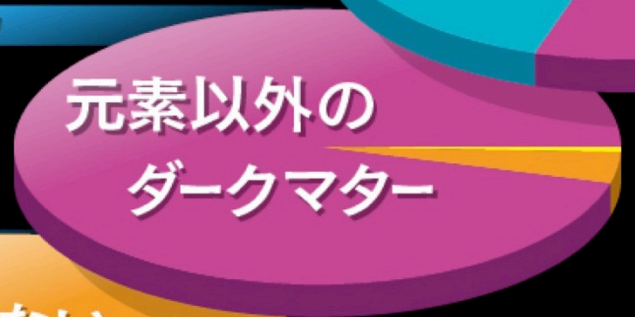
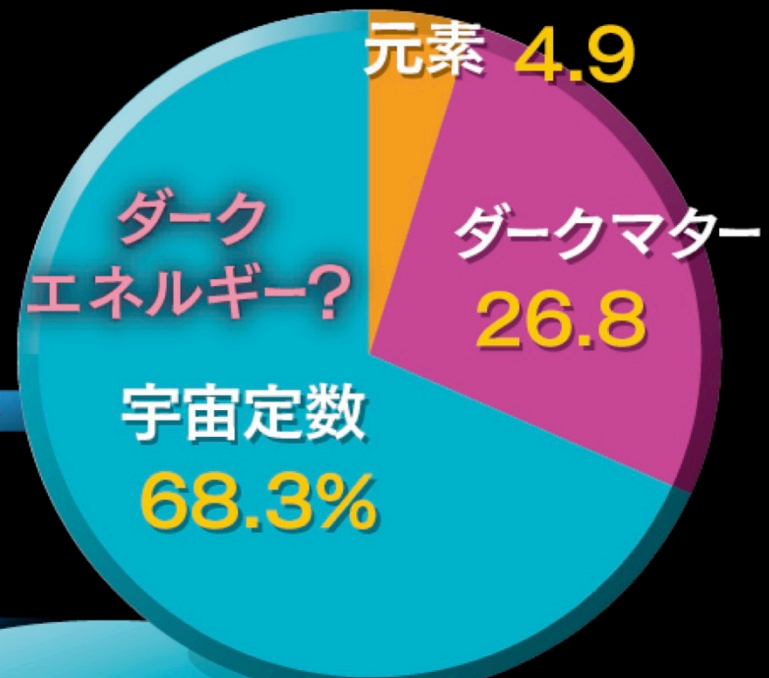
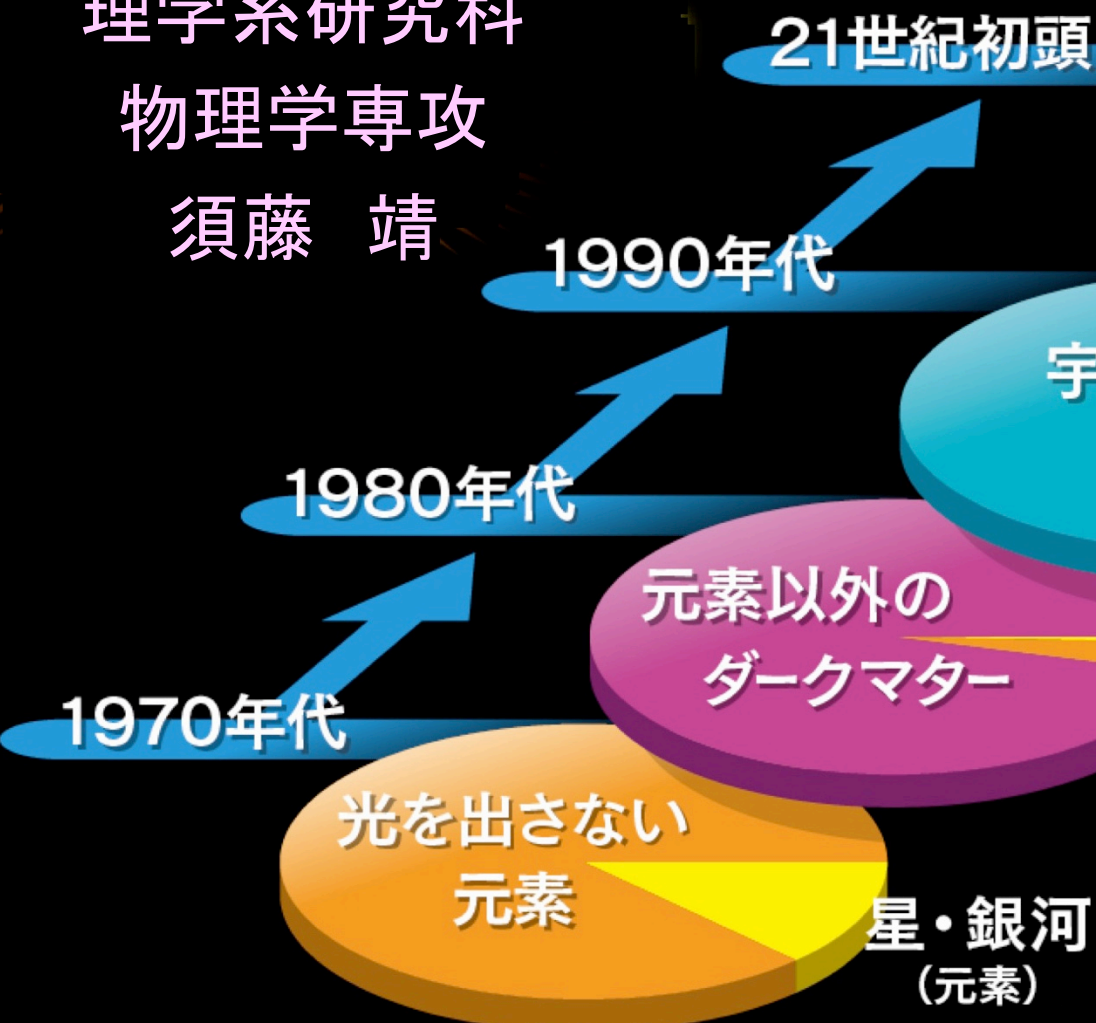


加速する宇宙論

東京大学大学院
理学系研究科
物理学専攻
須藤 靖



2015年6月24日
17:00-18:00
東京工業大学
地惑セミナー

宇宙論研究の歴史

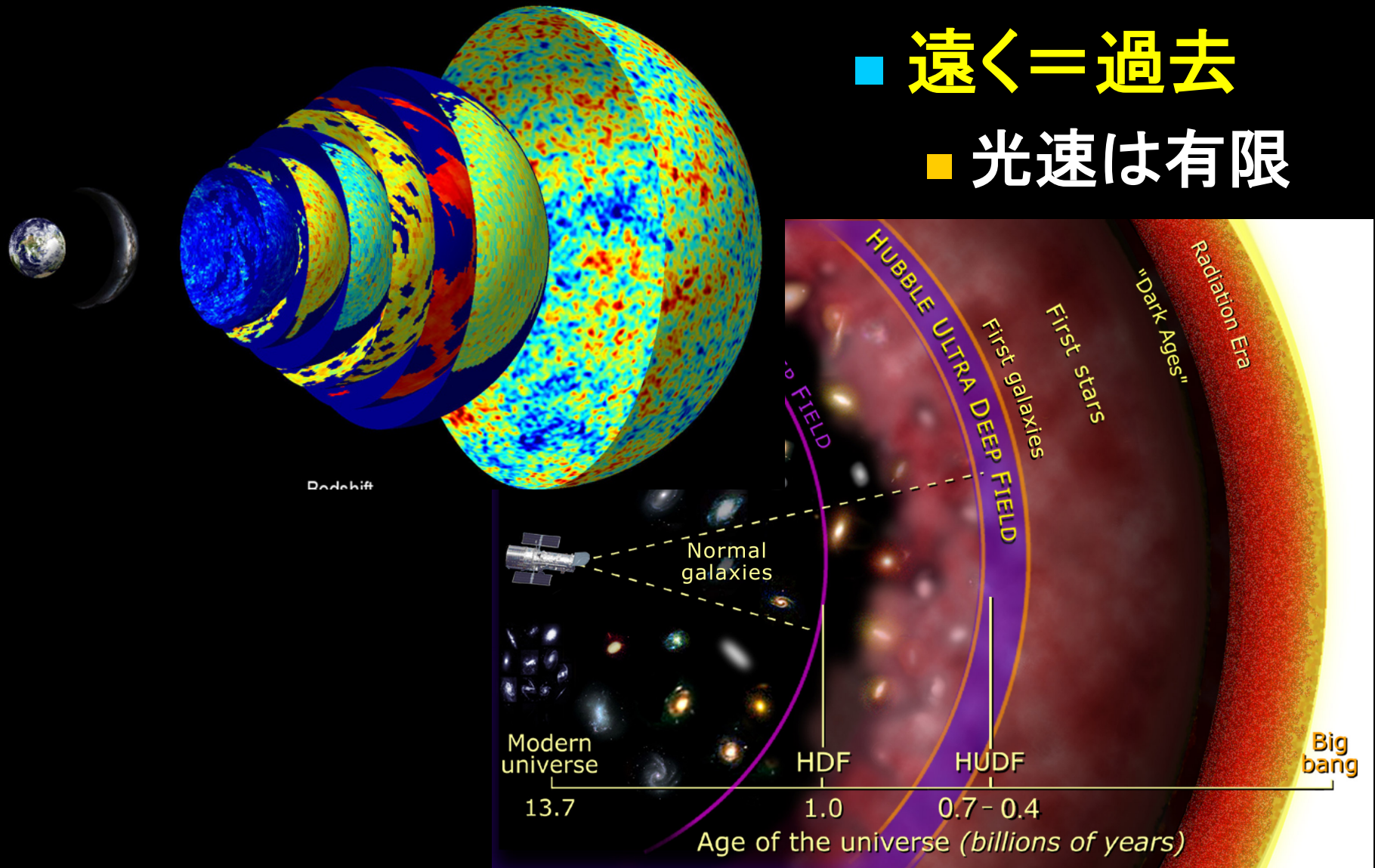
- 1916年～ 一般相対論的宇宙モデル
- 1929年 宇宙膨張の発見(ハッブル)
- 1946年～ ビッグバンモデルの提唱(ガモフ)
- 1965年 CMBの発見(ペンジアス、ウィルソン)
- 1980年～ 宇宙の大構造の発見
素粒子論的宇宙論の誕生
宇宙論的数値シミュレーション
- 1992年 CMB温度ゆらぎの検出(COBE)
- 1990年代後半～ 宇宙論パラメータの精密決定
冷たいダークマター
宇宙定数(ダークエネルギー)

観測的宇宙論の発見年表

1929	宇宙膨張(ハッブルの法則)の発見	ハッブル
1965	宇宙マイクロ波背景輻射の発見	ペンジァス・ウィルソン
1967	銀河の2点相関関数の巾法則の発見	東辻浩夫・木原太郎
1975	世界初の大構造形成数値シミュレーション	三好和憲・木原太郎
1980	CfA銀河サーベイによる宇宙の大構造の発見	ゲラー・ハクラ
1985	冷たい暗黒物質構造形成標準モデル確立	デイビス・エフスタチウ・フレンク・ホワイト
1992	宇宙マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見	マーサー、スムート
1998	Ia型超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見	超新星宇宙論グループ他
2003	SDSSによる銀河・クエーサーカタログ初期成果の発表	SDSS グループ(日本人メンバー13名)
2003	WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景輻射温度地図の精密測定	WMAPチーム(日本人メンバー 小松英一郎)

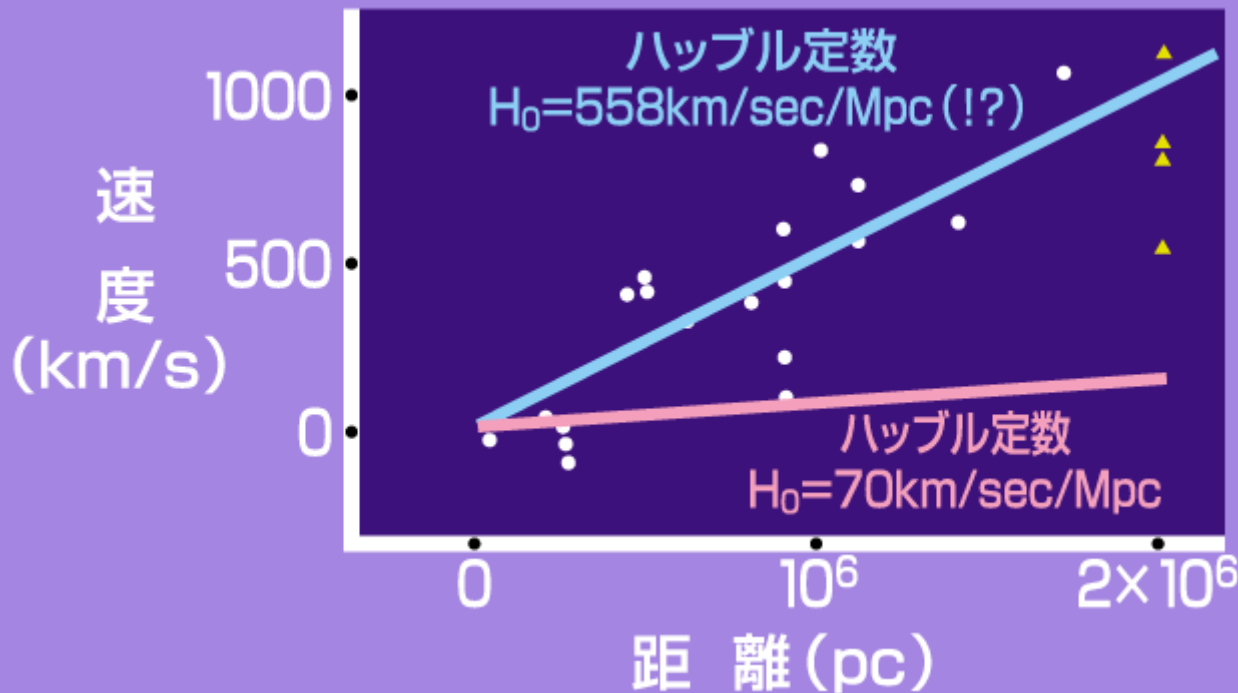
宇宙観測は天球上で行われる

- 遠く=過去
- 光速は有限



ハッブルの法則 (1929)

- 遠方銀河は我々に対して遠ざかっている
- その後退速度は、銀河までの距離に比例している



ハッブルの法則
 $v = H_0 d$

ハッブルが得た
遠方銀河の
距離速度関係

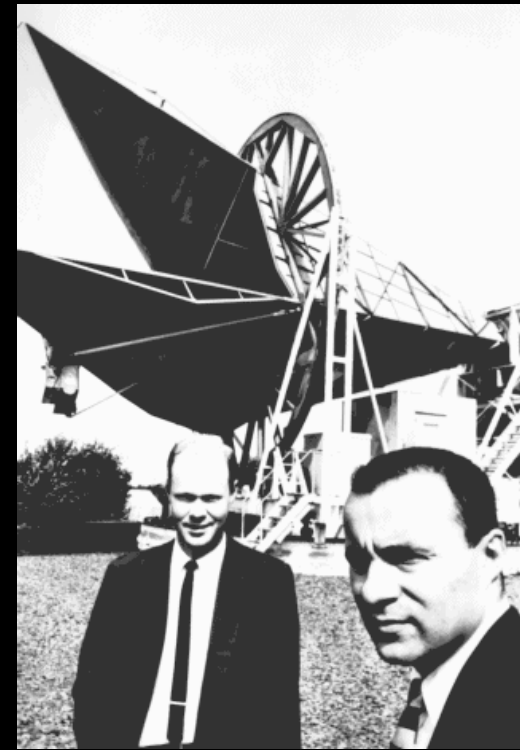
CMB: Cosmic Microwave Background

宇宙マイクロ波背景輻射

- **現在の宇宙を満たす等方的な電磁波の熱輻射分布**
 - 熱い火の玉宇宙の名残
 - 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が認められる観測的証拠となった
- 現在の宇宙の温度 = $2.728 \pm 0.002\text{K}$
- CMB温度揺らぎ全天地図は、宇宙論パラメータを知るためのもっとも重要な情報源

1978年度ノーベル物理学賞 宇宙マイクロ波背景輻射の発見

- Arno Penzias and Robert Wilson
- For the discovery of cosmic microwave background radiation



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE

AT 4080 Mc/s

free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

The Astrophysical Journal 142(1965)419



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.

