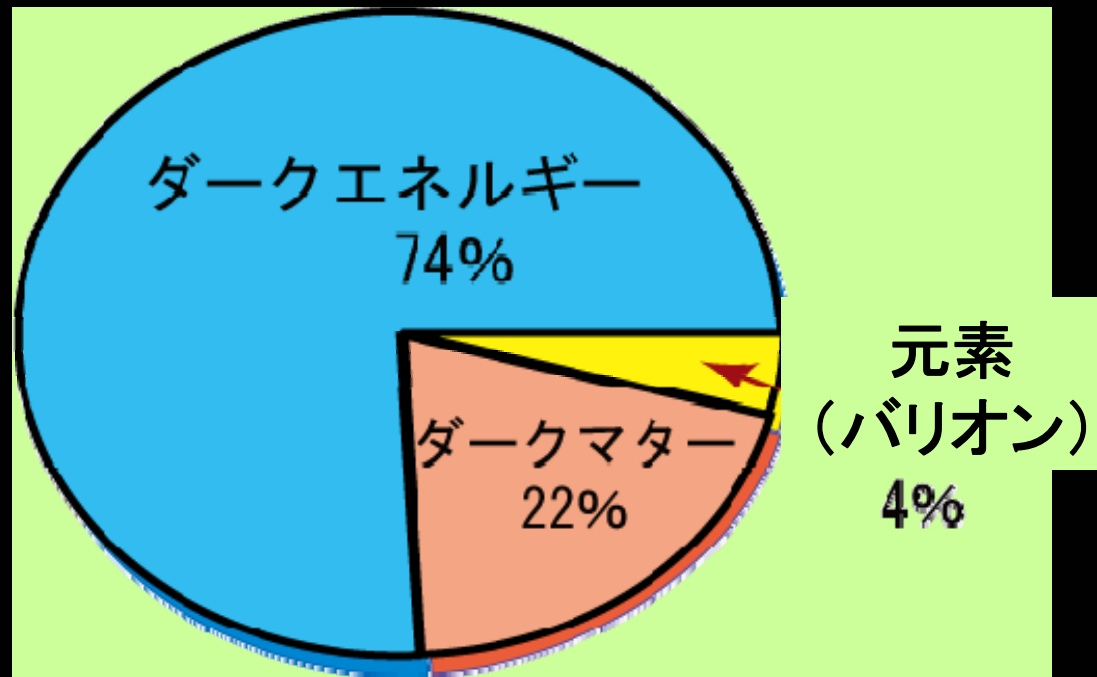
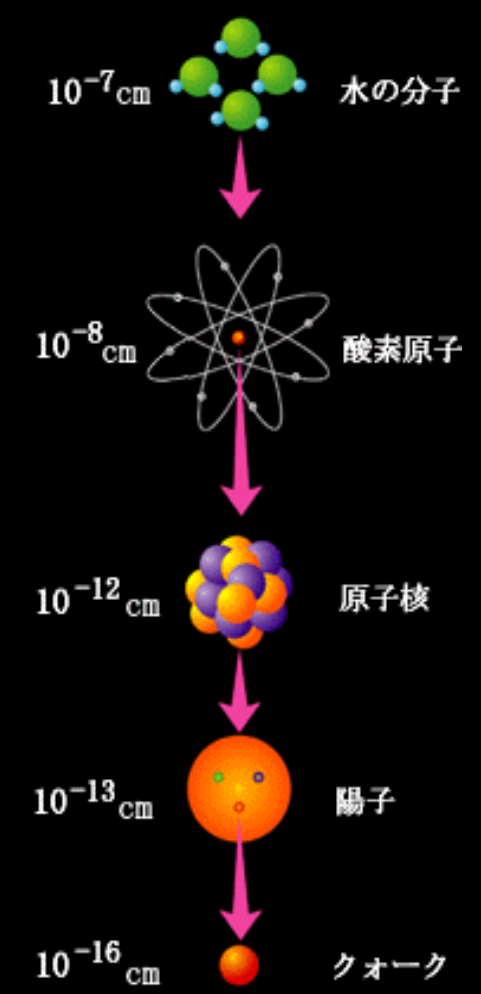
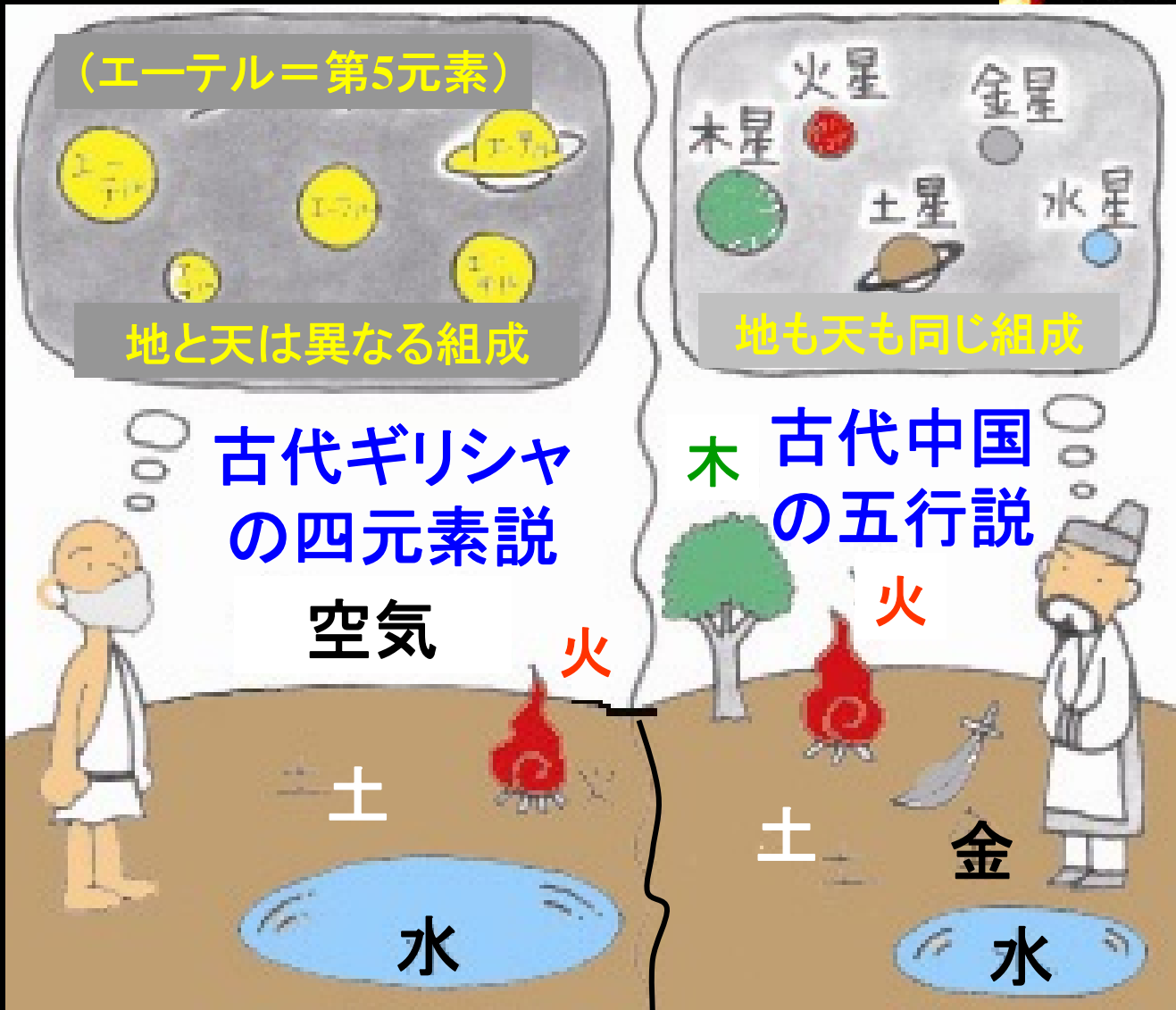


