

ビッグバンモデルを 正しく理解する

東京大学大学院
理学系研究科
物理学専攻
須藤 靖

ひの市民大学@日野市社会福祉協議会建物
2020年12月5日 14:00-16:00

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2020j.html



今日の話の内容予定

- I. ビッグバンとは何か
- II. ビッグバンの証拠
- III. ビッグバンに関するよくある誤解
- IV. ビッグバンの予言する宇宙
- V. ビッグバンが教えてくれない宇宙
- VI. まとめ

ビッグバンとは何か

let there be light

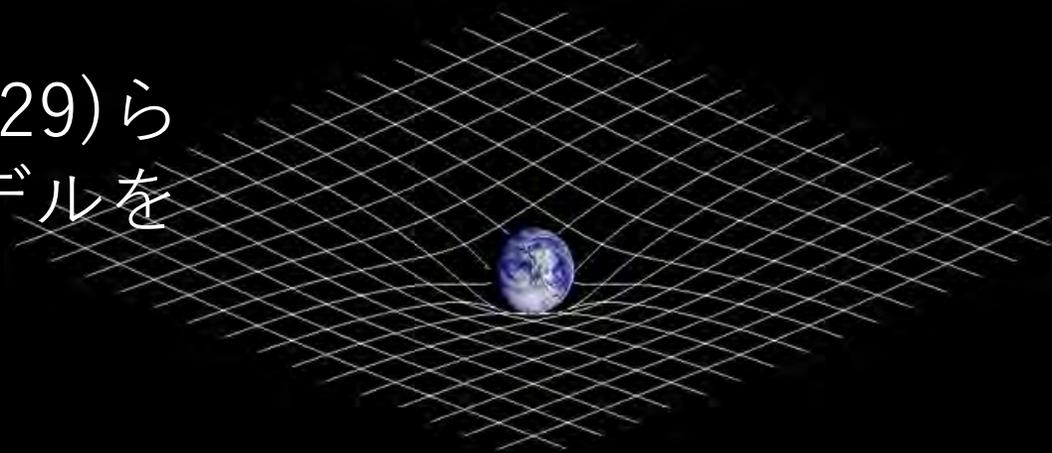
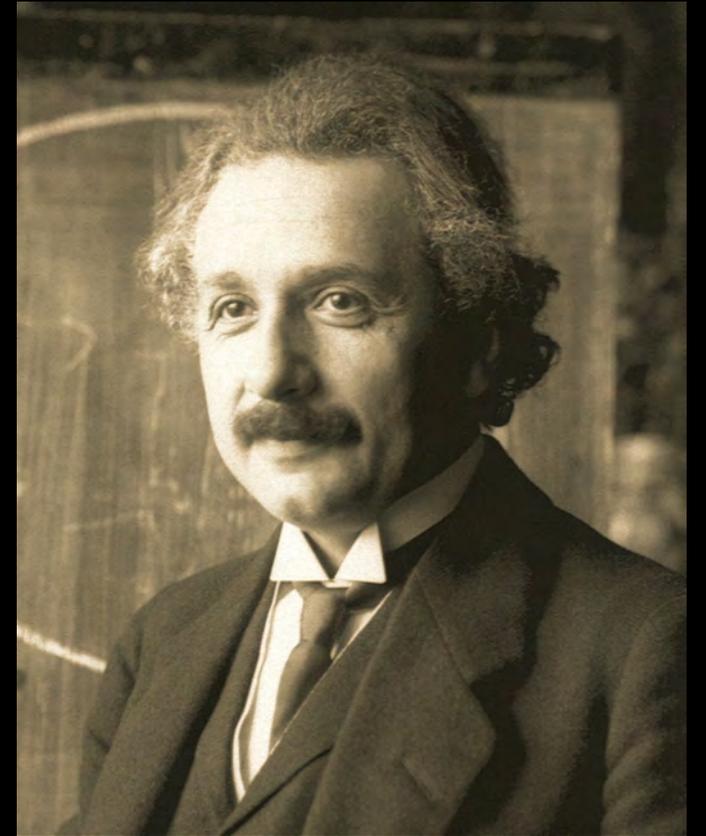
- 旧約聖書 創世記 天地創造
 - 初めに、神は天地を創造された。
 - 地は混沌であって、闇が深淵の面
にあり、神の霊が水の面を動いて
いた。
 - 神は言われた。「光あれ。」
こうして、光があった。



カリフォルニア大学
バークレー校のロゴ

一般相対論と宇宙

- **アインシュタインの一般相対論 (1916)**
 - 重力は「力」ではなく、時間と空間の幾何学的性質（曲がり、歪み）の帰結
 - 宇宙の中にある物質の運動だけでなく、物質を包み込む「器」である宇宙そのものの進化を記述可能とした
 - フリードマン(1922)、ルメートル(1929)らが一般相対論に基づいた膨張宇宙モデルを導く



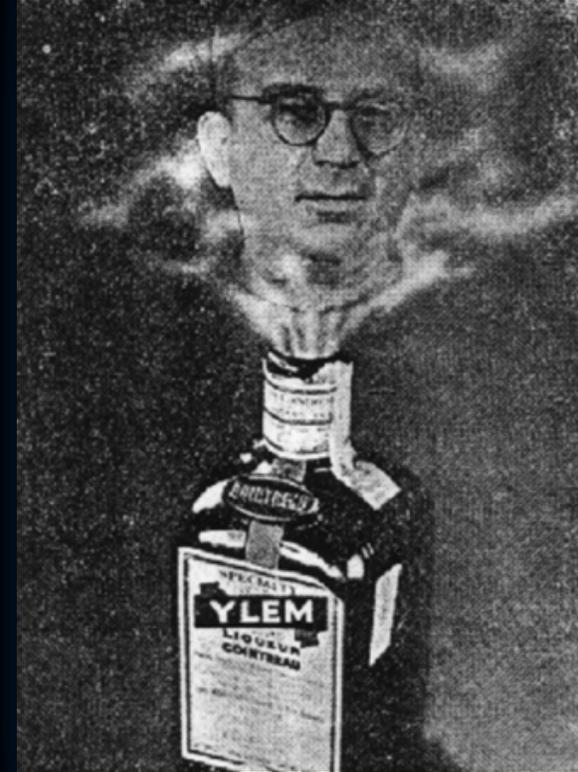
ガモフ、ホイル、ビッグバン

■ ジョージ・ガモフ (ビッグバンの生みの親)

- 宇宙が膨張しているなら、逆に過去は圧縮されて、高温・高密度の状態になっているはず
- つまり宇宙の力学的な進化だけではなく、その中の物質の進化も同時に考えるべき
- ガモフは宇宙初期の物質をウレムと名付け、その反応から宇宙のすべての元素が生まれたと考えた

■ フレッド・ホイル (ビッグバンの名付け親)

- 宇宙は進化しないとする定常宇宙論者のホイルは、このガモフの進化宇宙論を「宇宙が派手に爆発するとかいうトンデモ説」=ビッグバンと揶揄した



Getty Images

元素の起源： ガモフ、林、ホイル

■ ガモフとその学生達 (1948)

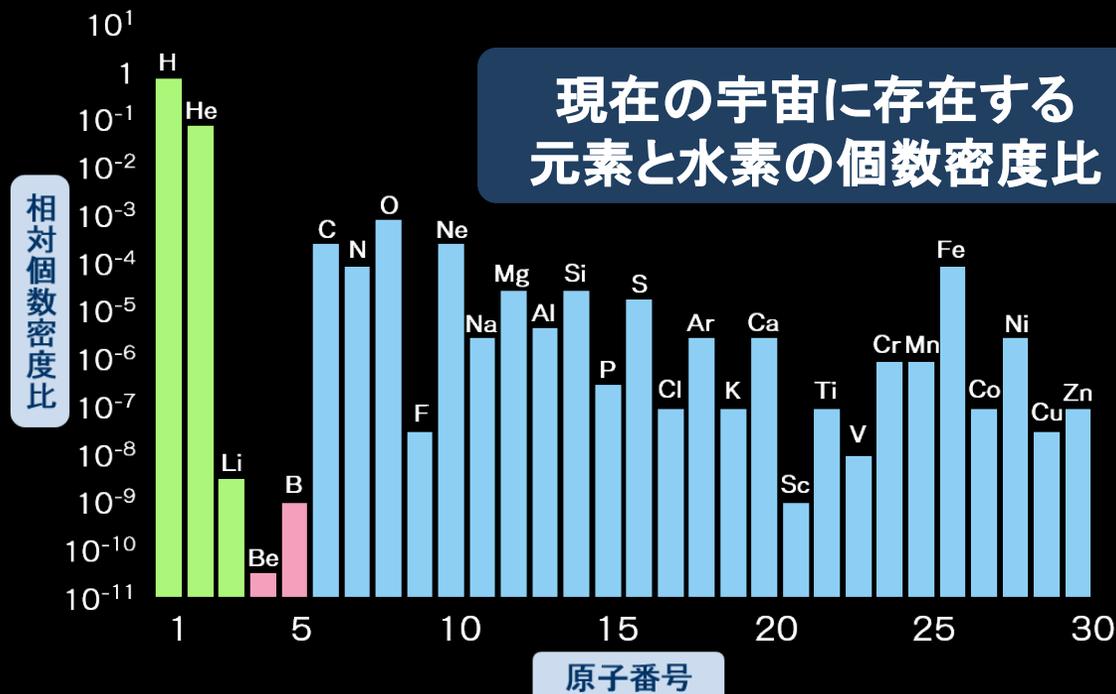
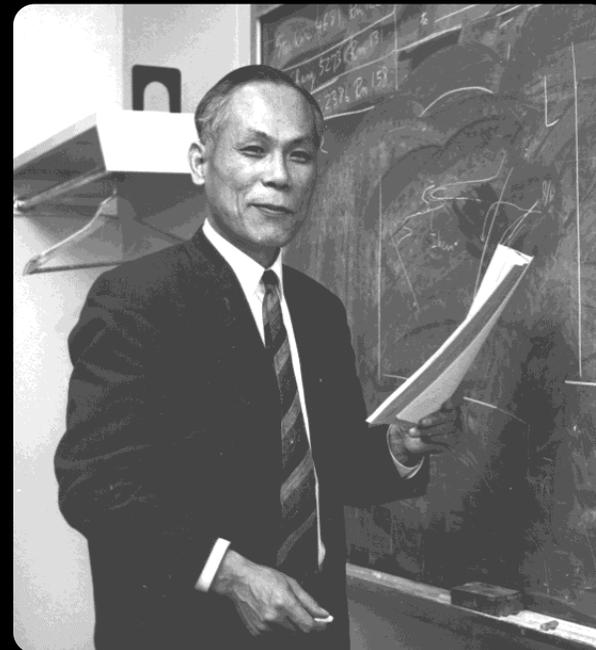
- 宇宙初期にすべての元素が生まれた
- 高温の宇宙名残の光が現在の宇宙を満たしているはずだと予言した

■ 林忠四郎 (1950)

- 宇宙初期には軽元素（主としてヘリウム）しか合成できないことを証明した

■ ホイル達(1957)

- 星の内部で炭素よりも重い元素が合成される物理過程を確立した

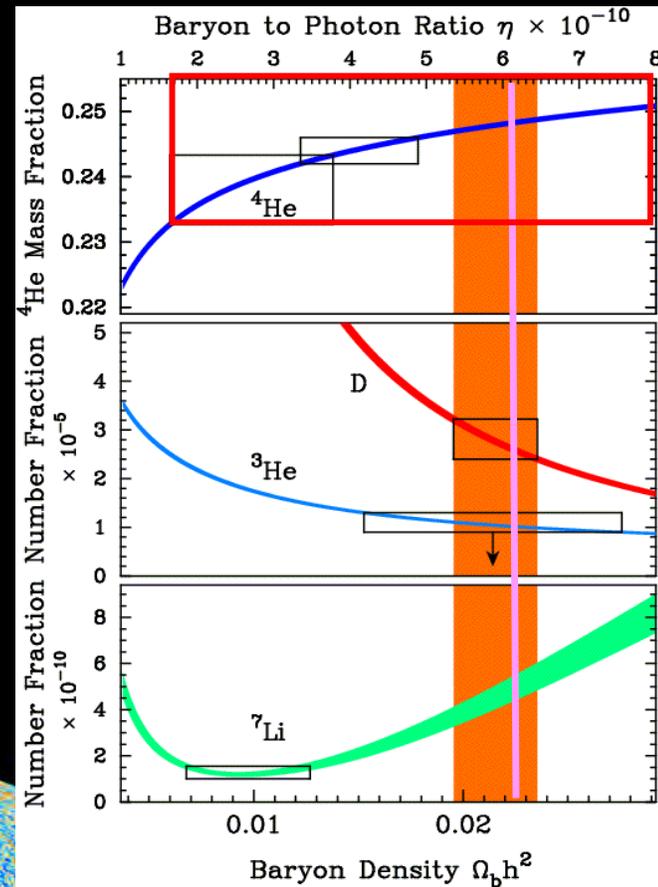
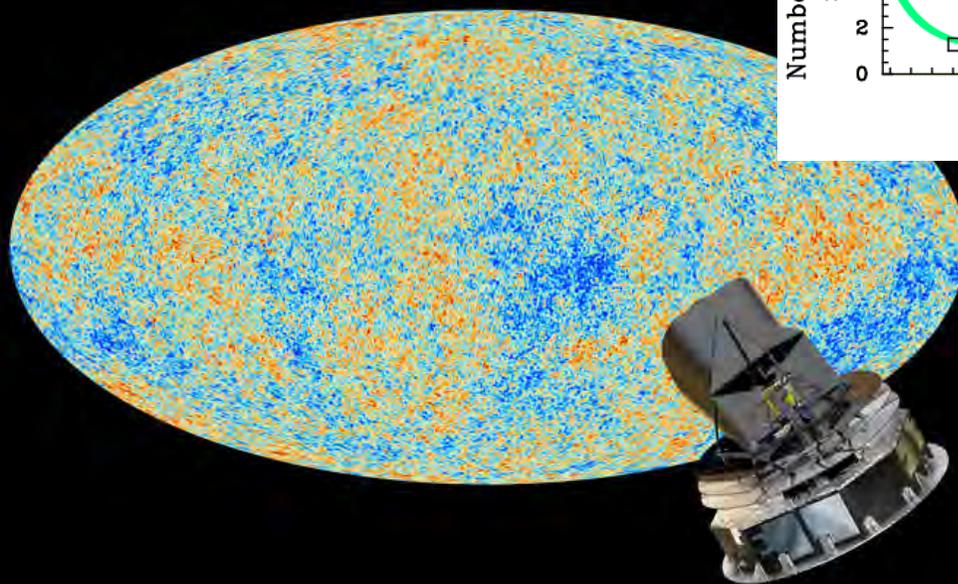
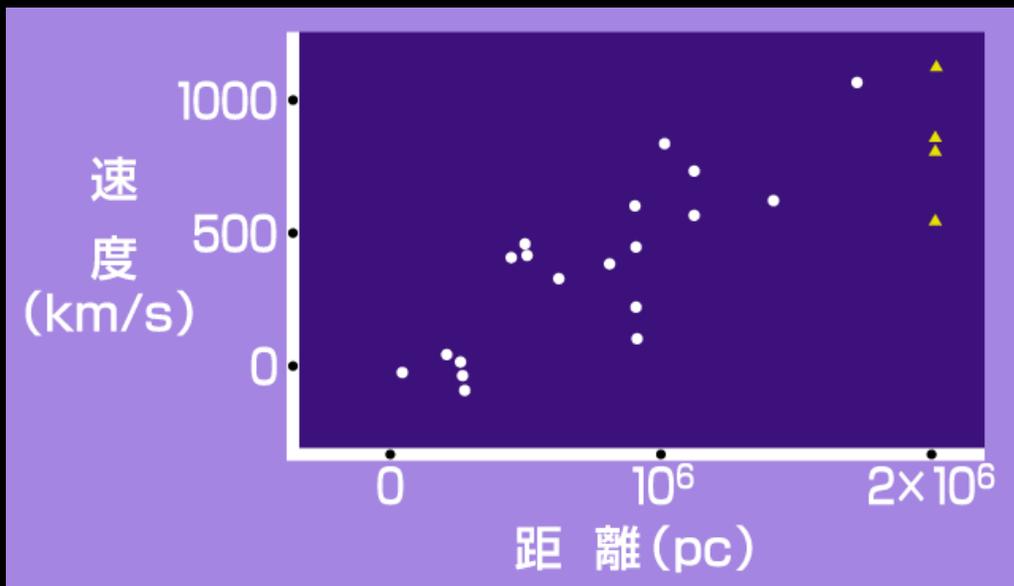


つまり、ビッグバンとは

- 本来は、誕生直後の極めて高温高密度の状態の宇宙を意味する単語
 - ただし今では、高温高密度の状態から出発した宇宙が、その後の膨張とともに物質進化と天体形成を繰り返しながら成長していく宇宙の描像（ビッグバン宇宙論、ビッグバンモデル）を指すほうが多い
- 宇宙論研究者は、宇宙が誕生した瞬間とビッグバンとを区別して用いる
 - 「宇宙はビッグバンで誕生した」は間違いとは言えないが正確ではなく、「宇宙は誕生直後にビッグバンの状態となった」という言い方が好まれる（後で詳しく説明する）

