

# 宇宙のダークエネルギー とは何か

東京大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

東邦大学理学部物理学科公開講座

「ミクロの物質とマクロの宇宙」 2007年7月7日

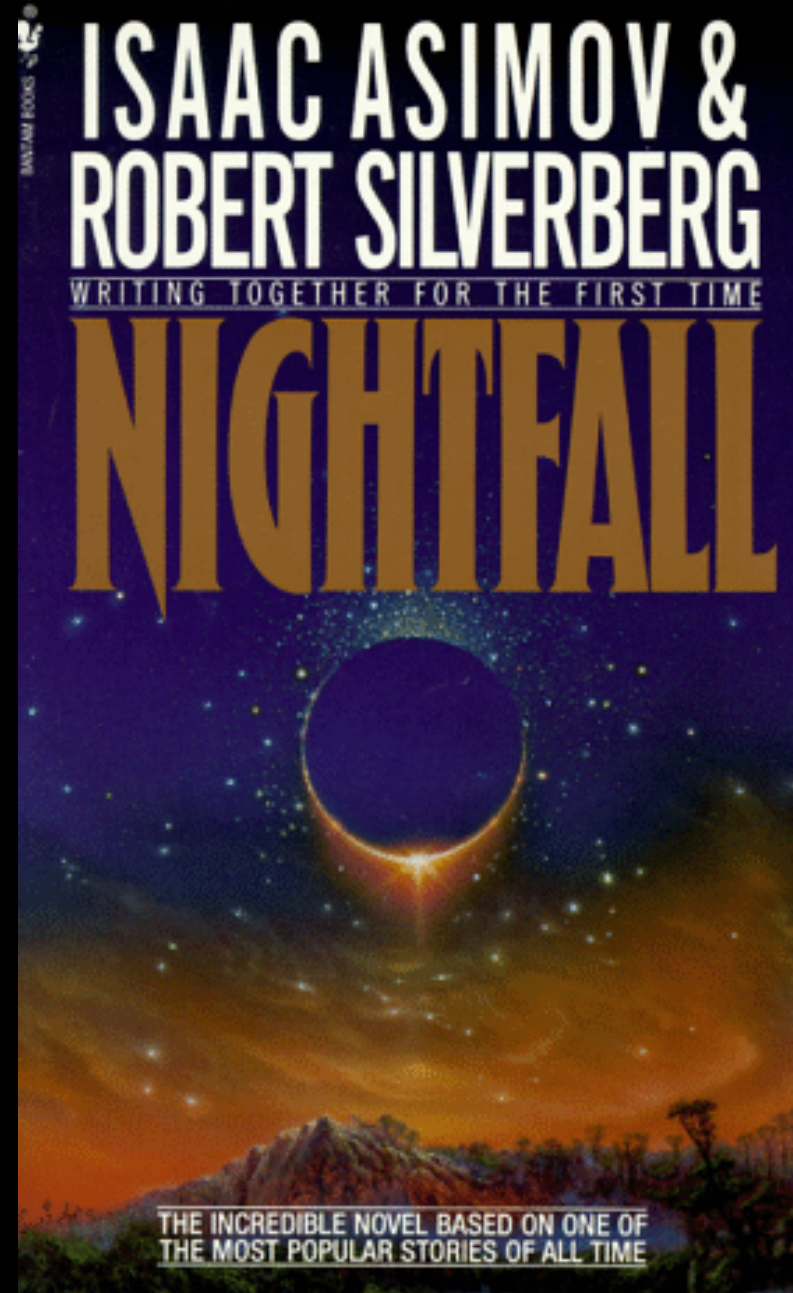
[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2007j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2007j.html)

# イタリアの青空

# 夜来たる



- 6つの太陽をもつ惑星ラガッシュに2049年に一度の夜が訪れる



# すばる観測所の秋空



(すばる観測所、田中壱氏撮影)

# すばる観測所の星空

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

# 夜があることの幸せ

- 暗いので昼間にはできない悪いこともできる
- リラックスできる
- ゆっくり眠れる
- 集中して何かに取り組める
- 地上の世界以外にも、夜空の向こうに別の世界がひろがっていることを教えてくれる
  - 宇宙とは何か、物質とは何か
  - 天文学の発端、哲学・自然科学の源流

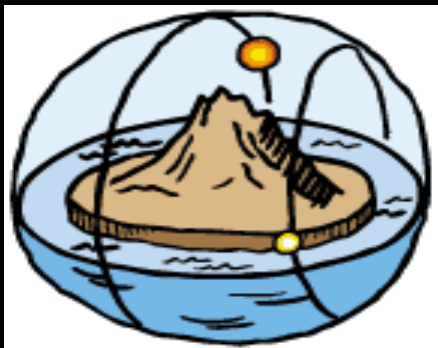
# 夜空のむこうの世界

## ■ 宇宙の果てには何がある？

古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像



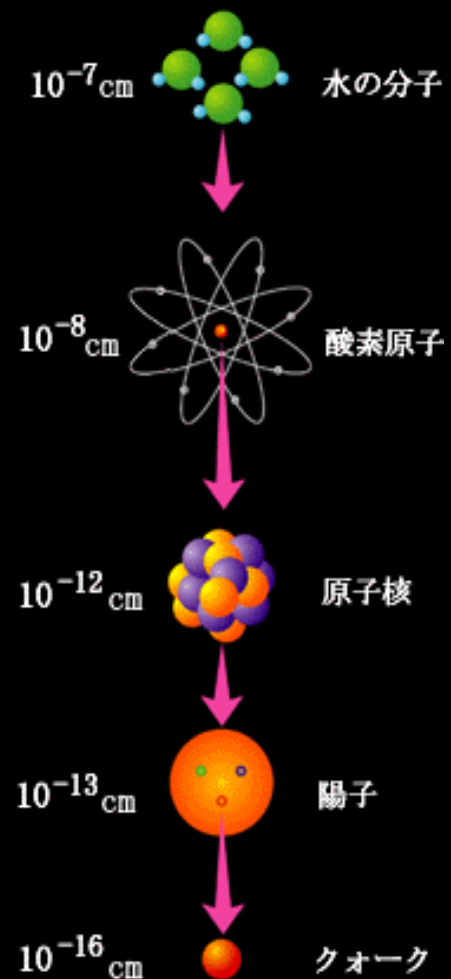
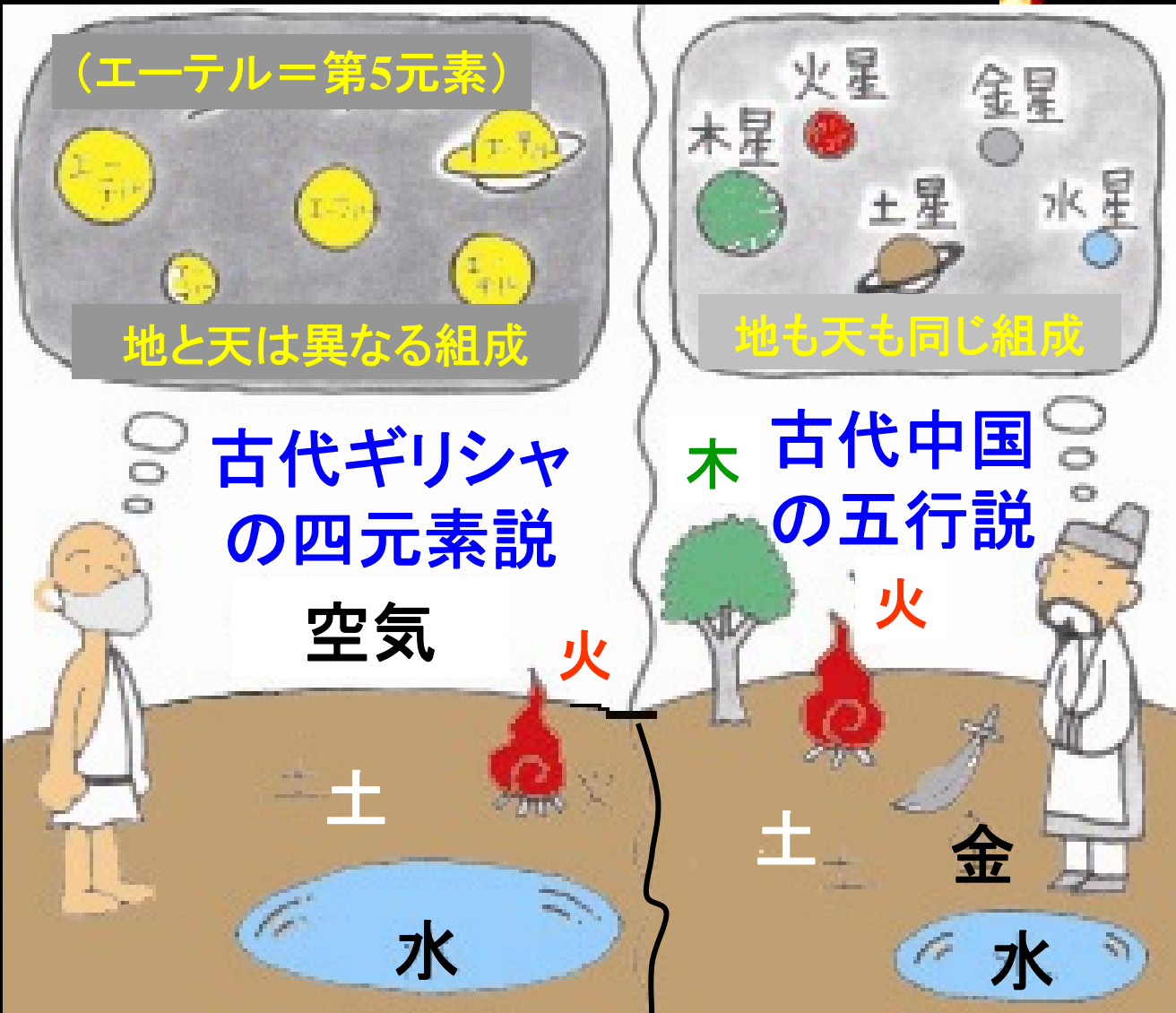
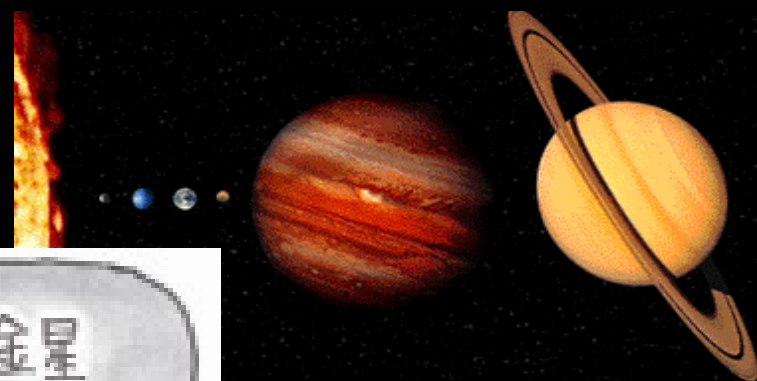
古代インドの宇宙像