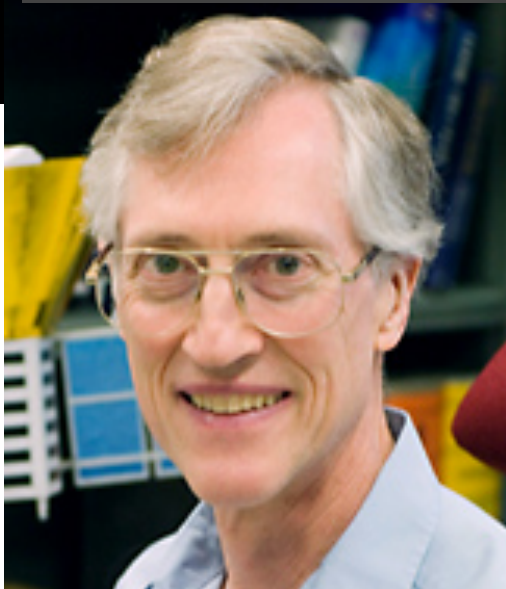
HISTORIC PHYSICS SITE, REGISTER OF HISTORIC SITES
AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

2013年11月2日

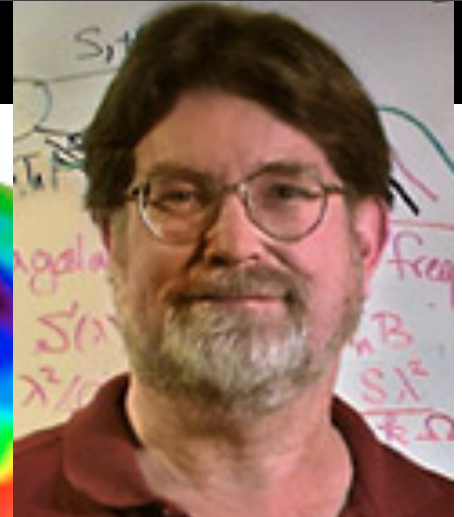
2006年度ノーベル物理学賞

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

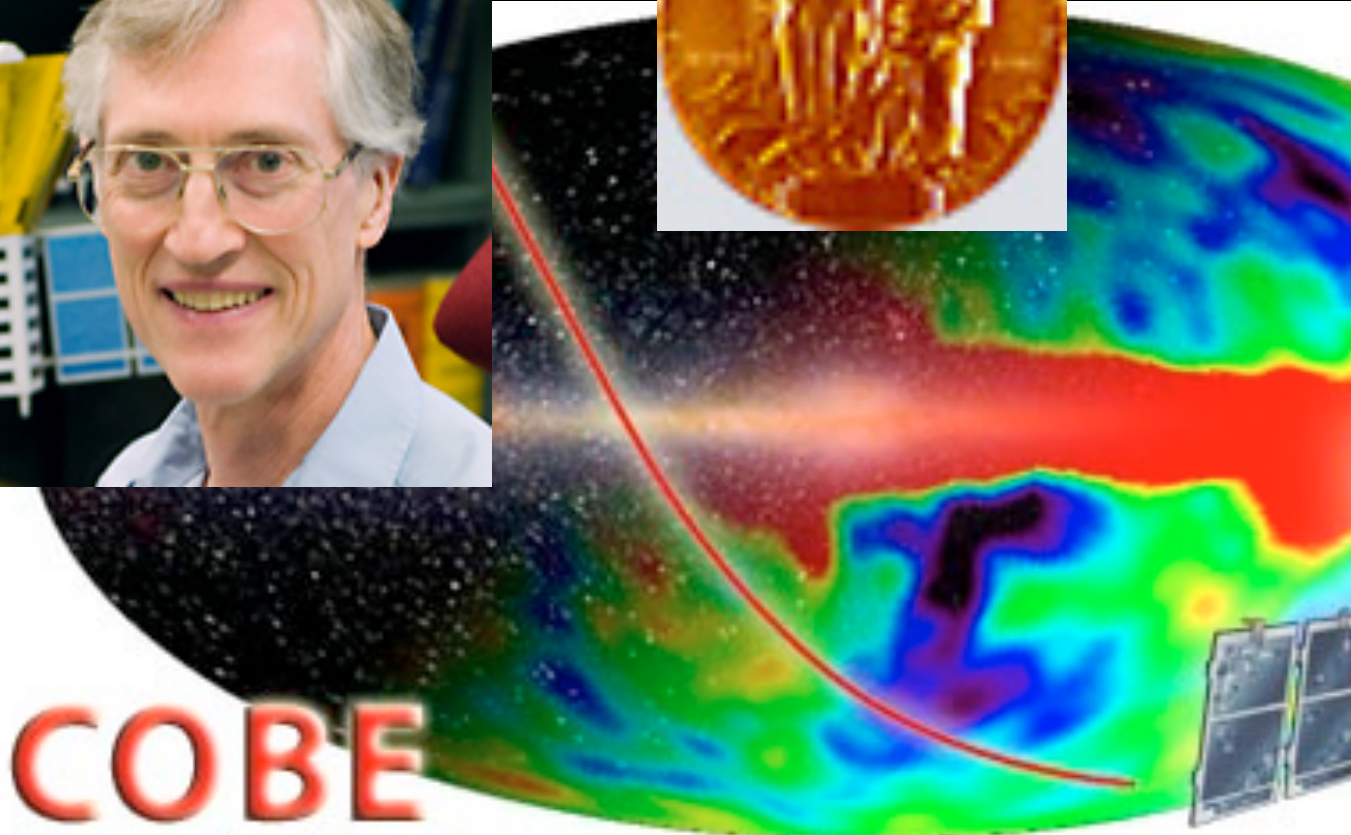


ジョージ・スムート



COBE

Cosmic Background Explorer



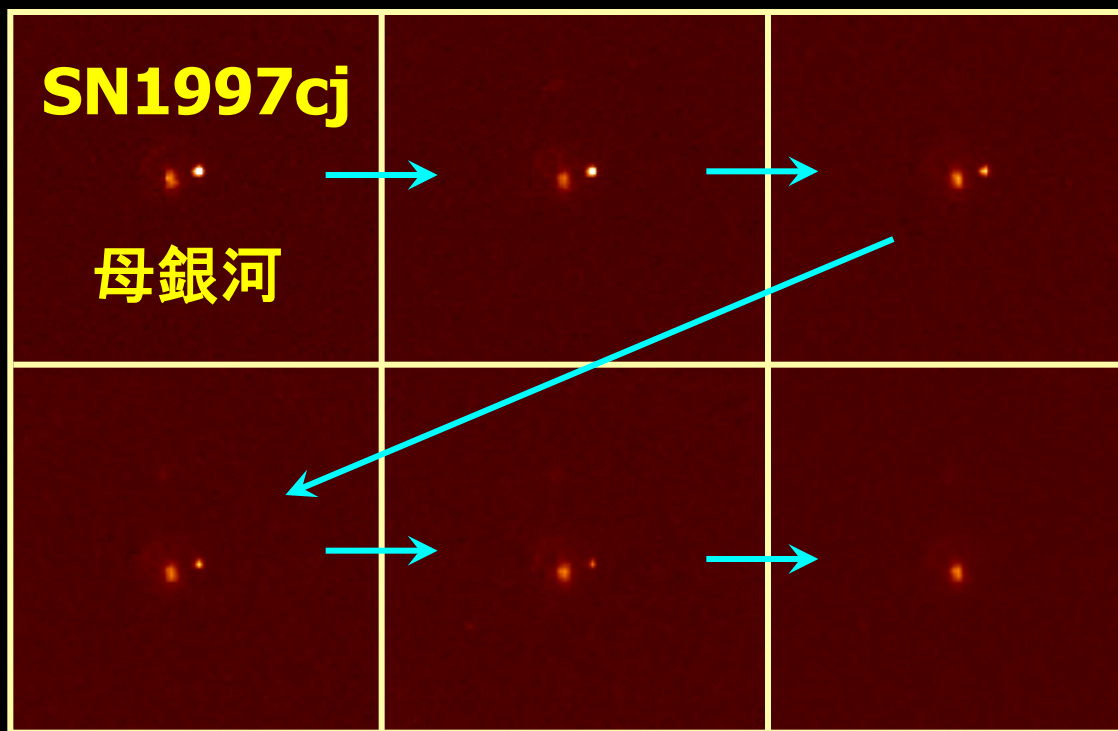
Ia型超新星

- 白色矮星と、核燃料を使い尽くしつつある星とからなる**連星系の進化の最終段階**
- 連星系の星の一方の白色矮星に、もうひとつの星から物質が次々と流れこむ
 - 白色矮星(電子の縮退圧で自己重力を支える)には、安定に存在できる最大質量がある
 - チャンドラセカル質量(約1.4太陽質量)
 - これを越えると不安定となり爆発を起こす

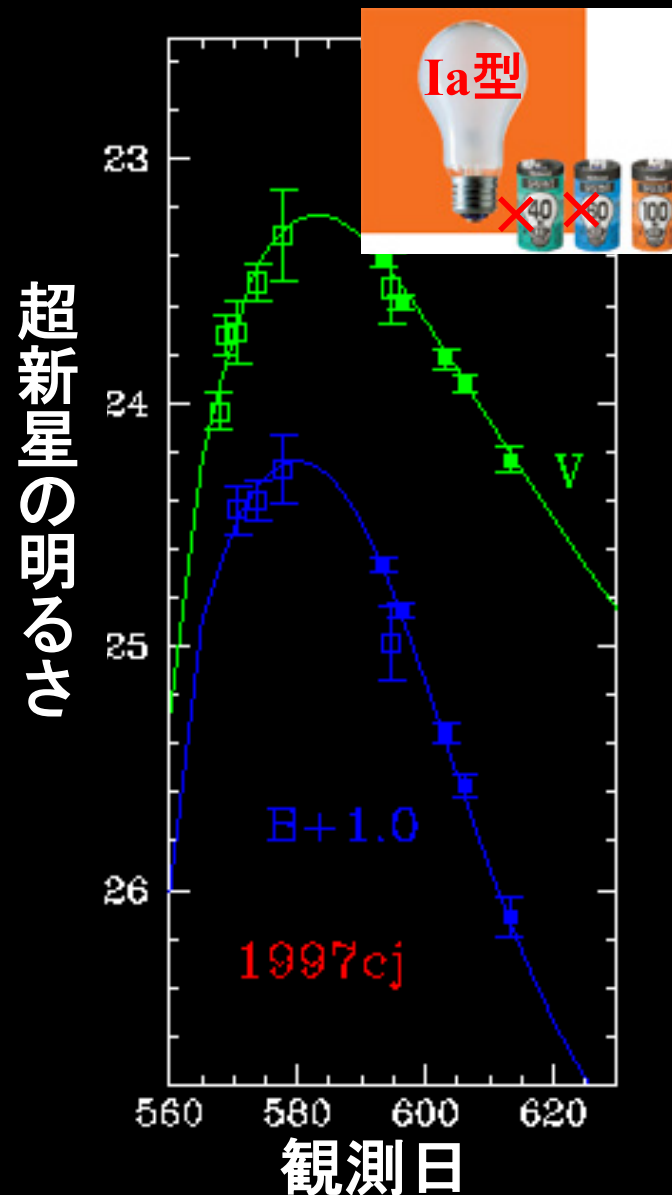


Ia型超新星の光度曲線の測定

- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる

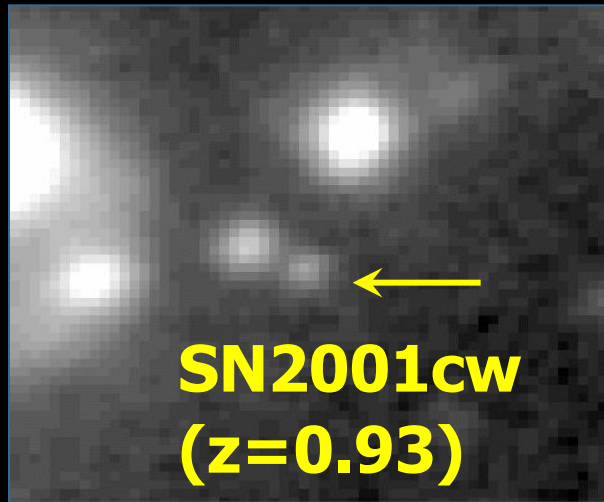


ハッブル宇宙望遠鏡による観測



標準光源: Ia型超新星

見かけの明るさ: F



真の明るさ: L



距離: D



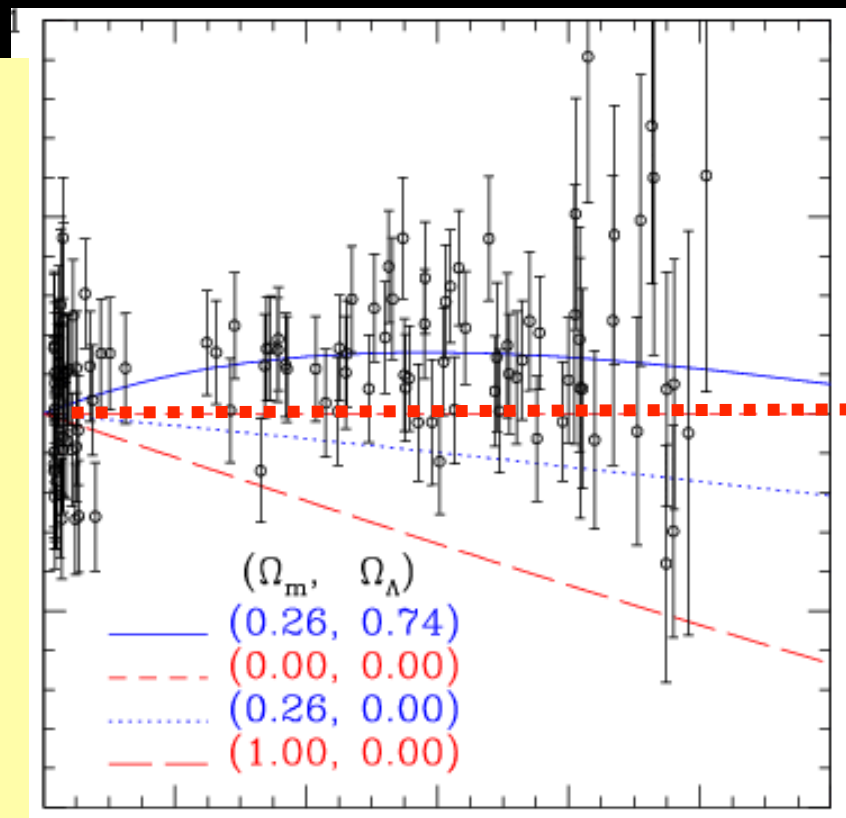
超新星までの距離がわかると、その時刻での宇宙膨張の加速度を推定できる

超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見

より暗い(遠い)