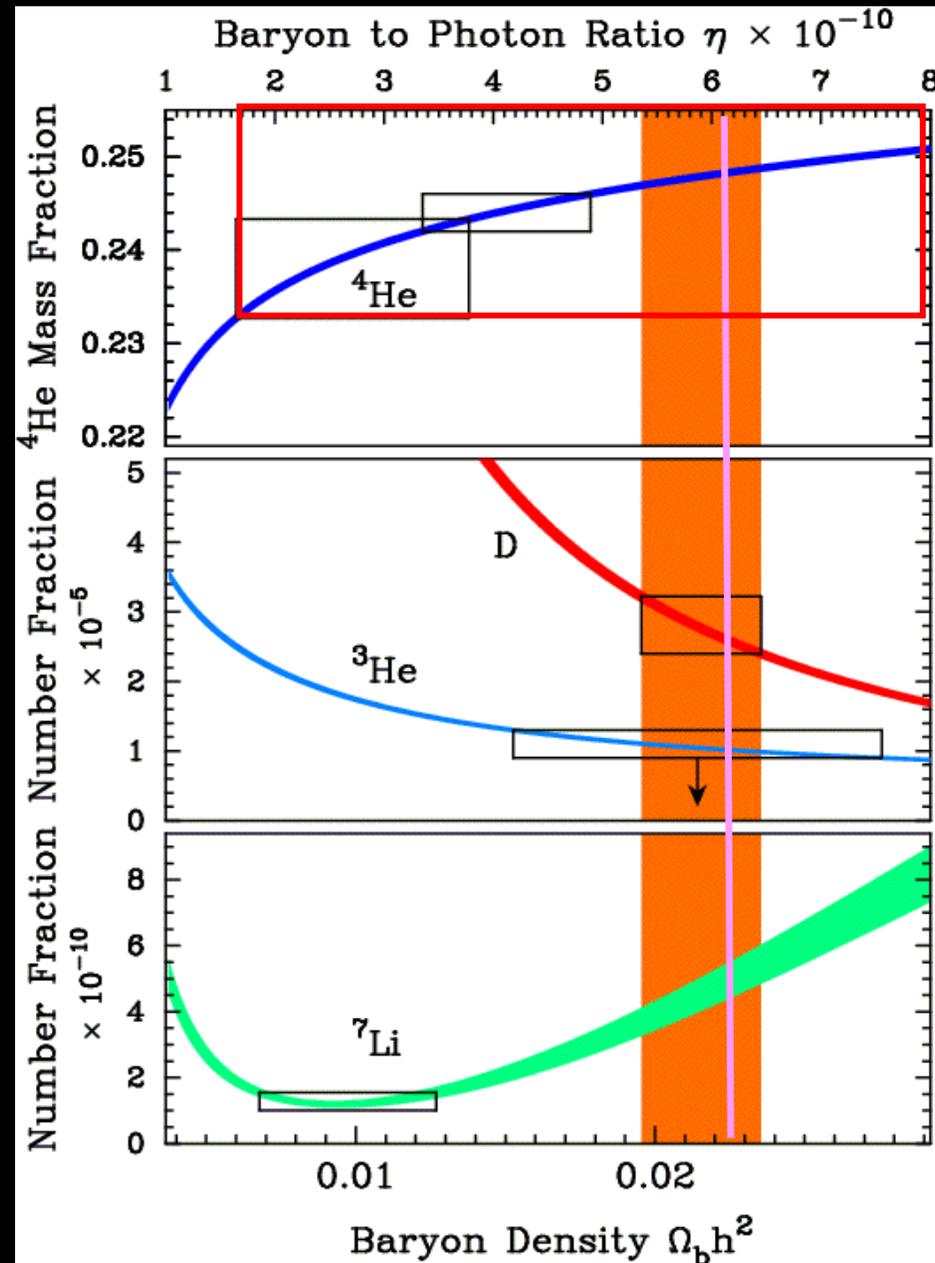
II ビッグバンの観測的証拠

- ヘリウムの存在量
- ハッブルの法則
- 宇宙マイクロ波背景放射



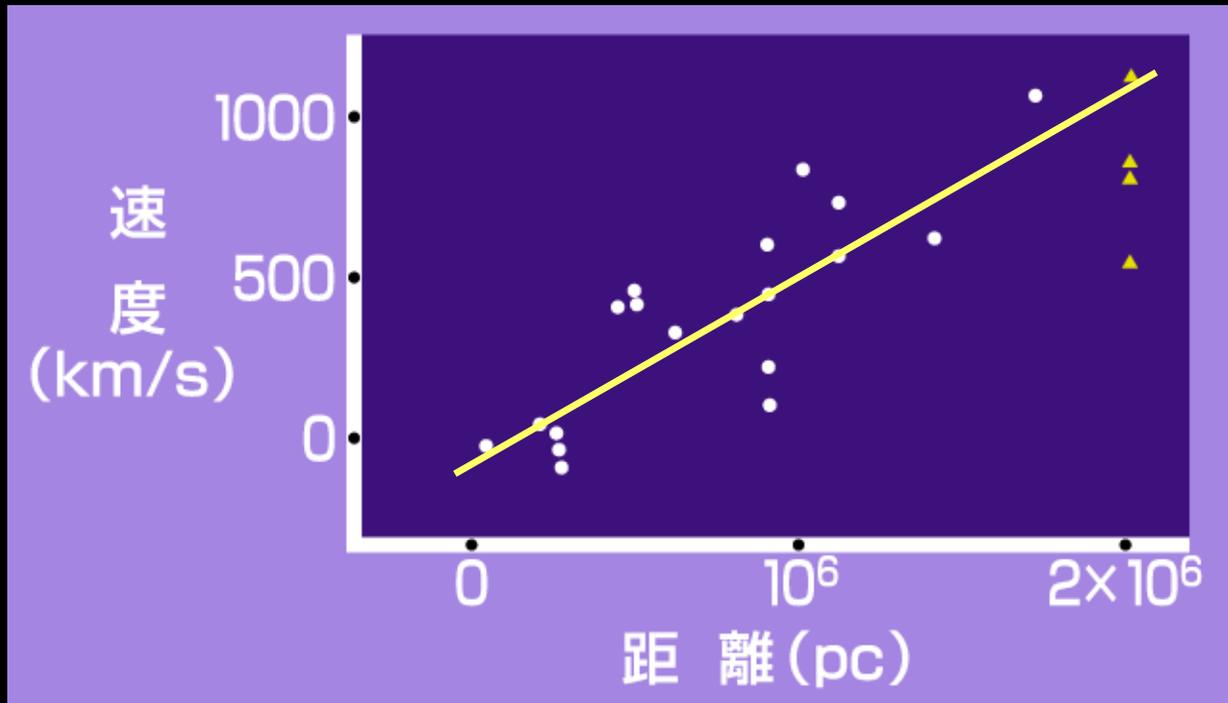
ビッグバン元素合成理論 と軽元素観測量との比較

- ビッグバン元素合成理論の予測は、観測されているヘリウム、重水素、リチウムの存在量を同時に説明する
- その結果、現在の宇宙に存在する全元素の割合が約5%であることがわかった



エドウィン ハッブル (1889-1953)

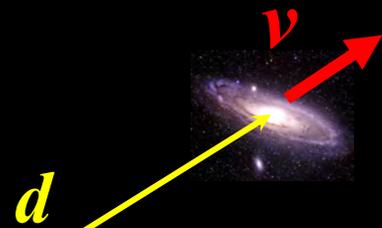
- 遠方の銀河はその距離に比例した速度で遠ざかっている (1929年)
- ハッブルの法則 $v = H_0 r$



ハッブルの法則と宇宙年齢

■ 我々(の銀河系)は宇宙の特別な中心ではない

■ ハッブルの法則にしたがって時間を遡ると
すべての天体は現在から H_0^{-1} だけ過去には
原点に集まる



後退速度が一定
ならば、 d/v だけ
過去に遡れば
宇宙全体が一点
に集まる

ハッブル定数

$$H_0 = 100h \text{ km/s/Mpc} \\ \approx 1/(100h^{-1} \text{ 億年})$$

$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} \approx 100h^{-1} \text{ 億年}$$

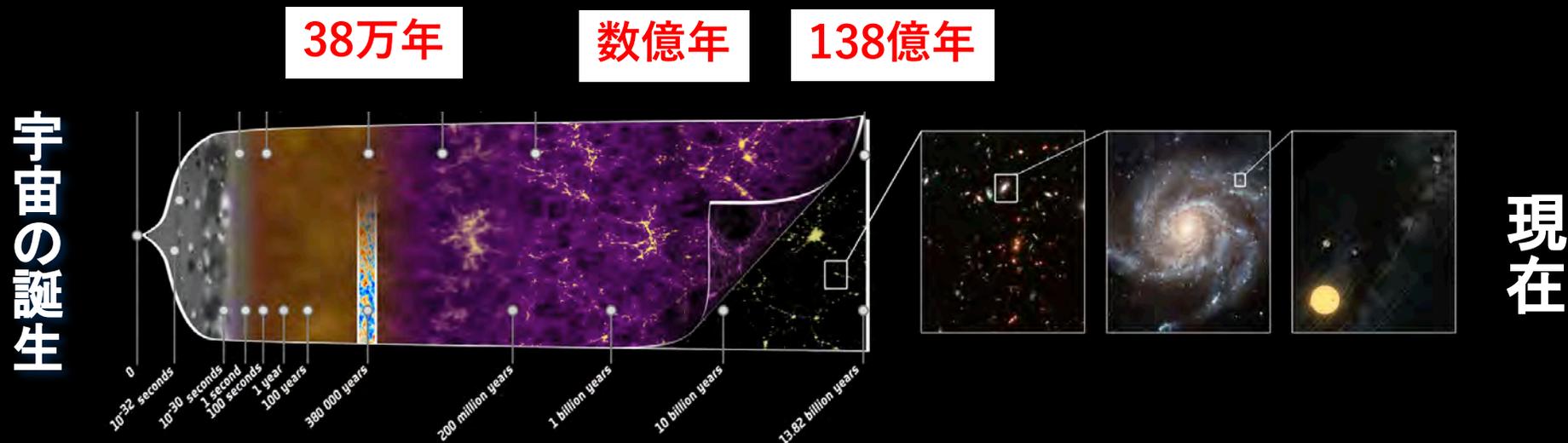
$h = 0.7$ の場合 $t_H \approx 140$ 億年



宇宙は膨張している
宇宙には始まりがある

宇宙膨張と物質世界の進化

- 膨張につれて密度と温度が下がる宇宙で天体が誕生・進化
 - 光が支配する宇宙から物質が支配する宇宙へ
 - $t \doteq 3$ 分：軽元素（ヘリウム）合成
 - $t \doteq 38$ 万年：電離した宇宙が中性化（陽子+電子 から 水素原子）
 - $t \doteq$ 数億年：第一世代天体の誕生
 - $t \doteq 10$ 億年～137億年：星形成（重元素合成）、銀河・銀河団形成



CMB: Cosmic Microwave Background

宇宙マイクロ波背景輻射

- **熱い火の玉宇宙（ビッグバン）の名残**
 - 現在の宇宙を満たす等方的熱輻射分布
 - ペンジアスとウィルソンが1964年に発見
 - ガモフが提案したビッグバンモデルに対する強い観測的証拠
- 現在の宇宙の温度 = $2.728 \pm 0.002\text{K}$



ペンジアスとウィルソン



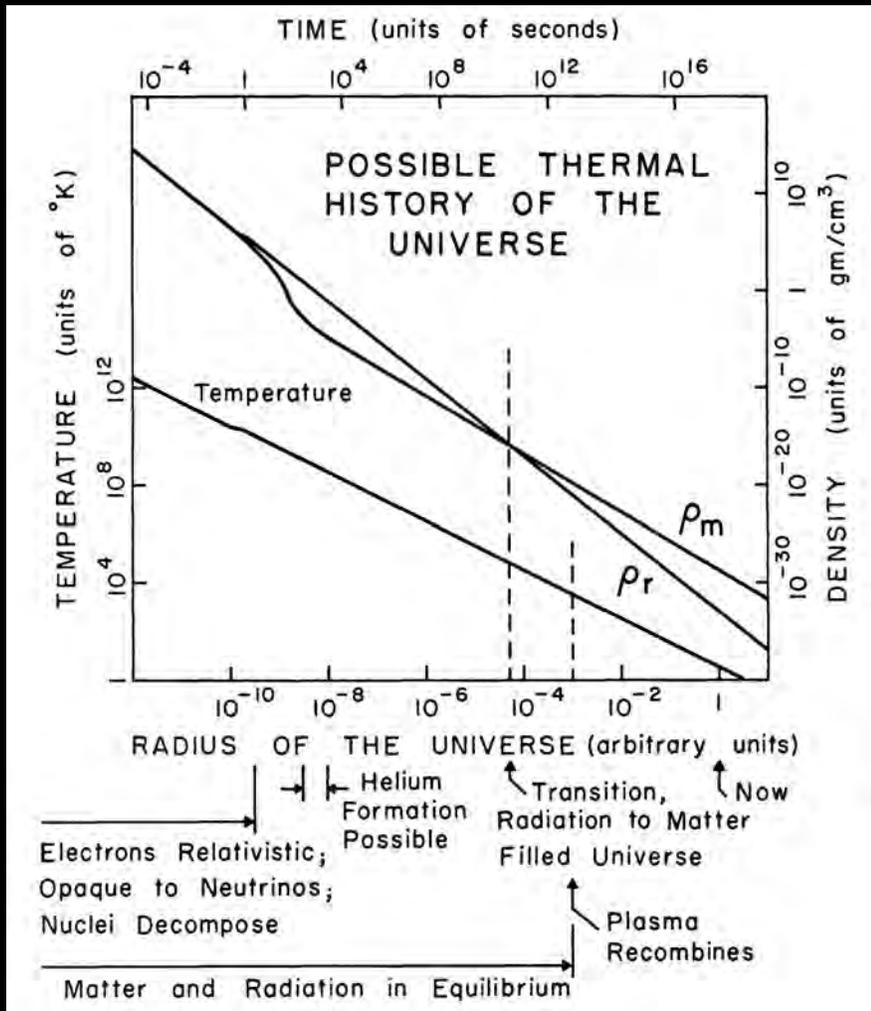
2013年11月2日@Crawford Hill, NJ

With this large horn antenna, Arno Penzias and Robert Wilson discovered the cosmic background radiation in 1964. This unexpected discovery, the first evidence that the universe began with the Big Bang, ushered in experimental cosmology.

HISTORIC PHYSICS SITE, REGISTER OF HISTORIC SITES
AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

2013年11月2日

ビッグバン宇宙の「温度」史



Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson
ApJ 142(1965)414

The Sept 29th 1963
Gamow Dacha
785 10th Street
Boulder, Colorado

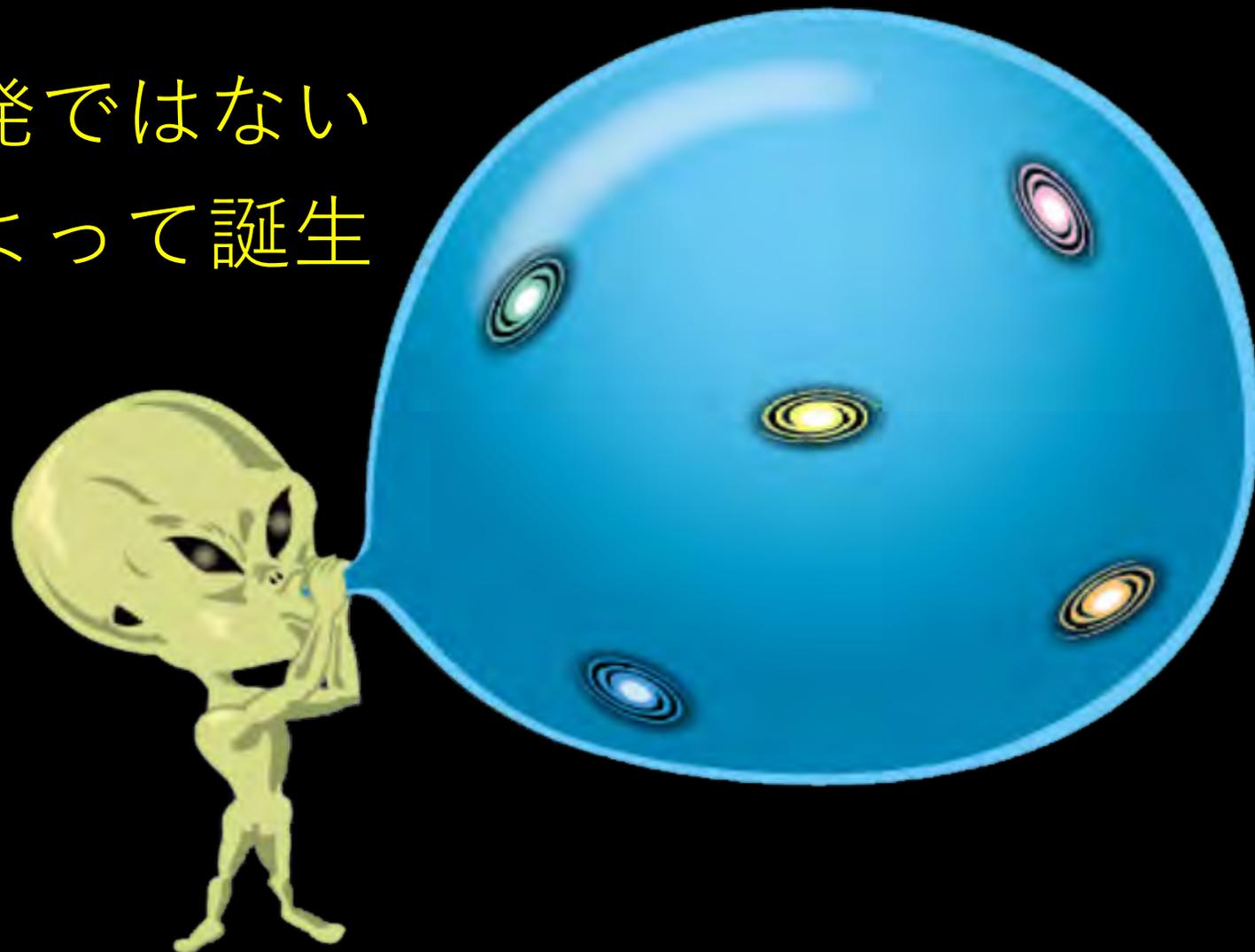
Dear Dr. Penzias,

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 be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5°K, and ~~in~~ in my paper (Kong Dansk. Vid. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (app. 42) the formula $T = 1.5 \cdot 10^{10} / t^{1/2}$ °K, and the upper limit of 50°K. Thus, you see the word did not start with mighty Dicke. Sincerely G. Gamow?

ガモフがペンジアスに宛てた手紙

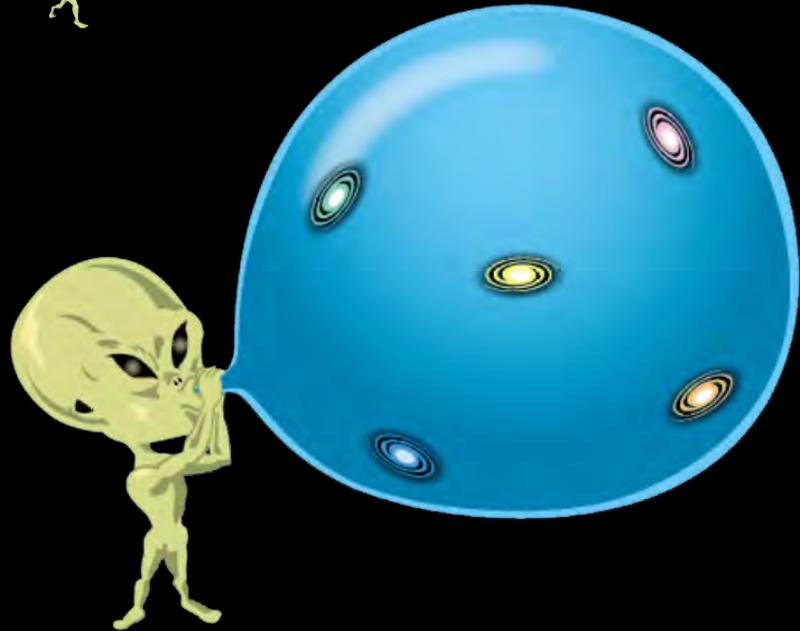
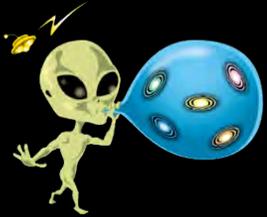
III ビッグバンに関するよくある誤解

- ビッグバンは点の爆発ではない
- 宇宙はビッグバンによって誕生したわけではない



膨張宇宙に関する誤解 (1)

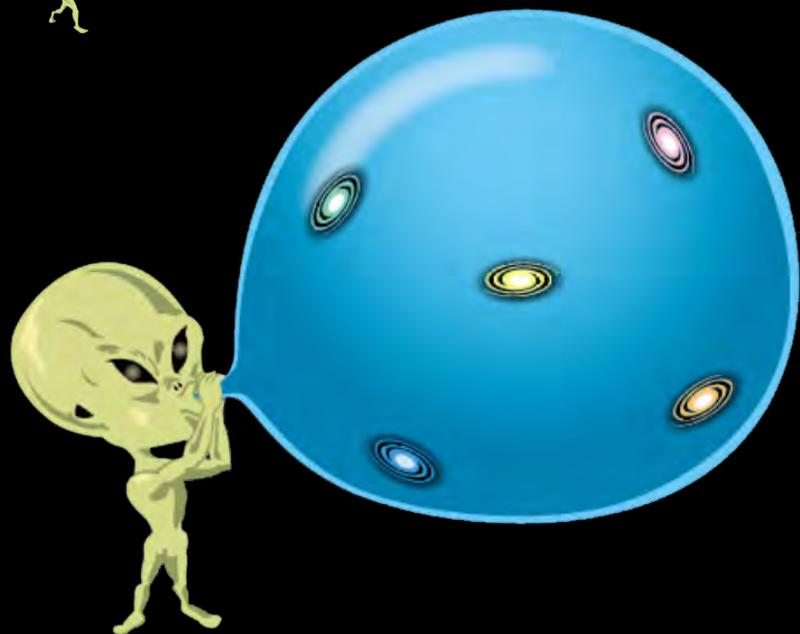
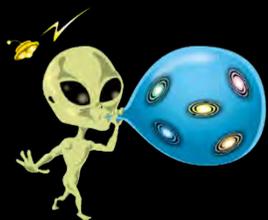
宇宙膨張をわかりやすく説明する目的で頻繁に用いられるゴム風船の表面のたとえの功罪



