

国立天文台提供 すばる望遠鏡 画像

# 宇宙の果てから太陽系外惑星へ

2004年9月27日：高知市民科学講演会

東京大学大学院理学系研究科

物理学専攻 須藤 靖

# 遠くの世界はどうなっているのだろうか？

## ■ 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



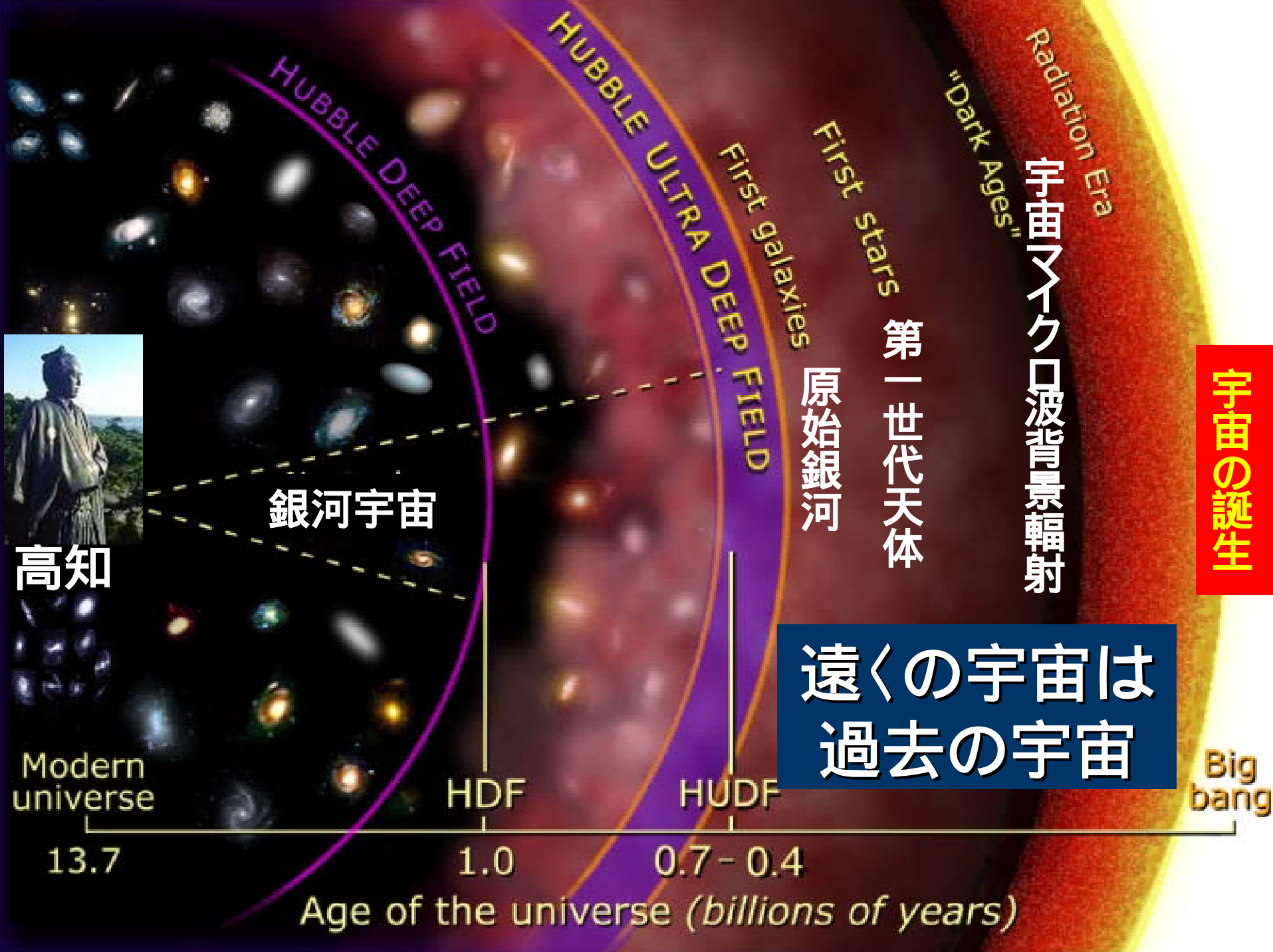
古代インドの宇宙像(象)



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

## ■ 第二の地球はあるか？

- 我々人類は広い宇宙でひとりぼっちなのか？

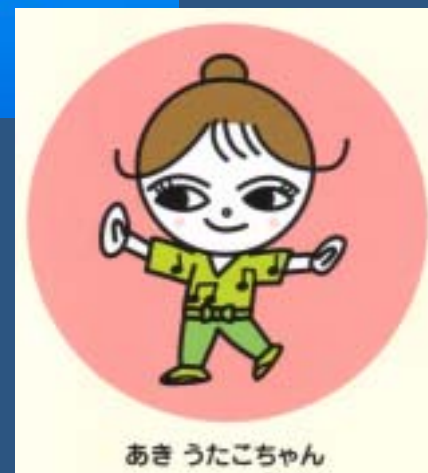


# RKCホールから安芸へ



光で0.1ミリ秒

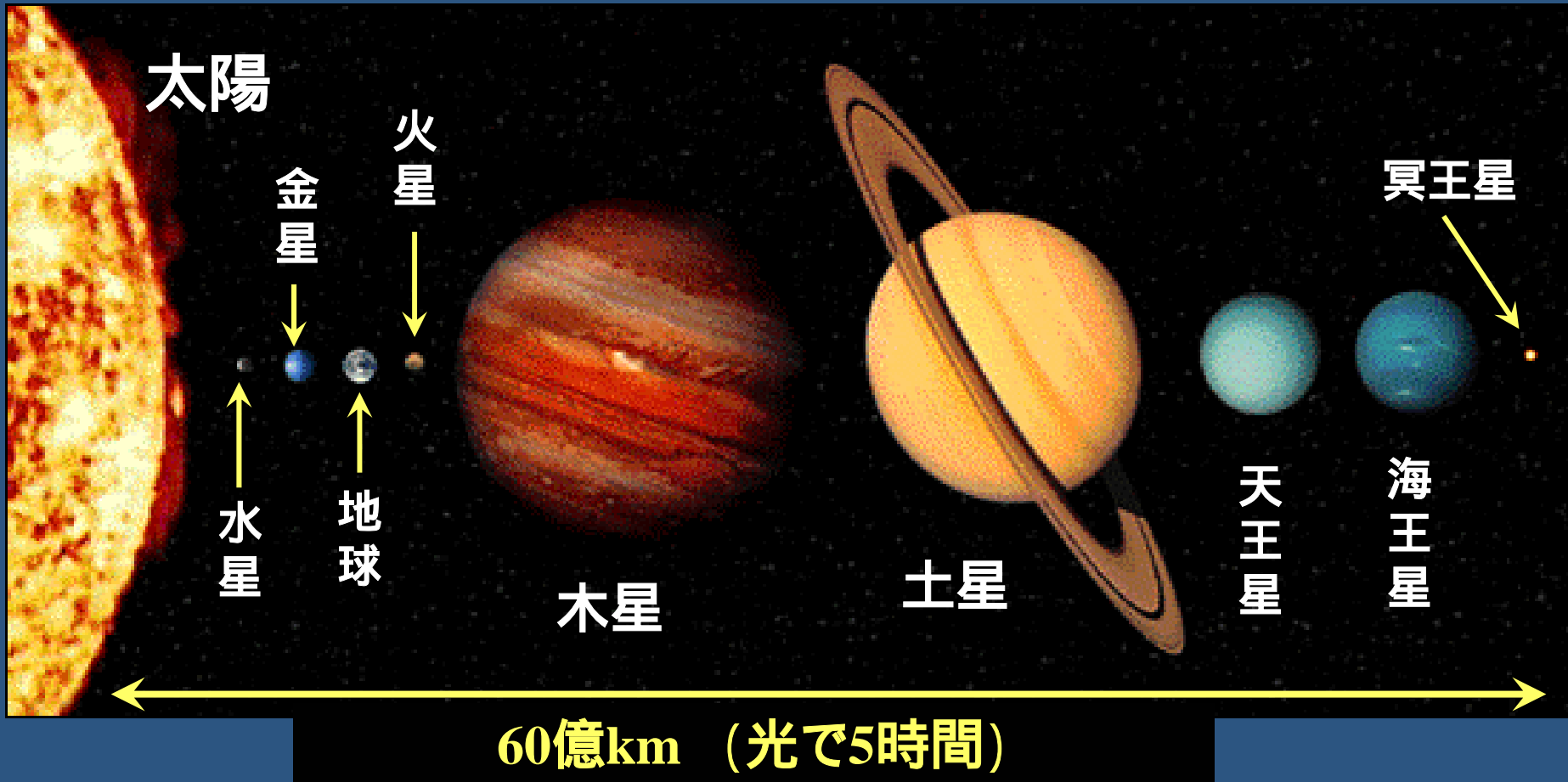
(ごめん・なはり線で1時間)