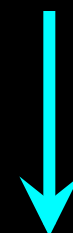
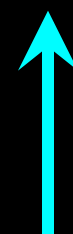
超新星の見かけの明るさ



加速膨張

(空っぽの宇宙)

減速膨張



より明るい(近い)

現在

時間



過去

- 宇宙は加速膨張をしている (1998年)

2011 Nobel prize in Physics

- **Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess**
 - for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae



加速度と物理法則

- **なぜか**物理法則(運動方程式)は時間の2階微分(つまり加速度)で書き表される
- **宇宙の(膨張)速度を知っても、さほど深い情報は得られない**
 - エネルギー保存則(運動エネルギー=重力ポテンシャル)より宇宙の重力の大きさ=宇宙の密度と重力的進化時間スケール=宇宙年齢は推定できる
- **宇宙の加速度を測れば、宇宙を支配する物理法則(の性質)を明らかにできる(かも)**
 - 加速度を知れば、(さらに高階微分は知らずとも)それで力学は完結

宇宙の加速膨張と物理法則

- 宇宙の“大きさ” $a(t)$ を、現在の時刻 t_0 付近でテイラー展開する

$$a(t) = a(t_0) + \left. \frac{da}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 a}{dt^2} \right|_{t_0} (t - t_0)^2 + \dots$$

- **第一項**: 宇宙の“大きさ” → 定数倍の自由度があり意味を持たない
- **第二項**: 宇宙の膨張率 (ハッブル定数) → 宇宙の年齢
- **第三項**: 宇宙膨張の加速度 → 力を及ぼす物質の正体を物理法則 (一般相対論から導かれる宇宙膨張の方程式) を通じて解明できる

本来は宇宙は加速できないはず！

■ 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)

加速膨張＝ダークエネルギー？

- 宇宙の加速膨張が示唆するもの
 - 法則が正しければダークエネルギー
 - ダークエネルギーが存在しなければ法則が間違い
- ダークマターとは異なり、空間的に局在しているようなものではない
 - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみたしている
- 実効的に「斥力」的な振る舞い
 - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応

標準宇宙モデルとフリードマン方程式

標準宇宙モデルの特徴

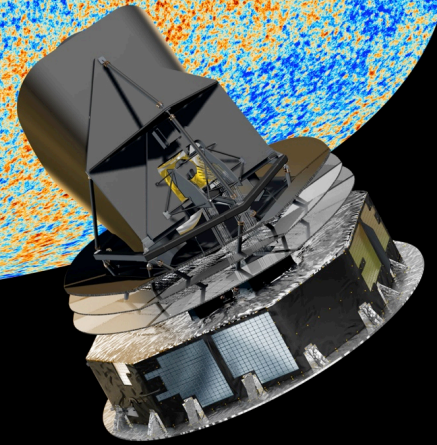
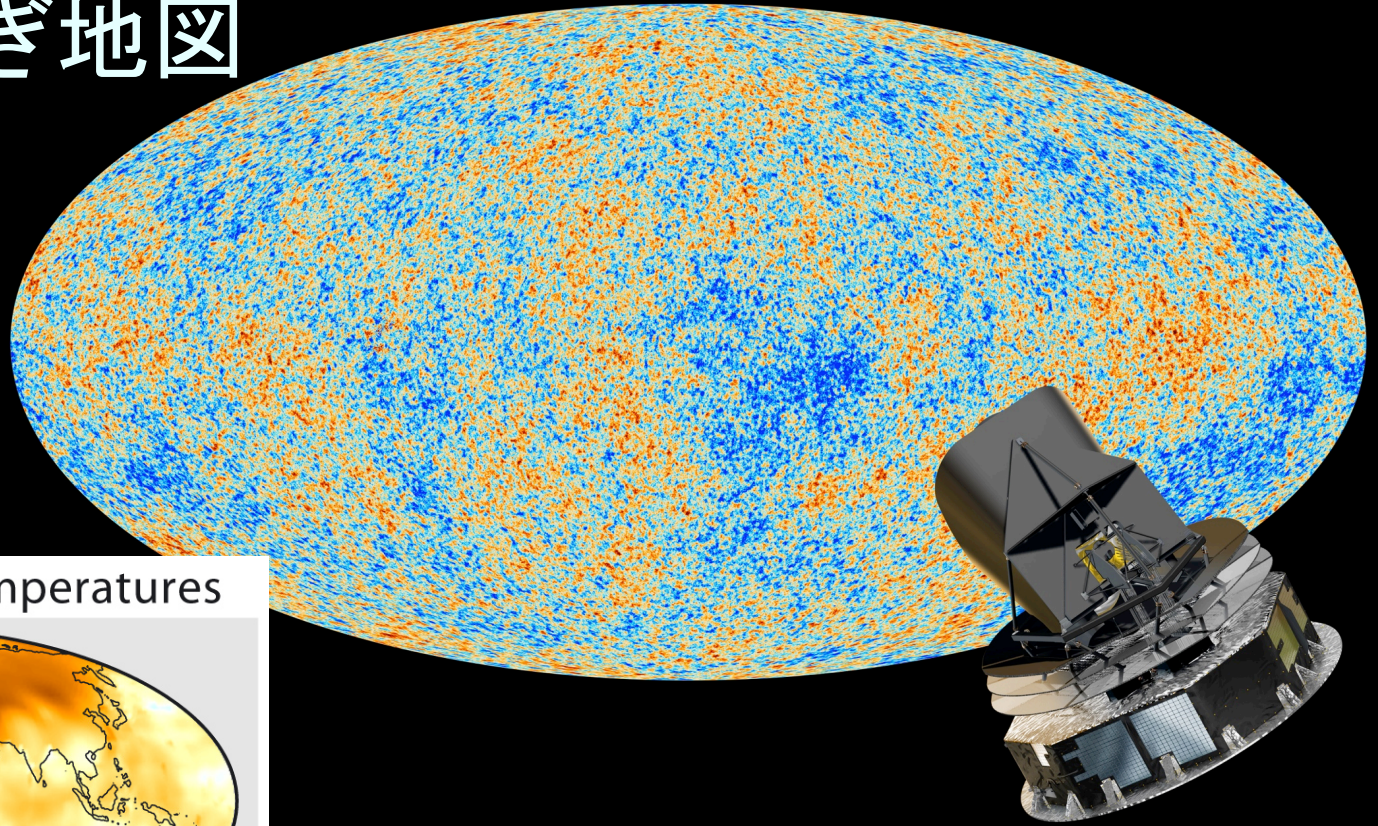
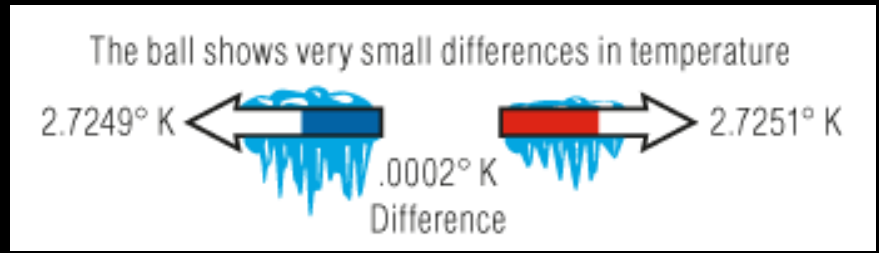
- ほぼ平坦な宇宙 (空間曲率が0のユークリッド空間) : $K \approx 0$
- 元素 (バリオンと呼ばれることが多い) : ρ_b
- ダークマター : ρ_d
- 宇宙定数 (より一般的にはダークエネルギー) : Λ

フリードマン方程式

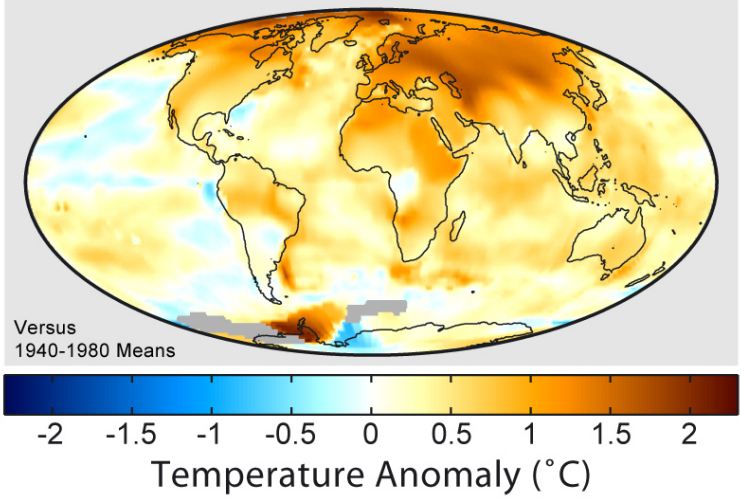
$$\begin{aligned} \text{時刻 } t \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 &= \frac{8\pi G}{3} = (\rho_b + \rho_d) - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} & \Rightarrow & \quad \Omega_b = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{b0} \quad \Omega_d = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{d0} \\ \text{現在 } t=t_0 & \quad (a=a_0=1) \quad H_0^2 = \frac{8\pi G}{3} = (\rho_{b0} + \rho_{d0}) - \frac{K}{a_0^2} + \frac{\Lambda}{3} & & \quad \Omega_K = \frac{K}{a_0^2 H_0^2} \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2} \end{aligned}$$

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

宇宙マイクロ波 背景放射 温度ゆらぎ地図



1999-2008 Mean Temperatures



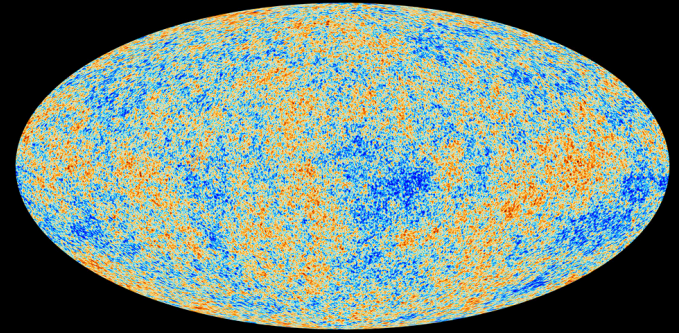
プランク衛星

http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_and_the_cosmic_microwave_background

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

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

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

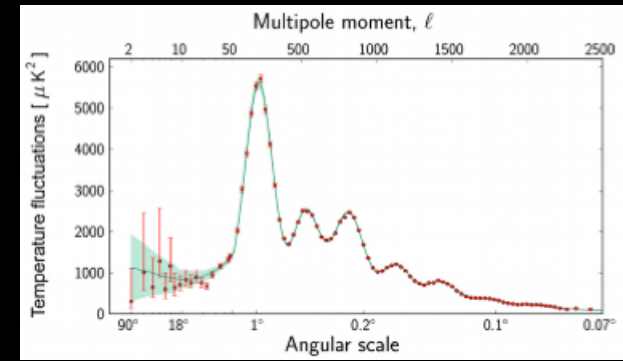
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ 古文書を理解するための文法

