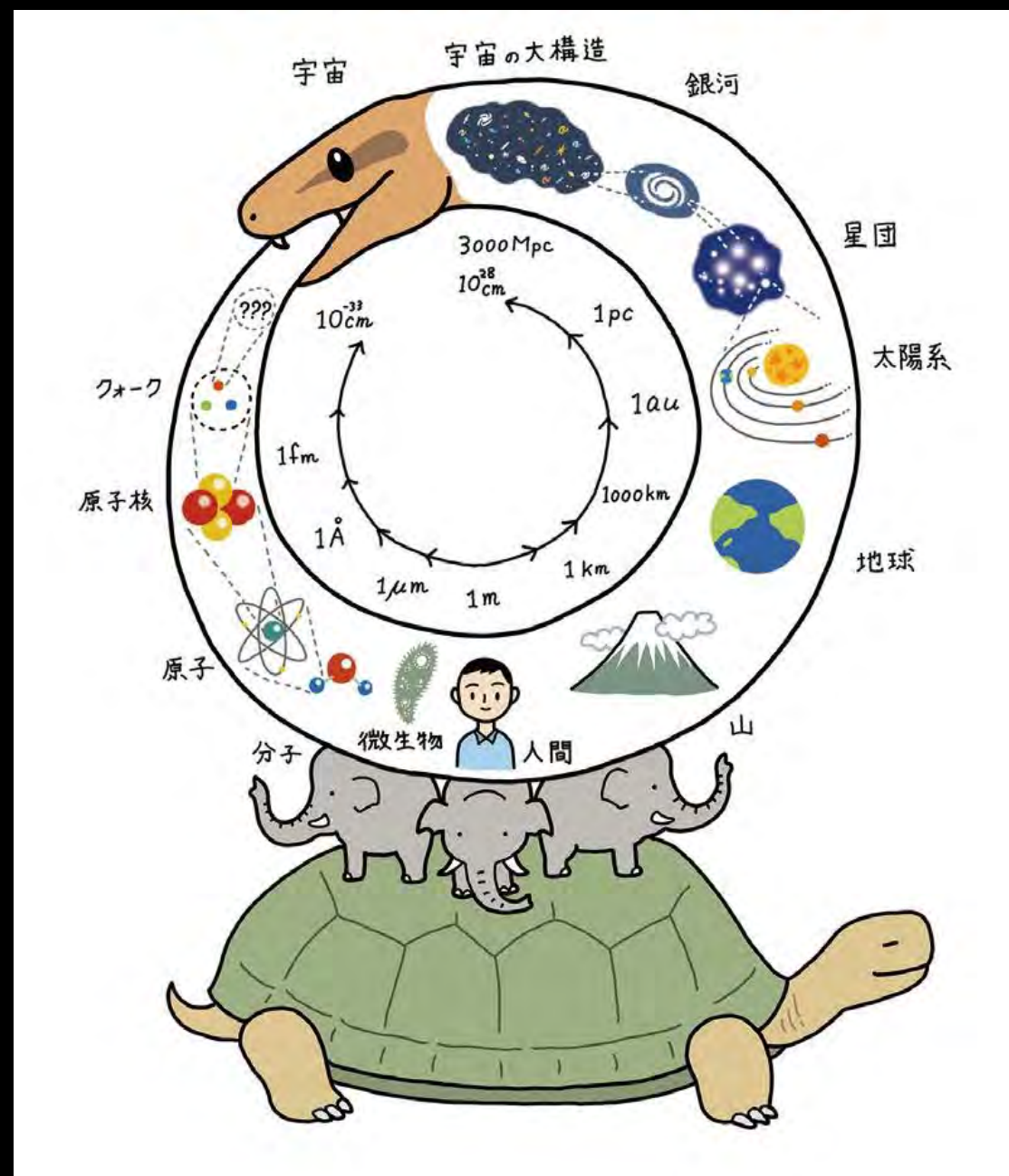
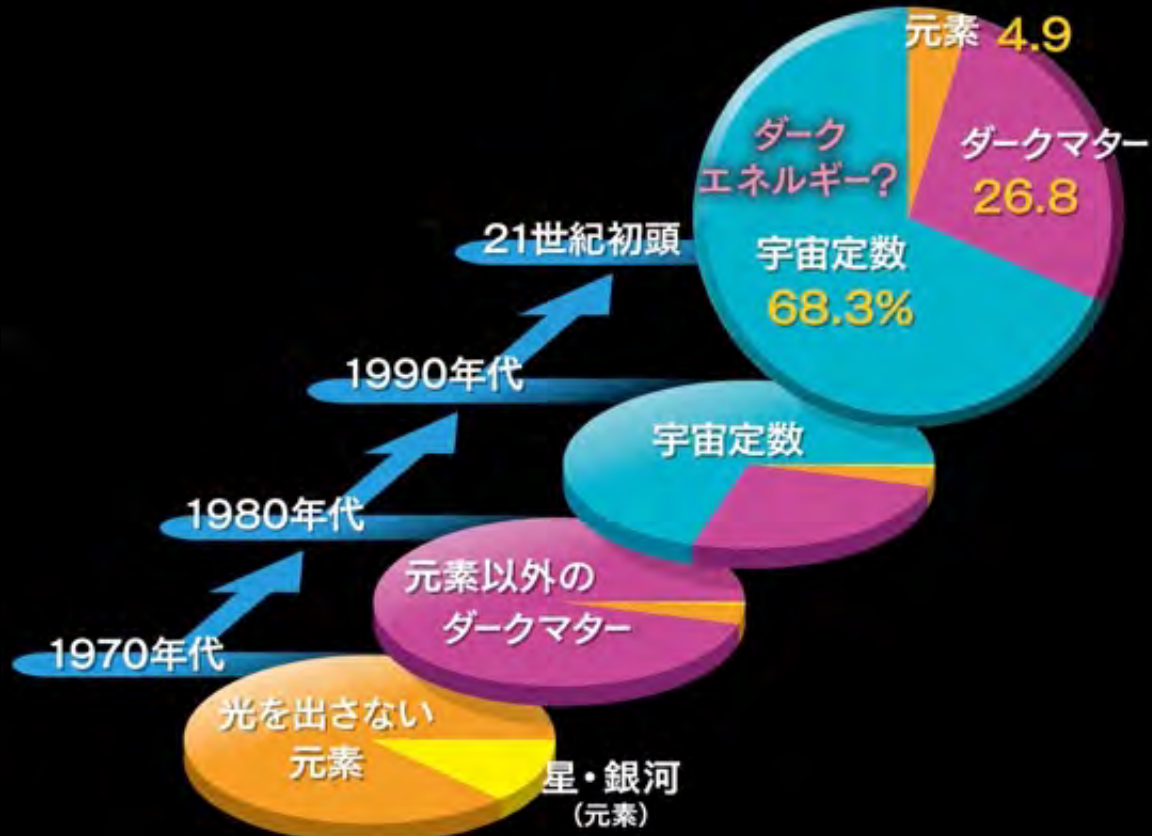


宇宙のダークサイド



かわさき市民アカデミー2021年度後期

新しい科学の世界 I 講座『地球と宇宙を科学する』第2回

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2021年10月12日 10:30-12:00 @川崎市生涯学習プラザ

目次

1. 世界はすべて見えるのか
2. ビッグバンの光の化石: 宇宙マイクロ波背景輻射
3. 標準宇宙モデル (Λ CDM)
4. ダークマターとダークエネルギー
5. まとめ

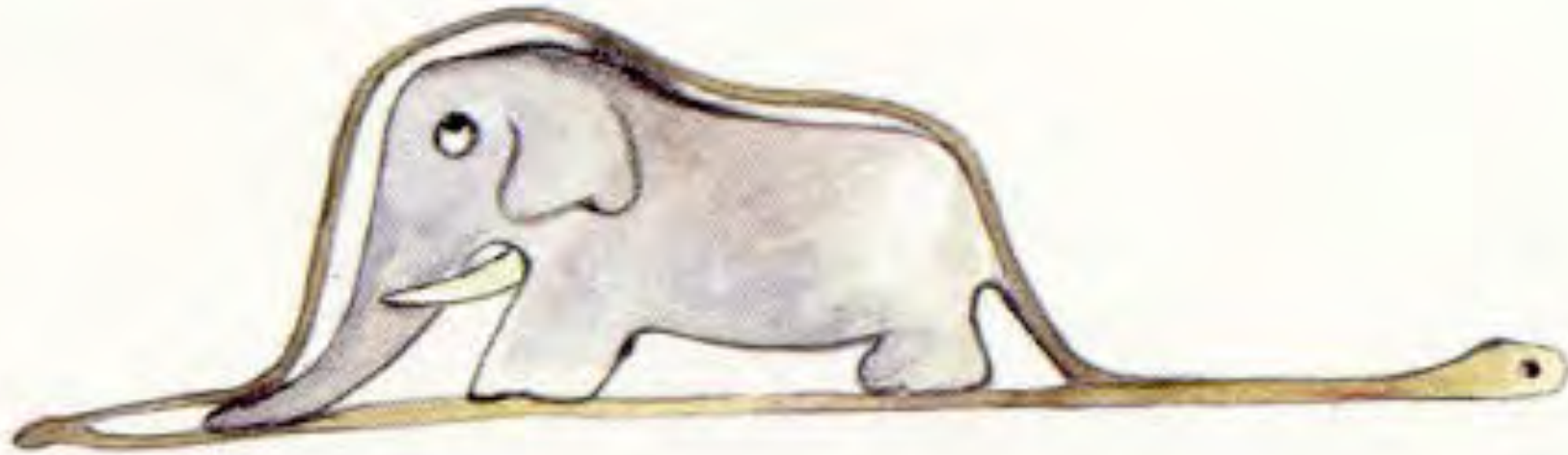
1. 世界はすべて見えるのか

見えているものだけがすべてではない



*Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait
un serpent boa qui digérait un éléphant*

大切なものは目に見えない



*J'ai alors dessiné
l'intérieur du serpent boa, afin que les grandes personnes puissent
comprendre. Elles ont toujours besoin d'explications*



L'essentiel est invisible pour les yeux



本当のことは心でしか見えないんだ
大切なことは目には見えないんだよ

「星の王子様」のなかのキツネの言葉

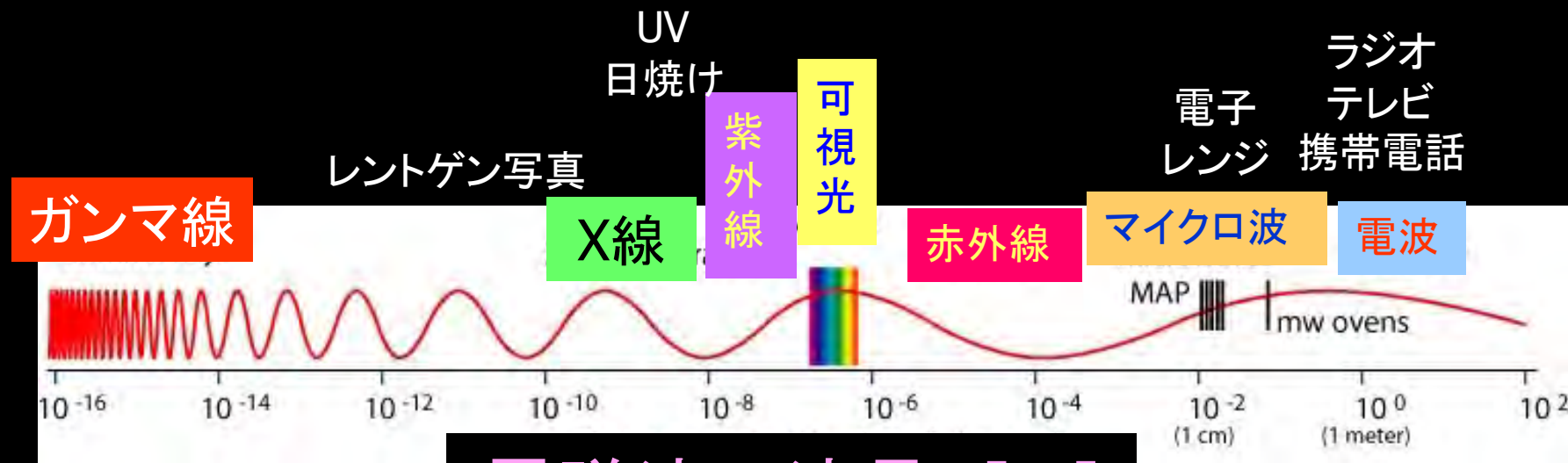
電気、水道、ガス
郵便、通信
教育、介護、医療
思いやり、絆、やさしさ

ダークマター
ダークエネルギー
太陽系外惑星
地球外知的生命

目に見えるのは世界のほんの一部だけ

通常、「光」と呼ばれているものは、電磁波と呼ばれる波の一種。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代天文学はこれらすべての波長を(さらには光以外の宇宙線、ニュートリノ、重力波も)駆使した観測を行っている。

