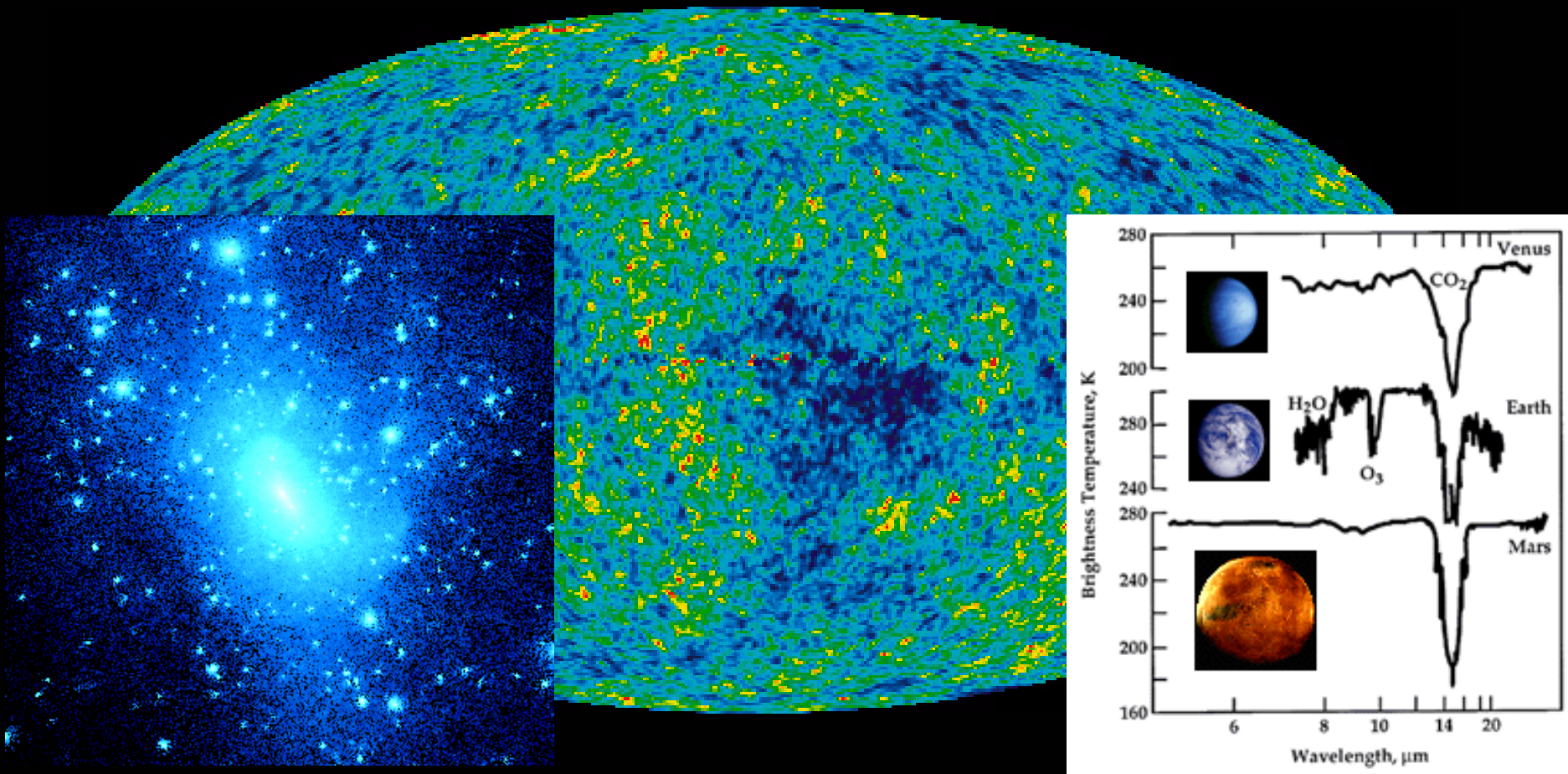


宇宙・銀河団・惑星に関する3つの小ネタ



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

階層構造の科学@湯河原温泉 おんやど恵、2008年3月28日

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2008j.html

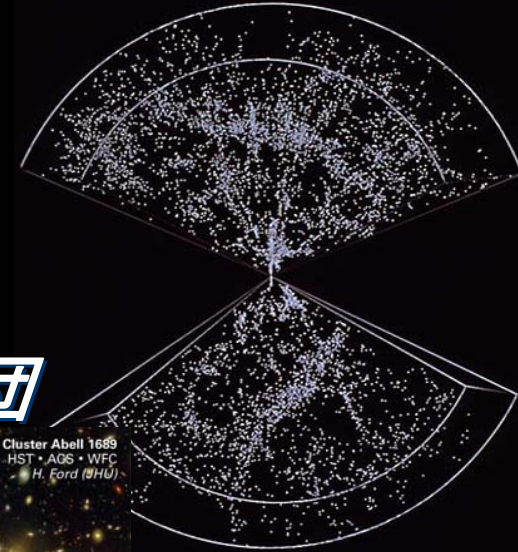
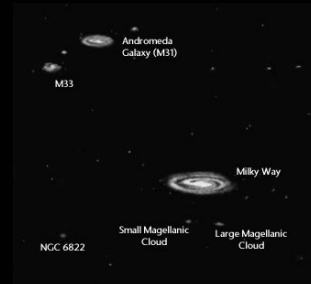
天文学・宇宙物理学の研究対象