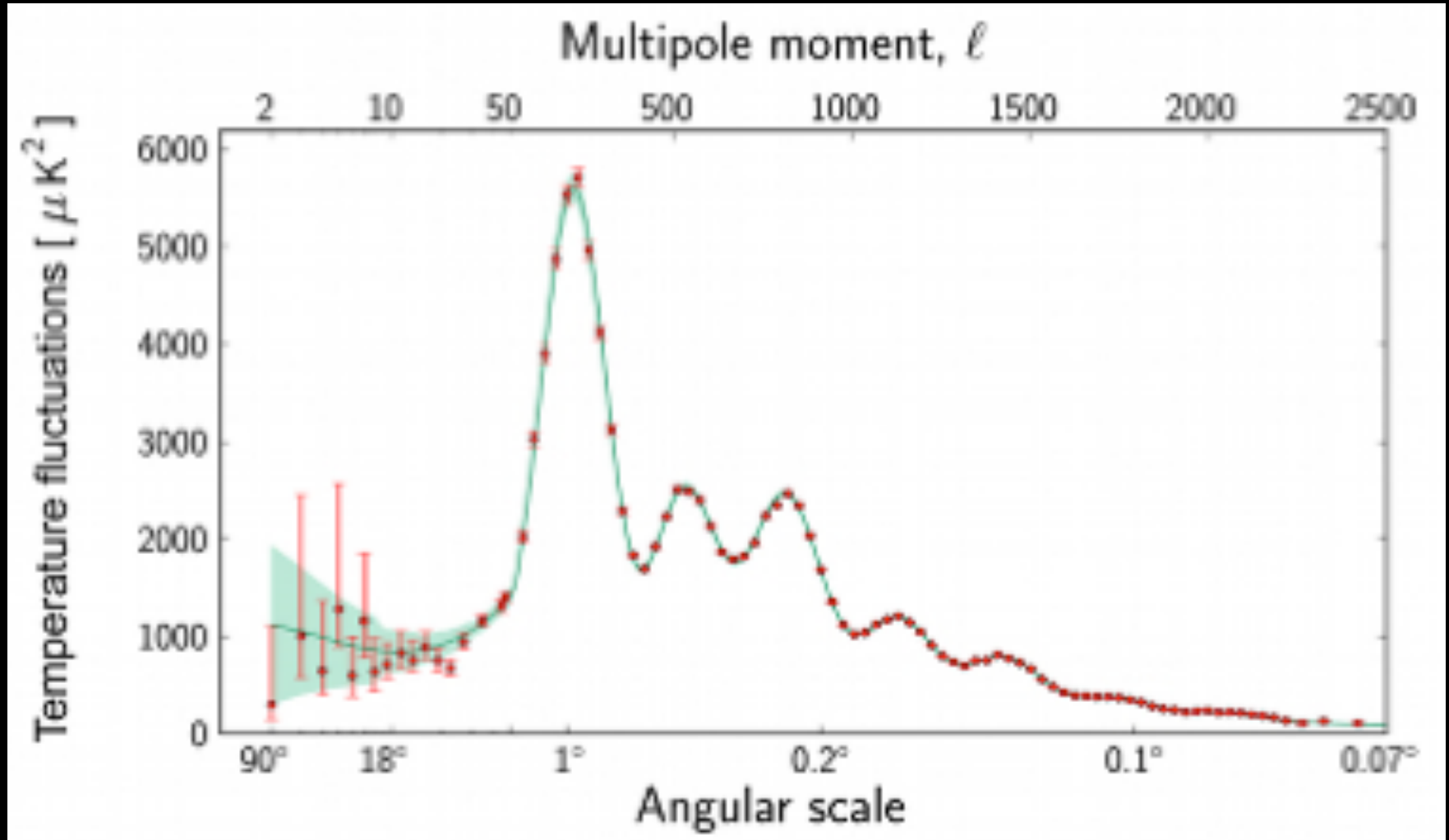
- 冷たいダークマターモデルの理論予言

■ 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、、、



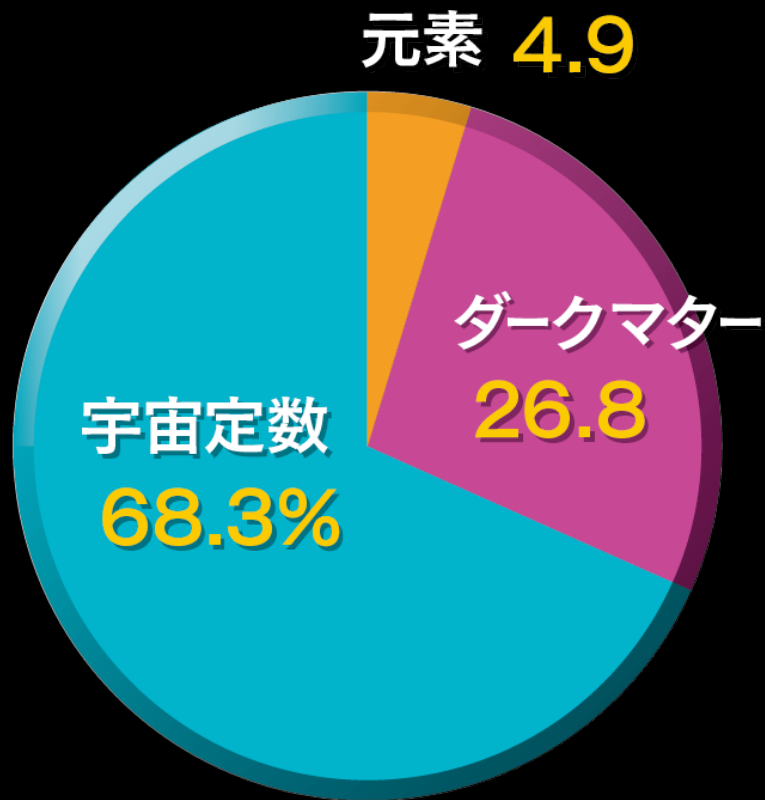
標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



宇宙論パラメータ (2013年版)

記号	名前	推定値
H_0	ハッブル定数	$(67.4 \pm 1.4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$
Ω_b	バリオン密度パラメータ	$(0.048884 \pm 0.00073) (h/0.674)^{-2}$
Ω_d	ダークマター密度パラメータ	$(0.2633 \pm 0.0068) (h/0.674)^{-2}$
Ω_Λ	(無次元化された) 宇宙定数	$0.685^{+0.018}_{-0.016}$
Ω_K	宇宙の曲率パラメータ	$(-4.2^{+4.3}_{-4.8}) \times 10^{-2}$
w	状態方程式パラメータ	$-1.13^{+0.23}_{-0.25}$
t_0	宇宙年齢	$(138.13 \pm 0.58) \text{ 億年}$

現在の宇宙の組成



- 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

元素とバリオン

地上の物質のほとんどすべて元素(原子)から構成

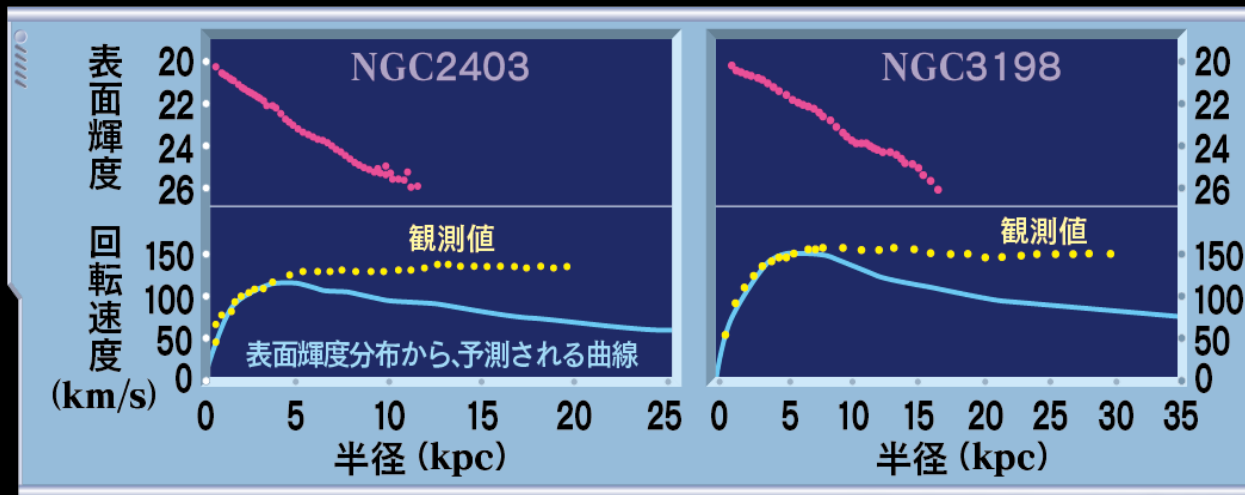
- 陽子と中性子は「バリオン」と呼ばれる種族
(本来はクォークから構成される複合粒子の総称)
- 通常物質(=元素)のことを指して「バリオン」という
不正確な表現が宇宙論では慣用となっている

宇宙も地上と同じく元素(=バリオン)だけからなると
考えるのがもっとも自然のはず

銀河のまわりを公転する天体の運動からダークマターの分布を推定する

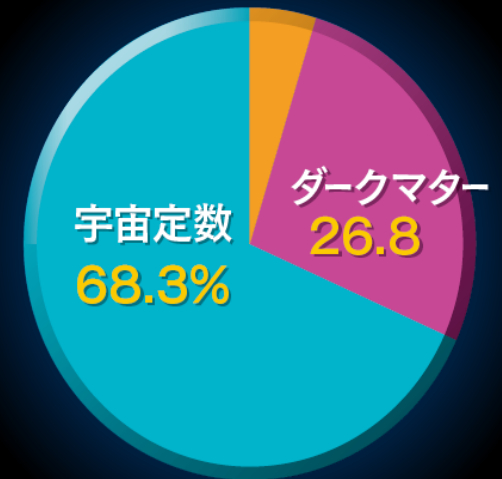


銀河の平坦な回転曲線



van Albada & Sancisi (1986)

元素 4.9



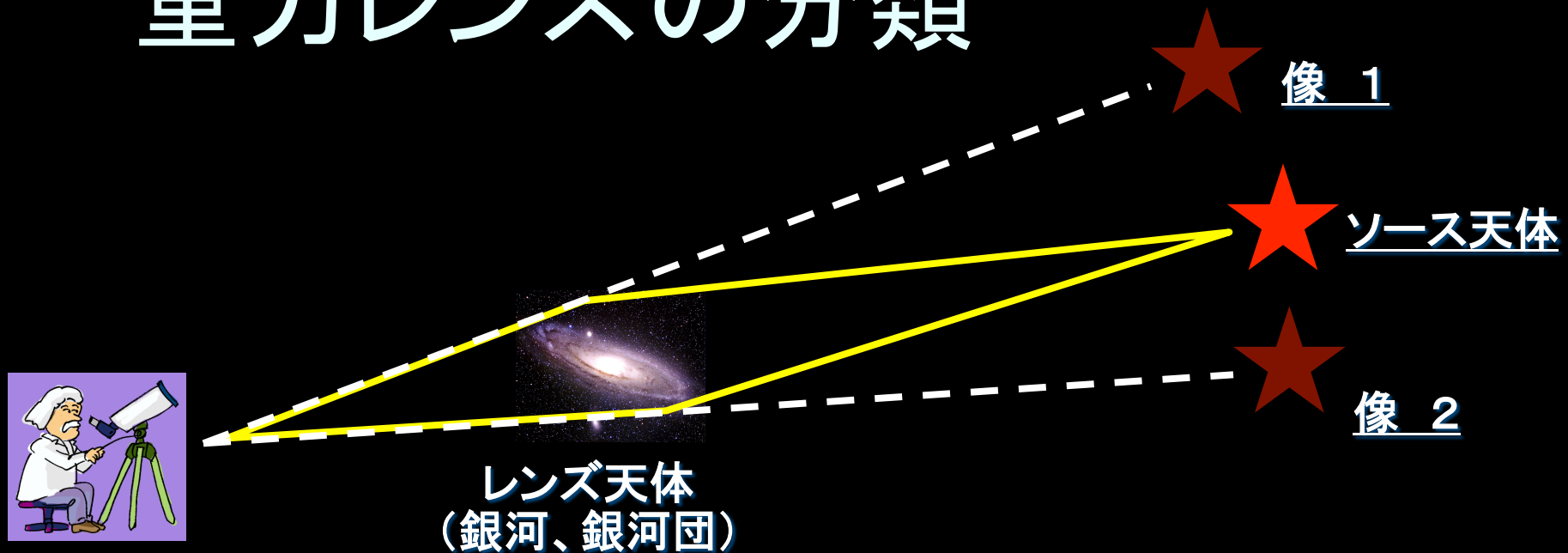
銀河のまわりを公転する天体の運動方程式

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

$$v(r) = \text{const.} \rightarrow M(<r) \propto r$$

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)質量が存在

重力レンズの分類



- 光線は重力場によって曲げられる
 - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
 - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
 - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

重カレンズで「見る」ダークマター



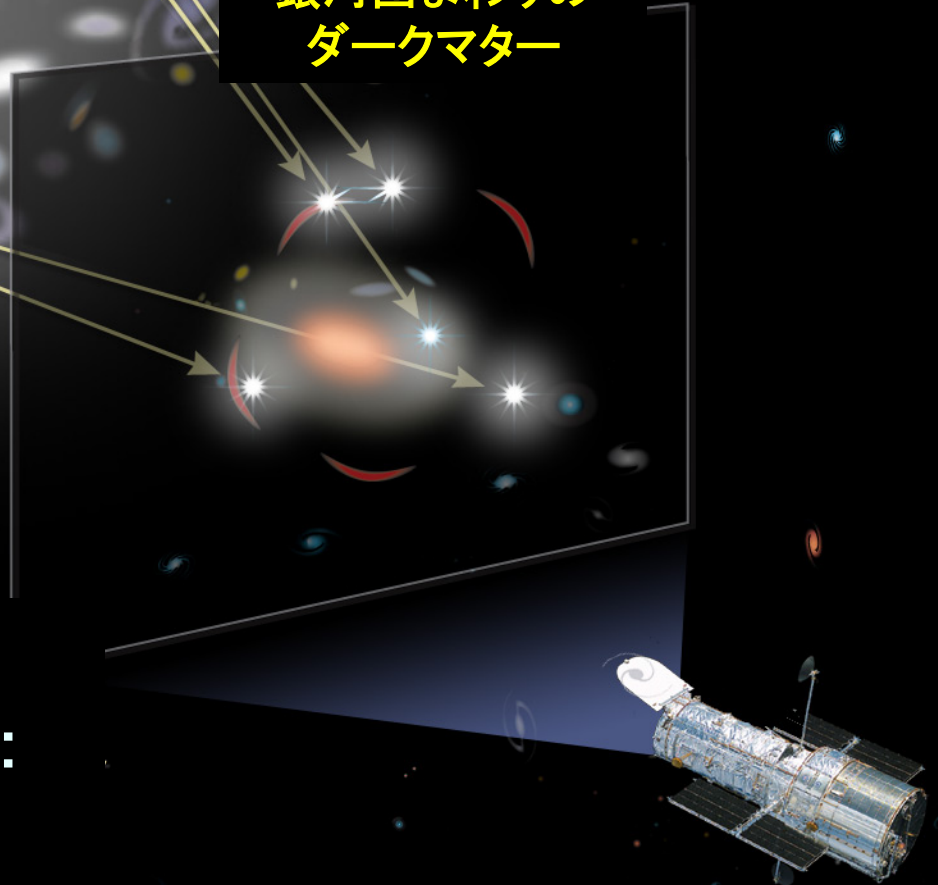
銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、
みかけ上5つの異なる天体をつくる
(ダークマターの存在)

98億光年先にある
クエーサー(中心に
ブラックホール)

62億光年先にある
銀河団まわりの
ダークマター



重力レンズ天体
SDSS J1004+4112 :
一般相対論的蜃気楼



ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重カレンズ SDSS J1004+4112

これだけ強く曲げる
ためには大量の質
量の存在が必要

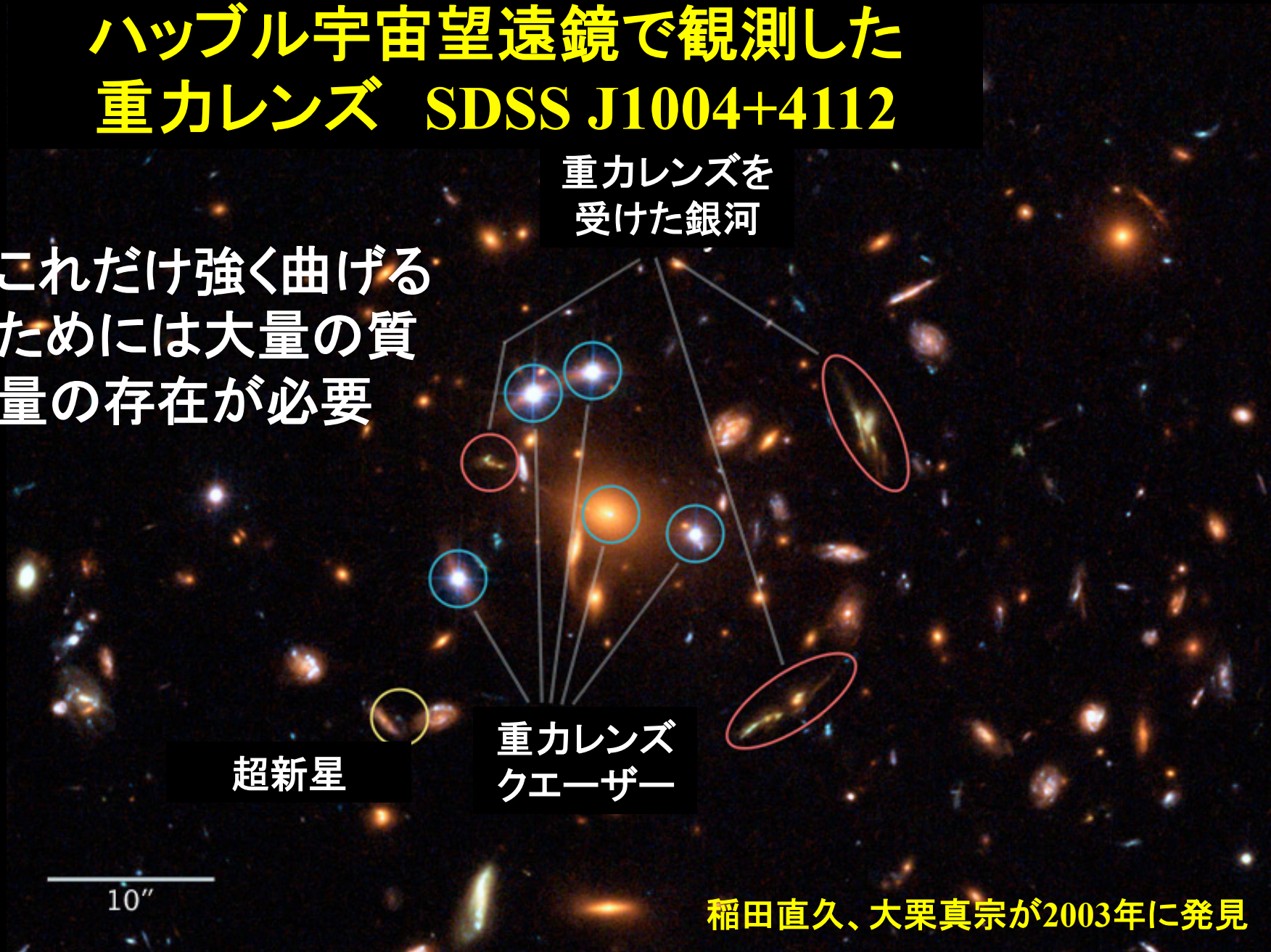
重カレンズを
受けた銀河

重カレンズ
クエーザー

超新星

10''