人間の「目に見える」のは、そのなかの「可視光」と呼ばれるごく狭い範囲のみ。



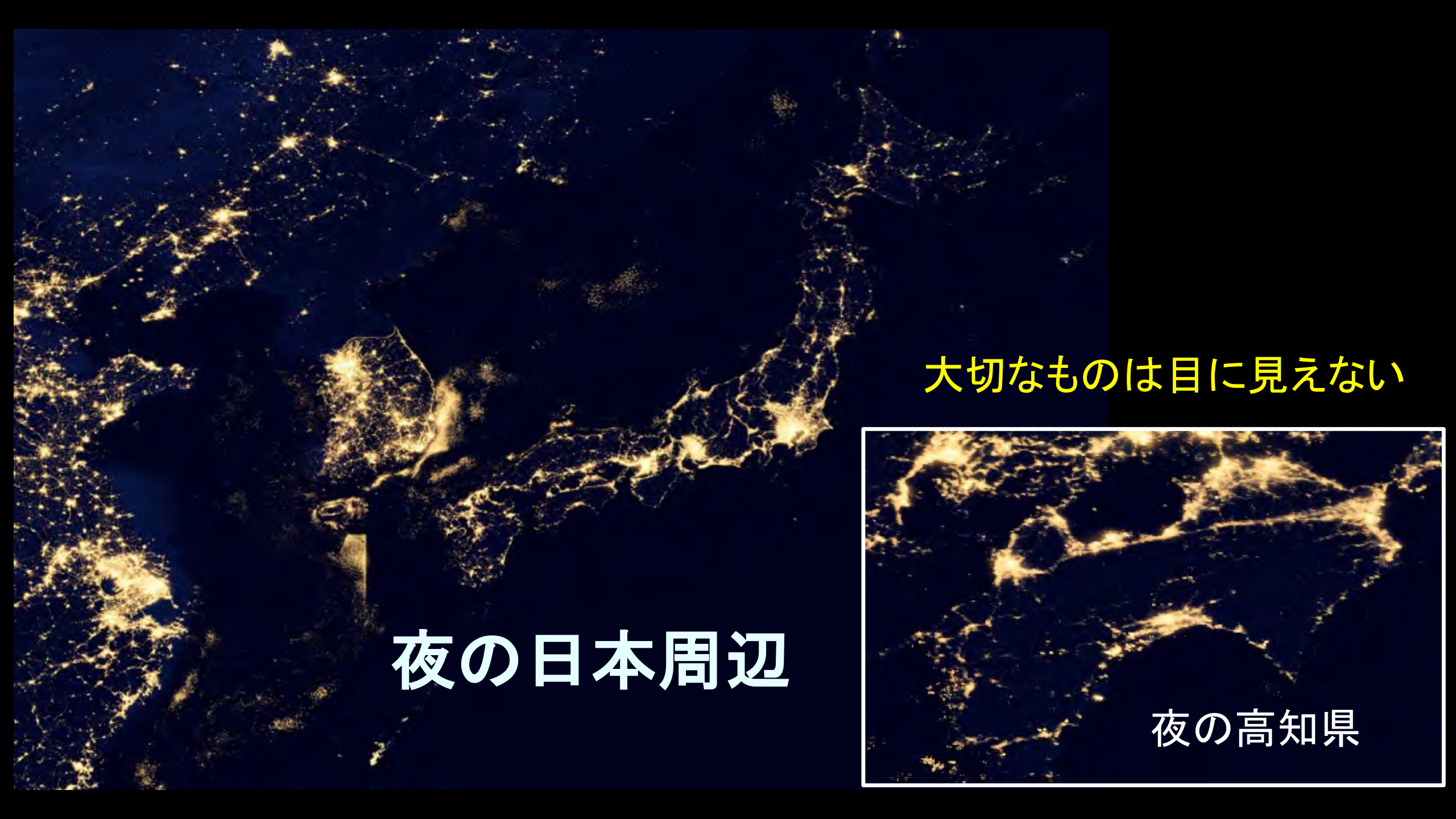
電磁波の波長 [m]

人類がなぜ可視光しか見えないのか(逆に可視光だけ見えるのか)は、興味ある疑問だが、仮に我々が目をつぶったとしても、そこにある世界はなにも変わらない

夜の地球



<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>



大切なものは目に見えない

夜の日本周辺

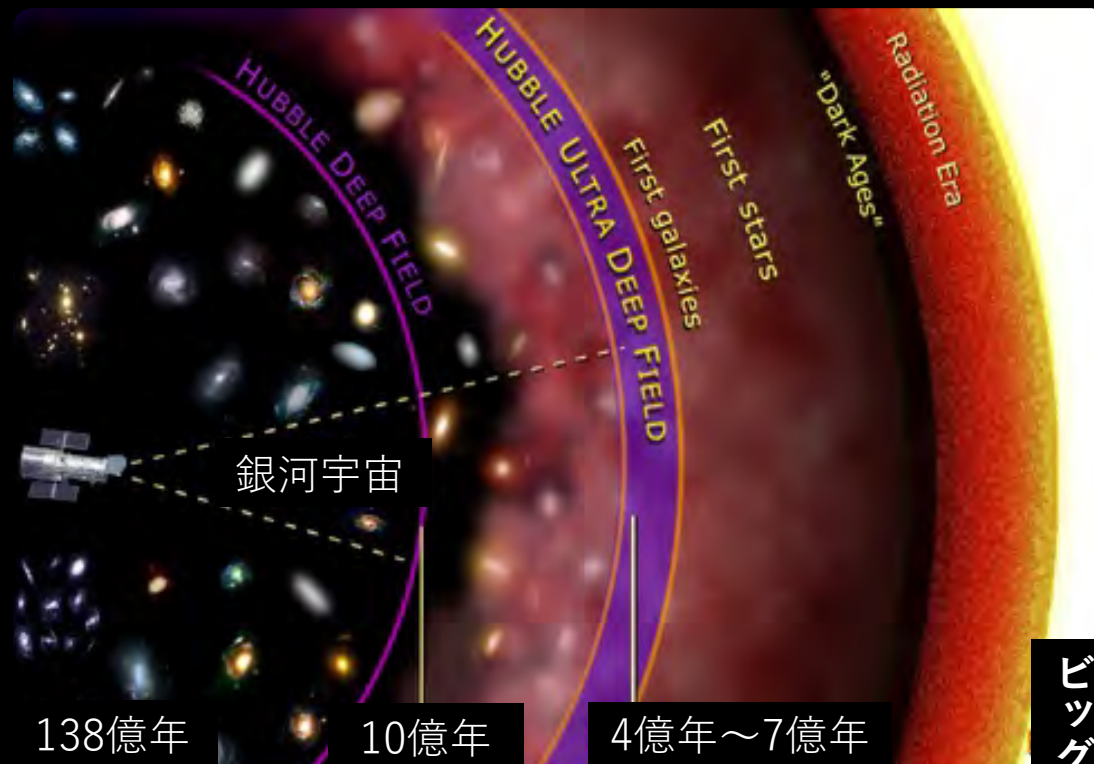
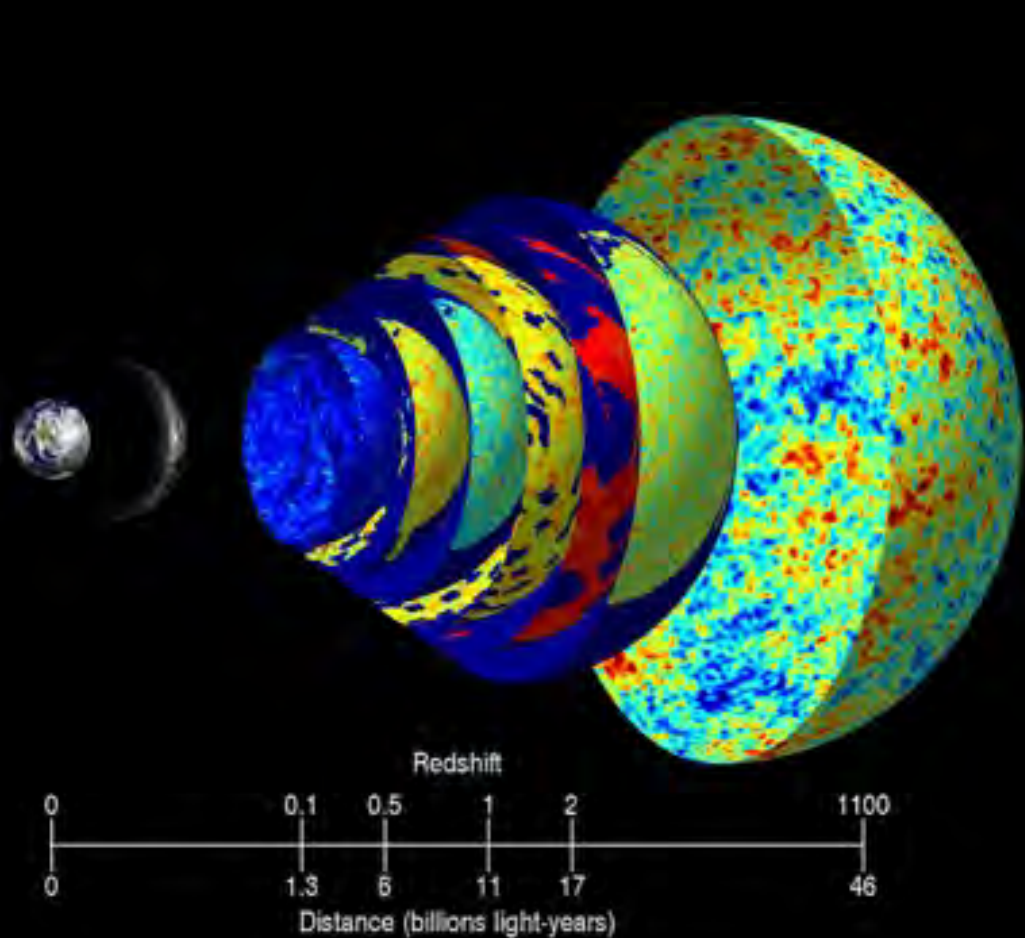
夜の高知県