- 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
 - 宇宙の内側にも外側にも空間は広がっている
- **これらはすべて誤解！**

膨張宇宙に関する誤解 (2)

この風船は宇宙の空間が2次元の場合の説明にすぎない
風船の表面以外の場所を考えてはいけない！

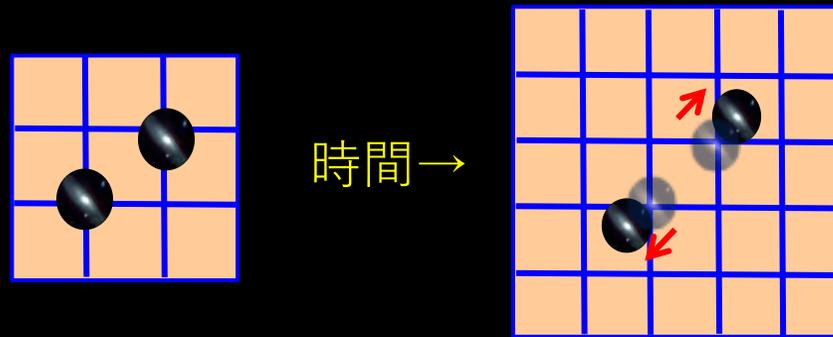


- この風船の2次元表面 (=宇宙)に住んでいる人にとっては
 - 宇宙には中心はない
 - 宇宙は全方向に等しく膨張している
 - 宇宙には果てはない (体積 = 表面積は有限となっているが、それはこの風船を用いた説明の限界。実際には無限であってもよい)
 - この表面以外の場所はない

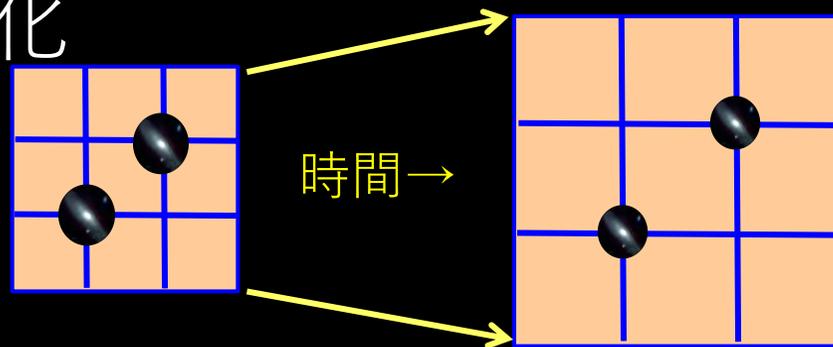
膨張宇宙に関する誤解 (3)

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

① 固定された空間（座標）内の天体の運動



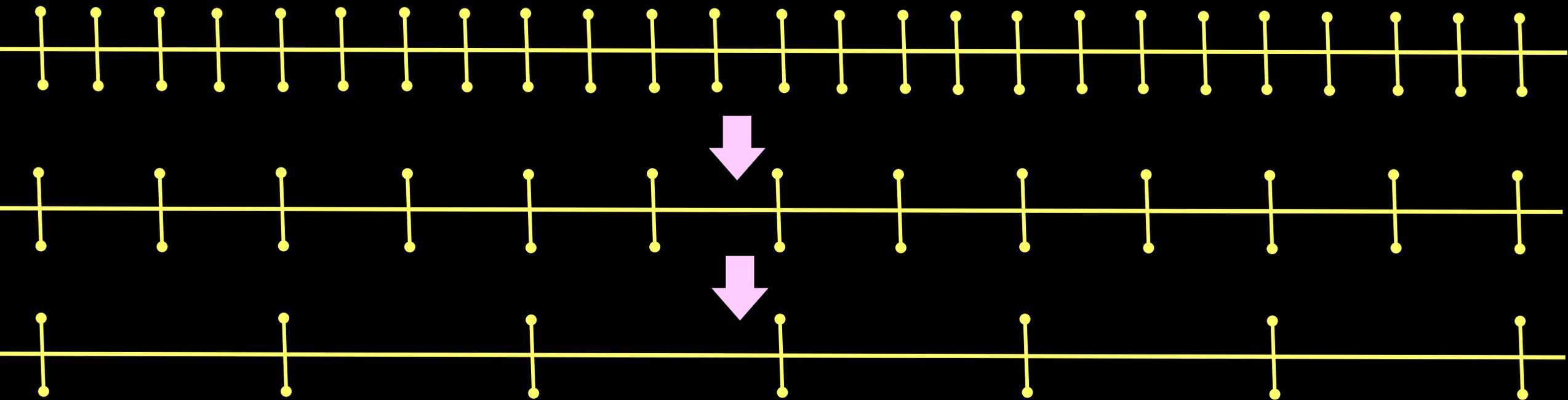
② 拡大する空間（座標）に貼付いた天体間の距離変化



実際に我々が観測する天体の後退速度はこの二つの足し合わせ
宇宙膨張に対応するのは②

宇宙は何に対して膨張している？

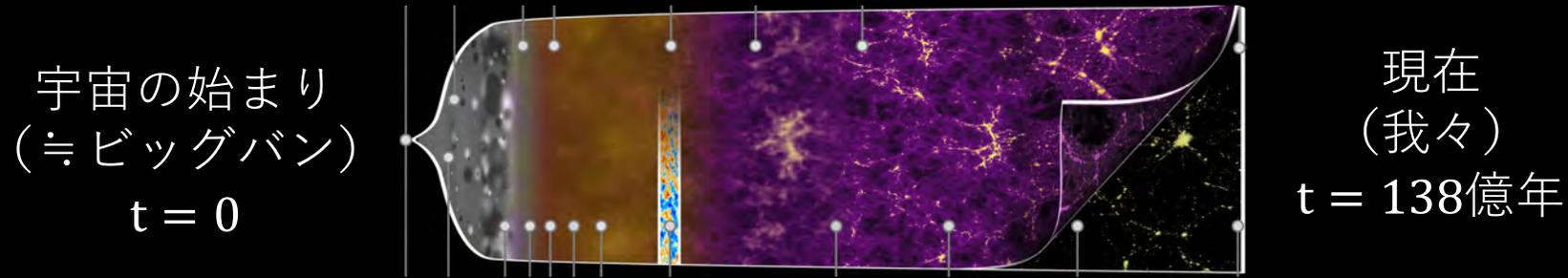
- すべての場所を中心に膨張していると言ってもよいが、中心があるわけではないし、何に対してでもない。宇宙のあらゆる場所が等しく相似的に膨張している。
- 風船の表面の例がかえって混乱させるのでは？ むしろ、無限に伸びた一本のゴムひもを例として考えるほうが誤解が少ないかもしれない。**端がない**ことも重要。



ビッグバンは宇宙誕生時の点の爆発ではない

- (定義だけの問題とも言えるが)宇宙論学者は**宇宙の始まりとビッグバンを区別**している
 - 宇宙が、なぜどのように始まったかはわからない
 - ただし、その後急激な膨張（インフレーション）をして、一旦、温度がほぼゼロに近づいてから、温度が再び上昇したと考えられている
 - この時期（≠場所）をビッグバンと呼んでいる
- **我々はビッグバンが起こった広大な空間領域の中に存在している**
 - だからこそ、四方八方から次々とビッグバンの名残の光が到達し続けている

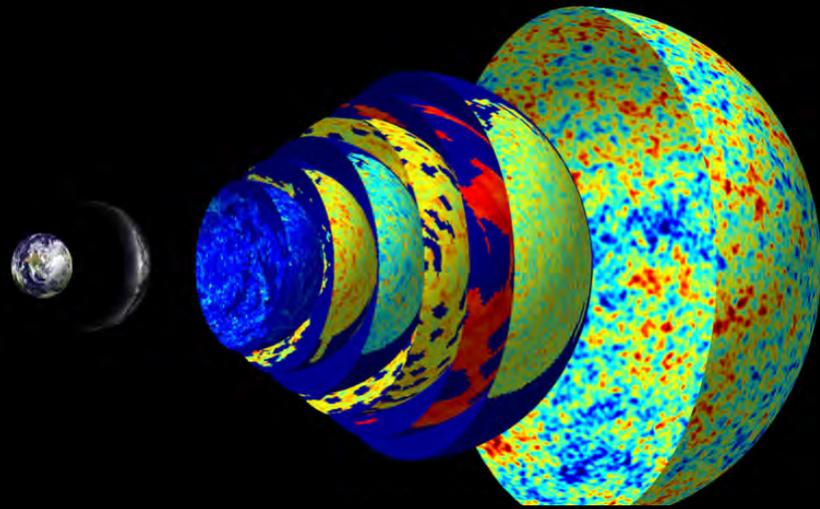
宇宙は「点から爆発して始まった」わけではない



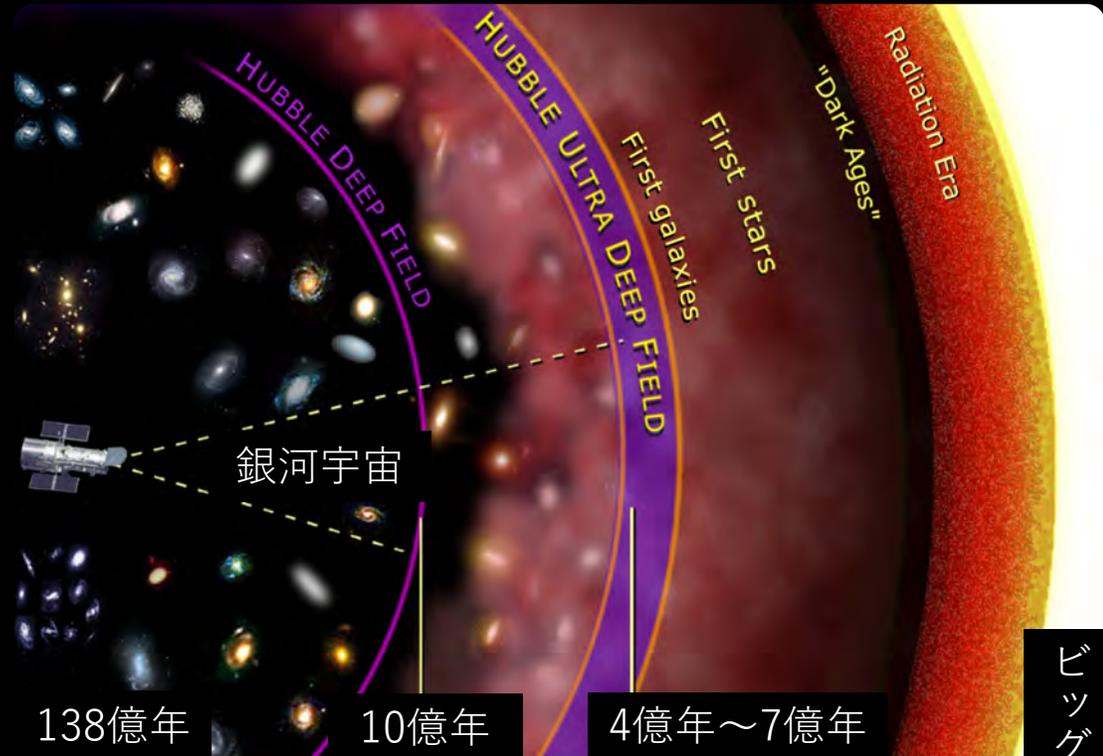
- もしもこの図をそのまま解釈 (= 誤解) したとすれば…
 - 「宇宙の始まり」に対応する爆発の光は、ある特別の方向から特定の時刻に一瞬だけ我々を通り過ぎて終わりのはず
- ところが実際には
 - ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射は、あらゆる方向から常に我々に降り注いでいる
 - つまりこの図は「ビッグバンは点の爆発」を意図していない

より適切な宇宙の歴史のイメージ

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



NASA/BlueEarth; Milky Way:
ESO/S.Brunier; CMB: NASA/WMAP.



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

The 12 Inch Beach Ball Universe

Light from outside the sphere has not yet reached us, and light from inside the sphere has already passed us.

Cosmic Microwave Background (CMB) = 45.7 billion light years in radius = 13.7 billion years in time (These numbers are not equal because the universe is expanding at the same time light is traveling.)

Light from the first stars 4 inch radius

現在 (地球)

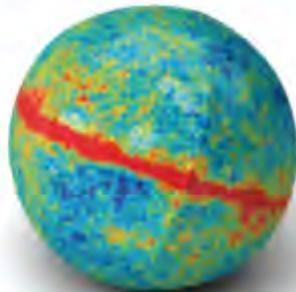
Earth is here

The Milky Way Galaxy 0.000008 inch diameter

過去へ

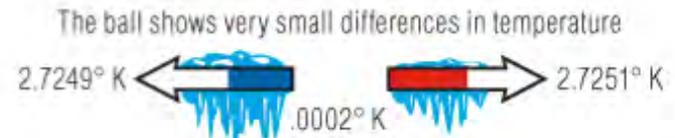
Galaxies seen by the Hubble Telescope approx. 3 inch radius

(The red band around the ball is our own Milky Way Galaxy (changing the view of the CMB))



宇宙の地平線

この外側にも宇宙は ほぼ無限に広がっている

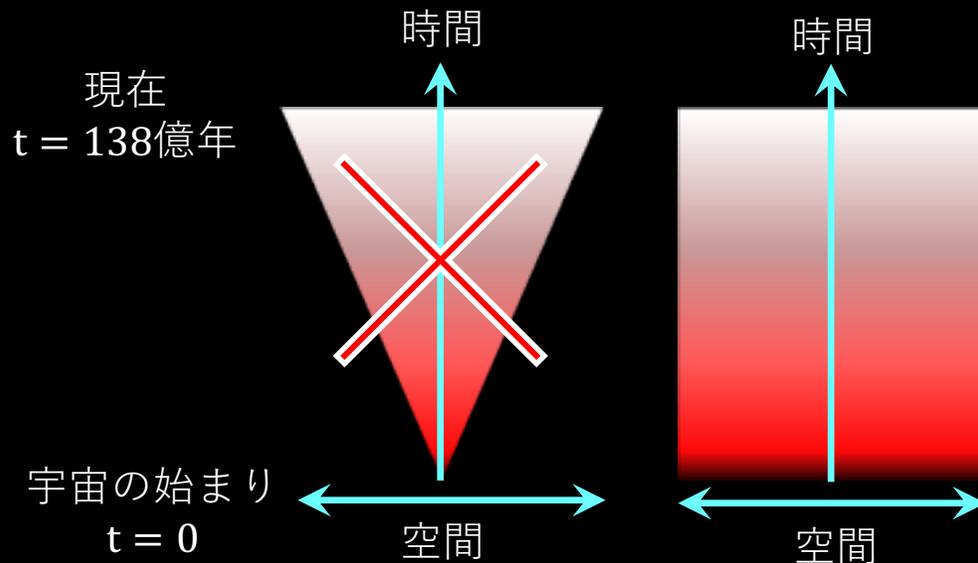


Learn more: <http://map.gsfc.nasa.gov/resources/edactivity1.html>

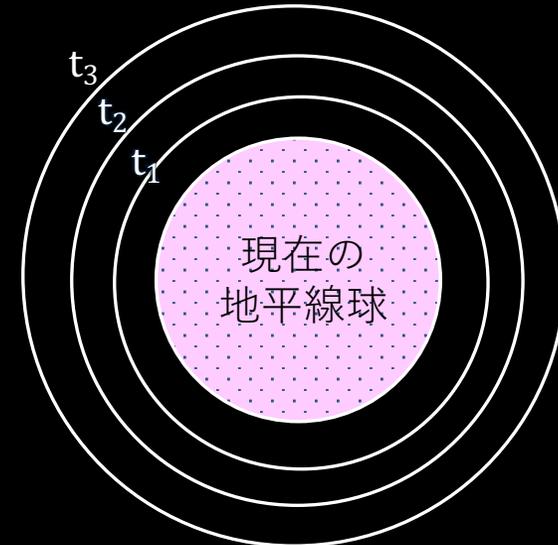
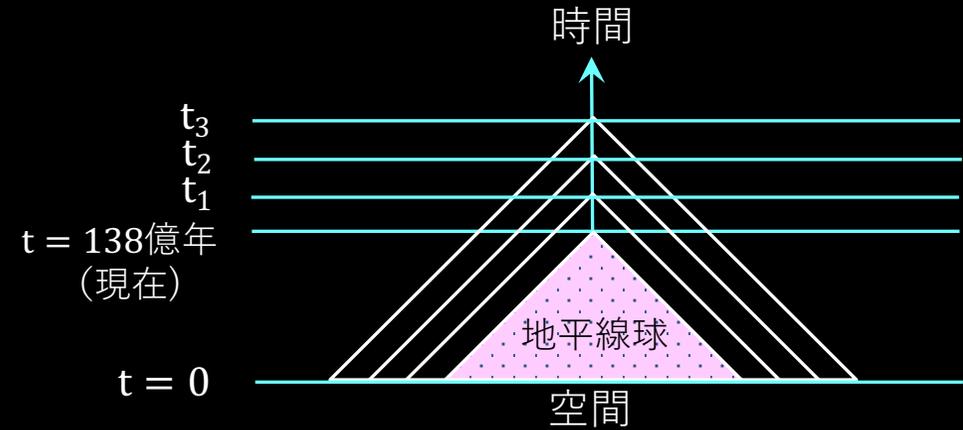
全宇宙は「点から爆発して始まった」わけではないが、**現在観測できる範囲の宇宙**がかつて実質的に点のような小さな領域であったことは事実