# IV 宇宙の組成

～宇宙の主成分:ダークマターと  
ダークエネルギー～



# 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)

# ものは何からできているのだろうか？

## ■ 古代ギリシャの4元説

- 空気、土、火、水

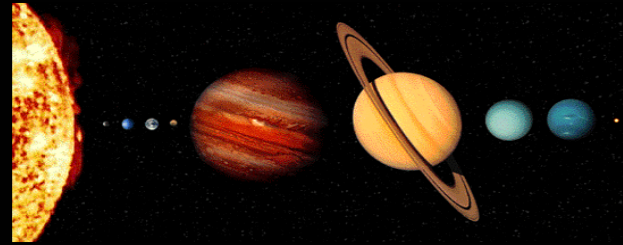
## ■ 中国の五行説

- (木、火、土、金、水)  
× (陽、陰)

- これが日本で用いられている惑星と曜日の名前の由来

## ■ 現代物理学

- 分子⇒原子⇒原子核(陽子・中性子)⇒素粒子(電子、ニュートリノ、クォーク・レプトン)



日月火水木金土

	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

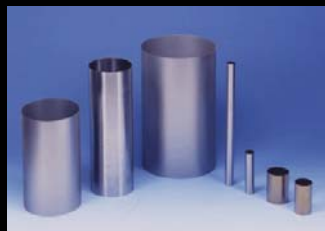
# 五行説：古代中国の素粒子論



水



木



金



土



火



北京 天壇にて

# 物質を構成しているもの

クォークからなる複合粒子＝バリオン(普通の元素)



原子核

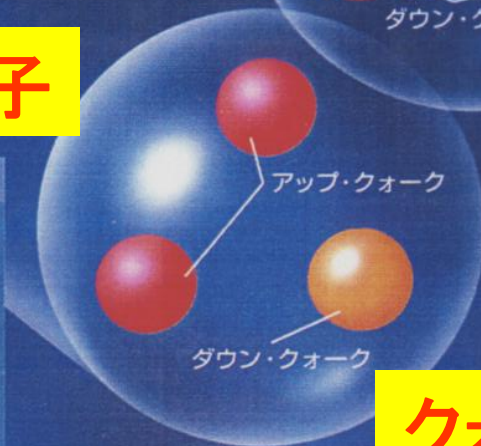
中性子

陽子









原子

中性子

陽子



クォーク

	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミュー・ニュートリノ	 タウ・ニュートリノ
	 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子
クォーク	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
	 アップ	 チャーム	 トップ

原子核の周囲を電子がまわって原子をつくる。原子核は陽子と中性子から、陽子と中性子はアップ・クォークとダウン・クォークから構成されている。第2世代と第3世代のクォークとレプトンは、粒子加速器を用いるなどして、高エネルギー状態にならないとあらわれない。われわれの世界の物質は第1世代のクォークとレプトンからできているといえる。

# 世界は何からできている？

- **微視的世界：物質は何からできているのか？**
  - 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か？**
  - 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
  - 宇宙は、我々が知っている元素だけからできているのか？
- **20世紀天文学観測の予想外の大発見**
  - 宇宙には大量のダークマターが存在
  - 実はさらに大量のダークエネルギーが存在
  - 宇宙はダーク成分に支配されている

# 宇宙のダークマター

- 光り輝く天体は、光ることのない大量のダークマターに包まれている
- **ダークマターの存在は、その周囲を通過する光の軌道を変化させる(重力レンズ効果)**
  - アインシュタインの一般相対論にもとづく重力レンズ効果を利用してその存在が確認済み
- ダークマターは、未発見の素粒子であると考えられている(天文学による微視的世界の発見)

# 重カレンズ



Zürich. 14. I. 13.

Aus  
Hoch geehrtes Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.

$\downarrow$  Grav. Feld       $\rightarrow$  Lichtstrahl

Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung  $0,84^\circ$  betragen und wie  $\frac{1}{R}$  abnehmen (R = Sonnenradius - Mittelpunkt)

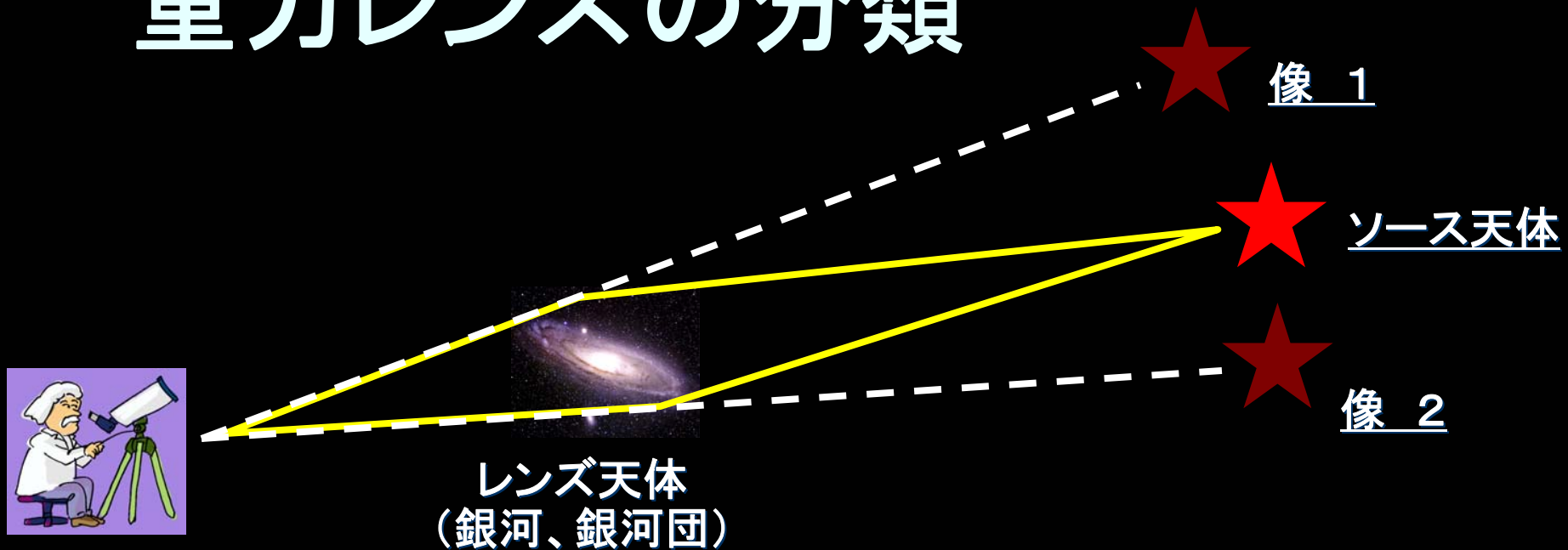
-----  $0,84^\circ$  -----

☉ Sonne

Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnen-nähe gewisse Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.