2. ビッグバンの光の化石:

宇宙マイクロ波背景輻射

遠くの宇宙には過去と歴史が刻まれている

光の速度は有限なので遠くの宇宙は同時に過去の宇宙でもある

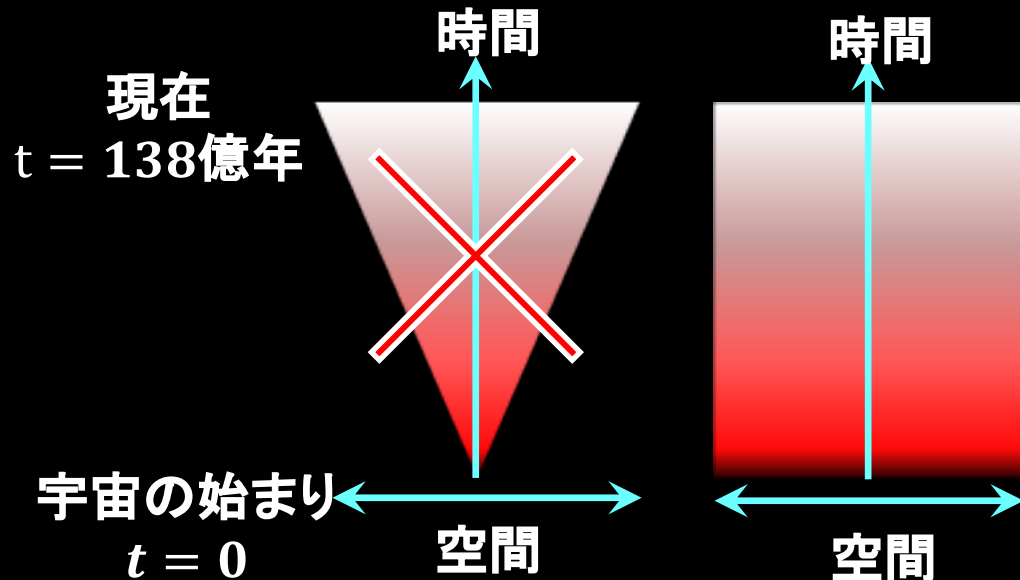
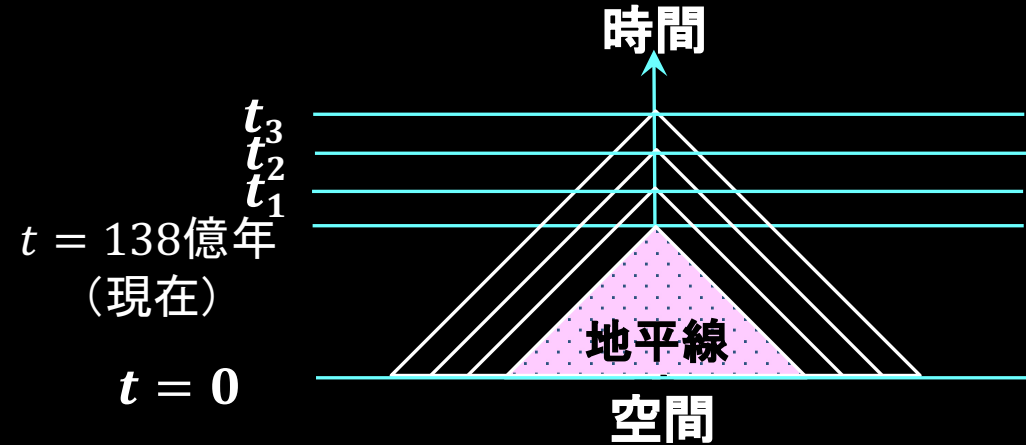


現在 ← 時間 → 過去 (= 遠方)

