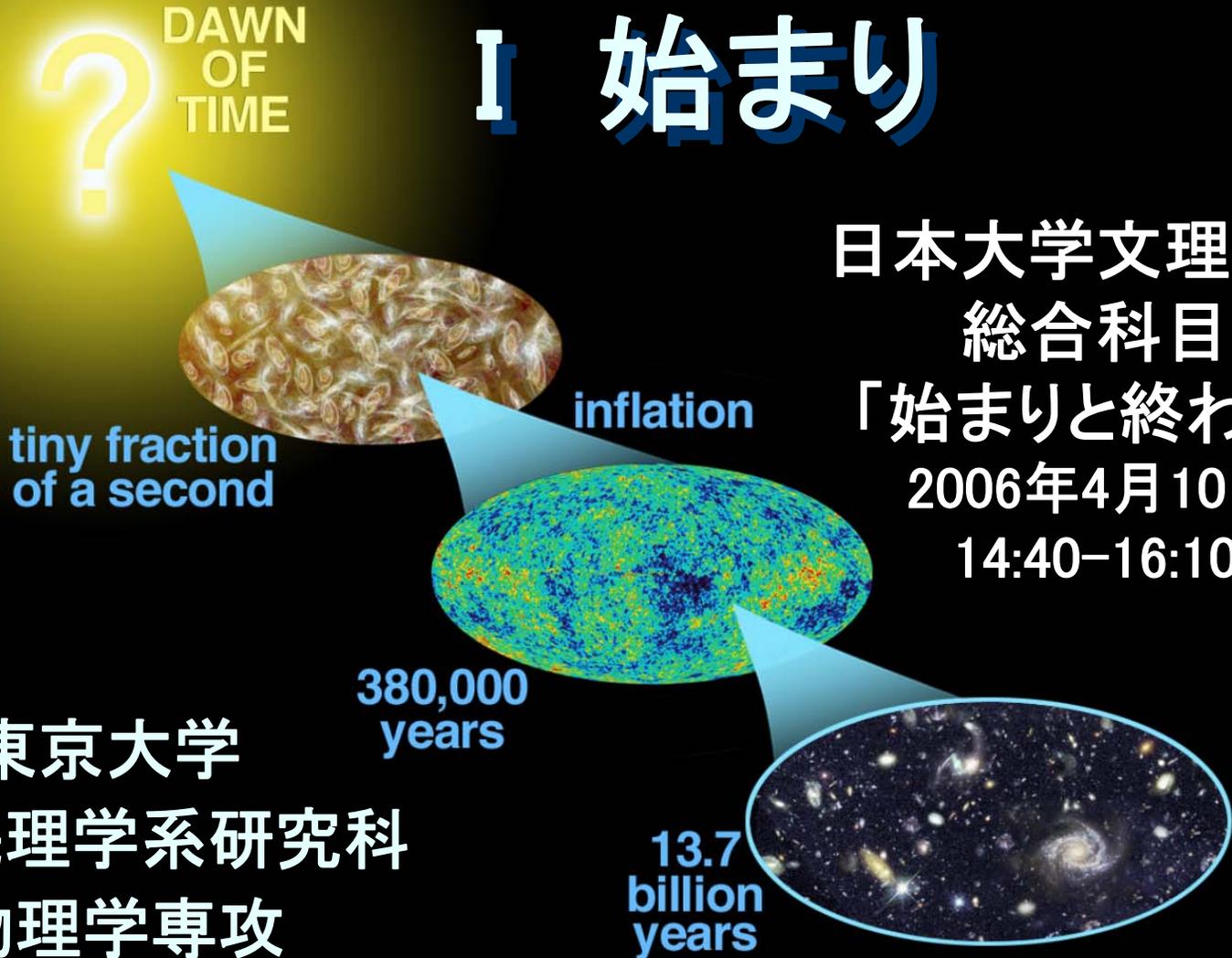


宇宙の始まりと終わり: I 始まり



日本大学文理学部
総合科目
「始まりと終わり」
2006年4月10日
14:40-16:10

東京大学
大学院理学系研究科
物理学専攻
須藤 靖



今回の講義の目的

1. 「宇宙に始まりがある」と考えられる科学的根拠を理解する
2. 宇宙初期のインフレーション理論を概観する
3. 標準ビッグバン理論とはどのようなものかを理解する
4. 宇宙が誕生してから現在に至る約137億年の歴史を振り返る

1. 宇宙に始まりがあると 考えられる理由



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。」 (*let there be light*)
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



宇宙に始まりはあるか？

- 全く自明ではない基本的な問いかけ
- 始まりがあるとすると
 - なぜ始まったのかと聞きたくなる
 - その前は何だったのかと聞きたくなる
- 「神様なしで」このような禅問答を避けるには、
 - 始まりも終わりもなくずっと同じ状態のまま
 - 無限に輪廻転生を繰り返す

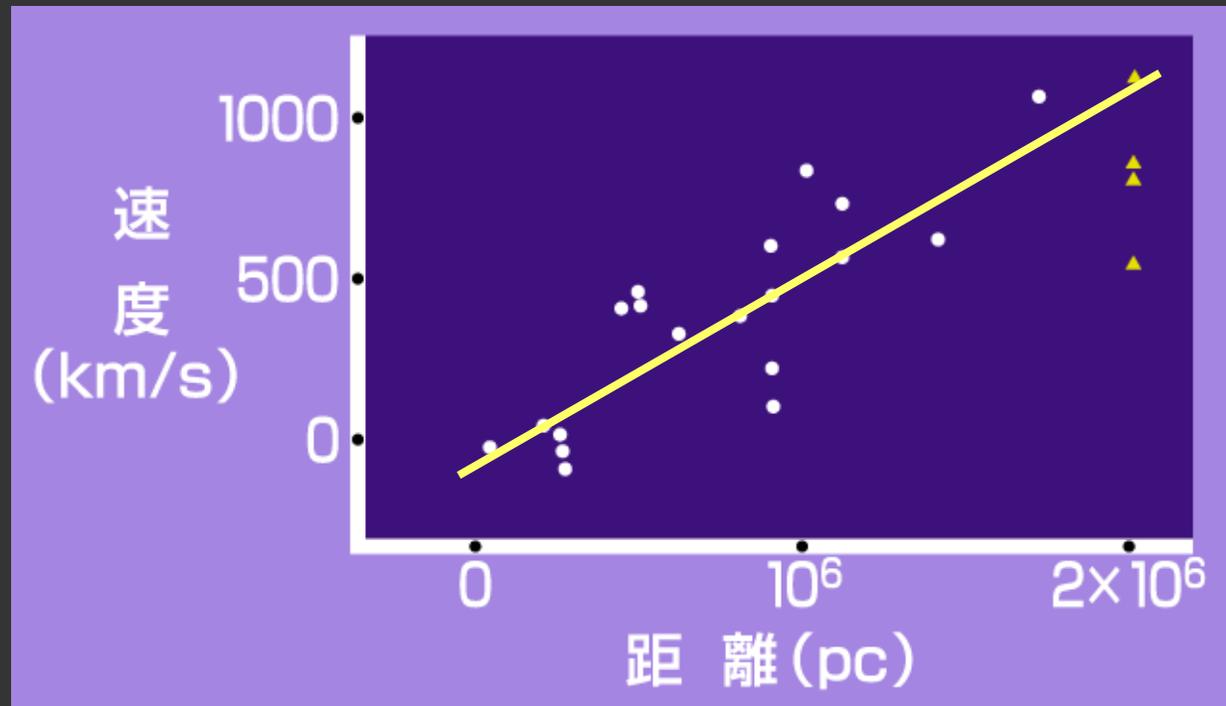
のどちらかだと考えたほうがずっとすっきりする

- つまり、**哲学的・宗教的には「宇宙に始まりはない」**あるいは**「創造主がいる」**ことにしないと面倒
- しかし、**科学的には「始まりはある」とされる**

天文観測：宇宙膨張の発見

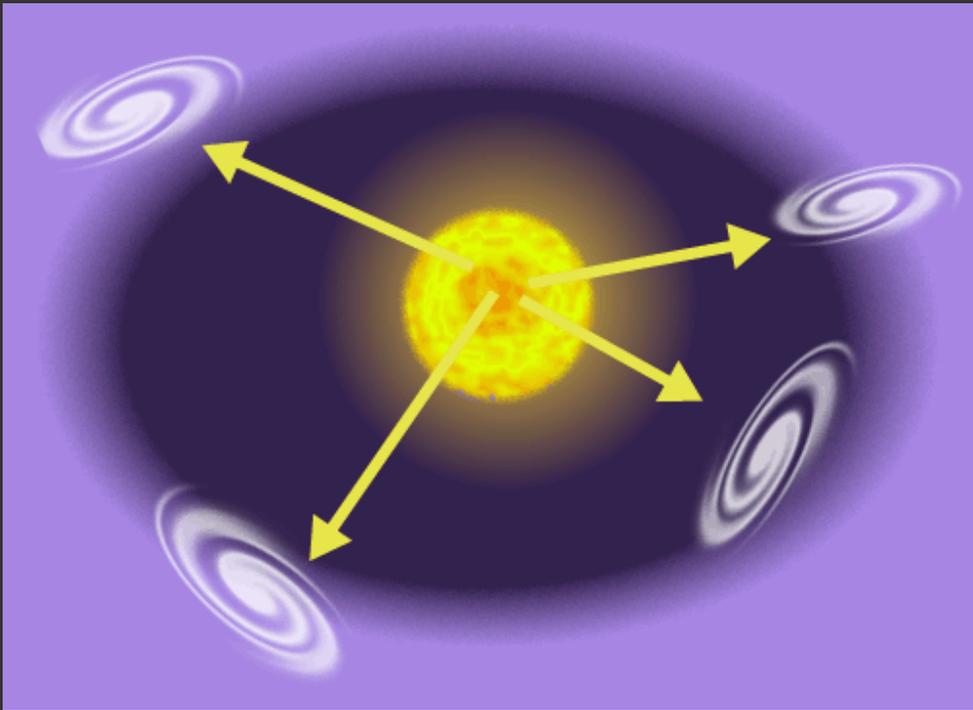
■ エドウィン ハッブル (1889-1953)