<http://www.isas.ac.jp/kids/firstlook/index.html>

- 宇宙を満たしているものは何か？
- もう一つの地球はあるか？
- 夜の存在なくしてこのような思考に到達するのは容易ではない

# 自然界に思いをはせる



(いずもりよう:須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)



# 我々の世界をもっとよく知りたい

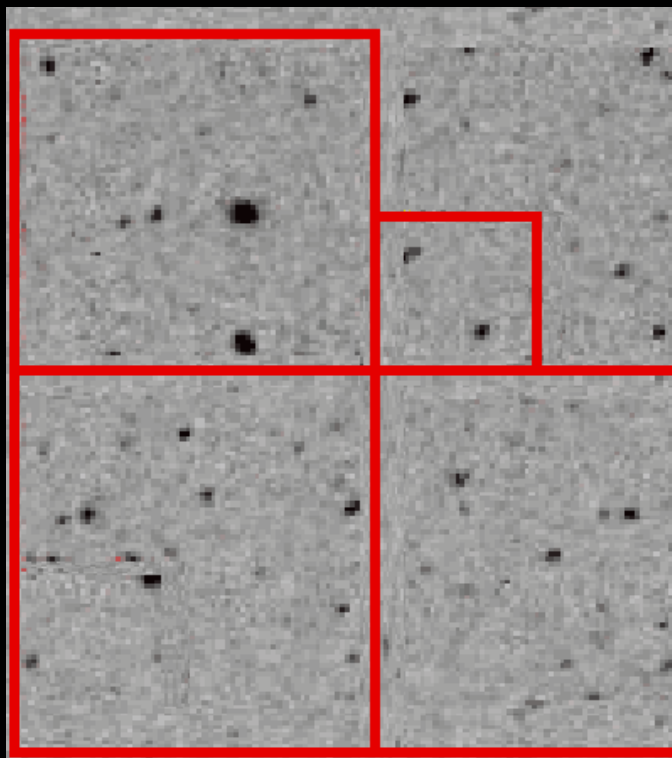
## ■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- ものをどんどん分けていくとどうなるか？
- 分子⇒原子⇒原子核(バリオン)⇒素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

## ■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのだろうか？

- 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
- 宇宙の大きさ(=年齢)はどのくらいだろう
- さらに遠く(=過去)の宇宙はどうなっているのだろう
- 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

# 宇宙を見る目 の進歩



地上4m望遠鏡+CCD  
100×写真乾板



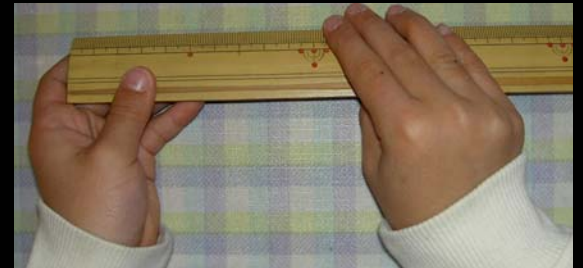
Hubble Deep Field  
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×  
地上望遠鏡

# 宇宙の成分分析法 (1)

- 宇宙は通常のエレメントだけからできているのか？
- 重力の影響を通じて宇宙の成分を探る
  - 宇宙の膨張速度は重力によって決まる
  - 異なる時刻の遠方宇宙までの距離を測ると重力の強さがわかる ⇒ 組成が分かる



## ■ 主な観測的推定法

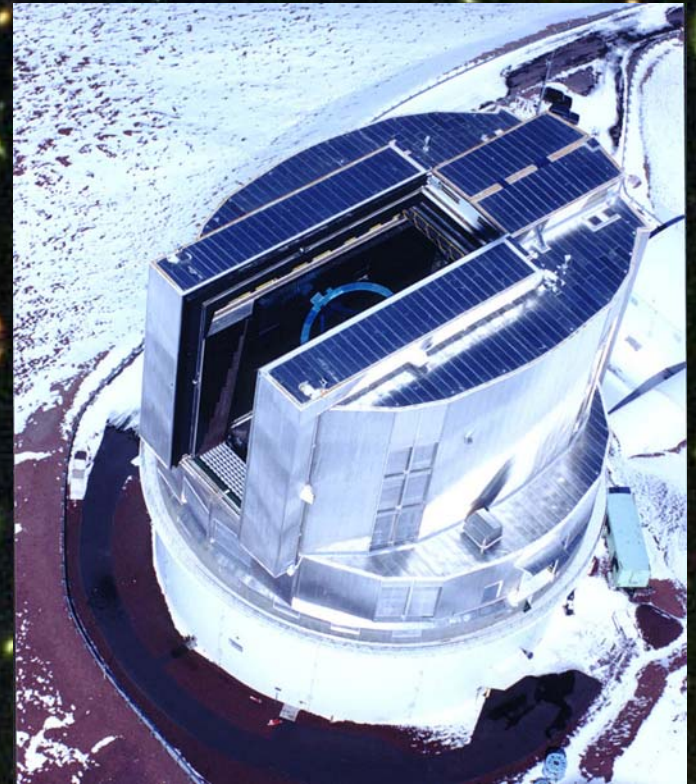
- 遠方天体の空間分布: 重力レンズ、バリオン振動
- 超新星: 後退速度・見かけの明るさ関係
- 宇宙マイクロ波背景放射: 温度ゆらぎ全天地図

# SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台



NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映

# すばる望遠鏡の見た夜空のむこう



<http://www.naoj.org/Gallery/>

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



重レンズ天体  
SDSS J1004+4112 :  
一般相対論的蜃気楼



# 100億光年先からの一般相対論的蜃気楼 (SDSS J1004+4112)



2003年に東京大学の稲田直久と大栗真宗がSDSSで発見、すばるで確認  
Inada et al. Nature 426(2003)810

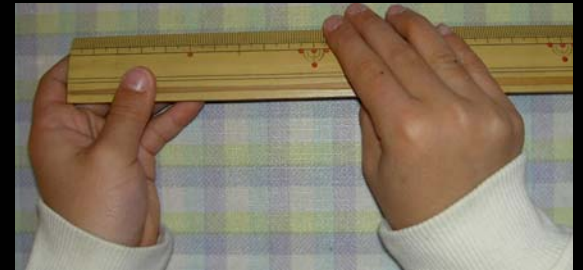
宇宙の果ての観測を通じて  
光は出さないが宇宙の重力を支配するダークマターが  
大量に存在することが明らかにされた

SDSS  
J1004+4112



# 宇宙の成分分析法 (2)

- 宇宙は通常のエレメントだけからできているのか？
- 重力の影響を通じて宇宙の成分を探る
  - 宇宙の膨張速度は重力によって決まる
  - 異なる時刻の遠方宇宙までの距離を測ると重力の強さがわかる ⇒ 組成が分かる
- 主な観測的推定法
  - 遠方天体の空間分布: 重力レンズ、バリオン振動
  - 超新星: 後退速度・見かけの明るさ関係
  - 宇宙マイクロ波背景放射: 温度ゆらぎ全天地図



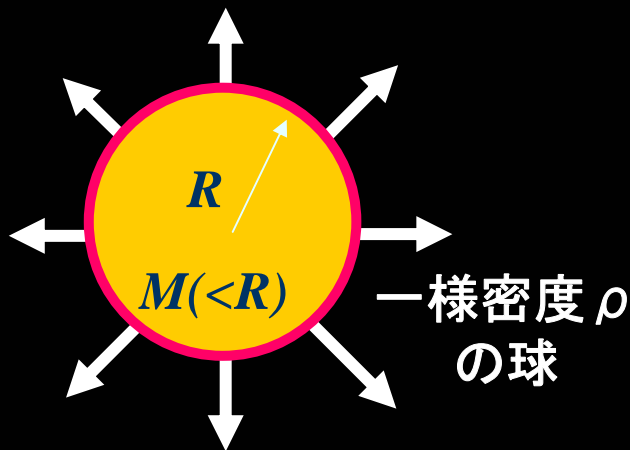
# 膨張宇宙の運動方程式

## ■ ニュートン力学による球殻の運動方程式

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

## ■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度  $\rho$  のみならず圧力  $p$  もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」( $\Lambda$ )が存在し得る