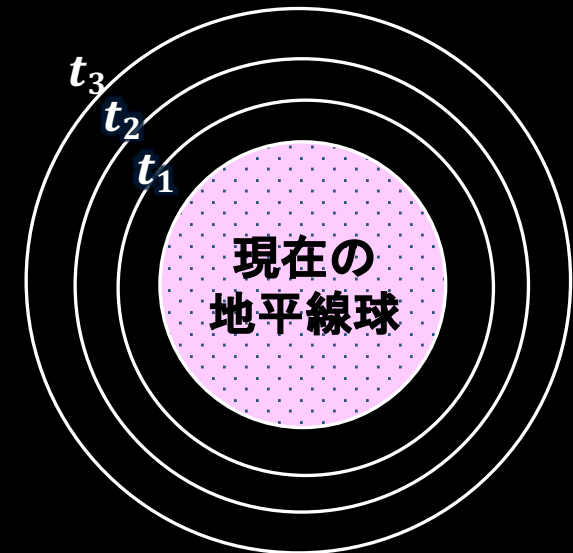
ビッグバン＝宇宙初期の高温高密度状態 ≠宇宙のなかの大爆発

■ 宇宙の地平線

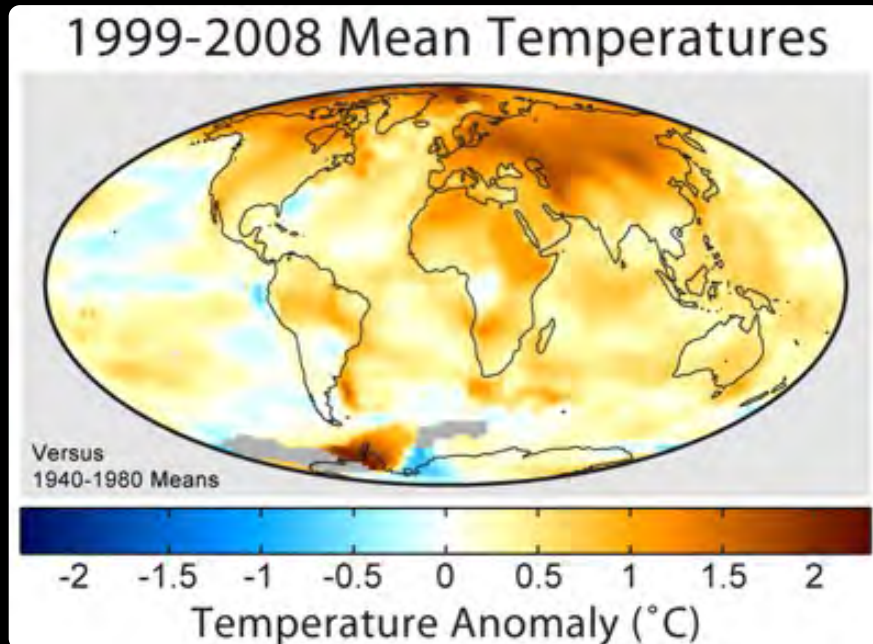
- 誕生直後の宇宙は点ではなく、むしろほぼ無限に広がっていると考えるべき



宇宙の地平線の半径は時間とともに増大する

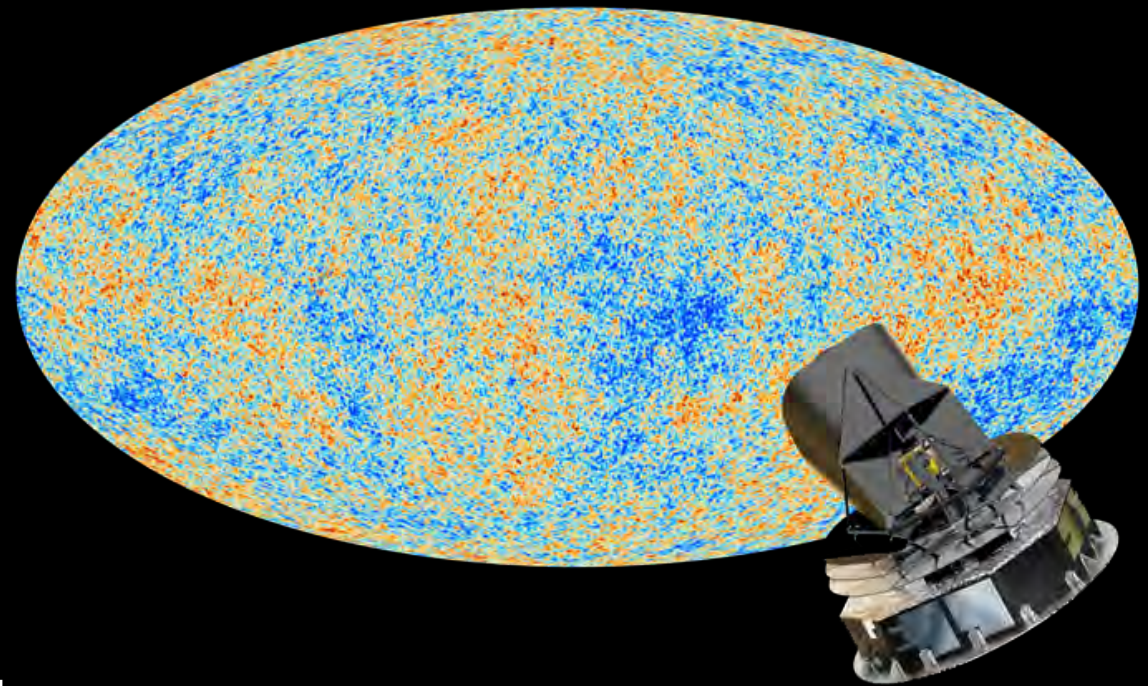


宇宙を満たすビッグバンの名残(光の化石): 宇宙マイクロ波背景輻射温度地図



Robert A. Rohde

地球の温暖化を表す温度地図

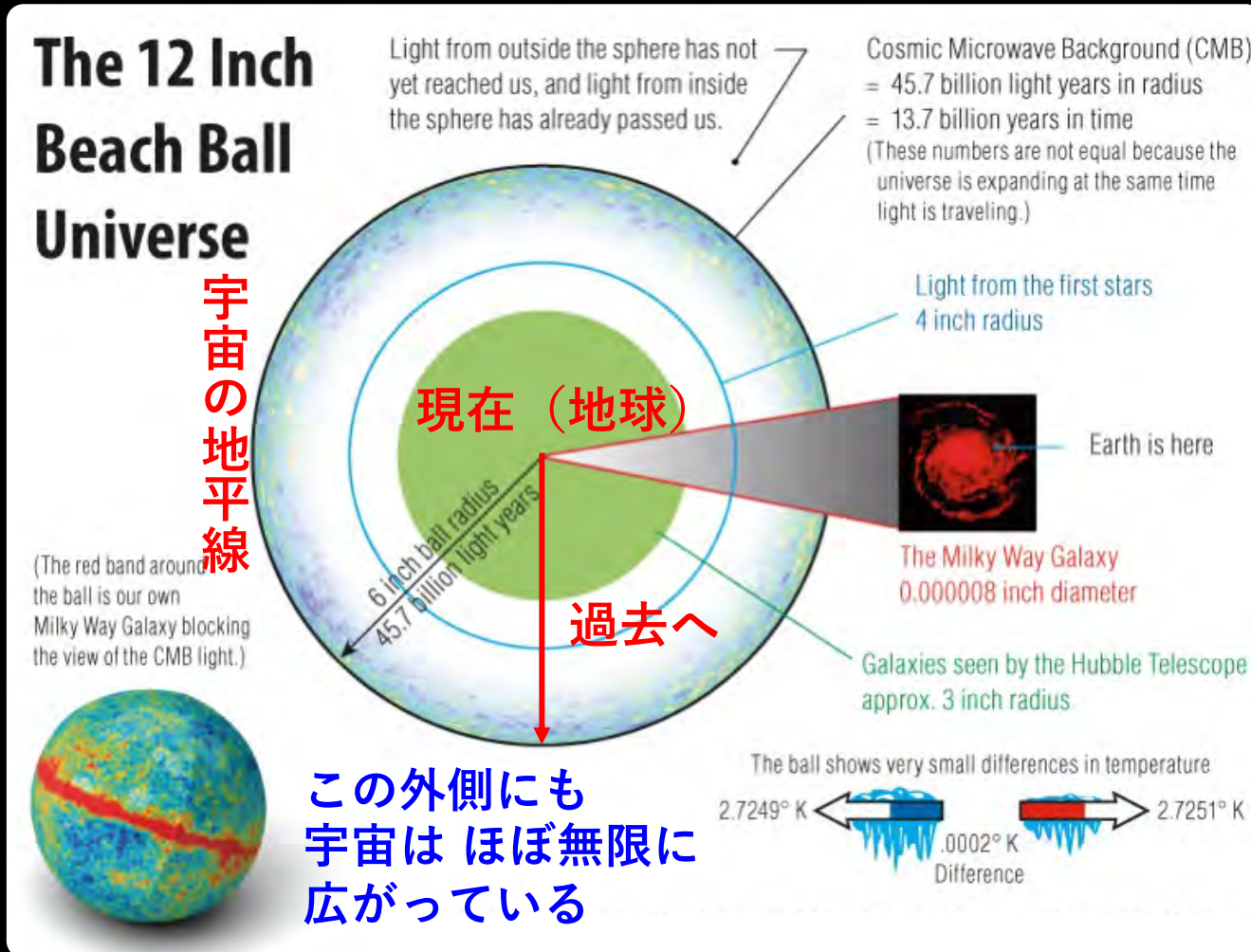


ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros

プランク衛星のデータ(2013)

宇宙マイクロ波背景輻射と宇宙の果て

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

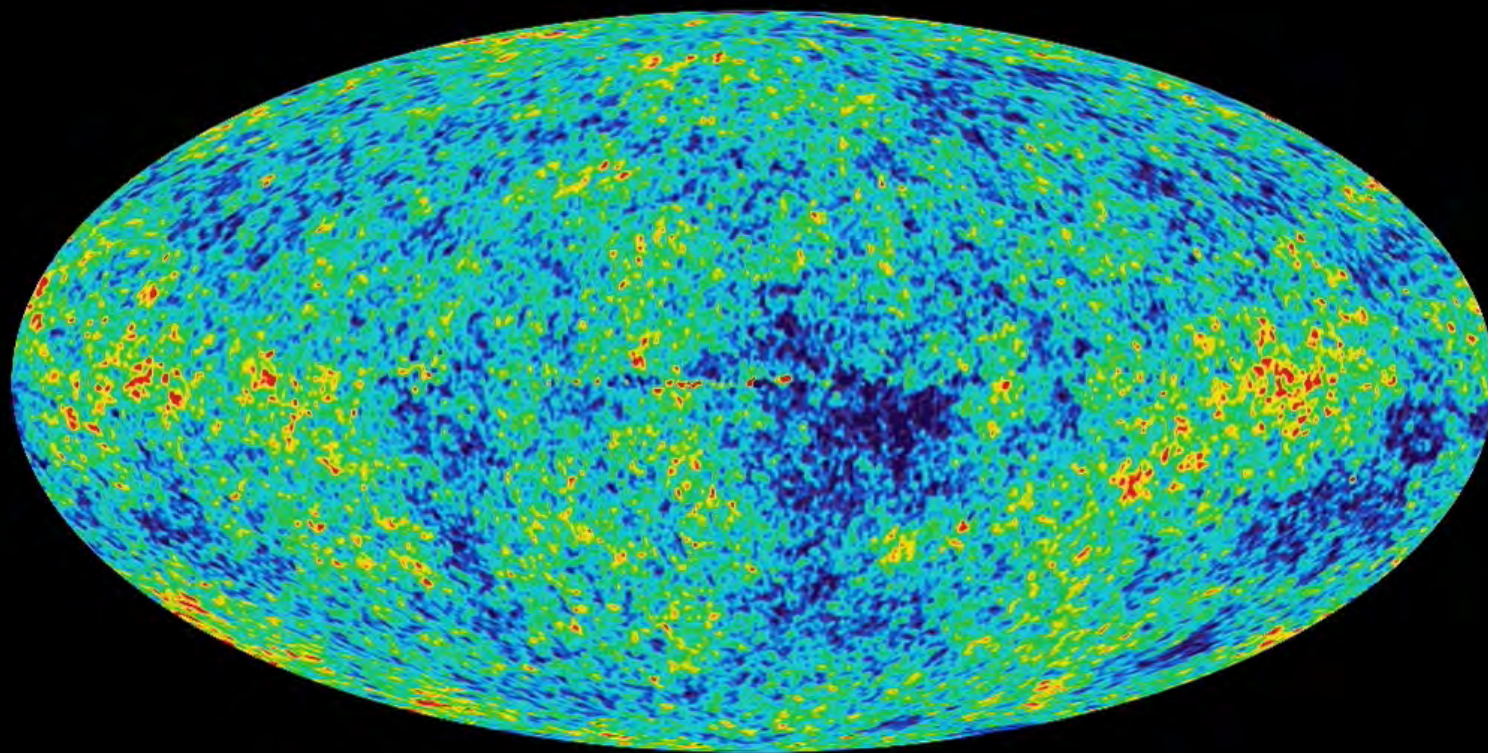


現在の銀河宇宙からマイクロ波背景輻射へ： 138億歳の現在から38万歳の過去へ



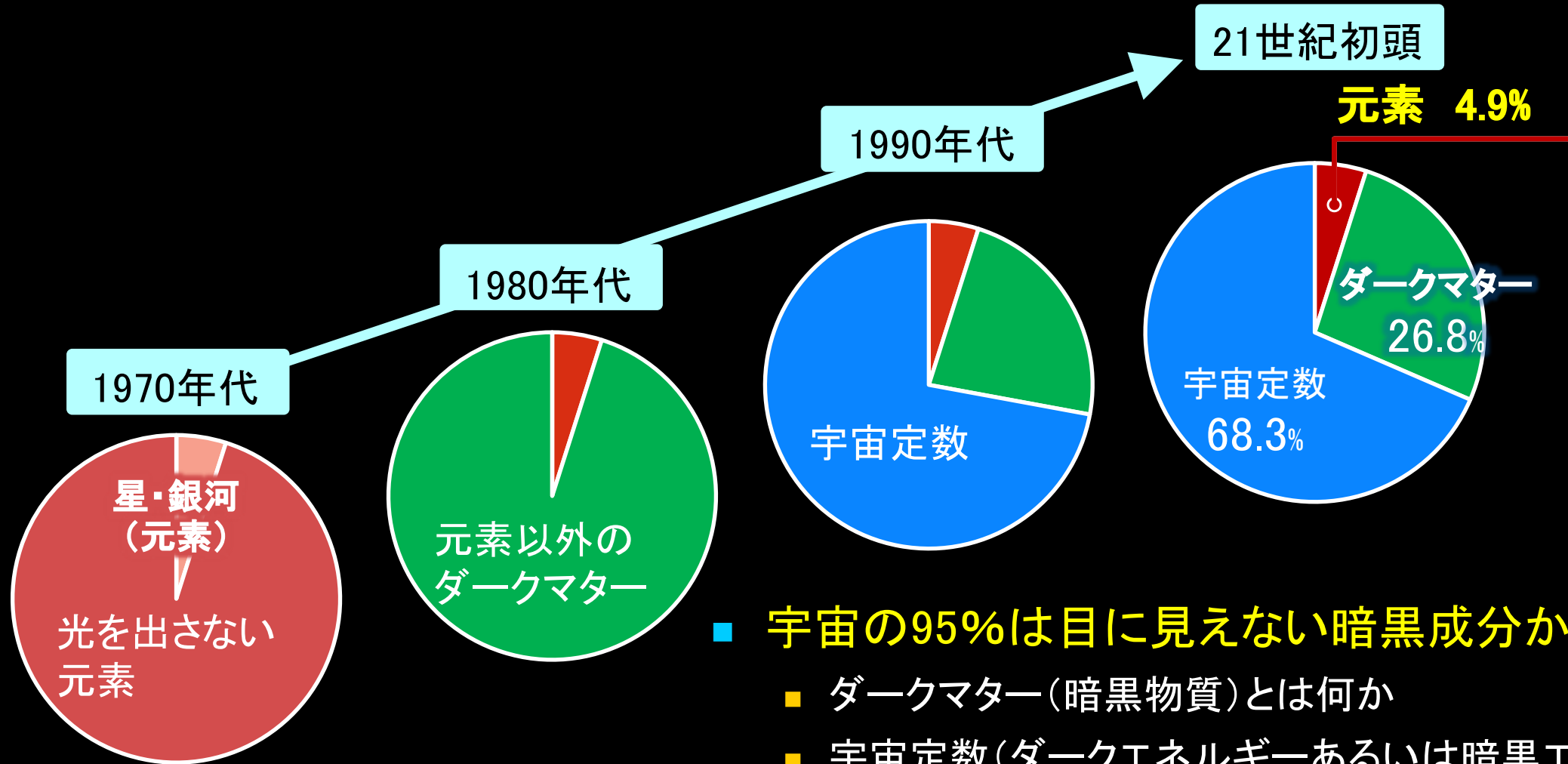
NASA / University of Chicago and Adler Planetarium and Astronomy Museum

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138億年までの進化



3. 標準宇宙モデル (Λ CDM)

世界は何からできている？



- 宇宙の95%は目に見えない暗黒成分からなる
 - ダークマター(暗黒物質)とは何か
 - 宇宙定数(ダークエネルギーあるいは暗黒エネルギーの一種)とは何か

標準宇宙モデル (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) を組み合わせて **平坦な Λ CDMモデル** と呼ばれる

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

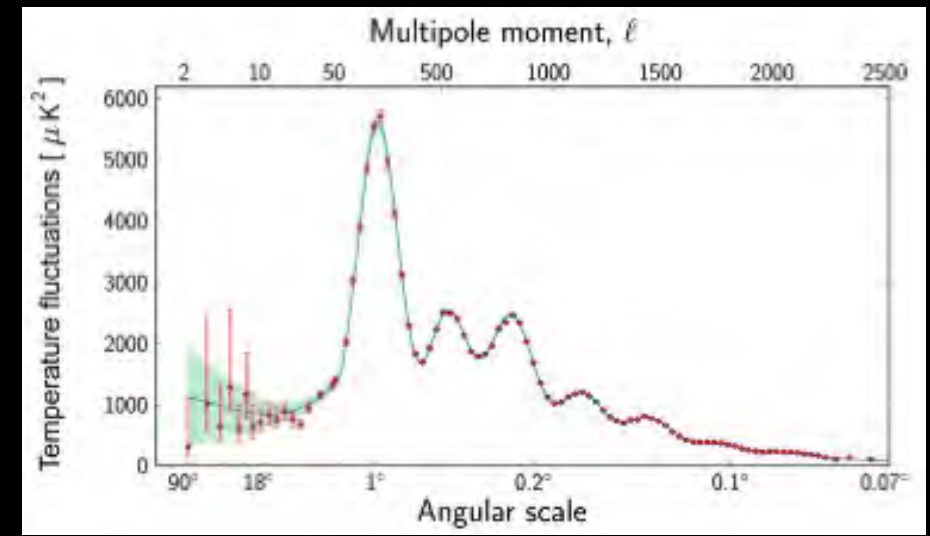
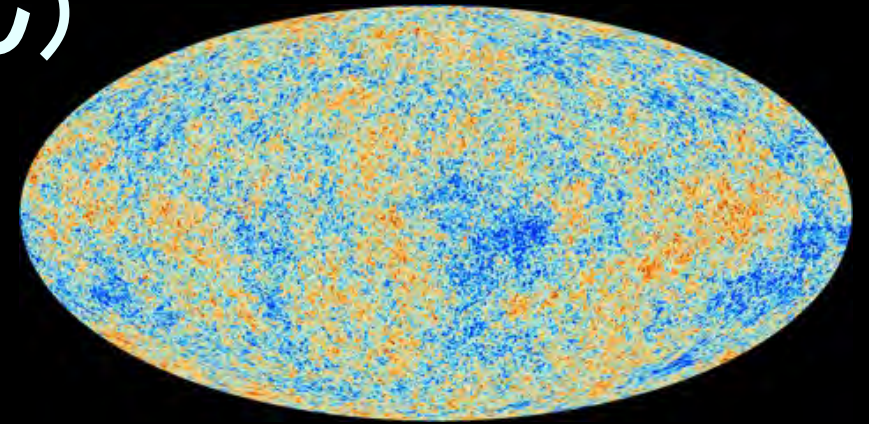
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