宇宙の大構造

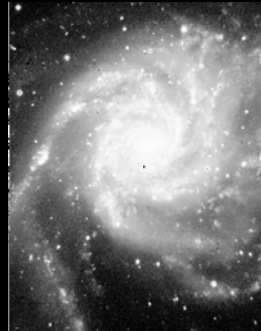
銀河群

矮小銀河

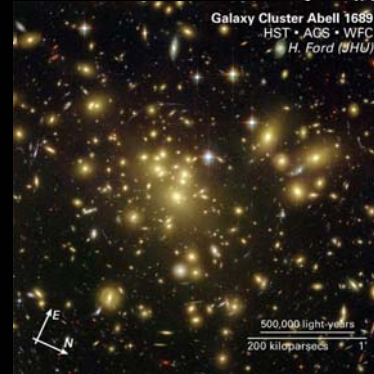
太陽系



銀河



銀河団



星団

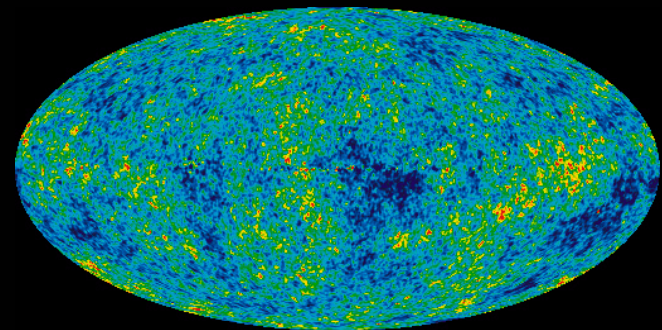


10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8

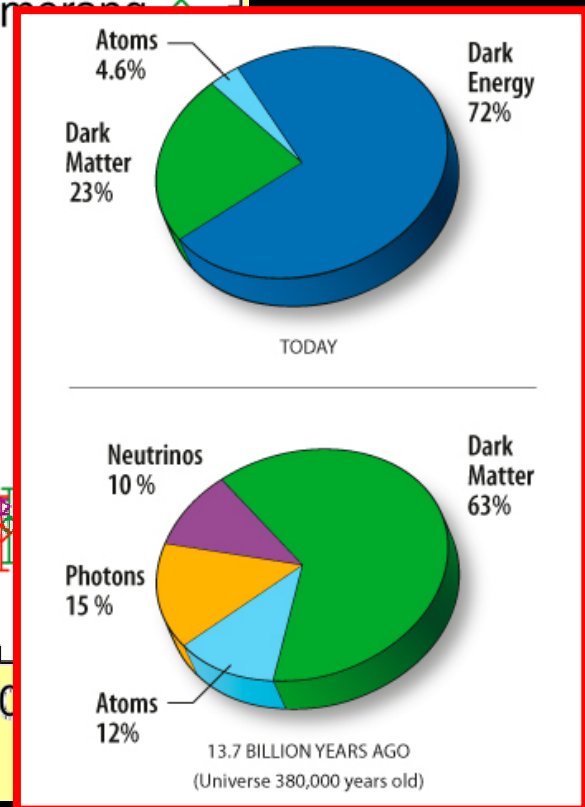
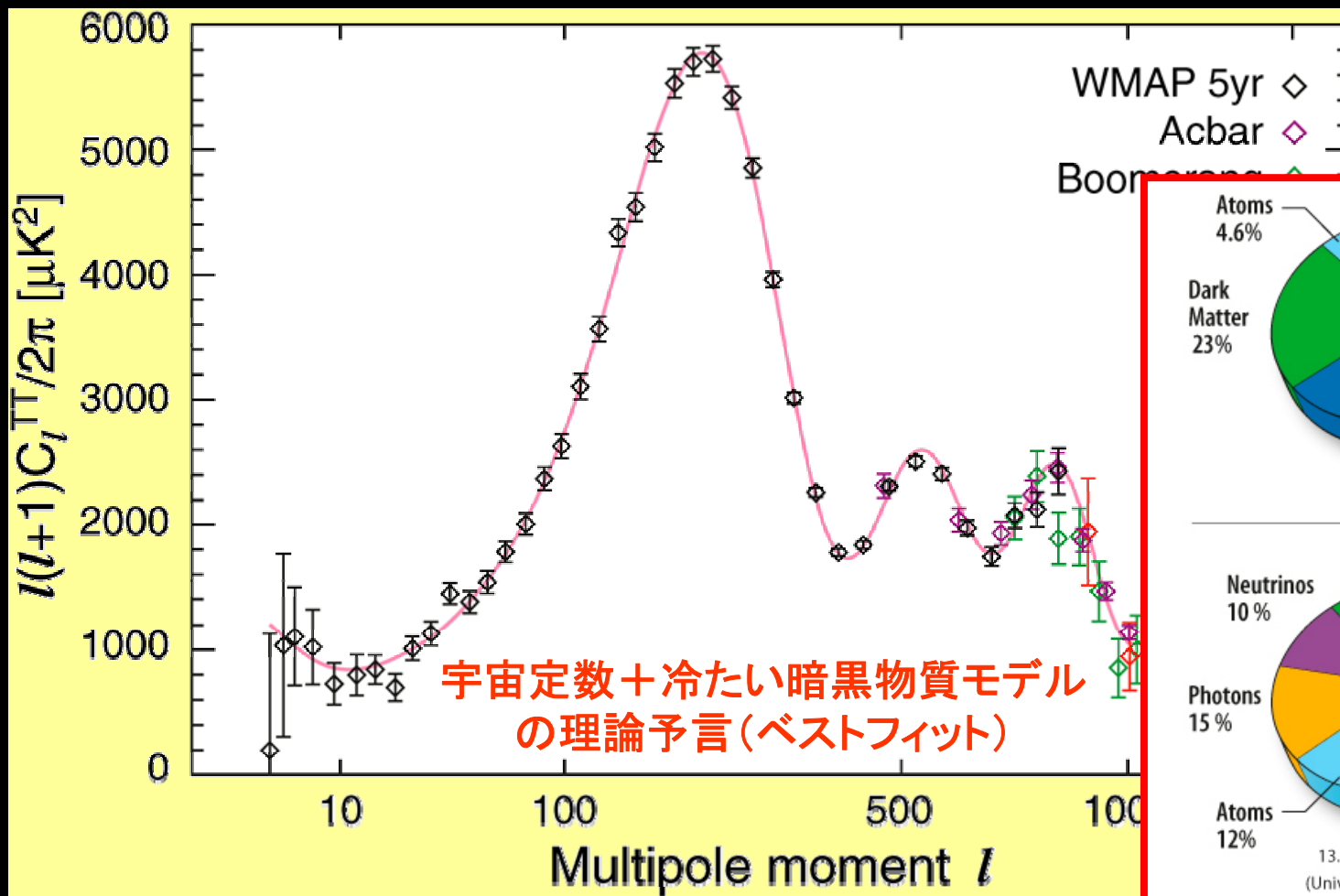
天体諸階層の典型的大きさ [光年]

宇宙の階層の起源

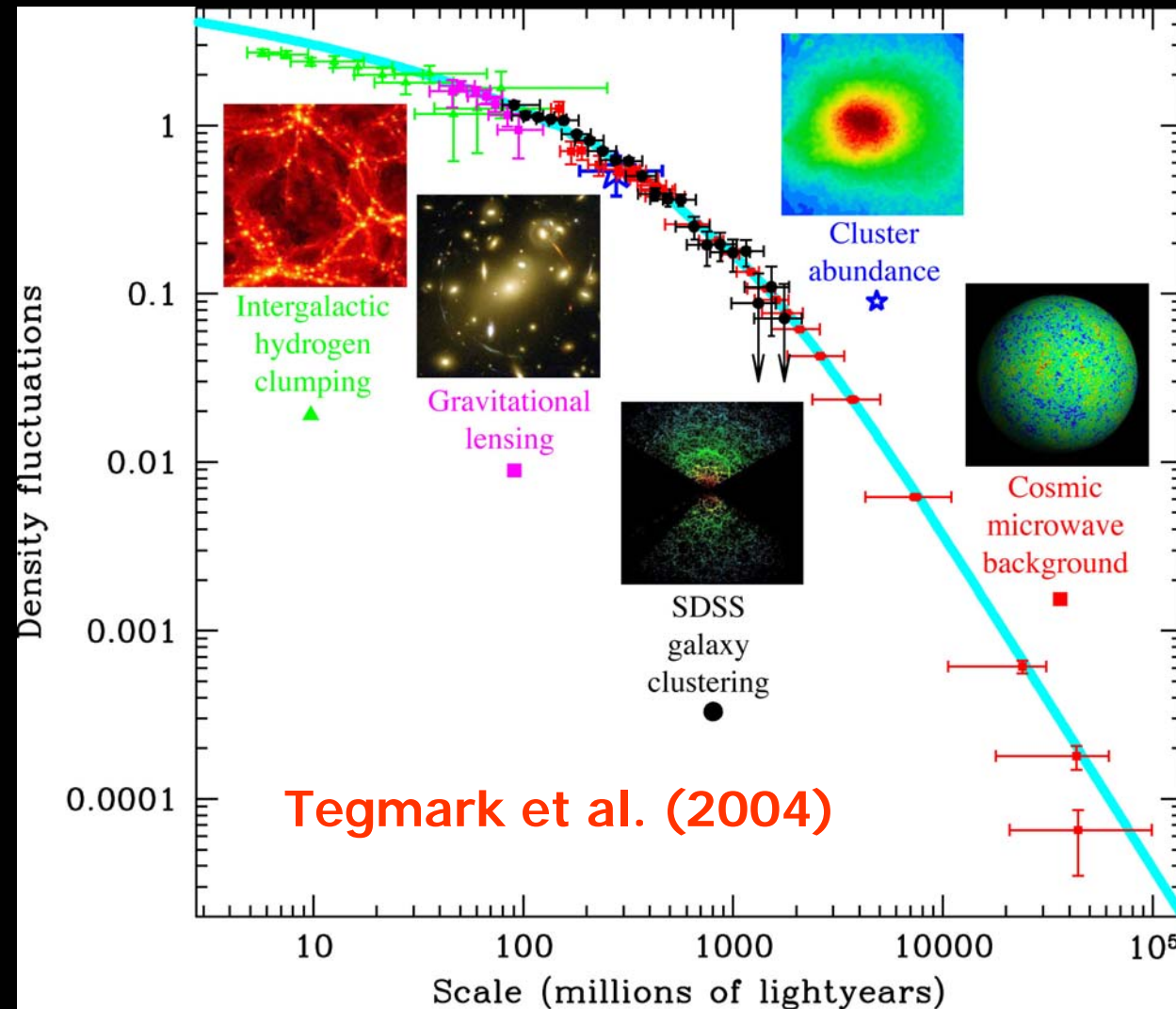
- 1980年代初めまでは十分意味のあった問いの例
 - 宇宙の構造はトップダウンかボトムアップか？
 - 銀河の空間2点相関関数がフラクタルであることの起源？
- 20世紀末頃にはこれらはほぼ解明された
 - 冷たい暗黒物質モデルの成功
 - 宇宙の構造はボトムアップで成長
 - 銀河の相関関数・パワースペクトルは初期条件＋重力進化(+ α)で正確に予言(記述)できる
 - 宇宙論的な文脈での重力的な進化の枠組みはほぼ理解されている
- 天体の形成・進化は未だに理解されていないことが多い
 - 基礎物理学・宇宙論というよりも天文学的問題
 - 銀河、ブラックホール、第一世代天体、星、惑星、衛星、リング