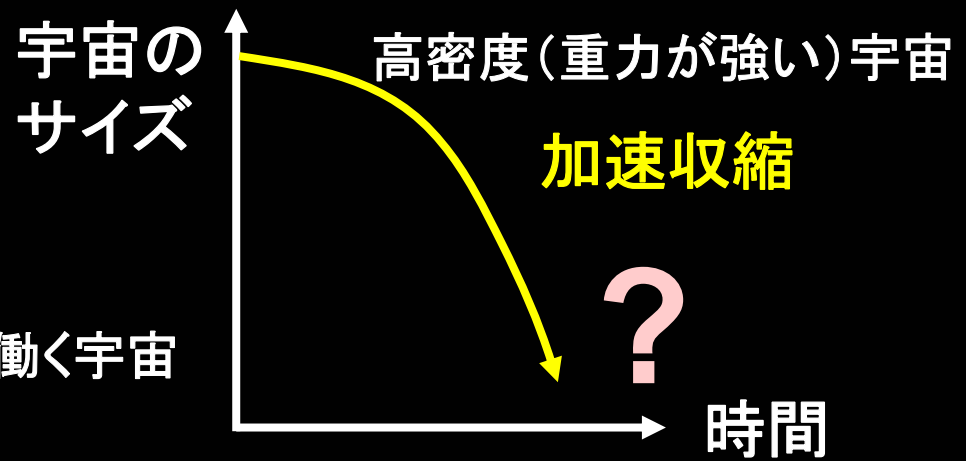
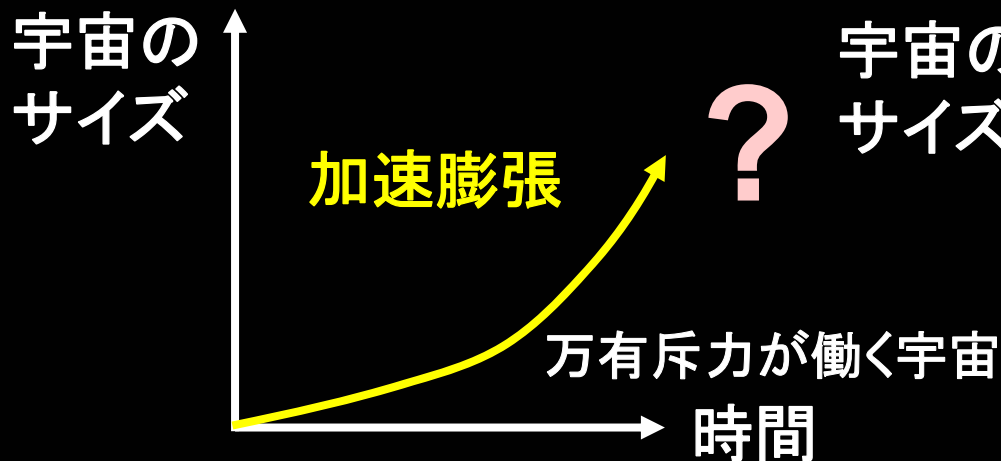
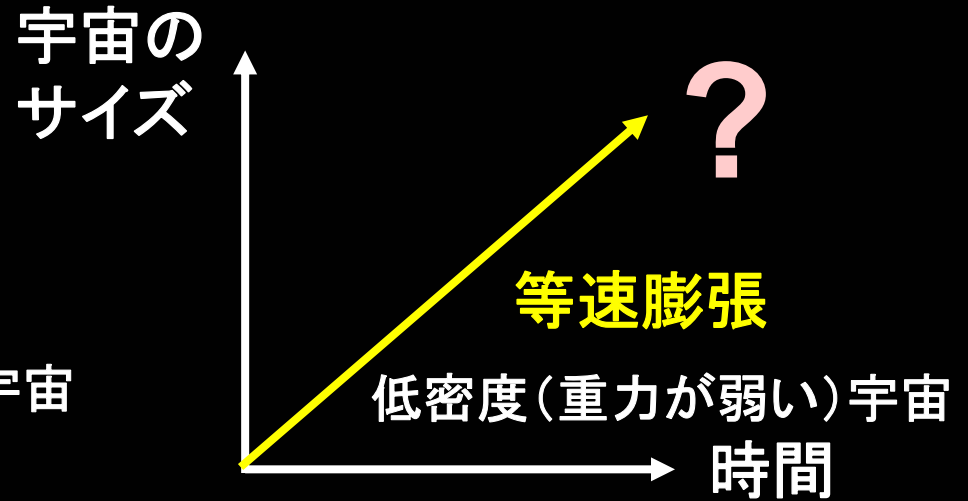
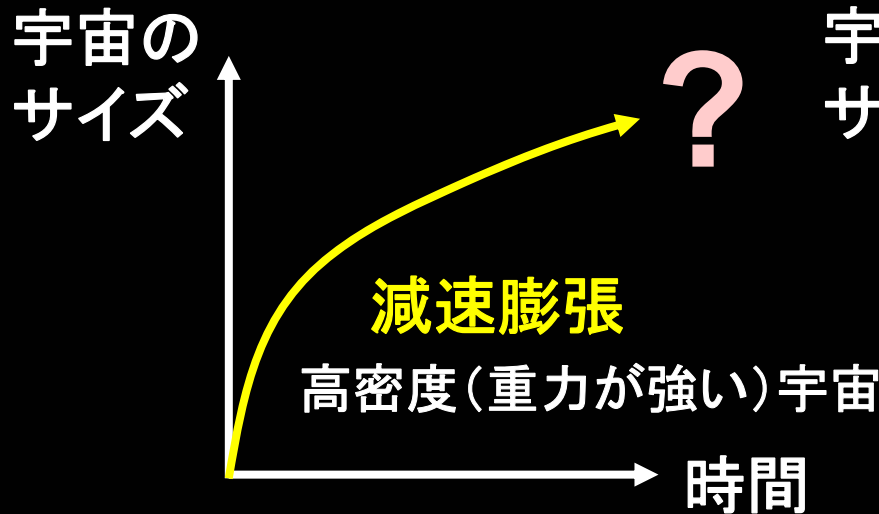


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

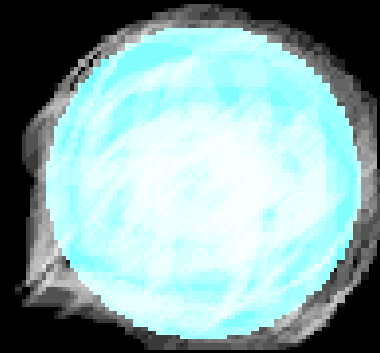
# 宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 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