土佐中学校・高等学校



# 九つの惑星：我が太陽系

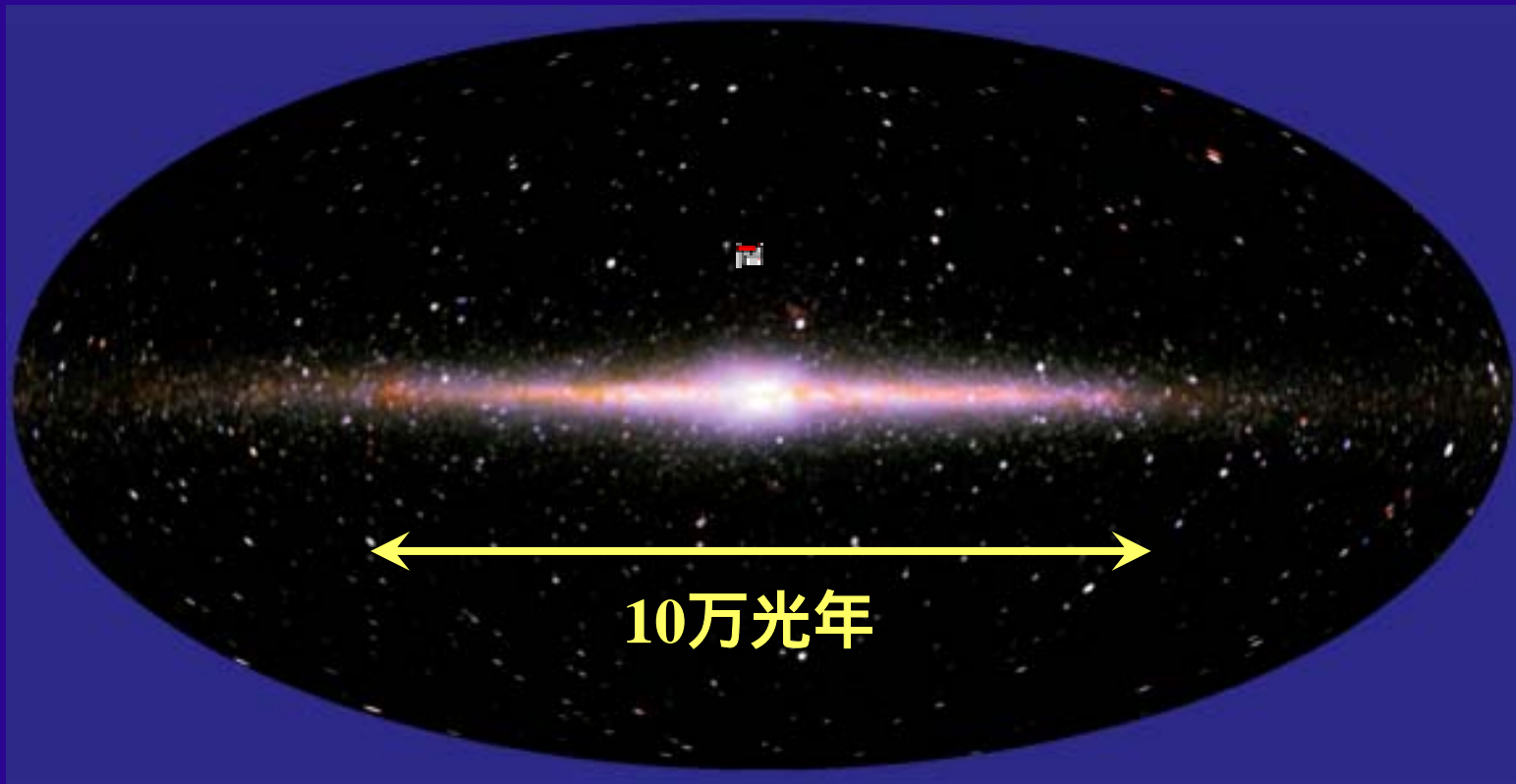


(太陽からの距離は別として、惑星の相対的な大きさはほぼ実際の比の通り)

<http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm> © Calvin J. Hamilton