■ 宇宙の地平線

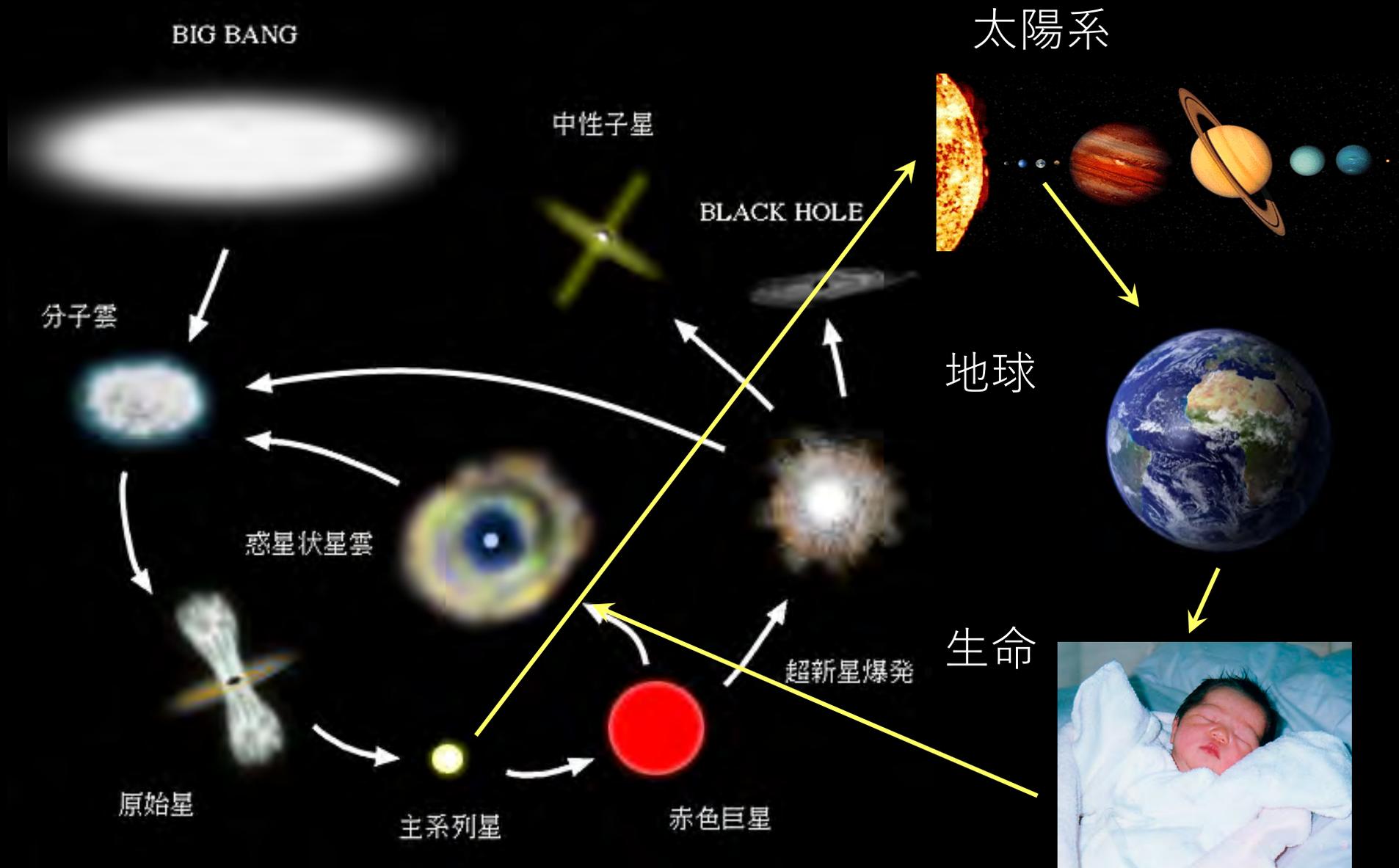
- 誕生直後の宇宙は点ではなくむしろほぼ無限に広がっていると考えるべき



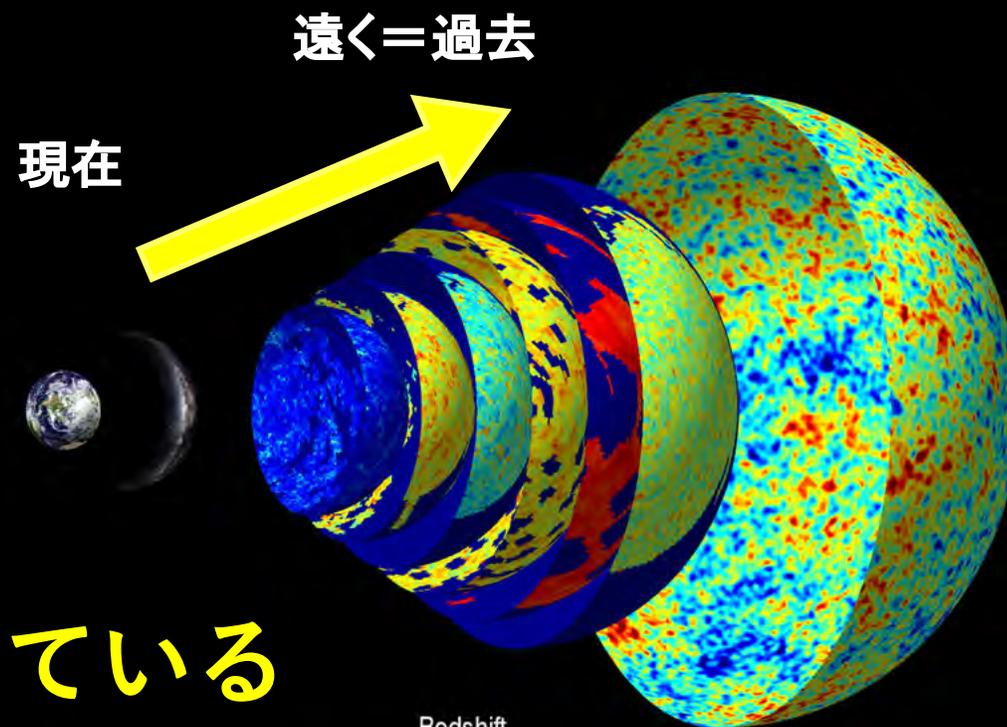
宇宙の地平線の半径は時間とともに増大する



IV ビッグバンの予言する宇宙



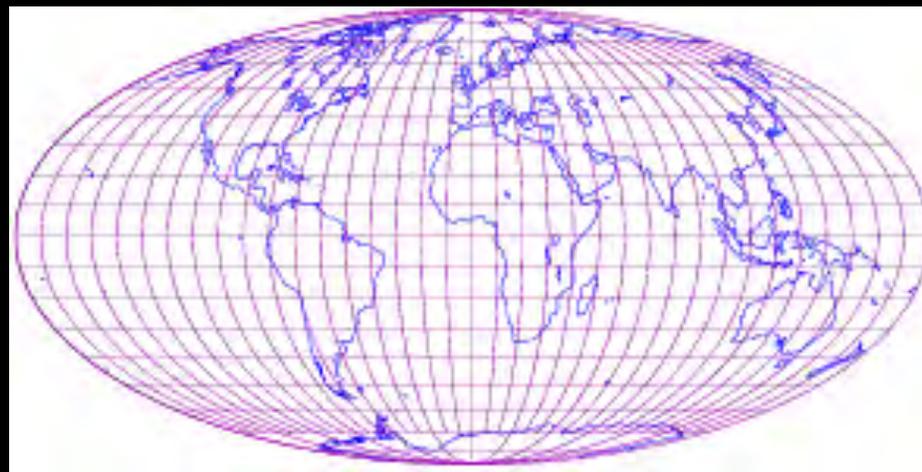
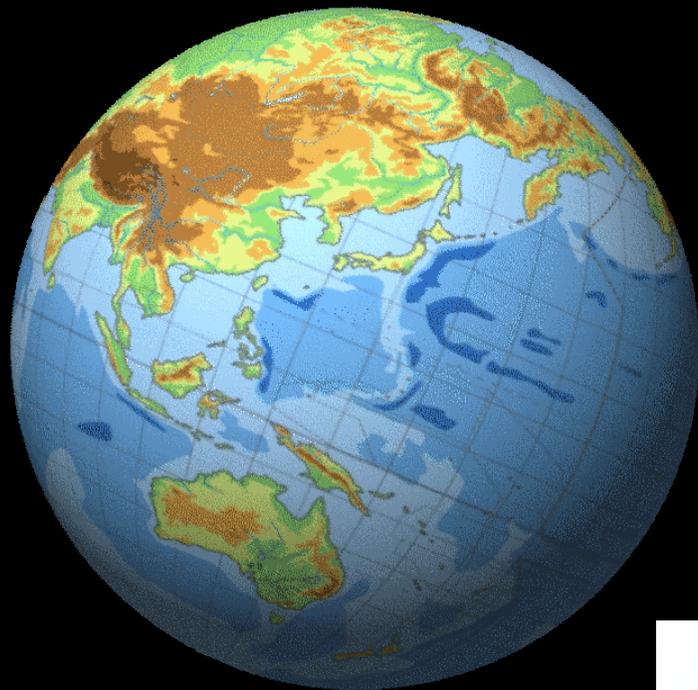
宇宙マイクロ波 背景輻射



■ 現在の宇宙は電波で満たされている

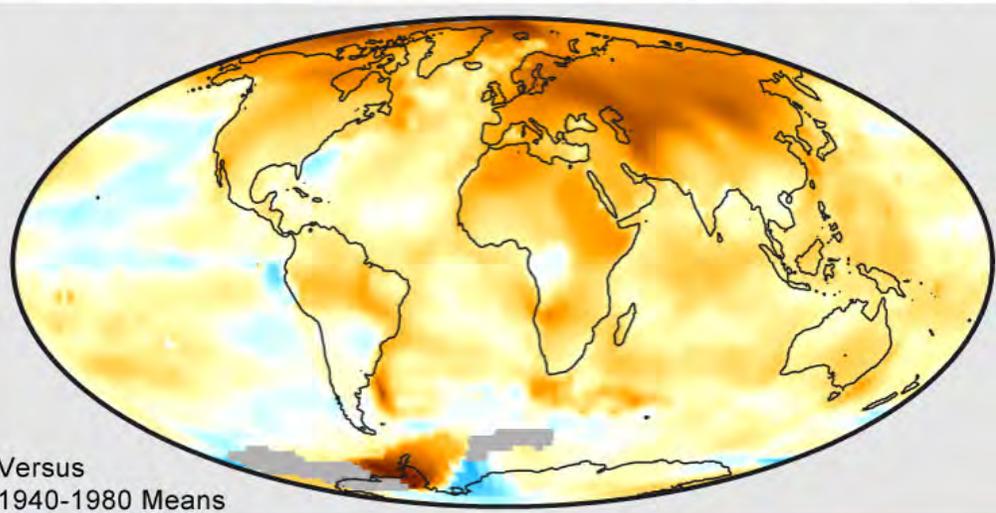
- 熱い火の玉宇宙の名残
- ビッグバンモデルの観測的証拠
- 38万歳の宇宙の姿が現在観測できる
- マイクロ波は、波長1mmから1mの電波をさす
- 携帯電話もこの波長帯を利用

地球儀と世界地図



宇宙マイクロ波背景放射温度地図

1999-2008 Mean Temperatures



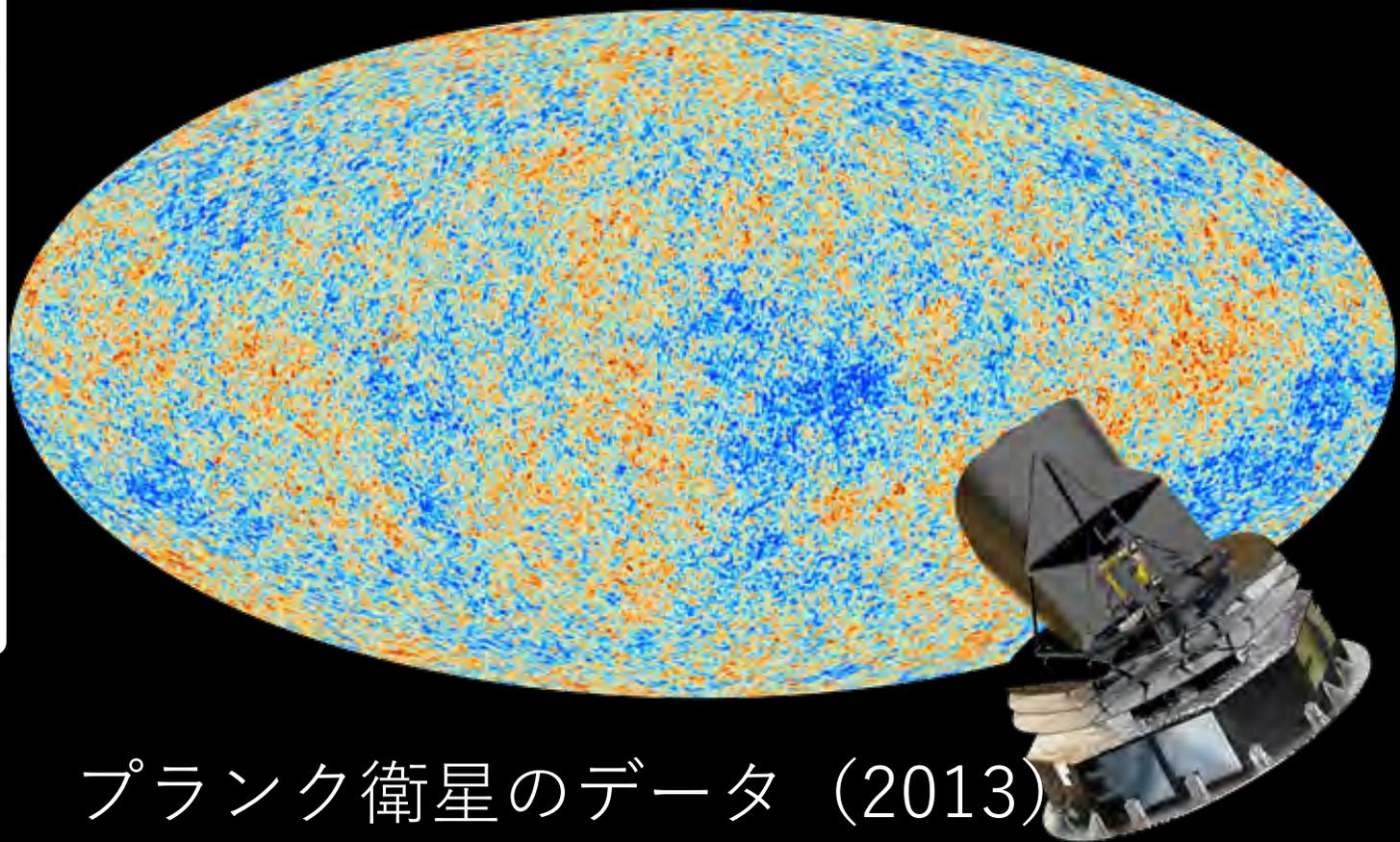
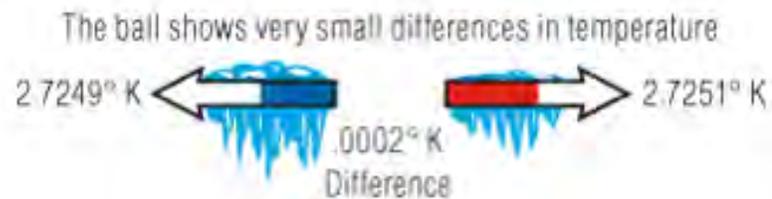
Versus
1940-1980 Means



-2 -1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5 2

Temperature Anomaly (°C)

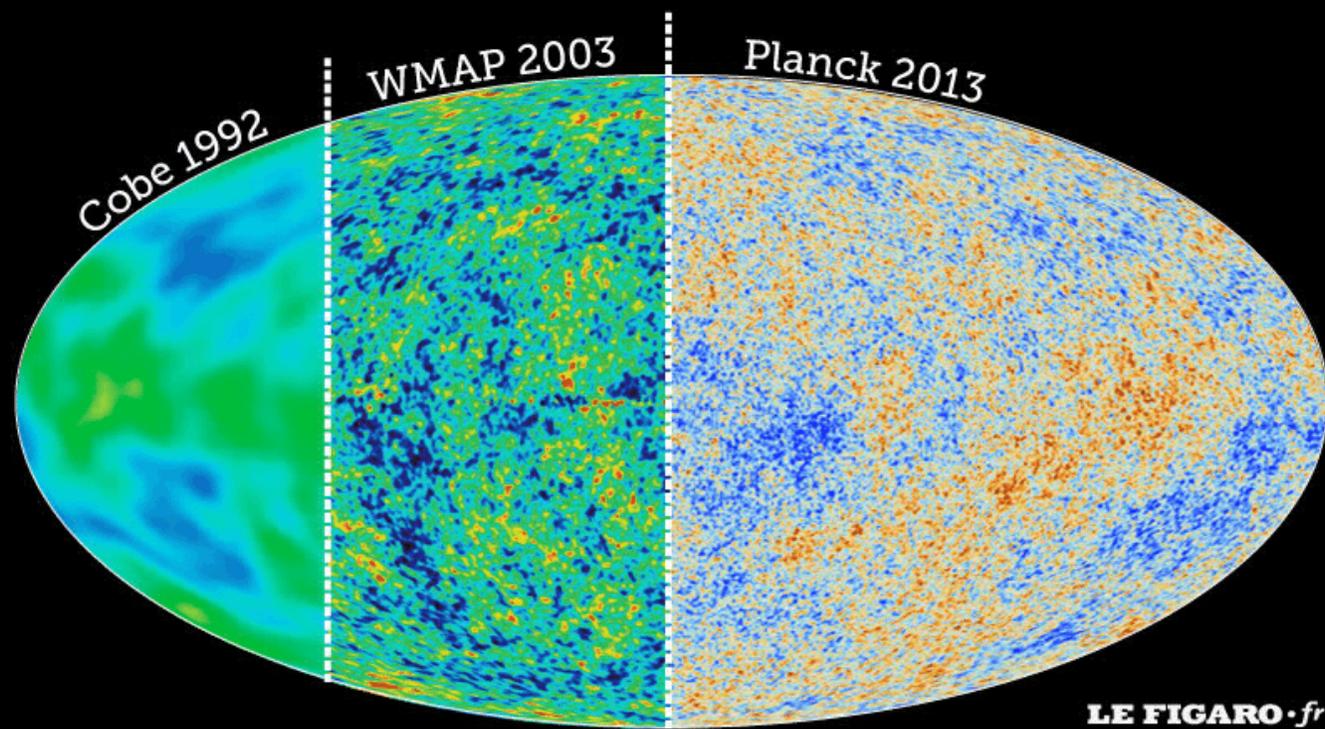
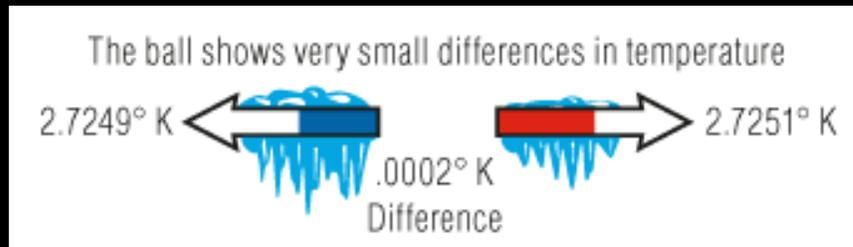
地球の温暖化を表す温度地図



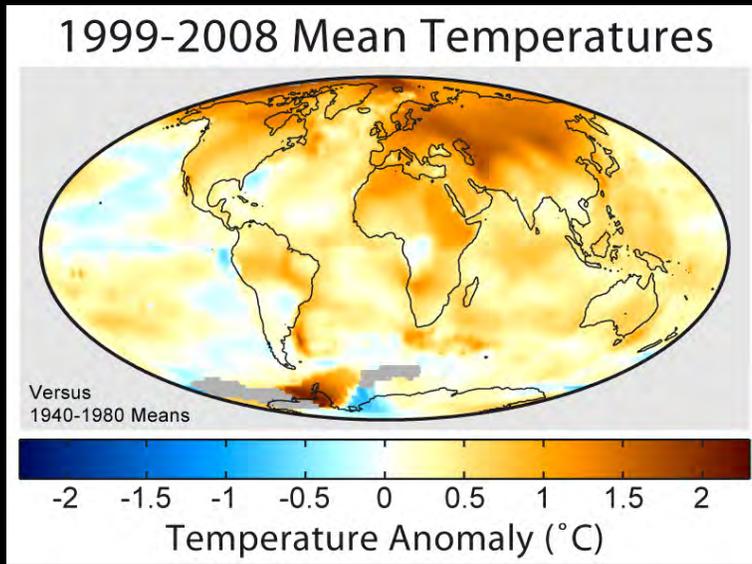
プランク衛星のデータ (2013)

宇宙マイクロ波 背景放射 温度ゆらぎ地図

Vazquez, Padilla
& Matos (2018)