WMAPの5年間データにもとづく 温度非等方性角度スペクトル



宇宙論的密度ゆらぎのパワースペクトル

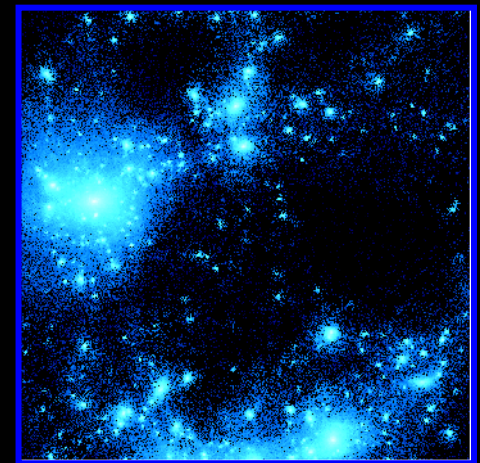
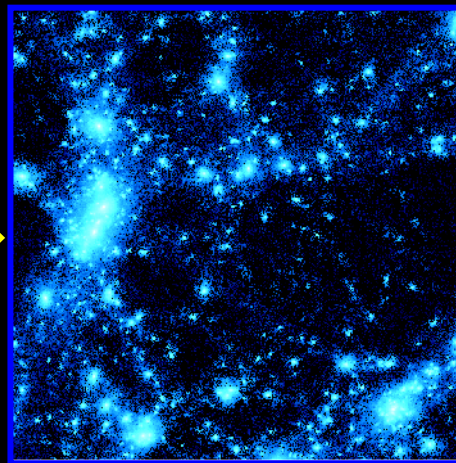
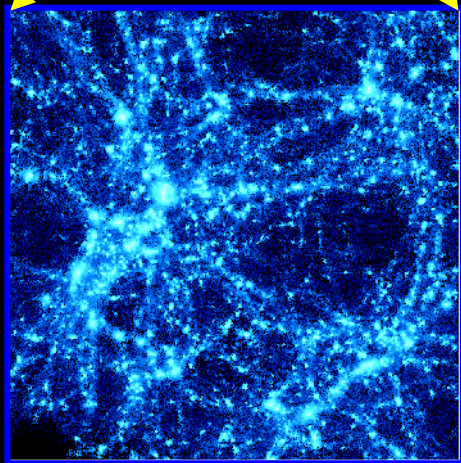
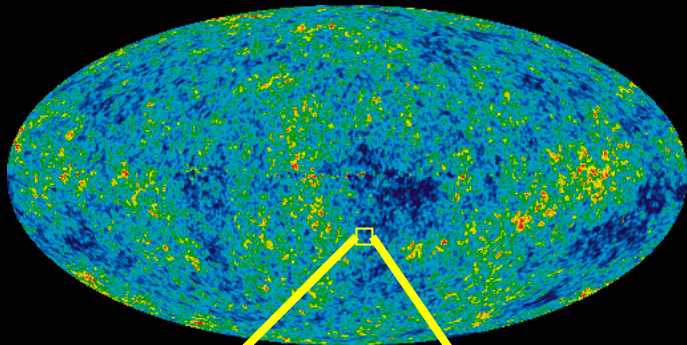


■冷たい暗黒物質 + 宇宙定数の存在を「**仮定**」すれば、銀河から銀河団、マイクロ波背景放射にいたる諸階層を生み出す密度ゆらぎが統一的に説明できる

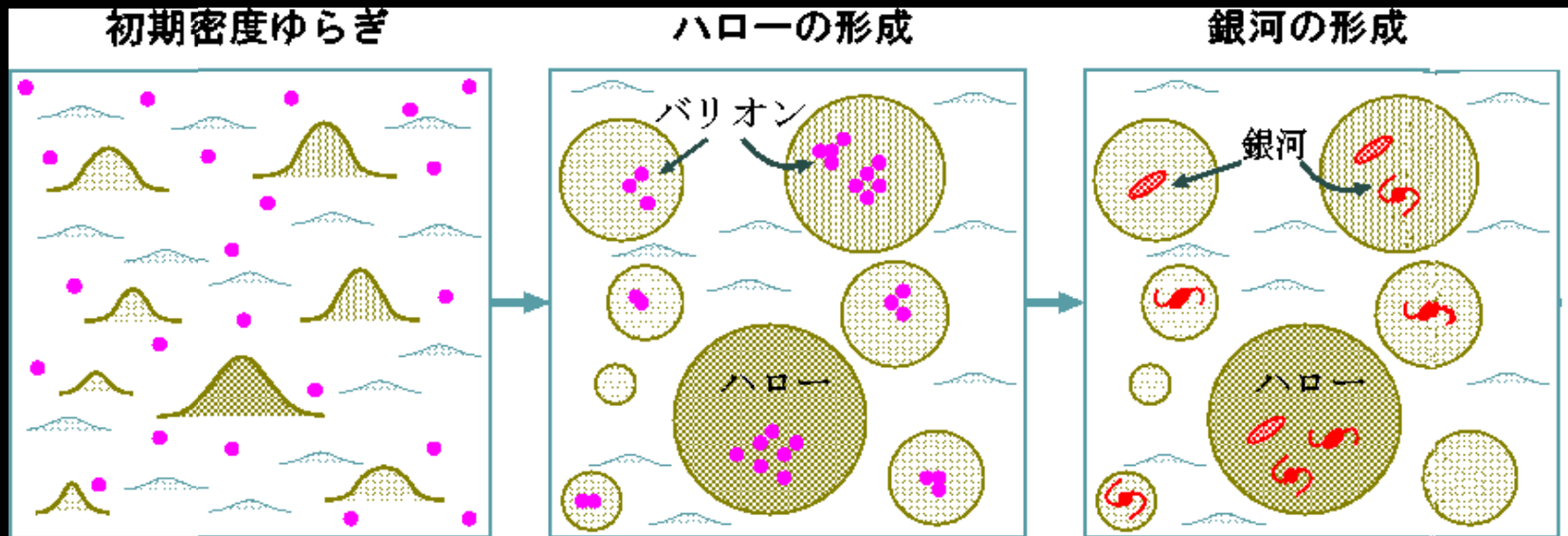
■残る問題は、「**暗黒物質および宇宙定数のより直接的な検出**」、「**天体諸階層の形成と進化**」

宇宙の構造形成シナリオ

- 小さなスケールの構造ほどより初めに形成される
- いったんできた構造が重力的に合体・集団を繰り返すことで、より大きなスケールの構造へと進化する



重力不安定による構造形成パラダイム



重力進化

ガスの冷却
輻射過程
星形成進化
...