稲田直久、大栗真宗が2003年に発見



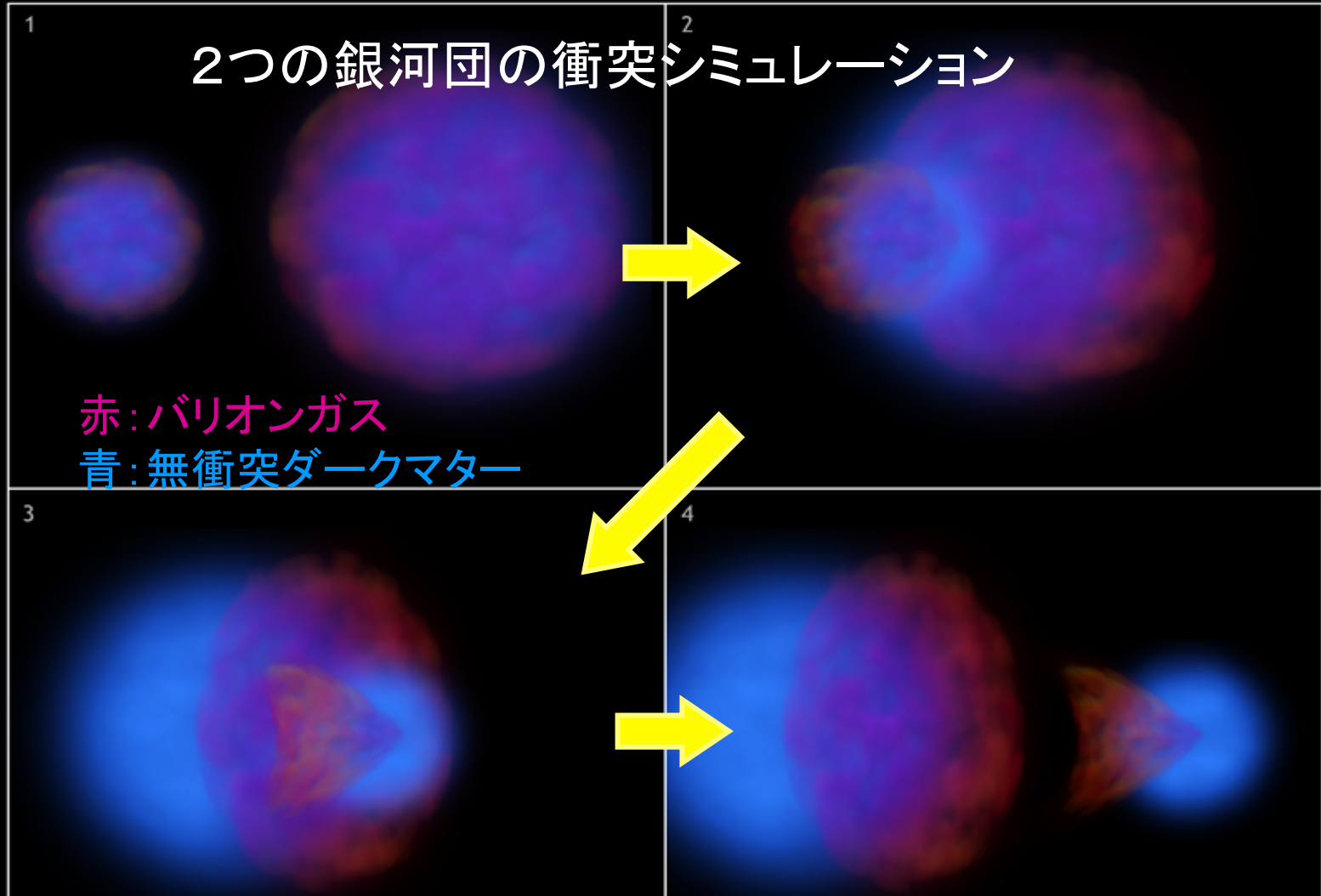
弾丸銀河団とダークマター

ガス分布(X線観測)

質量分布(重力レンズ観測)

1.5'

弾丸銀河団は、ダークマターが(ほぼ)相互作用しない粒子である観測的証拠



ダークマターはすり抜けるが、ガスは相互作用してX線を出す

宇宙の加速膨張

宇宙の膨張則

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

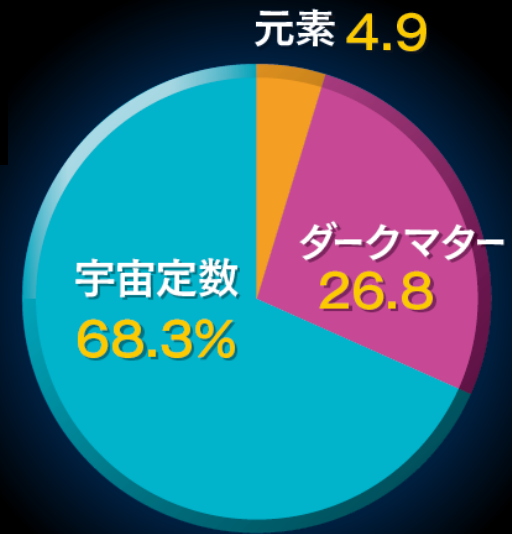
ニュートン力学による運動方程式

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

一般相対論による宇宙膨張の方程式

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) a$$

- 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 $\rightarrow \Lambda$ は実効的な斥力



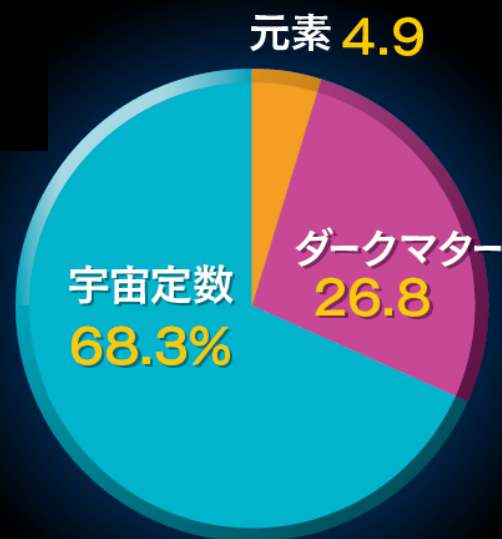
宇宙定数かダークエネルギーか？

宇宙の加速膨張を説明するための条件

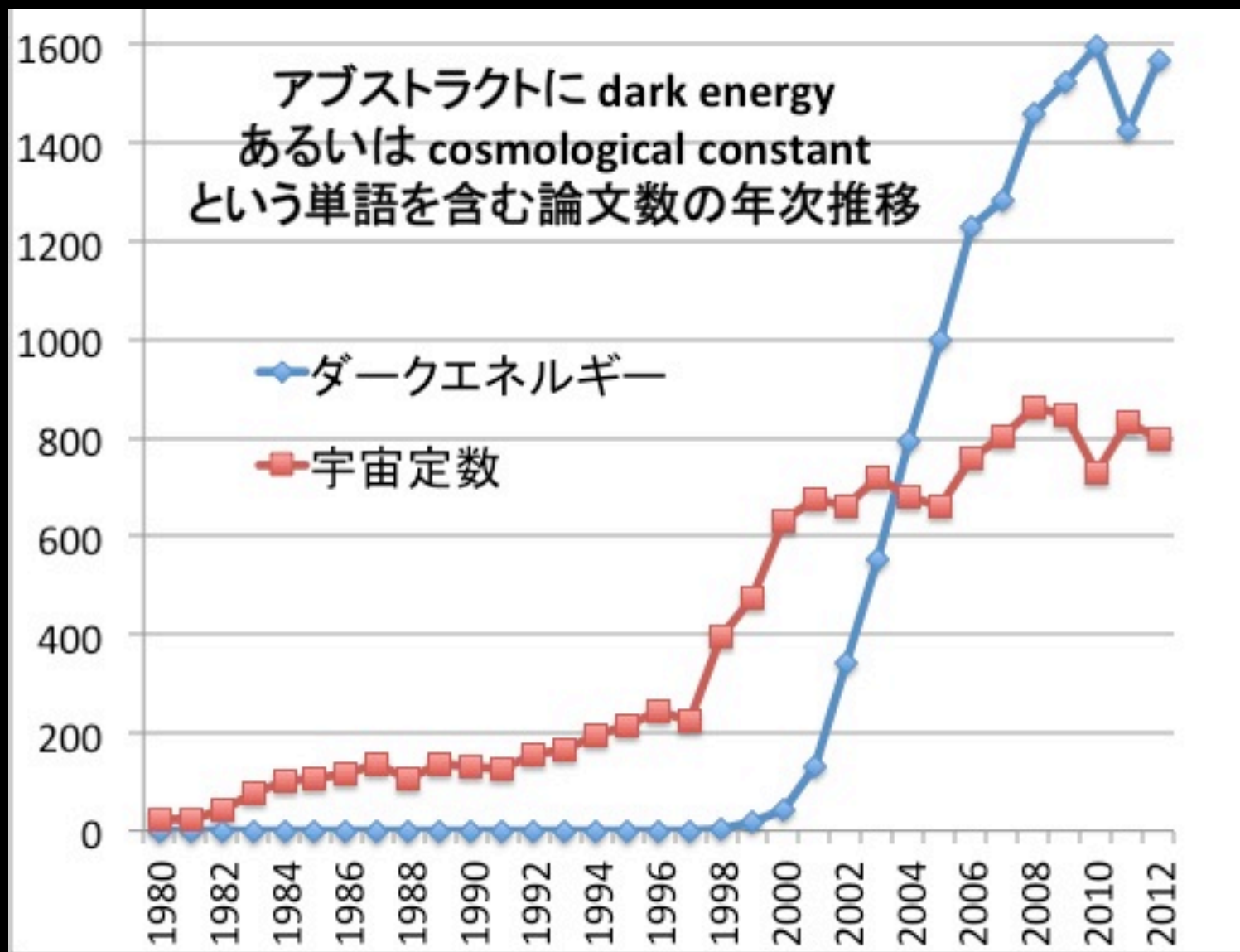
- (ダークマターとは異なり) 空間的に局在するのではなく宇宙全体を一様にみたく
- (ダークマターとは異なり) 引力ではなく、斥力を及ぼす
- 実効的な密度を ρ_x 、圧力を p_x としたとき $(\rho_x + 3p_x)$ が負となる存在が必要

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、宇宙定数の場合 $w = -1$
- 観測的には $w = -1.13^{+0.23}_{-0.25}$
- 宇宙定数に極めて近いもののそれとは違う存在？ → ダークエネルギー

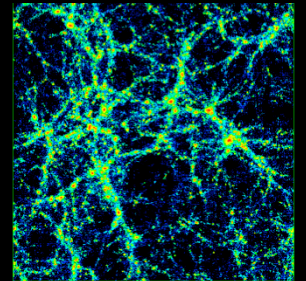
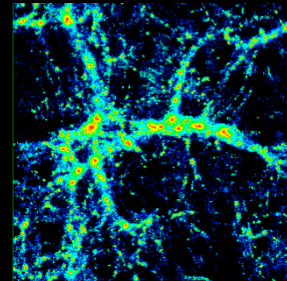
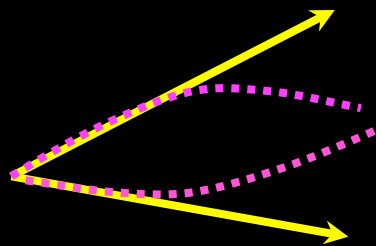
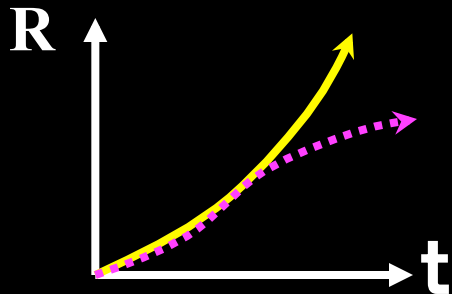
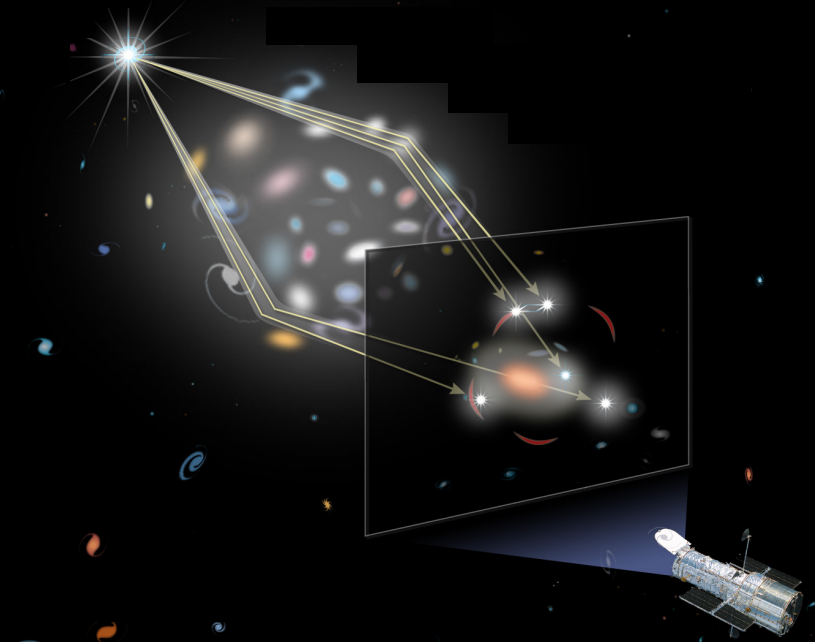