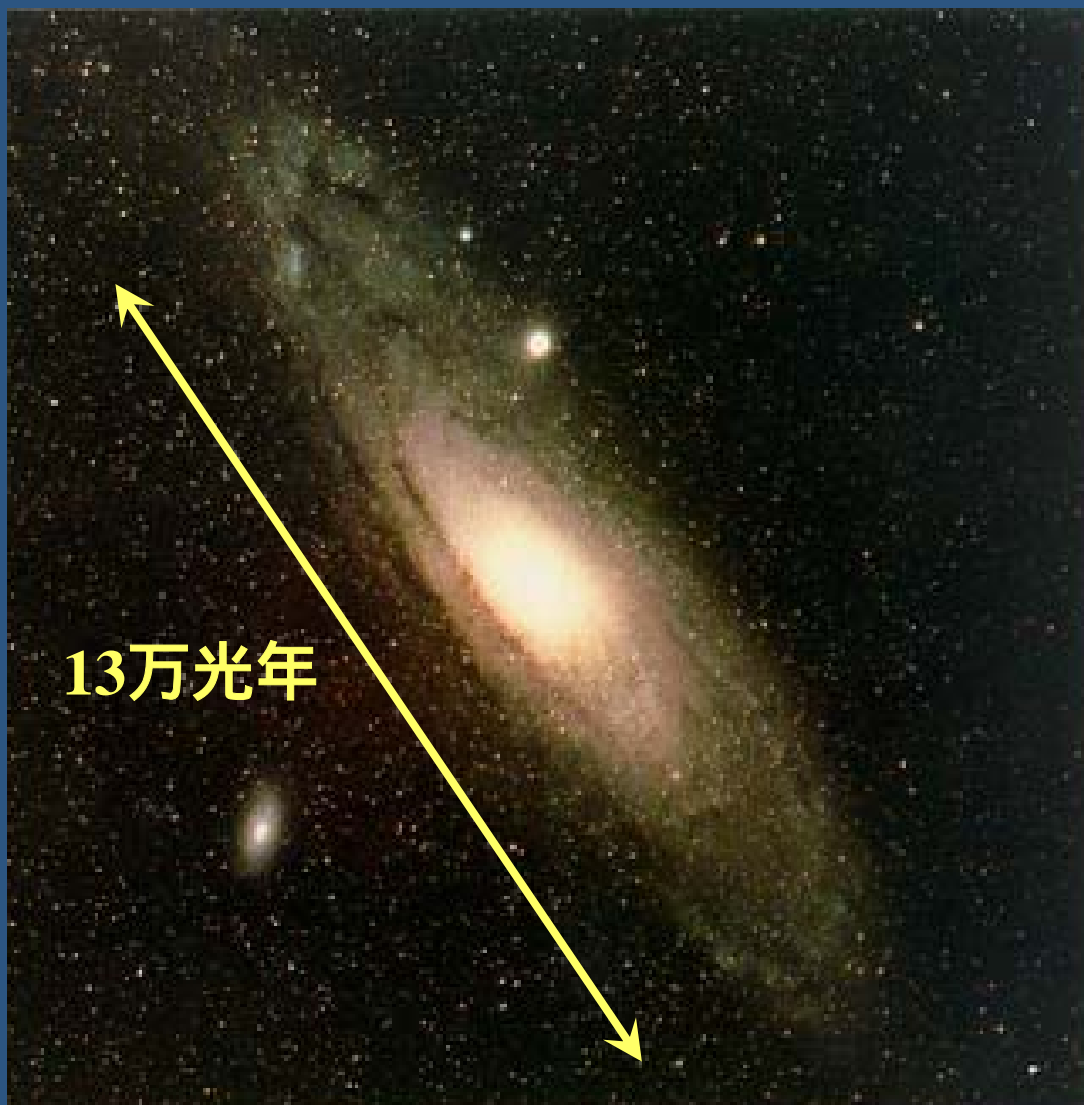
# 我々の銀河系：天の川

- 我々の銀河系(天の川)は、星とガスからなる渦巻き銀河。しかし実は、その質量の9割以上は光では観測できない(正体不明の)暗黒物質

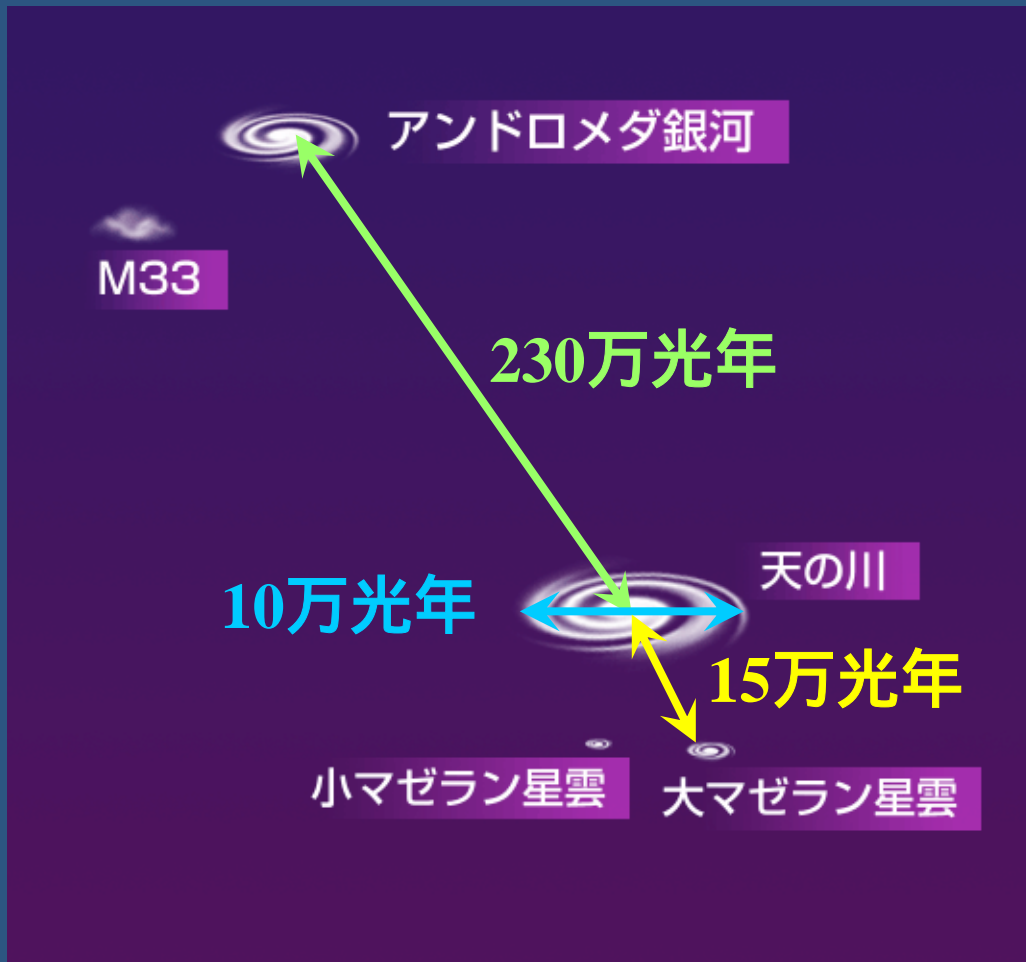


COBE衛星による近赤外線画像 <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

# アンドロメダ銀河 (M31) : 隣の銀河



# 局所銀河群： 我々のまわりの銀河集団



- 我々の銀河系はアンドロメダ銀河をはじめ30個程度のメンバー銀河とともに、直径600万光年程度の広がりをもつ局所銀河群を形成している



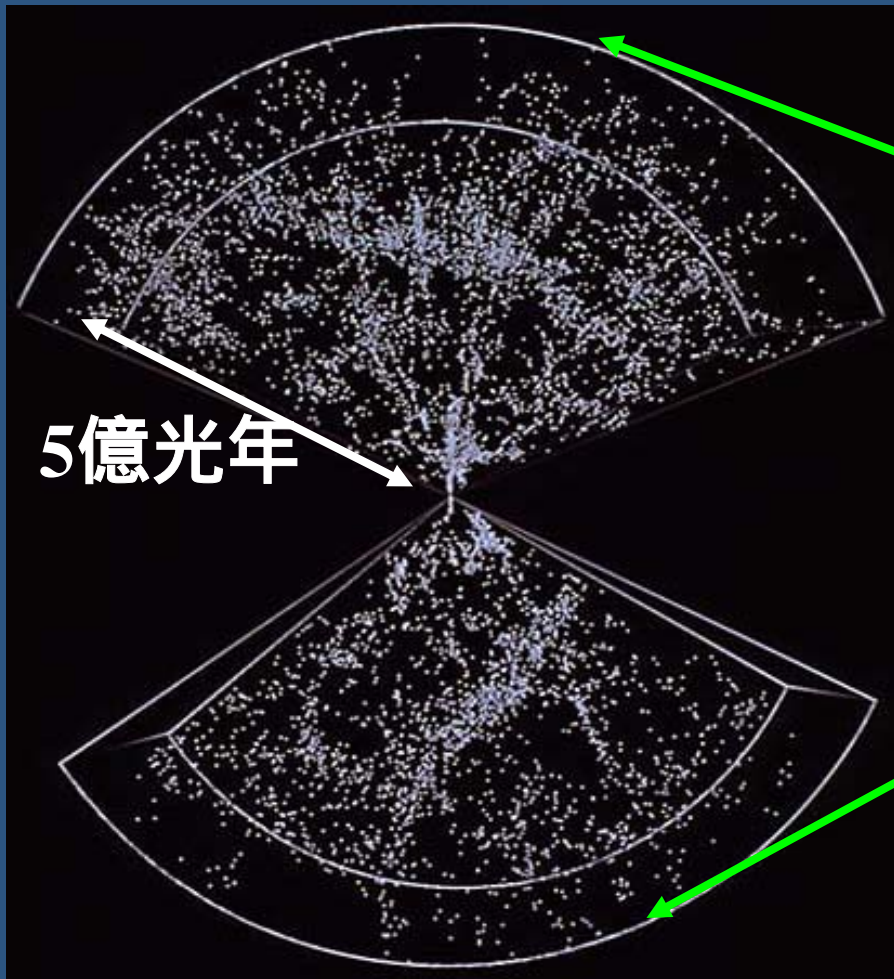
# 銀河団： 宇宙で最大の自己重力系



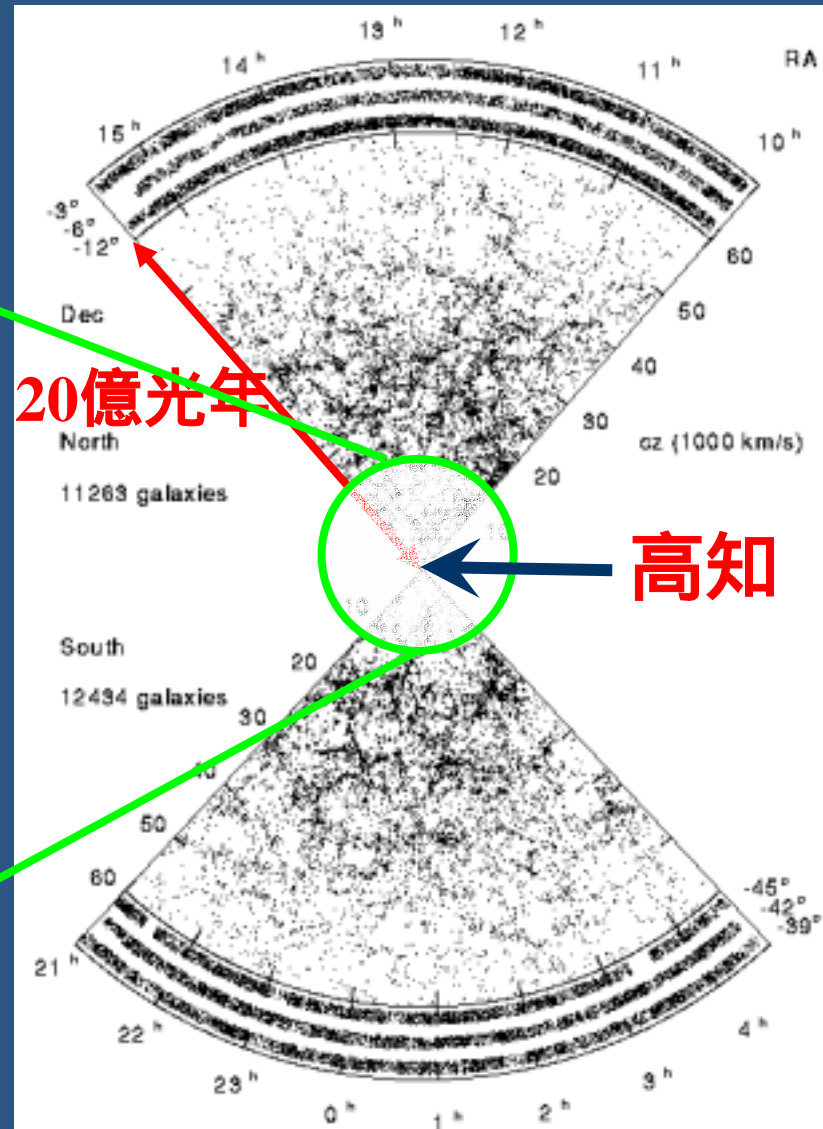
- 100 ~ 1000個の銀河が互いの重力で引き合った集団

銀河団エイベル1689  
(距離: 22億光年)  
ハッブル宇宙望遠鏡

# 銀河の3次元分布地図



CfA galaxy redshift survey:  
Geller, da Costa & Huchra (1992)

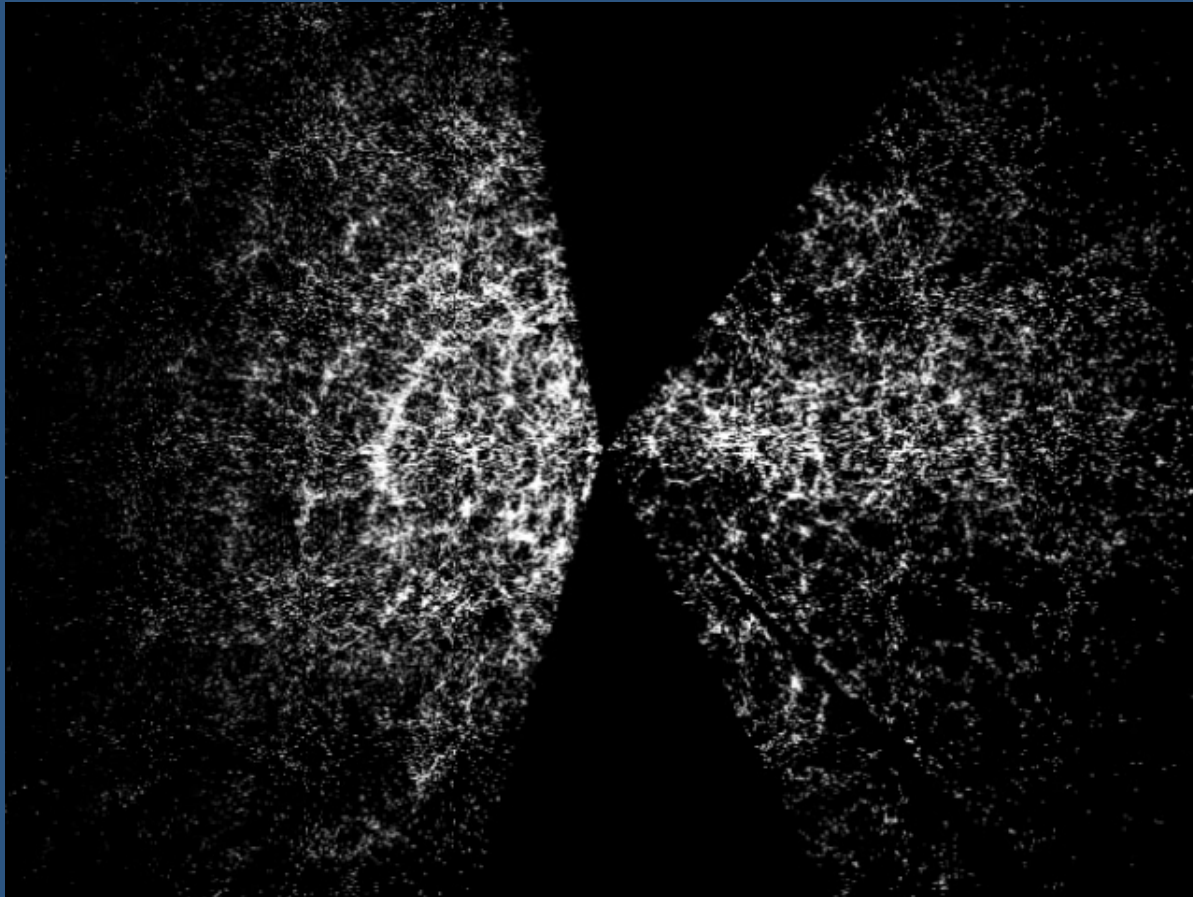


Las Campanas redshift survey:  
Schectman et al. (1996)