樽家篤史(2001)日本物理学会誌

ダークマターハロー(ダークマターの自己重力系)の
つくる重力ポテンシャルが天体形成の現場

宇宙論的流体力学シミュレーション



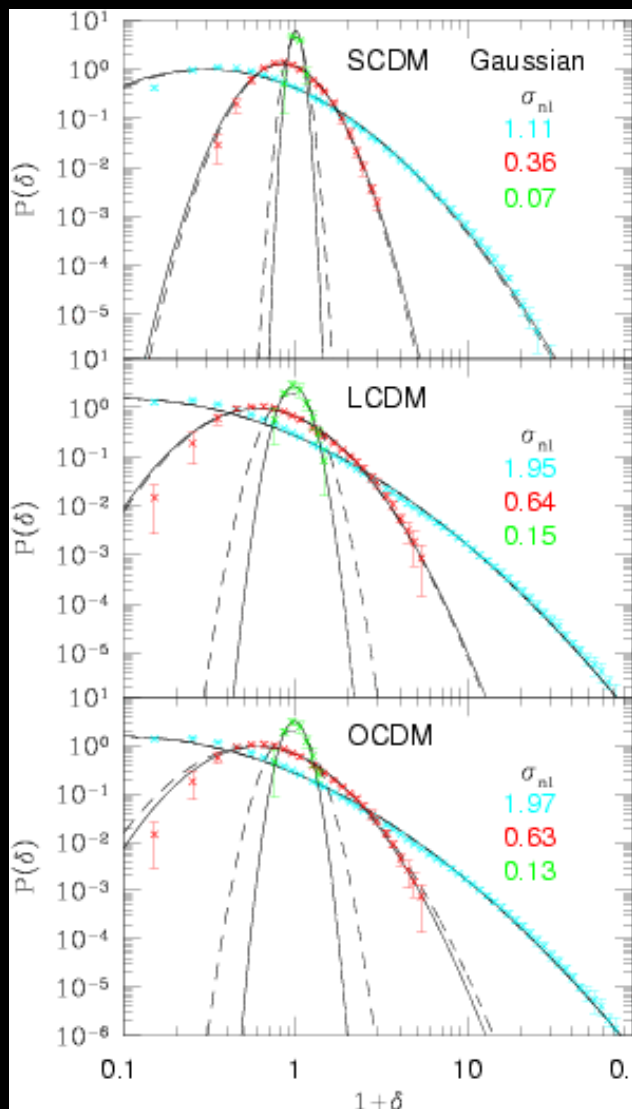
**SPH simulation in Λ CDM : dark matter \Rightarrow hot gas \Rightarrow galaxy
(Yoshikawa, Taruya, Jing & Suto 2001)**

本研究会に関連しそうな3つの話題

- I. 天体諸階層において密度ゆらぎの確率分布関数が示す対数正規分布
- II. ダークマターハロー密度分布の普遍性の起源
- III. 太陽系外惑星のバイオマーカーと(本当の)宇宙天気予報の重要性

I 天体諸階層において
密度ゆらぎの確率分布関数
が示す対数正規分布

宇宙論的密度ゆらぎ確率分布関数



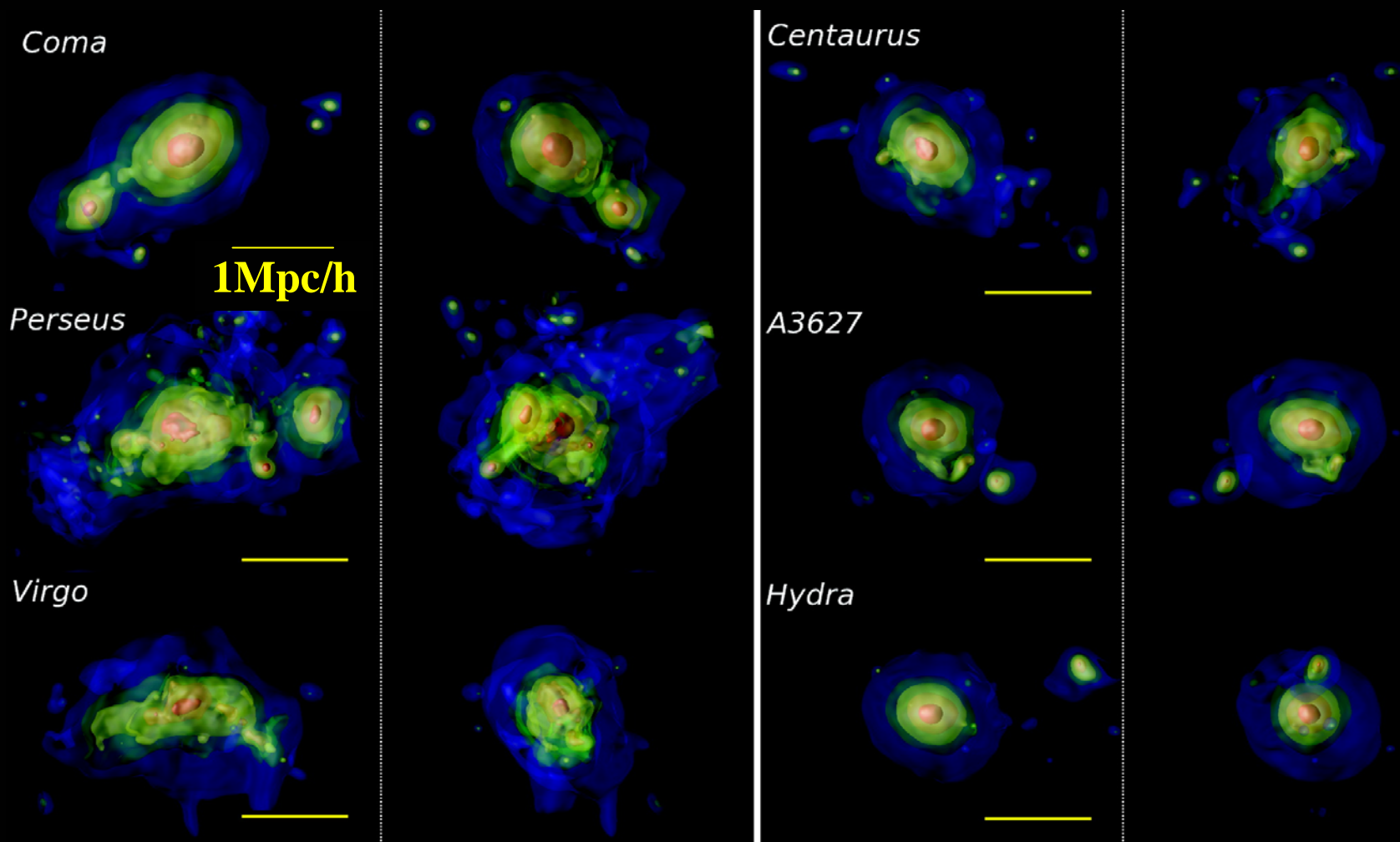
- 初期条件 : random-Gaussian
- ↓ 無衝突数値シミュレーション
- 重力非線形成長によって対数正規分布に近づく (> 数Mpcのスケール)

$$P_{LN}(\delta) = \frac{1}{(1+\delta)\sqrt{2\pi\ln(1+\sigma^2)}} \exp\left[-\frac{[\ln\sqrt{1+\sigma^2}(1+\delta)]^2}{2\ln(1+\sigma^2)}\right]$$