ダークエネルギー論文数の加速膨張

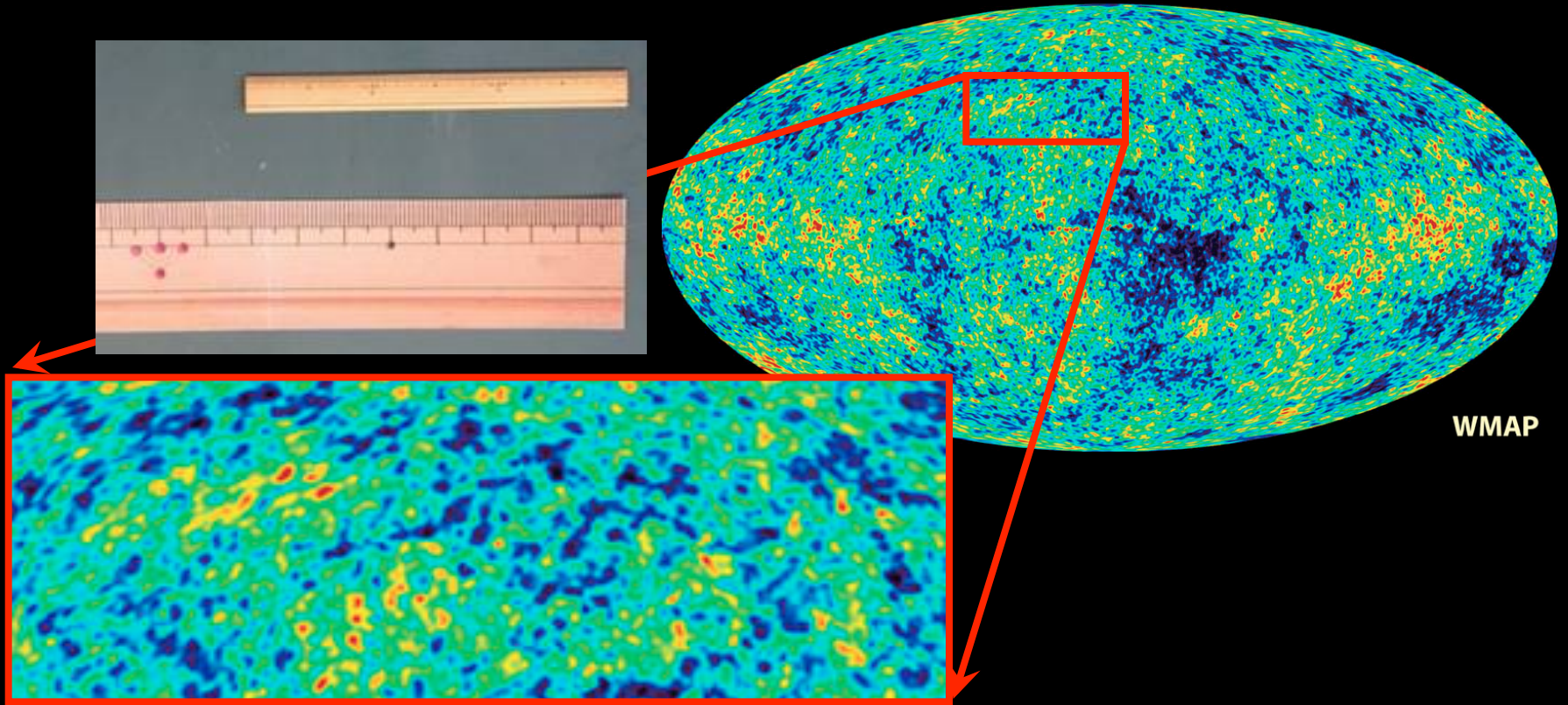


ダークエネルギーの観測手法

- 宇宙膨張
- 宇宙の幾何学
- 宇宙の構造進化
- **4つの主な手法**
 - 超新星のハッブル図
 - マイクロ波背景輻射
 - 重力レンズ
 - バリオン振動



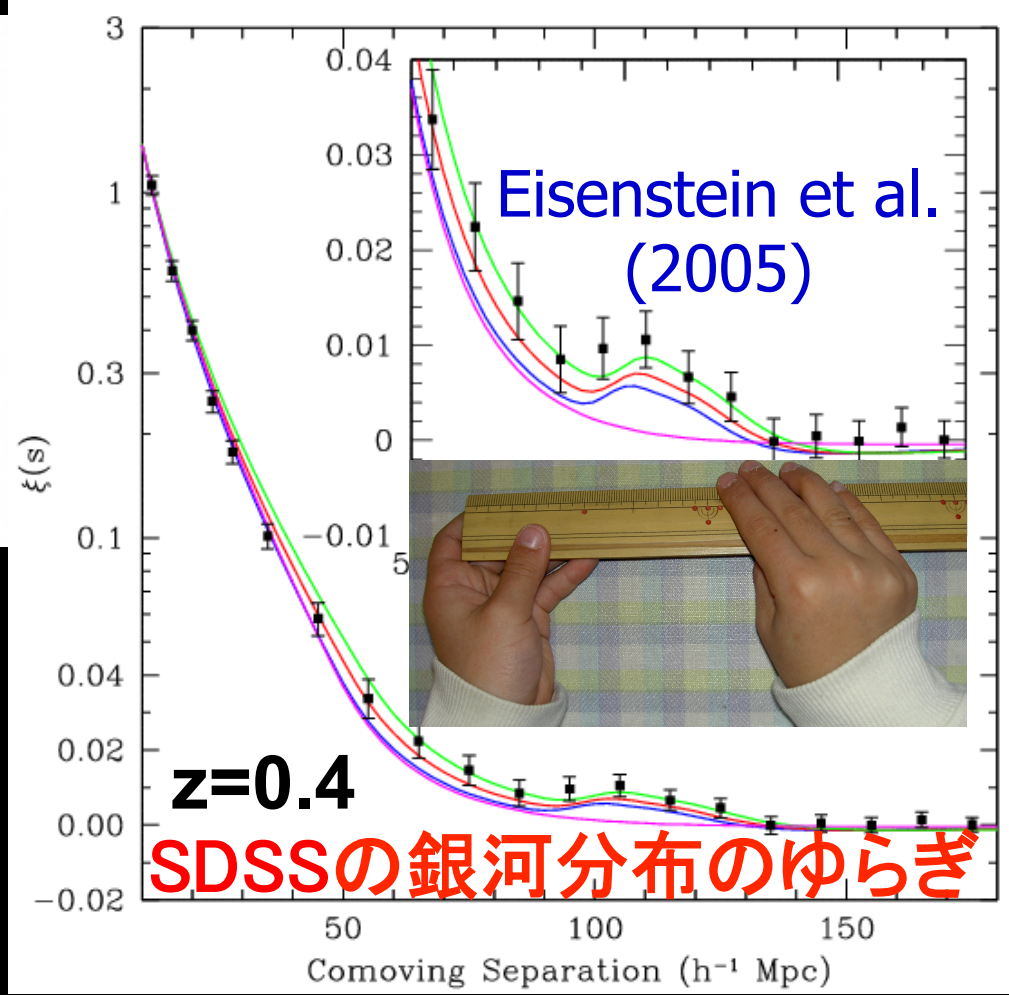
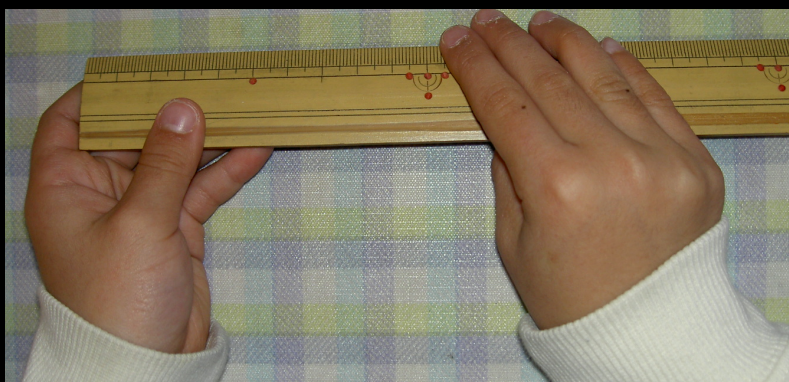
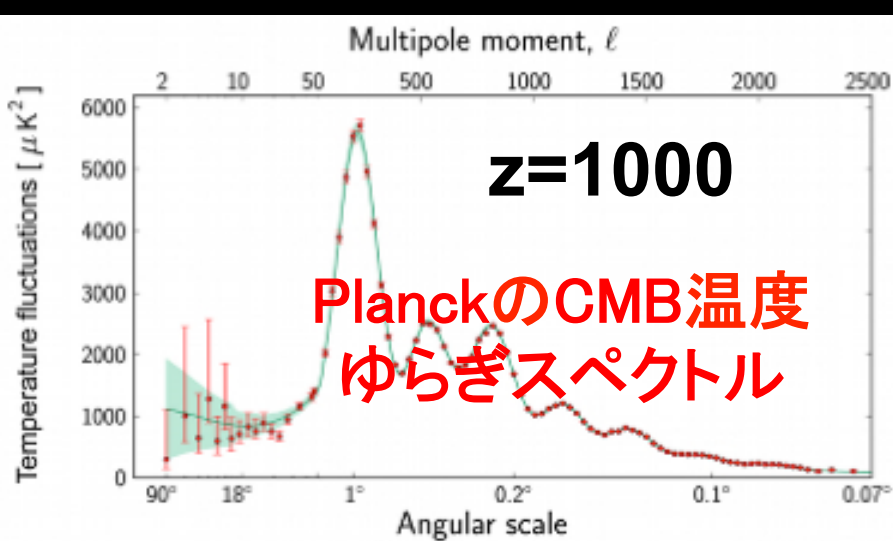
CMB中のバリオン・光子振動の痕跡



WMAP

- 再結合時の音波の地平線長 (= 音速 × 宇宙時刻)
 - $147 (\Omega_m h^2 / 0.13)^{-0.25} (\Omega_b h^2 / 0.024)^{-0.08} \text{ Mpc}$
- これを幾何学的な標準ものさしとして、宇宙の距離を決定

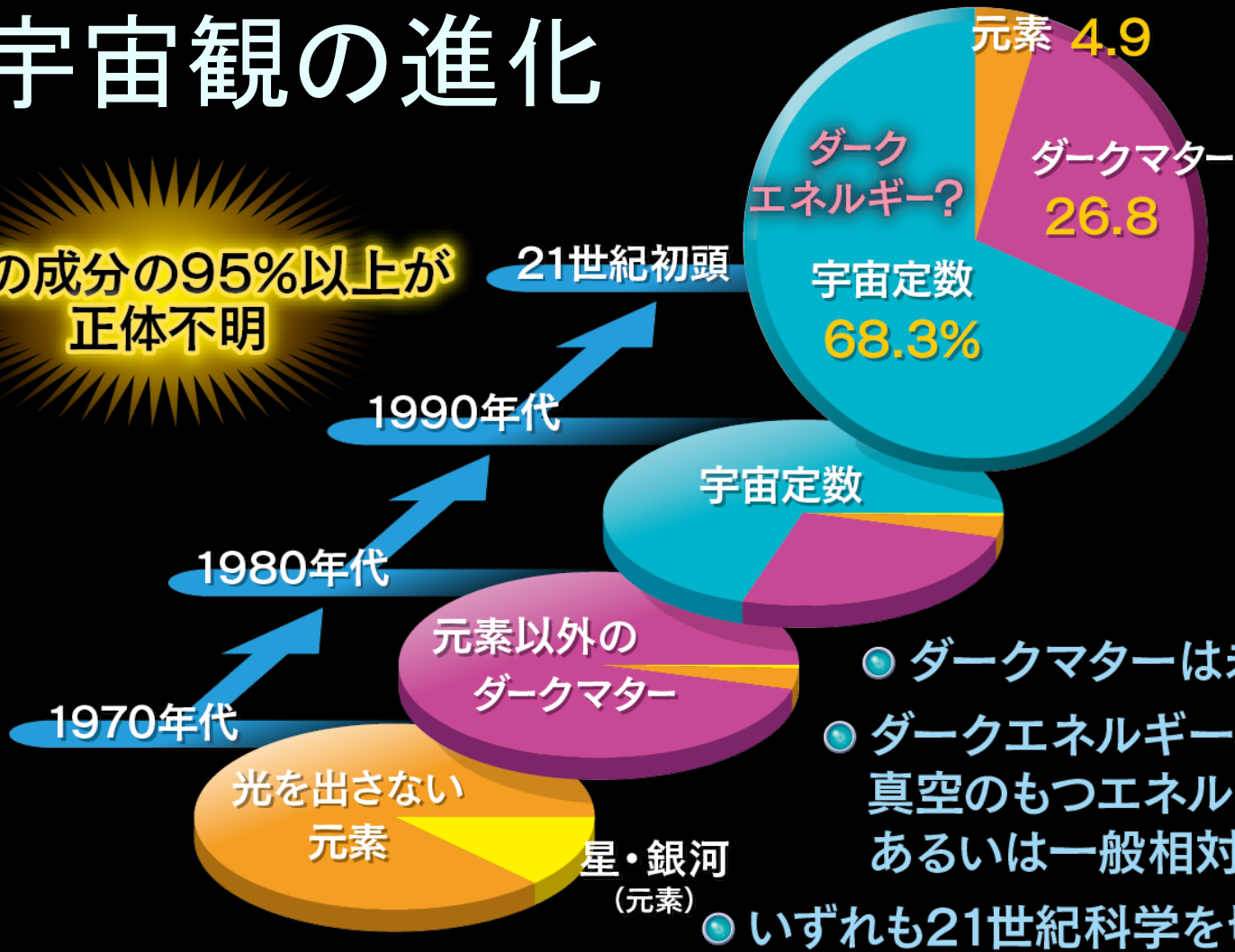
CMBと銀河で見るバリオン音響振動



- 音響振動の波長を測定することで、宇宙のダークエネルギーの量(とその時間変化)を決定する(標準ものさし)

宇宙観の進化

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

ドナルド・ラムズフェルド第21代国防長官



The Unknown

As we know,
There are known knowns.
There are things we know we
know.
We also know
There are known unknowns.
That is to say
We know there are some things
We do not know.
But there are also unknown un-
knowns,
The ones we don't know
We don't know.