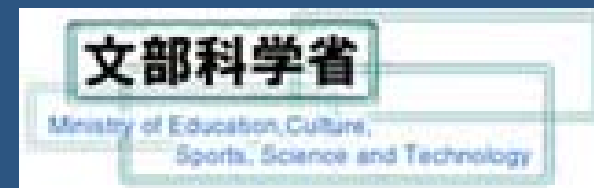


# 史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

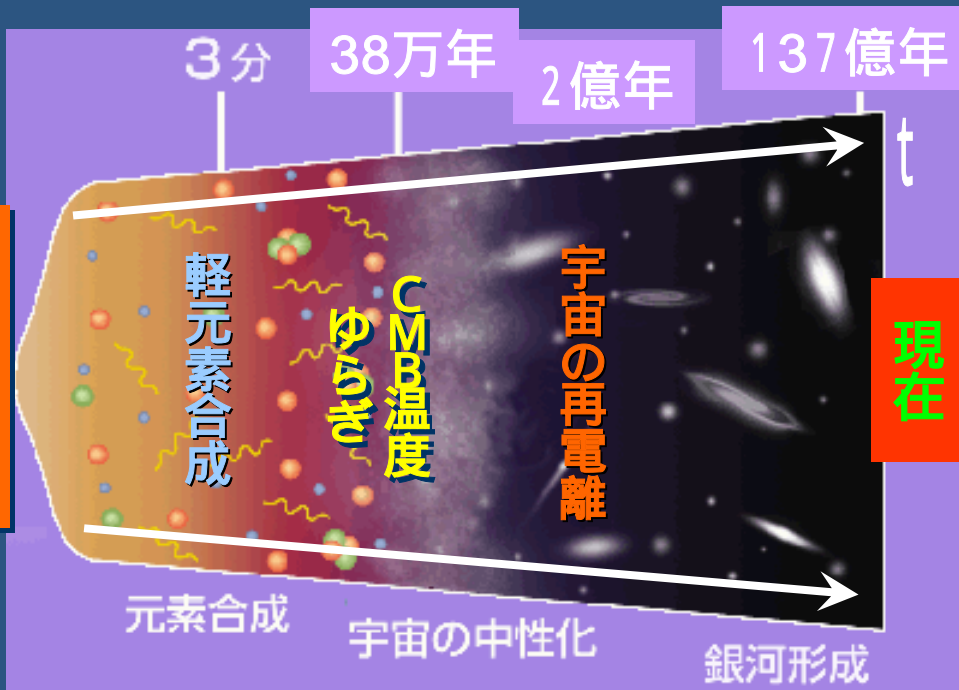


<http://www.sdss.org/dr1/>



NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

# 宇宙の歴史



量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

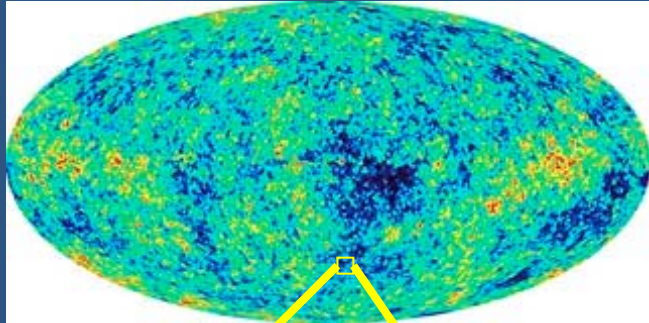
銀河の形成  
銀河団の形成

宇宙の大構造

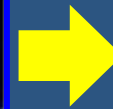
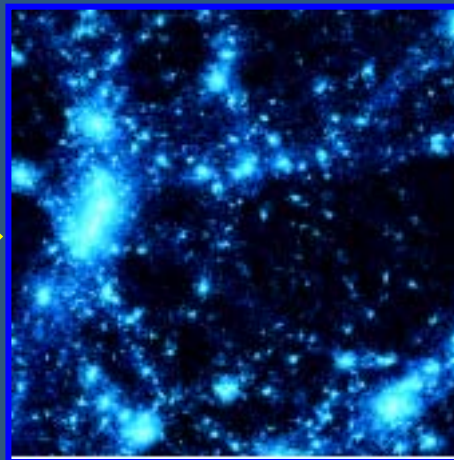
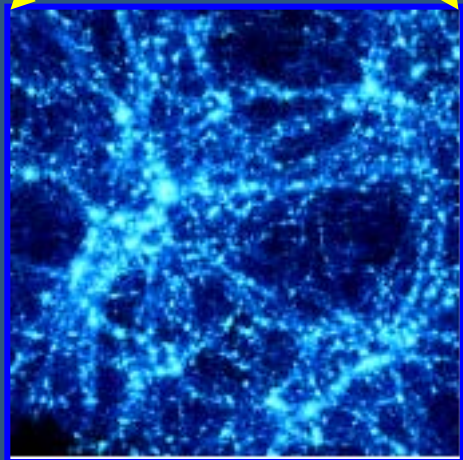
- $t \sim 10^{-40}$ 秒: インフレーション・量子ゆらぎの生成
- $t \sim 3$ 分: ヘリウム合成
- $t \sim 38$ 万年: 宇宙の中性化・宇宙の晴れ上がり
- $t \sim 2$ 億年: 第一世代天体の誕生
- $t \sim 8$ 億年: 宇宙の再電離ほぼ終了
- $t = 8$ 億年 ~ 137億年: 銀河形成、銀河団形成、宇宙の大構造
- $t \sim 137$ 億年: 現在

# 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



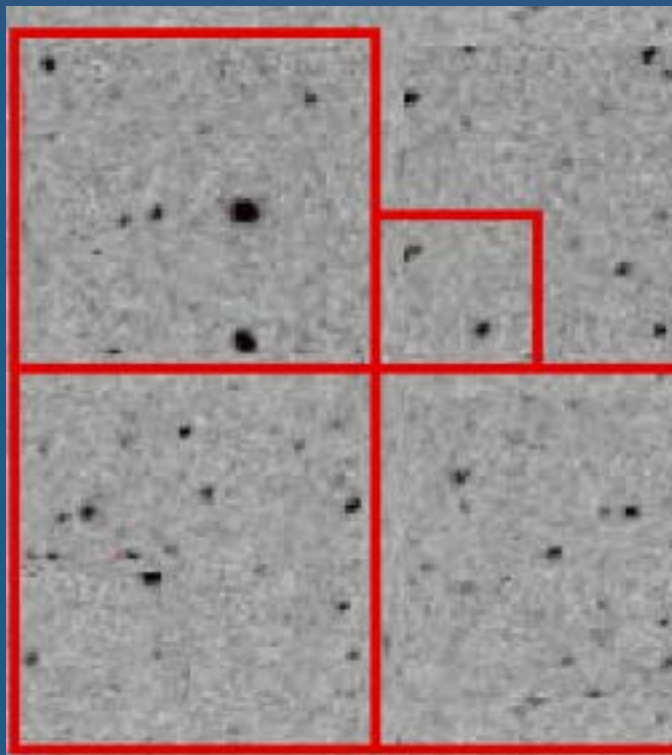
吉川 耕司、  
樽家 篤史、  
景 益鵬、  
須藤 靖  
(2001)