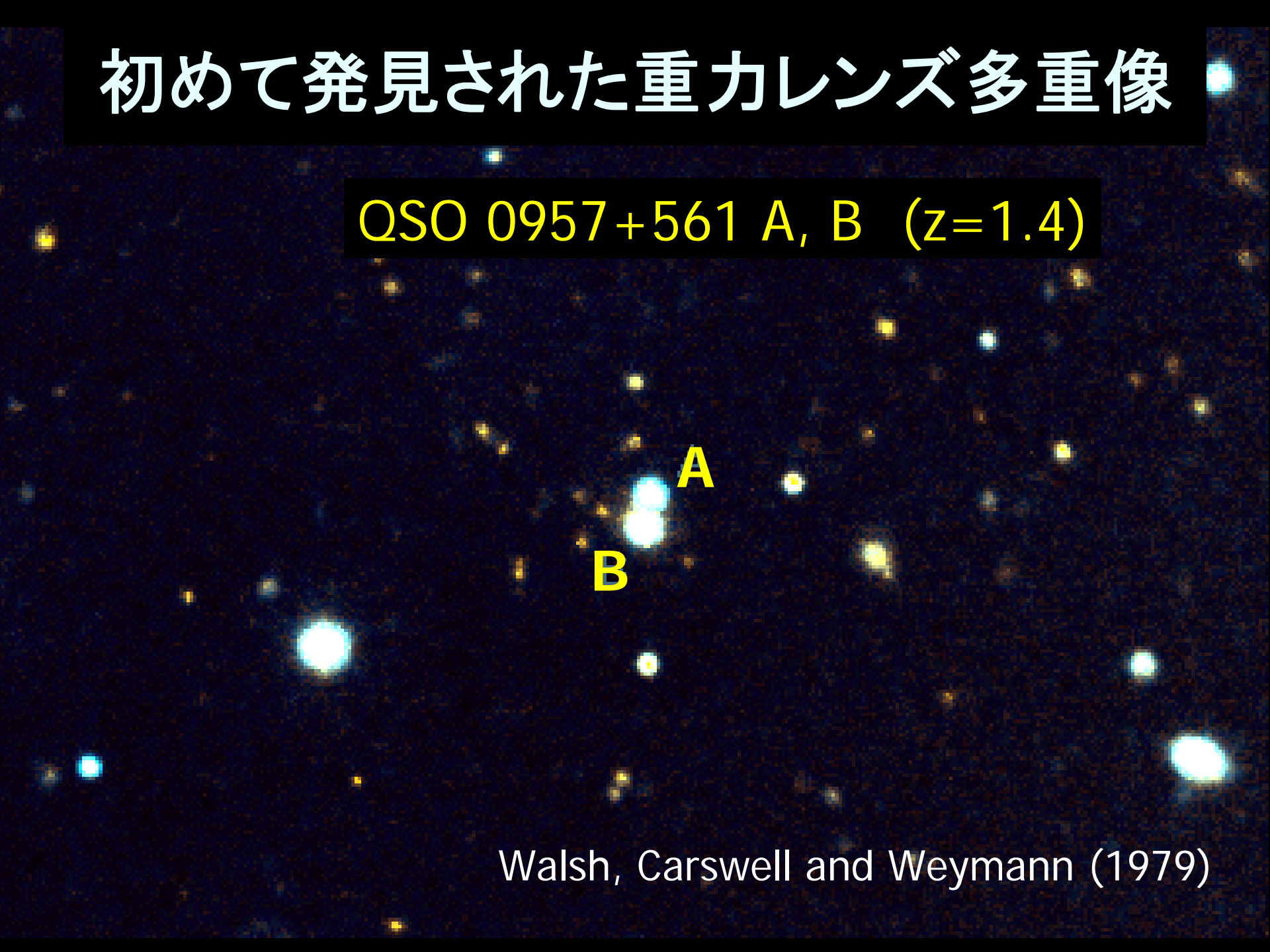
# 重力レンズの分類



- 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)

# 初めて発見された重力レンズ多重像

QSO 0957+561 A, B ( $z=1.4$ )

The image shows a field of stars and galaxies. Two specific points of light are highlighted with yellow labels 'A' and 'B'. Image A is located at approximately [466, 530, 515, 565] and image B is at [575, 465, 622, 495]. Both images appear as bright, slightly blurred spots of light. The background is a dark blue/black space filled with numerous other stars and galaxies of varying brightness and colors.

A

B

Walsh, Carswell and Weymann (1979)

# ハッブル宇宙望遠鏡でみる重力レンズ



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)

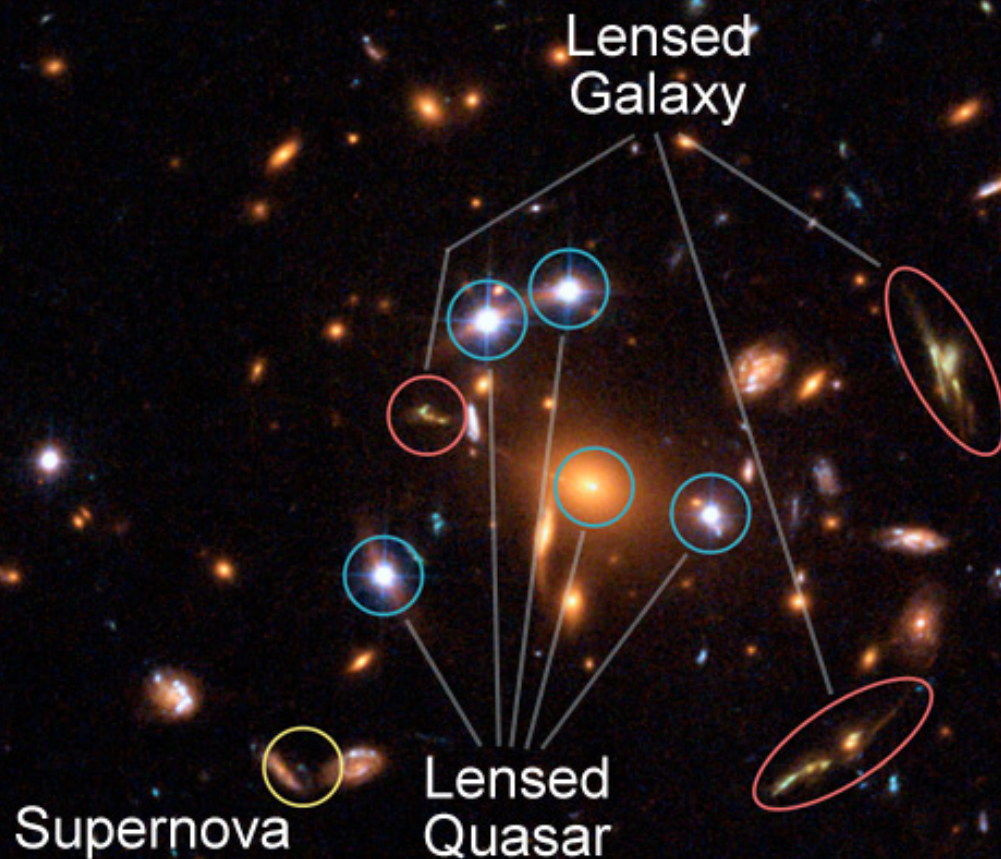
62億光年先にある  
銀河団まわりの  
ダークマター



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

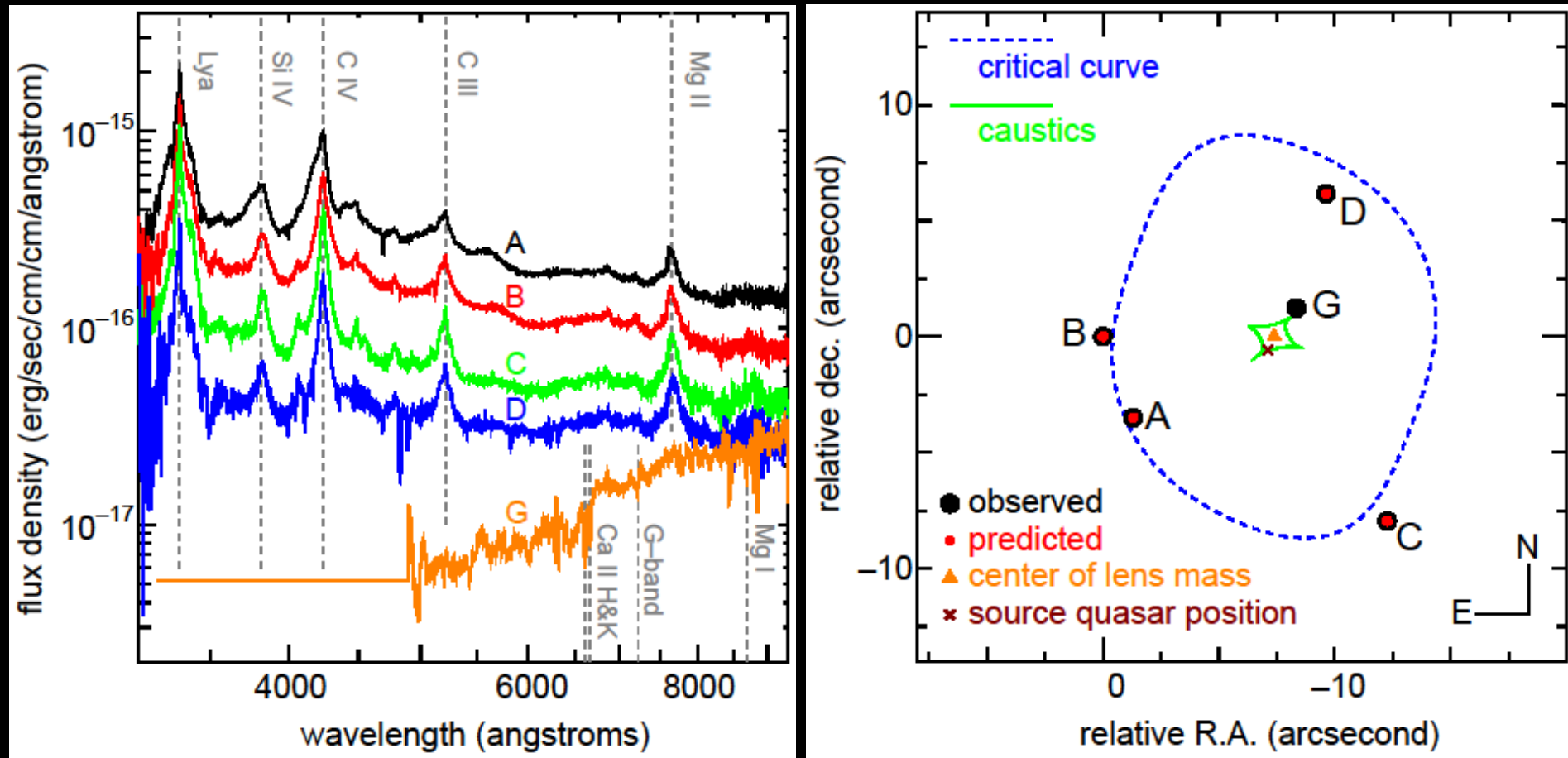


Galaxy Cluster SDSS J1004+4112  
HST ACS/WFC



10"

