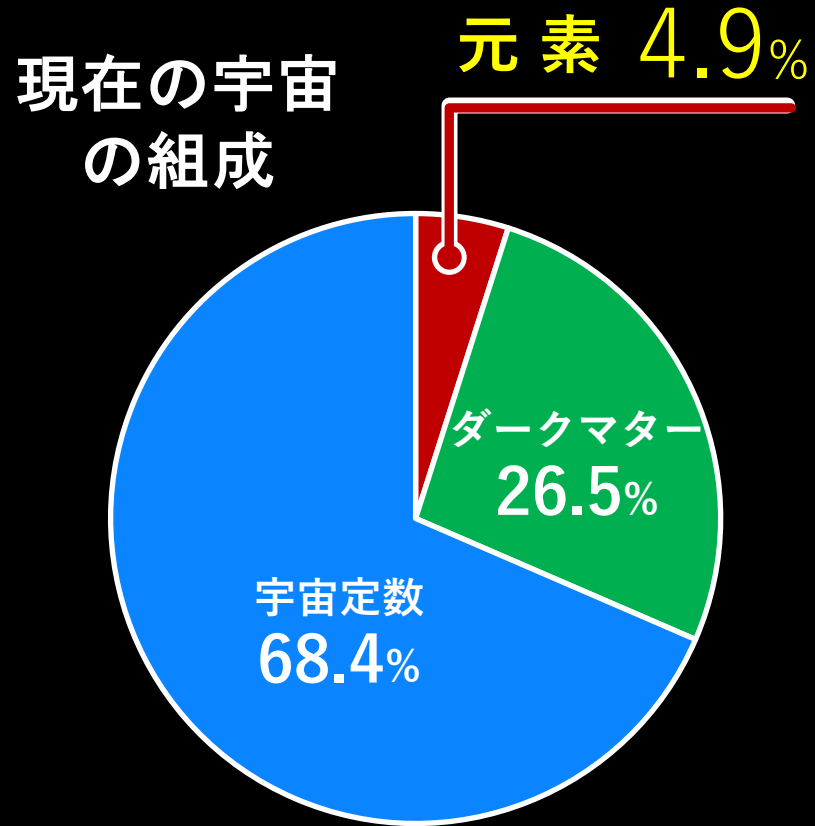
■ 宇宙初期は極めて高温かつ高密度（ビッグバン）

- 1000億度以上の高エネルギー状態では、陽子と中性子はばらばらのままで元素（原子核）を合成できない
- 宇宙の温度が一億度以下になると、陽子2個と中性子2個からなるヘリウムの原子核が合成される（宇宙誕生最初の3分間）
- それから数億年後以降、星の中心部での原子核反応の結果、徐々に重い元素が形成され、星の最期に宇宙空間に撒き散らされる（元素循環）