- 古文書を理解するための文法

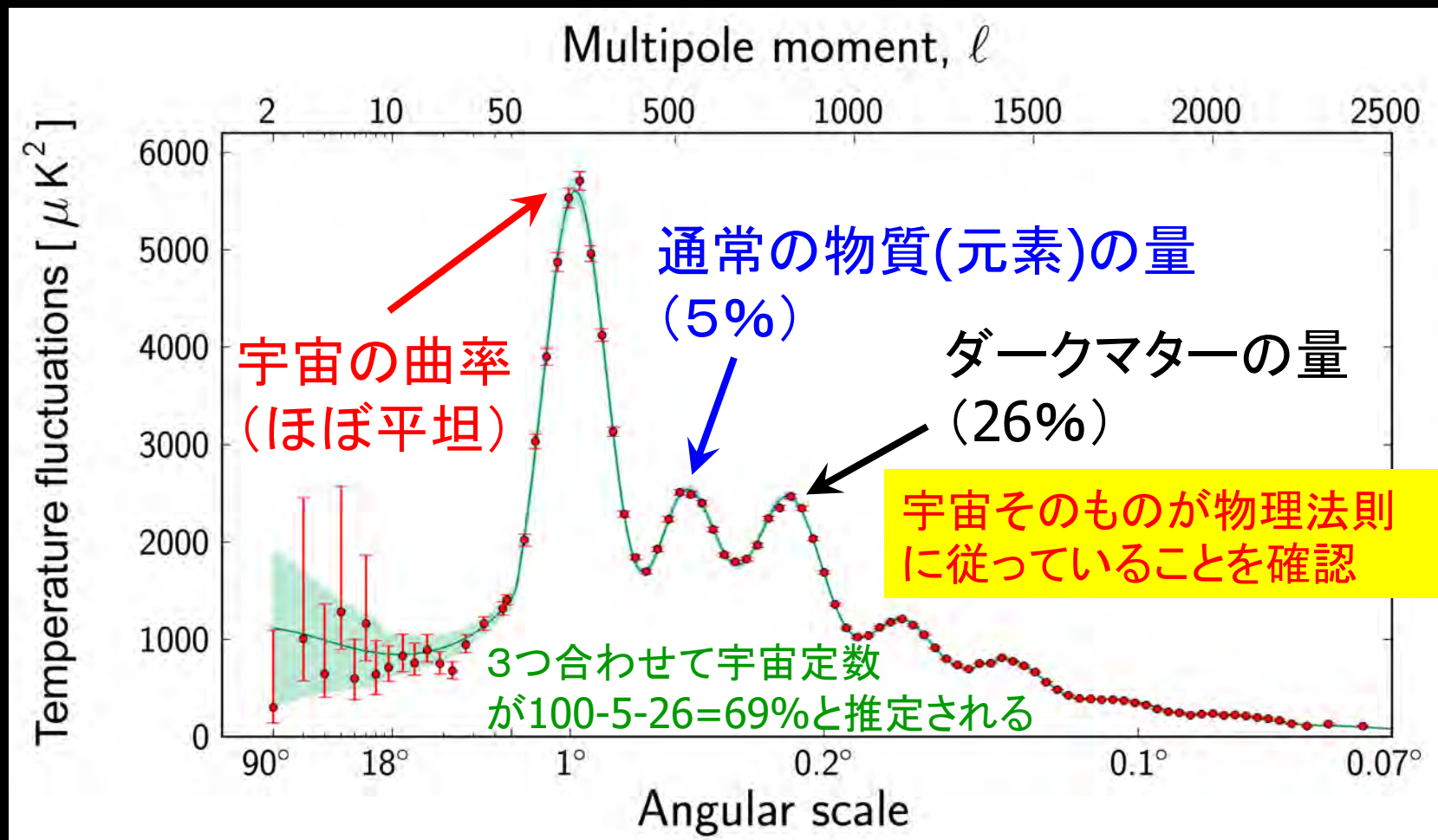
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

- 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つのパラメータで見事に説明できる



宇宙論パラメータ：定義

■ 標準宇宙モデル (flat Λ CDM model) の特徴

- ほぼ平坦な宇宙(空間曲率が0のユークリッド空間): $K \approx 0$
- 元素(バリオンと呼ばれることが多い): ρ_b
- ダークマター: ρ_d
- 宇宙定数(より一般的にはダークエネルギー): Λ

$$\Omega_b \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{b0}$$

$$\Omega_d \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{d0}$$

■ フリードマン方程式と宇宙論パラメータ

時刻 t

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_b + \rho_d) - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

現在 $t = t_0$
($a = a_0 = 1$)

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_{b0} + \rho_{d0}) - \frac{K}{a_0^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\Omega_K \equiv \frac{K}{a_0^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

$$1 + \Omega_K = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda$$

宇宙論パラメータ：推定値のまとめ

記号	名前	推定値
H_0	ハッブル定数 ($=100h\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$)	$(67.27 \pm 0.66)\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$
Ω_b	バリオン密度パラメータ	$(0.04917 \pm 0.00035) \left(\frac{h}{0.6727}\right)^{-2}$
Ω_d	ダークマター密度パラメータ	$(0.2647 \pm 0.0033) \left(\frac{h}{0.6727}\right)^{-2}$
Ω_Λ	(無次元化された)宇宙定数	0.6844 ± 0.0091
Ω_K	宇宙の曲率パラメータ	$(-4.0^{+3.8}_{-4.1}) \times 10^{-2}$
t_0	宇宙年齢	(138.13 ± 0.26) 億年

“Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters”
Astronomy & Astrophysics 594, A13(2016) の表4と表5に基づくまとめ

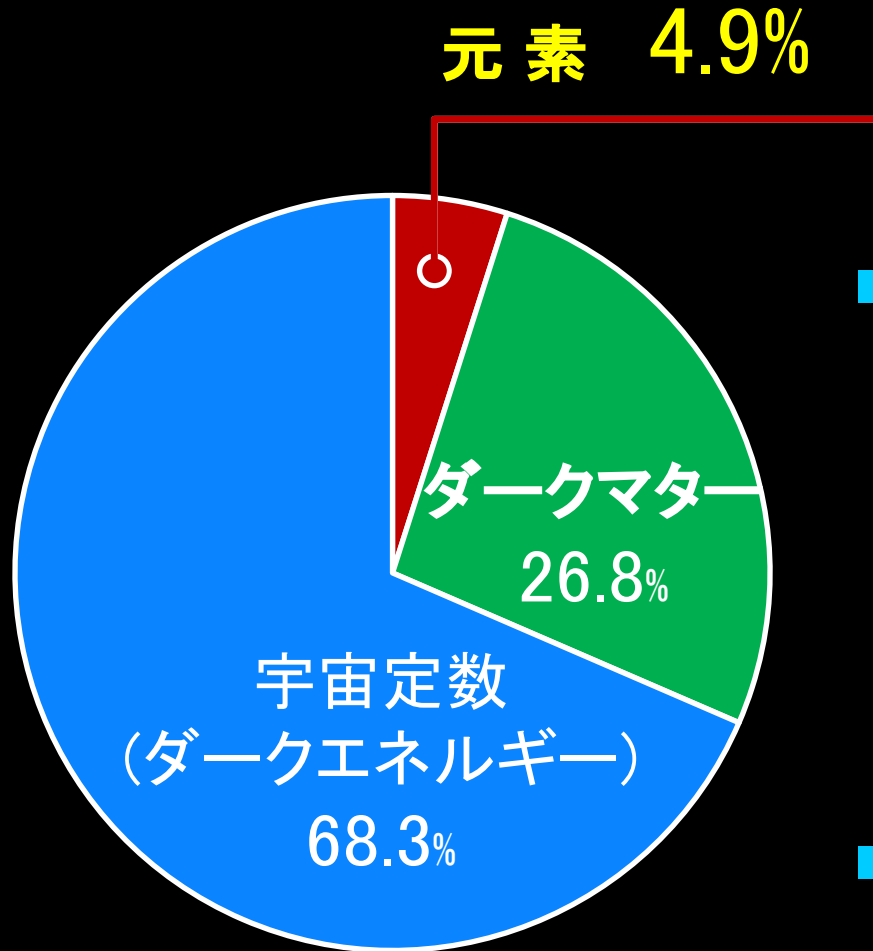
本当はこんな感じ（驚くほど精密であること だけわかってもらえれば、、、）

Parameter	Planck best fit	Planck [1]	CamSpec [2]	([2] - [1])/ σ_1	Combined
$\Omega_b h^2$	0.022383	0.02237 ± 0.00015	0.02229 ± 0.00015	-0.5	0.02233 ± 0.00015
$\Omega_c h^2$	0.12011	0.1200 ± 0.0012	0.1197 ± 0.0012	-0.3	0.1198 ± 0.0012
$100\theta_{MC}$	1.040909	1.04092 ± 0.00031	1.04087 ± 0.00031	-0.2	1.04089 ± 0.00031
τ	0.0543	0.0544 ± 0.0073	$0.0536^{+0.0069}_{-0.0077}$	-0.1	0.0540 ± 0.0074
$\ln(10^{10} A_s)$	3.0448	3.044 ± 0.014	3.041 ± 0.015	-0.3	3.043 ± 0.014
n_s	0.96605	0.9649 ± 0.0042	0.9656 ± 0.0042	+0.2	0.9652 ± 0.0042
$\Omega_m h^2$	0.14314	0.1430 ± 0.0011	0.1426 ± 0.0011	-0.3	0.1428 ± 0.0011
H_0 [km s ⁻¹ Mpc ⁻¹]	67.32	67.36 ± 0.54	67.39 ± 0.54	+0.1	67.37 ± 0.54
Ω_m	0.3158	0.3153 ± 0.0073	0.3142 ± 0.0074	-0.2	0.3147 ± 0.0074
Age [Gyr]	13.7971	13.797 ± 0.023	13.805 ± 0.023	+0.4	13.801 ± 0.024
σ_8	0.8120	0.8111 ± 0.0060	0.8091 ± 0.0060	-0.3	0.8101 ± 0.0061
$S_8 \equiv \sigma_8(\Omega_m/0.3)^{0.5}$	0.8331	0.832 ± 0.013	0.828 ± 0.013	-0.3	0.830 ± 0.013
z_{re}	7.68	7.67 ± 0.73	7.61 ± 0.75	-0.1	7.64 ± 0.74
$100\theta_*$	1.041085	1.04110 ± 0.00031	1.04106 ± 0.00031	-0.1	1.04108 ± 0.00031
r_{drag} [Mpc]	147.049	147.09 ± 0.26	147.26 ± 0.28	+0.6	147.18 ± 0.29