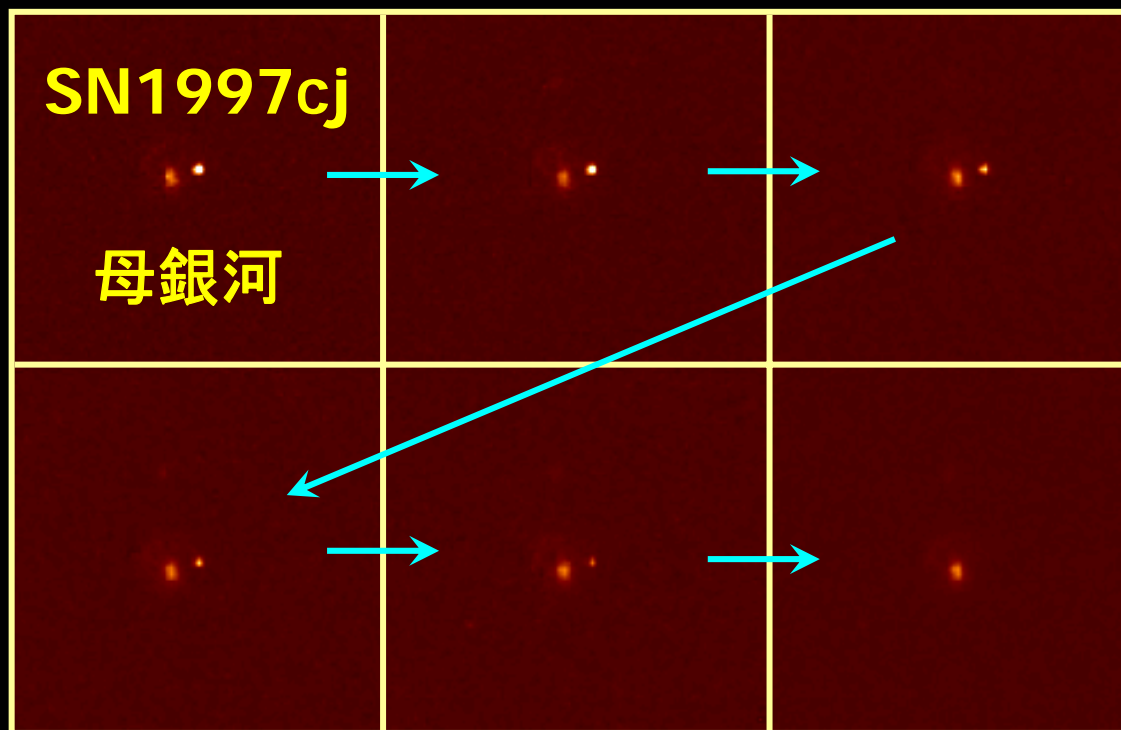
# Ia型超新星

- 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

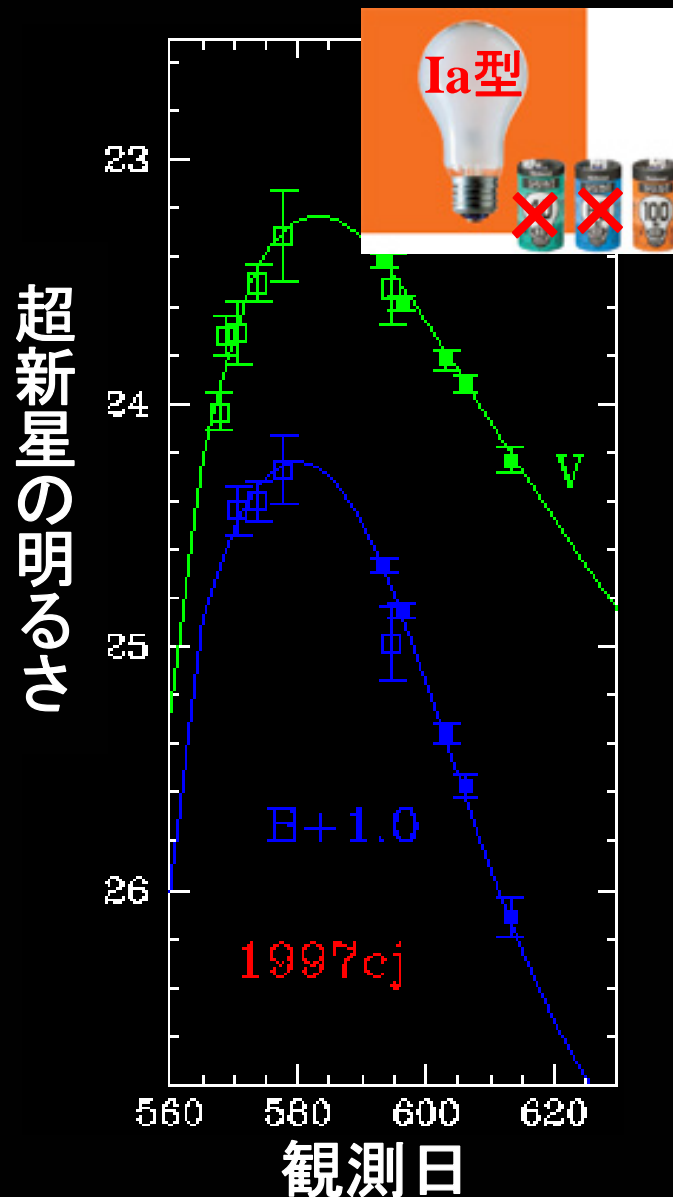


# Ia型超新星の光度曲線の測定

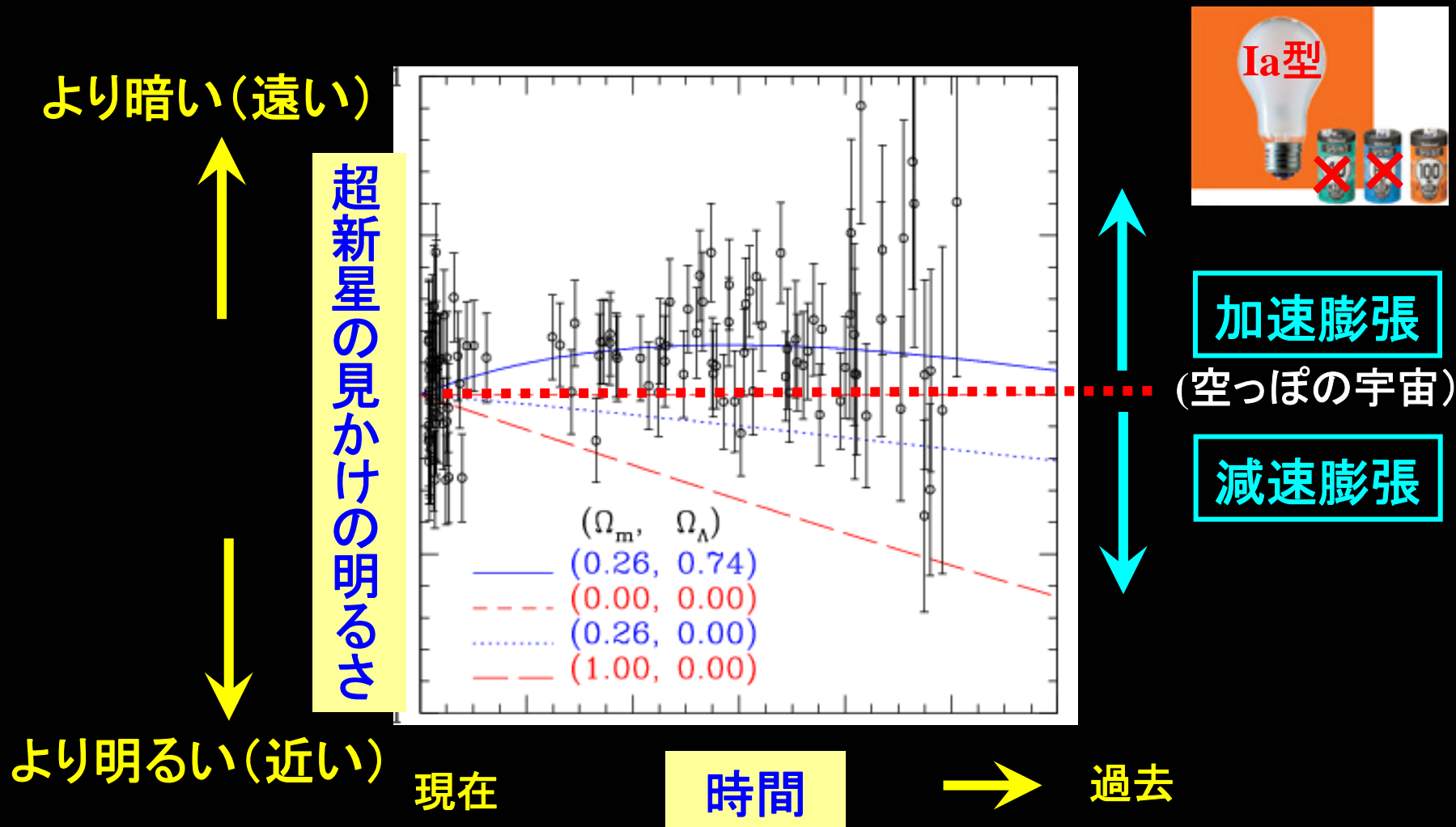
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



ハッブル宇宙望遠鏡による観測

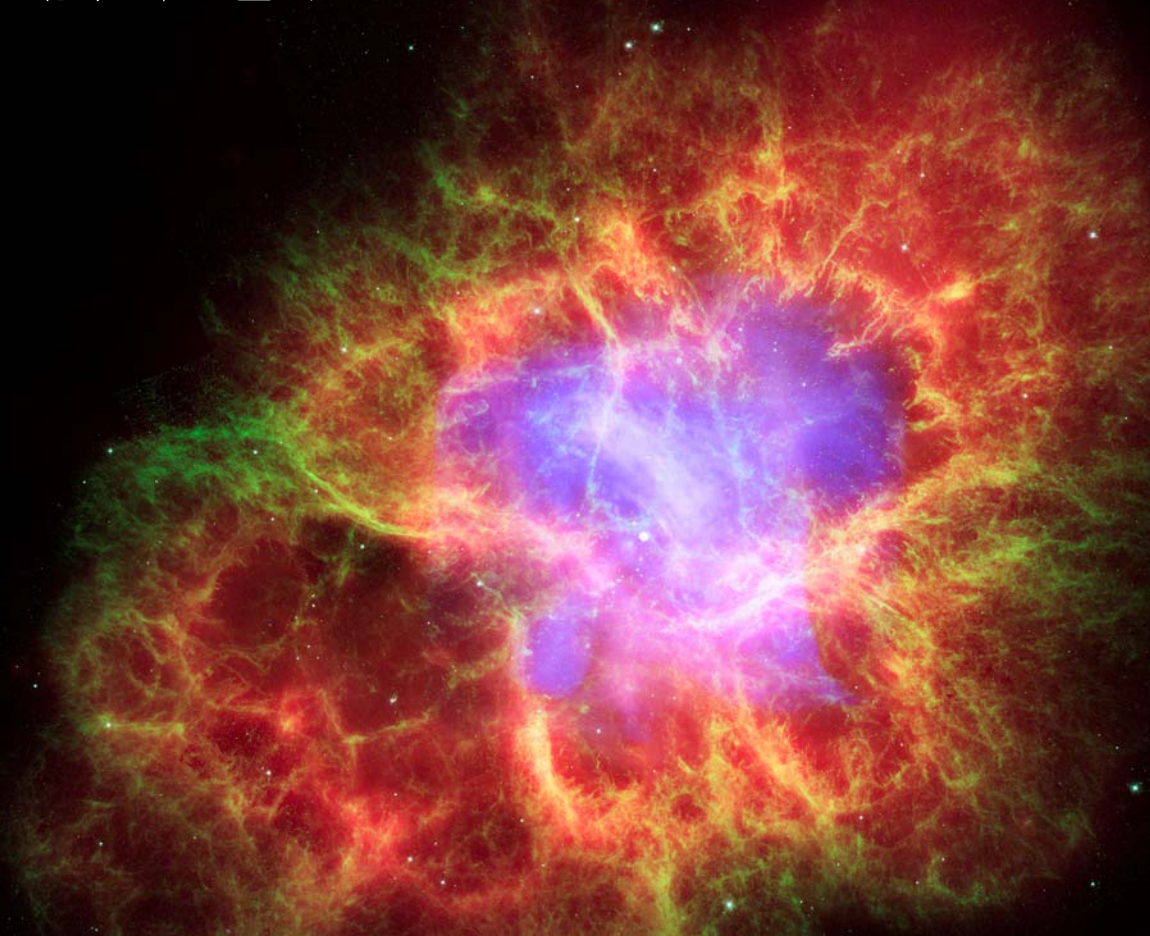


# 超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見



- 宇宙は加速膨張をしていた！ (1998年)

# 宇宙の果ての超新星が 宇宙の加速膨張を明らかにした



かに星雲

1054年に起こったⅡ型超新星爆発の残骸

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/2005/37/image/b/>

# 宇宙膨張とダークエネルギー

## ■ 宇宙の将来はどうか？

- 宇宙は膨張している（ハッブルの法則、1929年）
- さらに膨張の加速度の符号を決める必要

## ■ 負の加速度、つまり減速する？

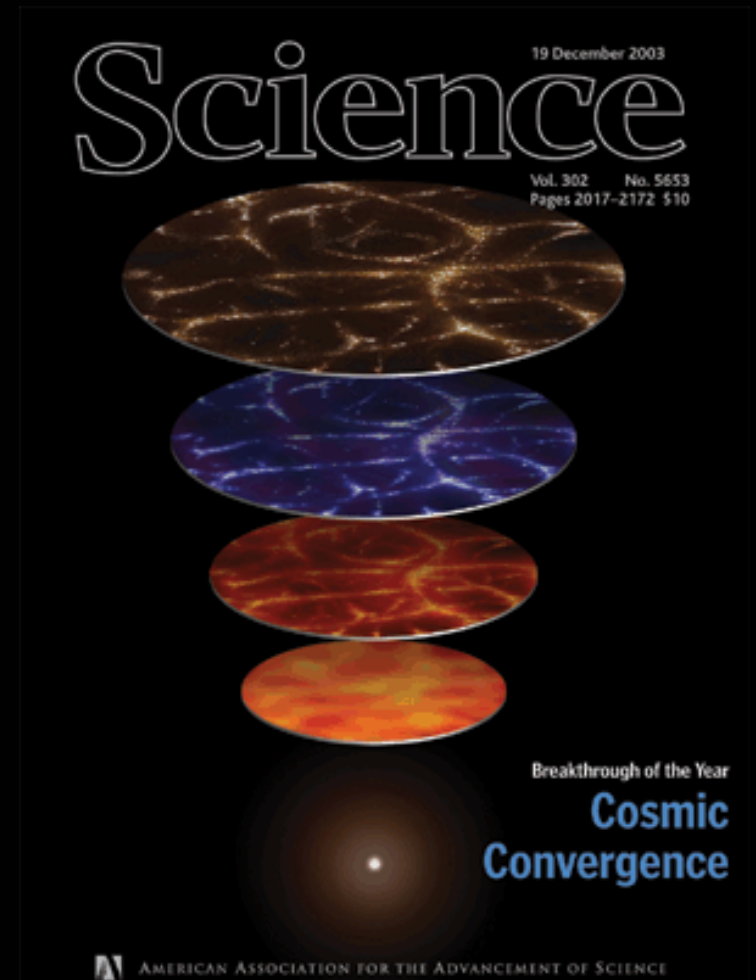
- 重力は常に引力なのであたりまえのはず、、、
- 膨張が遅くなりやがては収縮に転ずるかも

## ■ 正の加速度、つまり膨張がさらに加速する？

- 引力である重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な可能性
- にもかかわらず観測的に証明されてしまった
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体（暗黒エネルギー）??



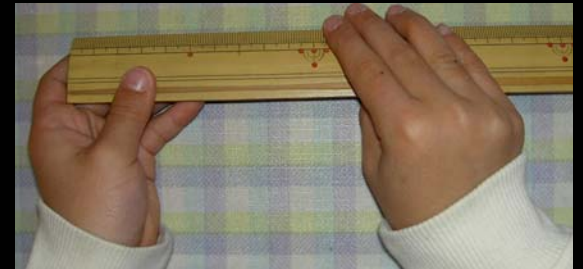
# 宇宙の加速膨張と宇宙の組成



米国の科学雑誌Scienceが選んだ「その年の大発見」(breakthrough of the year)  
1998年 宇宙の加速膨張、2003年 宇宙の暗黒エネルギー