# SDSSJ1004: スペクトルとレンズモデル



Inada et al. Nature 426 (2003) 810

# 一般相對論的蟹氣樓



# 宇宙を満たしているもの

- ダークマターは、光は出さないが互いに万有引力を及ぼすので空間的には凸凹分布
  - 銀河や銀河団はそのようなダークマターの塊の中心部に誕生
- ダークマターの存在は、光っているものだけが世界のすべてではないことを教えてくれる
- では、宇宙空間を完全に一様に満たすような成分(ダークエネルギー)は存在しないのか？
  - そもそもそのようなものがあっても観測できるのか？



# 一様なものをなぜ観測できる？

- 一般にもものの検出は差分観測（≠絶対観測）
  - 天体：暗いところと光っているところの差
  - ダークマター：空間的な非一様性を天体をトレーサーとして力学的に検出
- もしもダークエネルギーが空間を完全に一様に満たしているとする、その検出には絶対観測が必要？
  - 時間領域での差分観測をすればよい
  - 宇宙膨張、宇宙の構造進化など観測量の時間進化を通じてダークエネルギーの存在を読み取る

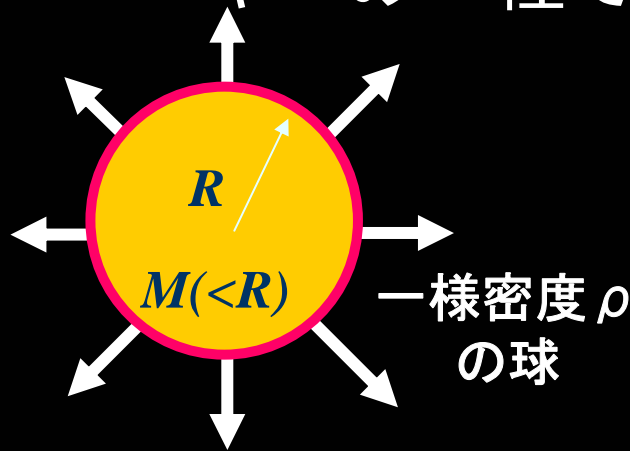
# 宇宙膨張の方程式

## ■ ニュートン力学による運動方程式

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

## ■ 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」( $\Lambda$ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

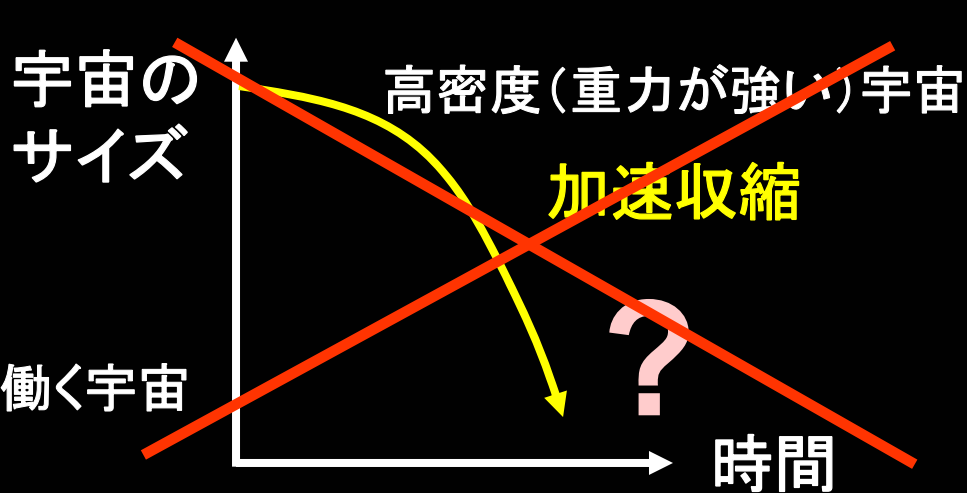
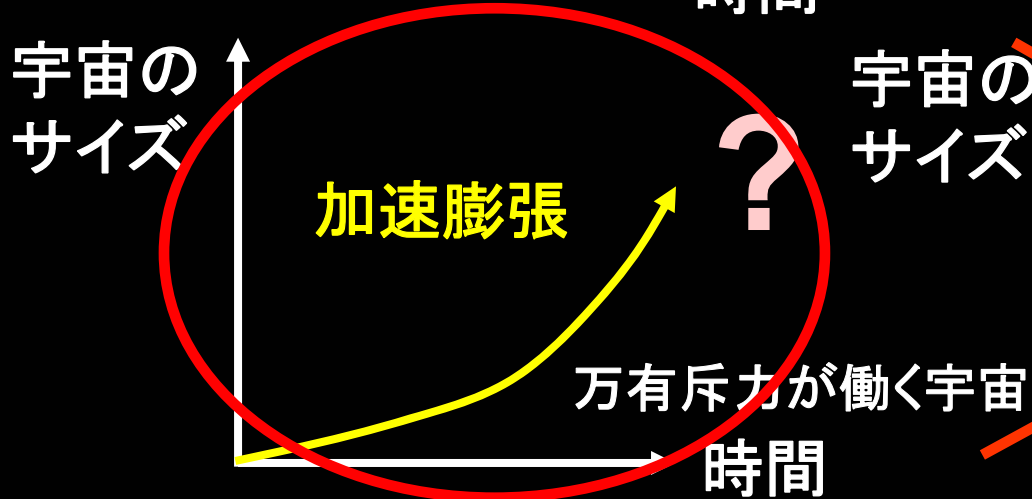
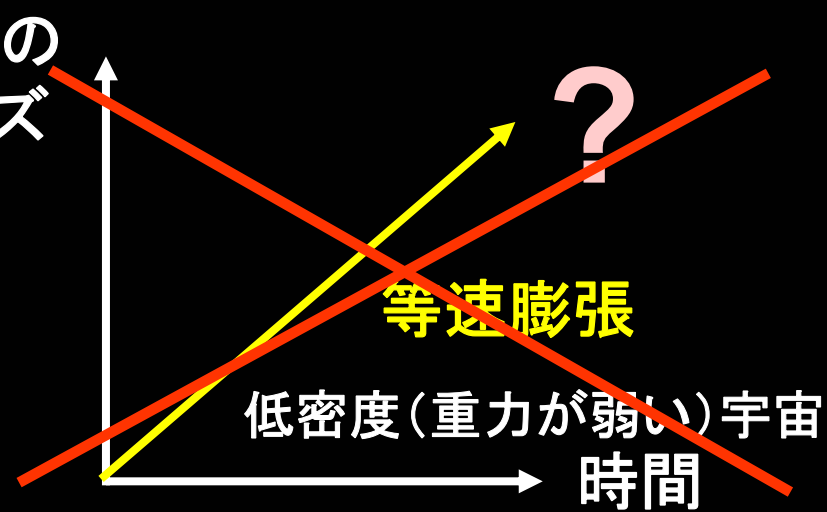
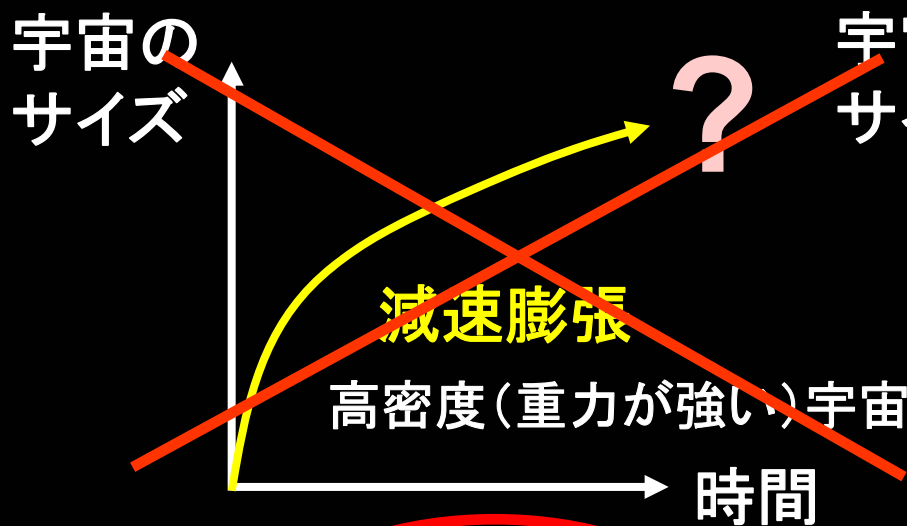