■ 元素合成過程の本質は基礎物理学

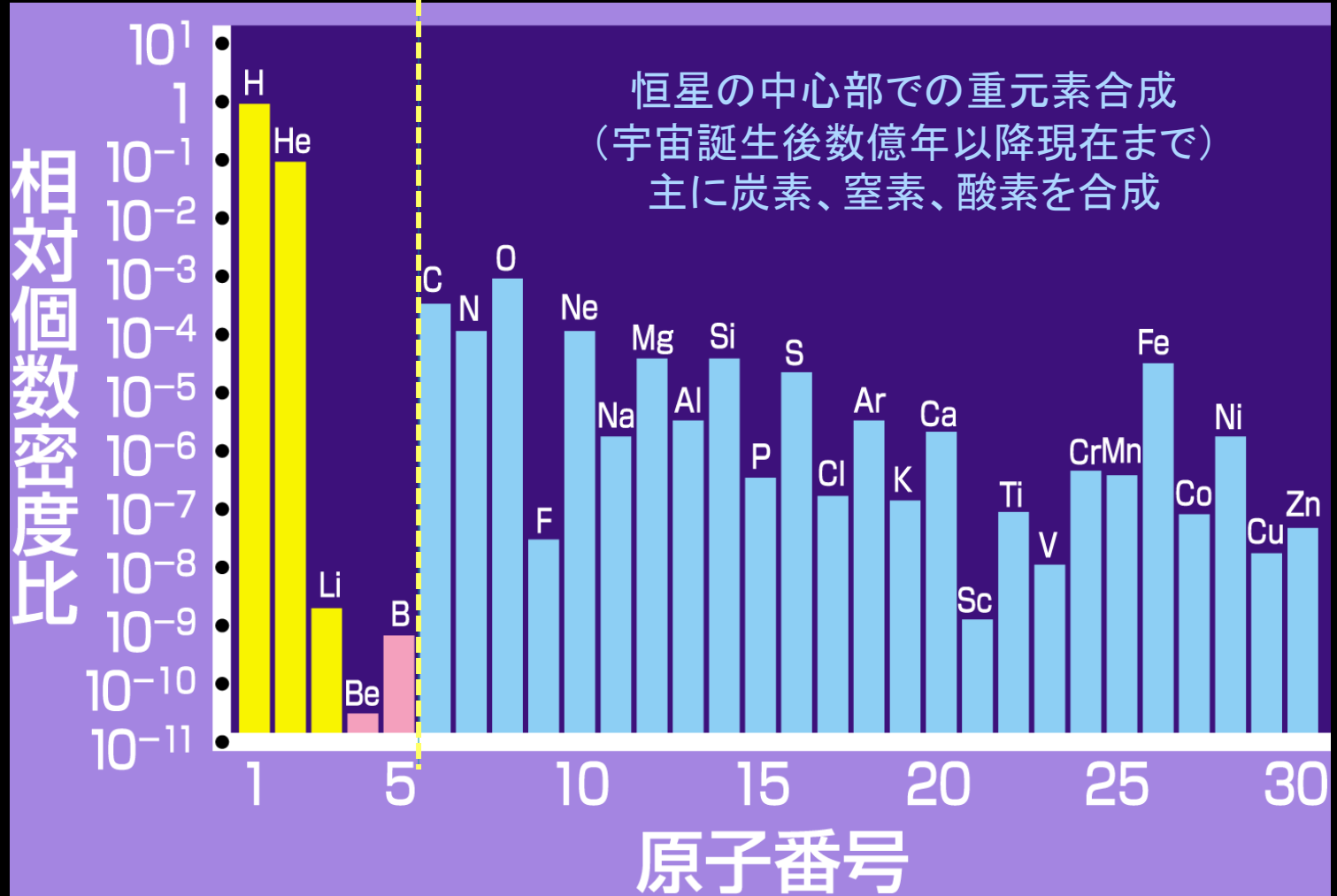
- 陽子と中性子間の引力：強い力
 - 陽子同士の反発力：電磁気力
 - 中性子と陽子の相互変換：弱い力
 - 重元素が合成される場所は大質量星の中心部：重力
- 自然界の4つの力がすべて関与
⇒ 宇宙の元素合成と元素循環は
物理法則による必然的帰結