- 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ことを発見 (1929年)



ハッブルの法則の非民主的解釈

- 我々は宇宙の中心である！

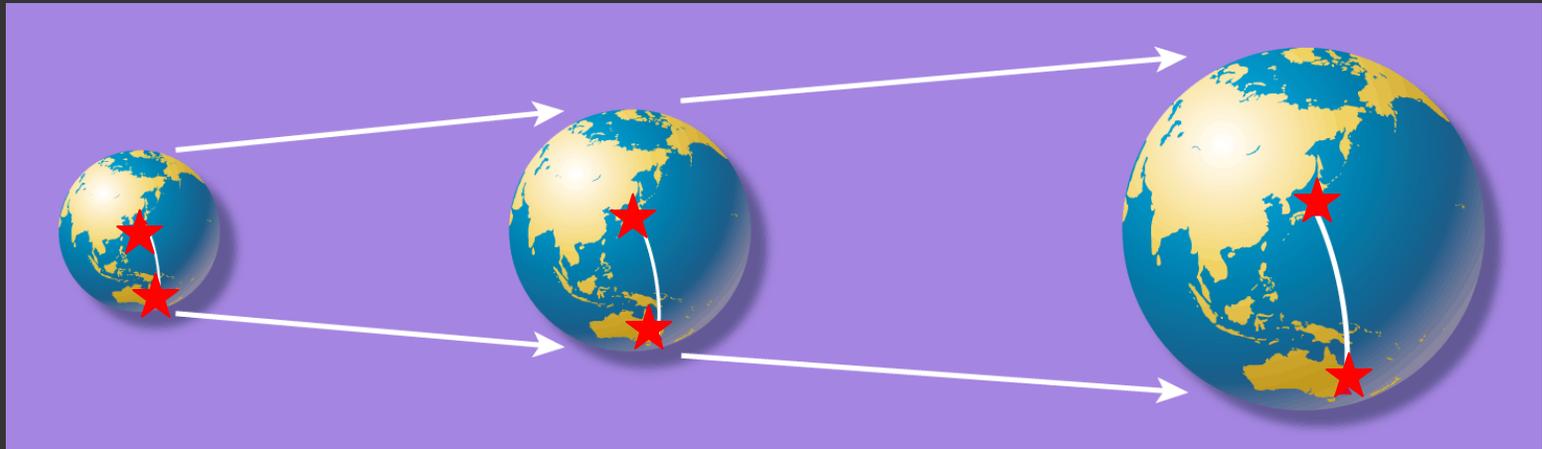


すべての銀河が我々の銀河系を中心にして、かつその後退速度が距離に比例するような特殊な関係を満たしながら運動している

ハッブルの法則の民主的解釈

- ハッブルの法則は、我々の銀河系を中心とした場合に限らず宇宙のどこでも成り立つ

この法則は、単に個々の銀河の運動ではなく、宇宙があらゆる場所で全体として一様等方に膨張している結果



ハッブルの法則と宇宙年齢

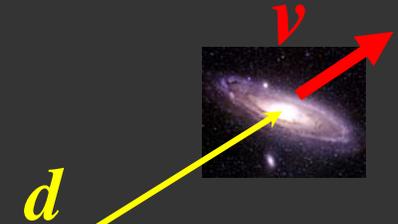
- ハッブル定数の逆数は宇宙年齢の目安

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

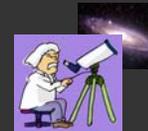


$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} \approx 100h^{-1} \text{ 億年}$$

$$h = 0.71 \text{ の場合 } t_H \approx 140 \text{ 億年}$$



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



宇宙には始まりがある！進化する！

一般相対論と進化する宇宙

■ アルバート・アインシュタイン (1879-1955)



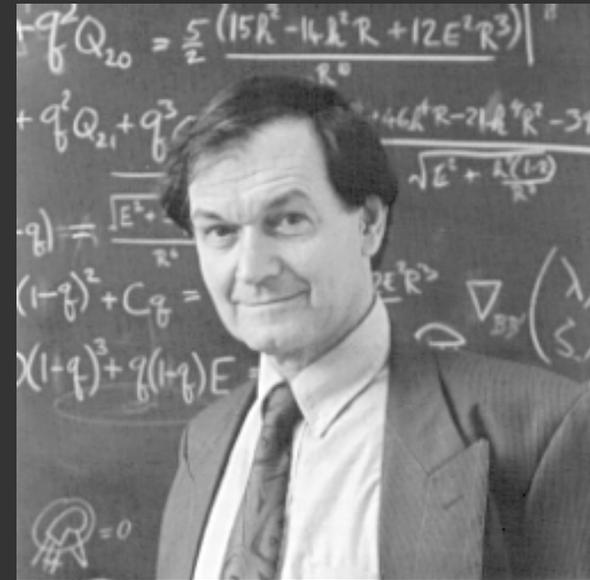
■ 一般相対論の完成 (1916年)

■ 自然な帰結である「始まりがある」宇宙を避けるため、理論を修正し宇宙項を導入。アインシュタインの**静的宇宙モデル** (1917年)

■ ハッブルの発見によりこの修正を撤回。自ら「人生最大の失敗」と評す(1929年)

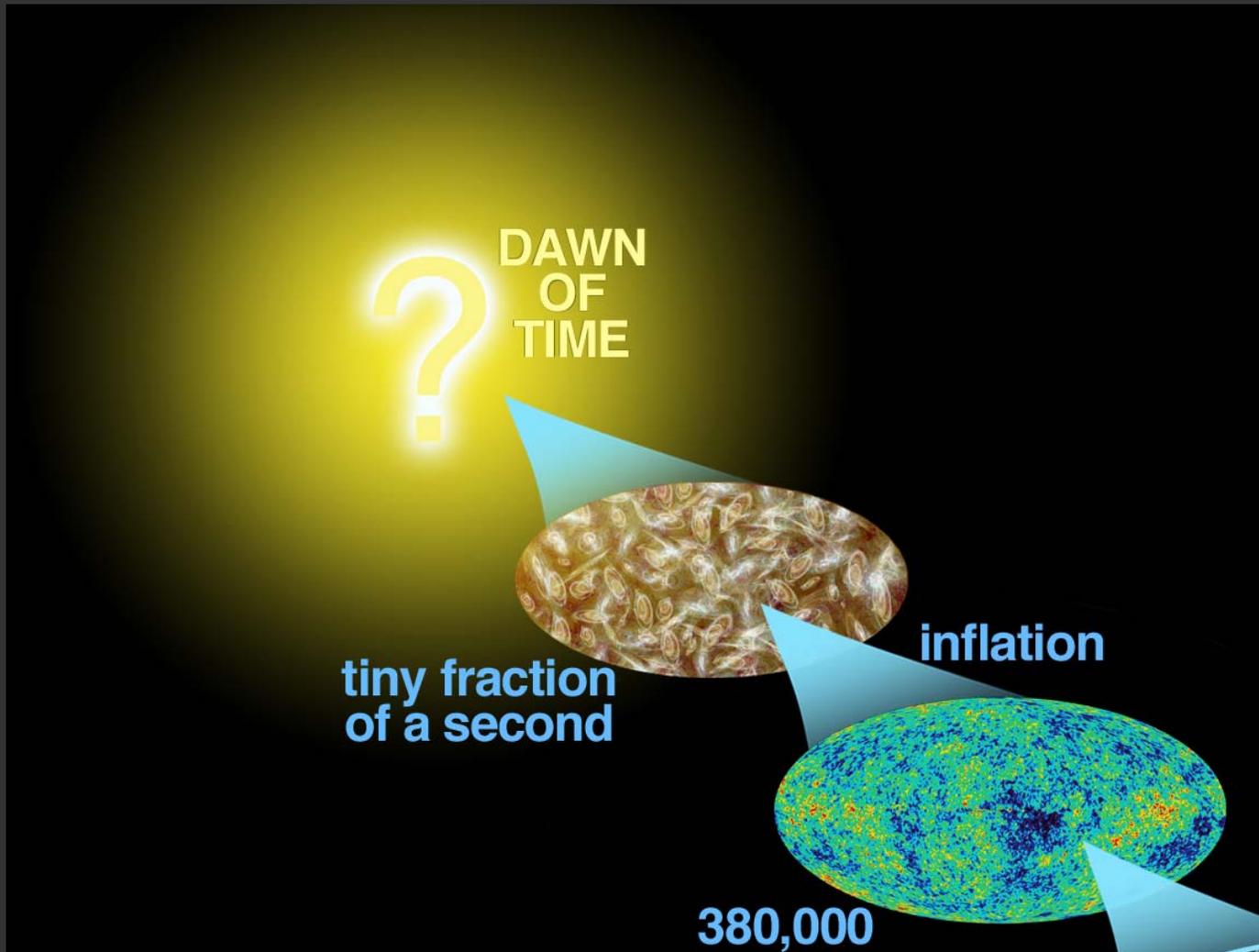


特異点定理



- 英国のロジャー・ペンローズとスティーブン・ホーキングによって、一般相対論によれば初期特異点(宇宙の始まり)が必然的に存在することが証明された(1970年)。
 - 強いエネルギー条件($\rho + 3P > 0$)が満たされている限り過去に $R(t) = 0$ となる点が存在する
 - あくまで古典論の結果であり、量子論を考慮すれば物理的には厳密な特異点は存在しないだろうと期待されている

2. 宇宙のインフレーション



宇宙に関する2つの謎

■ なぜこんなに大きい？（平坦性問題）

- 物理法則から決まる自然な宇宙のサイズは、 10^{-33}cm （プランク長さ）
- 現在観測できる宇宙の大きさは137億光年
 $\doteq 10^{28}\text{cm}$ （ハッブル半径）
- 60桁以上も大きいのは極めて不自然！