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

フリードマン方程式

# 宇宙の組成と宇宙膨張の未来

- 宇宙膨張の進化の観測を通じて、宇宙を一様に満たしている成分の存在が検出できる

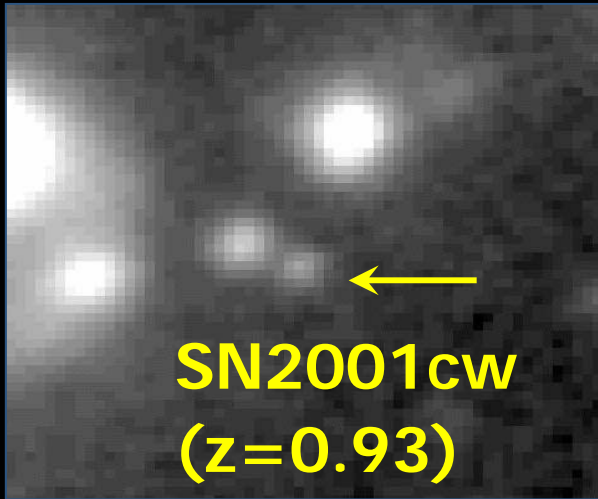


# 宇宙の標準光源(ろうそく): Ia型超新星

見かけの明るさ:  $F$

真の明るさ:  $L$

Ia型超新星



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

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$



# 宇宙の加速膨張とダークエネルギー

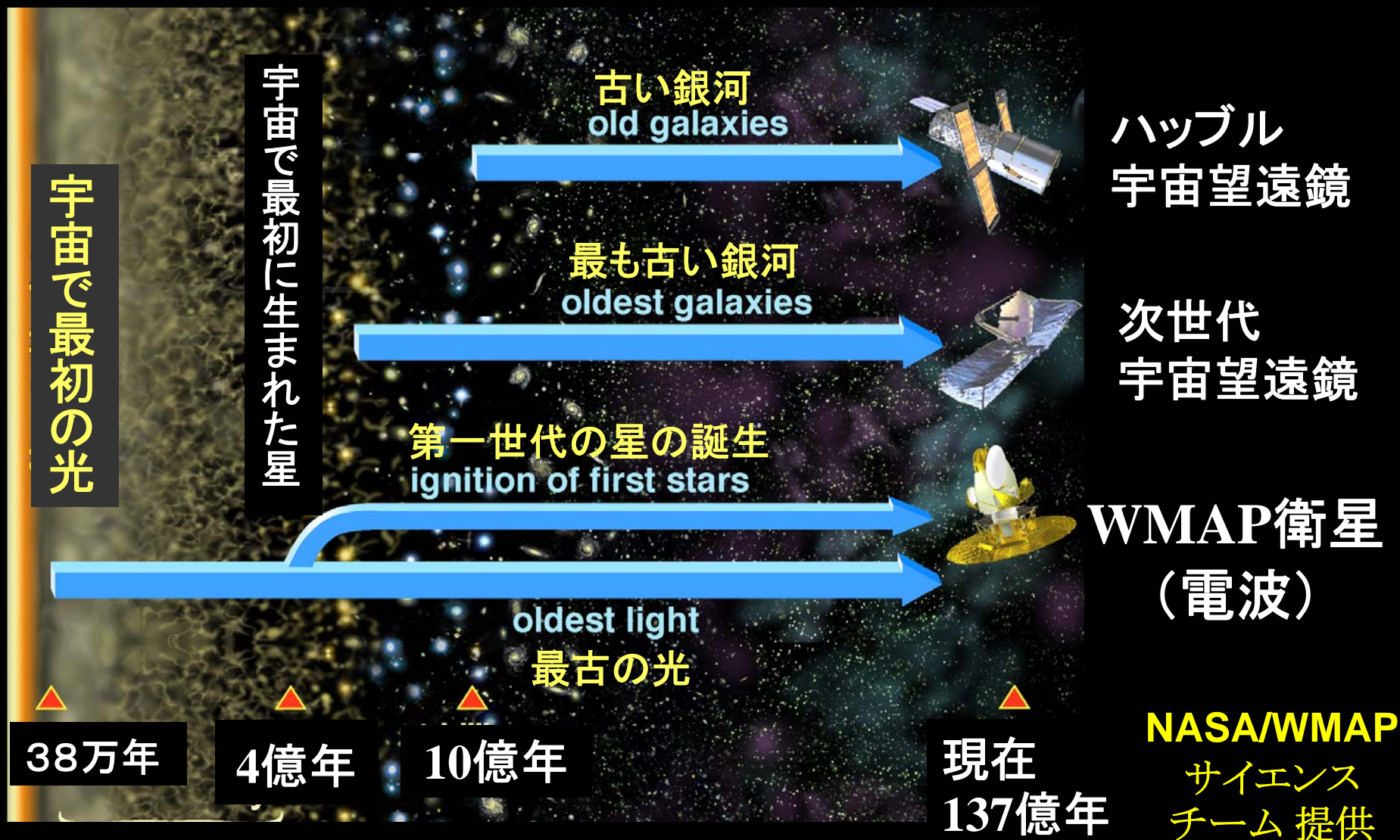
## ■ 宇宙の将来はどうなるか？

- 宇宙は膨張している（ハッブルの法則、1929年）
- さらに時間軸に沿った精密な観測をすることで膨張の加速度の符号がわかる
- 重力は常に引力なので当然減速するはず？
- しかし宇宙は「加速膨張」していた！（1998年）

## ■ 引力である重力を打ち消すことが必要

- 普通の物質ではあり得ない、つまり非常識な結果
- 万有斥力を及ぼす奇妙な実体（ダークエネルギー）??