ダークマター分布の進化

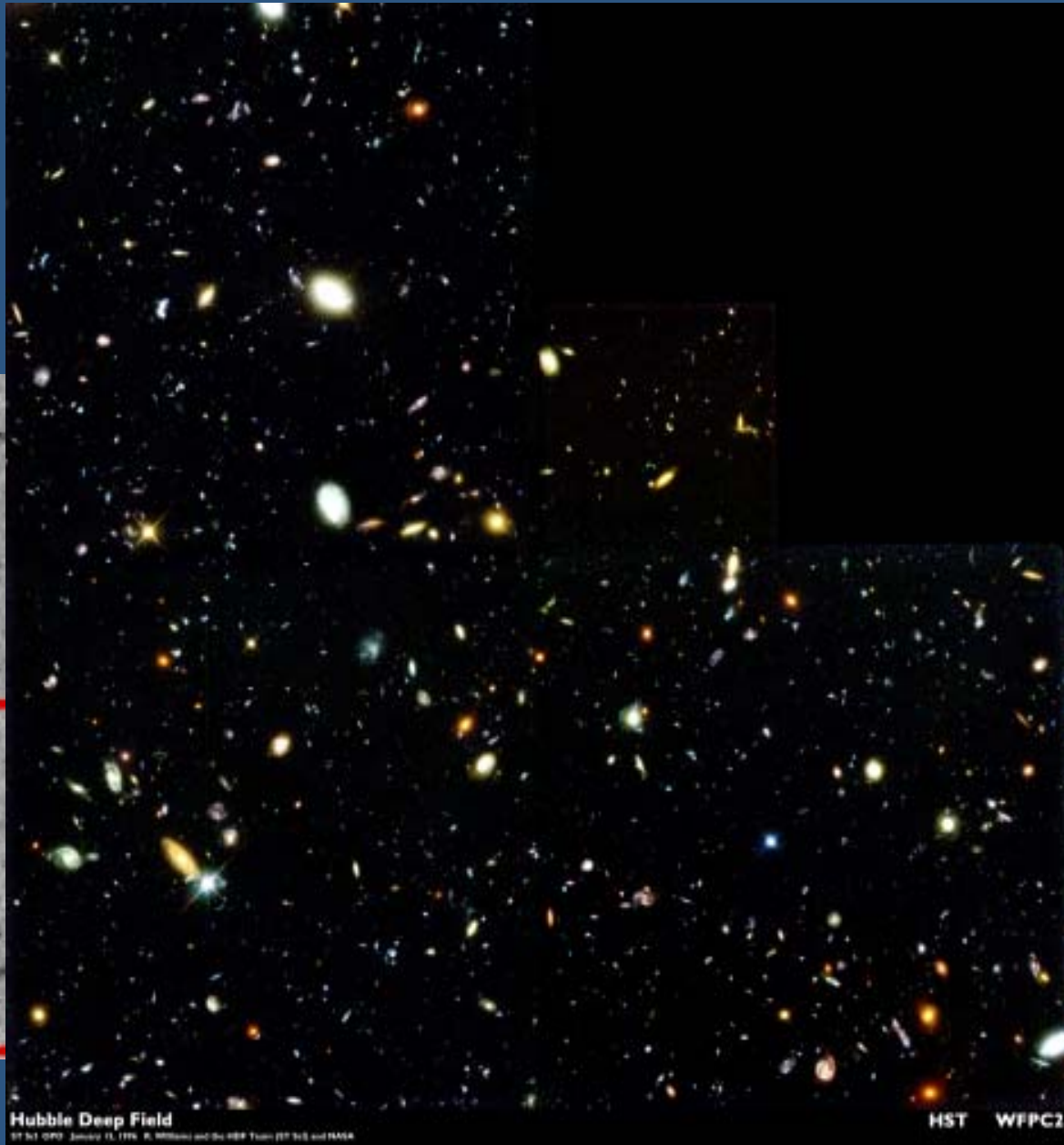
X線で見える現在の高温ガス分布

可視光で見える現在の宇宙の銀河分布

# 宇宙を見る “目”の進歩



地上4m望遠鏡 + CCD  
100× 写真乾板

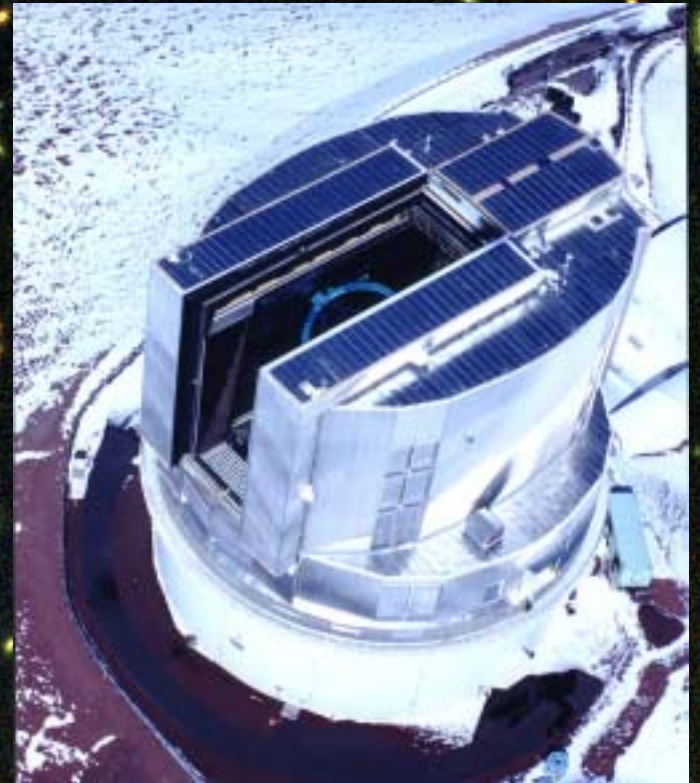


ハッブル宇宙望遠鏡 + CCD: 1000×  
地上望遠鏡





# すばる望遠鏡の見た夜空のむこう



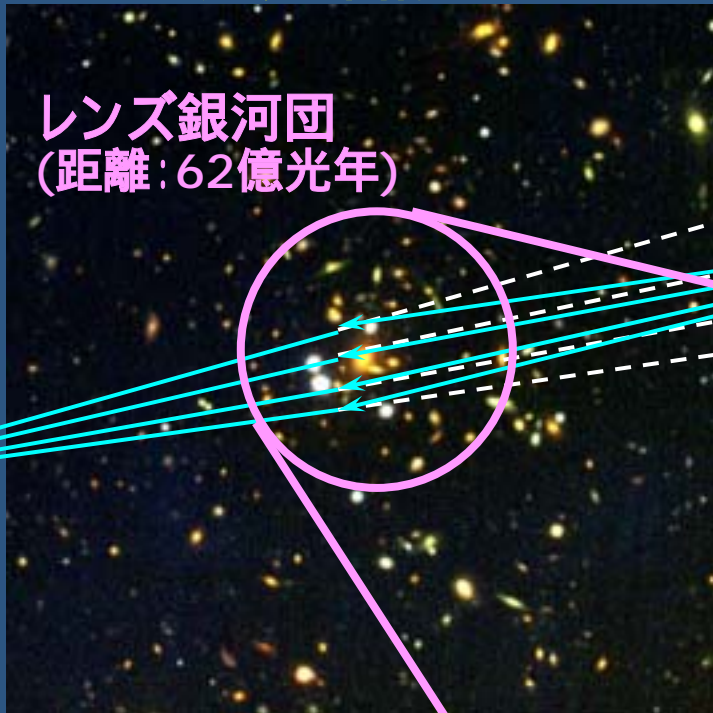
<http://www.naoj.org/Gallery/>

# すばるが見た最大のクエーサー重力レンズ

すばる 8.2m  
望遠鏡



すばる望遠鏡の画像

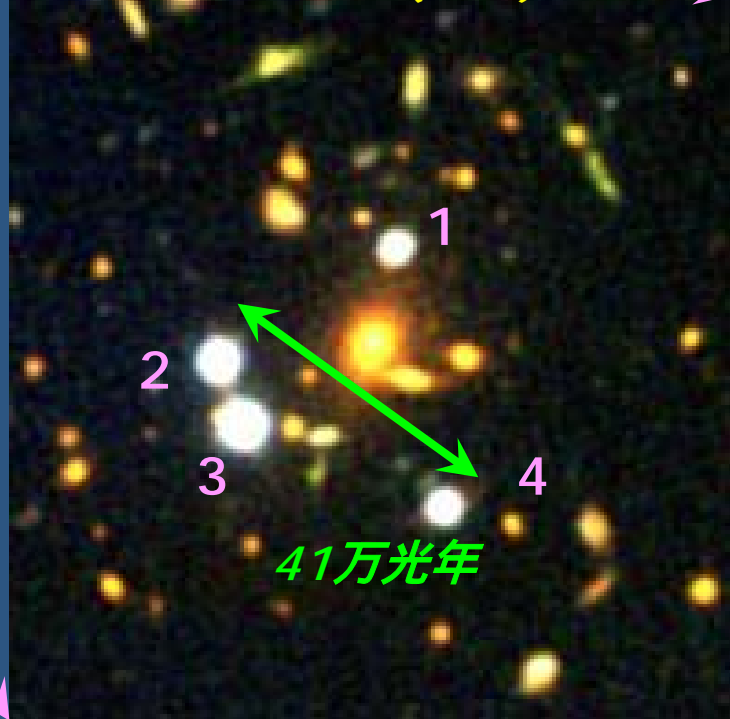


レンズ銀河団  
(距離: 62億光年)

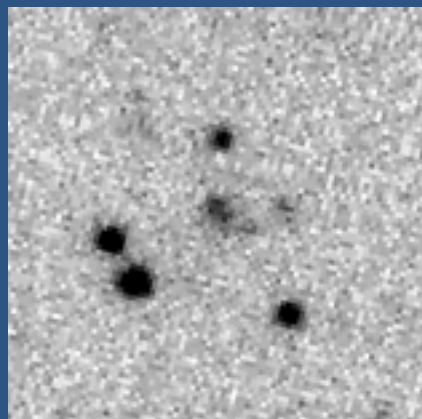
稲田、大栗ほかSDSSグループ  
Nature 426 (2003) 810

クエーサー  
SDSS J1004  
(98億光年)

すばる望遠鏡の画像(拡大)