■ なぜどこもほとんど同じ姿？（地平線問題）

- 宇宙誕生137億年後に初めて地球で遭遇した光でみる正反対側の宇宙の姿が全く同じ
- 因果律と矛盾？（宇宙の談合？）

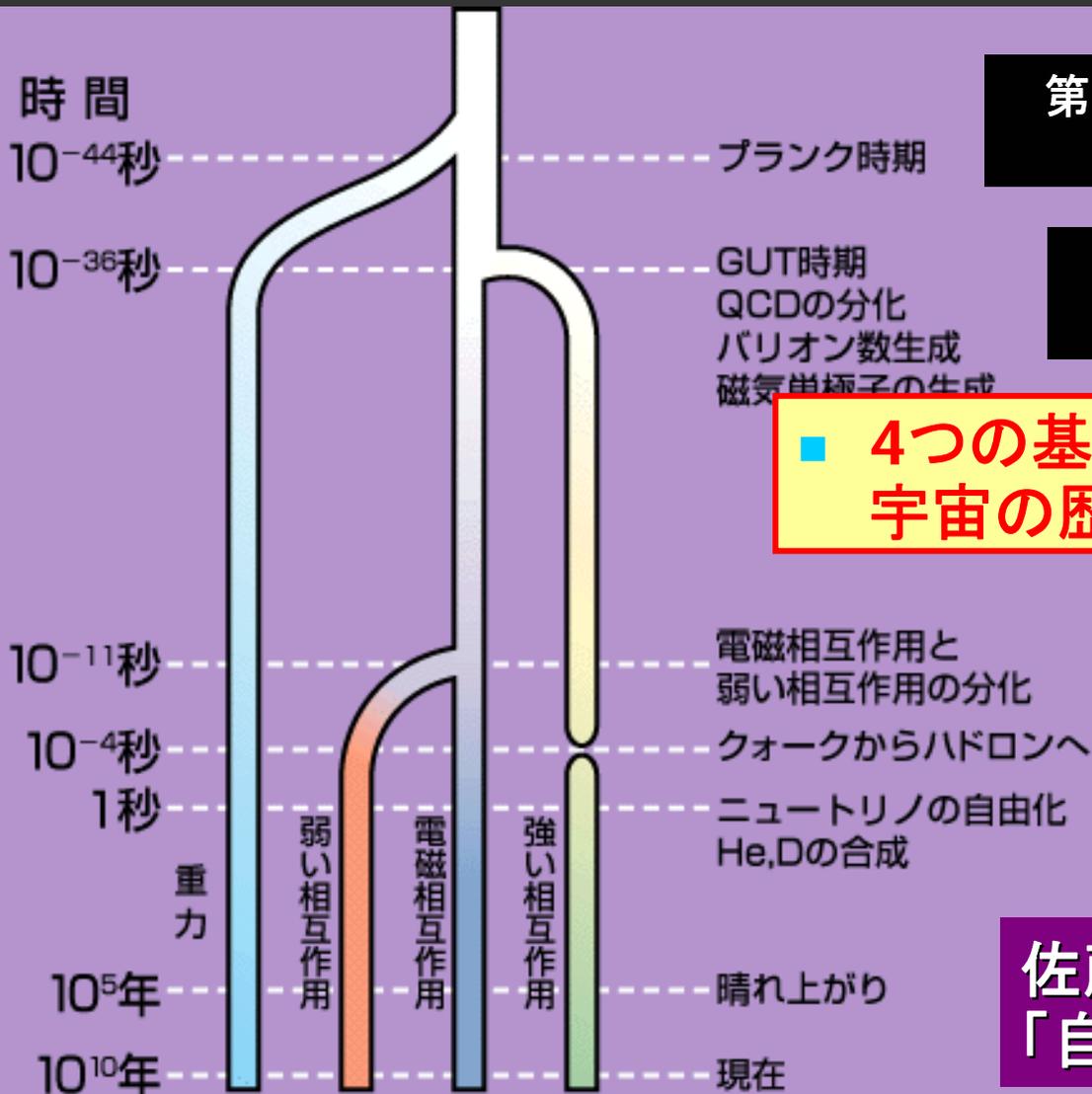
宇宙のインフレーション

- 誕生直後の宇宙がほぼ瞬間的に何十桁も膨張したとすればこれらの問題は解決できる！
 - 1981年、アメリカのアラン・グースと日本の佐藤勝彦が独立に提案
 - 当時の素粒子の統一理論からの自然な帰結
 - グースにより「インフレーション」理論と命名される
- インフレーション理論の完成へ
 - 提案後4半世紀経った今でもあらゆる観測と矛盾しない優れた仮説
 - しかし、最近の統一理論からは必ずしも自然に導かれる結果ではなくなった
 - 理論を具体的に完成させることが重要な課題

宇宙のインフレーションを起こす機構

- 実は良くわかっていない
- 予想されている大まかなシナリオ
 - 宇宙初期には様々な異なる「真空」が存在
 - 「不安定な偽の真空状態」は「安定な真の真空状態」へ転移する際に急激な膨張をする
 - この偽の真空状態が持っていた潜熱(真空のエネルギー)が解放されることによって宇宙を加熱し、標準的ホットビッグバン宇宙に到達する
- 宇宙の誕生は超高エネルギーにおける素粒子物理によって記述される
 - 宇宙の歴史 = 素粒子の相互作用の歴史
 - 今後解明されるべき研究のフロンティアの一つ

自然界の4つの相互作用と相転移



第1の真空の相転移
(重力の誕生)

第2の真空の相転移
(強い力の誕生)

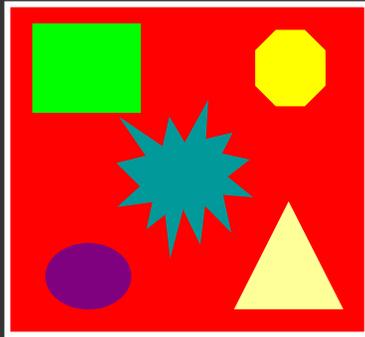
■ 4つの基本相互作用の分化は、
宇宙の歴史に刻印されている

第3の真空の相転移
(弱い力の誕生)

第4の真空の相転移
(陽子の誕生)

佐藤文隆、佐藤勝彦
「自然」1978年12月号より

インフレーションシナリオ的宇宙観



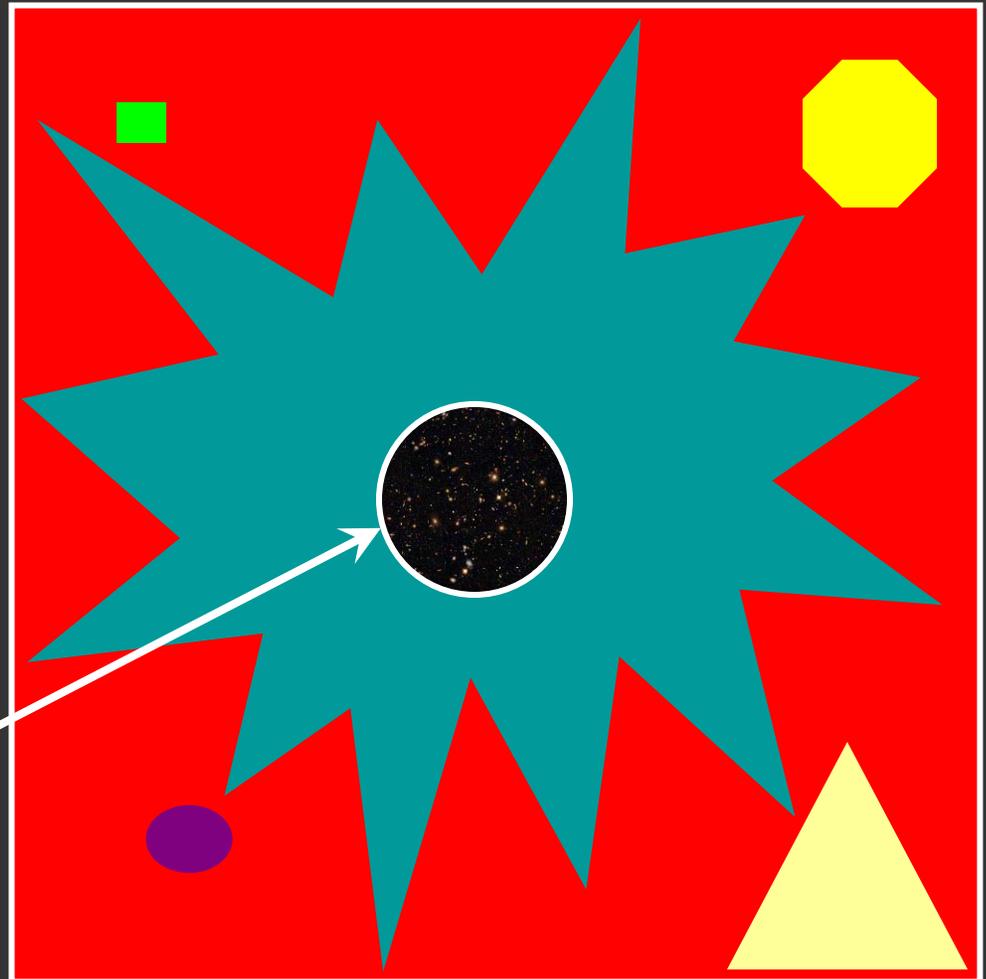
インフレーション前:

空間の異なる領域はそれぞれ異なる初期条件(例えばインフレーションを起こす場の初期値)を持つ



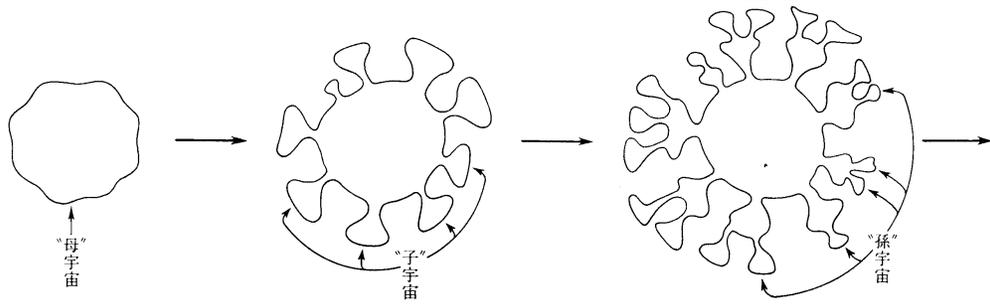
インフレーション後:

適切な初期条件を持った領域だけが指数関数的膨張をし、現在の(我々の)宇宙をつくることのできる

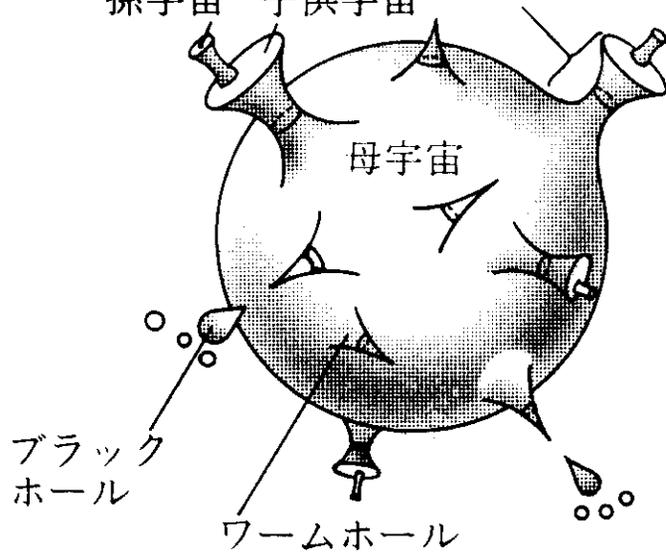


現在の宇宙の地平線
(因果関係を持ちうる
観測可能領域)

インフレーションシナリオ的多重宇宙像



アインシュタイン・ローゼンの橋
孫宇宙 子供宇宙



(佐藤勝彦氏提供)



「The Genesis out of the Vacuum」1989年 ガラス 38.5×24×24cm/宇宙の生成のようすをガラスで表したこの作品。イメージの背後には長年の探究がある。作者は、太陽や月に毎日カメラを向けて、もう20年。宇宙に魅せられ、シャッターを押しつづけるために会社も辞めてしまった。ガラス職人とのコラボレーションで生まれたこの彫刻にも、宇宙の雄大な動きそのものがたくいまれな造形だという確信がうかがえる。

アーティスト

野村 仁

Hitoshi Nomura

1945年兵庫県生まれ。活動当初より物体の変容を写真に記録。のちに1枚のネガに1年間の太陽の軌跡を刻した「アナレンマ」シリーズや、一夜の月の運行を楽譜にした「moon' score」など、宇宙の時の流れを視覚化した作品が代表作となる。



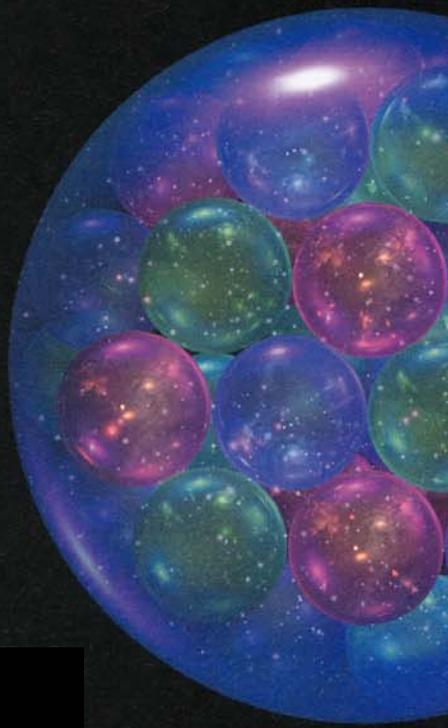
私たちの宇宙

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)



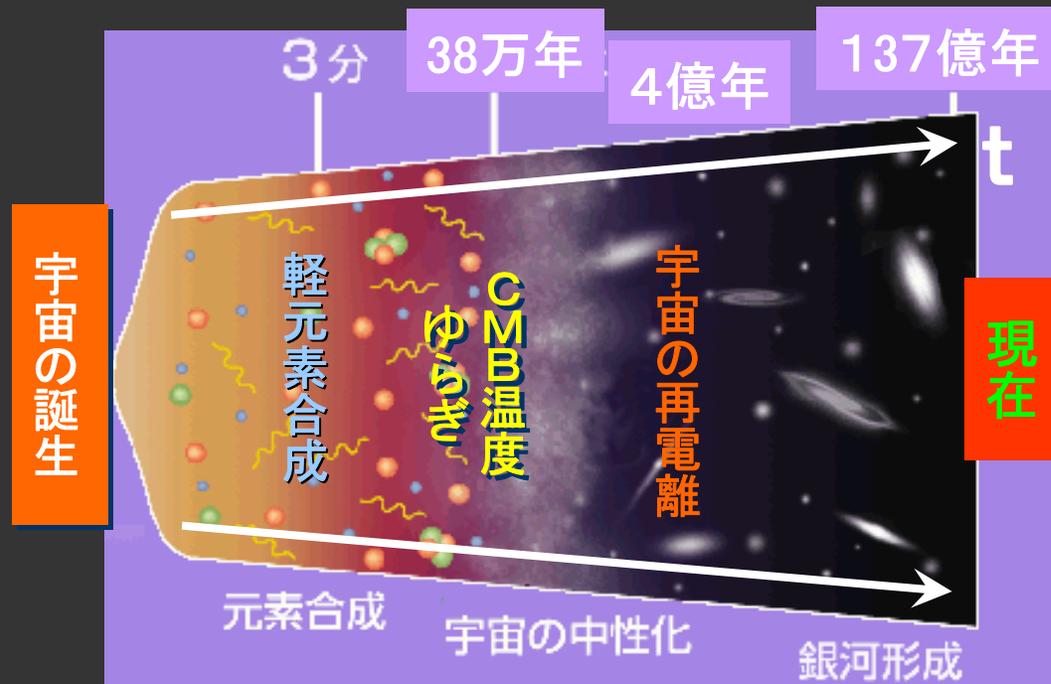
並行して存在する
レベル1
マルチバース

多重宇宙 並行宇宙

- インフレーション理論は我々の宇宙以外の多重宇宙・並行宇宙の存在を予測
- 各々の宇宙で物理法則が異なっているかも知れない

inset)

3. 標準ビッグバン理論



量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

銀河団の形成

宇宙の大構造

ビッグバン宇宙論の観測的証拠

ハッブルの法則

十分遠方にある銀河はすべて我々に対して遠ざかっている

軽元素の起源

現在の宇宙には大量のヘリウムが存在する(質量密度にして全元素の約 25%)

宇宙マイクロ波背景輻射

現在の宇宙は、等方的な強度分布を示す電磁波(絶対温度約2.7Kに対応する熱放射)に満たされている

ジョージ ガモフ (1904-1968)

- 宇宙の元素の起源を説明するべく、ホットビッグバン理論を提唱
- その帰結として、宇宙マイクロ波背景輻射の存在を予言
- 原子核物理、宇宙論、分子生物学等の多岐の分野にわたり、極めて独創的なアイデアを発表するとともに、優れた啓蒙書を著した

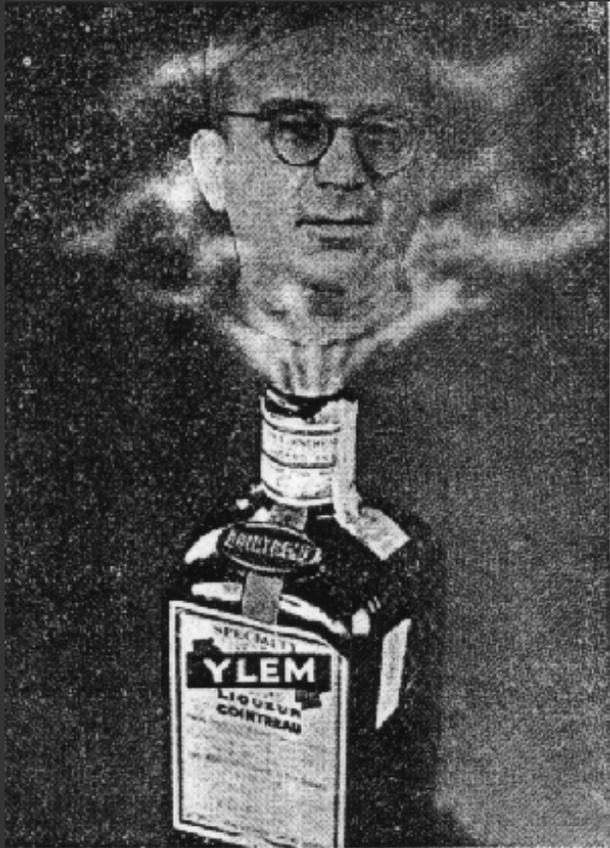
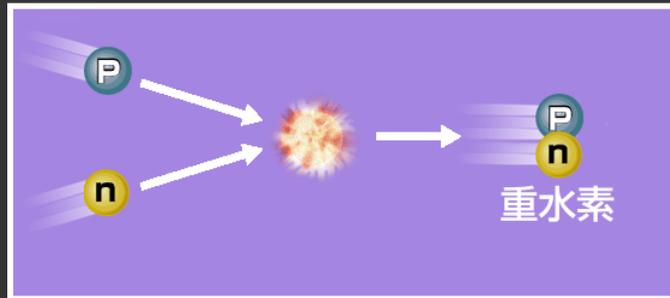