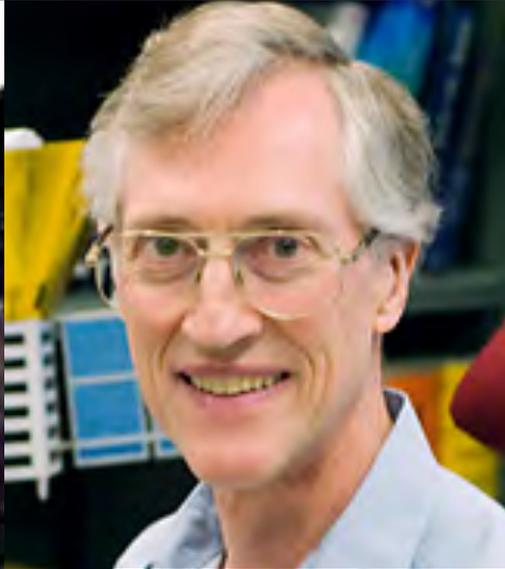
COBE衛星
WMAP衛星 (Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe)
Planck衛星



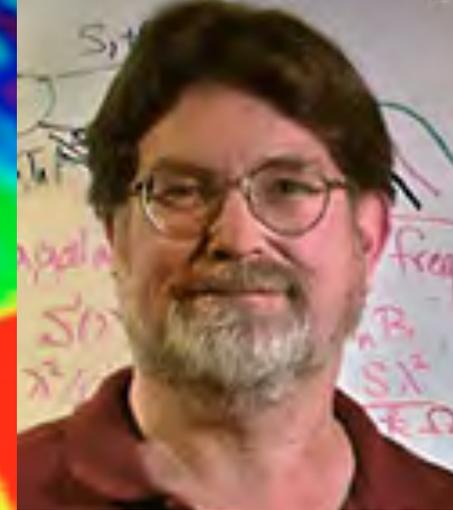
2006年ノーベル物理学賞

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

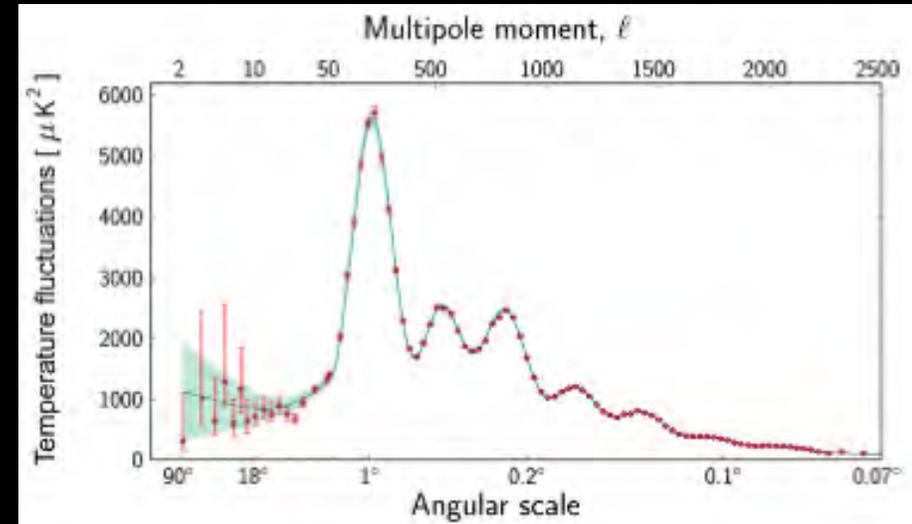
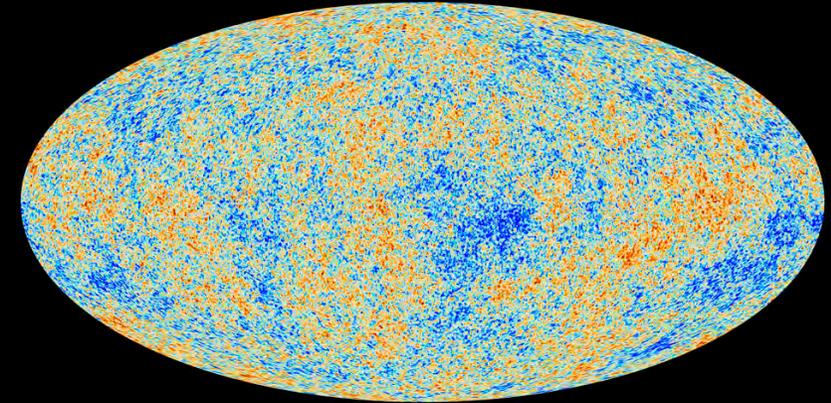


138億年前の古文書の解読方法

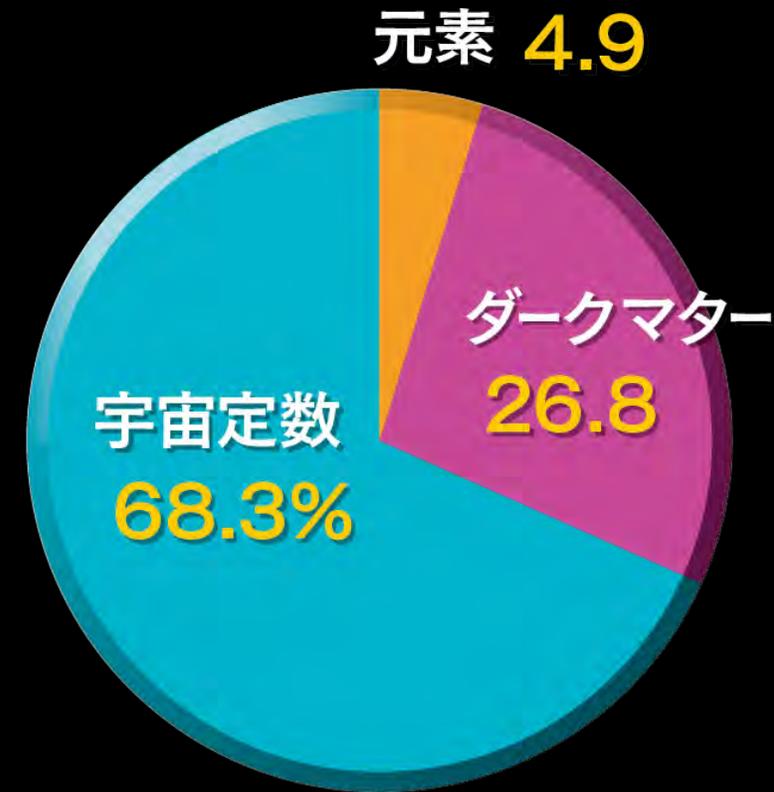
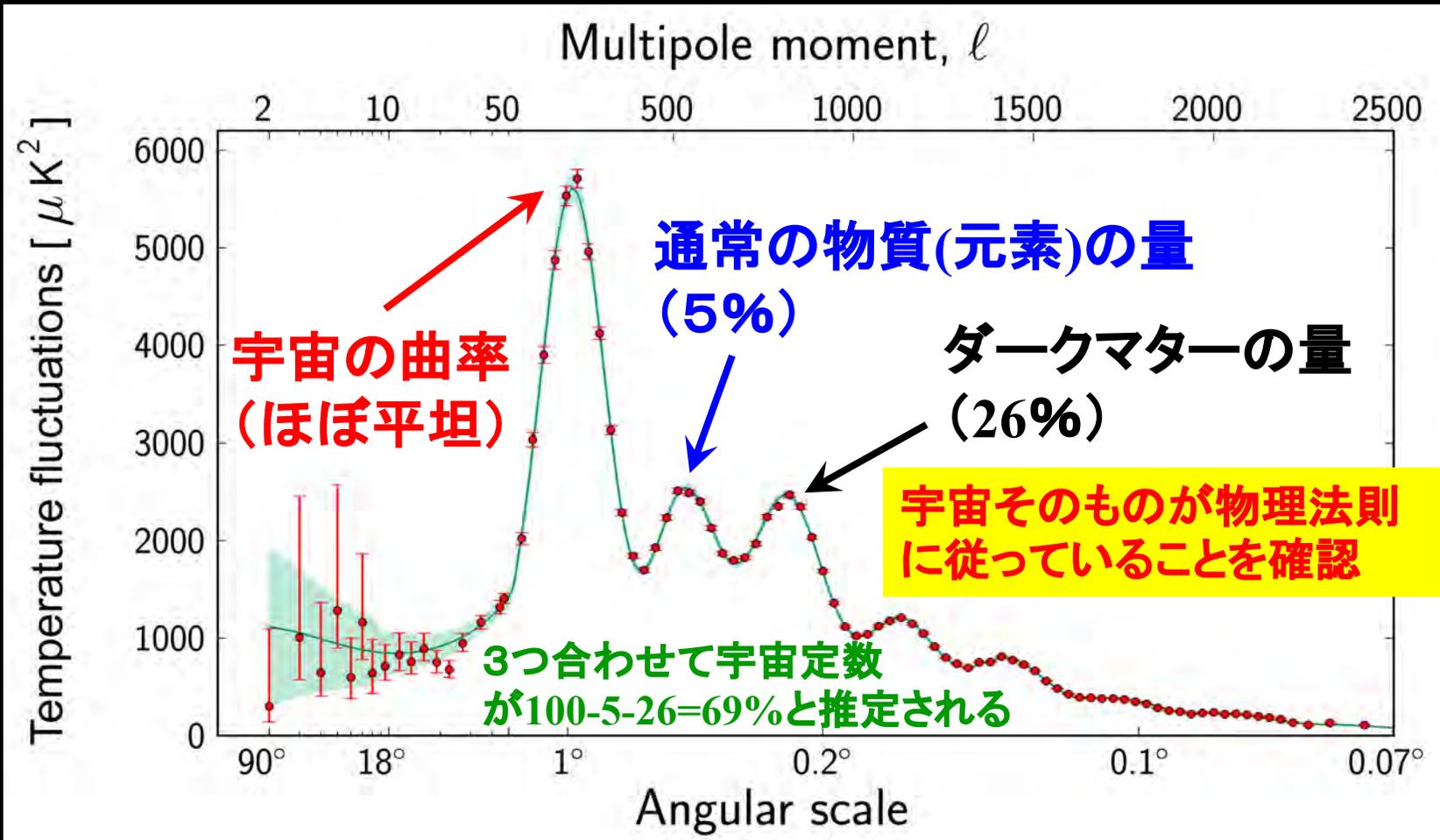
- 暗号化された状態の古文書
 - 宇宙マイクロ波全天温度地図
- 暗号を解く鍵
 - 球面調和関数展開
- 解読された古文書内容
 - 温度ゆらぎスペクトル
- 古文書を理解するための文法
 - 冷たいダークマターモデルの理論予言
- 夜空のムコウに隠されている情報
 - 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、

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

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

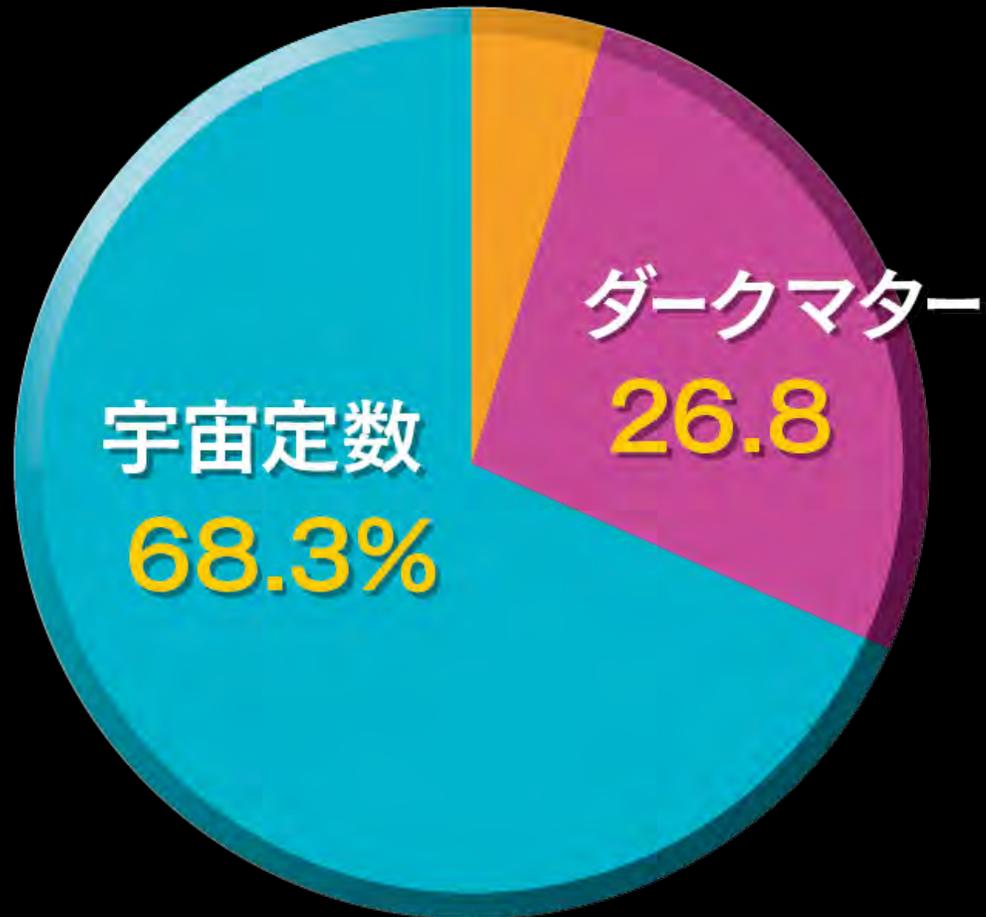


標準宇宙モデル：わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



わかったこと：現在の宇宙の組成

元素 4.9



- 宇宙の主成分は宇宙定数で約7割を占める
- その次は約3割を占めるダークマター
- 我々の身の回りの世界を構成している元素はわずか5%程度でしかない
- 宇宙の約95%はその正体が未だ解明されていない

2011年 ノーベル物理学賞

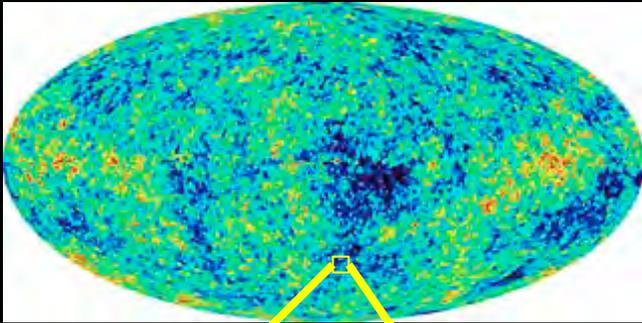
- Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess
 - 1998年に、遠方の超新星の観測を通じて、宇宙の膨張が加速していることを発見

この観測事実を説明する最も有力な仮説が宇宙定数

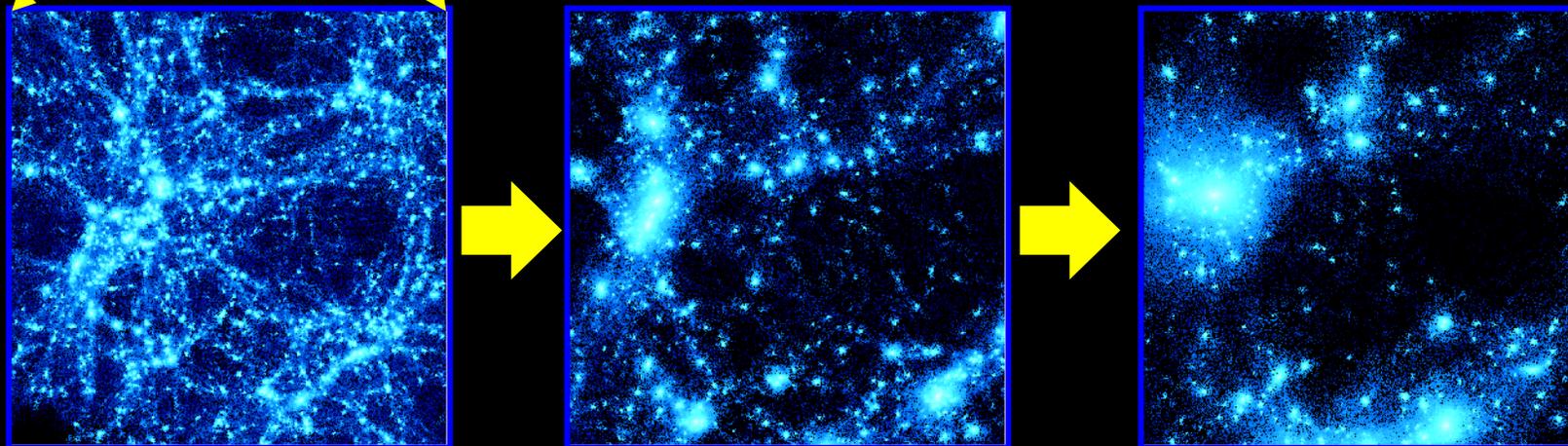


宇宙の構造形成標準理論

宇宙初期の空間ゆらぎ



- すべては重力のおかげ
- 小さなスケールの構造がまず形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



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

2019年ノーベル物理学賞

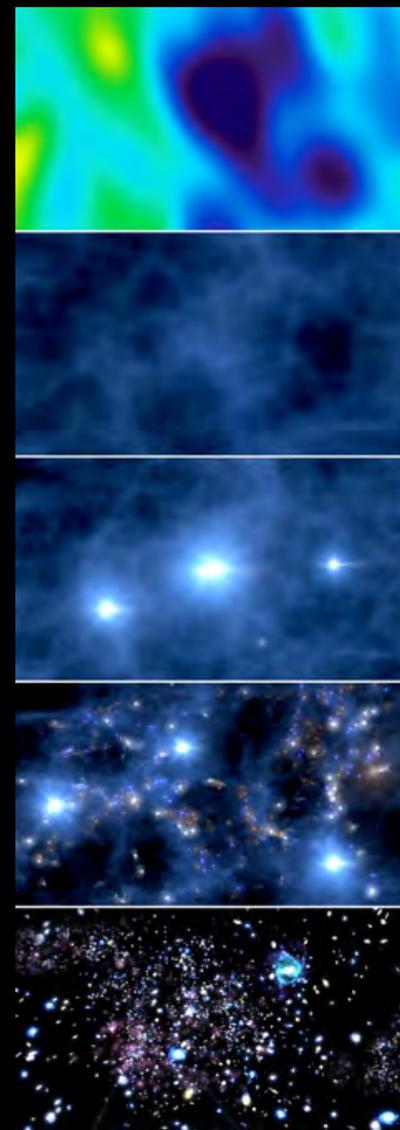
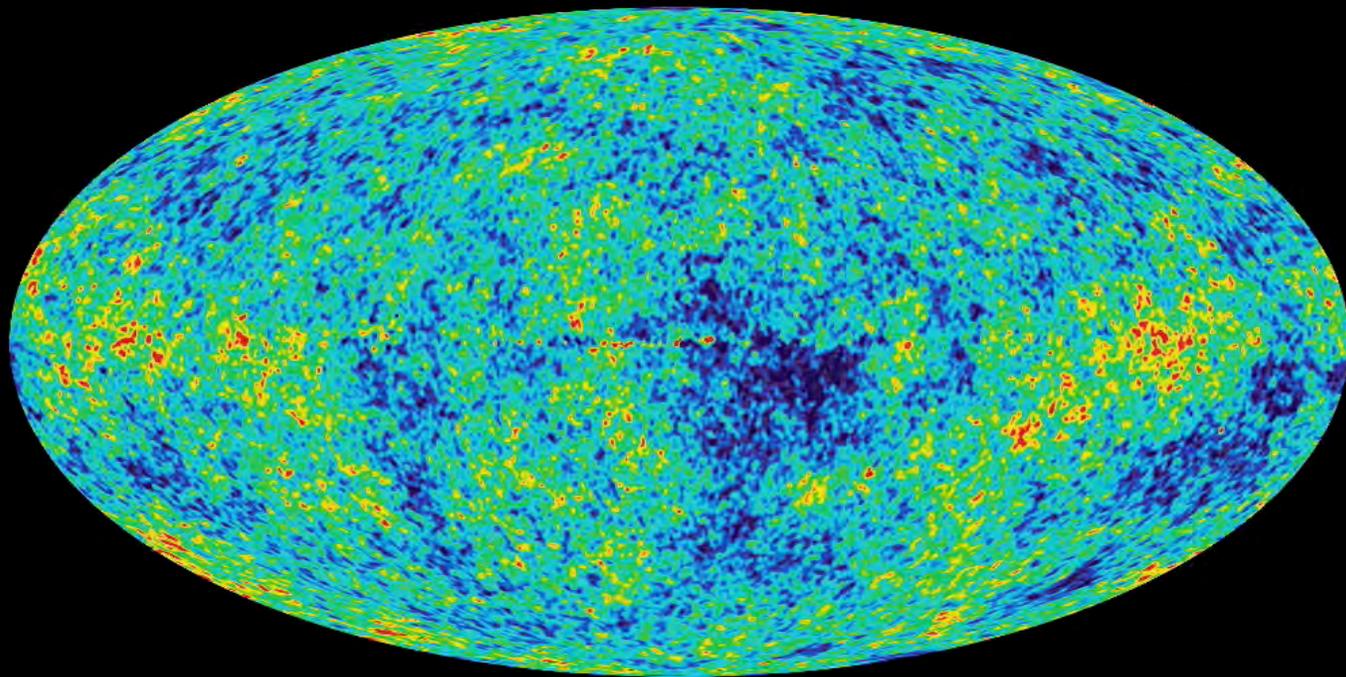
- 宇宙の進化と宇宙におけるこの地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献

(Contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos)



ジェームズ・ピーブルズ ミシェル・マイヨール ディディエ・ケロー

38万歳の宇宙から138億歳の現在へ



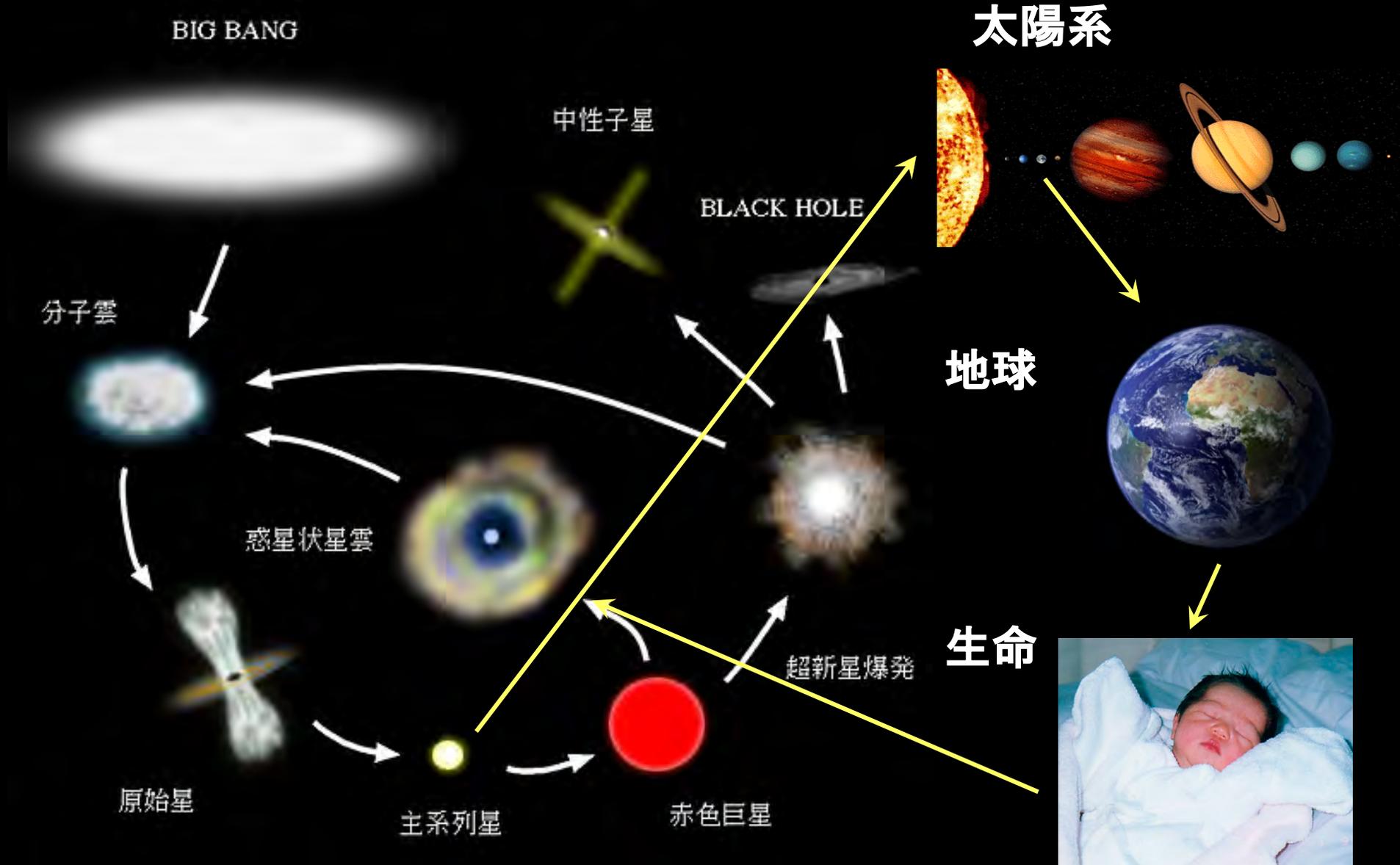
NASA/WMAP サイエンスチーム提供

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

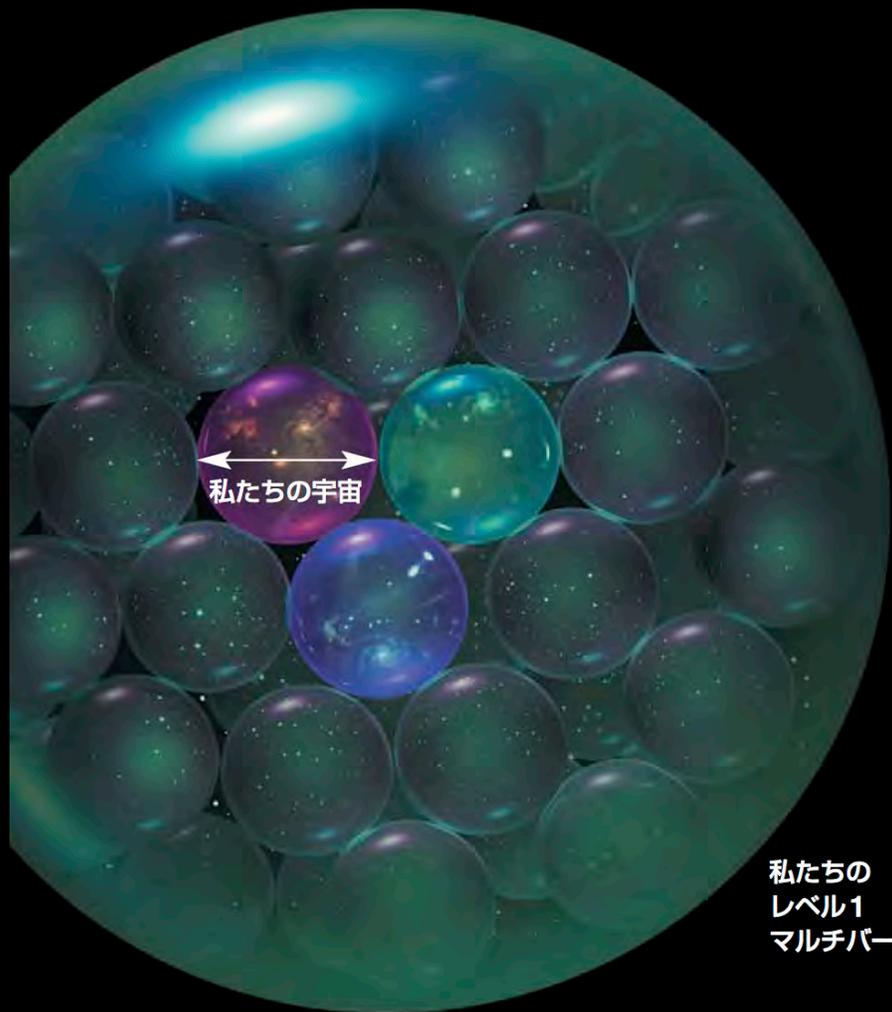
我々は星の子供：宇宙の元素循環

- ビッグバン後、最初の3分間で合成された軽元素から、数億年後に**第一世代の星**が誕生
- **星の内部で重元素が合成**され、それが星の進化の最終段階で宇宙にばらまかれる
- それを材料として**次の世代の天体**が誕生
- この過程の繰り返しが宇宙での元素循環
- 我々は、かつて宇宙のどこかで生まれた星の内部で合成された重元素、さらには宇宙最初の3分間で合成されたヘリウムを材料としている！

ビッグバン、天体形成史、元素循環



V ビッグバンが教えてくれない宇宙



私たちの
レベル1
マルチバース



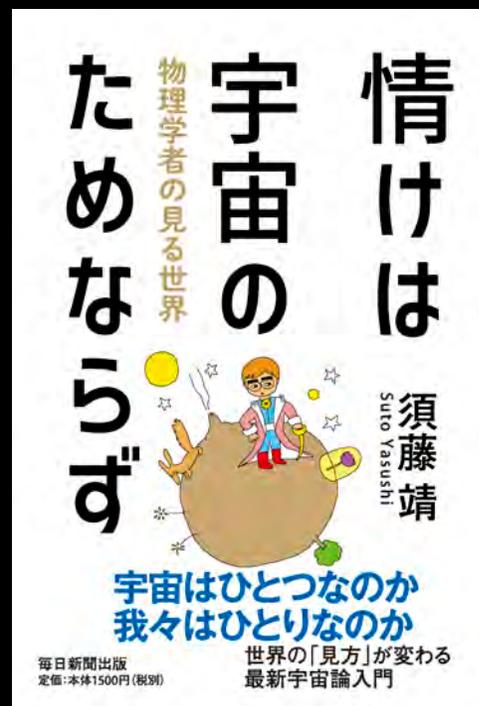
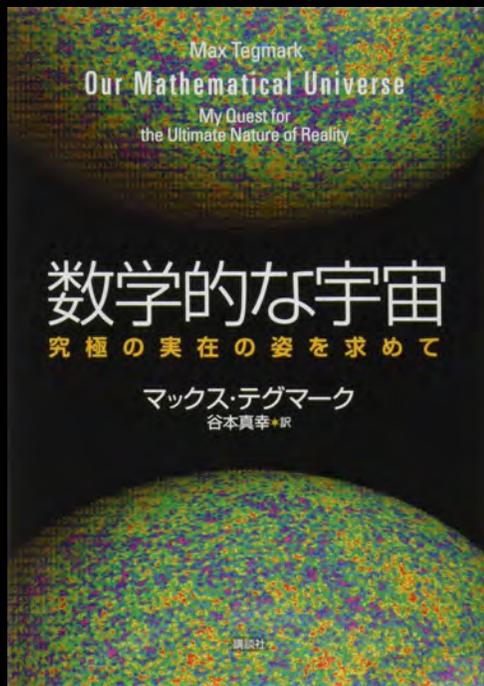
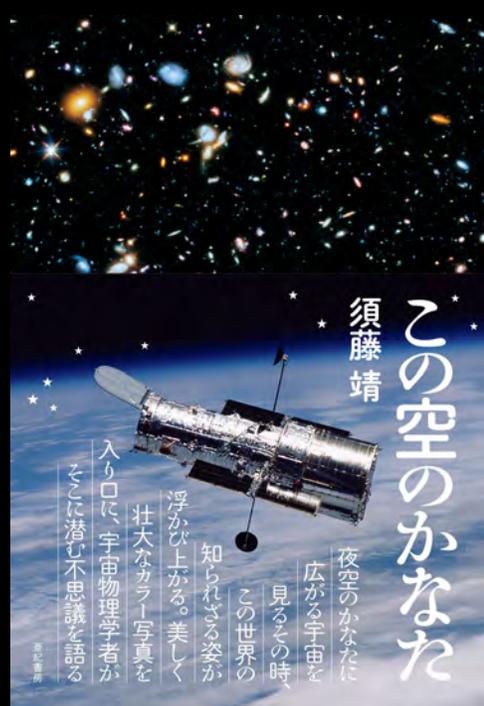
並行して存在する
レベル1
マルチバース

何もない空間
(膨張している)

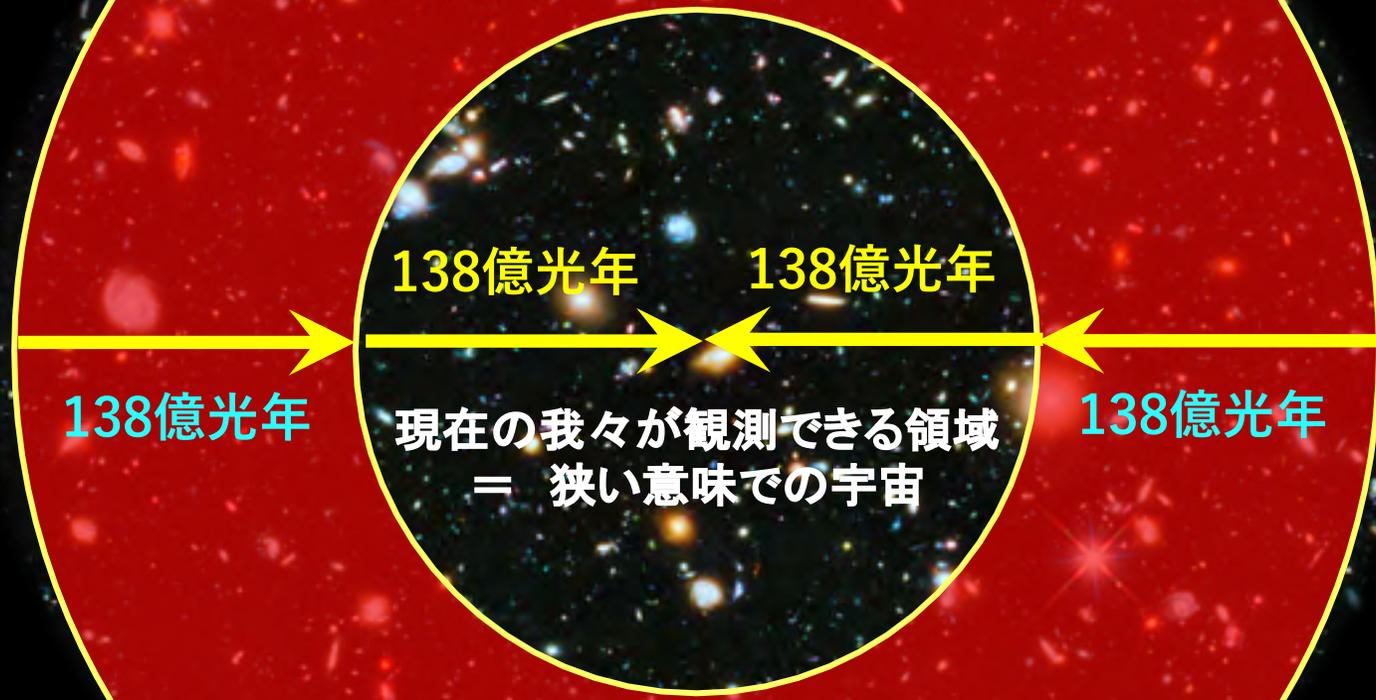


日経サイエンス2003年8月号

参考文献



我々が観測できる宇宙：地平線球



138億光年

138億光年

138億光年

138億光年

現在の我々が観測できる領域
= 狭い意味での宇宙

現在の我々にはまだ観測できない領域
= 今から138億年後に観測可能となる宇宙

ユニバースの集合 = マルチバース

- 個別の宇宙（ユニバース=universe）
- それらの集合である全宇宙（マルチバース=multiverse）

レベル	説明
1	現在観測可能ではない地平線の外側にも、ユニバースが無限に存在。それらは徐々に観測可能な領域に入る。これら同じ物理法則をもつユニバースの集合がレベル1マルチバース
2	無限個のレベル1マルチバースは、原理的にも因果関係を持たないまま存在するかもしれない。物理法則すらが異なり得るそれらの集合がレベル2マルチバース
3	量子力学の多世界解釈に対応する無数の時空の集合。レベル3マルチバース内の異なる元を遍歴する軌跡の一つが我々のユニバースである
4	異なる数学的構造に対応する具体的な時空は必ず実在する。言い換えれば、抽象的な法則は必ず対応する物理的実体を伴うのではないか。それらの集合をレベル4マルチバースと定義する

レベル1 マルチバース

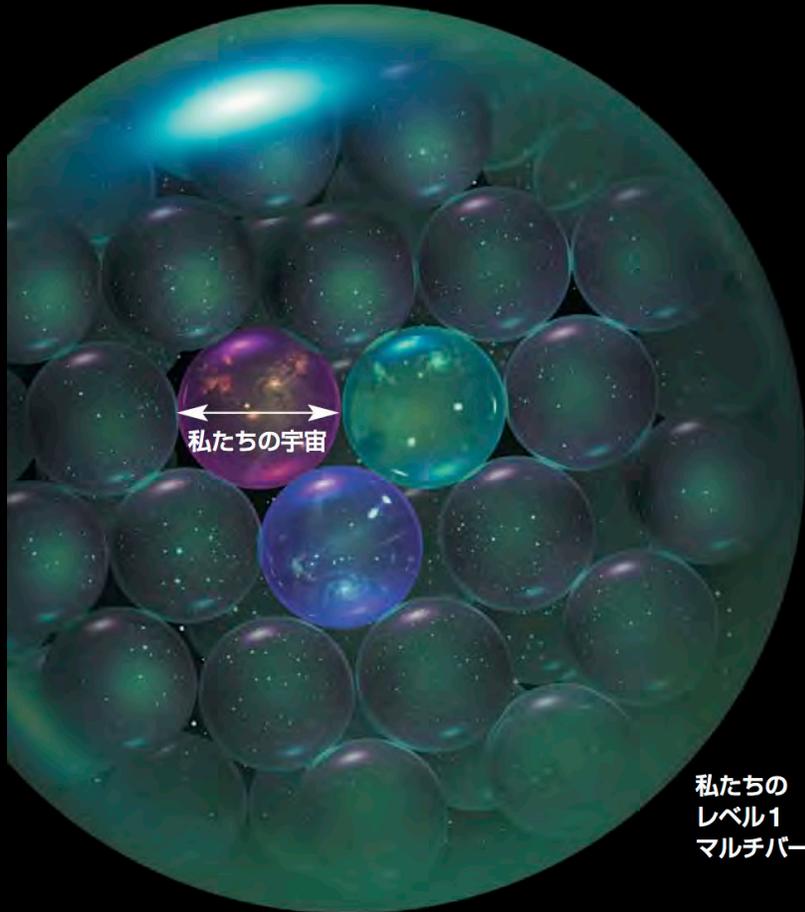
- 現在の地平線内にある我々の（レベル1）ユニバースは、レベル1マルチバースに属する元の一つ
- 我々の地平線球の外側にも、同じく地平線球（レベル1ユニバース）が無数にあるが、現在は「まだ」互いに因果関係を持たない
- それらの集合が（我々の属する）レベル1マルチバース
- 同じレベル1マルチバース内のレベル1ユニバースは、初期条件が異なると、物理法則は同じ