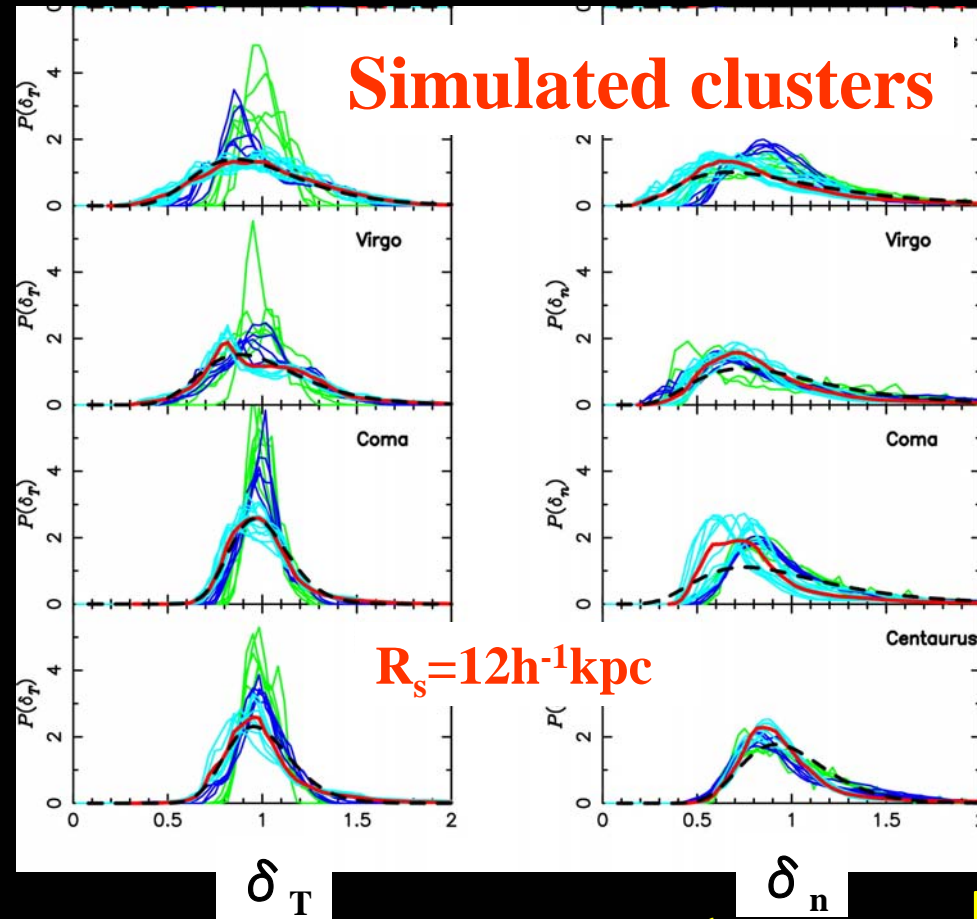
- 1点分布関数のみならず2点分布関数も同様にして記述できる
- 宇宙論的自己重力進化に対する非ガウス性の現象論的モデル

Kayo, Taruya & Suto, ApJ 561(2001)22

宇宙論的流体シミュレーションで得られた 銀河団のイメージ



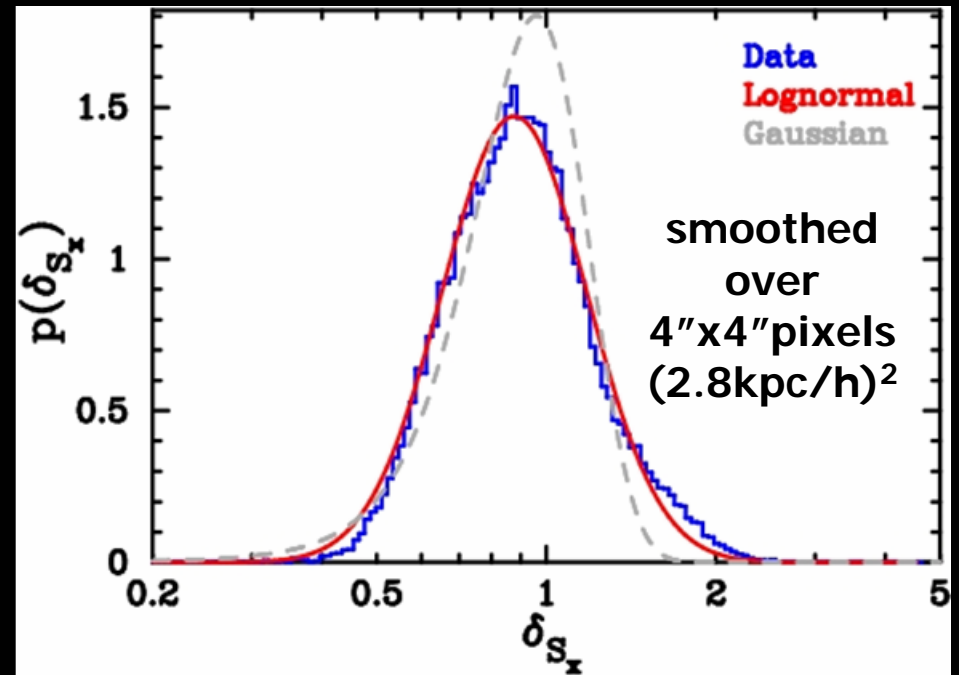
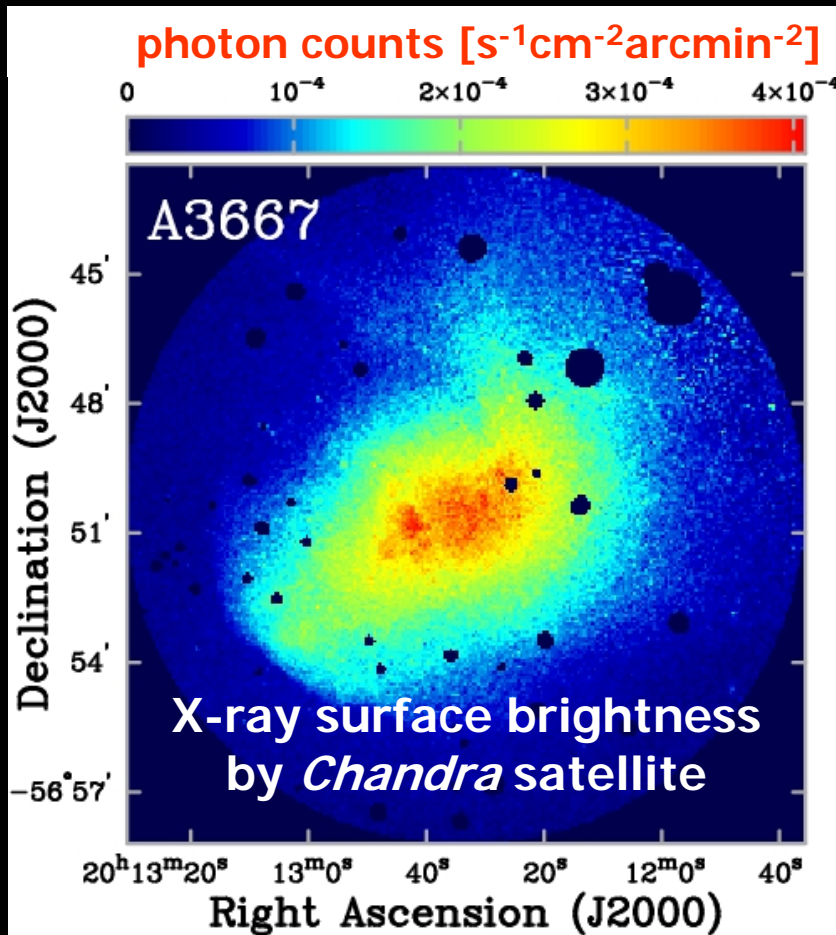
銀河団内物質の密度・温度ゆらぎ分布関数



- 同じ半径にあるが角度方向が異なる場所での密度・温度の非一様性
 - $\delta_n = n(r, \theta, \phi) / \langle n \rangle(r)$
 - $\delta_T = T(r, \theta, \phi) / \langle T \rangle(r)$
- 対数正規分布が(それなりに)良い近似