宇宙の組成と元素の組成

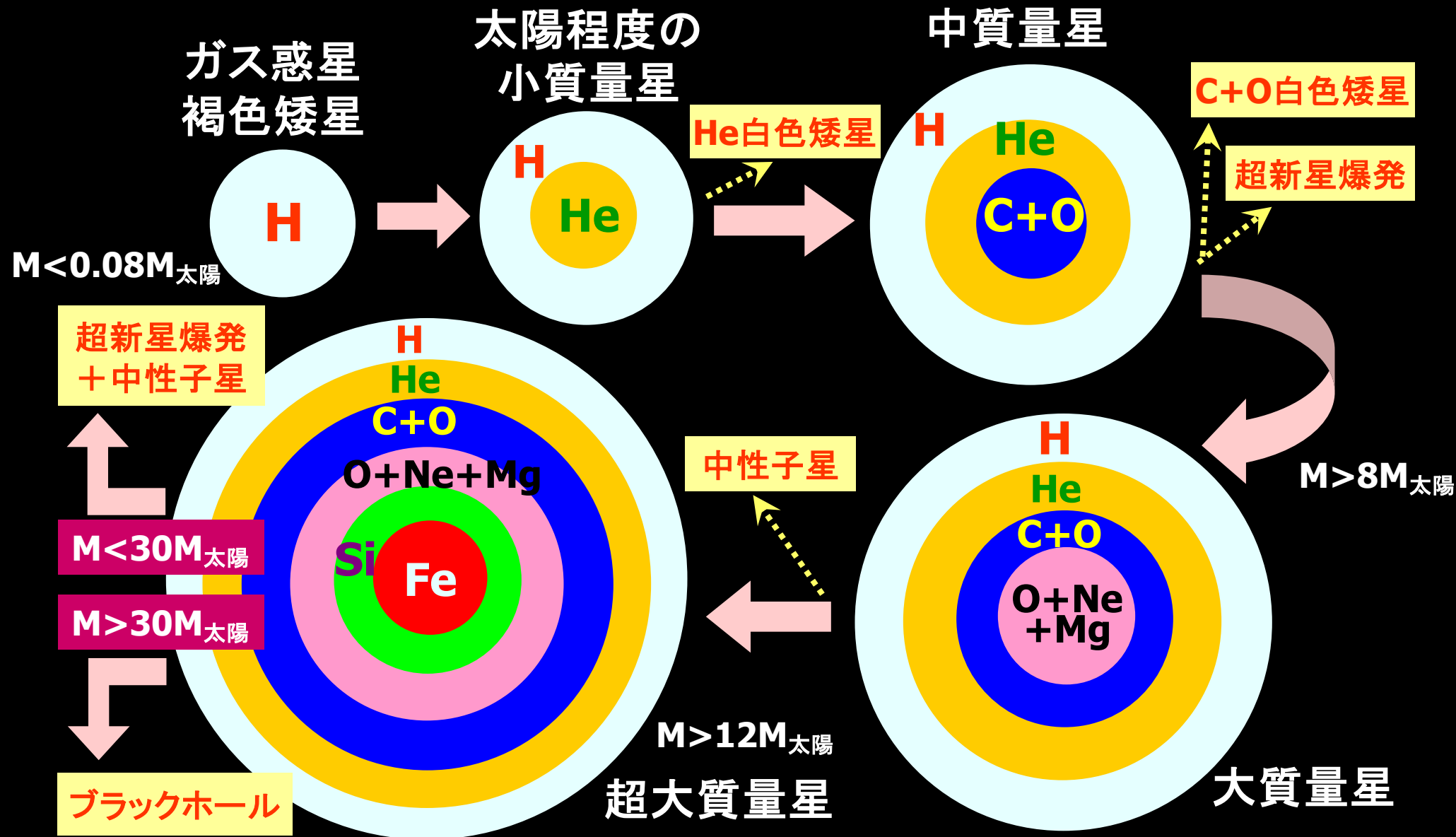


宇宙の力学進化は、主成分である宇宙定数(ダークエネルギー)とダークマターで決まる。一方、その中の天体(そして生命)の普遍性と多様性は残りわずか5%の元素で決まっている

ビッグバン元素合成
(宇宙誕生後約3分間)
主にヘリウムを合成



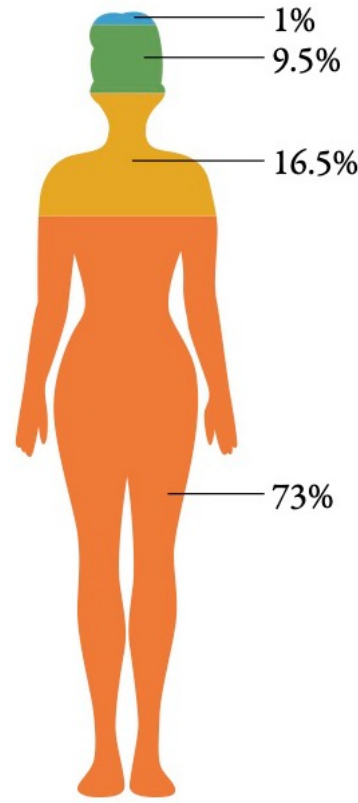
星の一生と元素合成



宇宙 ⇒ 星 ⇒ 元素 ⇒ 人間 (=星の子供)

H 水素																
Li リチウム	Be ベリリウム															
Na ナトリウム	Mg マグネシウム															
K カリウム	Ca カルシウム	Sc スカンジウム	Ti チタン	V バナジウム	Cr クロム	Mn マンガン	Fe 鉄	Co コバルト								
Rb ルビジウム	Sr ストロンチウム	Y イットリウム	Zr ジルコニウム	Nb ニオブ	Mo モリブデン	Tc テクネチウム	Ru ルテニウム	Rh ロジウム								
Cs セシウム	Ba バリウム	ランタノイド	Hf ハフニウム	Ta タンタル	W タングステン	Re レニウム	Os オスミウム	Ir イリジウム								
Fr フランシウム	Ra ラジウム	アクチノイド														
ランタノイド		La ランタン	Ce セリウム	Pr プラセオジム	Nd ネオジム	Pm プロメチウム	Sm サマリウム	Eu ユウロピウム								
アクチノイド		Ac アクチニウム	Th トリウム	Pa プロアクチニウム	U ウラン											