図1 魔法の“イレム”ビンから出てくるガモフ

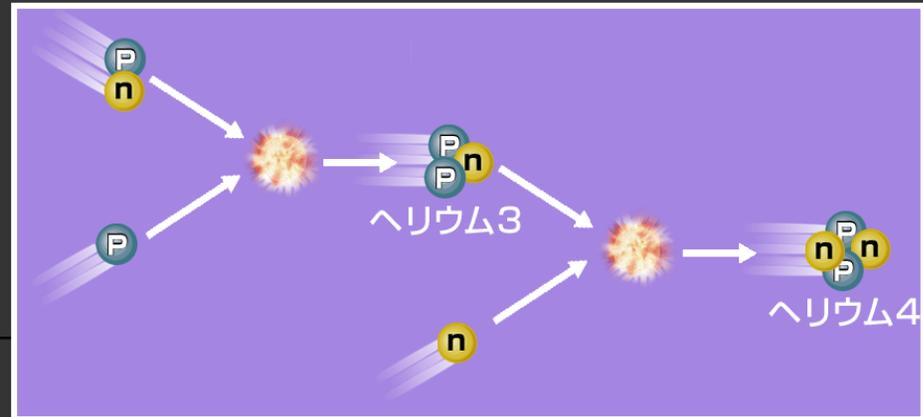
ビッグバン元素合成の基礎過程

■ 宇宙誕生最初の三分間の三分間

重水素合成が第一ステップ



いったん重水素ができると二体反応の積み重ねによって直ちにヘリウムが合成される



ただし、質量数5, 8をもつ安定な原子核が存在しないため、それ以上の重元素の合成は起こらない

1	1	H	1.008	水素
2	3	Li	6.941	リチウム
	4	Be	9.012	ベリリウム

5	6	7	8	9	10
B	C	N	O	F	Ne
10.81	12.01	14.01	16.00	19.00	20.18
ホウ素	炭素	窒素	酸素	フッ素	ネオン

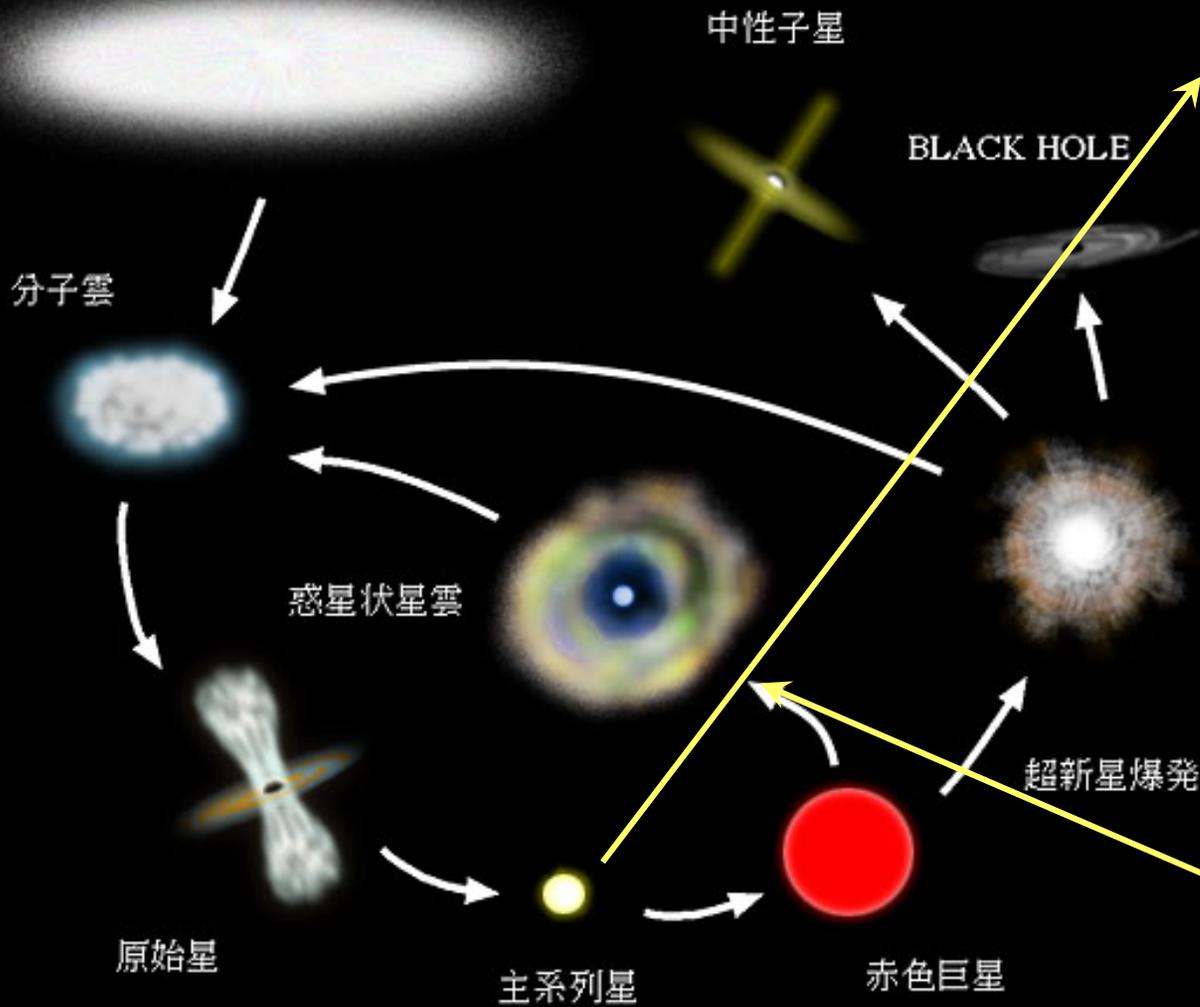
我々は星の子供：宇宙の元素循環

- 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

BIG BANG

太陽系



地球

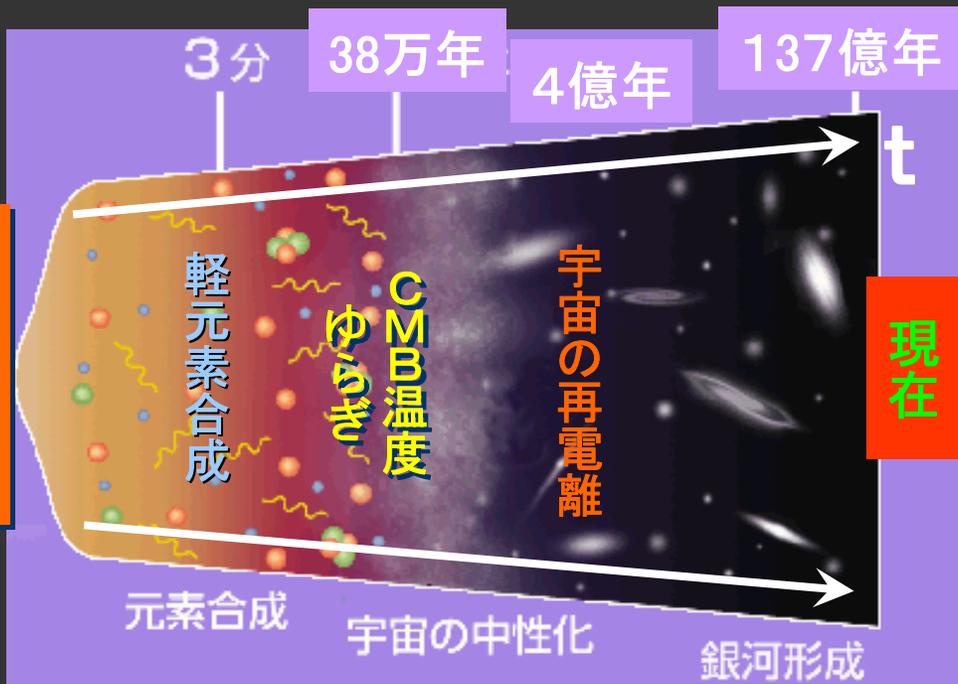


生命



宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波の名残り
(今から137億年前の宇宙の光の化石)



CMB:

Cosmic Microwave Background

■ 宇宙の晴れ上がり

- 誕生後約38万年で温度が3000度程度に下がった宇宙で、電子と陽子が結合して水素原子となる
- この宇宙の中性化により、宇宙は電磁波に対して透明となる

宇宙の誕生

現在

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

銀河団の形成

宇宙の大構造

初めに光あれ

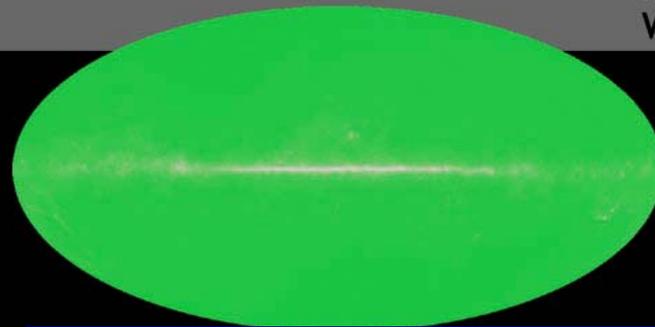
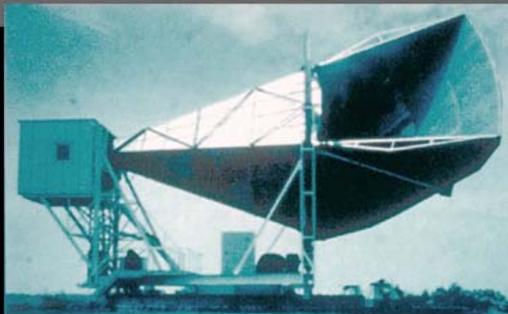


- 神は言われた。「光あれ。」 (*let there be light*)
こうして、光があった。
- 旧約聖書 創世記 天地創造
はすでに現在のビッグバン理論 (1946年) にかなり迫っていた！

CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

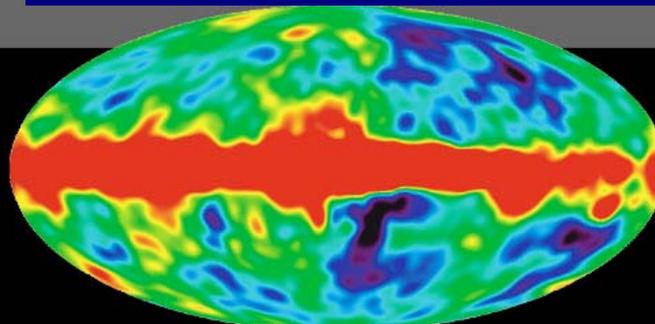
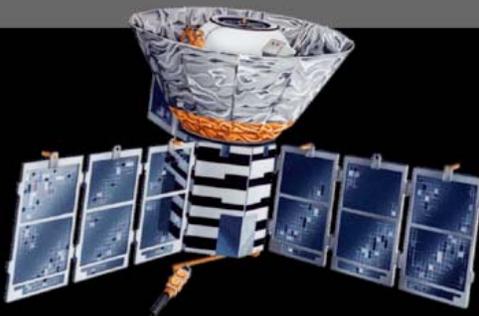
1965

Penzias and
Wilson



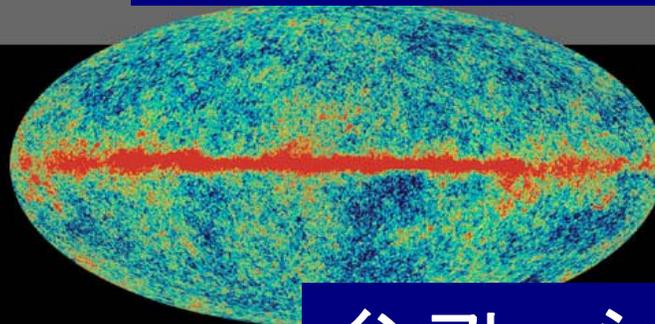
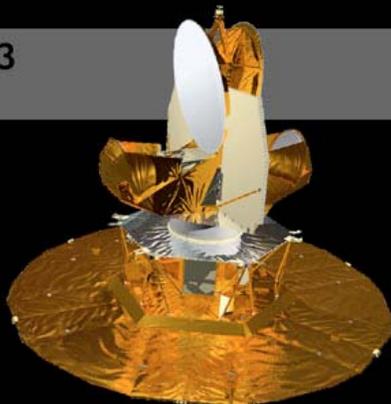
CMBの発見・宇宙の等方性

1992



10万分の1の非等方性発見

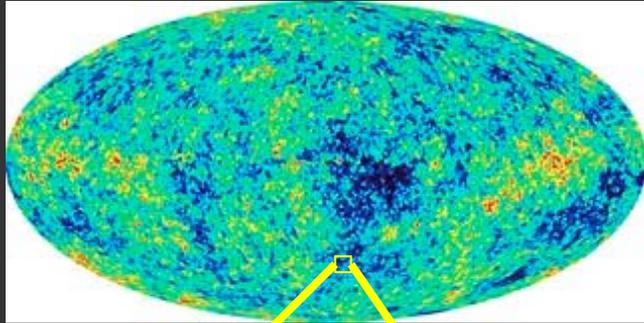
2003



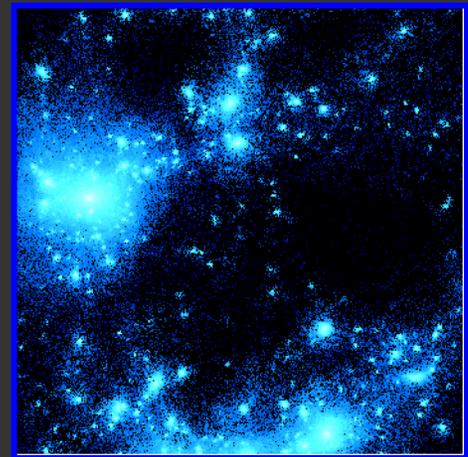
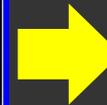
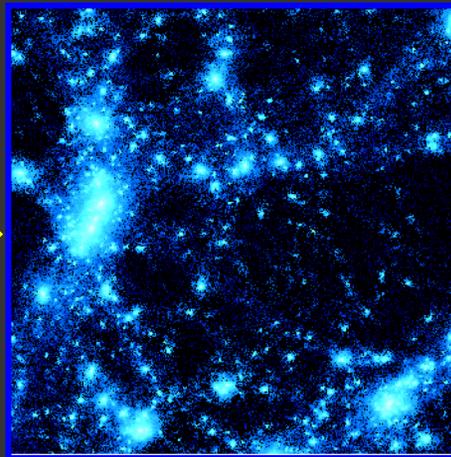
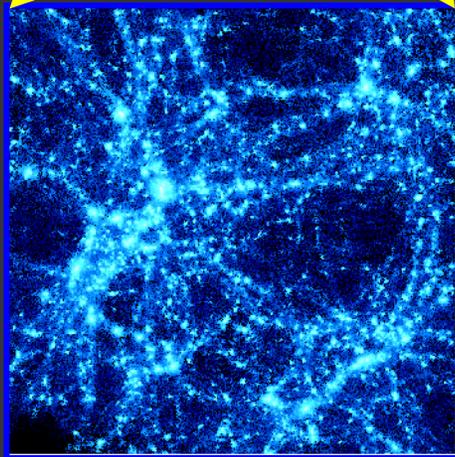
インフレーション理論の検証