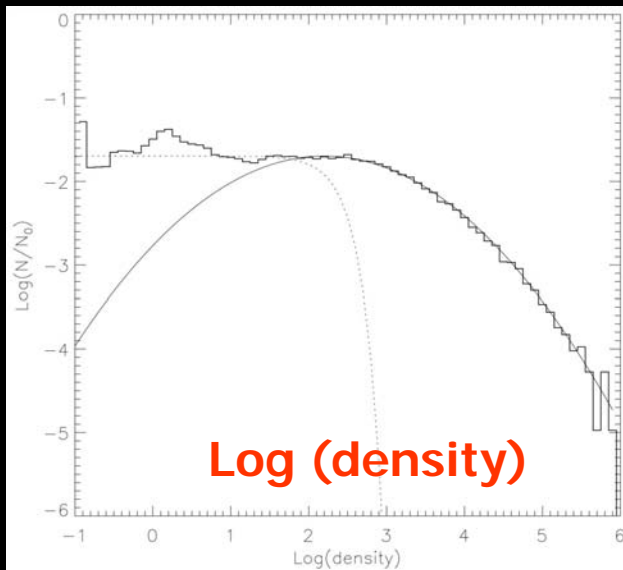
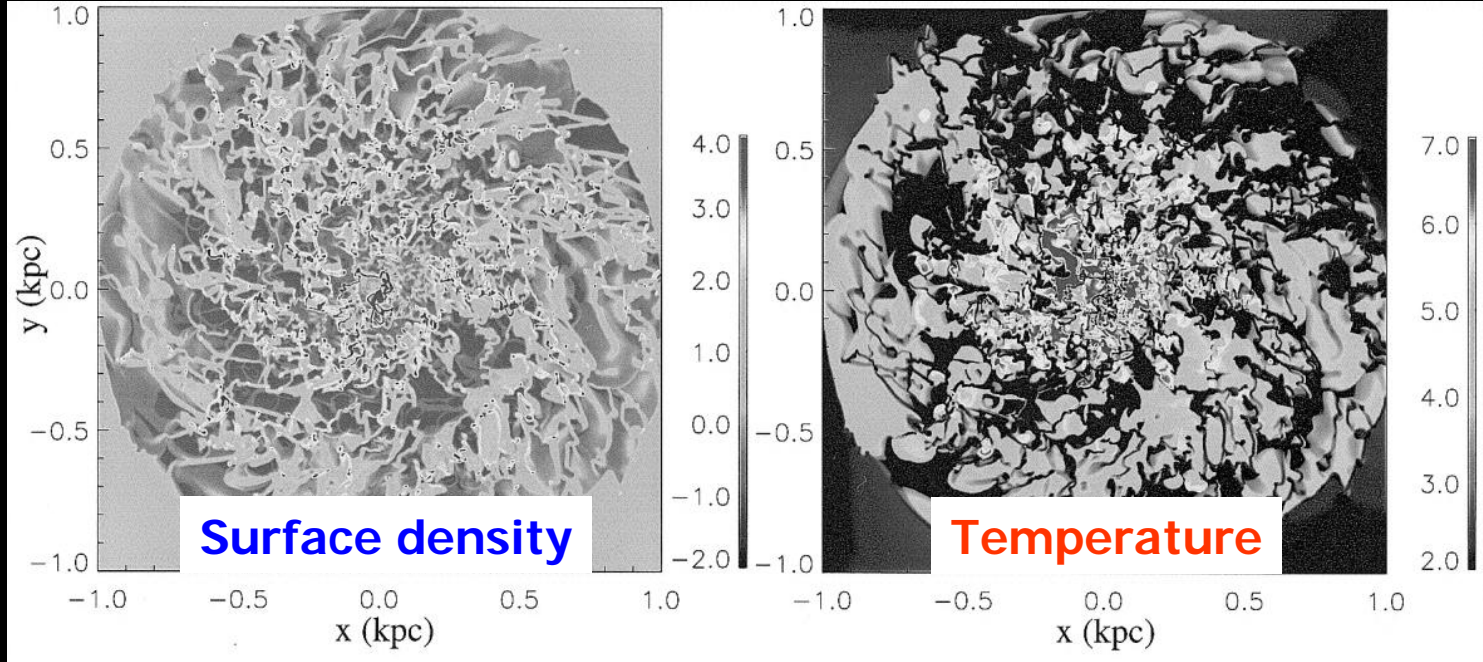
$$P_{LN}(\delta) d\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left[-\frac{(\log \delta + \sigma^2 / 2)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{d\delta}{\delta}$$

銀河団A3667の中心部のX線表面輝度分布と対数正規分布の比較



Kawahara, Reese et al. (2008) in preparation

銀河円盤中の星間物質の2次元流体シミュレーション



高密度領域は、約4桁にわたって対数正規分布でよく近似できる

Wada & Norman ApJ 547(2001)172

まとめ I : 密度ゆらぎの対数正規分布

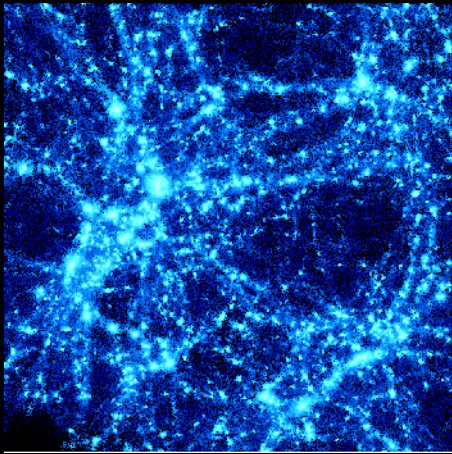
- 宇宙論的密度ゆらぎ (数Mpc以上のスケール:
 $0.1 < \rho / \langle \rho \rangle < 1000$)
- 銀河団内ガスの密度・温度ゆらぎ (数kpcから
1Mpcのスケール: $0.1 < \rho / \langle \rho \rangle < 3$)
- 銀河円盤中の星形成領域 (数pcから1kpcのス
ケール: $10^2 < \rho / \langle \rho \rangle < 10^6$)
- 宇宙・銀河団・銀河円盤の各階層の密度ゆら
ぎの進化に共通するのは自己重力

Ⅱ ダークマターハロー密度 分布プロファイルの普遍性

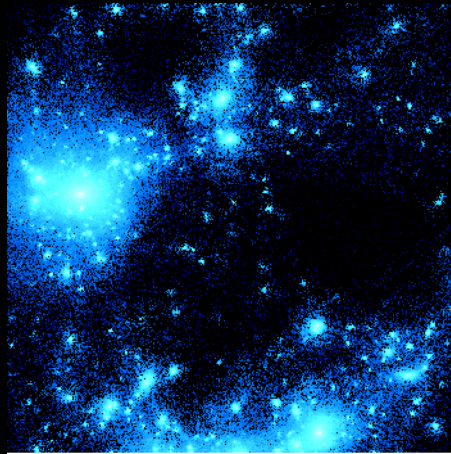
銀河や銀河団が誕生する場所： 暗黒物質が つくる自己重力系（ダークマターハロー）