Table 1 of "Planck 2018 results VI. Cosmological parameter", A&A, 641, A6 (2020)

4. ダークマターとダークエネルギー

現在の宇宙をみたすもの



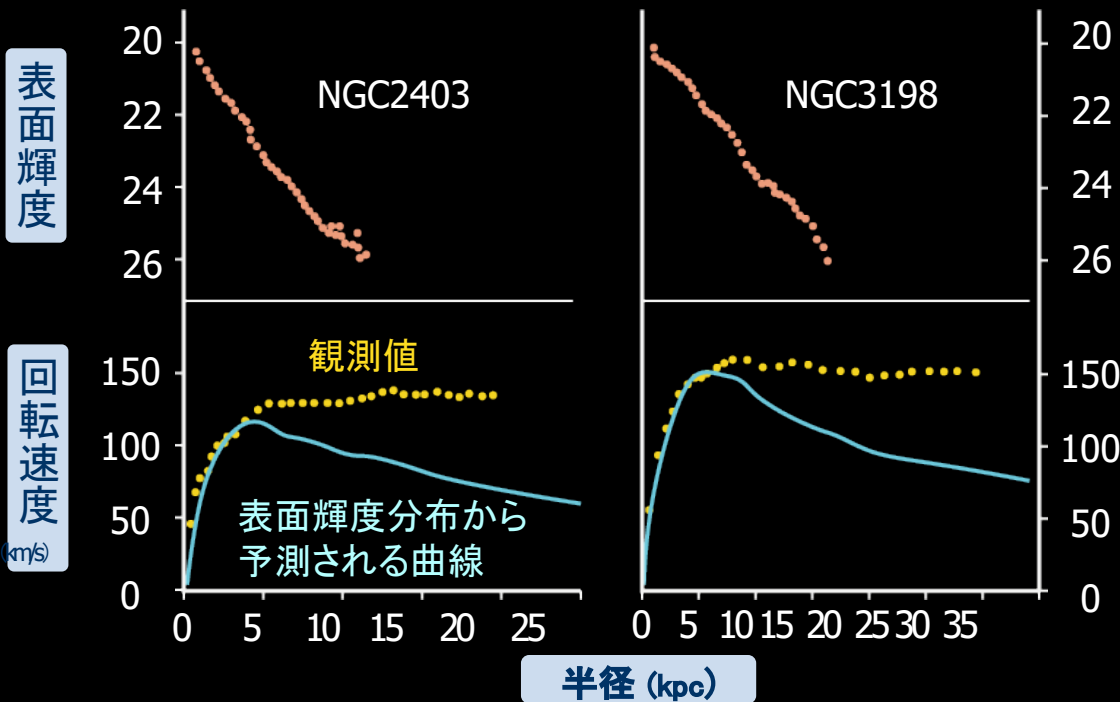
- 宇宙の約95%はその正体が未だ解明されていない暗黒成分
 - 主成分は宇宙定数 (ダークエネルギーの一種) で約7割
 - 次は約4分の1を占めるダークマター
- 身の周りの世界を構成している普通の物質 (元素) は、わずか5%

元素とバリオン

- 地上の物質のほとんどすべては元素（原子）からなる
 - 陽子と中性子は「バリオン」と呼ばれる複合粒子
 - そのため、普通の物質(=元素)のことを「バリオン」と呼ぶこともある
 - 宇宙もまた元素（=バリオン）だけで満たされているべきでは？
- バリオンは宇宙の全質量の約5%に過ぎない
 - ビッグバン元素合成理論と宇宙のヘリウムの存在量
 - 宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎ地図の解析
- 宇宙の組成は、未知の物理学の存在を示唆する重要な観測的証拠
 - 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エネルギー？あるいは一般相対論の限界？

ダークマター：銀河の平坦な回転曲線

- 渦巻き銀河には 光って見える円盤領域半径の2倍以上にまで広がった（星以外の）見えない質量が存在



van Albada and Sancisi (1986) のデータより作成

銀河（質量 M ）のまわりを公転する天体（質量 m ）の運動方程式

$$m \frac{v^2(r)}{r} = \frac{GmM(<r)}{r^2}$$

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(<r)}{r}}$$

したがって、 $v(r) = const.$ ならば

$$M(<r) \propto r$$

ダークマター：クエーサーの重力レンズ多重像

重力レンズ効果

- 質量の存在のために空間が歪んだ結果、光の進路が曲がる一般相対論的現象
- 銀河(団)背後にある1つのクエーサーが多重像になる
- この効果から銀河(団)質量を推定すると光って見えている質量の数倍にもなる

銀河団 SDSS J1004+4112

European Space Agency, NASA, Keren Sharon
(Tel-Aviv University) and Eran Ofek (CalTech)

ダークエネルギー：宇宙の加速膨張と宇宙定数

■ 宇宙の膨張則

- 宇宙の速度 $\dot{a} > 0$ \Rightarrow 宇宙が膨張している(1929)
- 宇宙の加速度 $\ddot{a} > 0$ \Rightarrow 宇宙の膨張は加速している(1998)

■ ニュートン力学による運動方程式

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

■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- 質量密度 ρ のみならず圧力 p もまた重力源となる
- $\Lambda > 0$ でないと、右辺は必ず正(減速膨張)となる $\Leftrightarrow \Lambda$ は実効的な斥力源

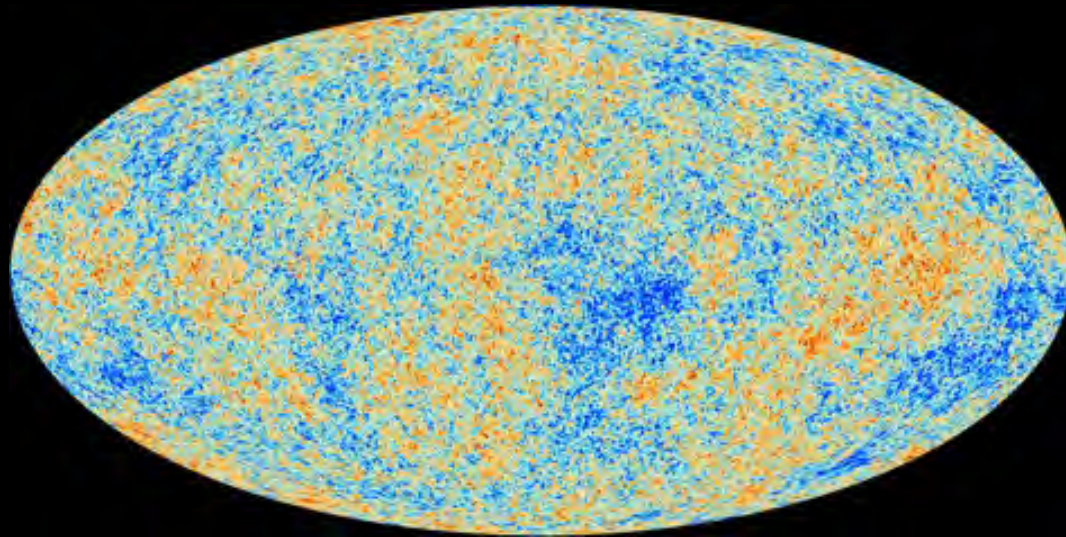
宇宙定数か ダークエネルギーか

- 宇宙の加速膨張を説明するために必要な条件
 - (ダークマターとは異なり)空間的に局在するのではなく宇宙全体を一様にみたす
 - (ダークマターとは異なり)引力ではなく、斥力を及ぼす
 - 実効的な密度を ρ_x 圧力を p_x としたとき、 $\rho_x + 3p_x < 0$
- 宇宙の状態方程式
 - 圧力と密度の比を $w = p_x/\rho_x$ とすると、宇宙定数なら $w = -1$
 - 観測的には $w = -1.019^{+0.075}_{-0.080}$
 - 宇宙定数、あるいはそれと似てはいるが異なる存在？
⇒ ダークエネルギー

5. まとめ

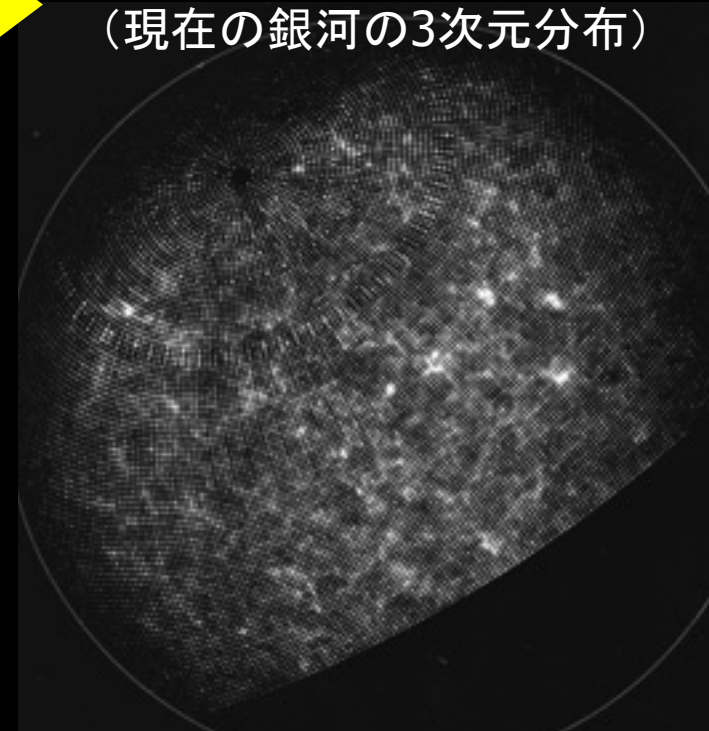
現在の宇宙(世界)に関する全情報が 原理的にはここに刻み尽くされている

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)



物理法則

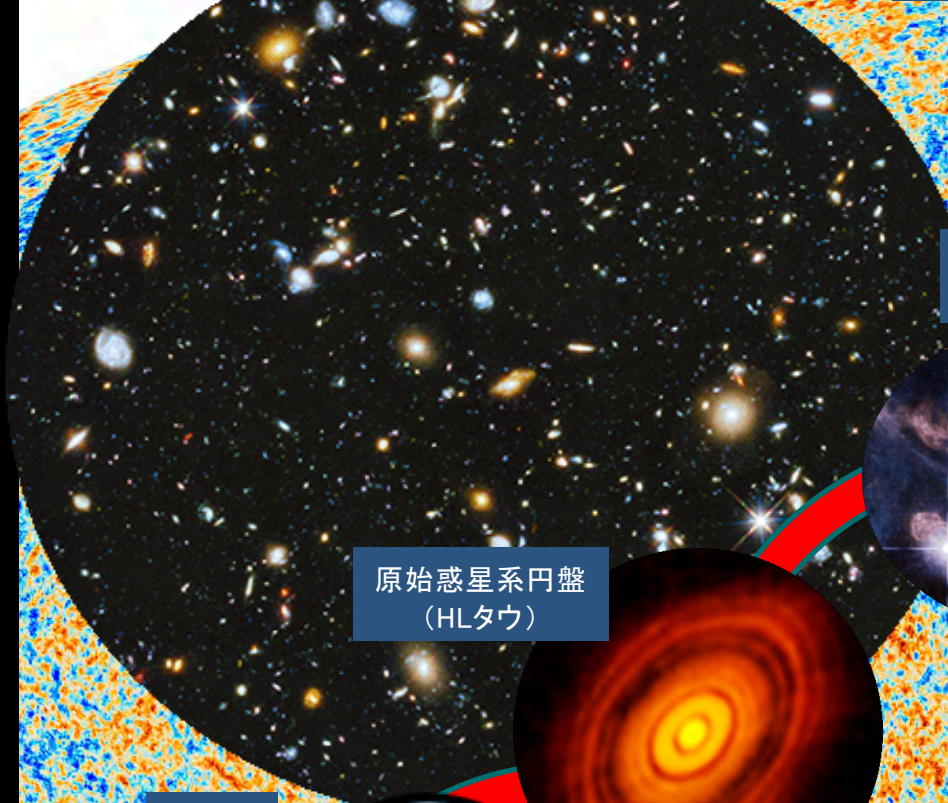
宇宙の構造形成進化史
(現在の銀河の3次元分布)