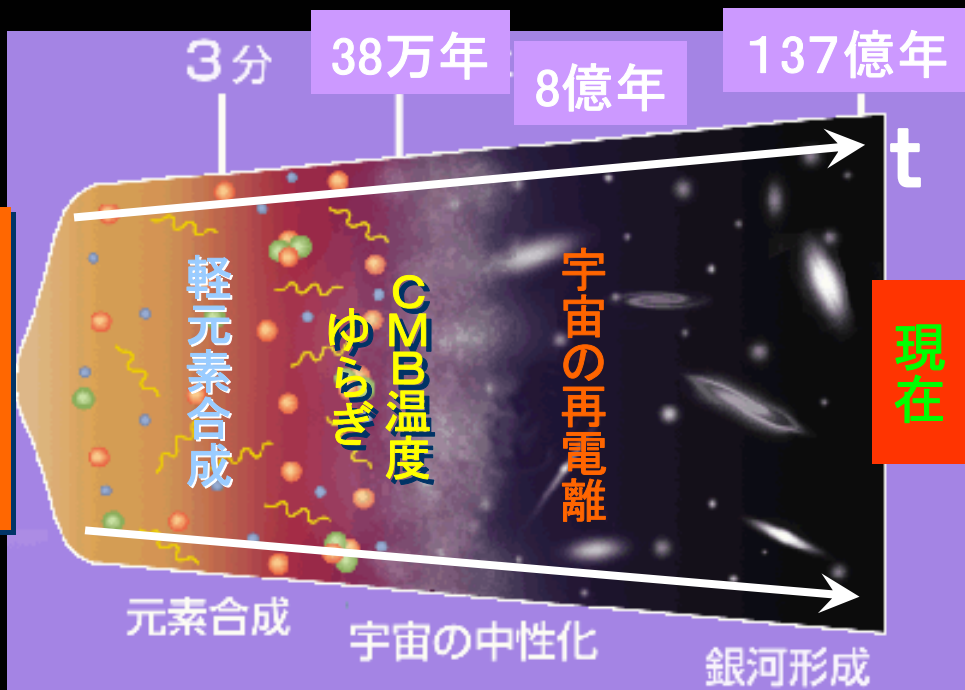
# 宇宙の成分分析法 (3)

- 宇宙は通常のエレメントだけからできているのか？
- 重力の影響を通じて宇宙の成分を探る
  - 宇宙の膨張速度は重力によって決まる
  - 異なる時刻の遠方宇宙までの距離を測ると重力の強さがわかる ⇒ 組成が分かる
- 主な観測的推定法
  - 遠方天体の空間分布: 重力レンズ、バリオン振動
  - 超新星: 後退速度・見かけの明るさ関係
  - 宇宙マイクロ波背景放射: 温度ゆらぎ全天地図



# 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

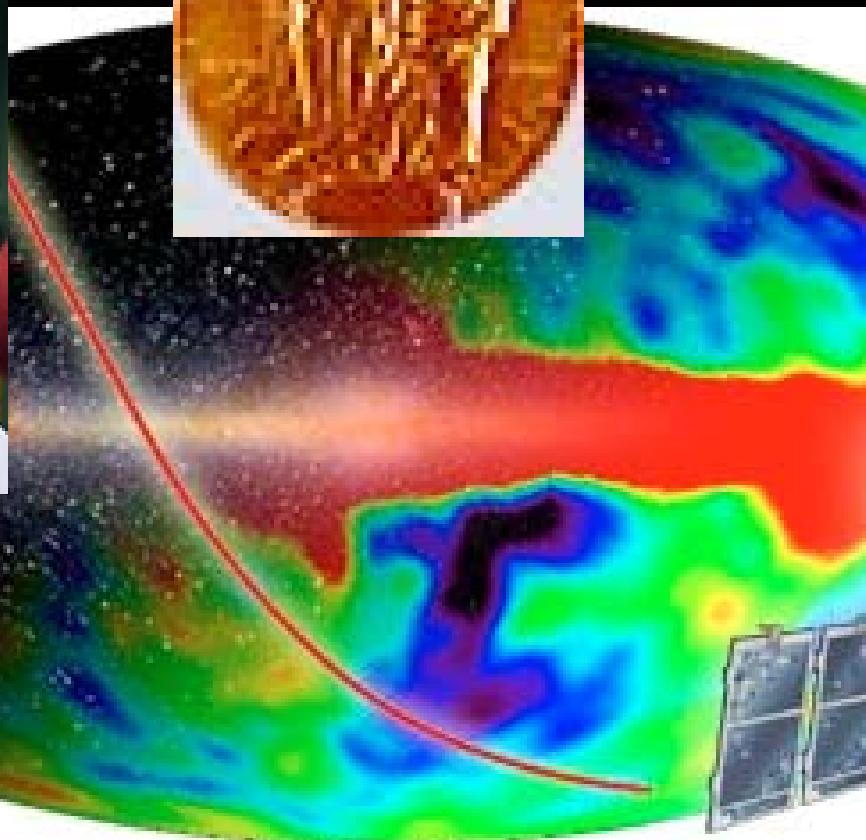
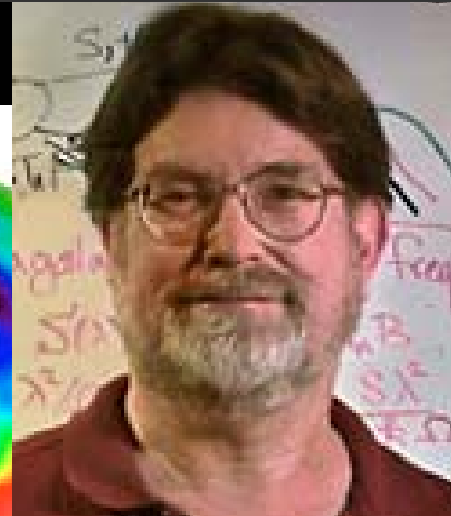
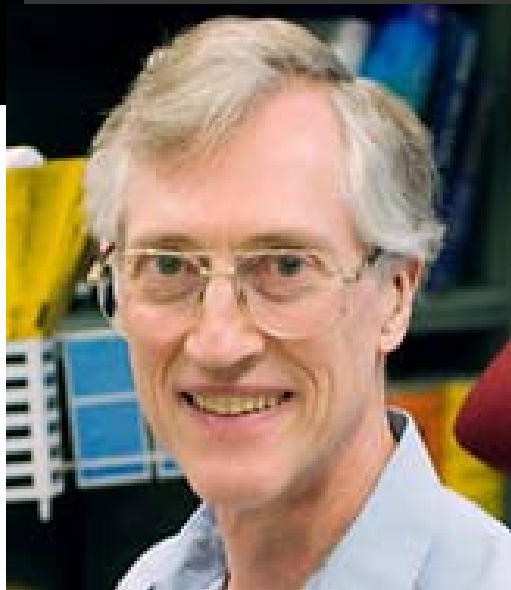
銀河団の形成