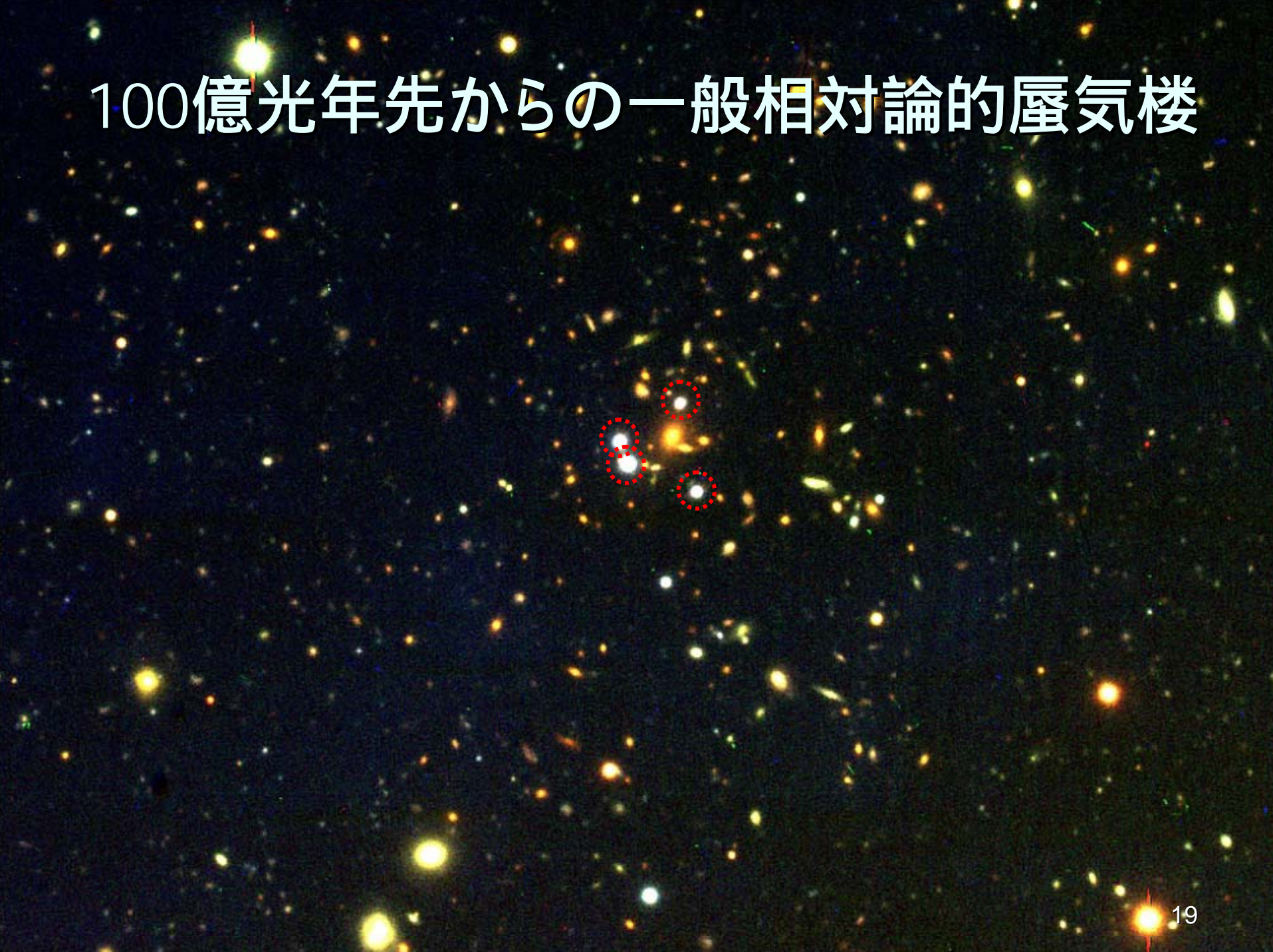


SDSS専用  
2.5m望遠鏡

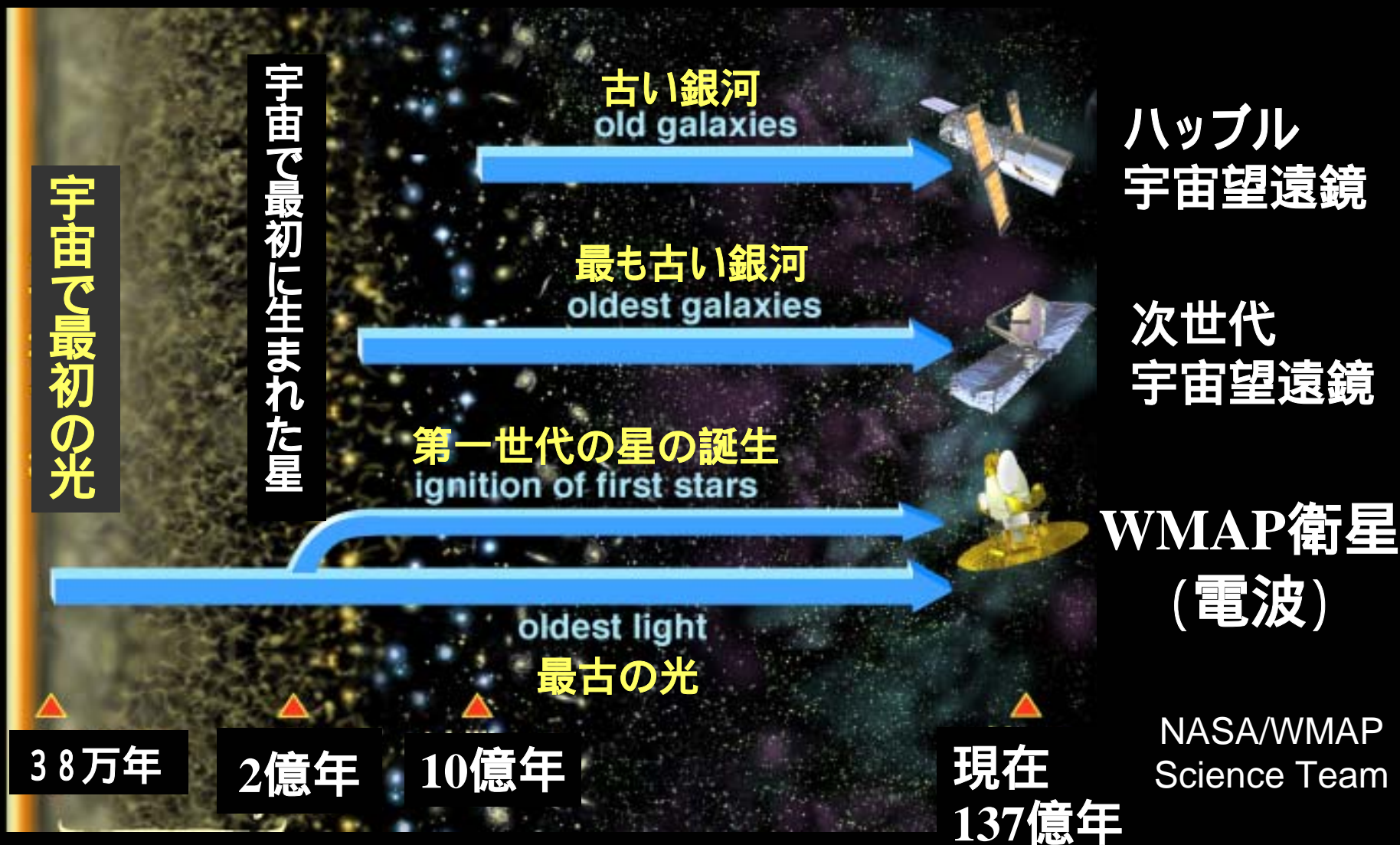


SDSSの画像

# 100億光年先からの一般相対論的塵気楼



# 衛星を使ってもっと遠くの宇宙を見る

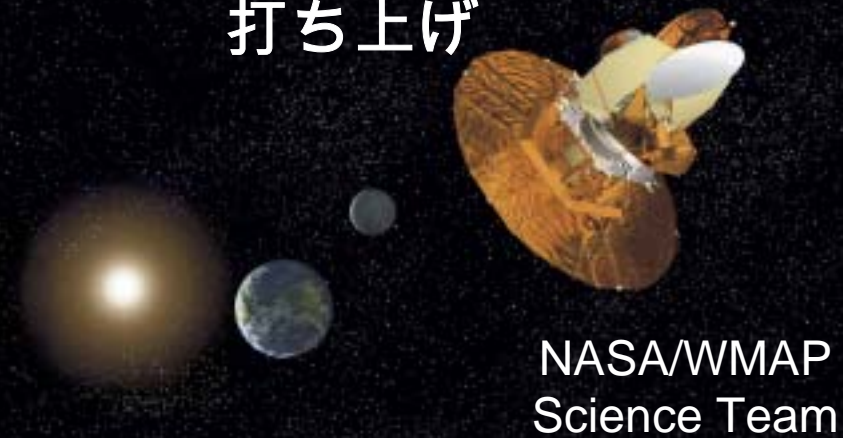
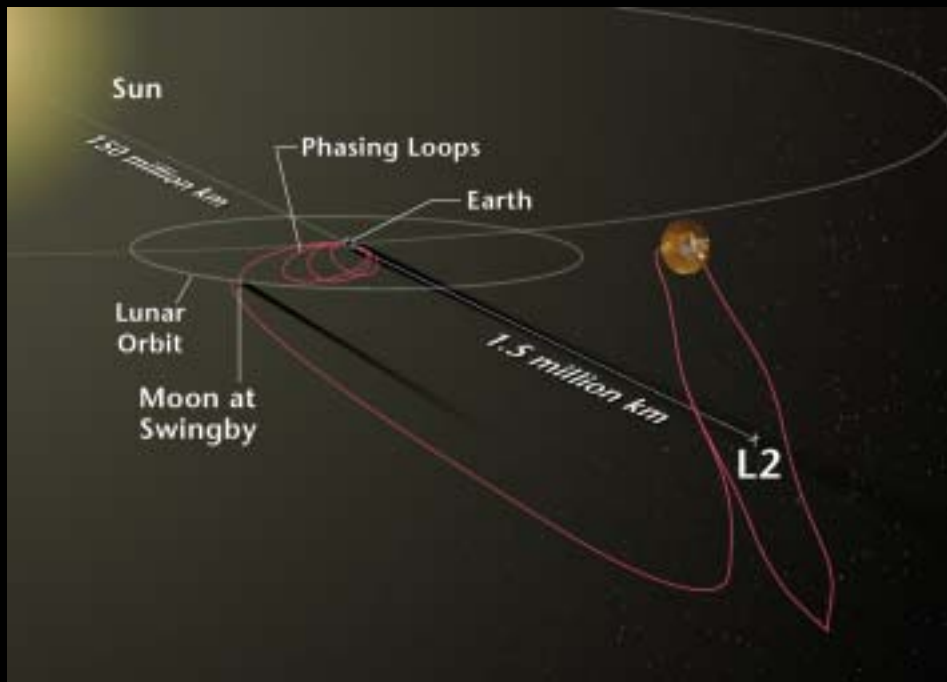


<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

# WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)



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



NASA/WMAP  
Science Team

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

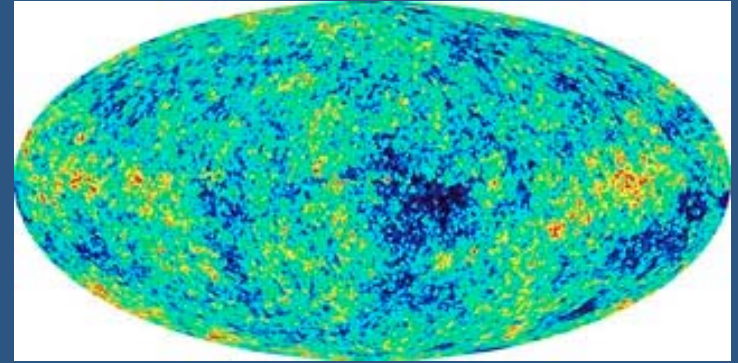
# WMAP衛星：地球から宇宙の果てへの旅



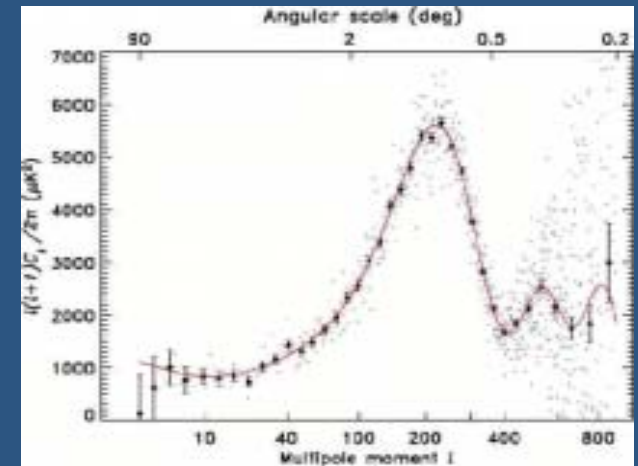
NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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