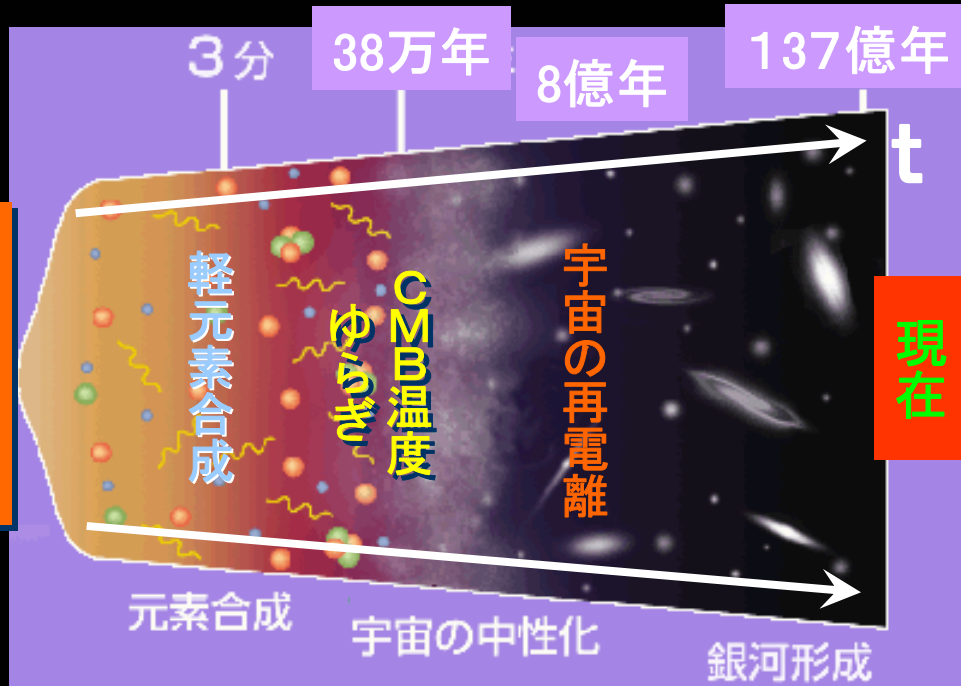
# 衛星によってさらに過去の宇宙を探る



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

# 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

軽元素合成

CMB温度ゆらぎ

CMB温度

宇宙の再電離

現在

元素合成

宇宙の中性化

銀河形成

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

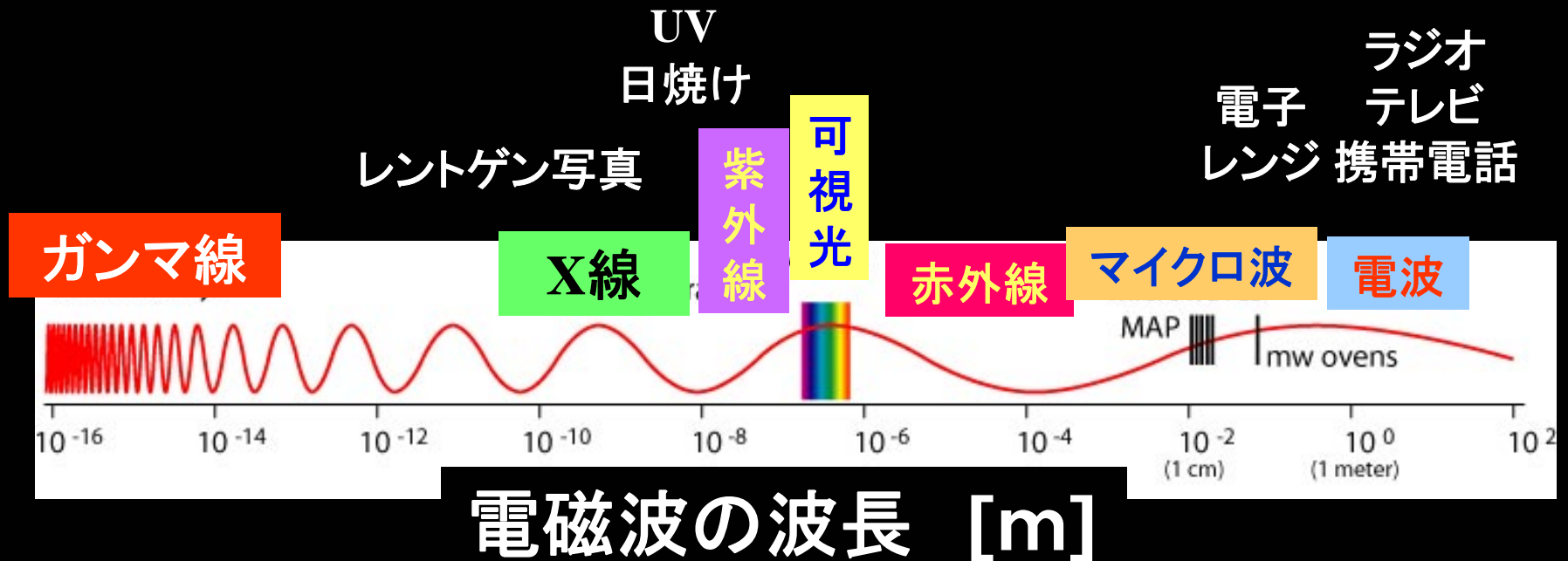
銀河団の形成

宇宙の大構造

# マイクロ波とは？：電磁波の名前と波長

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である。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代の天文学ではこれらすべての波長を駆使した観測を行っている。

マイクロ波は、波長1mm(300GHz)から1m(300MHz)の領域で極超短波とも呼ばれる。電波望遠鏡は主としてこの波長域を利用する。

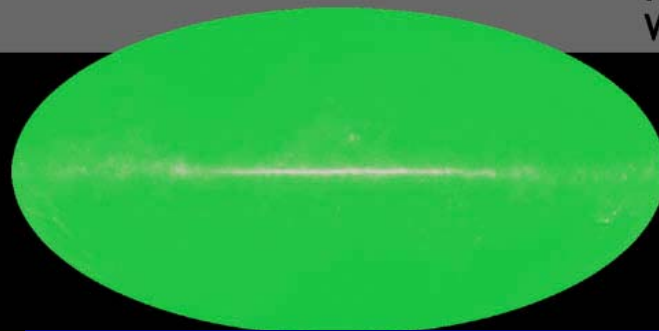
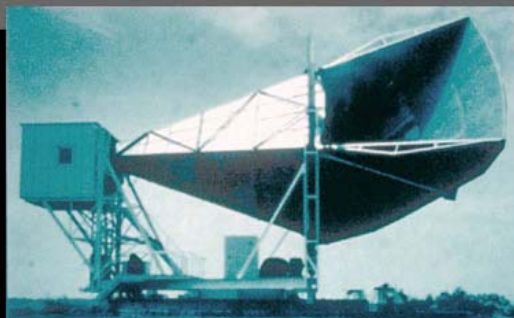




# CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

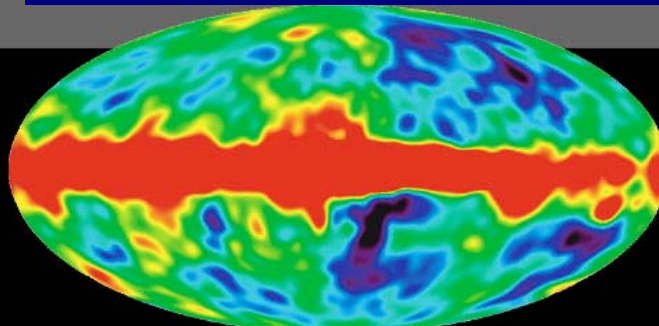
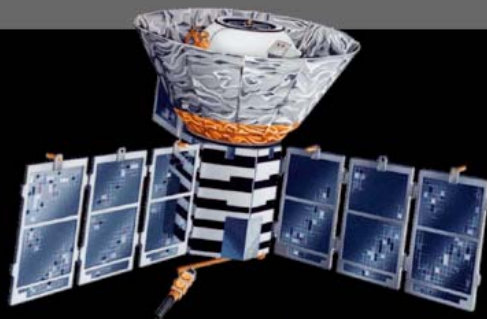
1965

Penzias and  
Wilson



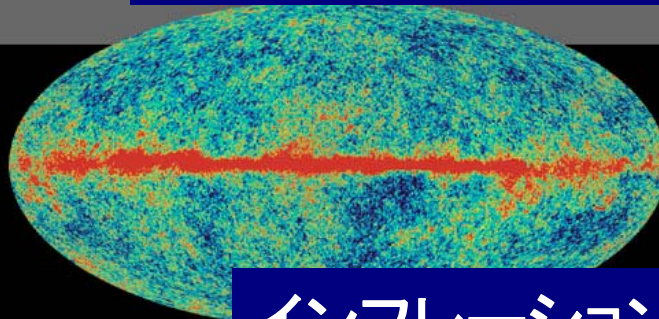
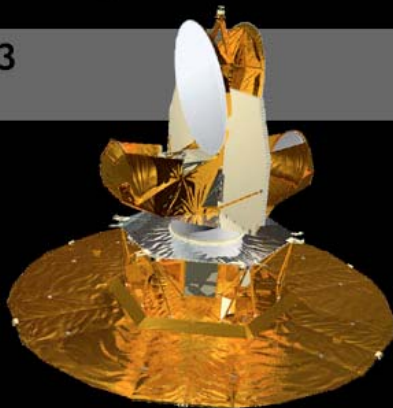
CMBの発見・宇宙の等方性