宇宙の大構造

# 宇宙マイクロ波背景輻射とCOBE ～2006年度ノーベル物理学賞～

ジョン・マザー

ジョージ・スムート



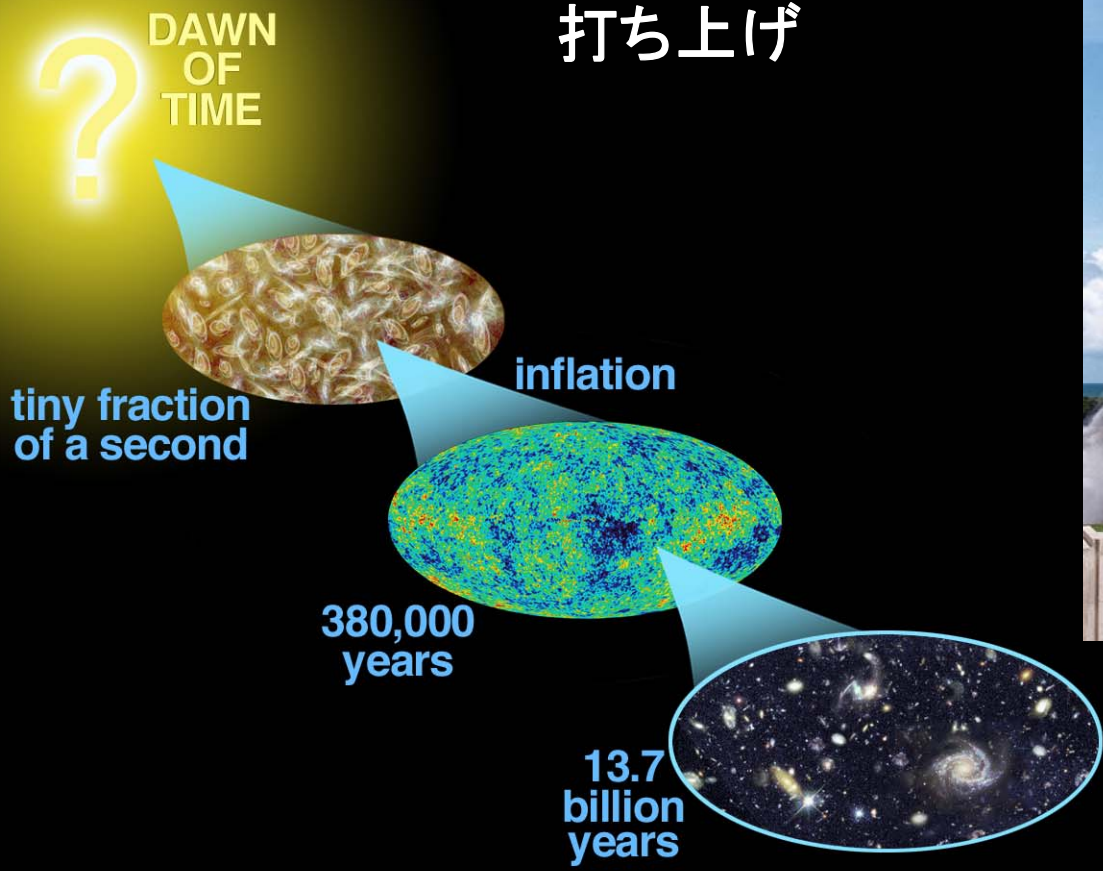
**COBE**

Cosmic Background Explorer

# WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査機)

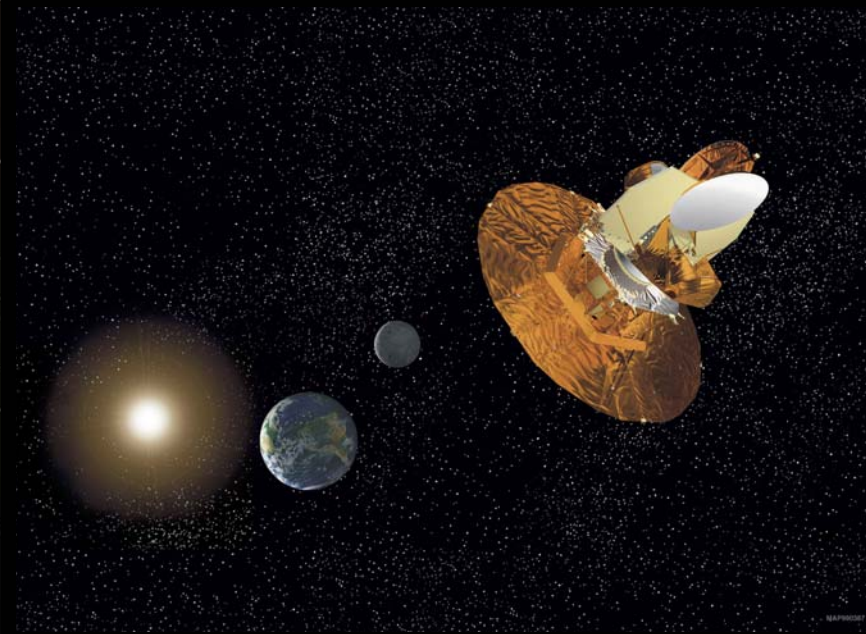
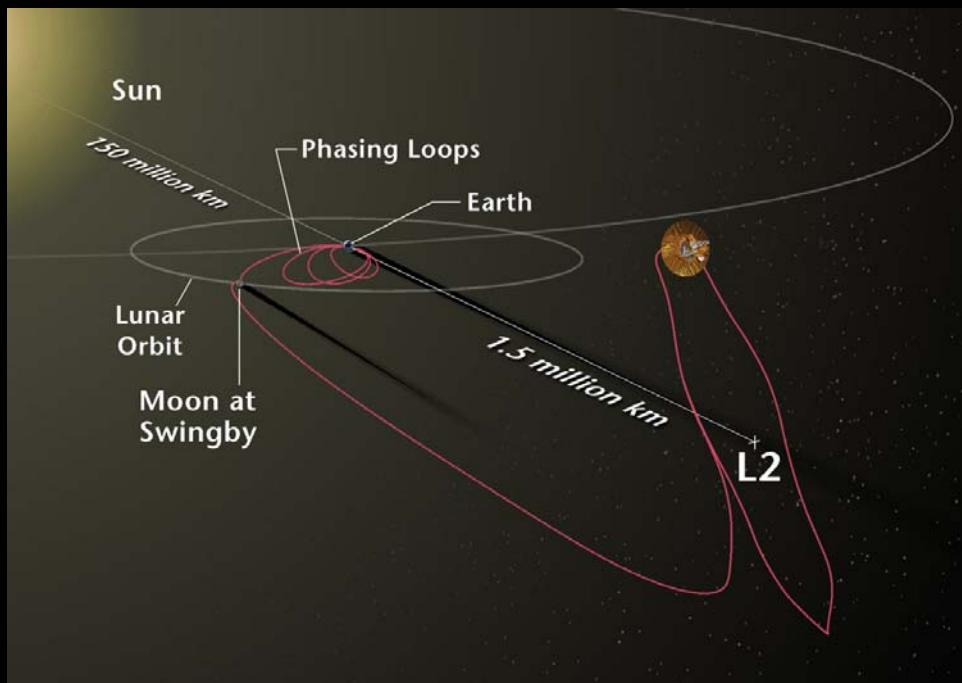
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

2001年6月30日 15:46:46  
米国東海岸標準時間  
打ち上げ



**NASA/WMAP**  
サイエンスチーム提供

# WMAP 衛星打ち上げ



# WMAP衛星：地球から宇宙の果てへの旅

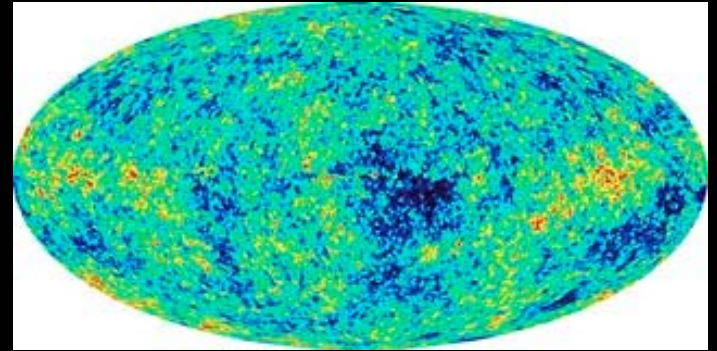


NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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

# 137億年前の古文書の解読

- 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

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

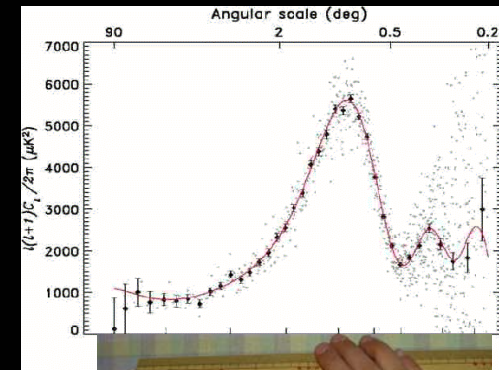
- 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

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

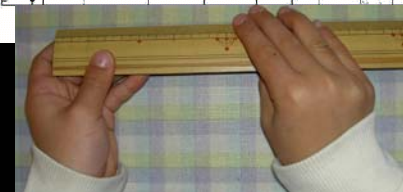
- この古文書の意味を理解するための文法

- 冷たいダークマターモデルの理論予言



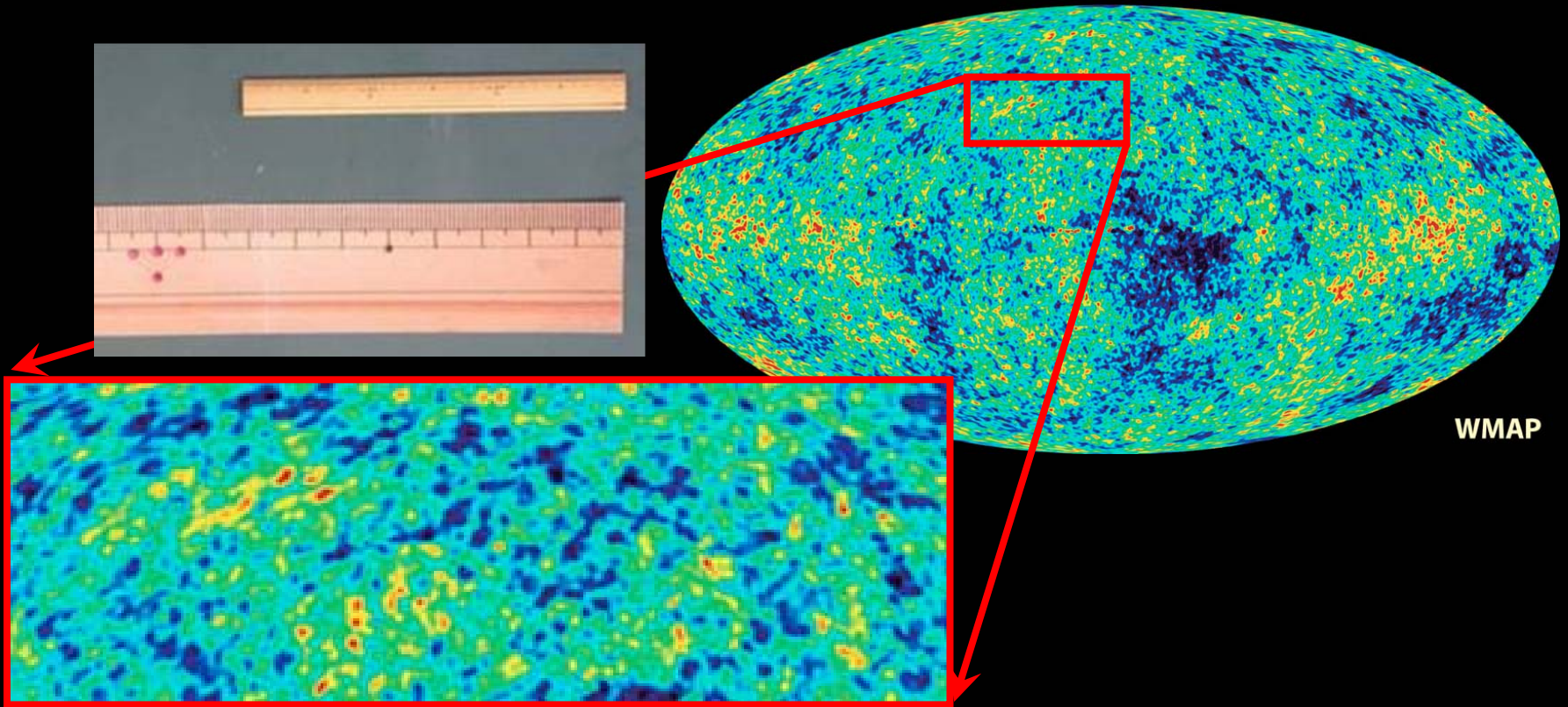
- 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