- ビッグバン
元素合成
- 低質量星の
質量放出
- 大質量星の
超新星爆発
- 宇宙線
破碎反応
- 中性子連星
合体
- 白色矮星の
超新星爆発



										He ヘリウム
					B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素	F フッ素	Ne ネオン
					Al アルミニウム	Si ケイ素	P リン	S 硫黄	Cl 塩素	Ar アルゴン
Ni ニッケル	Cu 銅	Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As ヒ素	Se セレン	Br 臭素	Kr クリプトン		
Pd パラジウム	Ag 銀	Cd カドミウム	In インジウム	Sn スズ	Sb アンチモン	Te テルル	I ヨウ素	Xe キセノン		
Pt 白金	Au 金	Hg 水銀	Tl タラウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム	At アスタチン	Rn ラドン		
Gd ガドリウム	Tb テルビウム	Dy ジスプロシウム	Ho ホルミウム	Er エルビウム	Tm ツリウム	Yb イテルビウム	Lu ルテチウム			

我々のDNA中の窒素、歯をつくるカルシウム、血液中の鉄、アップルパイに含まれる炭素。これはすべて星の内部で合成された。つまり我々は星の成分からできているのだ。

カール・セーガン 『コスモス』

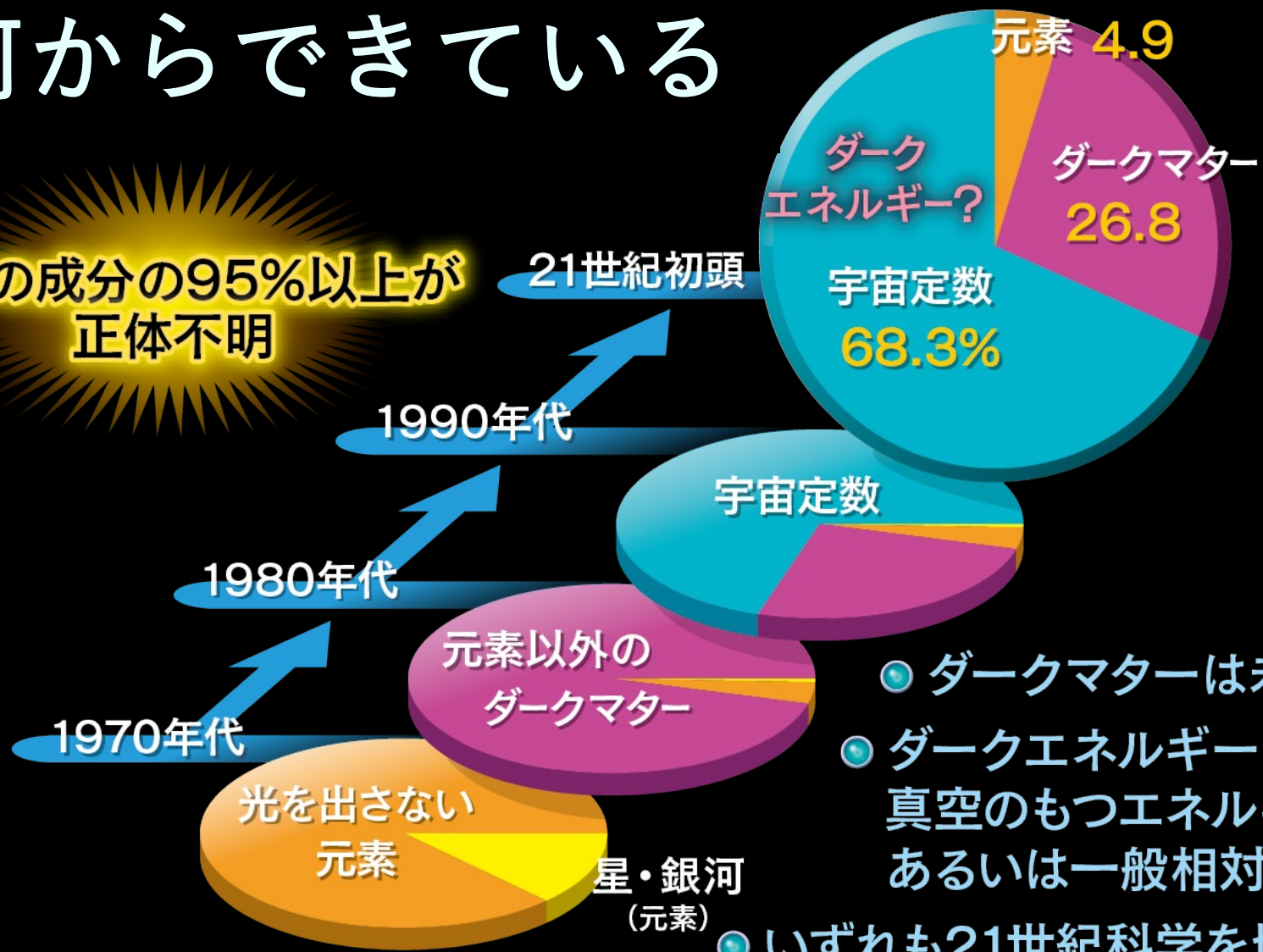
6 まとめ：さらなる宇宙「論」の加速