1992



10万分の1の非等方性発見

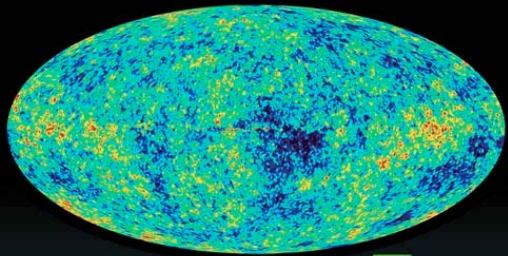
2003



インフレーション理論の検証

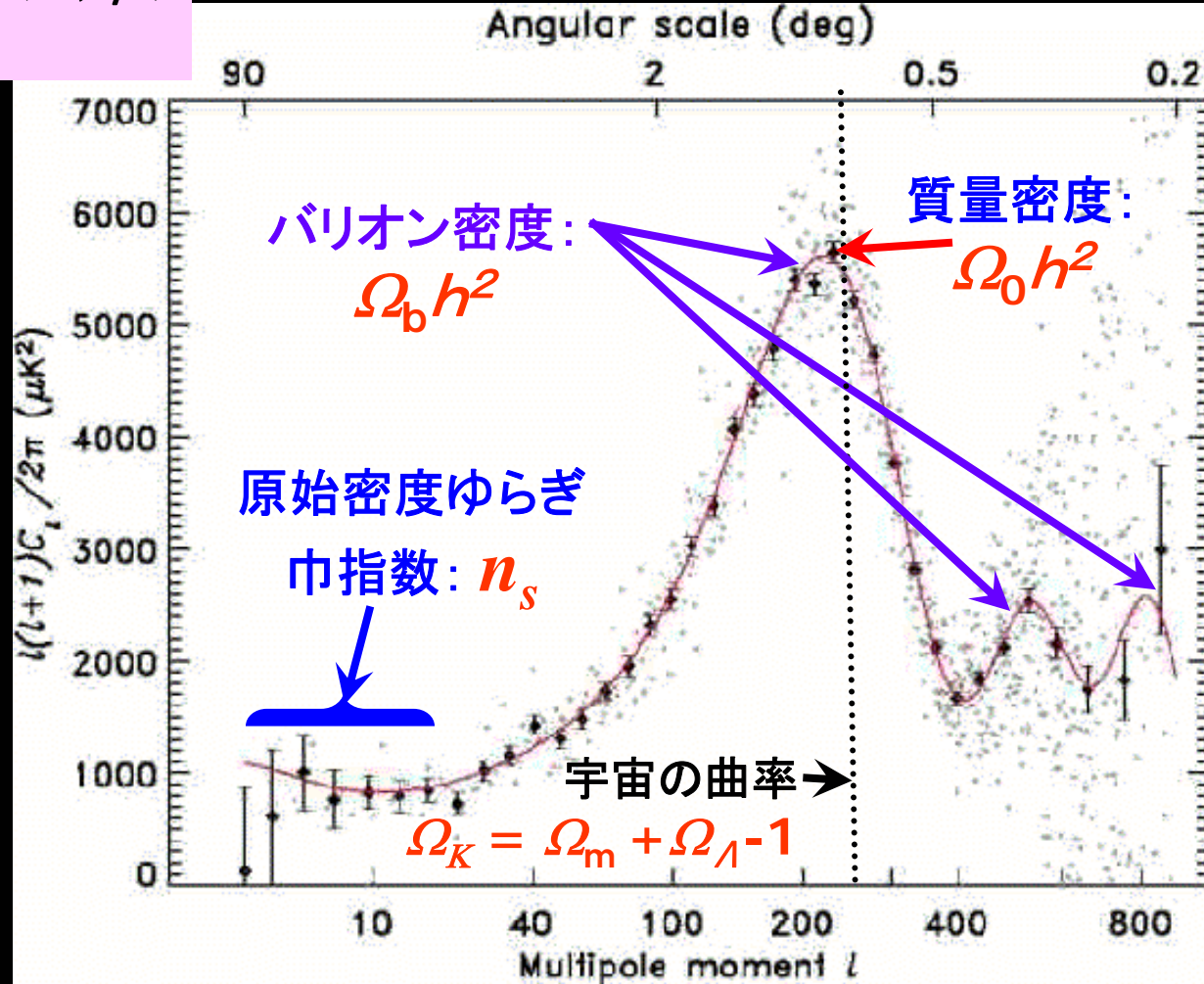
# WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

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



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

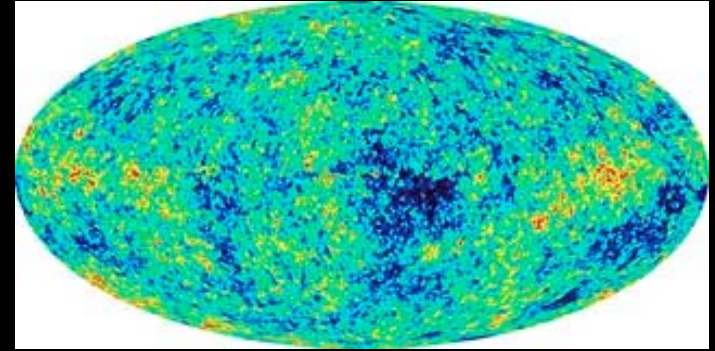
Spergel et al.  
ApJS 148(2003)175



# 137億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

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

## ■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

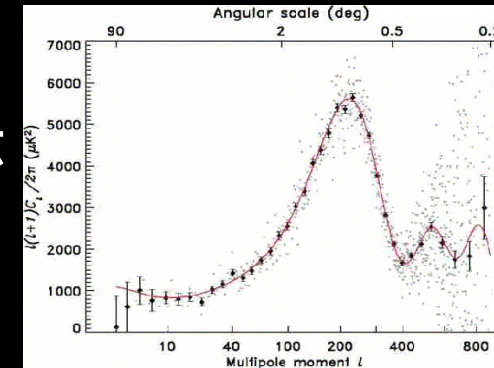
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

## ■ この古文書の意味を理解するための文法

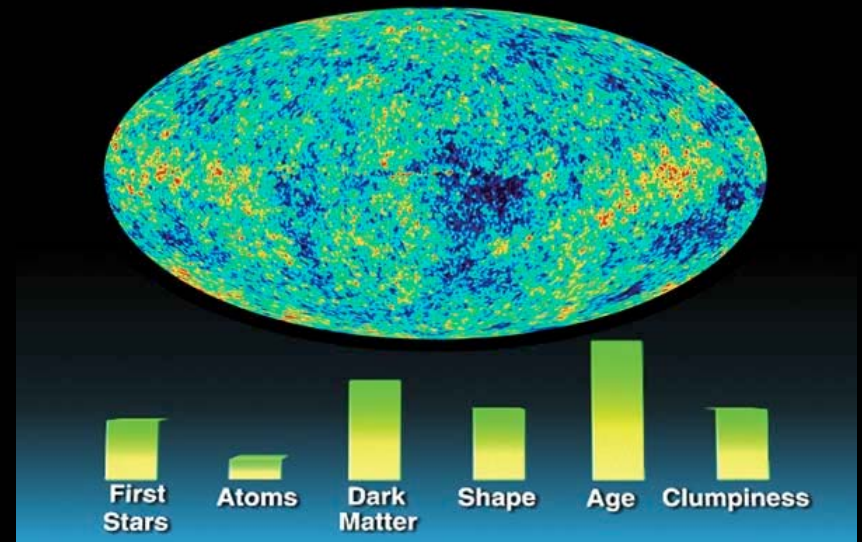
- 冷たい暗黒物質モデルの理論予言

## ■ 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、、、



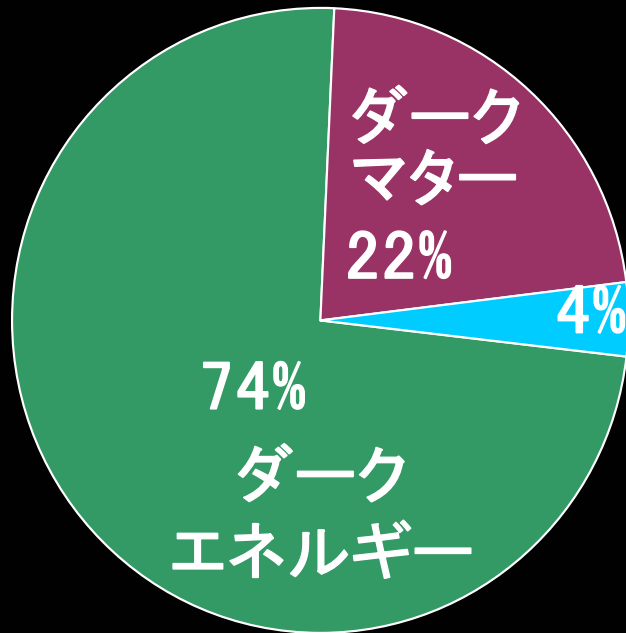
# 宇宙の古文書が 教えてくれたこと



- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて4億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「ダークマター」
- 実はさらに、「ダークエネルギー」が宇宙を支配