日経サイエンス2003年8月号



レベル2 マルチバース

- レベル1マルチバースはレベル1ユニバースを元とする集合
- レベル1マルチバースを元とする集合が、レベル2マルチバース

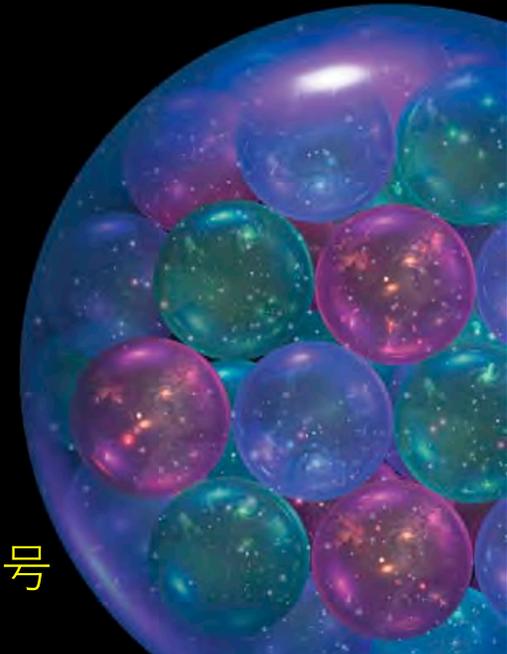


私たちの
レベル1
マルチバース



並行して存在する
レベル1
マルチバース

何もない空間
(膨張している)

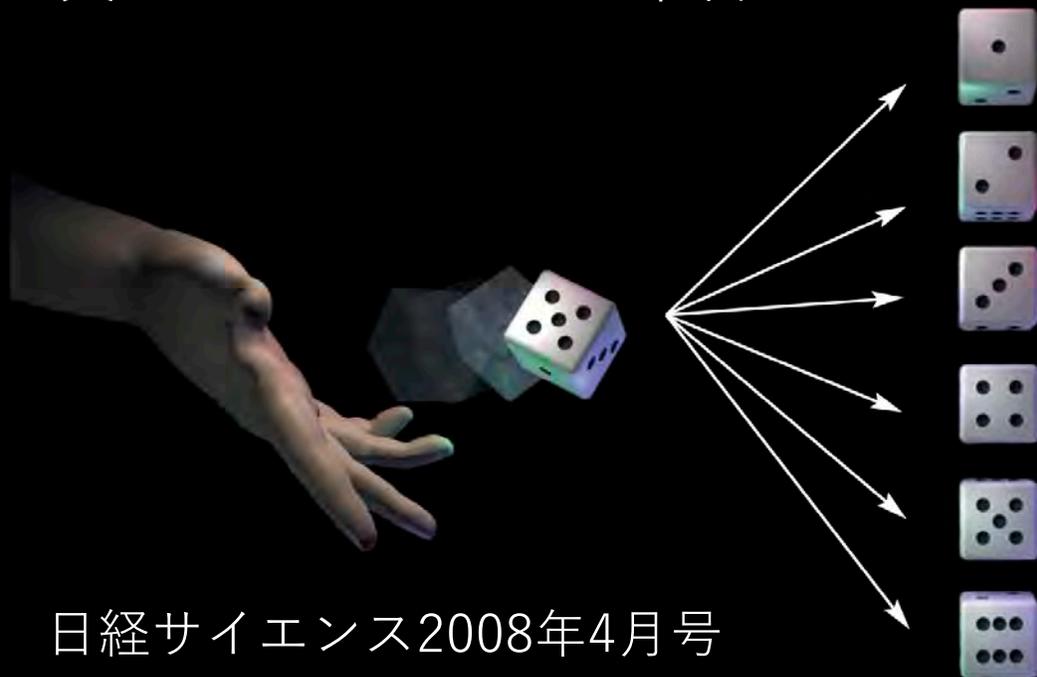


日経サイエンス2003年8月号

レベル3 マルチバース

■ 量子力学におけるエヴェレットの多世界解釈

- 一つのユニバース内に「異なる可能性」が同時に存在するのではなく、それらの可能性ごとに「異なるユニバース」が実在
- 観測すると、シュレーディンガーの猫が死んでいる宇宙と死んでいない宇宙のどちらか観測者が分岐する
- これらの異なるユニバースの集合がレベル3 マルチバース



量子のサイコロ

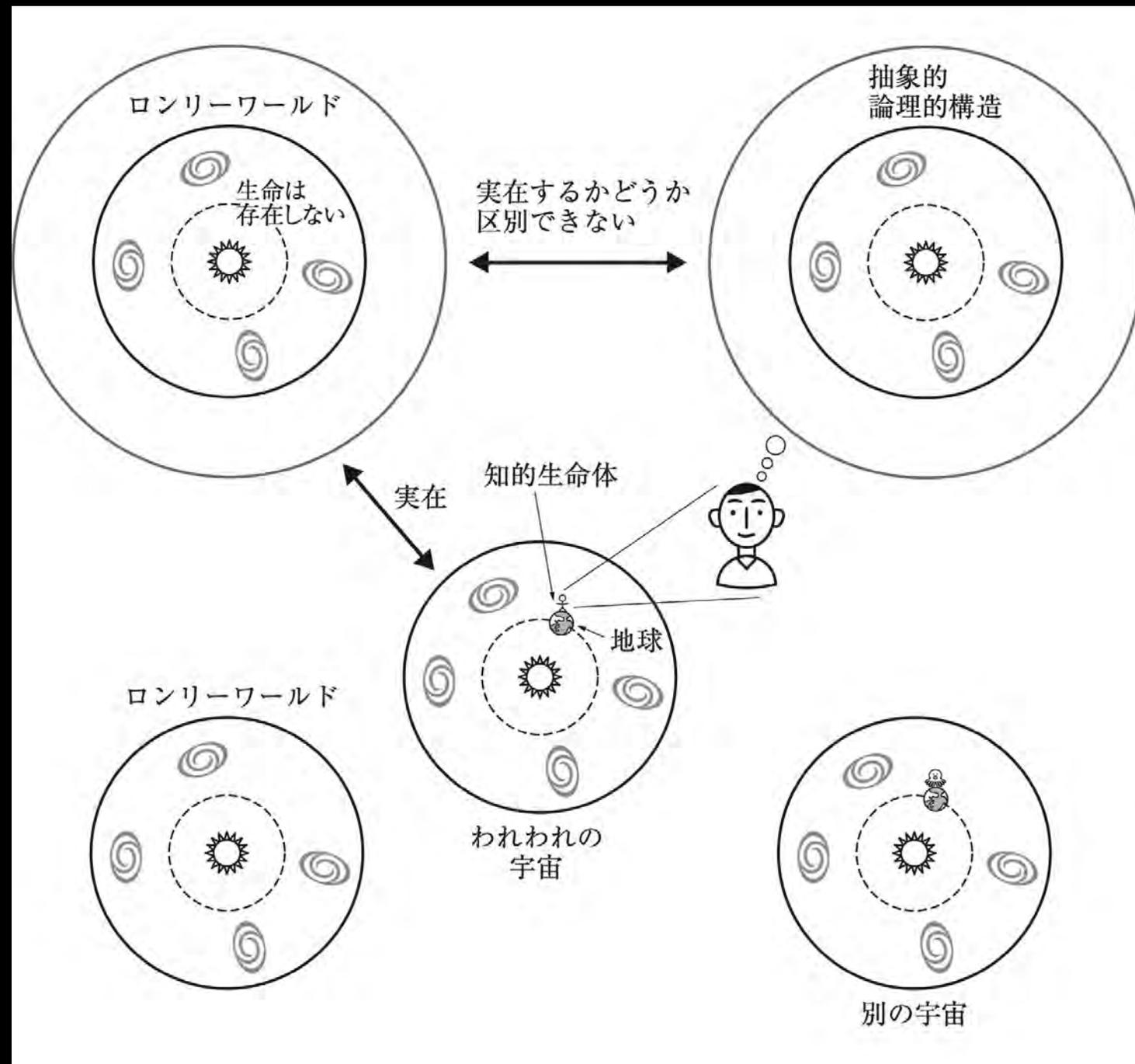
目の出方が完全に無秩序な「量子のサイコロ」を考える。これを振ると1から6までの目のいずれかに落ち着くが、その出方は無秩序だ。しかし量子力学の考え方では、振られたサイコロは1から6までの目を同時に示す。この矛盾した見方に折り合いをつけるには、サイコロが別の宇宙で別の目を出すと考えればよい。6つある宇宙の1つでは「1」、もう1つの宇宙では「2」を出すという具合だ。私たちはいずれかの宇宙の中にとらえられているので、量子世界の全体像のうちごく一部しか実感できない。

無矛盾な数学的構造は必ず実在する？

- 我々のユニバースでの実験とは一致しないが、論理的に無矛盾な物理法則（数学的体系）があったとする
 - 実験で否定される以上、その体系はこの世界と矛盾しており、それ以上考えても無意味（標準的考え）
 - 単にたまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する宇宙がどこかに実在しているだけ？
- 宇宙の振る舞いは法則（数学）でたまたまうまく記述できるのではなく、そもそも宇宙は厳密に法則に支配されているのでは？
- 本当は異なる物理法則を持つ世界が無数に存在しているのではないか（世界 = 数学的構造 = 物理的実体 = 宇宙）

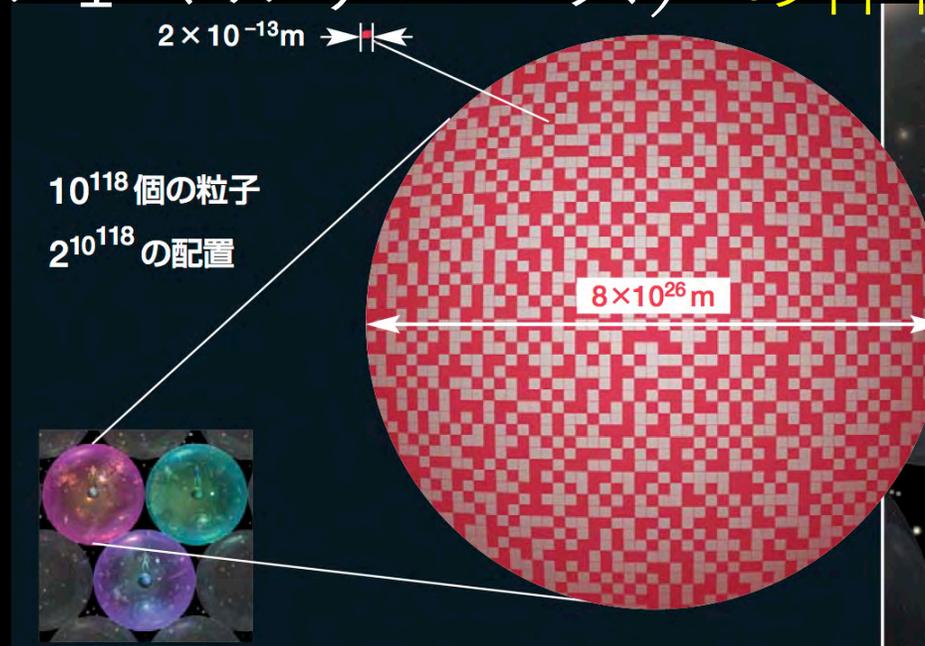
レベル4 マルチバース

- 世界とは抽象的な数学的構造そのものなのではないか？
 - とすれば法則が数学で記述できるのは当たり前
 - (無矛盾な) 数学的構造に対応した無数の宇宙が実在する



パラレルユニバース（クローン宇宙） が実在するための条件

- 我々が観測できる宇宙（半径138億光年の地平線球：レベル1ユニバース）は有限個の自由度で記述し尽くされる（量子論的効果が無視できる）
- その外に広がる宇宙（レベル1マルチバース）の体積は（ほぼ）無限



有限体積の宇宙が持つ情報量は有限か —世界はデジタルか、アナログか？—

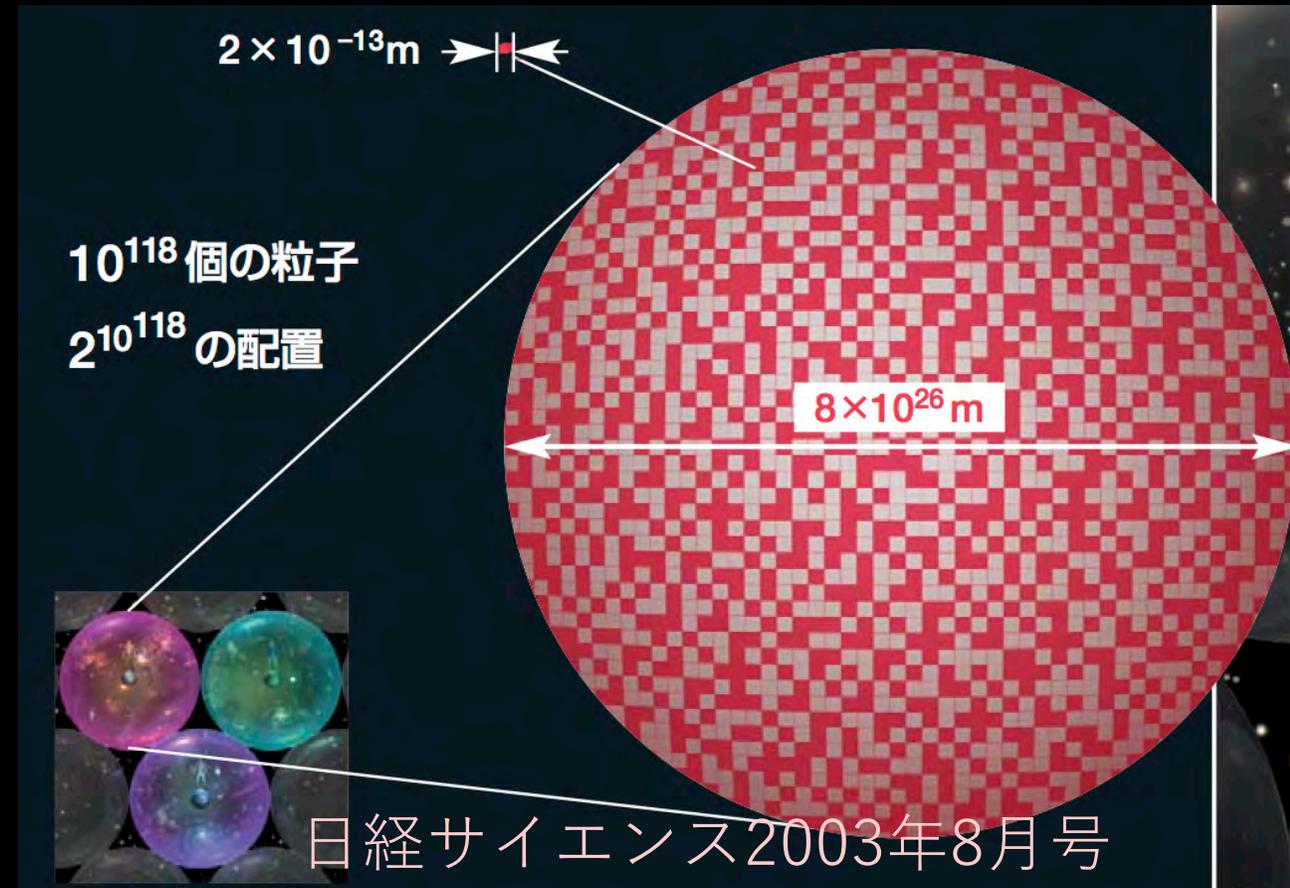


- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物（と区別できないクローン宇宙）に到達する？
 - すべての物質は有限個の素粒子からなる（量子論を無視する）
 - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
 - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？

我々の地平線球が持つ情報量

- 水素の原子核の大きさは $\sim 10^{-13}\text{cm}$
- 地平線球の半径138億光年は $\sim 10^{28}\text{cm}$

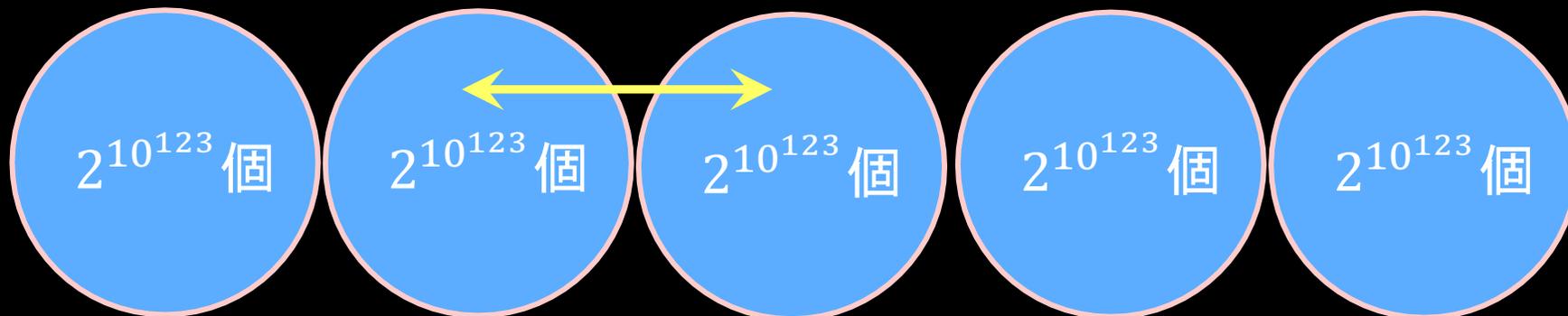
- この地平線球につめこめる水素の個数は最大 $(10^{28}/10^{-13})^3=10^{123}$ 個
- そこに実際に水素を置くかどうかの2通りの可能性があるので、可能な配置数は2の 10^{123} 乗通り
- この半径をもつ地平線球の種類は2の 10^{123} 乗通り*しか*ない



隣のクローン宇宙（パラレルユニバース）までの距離

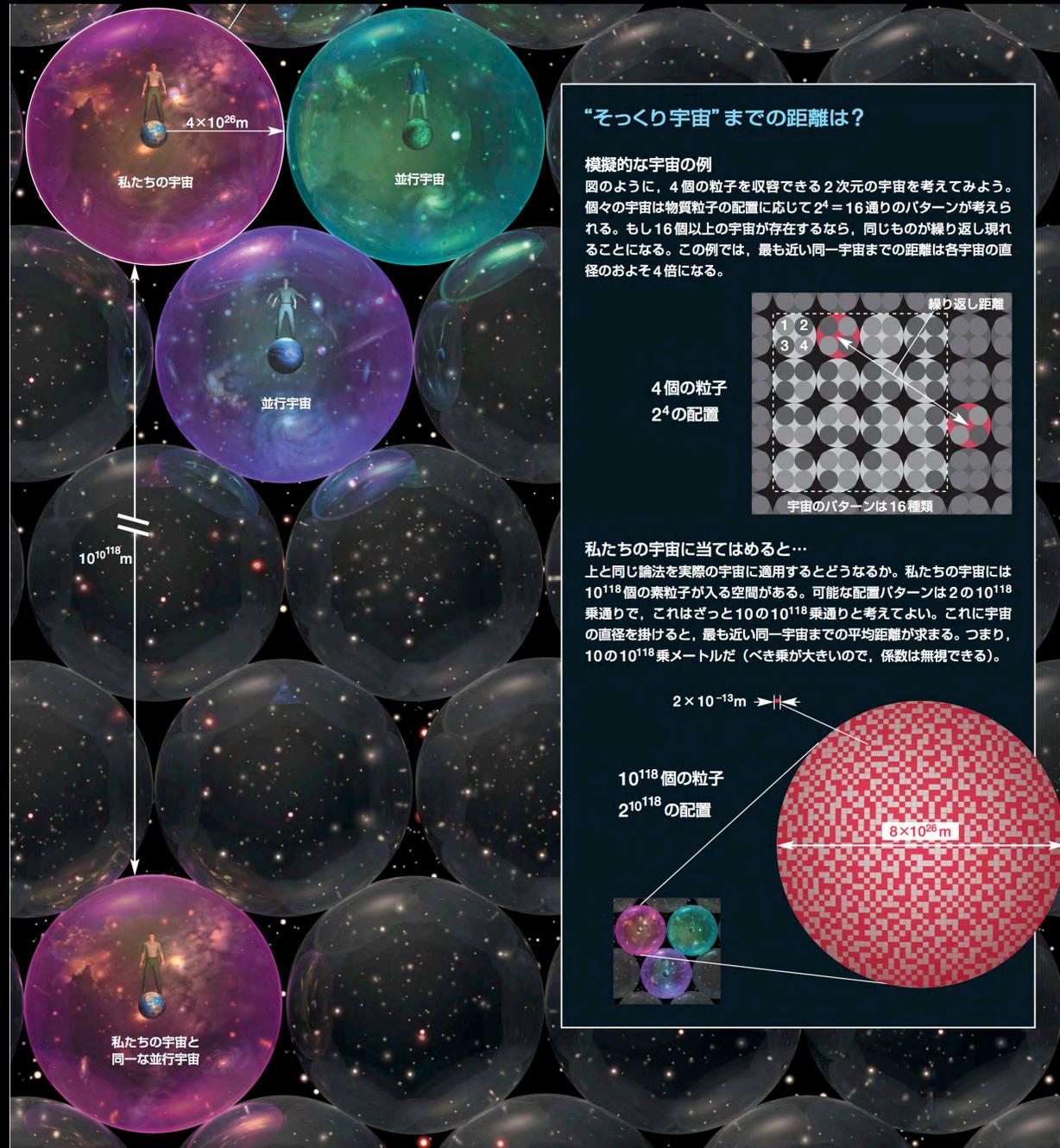
- 2の 10^{123} 乗個の地平線球（レベル1ユニバース）を含む体積
 - それぞれの地平線球内の水素配列は全くランダムだとする
 - 完全に同一の水素配列をもつ地平線球(レベル1ユニバース)は全く同じ性質を持つクローン宇宙だとする
- とすれば平均的には、この体積の球と同じ体積をもつ隣の球内には、我々の地平線球のクローン宇宙が存在しているはず
 - 隣のクローン宇宙までの距離

138億光年 \times (2の 10^{123} 乗) $^{1/3}$ \sim (10の 10^{122} 乗)億光年



パラレルユニバース (クローン宇宙) は実在する!