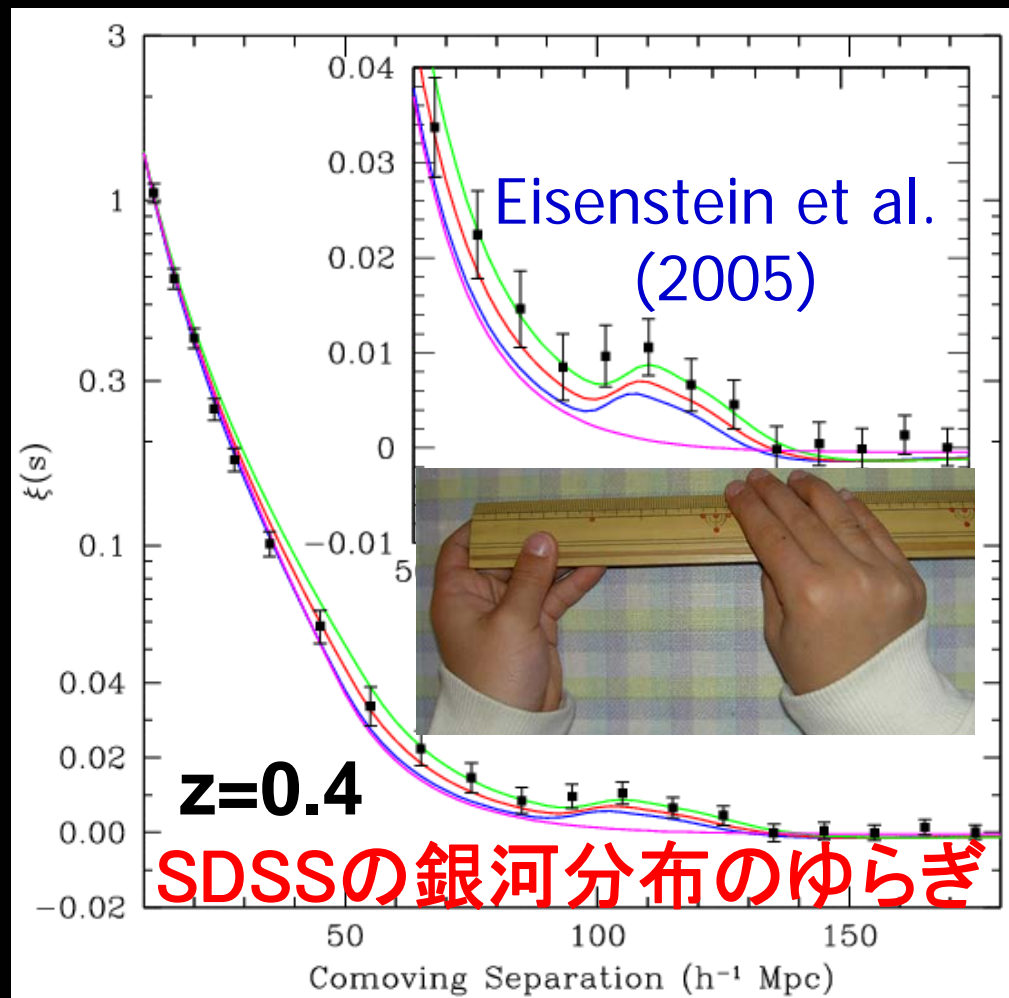
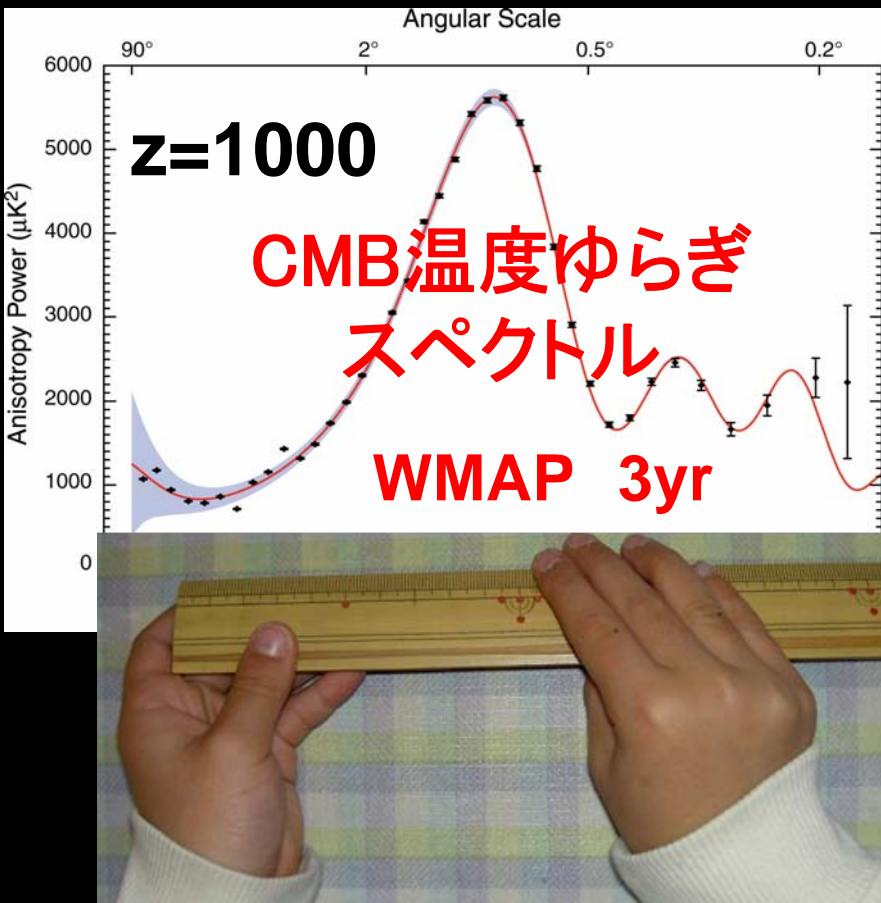


# CMB中のバリオン・光子音波振動の痕跡



- 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

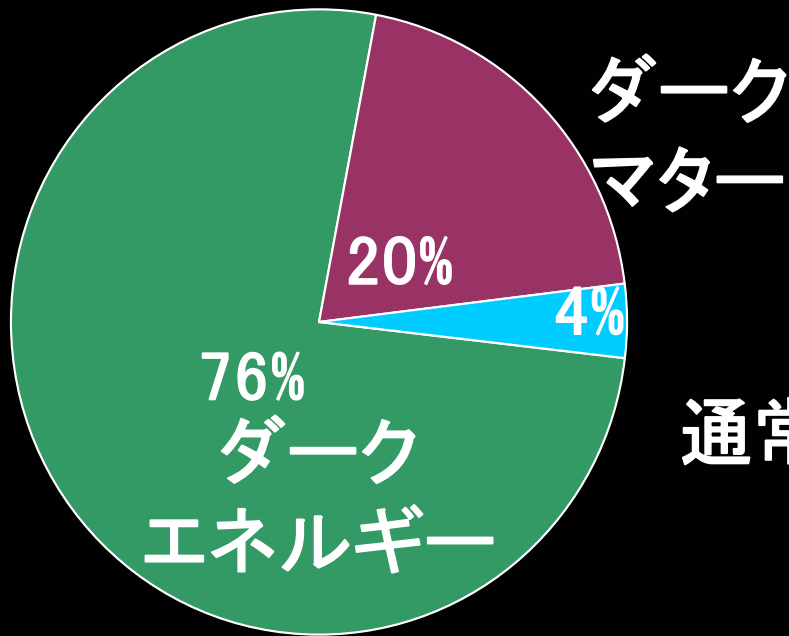
# CMBと銀河で見る宇宙の音波振動



$$147 \left( \frac{0.13}{\Omega_m h^2} \right)^{0.25} \left( \frac{0.024}{\Omega_b h^2} \right)^{0.08} \text{ Mpc}$$

# 古文書の教えてくれたこと

## 宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

## 通常物質 (バリオン)

- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？
- 宇宙空間を一様に満たしている
- ダークマターとは異なり空間的に局在せずあまねく存在

- 元素をつくっているもの(陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質(の質量)は実質的にはすべてバリオン

我々は、地上・天空を問わずすべてをダークエネルギーごしに見ている

# アインシュタイン方程式と宇宙定数

- 一般相対論の基礎方程式
- 両辺にアインシュタインの思想と叡智が満ちている

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} \left( + \boxed{\Lambda}g_{\mu\nu} \right) = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

宇宙定数

- 「標語的」には

**時空 = 物質**



- 左辺は時空の幾何学で決まる
- 右辺はその時空に存在する物質の性質
- 本来、宇宙定数は別になくてもよいはずだった

# 宇宙定数(≡ダークエネルギー)の歴史

- 1916年：一般相対論
- 1917年：アインシュタインの静的宇宙モデル
- 1980年代以降：真空のエネルギー密度

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

宇宙定数 (時空の幾何学量)      移項      物質場 (真空のエネルギー密度?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left( T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

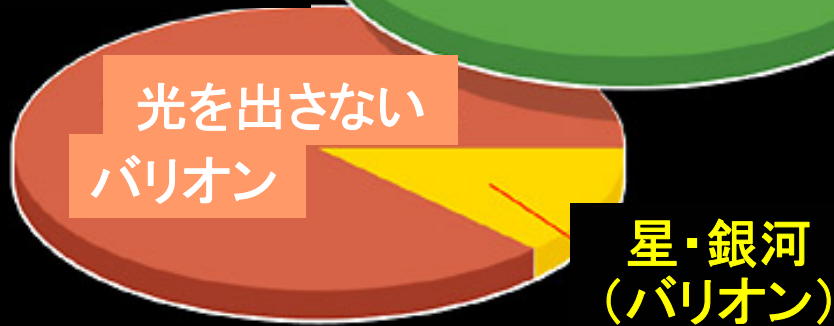
- 宇宙定数の自然な理論予想値(プランク密度)

$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 観測的推定値:  $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$       物理学史上最大の理論と観測の不一致!