宇宙の構造形成標準理論

宇宙初期の空間ゆらぎ

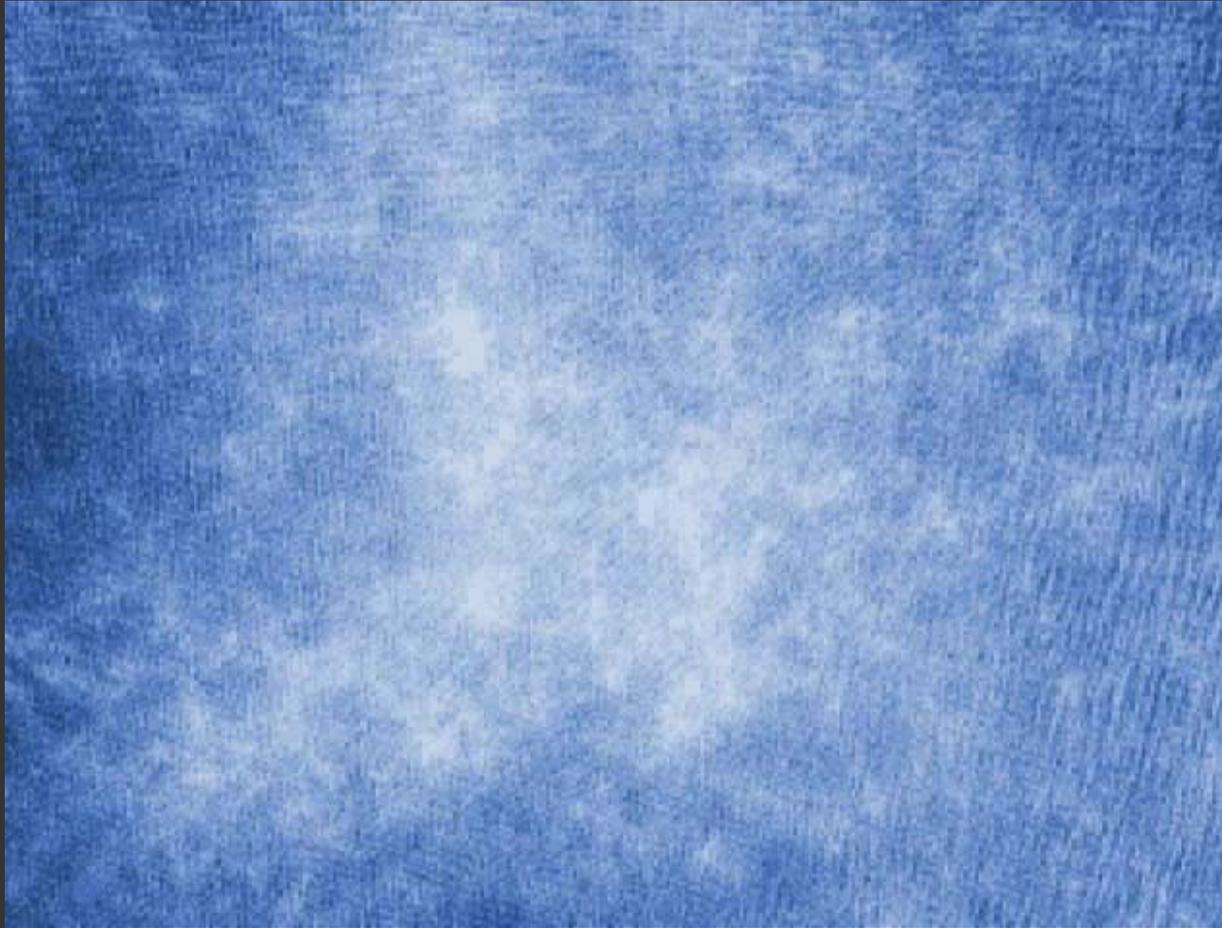


- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



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

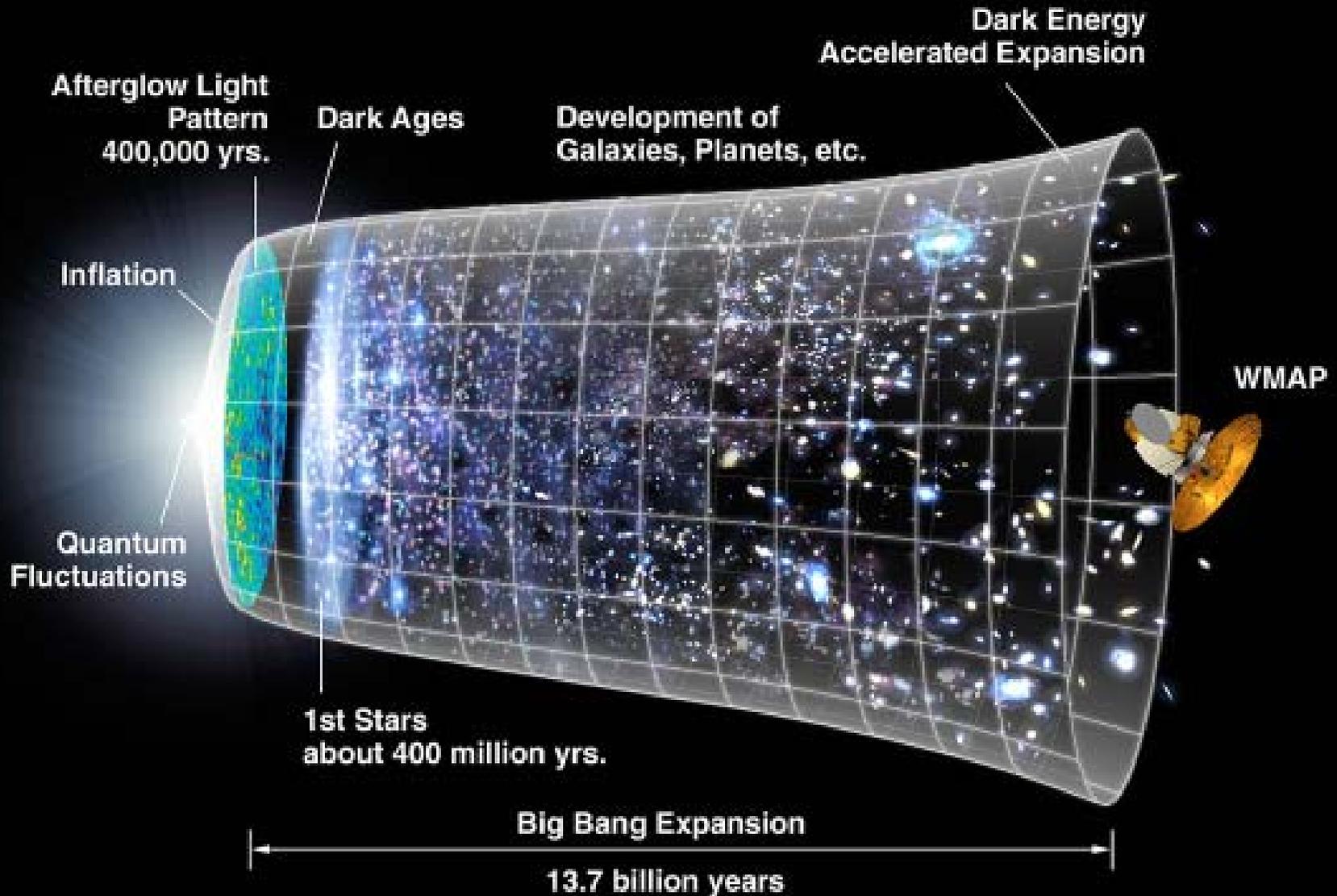
宇宙構造進化シミュレーションの例



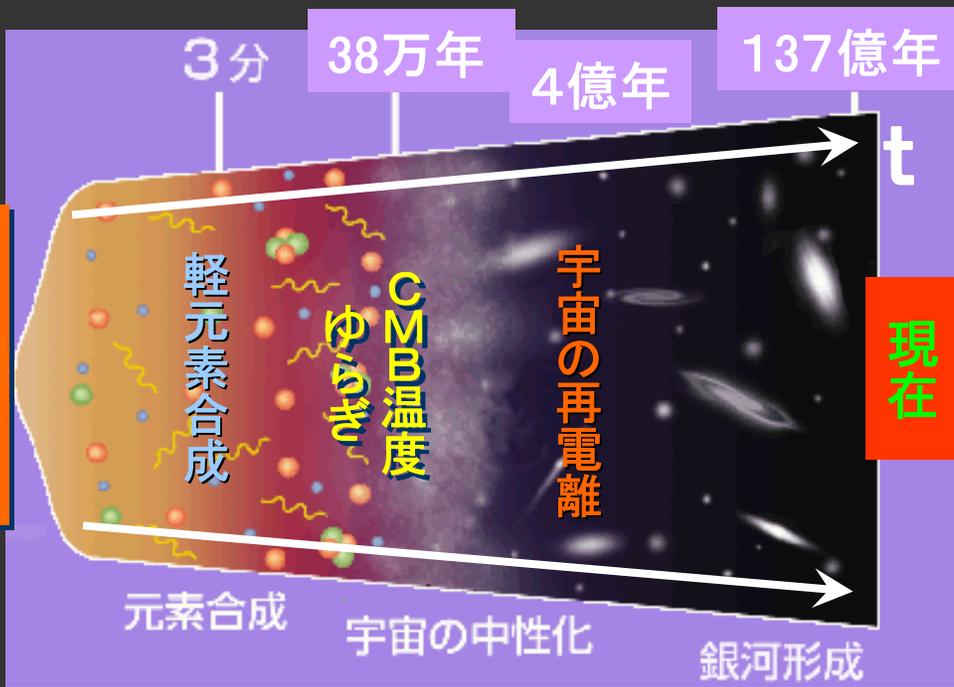
吉川 耕司、
樽家 篤史、
景 益鵬、
須藤 靖
(2001)

- ダークマター分布の進化
- ⇒ X線で見える現在の高温ガス分布
- ⇒ 可視光で見える現在の宇宙の銀河分布

4. 137億年の宇宙史



宇宙の歴史



量子ゆらぎの生成

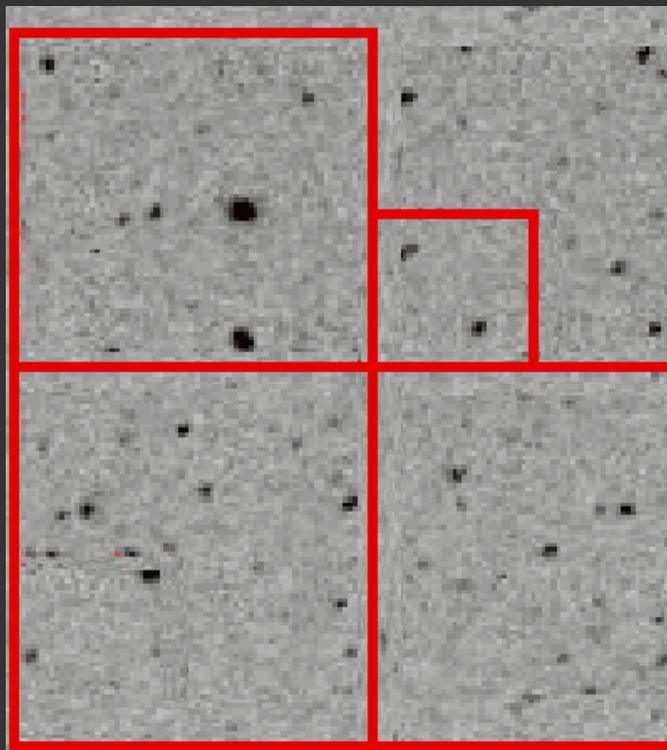
第一世代天体の誕生

銀河の形成
銀河団の形成

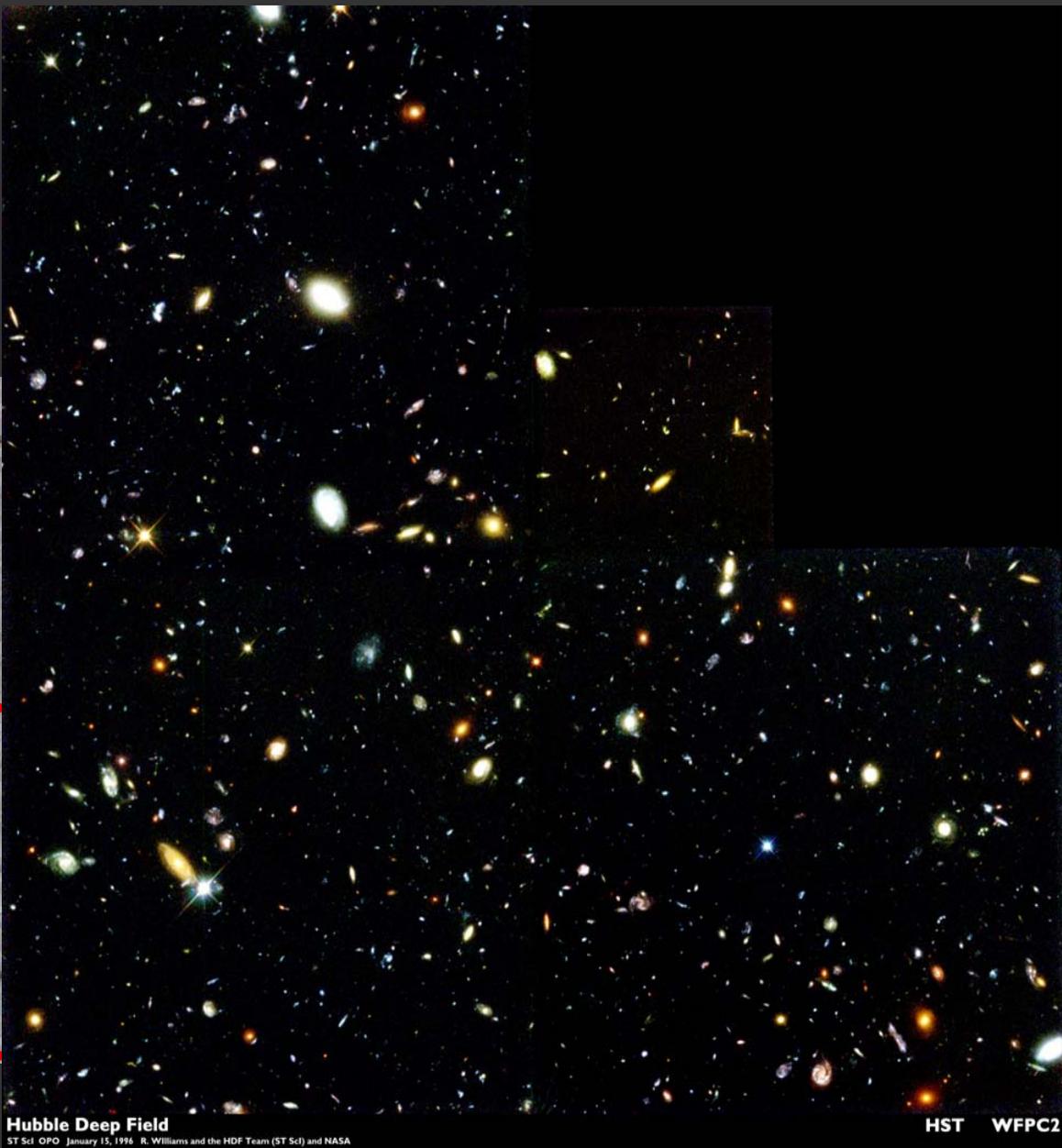
宇宙の大構造

- $t \sim 10^{-40}$ 秒: インフレーション・量子ゆらぎの生成
- $t \sim 3$ 分: ヘリウム合成
- $t \sim 38$ 万年: 宇宙の中性化・宇宙の晴れ上がり
- $t \sim 4$ 億年: 第一世代天体の誕生
- $t \sim 8$ 億年: 宇宙の再電離ほぼ終了
- $t = 8$ 億年 \sim 137億年: 銀河形成、銀河団形成、宇宙の大構造
- $t \sim 137$ 億年: 現在