宇宙「論」の進化史 (個人的バイアスあり)

1916年	“一般相対論的”宇宙論の始まり	アインシュタイン (+ドジッター、フリードマン…)
1927/29年	宇宙膨張の発見	ルメートル、ハッブル
1946年	元素の起源としてのビッグバンモデル	ガモフ、アルファー、(ベータ)、林忠四郎
1965年	宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の発見	ペンジアス、ウィルソン
1980年代	宇宙の大構造(銀河の空間分布)、素粒子的宇宙論(バリオン数、インフレーションモデル)、数値シミュレーション	東辻浩夫、三好和憲、木原太郎、吉村太彦、佐藤勝彦、グース、スタロビンスキー、リンデ、ゲラー、フクラ、デイビス、ホワイト、フレンク、エフスタチュー
1992年	CMB温度ゆらぎの検出	COBE(Cosmic Background Explorer)
1990年代	宇宙論パラメータの決定と標準宇宙論モデルの確立 (spatially-flat Λ CDM)	ピーブルズ、ガン、SDSS(Sloan Digital Sky Survey)
21世紀	精密宇宙論 (CMB全天マップ、遠方・広域天体サーベイ、超新星サーベイ、重力レンズ、重力波、、、)	WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), Planck, SDSS, HST (Hubble Space Telescope), DES(Dark Energy Survey), Subaru HSC (Hyper Suprime Cam), LIGO-VIRGO-KAGRA