# 137億年前の古文書の の解読

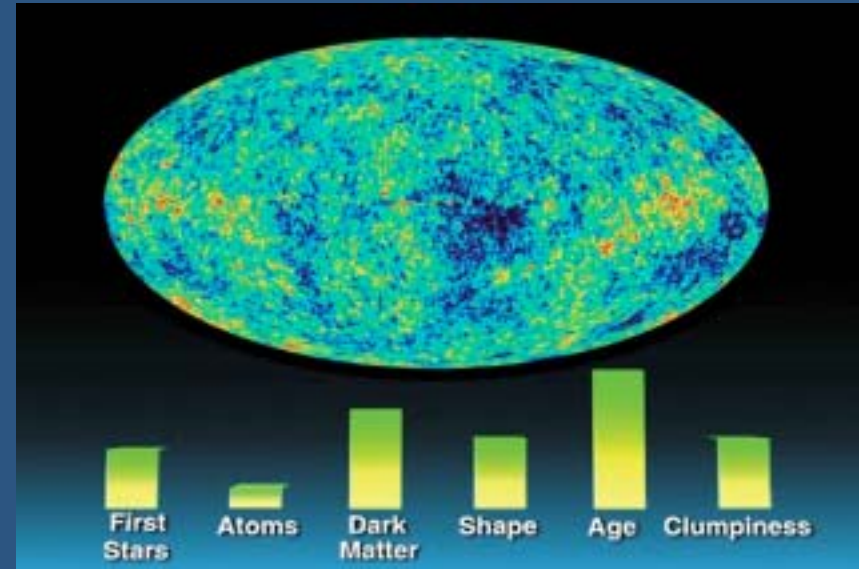


- 暗号化された状態の古文書
  - 宇宙マイクロ波全天温度地図
- 暗号を解く鍵
  - 少し難しい数学
- 解読された古文書内容
  - 温度ゆらぎスペクトル
- この古文書の意味を理解するための文法
  - 宇宙モデルを仮定したときの予言
- 隠されている情報
  - 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



# 宇宙の古文書(マイクロ波背景放射温度地図)が教えてくれたこと

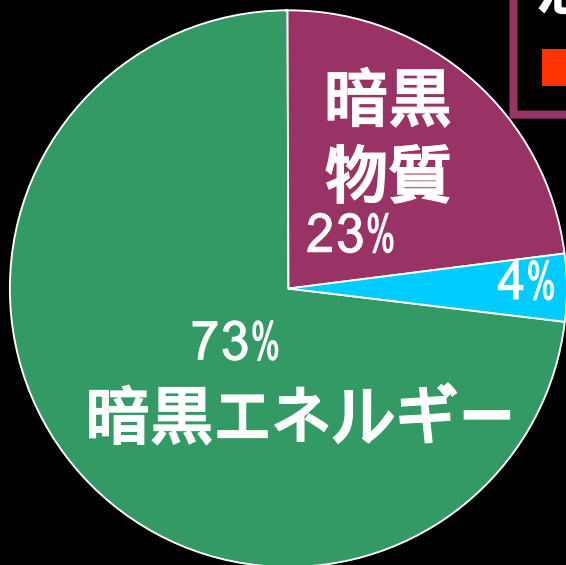
- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて2億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「暗黒物質」
- 実はさらに、「暗黒エネルギー」が宇宙を支配





# WMAPデータ解読結果：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倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

通常物質

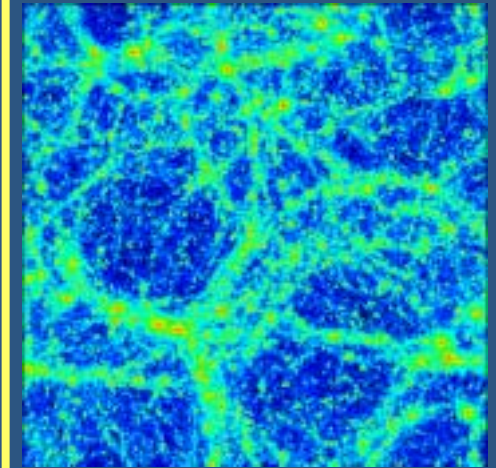
- 我々の体を含めて、地上のありとあらゆるものの成分(主に、陽子と中性子)

- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

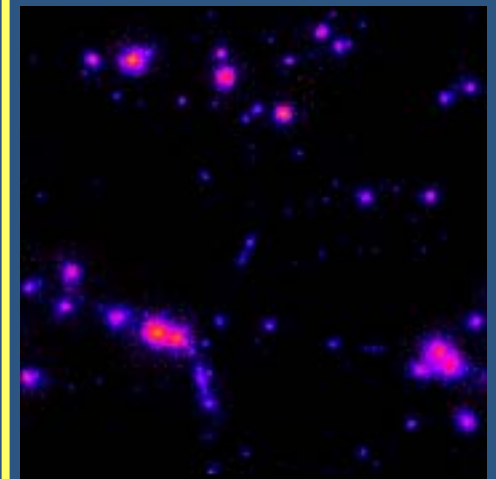
# 宇宙の暗黒物質

- 独立な数多くの宇宙観測データがその存在を支持
  - WMAP衛星、銀河の質量密度プロファイル、銀河団からのX線放射強度、銀河の3次元分布、など
- 宇宙の重力(質量)の大半を支配する
  - 宇宙の構造の起源は暗黒物質の重力
- すでに知られている物質(バリオン)がただ光っていないだけでは説明できない
  - その正体はまだわかっていない
  - 暗黒物質の直接検出実験は21世紀物理学に残された大きな課題
- 暗黒物質は、まだ知られていない新しい物理学を開拓する鍵となる

数値シミュレーションによる暗黒物質分布と明るいバリオンガス分布の比較例



暗黒物質



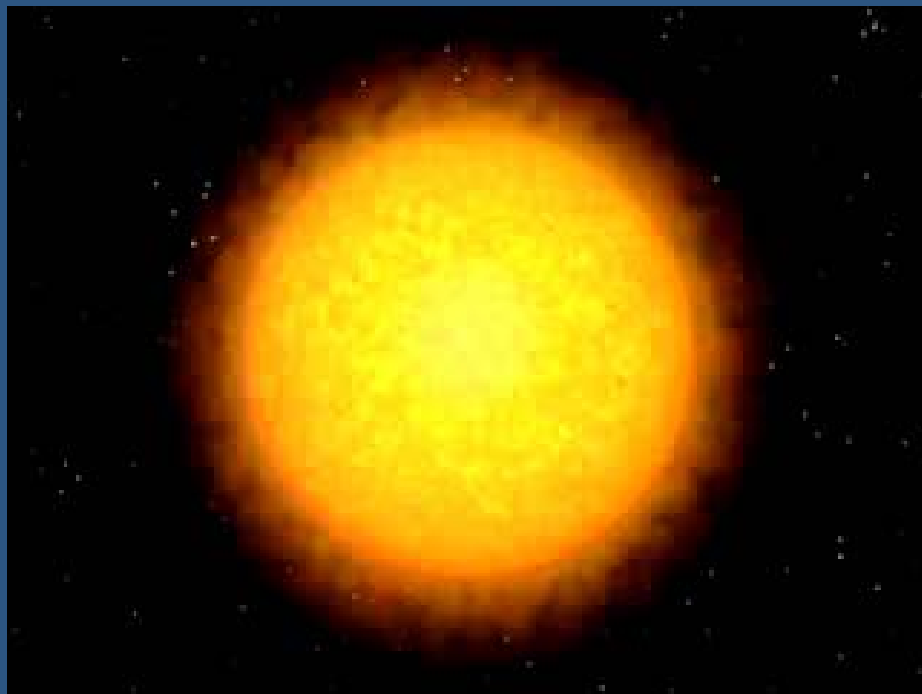
明るいバリオンガス

# 宇宙の暗黒エネルギー

- 暗黒物質とは異なり、ある特定の場所に集中して存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
- その重力は、実効的に「万有斥力」
  - 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
  - 暗黒物質以上にその正体は不明
- 暗黒エネルギーもまた、我々がいまだ理解していない新たな物理学の存在を示す重要な手がかり

# もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

## ■ 宇宙の果ての観測と系外惑星の観測



- 大望遠鏡は暗い天体を観測できる
  - 本当は明るいのだが遠いために暗い天体  
宇宙の果てにある銀河
  - すぐ近くにあるのだが本当に暗い天体 銀河内にある系外惑星