# 宇宙の組成観 の変遷

1970年代



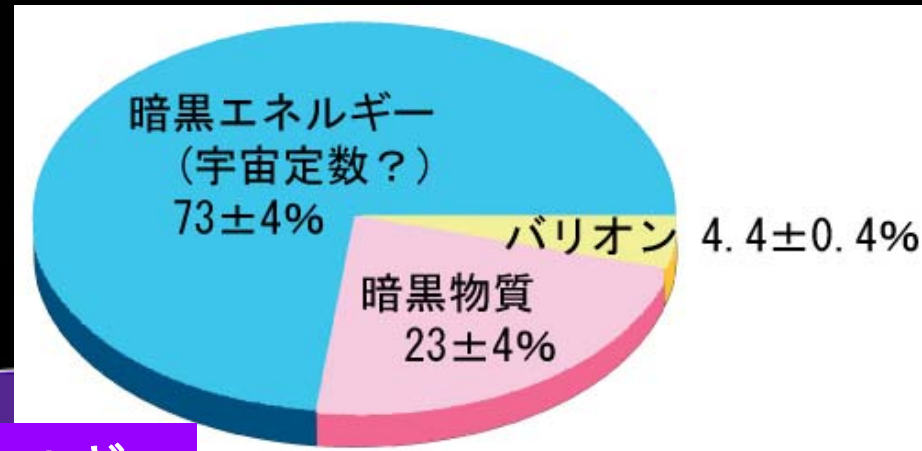
1980年代



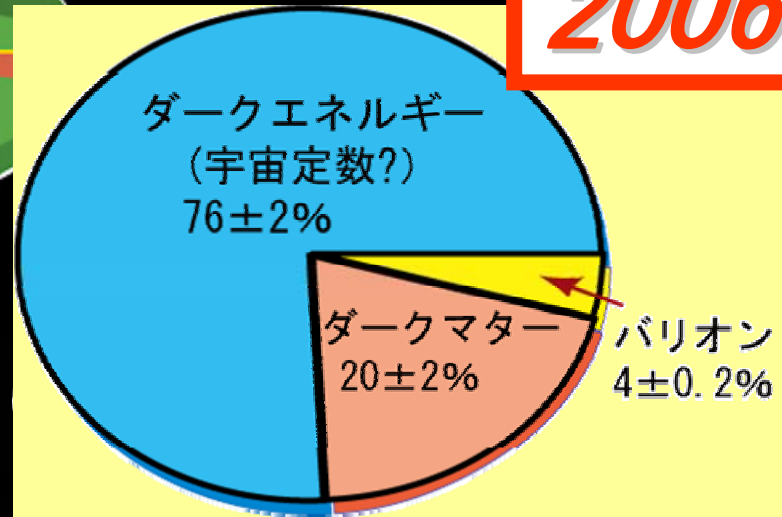
1990年代



2003年



2006年



# 宇宙観は本当に進歩したか？

古代エジプト



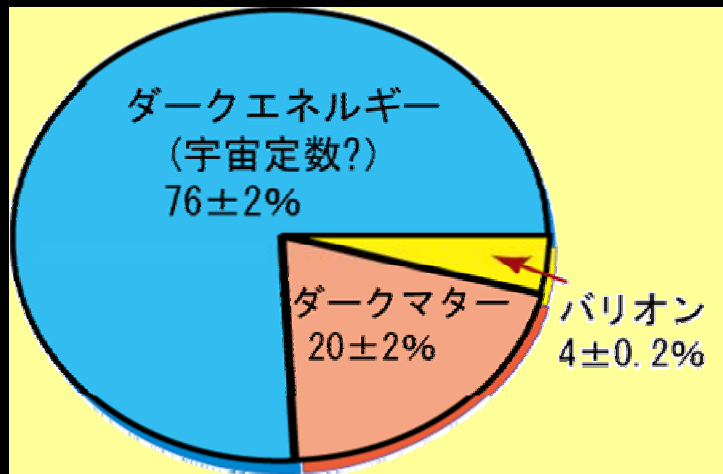
古代中国



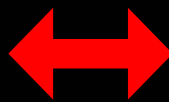
古代インド



2006年



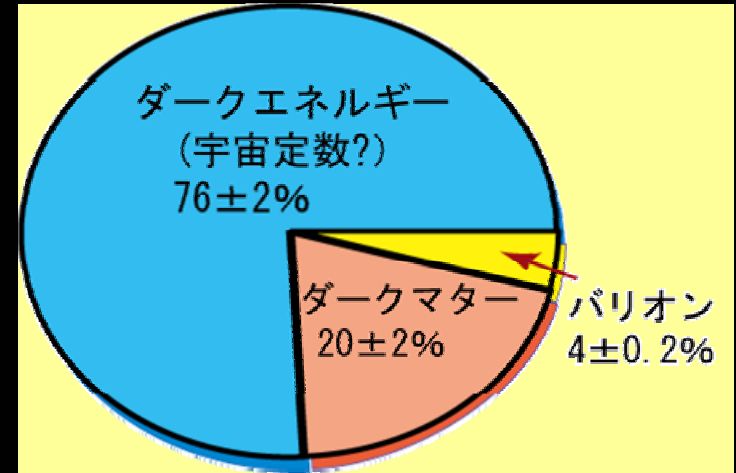
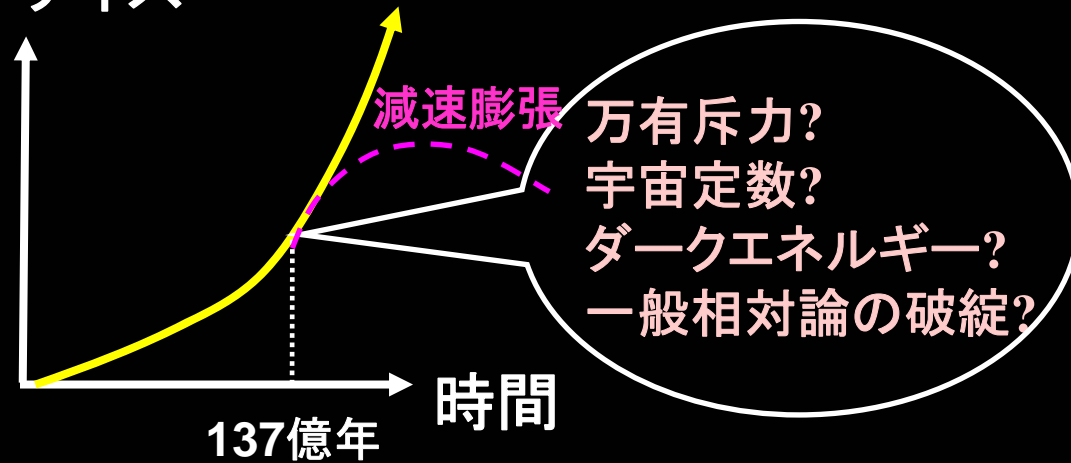
進歩？



# ダークエネルギーと21世紀の物理

宇宙の  
サイズ

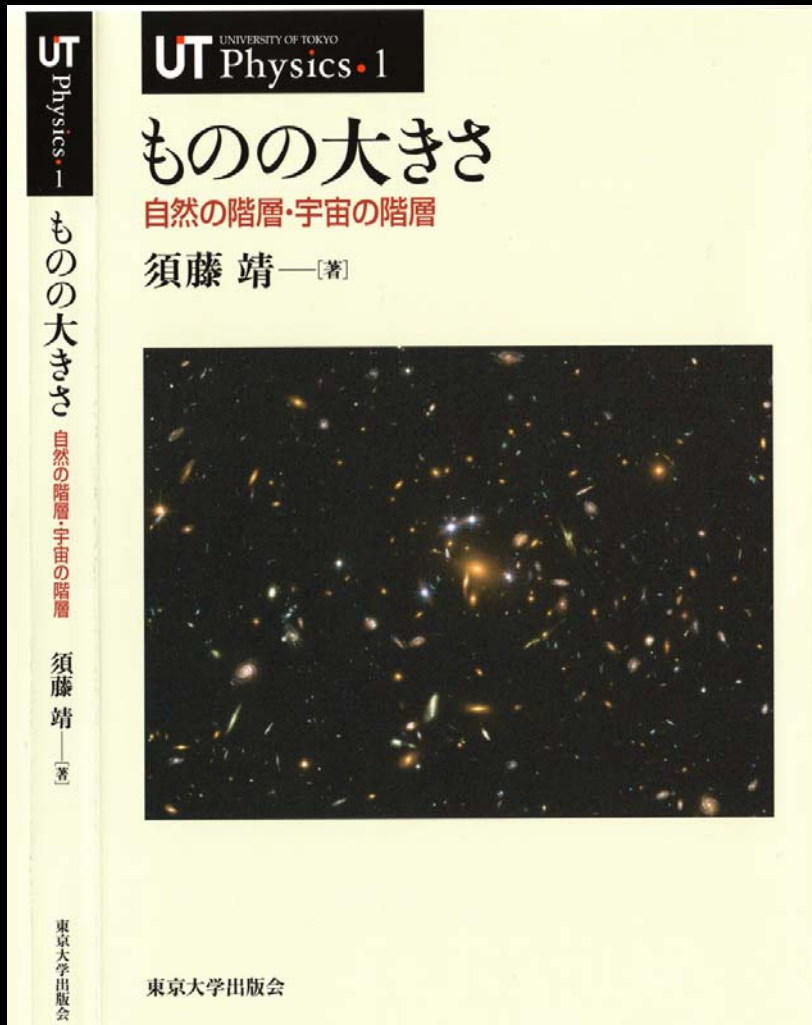
宇宙の加速膨張



- **宇宙の加速膨張の原因は何か?**
  - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
    - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
    - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
  - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- **いずれであろうと21世紀の物理学を切り拓く鍵**



# コマーシャル(要注意)！ UT Physics1 ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層



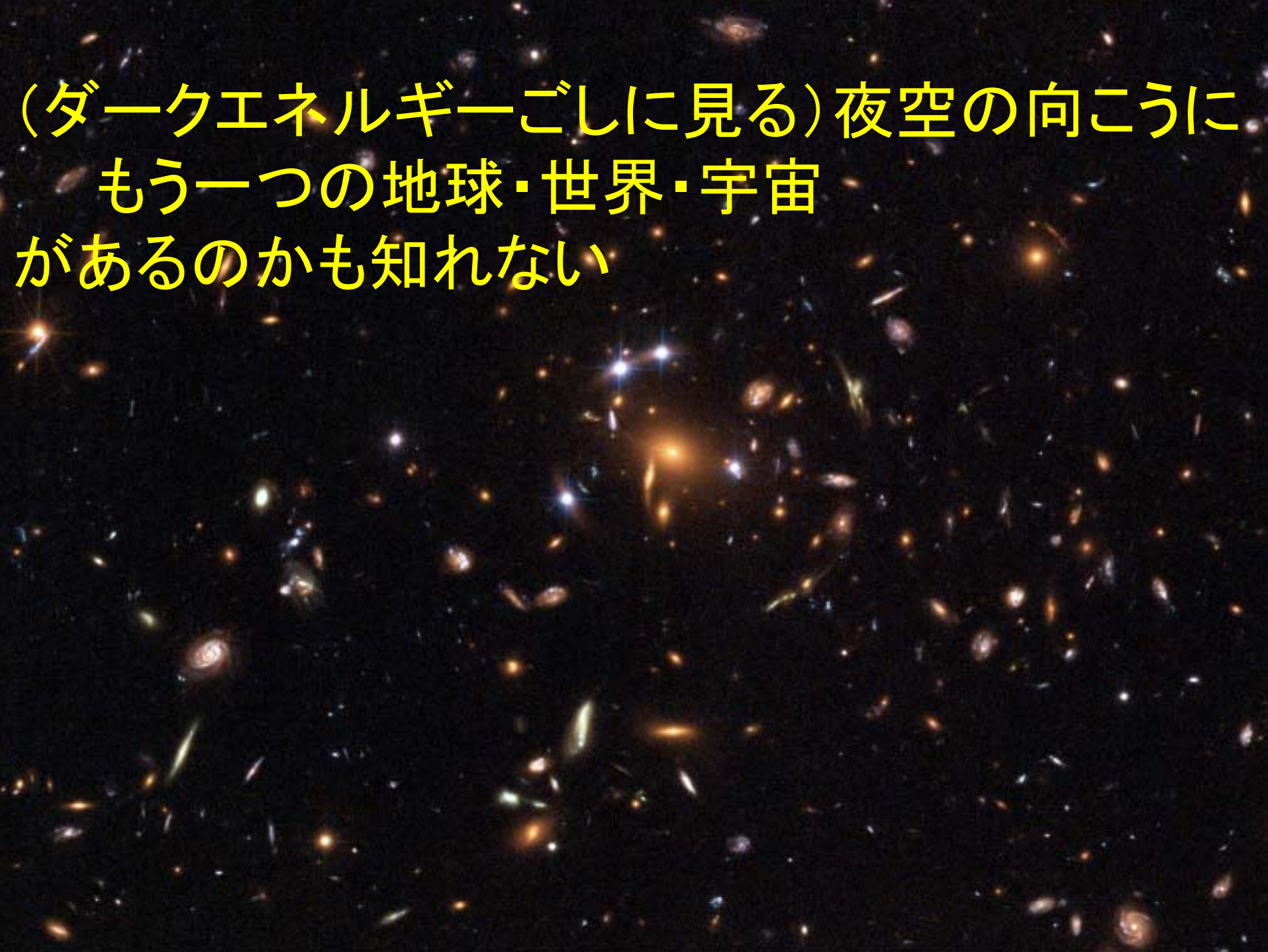
- 2006年10月13日発売  
(東京大学出版会)
- 目次
  - 1 科学をする心
  - 2 微視的世界の階層
  - 3 宇宙の階層
  - 4 微視的世界と巨視的世界をつなぐ
  - 5 宇宙の組成
  - 6 人間原理
  - 7 宇宙論の進化
- 付録 大きな数と小さな数

この青空の向こうには  
無数の星々  
がきらめいている

実はこの星空のいたるところに  
ダークマター  
ダークエネルギー  
が満ちている



(ダークエネルギーごしに見る)夜空の向こうに  
もう一つの地球・世界・宇宙  
があるのかも知れない



# 今夜は空を見上げてみてください



こと座 (ベガ)

わし座 (アルタイル)



<http://www.astroarts.co.jp/special/tanabata2006>