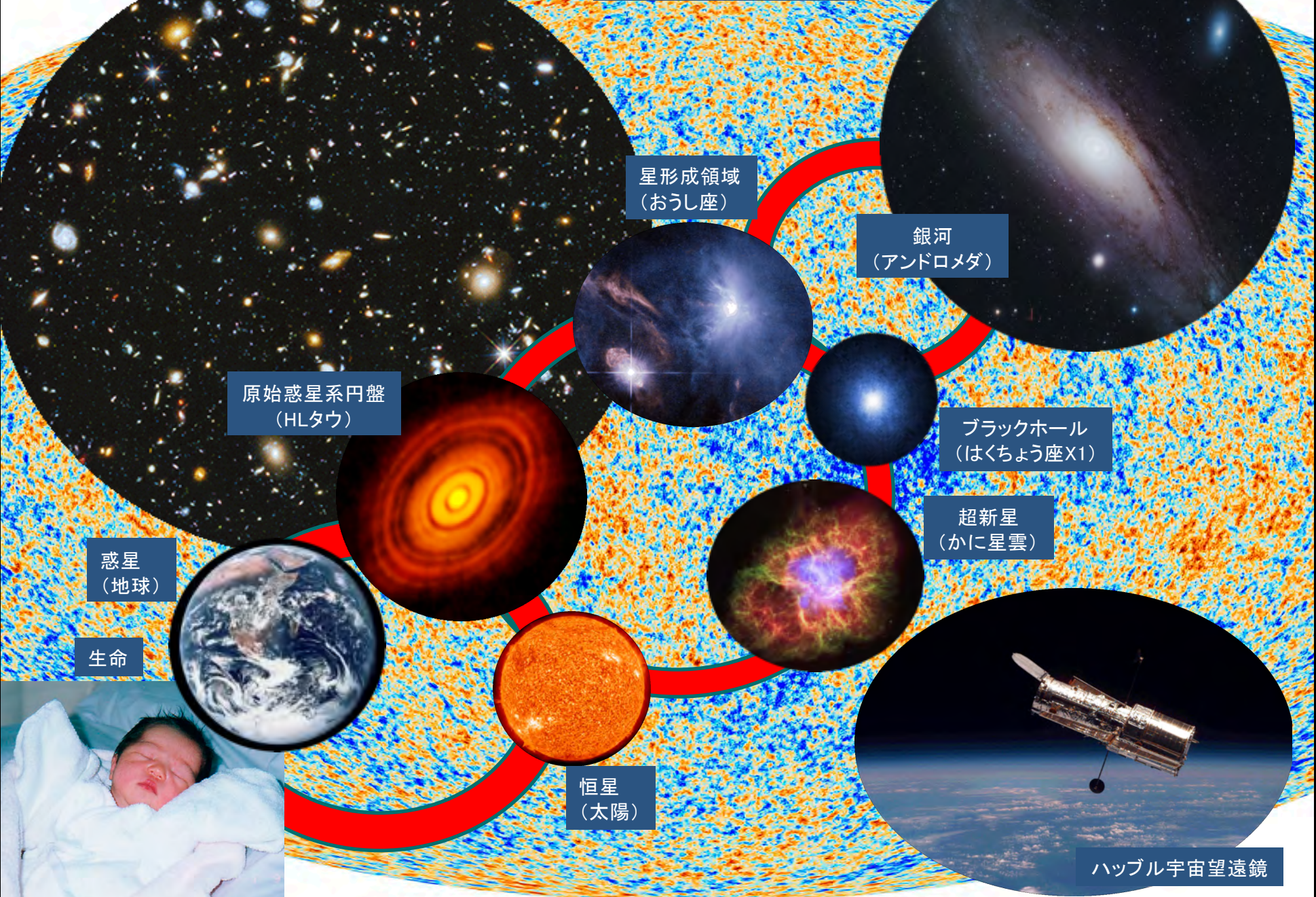
■ 宇宙論の中心的教義

初期条件+(既知の)物理法則 = 現在の宇宙

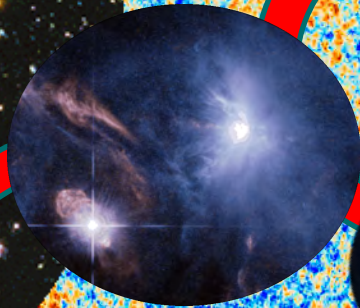
約130億年前の宇宙
(ハッブルウルトラディープフィールド)



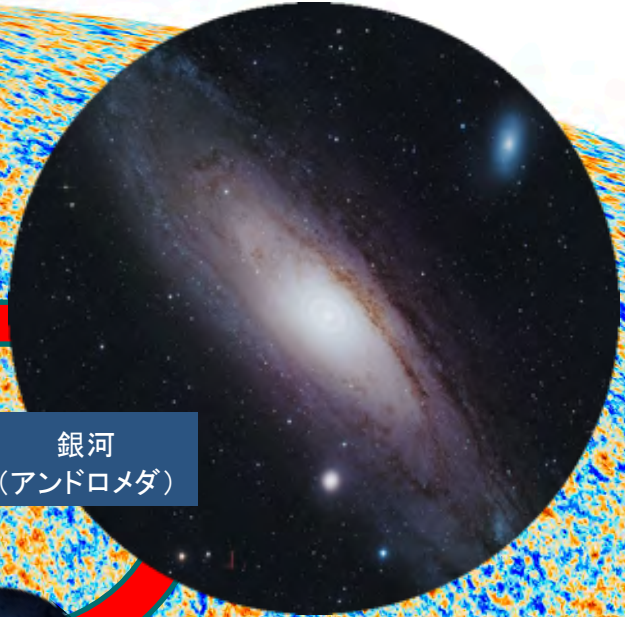
138億年前の宇宙
(宇宙マイクロ波背景放射)



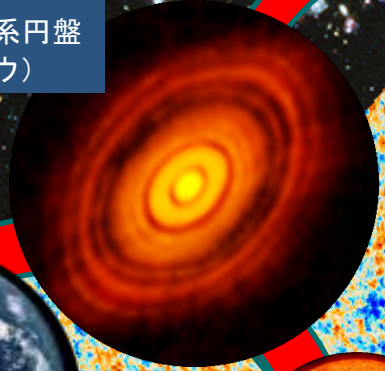
星形成領域
(おうし座)



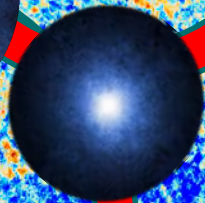
銀河
(アンドロメダ)



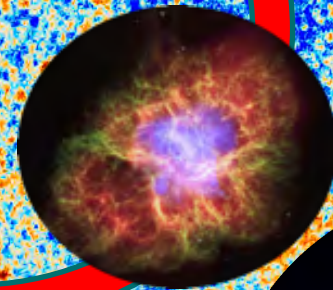
原始惑星系円盤
(HLタウ)



ブラックホール
(はくちょう座X1)



超新星
(かに星雲)



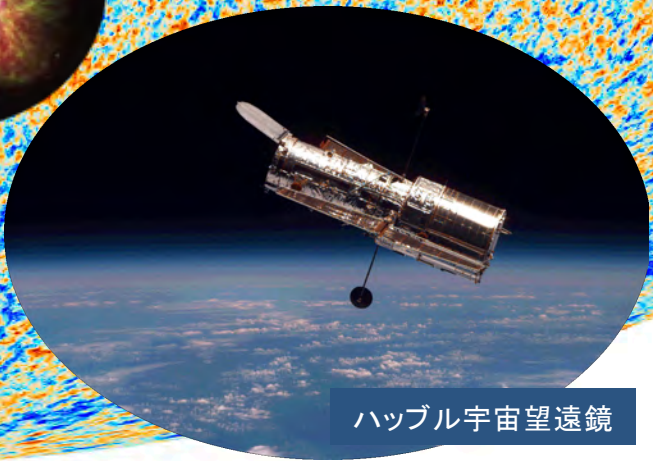
惑星
(地球)



生命



恒星
(太陽)



ハッブル宇宙望遠鏡

宇宙 = 天体 + 生命 + 技術 + 社会...



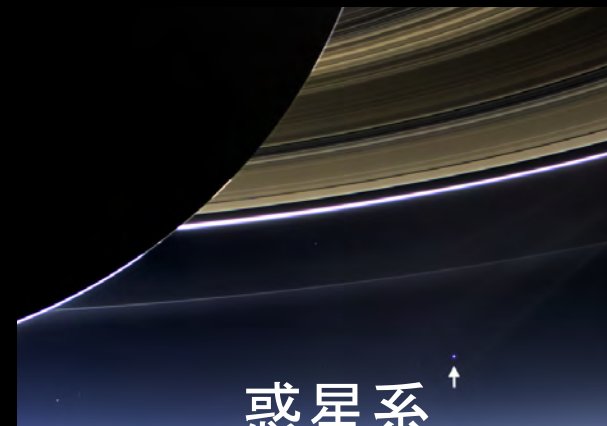
宇宙の構造

NASA, ESA, S.Beckwith (STScI) and the HUDF Team



銀河

NAOJ and HSC project (2013)



惑星系[↑]