—Feb. 12, 2002, Department of
Defense news briefing

2003年『やさしい英語普及運動』から、『関係代名詞や従属節を多用し、なおかつ
接続詞の乱用による長いセンテンスを使用した、わかりにくい英語の演説、発言』
をすることを顕彰して『フット・イン・マウス(意味不明な迷言)賞』受賞

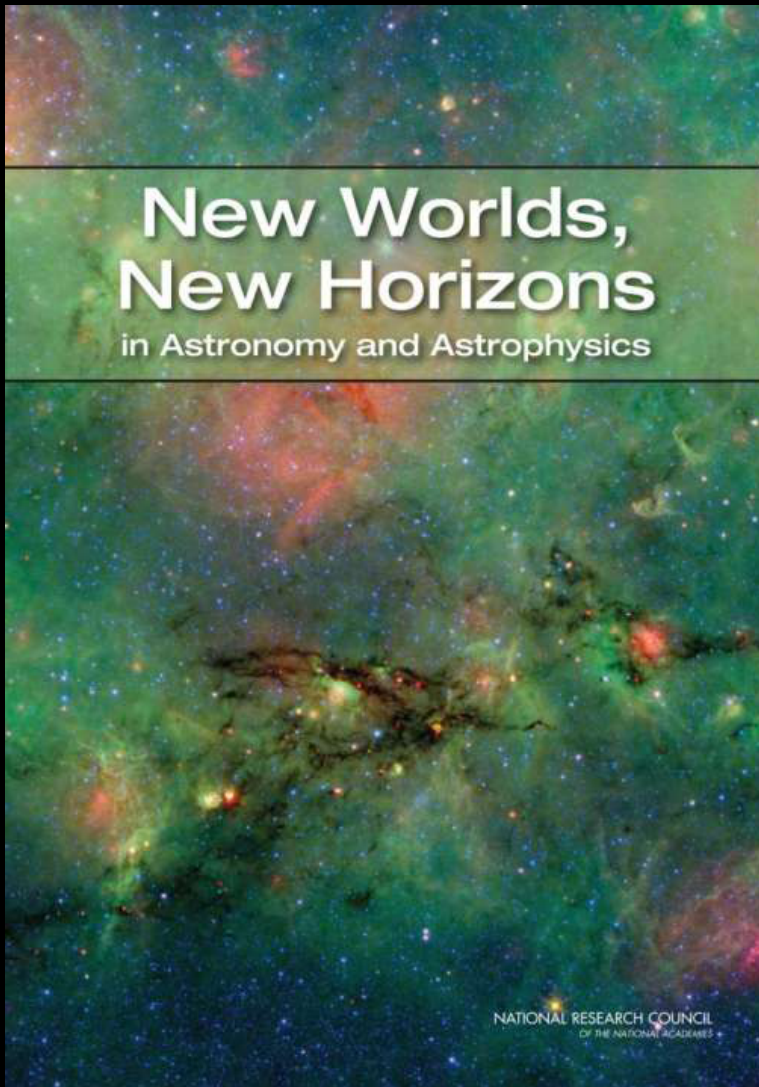
21世紀宇宙論 を覆う二つの暗雲



http://www.physics.gla.ac.uk/Physics3/Kelvin_online/clouds.htm

- 1900年4月27日 ケルビン卿 王立協会講演
 - 熱と光の動力学理論に立ち込める19世紀の暗雲
beauty and clearness of theory was overshadowed by two clouds
 - 実は、相対論と量子論の幕開けであった
- ダークマターとダークエネルギー(宇宙定数)は21世紀宇宙論における二つの暗雲か福音か？

Astro2010: decadal survey

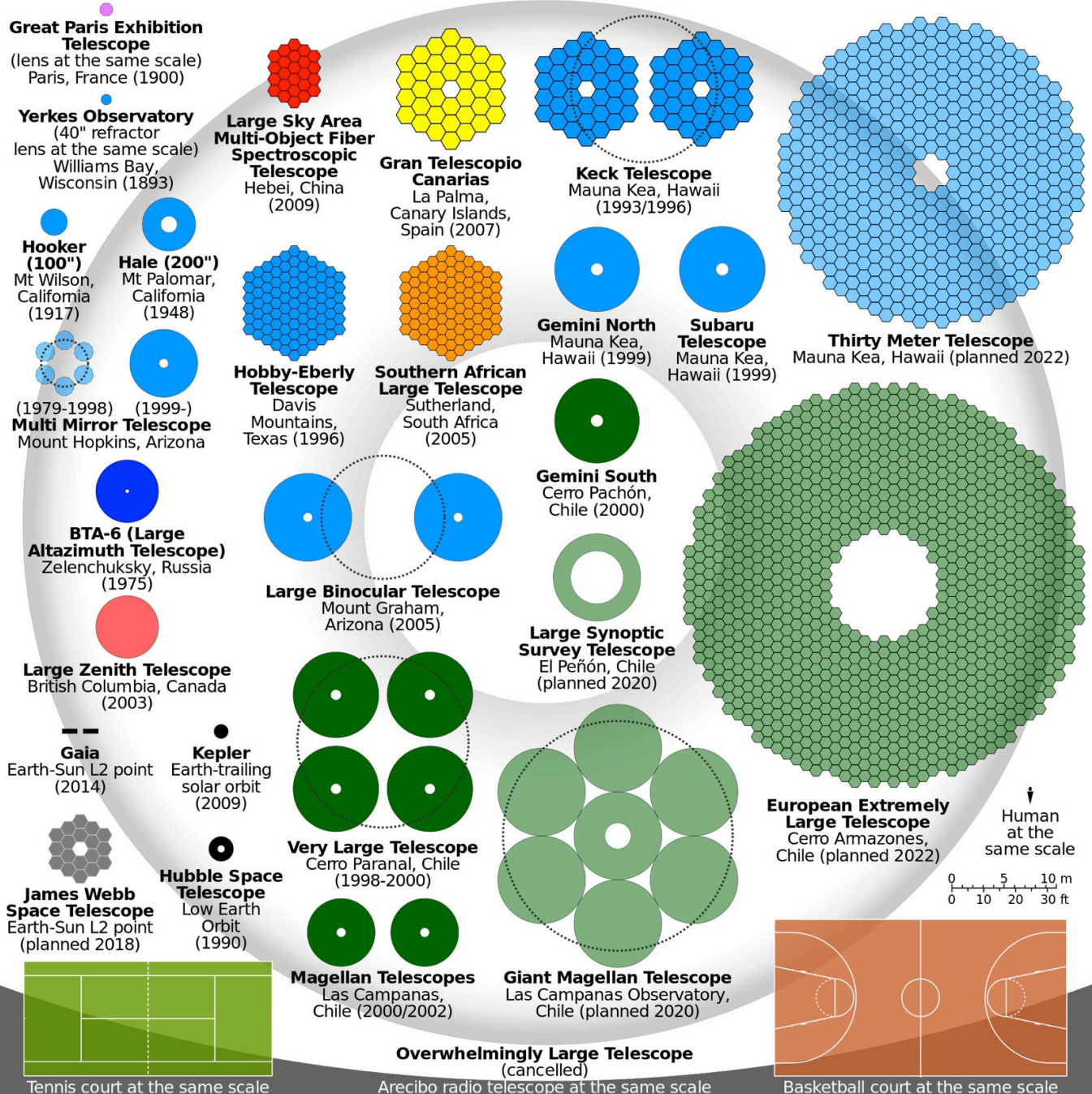


- ***Cosmic Dawn***
- ***New Worlds***
- ***Physics of the Universe***

August 13, 2010

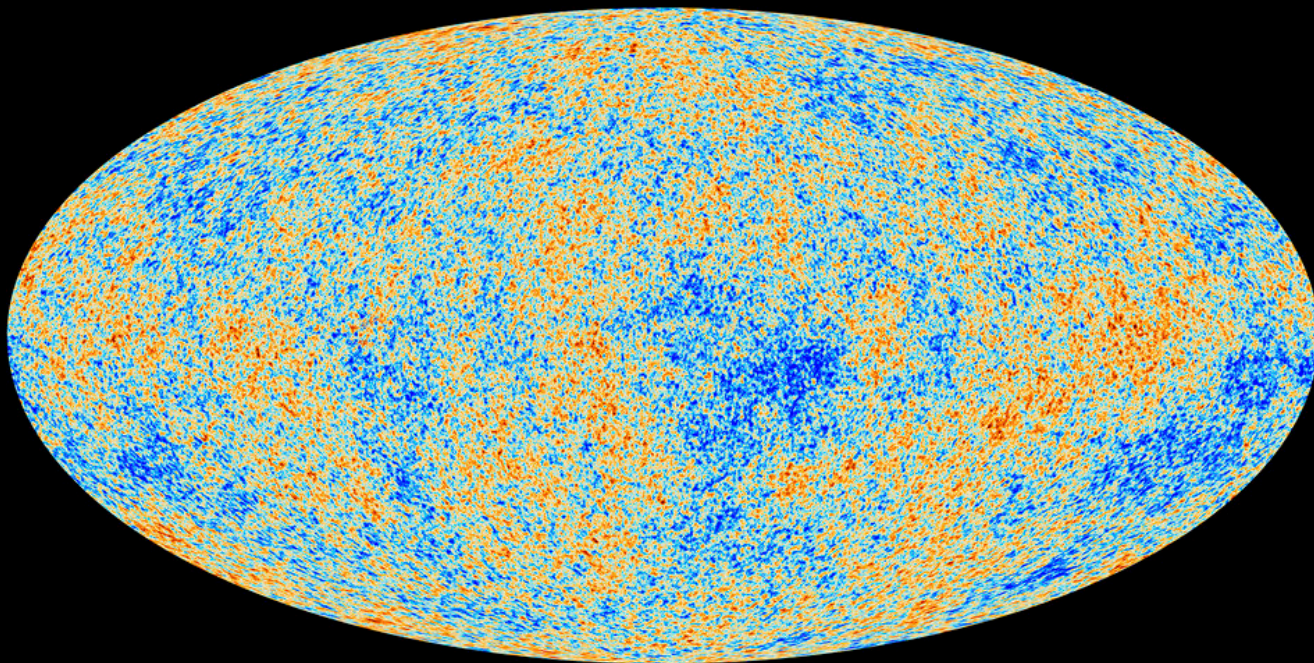
http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

大口径望遠鏡の進化



物理学的世界観と宇宙の進化

驚くべきことに、現在の宇宙に関するすべての情報が原理的にはここに刻まれている

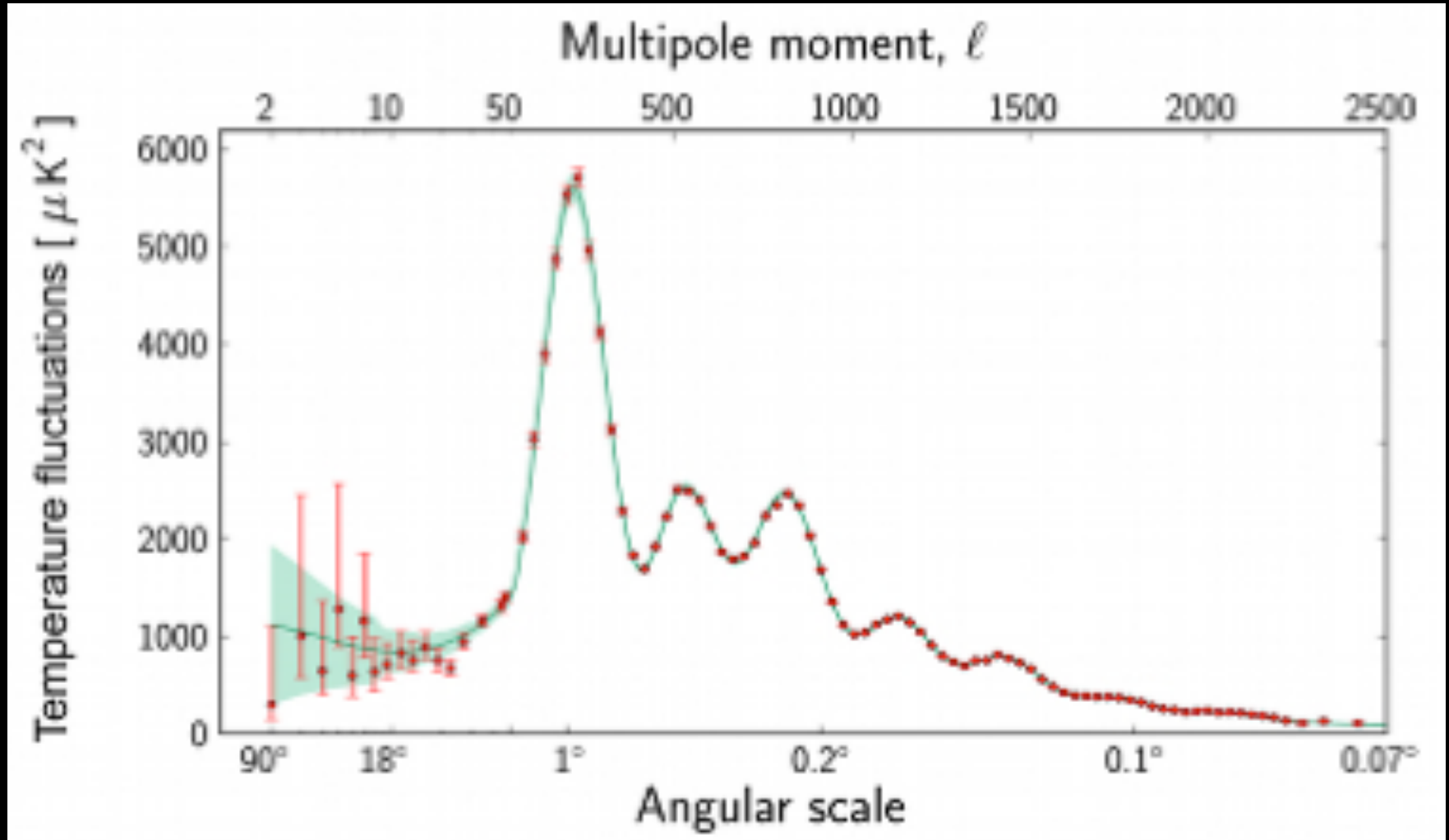


■ 宇宙論のセントラルドグマ

初期条件(量子論的非決定論)