# 宇宙は何からできている？

## 宇宙の組成



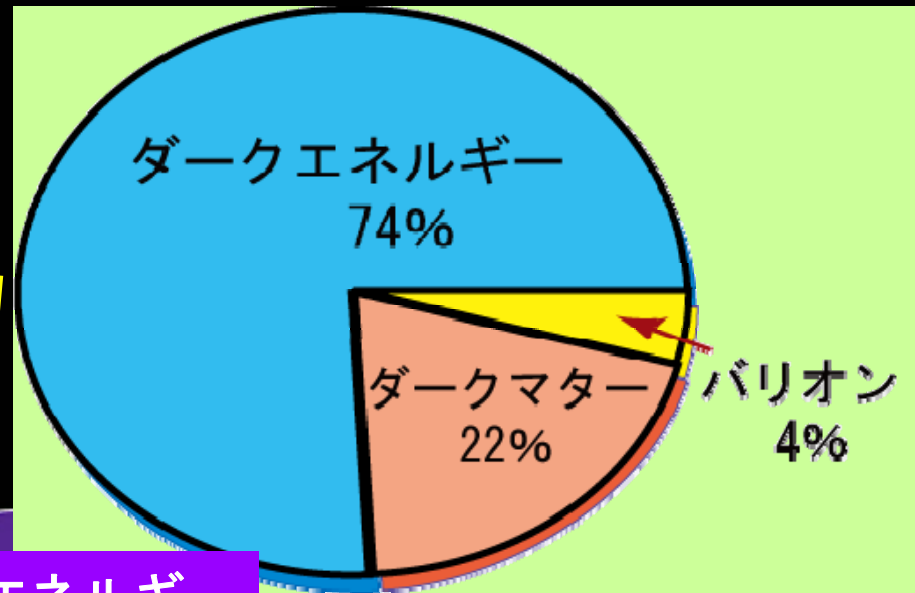
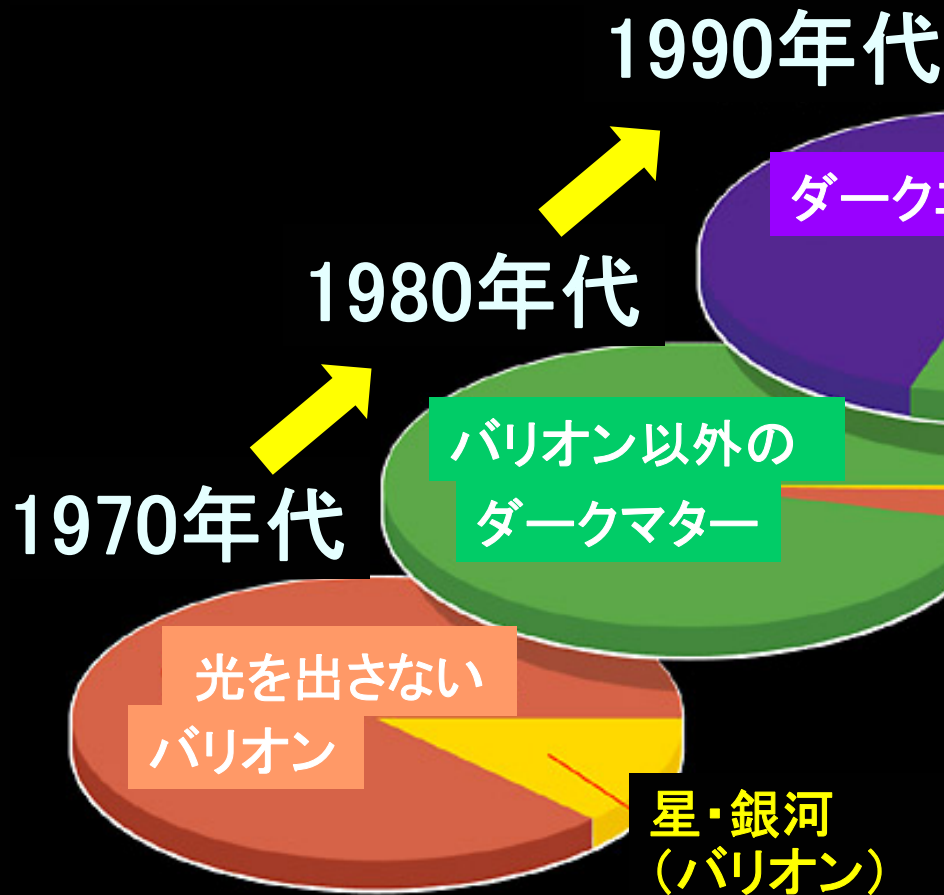
- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量
- 未知の素粒子が正体？

## 通常物質(元素)

- 現時点で知られている物質は実質的にはすべて元素(陽子と中性子)からなる

- 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しないが、宇宙の主成分

# 宇宙の組成観 の変遷

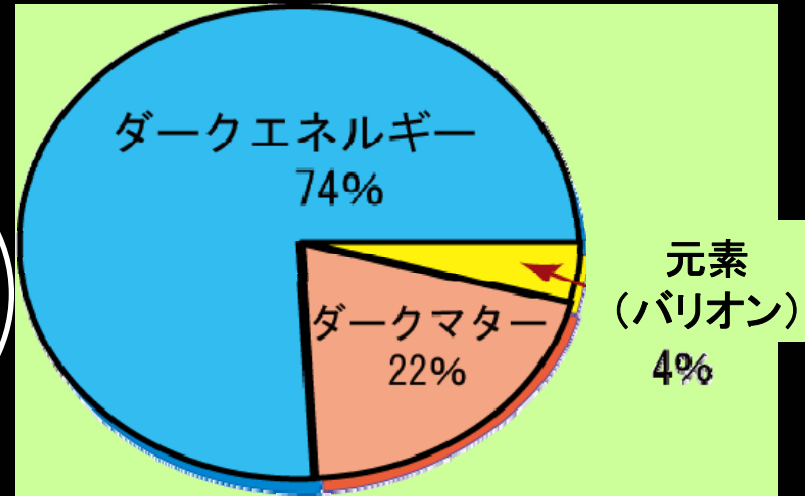
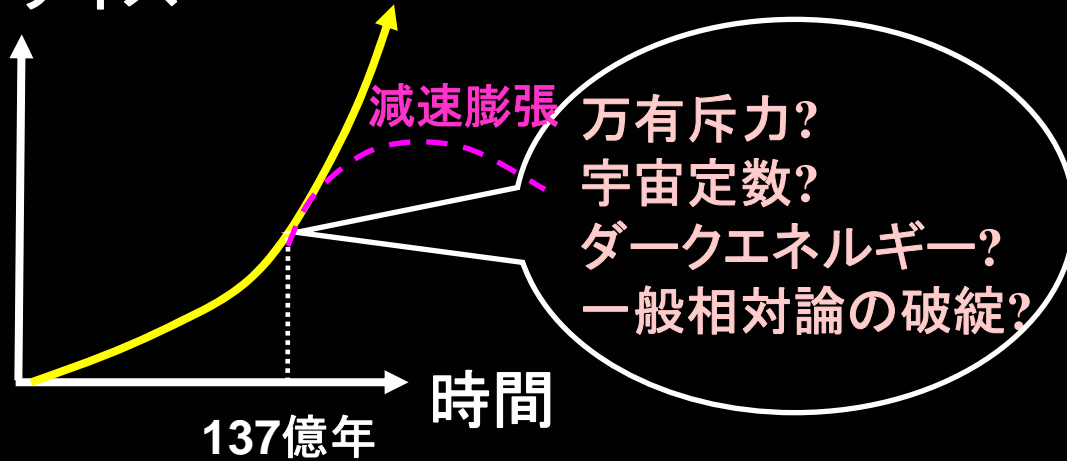


- **重力レンズ**:ダークマター
- **超新星**:ダークエネルギー
- **マイクロ波背景放射**:  
ダークマター、ダークエネルギー

# 宇宙の組成とダークエネルギー

宇宙の  
サイズ

宇宙の加速膨張



- **ダークエネルギーの正体は何か?**
  - 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世紀の科学を切り拓く鍵**