宇宙“論”の進化： 宇宙は何からできている

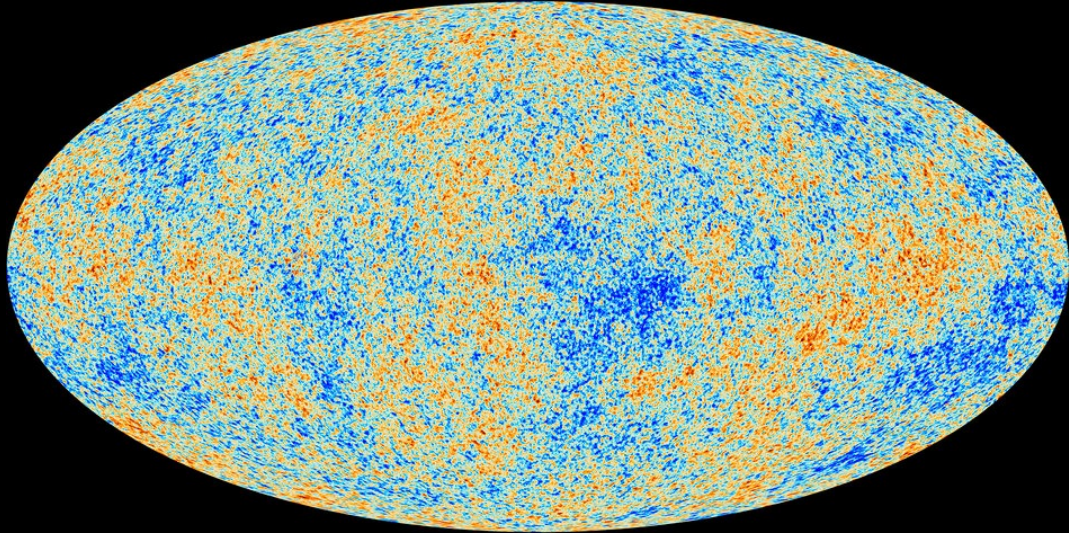
宇宙の成分の95%以上が
正体不明



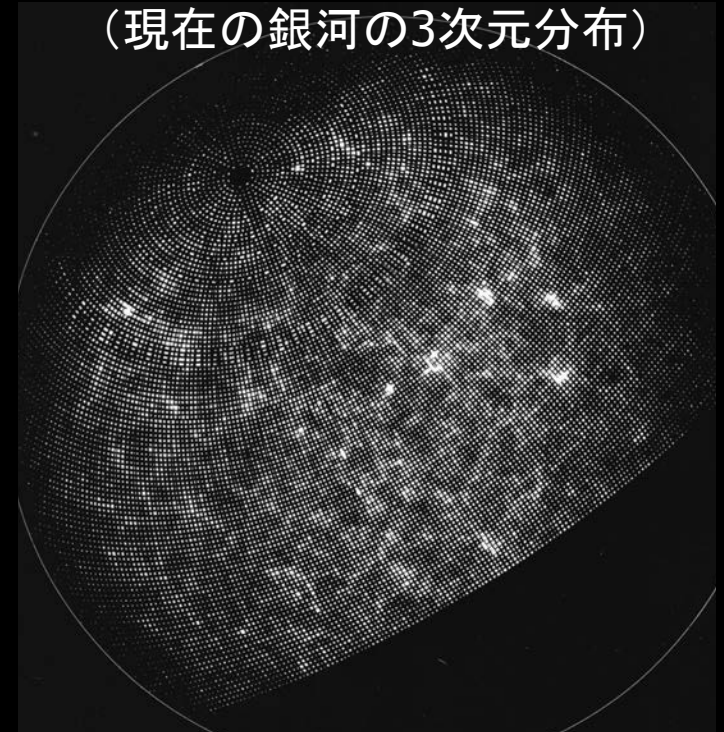
- ダークマターは未知の素粒子?
- ダークエネルギーは真空のもつエネルギー?あるいは一般相対論の破綻?
- いずれも21世紀科学を切り拓く鍵

宇宙に関する全情報がこれらの地図の どこかに刻み尽くされているはず

誕生後38万年の宇宙の「初期条件」
(宇宙マイクロ波背景放射)



宇宙の構造形成進化史
(現在の銀河の3次元分布)



物理法則

■ 宇宙論のセントラルドグマ

初期条件+(既知・未知の)物理法則 = 現在の宇宙

「宇宙そのものが物理法則に従っている」事実の確認こそが
現時点での宇宙論の最大の発見というべき

次のブレイクスルーはどこに？

(そもそもダークという形容詞が残っている限り
ブレイクスルーが必要なのは自明)

- 標準 Λ CDMモデルは本当に正しいのか？
 - この空間は本当に平坦か？ 体積は無限なのか？
- ダークマターの正体と直接検出
 - ダークマターは重力以外に相互作用しないのか？
 - ダークマターは素粒子モデルにどう埋め込まれている？
- 加速膨張の起源
 - 宇宙定数？ ダークエネルギー？
 - 宇宙論的スケールにおける一般相対論の破綻？
- 標準 Λ CDMモデルの基礎たるインフレーション仮説の検証