Λ CDMモデルにおけるダークマターハロー形成シミュレーション

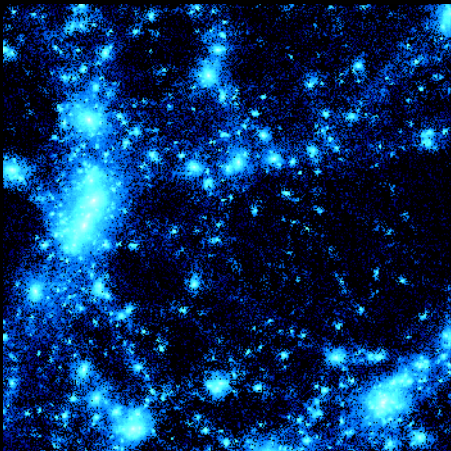
$z=4.2$



$z=1.0$



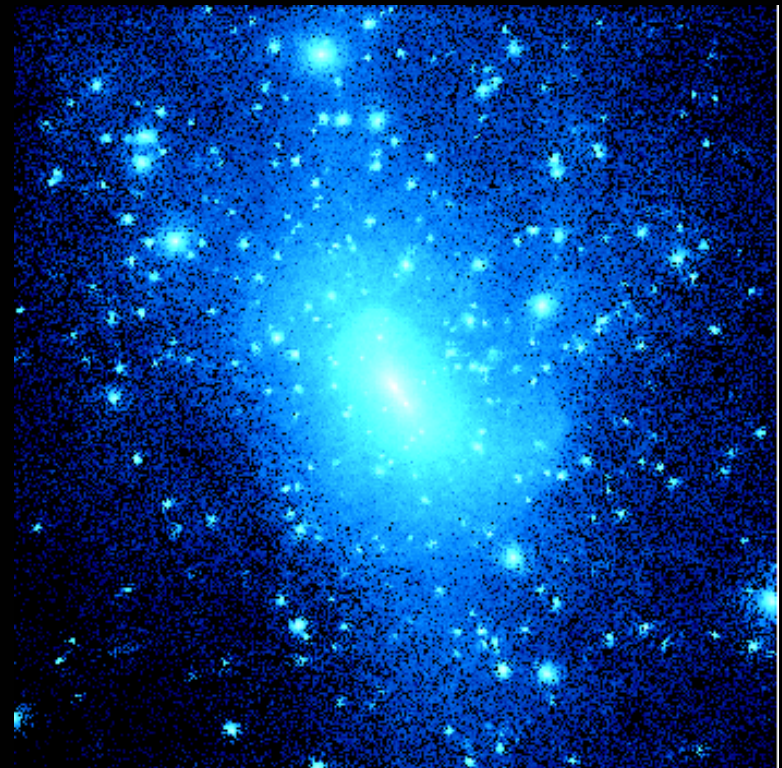
$z=2.1$



現在
($z=0$)

$3 \times 10^{14} h^{-1}$ 太陽質量

Jing & Suto (2000)



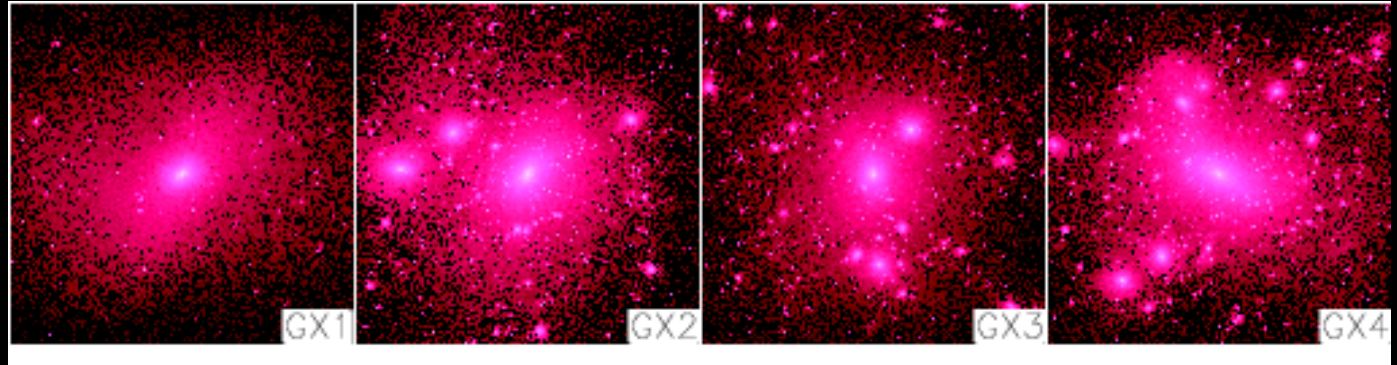
ダークマターハローの密度分布を 決めることの重要性

- **物理学的興味**: 宇宙論的自己重力系の最終（平衡？）状態は何か（そもそもあるのか）？
 - 初期条件を忘れるか、それとも覚えたままか
- **天文学的応用**: ダークマターの検証と宇宙論的予言の基礎モデル
 - 天体形成時の重力ポテンシャル
 - 天体の力学的質量推定（回転曲線、重力レンズ）
 - 銀河団のX線電波データモデル化
 - ダークマターの性質の検証、対消滅ガンマ線