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

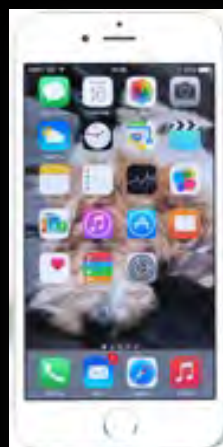


NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

地球と月



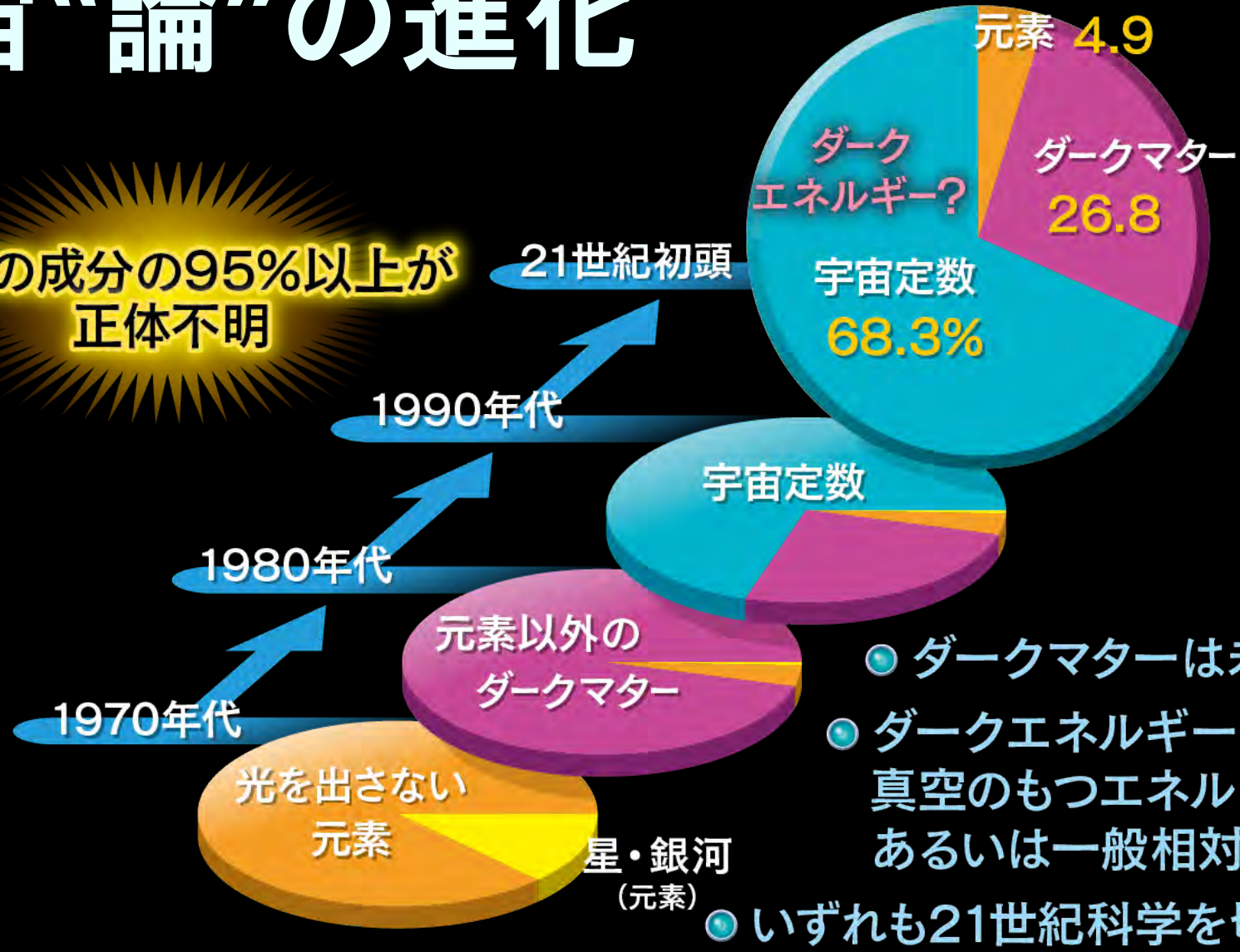
生命と知性



技術と社会

宇宙“論”の進化

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

宇宙観は本当に進歩したか？

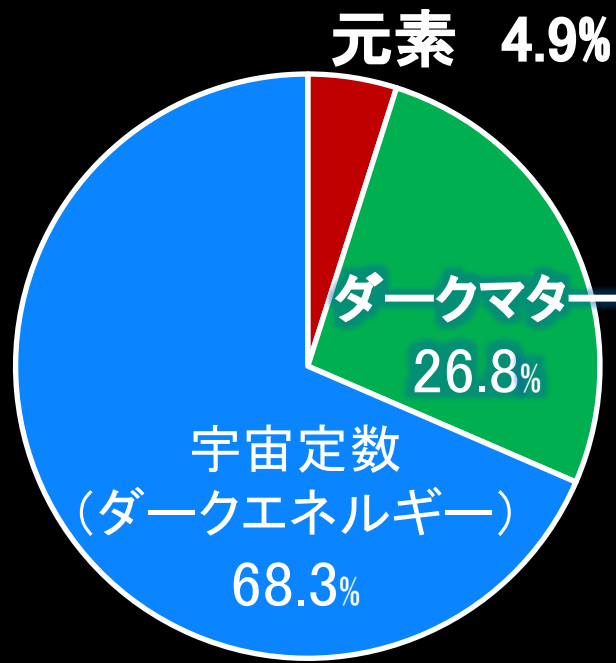
古代エジプト



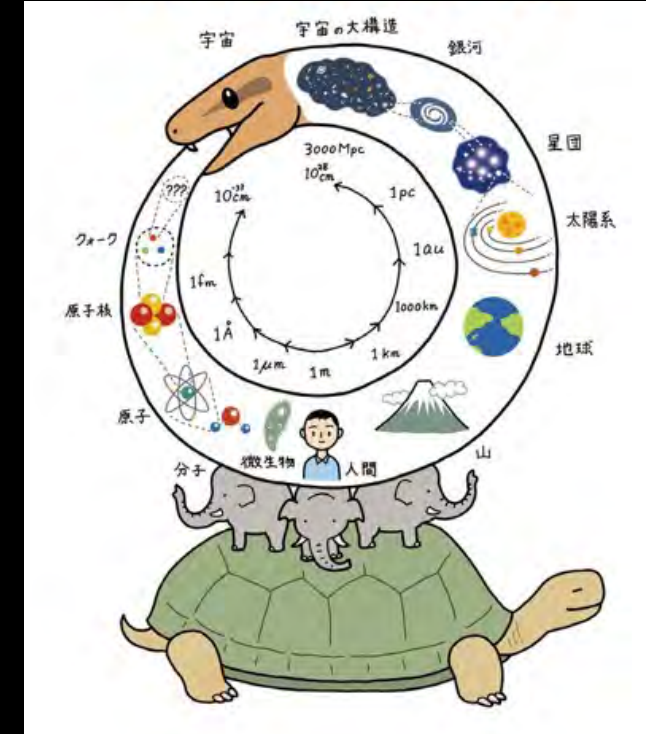
古代中国



古代インド



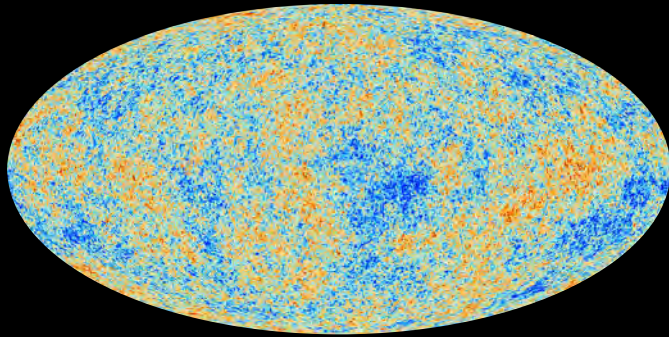
↓
←→
進歩？



宇宙を知り世界を問う

■ 天文学・宇宙物理学の進歩 ⇔ 新たな世界観

- 宇宙・世界の始まりと終わり
- 宇宙・世界は何からできているか
- 宇宙と生命



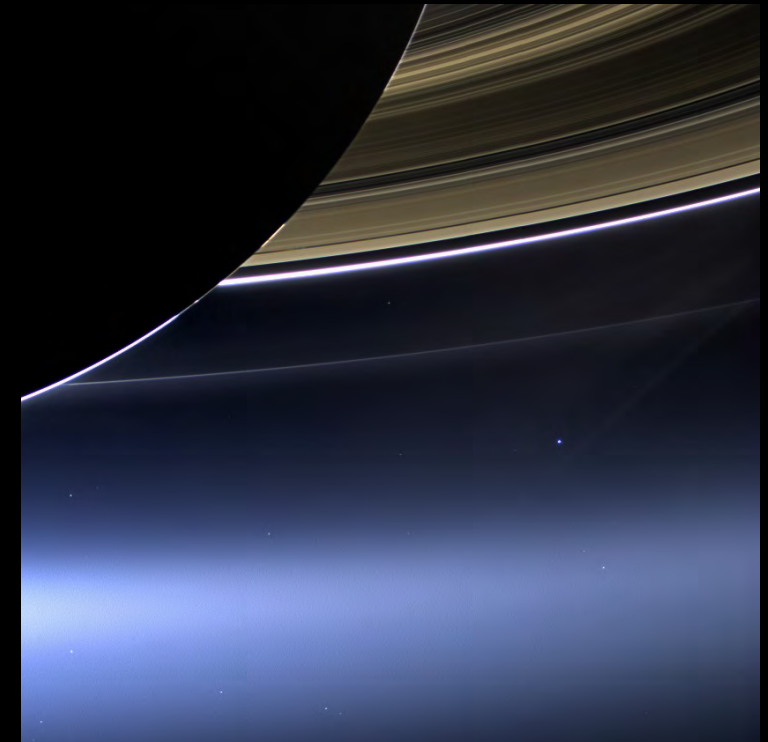
プランク探査機による
宇宙マイクロ波背景放射全天温度地図

ESA and the Planck Collaboration – D. Ducros



ボイジャー1号が撮影した地球
(ペイル・ブルー・ドット)

NASA/JPL



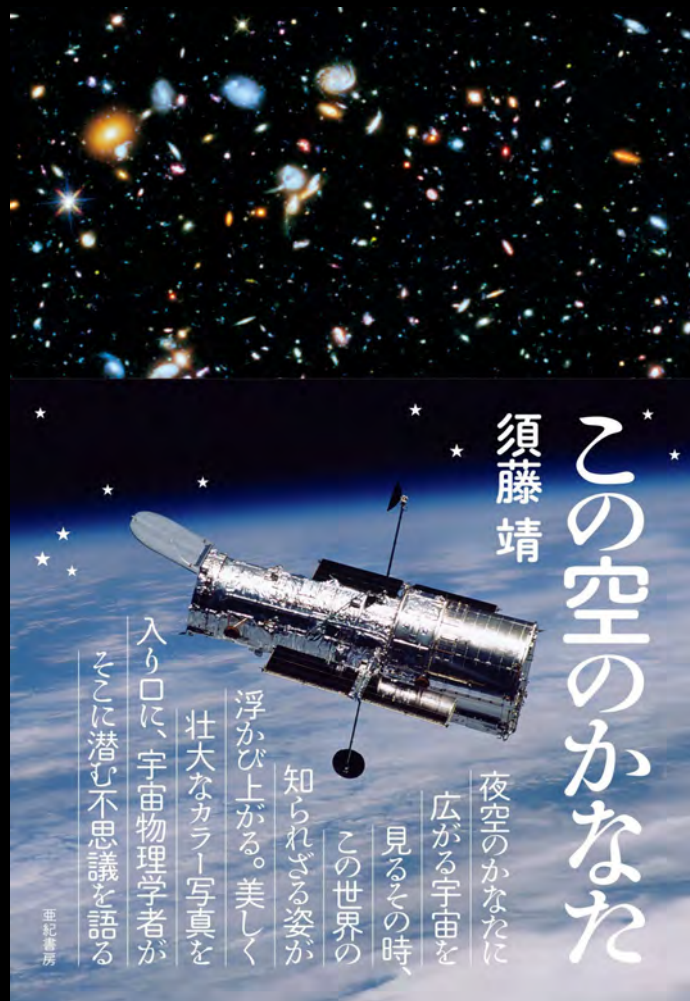
カッシーニ探査機が撮影した地球

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

今回の話に興味を持たれたなら



講談社ブルーバックス 2019年



亜紀書房 2018年



毎日新聞出版 2018年

東京大学出版会
初版 2006年
第2版 2021年



毎日新聞出版
定価・本体1500円(税別)

世界の「見方」が変わる
最新宇宙論入門

ついでに、このような哲学者とのバトルもあります



河出書房新社 初版 2013年



河出書房新社 増補版 2021年