宇宙を見る “目”の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板

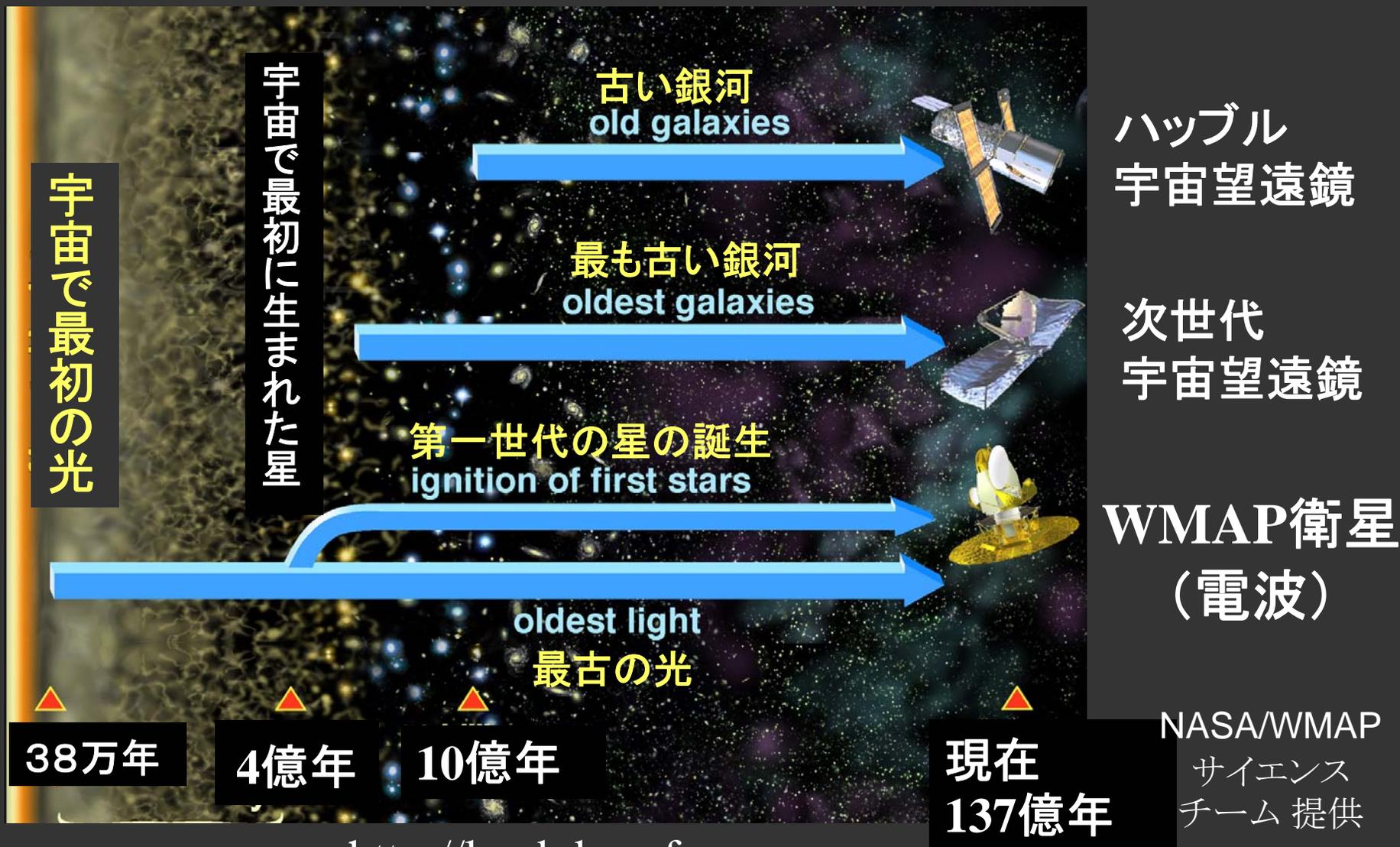


Hubble Deep Field
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2

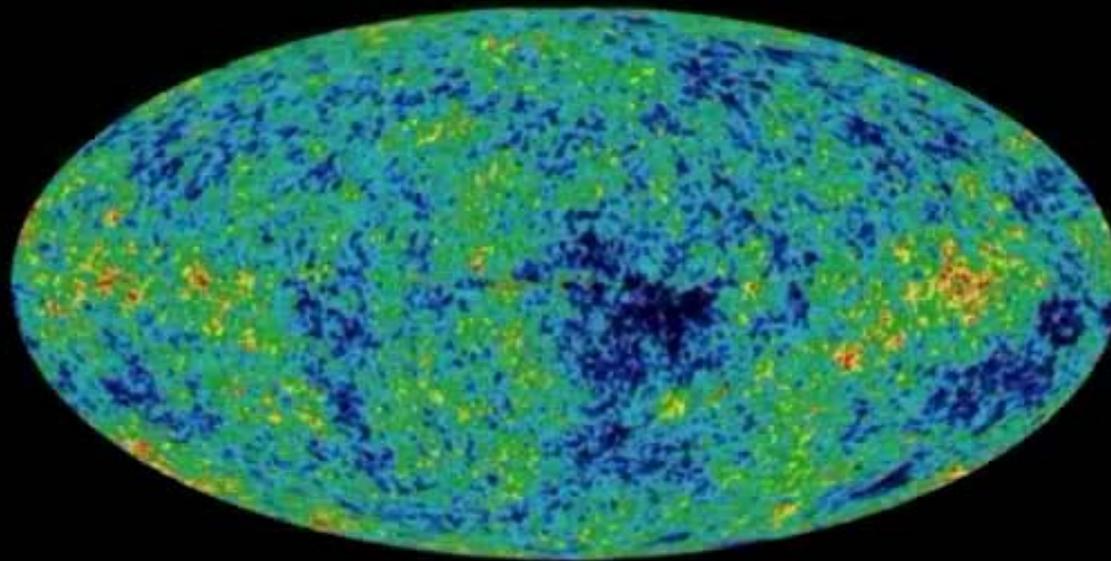
ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×
地上望遠鏡

衛星によってさらなる宇宙の果てを見る



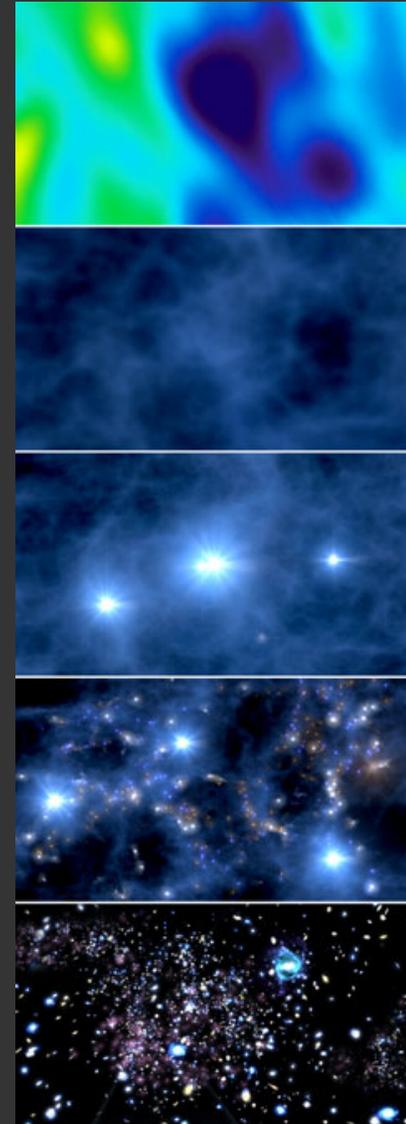
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

38万歳の宇宙から137億歳の現在へ



NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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



今回の講義で学んだこと

1. 宇宙には始まりがある
 - ハッブルの法則と特異点定理
2. インフレーションが宇宙を大きく滑らかにした
 - 地平線問題と平坦性問題の解決、多重宇宙の存在？
3. 宇宙最初の3分間で合成された軽元素、およびその後約100億年にわたって星の内部で合成された重元素が我々の体の材料
 - 我々は星の子供、祖先はビッグバン宇宙とお星様
4. 初めの「光」の時代の後、物質間の重力によって宇宙の階層構造が形成され、137億年の今に至る
 - 宇宙マイクロ波背景輻射

今回の講義のまとめ

この講義ファイルは

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2006j.html

からダウンロード可能

- 宇宙に始まりはあったか？
 - あった
- 宇宙はなぜ始まったのか？
 - わからない
 - にもかかわらず、誕生後ナノ秒以降の宇宙の歴史はかなり正確に理解されている
 - インフレーションの起源およびそれ以前の宇宙の進化・歴史の理解はまだまだ発展途上