- 宇宙が(10の 10^{122} 乗)億光年より大きければ(=ほぼ無限体積)
- 同一原子配置をもつ人間は意識まで含めて同じクローン人間か?



先生、未来の江戸も美しき町ですか？

TBS開局60周年記念

日曜劇場

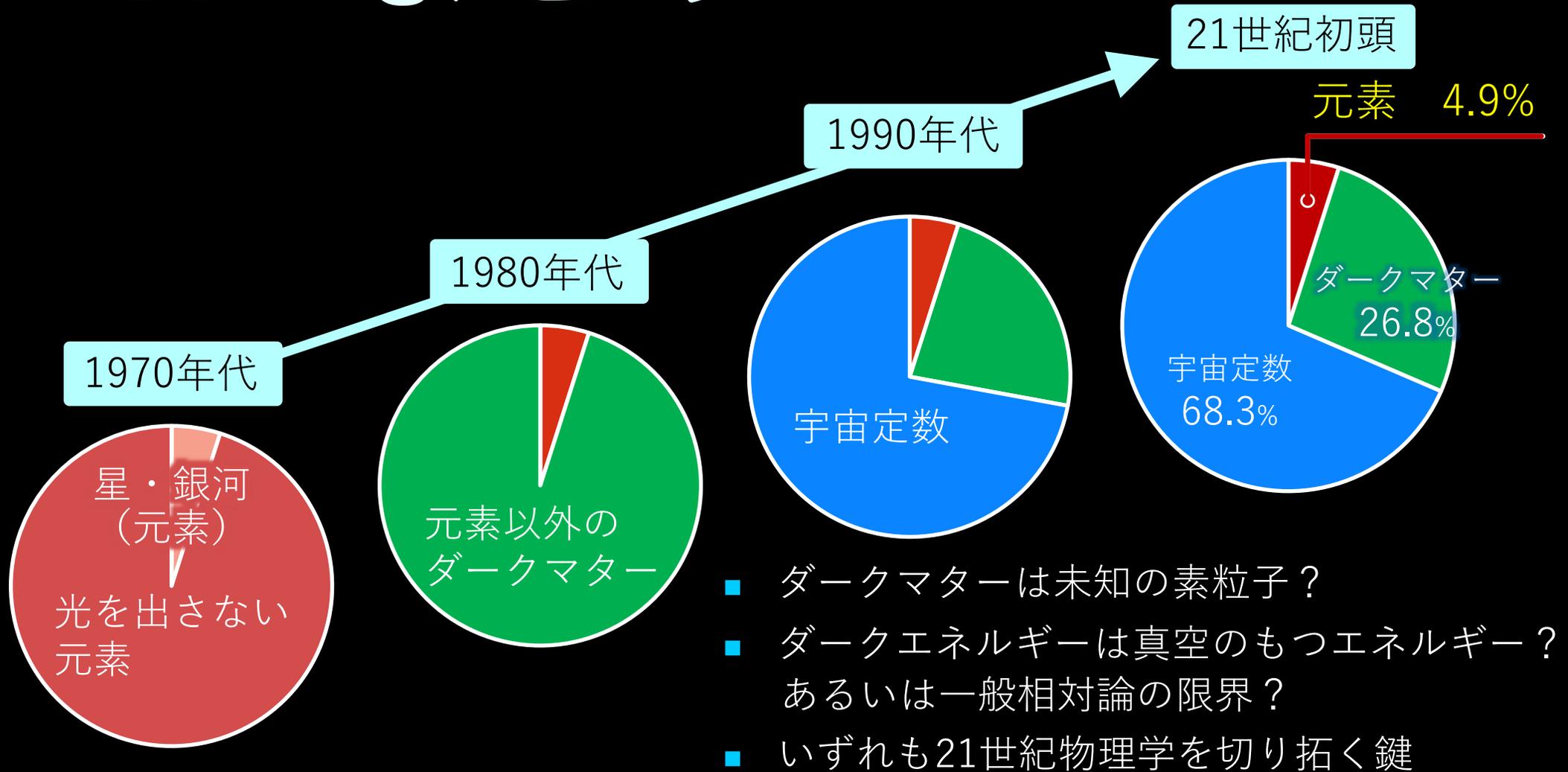
JIN-仁-



TBS



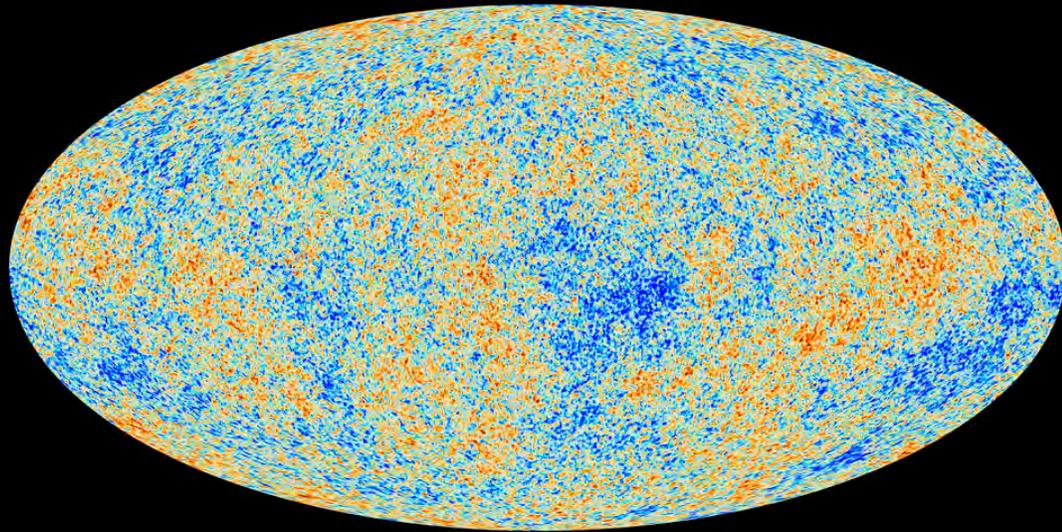
VI まとめ



- 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限界？
- いずれも21世紀物理学を切り拓く鍵

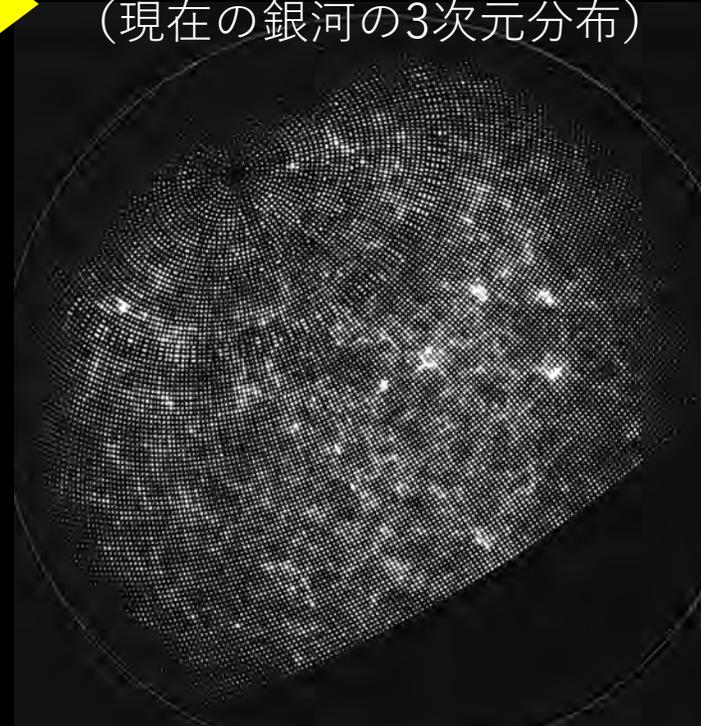
現在の宇宙（世界）に関する全情報が 原理的にはここに刻み尽くされている

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)

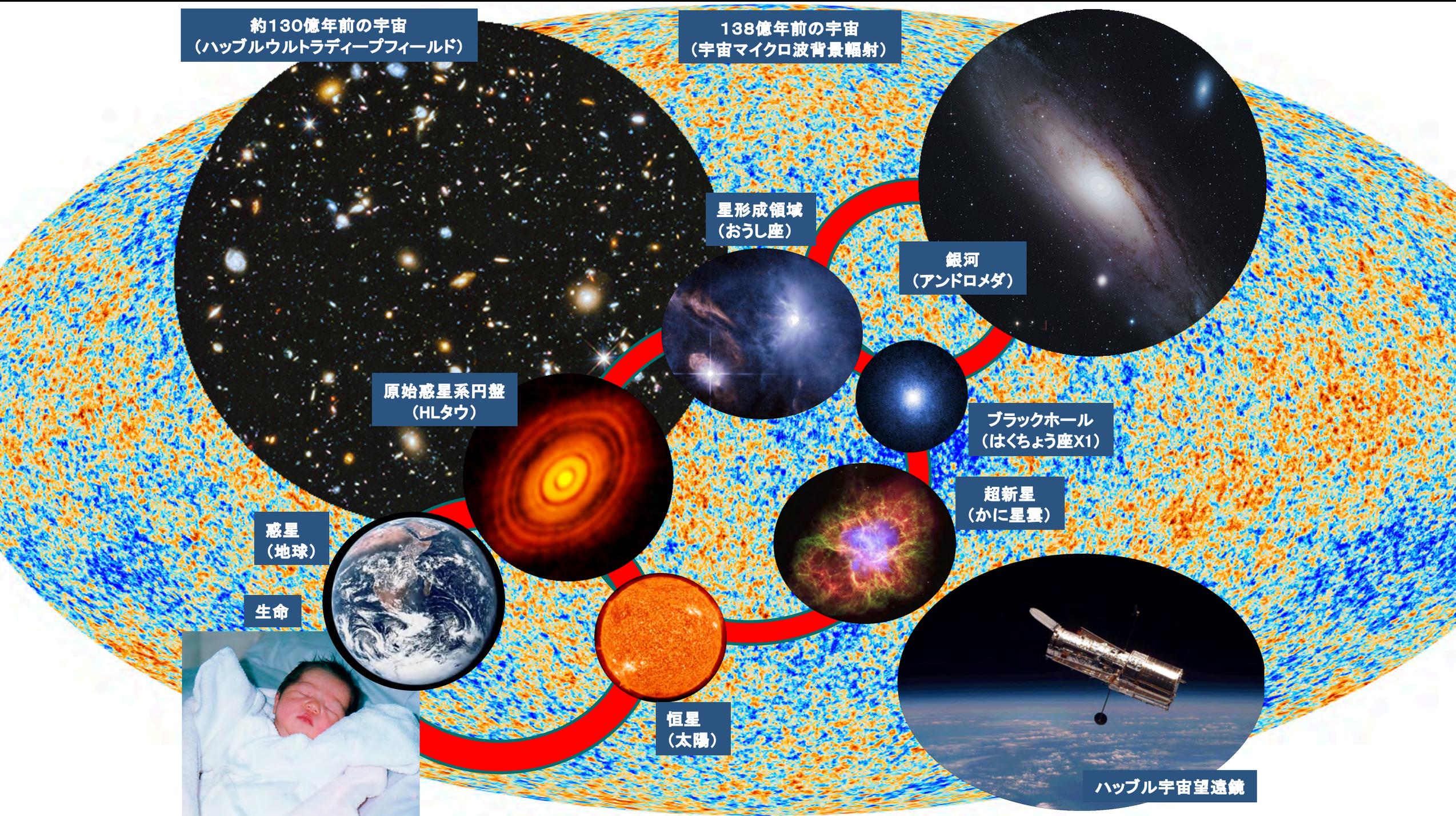


■ 宇宙論の中心的教義

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)

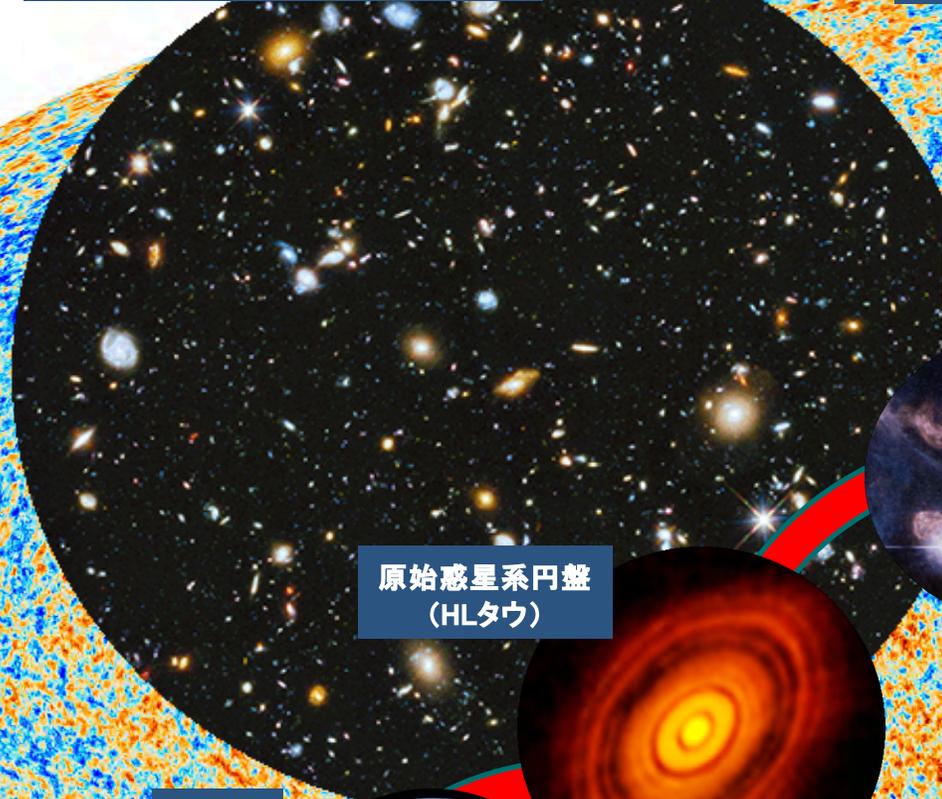
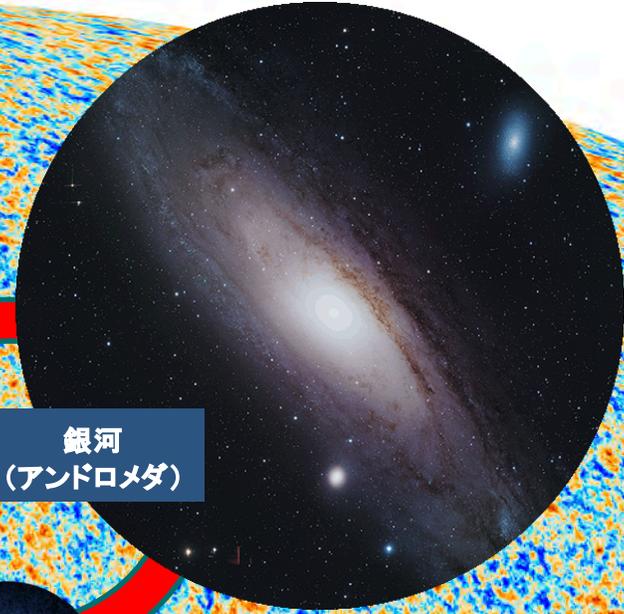
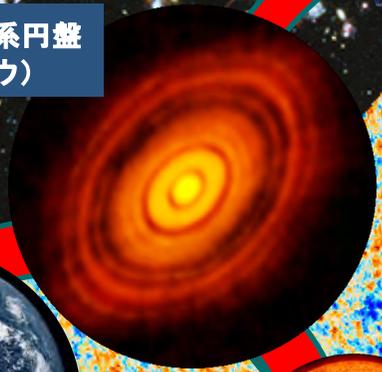
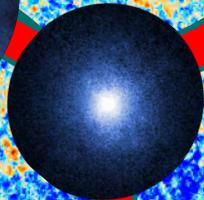
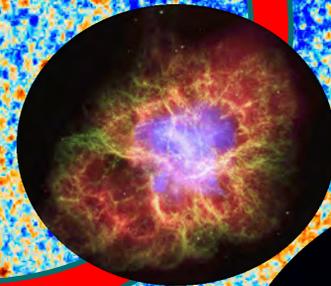
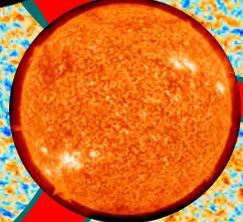
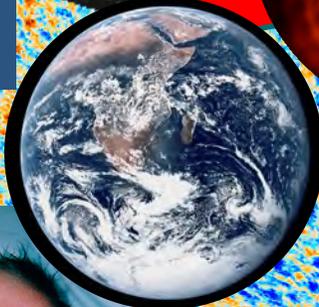
超新星
(かに星雲)

惑星
(地球)

生命

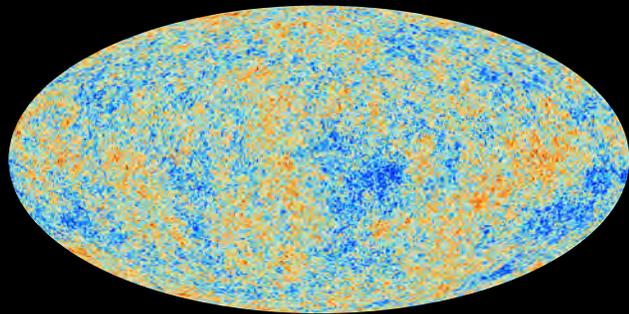
恒星
(太陽)

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