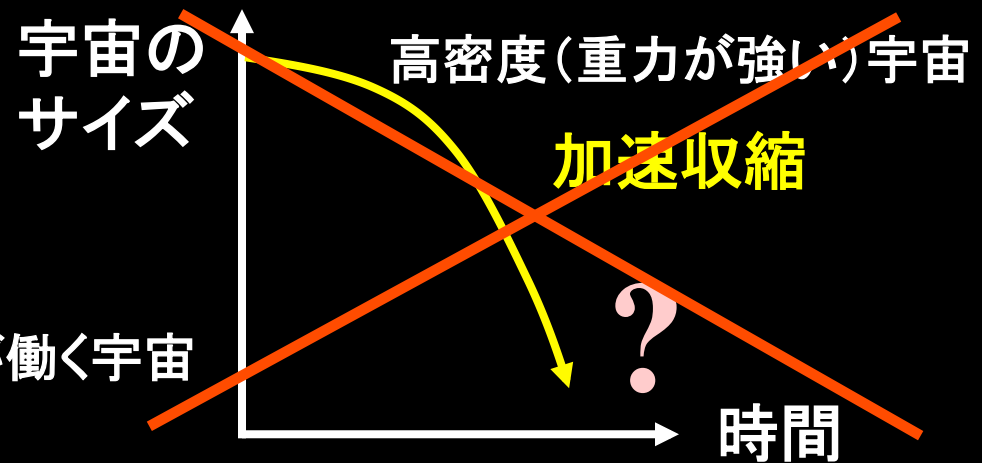
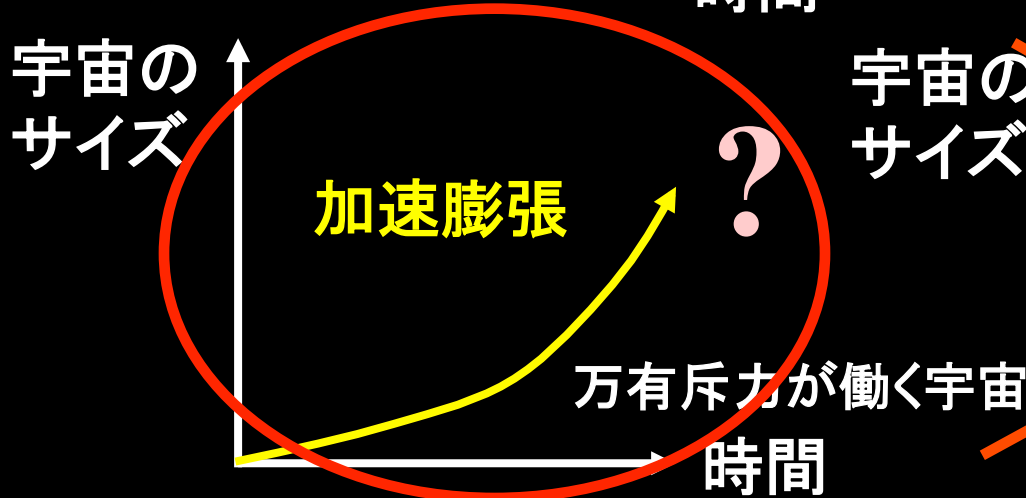
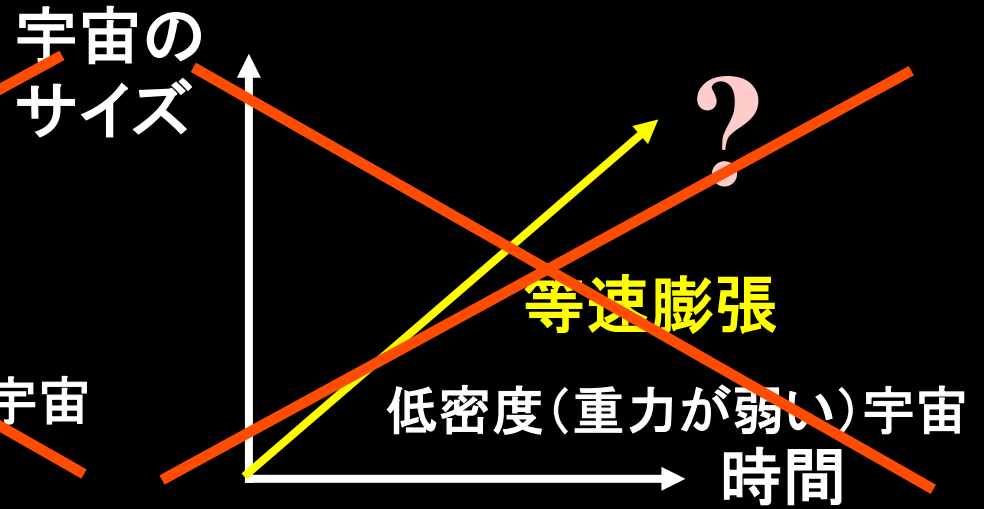
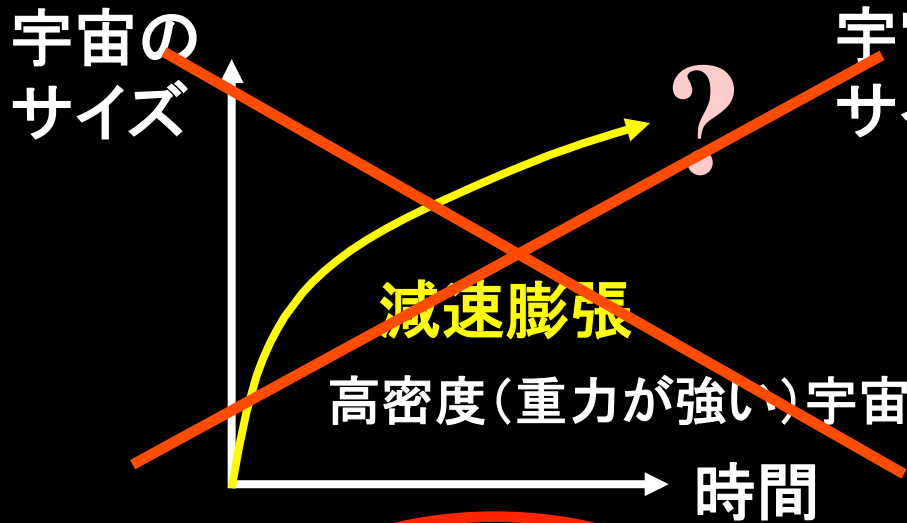
+ 既知の物理法則(古典論的決定論) = 現在の宇宙

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



宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙の構造と進化の観測を通じて、宇宙の組成を決定する ⇒ 宇宙の未来もわかる

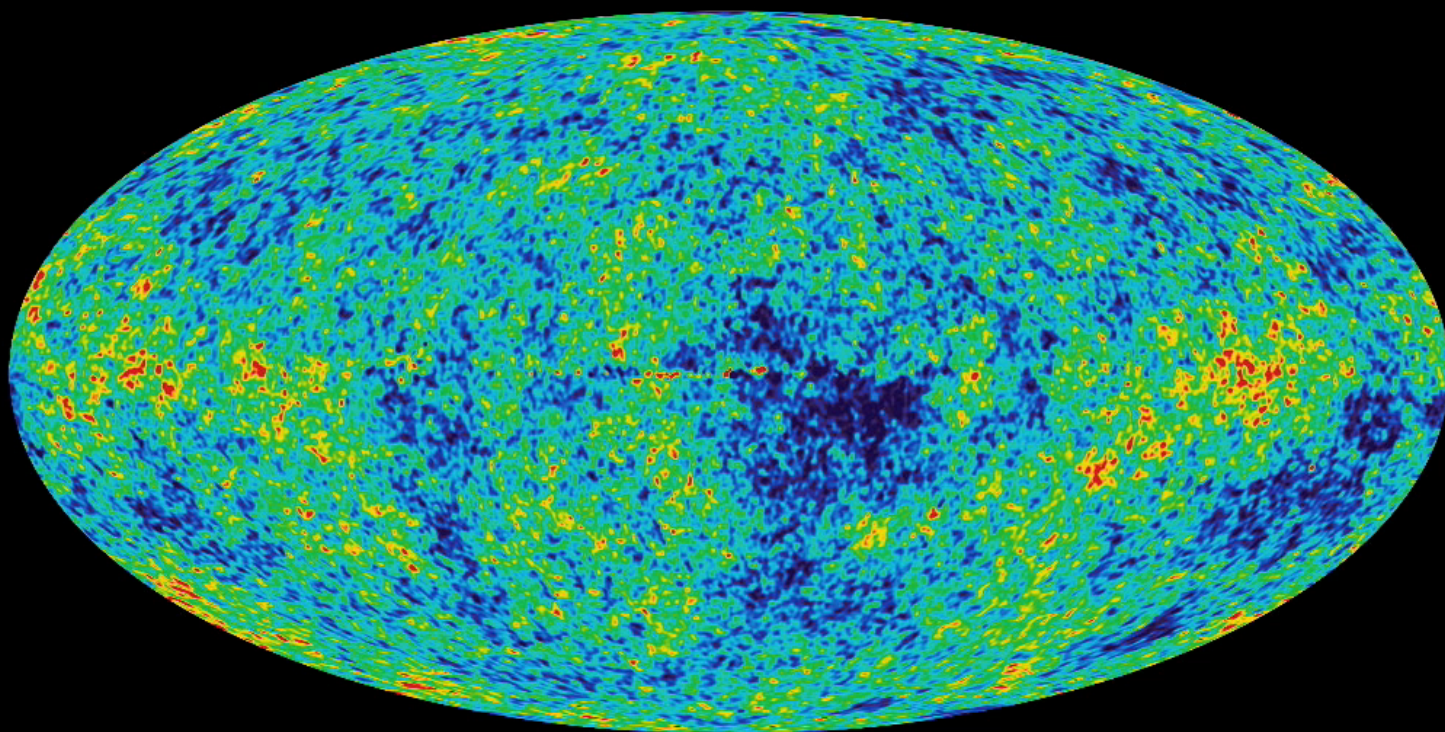


物理法則と初期条件

■ 物理学的世界観

- この自然界を支配する**物理法則**がわかっているならば、**初期条件**さえ与えられれば世界の振る舞いはすべて説明できるはず
- 少なくとも無生物界の記述には大きな成功をおさめている
 - ただしミクロな世界では、量子論的不確定性が存在するのでこの限りではない

38万年から138億年へ



NASA/WMAP サイエンスチーム

単に宇宙の構造だけではない



土星越しに 見る地球



- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
 - 2013年7月20日(日本時間): 2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini)
900 million miles away

必然と偶然

■ 科学が解明すべき究極の謎

- なぜ生命は誕生したのか
- なぜ意識が芽生えたのか
- なぜ宇宙は存在するのか

■ 必然と偶然の接点

- この宇宙のどこかで生命が誕生することは必然
- 進化した生物がやがては意識をもつのもまた必然
- しかし、宇宙の存在・誕生は偶然？
 - そもそも、宇宙誕生の前に物理法則はあったのか

宇宙の進化という必然

- 誕生後38万年での初期条件(CMB温度地図)
 - + 物理法則 = 現在の宇宙に関する観測事実
 - ビッグバン元素合成、宇宙の中性化、天体の誕生、元素循環と天体の形成・進化、宇宙の加速膨張
- 生命の誕生、知的生命への進化ですら、(未だ具体的な説明には成功していないものの)物理法則にしたがった必然的帰結

物理法則と宇宙の存在もまた必然か

- 初期条件と物理法則によって、その後の振る舞いは説明できるはず(物理学的世界観)だが、、、
- 初期条件は何によって決まったのか
 - 最終的には宇宙のはじまりの問題
- 宇宙はなぜ存在しているのか
- 物理法則は、いつから、どのように、なぜ存在しているのか
 - これらは通常の科学が扱える範囲ではないが、問題の存在は認識しておくべき

物事には必ず理由があるのか

■ 例題

- 地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と $\pm 10\%$ 程度の狭い範囲内におさまっていないとまらない(ハビタブルゾーンと呼ばれている)。これから何かわかることはあるか？

偶然に意味を見い出す

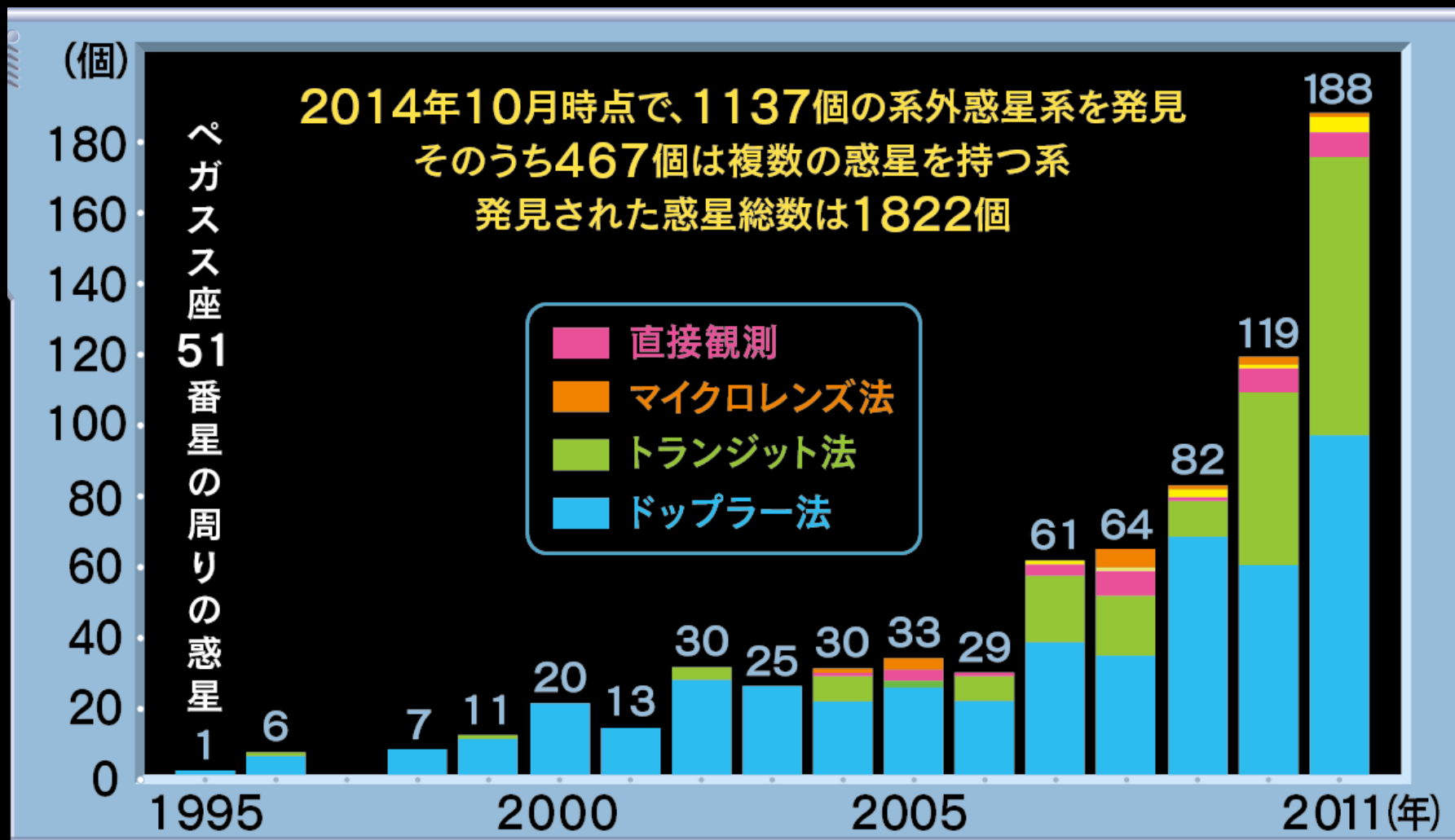
■ 回答例 1: 無意味な質問である

- 地球と太陽の距離は単に偶然決まっただけ。偶然には意味はない。

■ 回答例 2: 実は深い意味を持つ

- 偶然そのような微調整された系が実在するためには、地球が唯一ではなく、中心星と異なる距離にある無数の惑星が存在すると考える方が自然。つまり、この地球が微調整された(不自然な)性質を持っているのならば、それ以外の無数の惑星が存在していることを示唆する

この問いの正解は不明だが、太陽系以外に無数の惑星系が存在していることは事実



物事には必ず理由があるのか

■ 応用問題

- この宇宙には我々人間という知的生命が存在するが、そのためには宇宙の初期条件と物理法則に微調整が必要だとされている。これから何かわかることはあるか？

ユニバースからマルチバースへ

- **回答例 1: 無意味な質問である**
 - 知的生命の起源を未だ解明できていないだけ、あるいはそれは偶然に支配されているだけ、のいずれかである。それ以上の意味などない
- **回答例 2: 実は深い意味を持つ**
 - 知的生命を誕生させる条件をもつ宇宙の存在確率が極めて小さいならば、それを相殺するだけの数の宇宙が存在しなければ、知的生命をもつ宇宙は実存し得ない。つまり、宇宙は我々の宇宙以外にも多数存在しているはず。

宇宙を知り世界を知る

- 天文学研究者にとって「宇宙」は具体的な対象で、「世界」がより広い抽象的概念？
 - 宇宙 > 世界？ それとも 世界 > 宇宙？
- 宇宙観と世界観の広がり
 - ロバートソン・ウォーカー計量から標準宇宙モデルへ
 - 元素からダークマター・ダークエネルギーへ
 - ユニバースからマルチバースへ
 - 太陽系から系外惑星へ
 - 系外惑星からハビタブル惑星へ

宇宙観から世界観へ

- 天文学・宇宙物理学の進歩
⇔ **新たな世界観の構築**
 - 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