現代科学に残された3つの究極の謎

■ 宇宙の起源

- 宇宙はなぜ誕生したのか
- 宇宙は我々の宇宙だけなのか
- あるいはそれ以外にも多様な宇宙が存在するのか

現在未解明なだけではなく、そもそも答えがある問いかどうかすら不明

■ 生命の起源

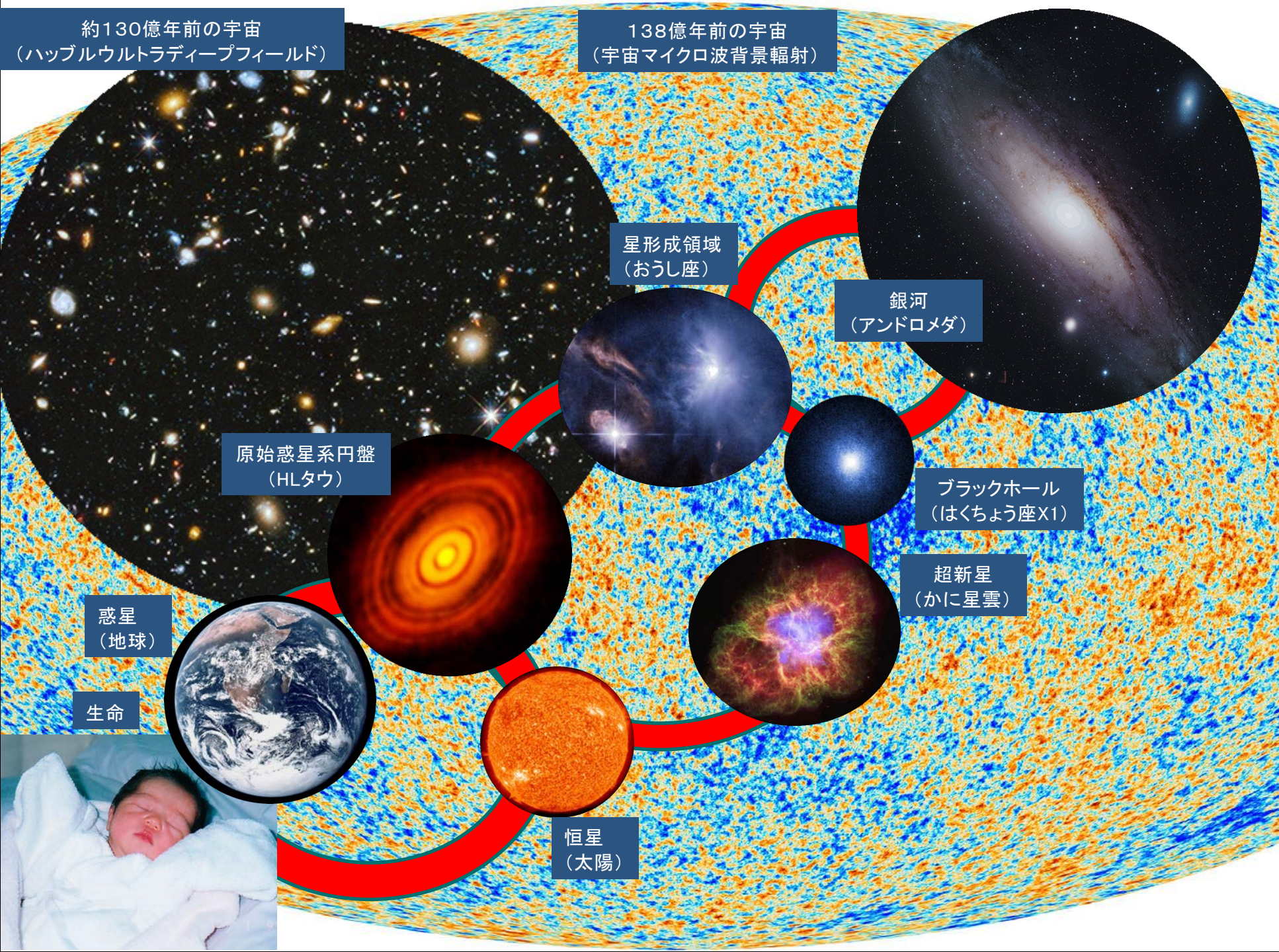
- 生命はなぜ誕生したのか
- 地球外にも生命は普遍的に存在するのか
- もしそうなら生命はいかなる多様性を持つのか

仮に正解があるとしても、地球人ごときちっぽけな存在がたどり着ける（理解できる）かすらわからないほど魅力的な問い

■ 意識（知性）の起源

- 意識はなぜ誕生したのか
- 生命（機械）は必然的に意識を獲得するのか
- 地球外に知的文明は存在するのか

138億年の宇宙史における天体の進化



宇宙の元素循環と生命の誕生・進化

参考文献



東京大学出版会 2021



亜紀書房 2018



朝日新聞出版社 2022