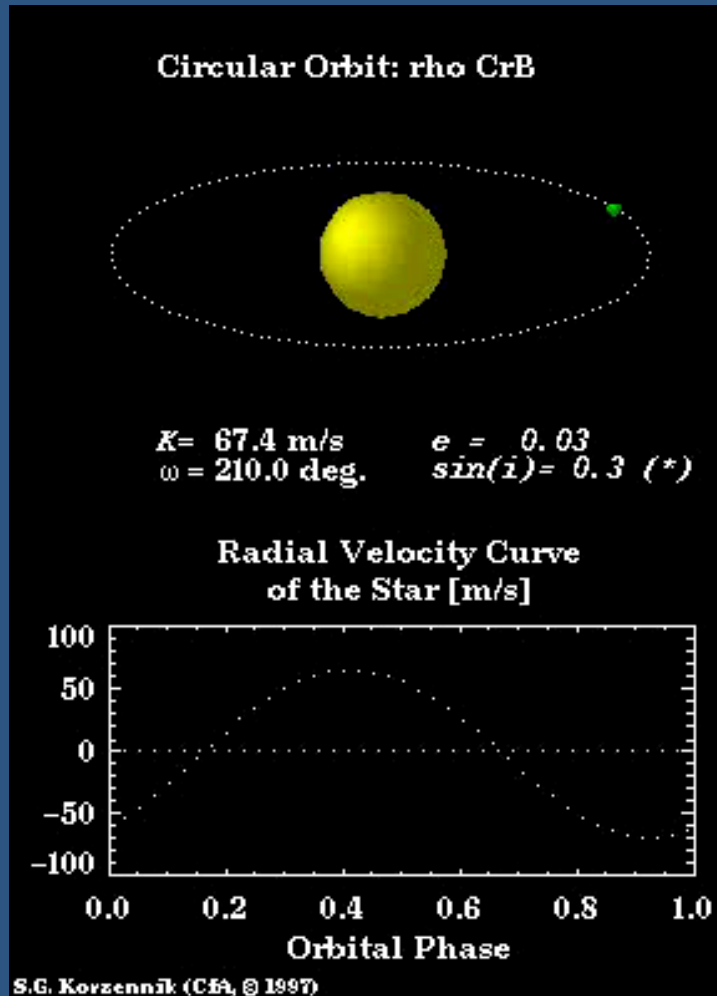
# 第二の地球はあるか？

- 地球外生物の科学的証拠は(未だ)存在しない
- 生物が誕生するには
  - 大気存在
  - 適度な温度(水が液体として存在)
  - + 偶然？(必要/十分条件ともに現時点では不明)
  - 太陽のような恒星上では不可能 恒星のまわりの惑星を探せ！



Terra衛星のMODIS検出器のデータ  
<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>  
<http://www.nasa.gov/home/index.html>

# 惑星を間接的に「見る」



もしも惑星があれば主星の軌道は影響を受ける

ケプラーの法則：  
地球は太陽の周りを楕円運動している



厳密には、太陽も地球のために少しだけいつも運動している

この方法によって、木星程度の質量の太陽系外惑星がすでに130個以上発見されている (2004年9月26日現在)

# 太陽系外惑星が初めて発見されたのは、 今からわずか10年前でしかない！

## ■ わが太陽系の拡大

- 1781年：天王星の発見
- 1846年：海王星の発見
- 1930年：冥王星の発見

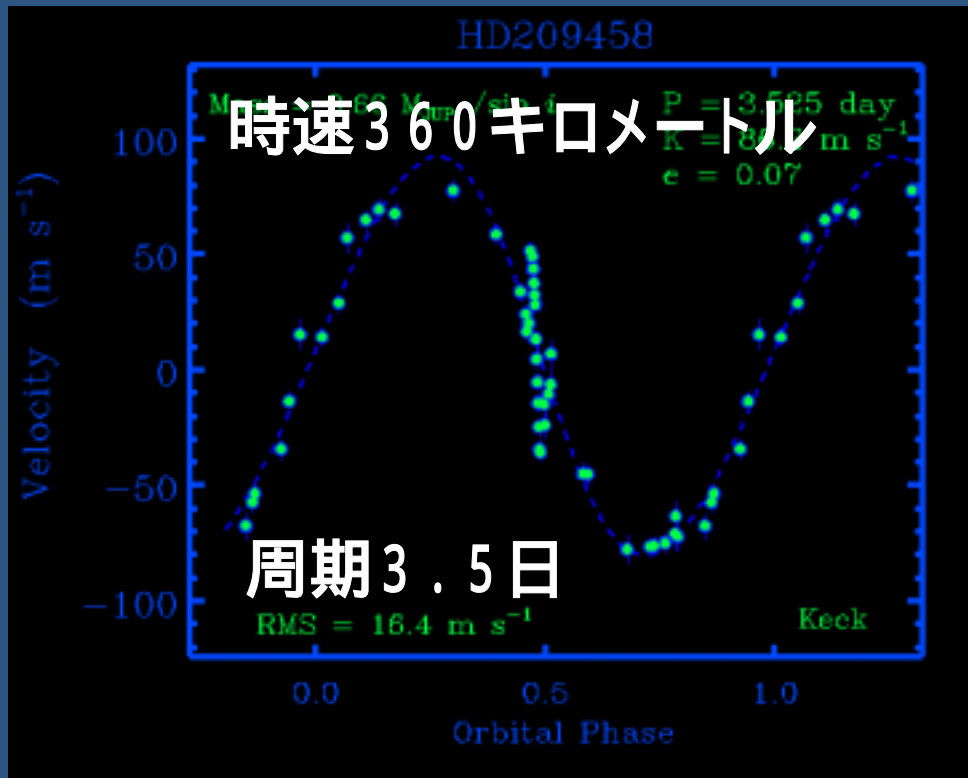
## ■ 1995年：初めての太陽系外惑星の発見

- 約50光年先のペガサス座51番星の周り
- 一年（公転周期）がわずか4.2日の木星質量惑星
- 太陽系惑星とは全く異なる姿

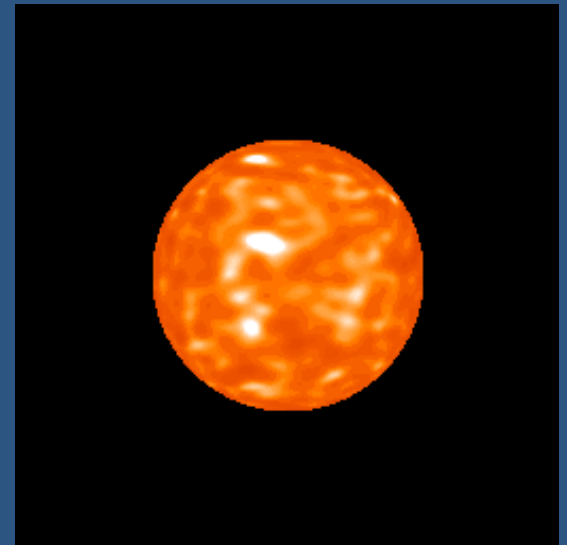
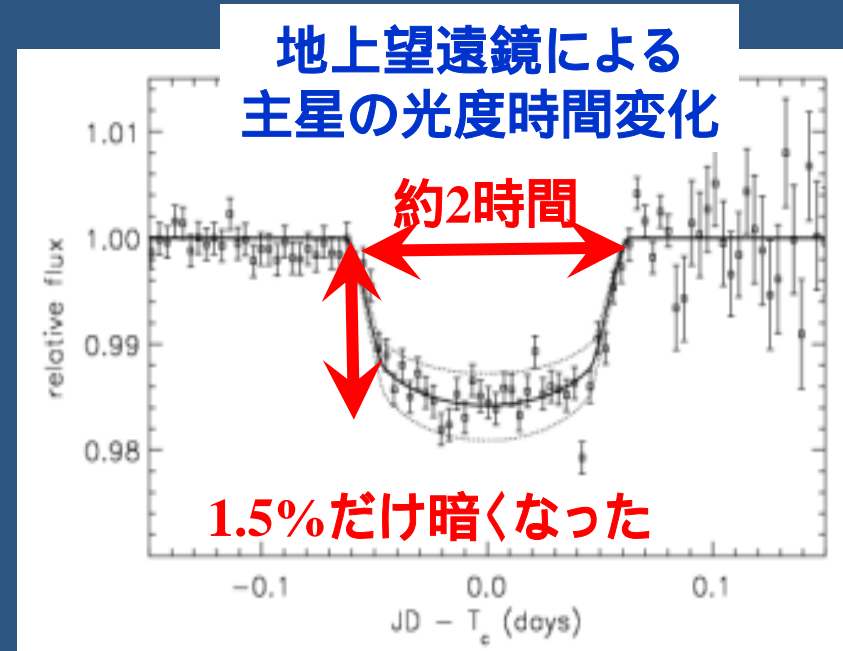
## ■ 2004年9月26日までに136個の系外惑星

# 太陽系外食惑星 HD209458

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



地上望遠鏡による  
主星の速度時間変化





# 地球外知的生命はいるか？：ドレイクの式

$$N = (N_s / L_s) \times f_p \times n_e \times f_L \times f_I \times f_C \times L$$

銀河系内にある  
交信可能な知的文明の数

銀河系内の全命に適した(恒星の数

その恒星の寿命

その恒星が惑星を伴っている確率

その惑星の中で、生物が存在可能な環境にある地球型惑星の期待値

その惑星に生物が発生する確率

その生物が知的生命に進化する確率

その知的生命が他の文明と交信を行う確率

その文明の継続時間



Frank Drake博士

Nの値は良くわかっていない。0.003個(つまり、我々の地球以外には存在し得ない!)と推定する研究者から200万個と推定する研究者までいる。ドレイク博士自身は1万個程度であると考えた。

# 謎解きはまだまだこれから

- **宇宙の果てをみることで自然界の新たな物質階層が明らかとなった**
  - 宇宙の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
  - 我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった
  - 暗黒物質、暗黒エネルギーの解明は21世紀科学の大目標
- **10年足らず前に初めて太陽系以外に惑星が存在することが発見された(ただしまだガス惑星のみ)。**
  - 第二の地球はあるのか？
  - 地球外生物、地球外知的文明は存在するか？
  - 我々の存在は偶然か、必然か？
  - これらが単なる夢物語やSFではなく、科学的に議論できる時代になってきた！

# 「宇宙を見る新しい目」(日本評論社)

## 日本物理学会編：2004年3月刊



1章 宇宙マイクロ波背景輻射で見る宇宙...小松英一郎

2章 X線で見る宇宙...大橋隆哉

3章 ガンマ線で見る宇宙...谷森達

4章 重力波で見る宇宙...三尾典克

5章 最高エネルギー宇宙線...手嶋政廣

6章 コンピュータシミュレーションから見る宇宙...吉田直紀

7章 超新星で測る宇宙膨張とダークエネルギー...土居守

8章 ニュートリノと素粒子物理...梶田隆章

9章 超新星ニュートリノで見る宇宙...佐藤勝彦

10章 究極の宇宙論：太陽系外惑星探査...須藤靖