質量・初期条件の異なるダークハロー シミュレーションの結果

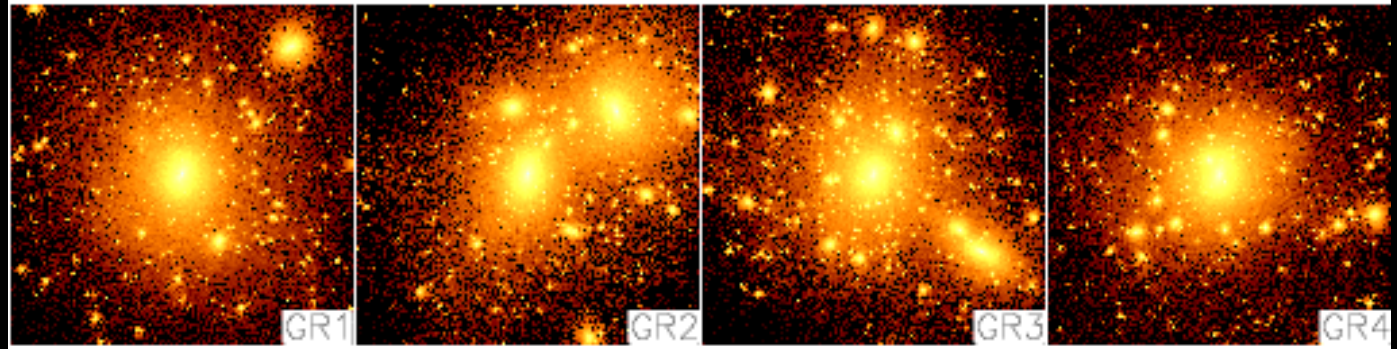
銀河

$\sim 5 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$



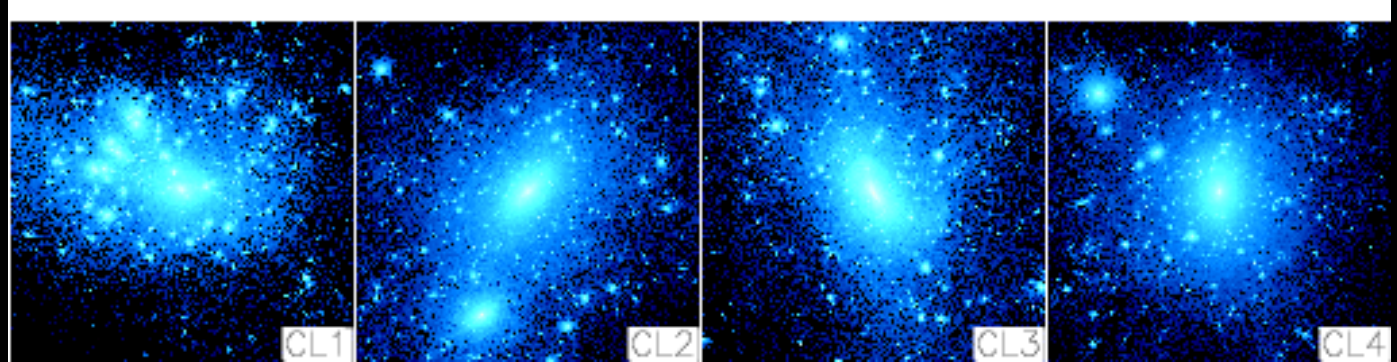
銀河群

$\sim 5 \times 10^{13} M_{\text{sun}}$



銀河団

$\sim 3 \times 10^{14} M_{\text{sun}}$

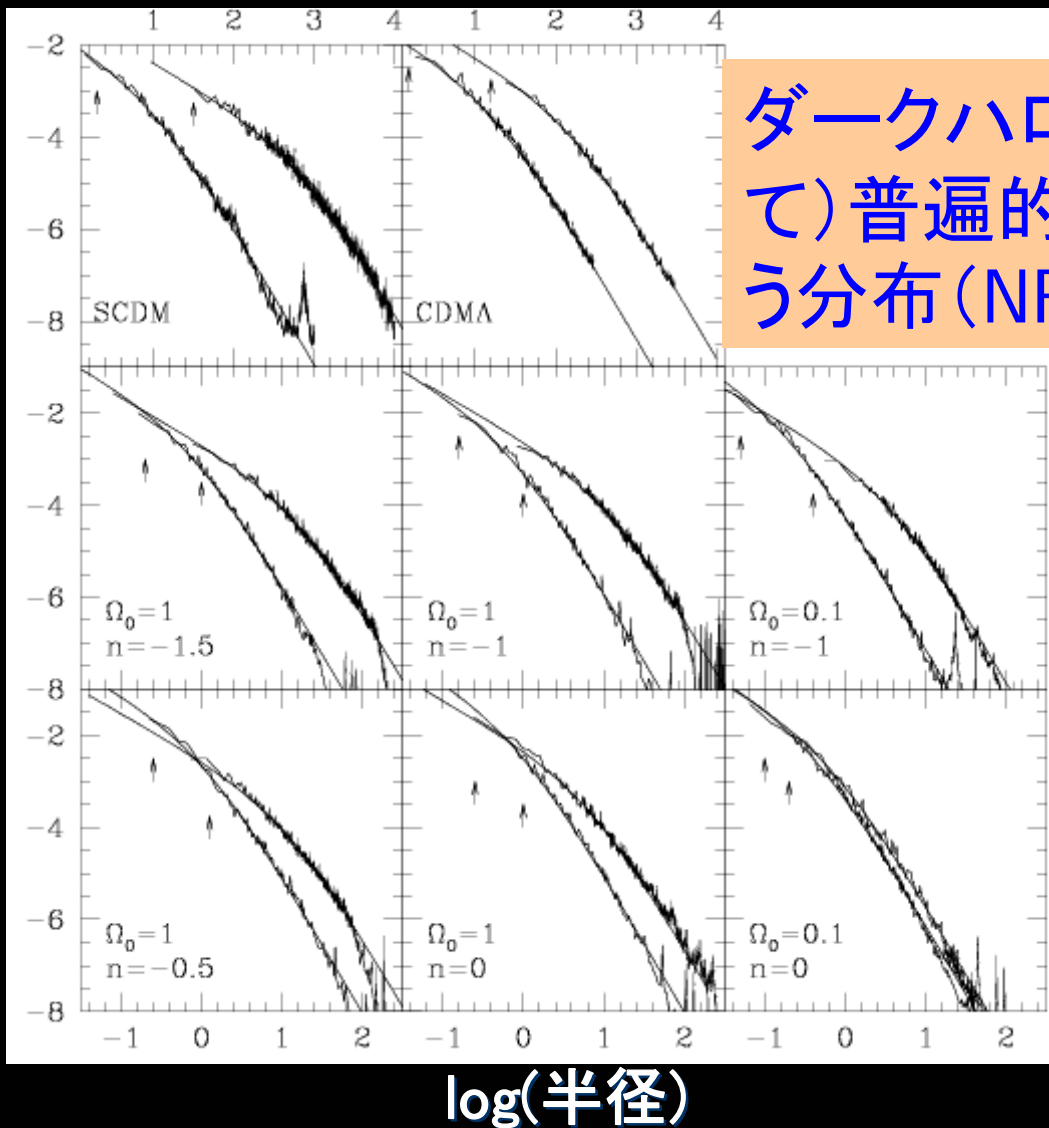


Jing & Suto (2000)

数値シミュレーションから得られた 密度プロファイルの普遍性

ダークハローは(初期条件を忘れて)普遍的なスケールリング則に従う分布(NFWプロファイル)となる

log(密度)



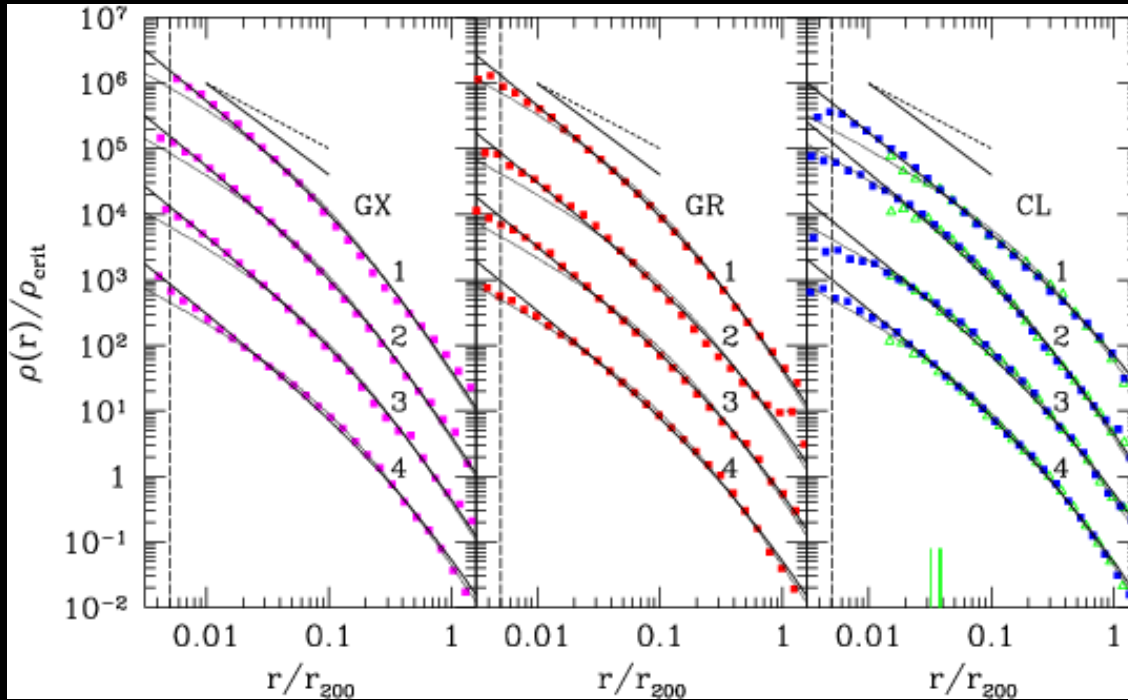
$$\rho(r) = \frac{\delta_c \rho_{crit}}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

$$c_{vir}(M) \equiv \frac{r_{vir}(M)}{r_s(M)}$$

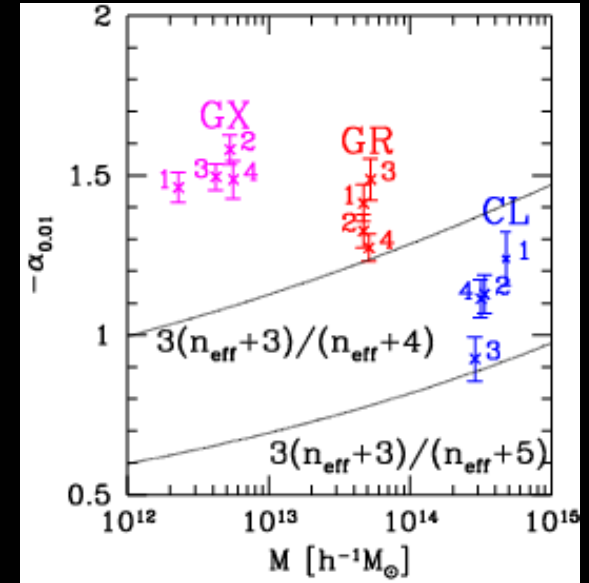
$$\delta_c(M) \equiv \frac{\Delta_{vir} \Omega_0 c^3}{3[\ln(1+c) - c/(1+c)]}$$

Navarro, Frenk
& White (1997)

数値シミュレーションのまとめ



Jing & Suto (2000)



- CDMハローの密度プロファイルはほぼ普遍的で、内側は $\propto r^{-1.5}$ 程度のカスプを持つ!

$$\rho(r) = \frac{\delta_c \rho_{crit}}{(r/r_s)^\alpha (1+r/r_s)^{3-\alpha}} \quad \alpha \approx 1.5$$

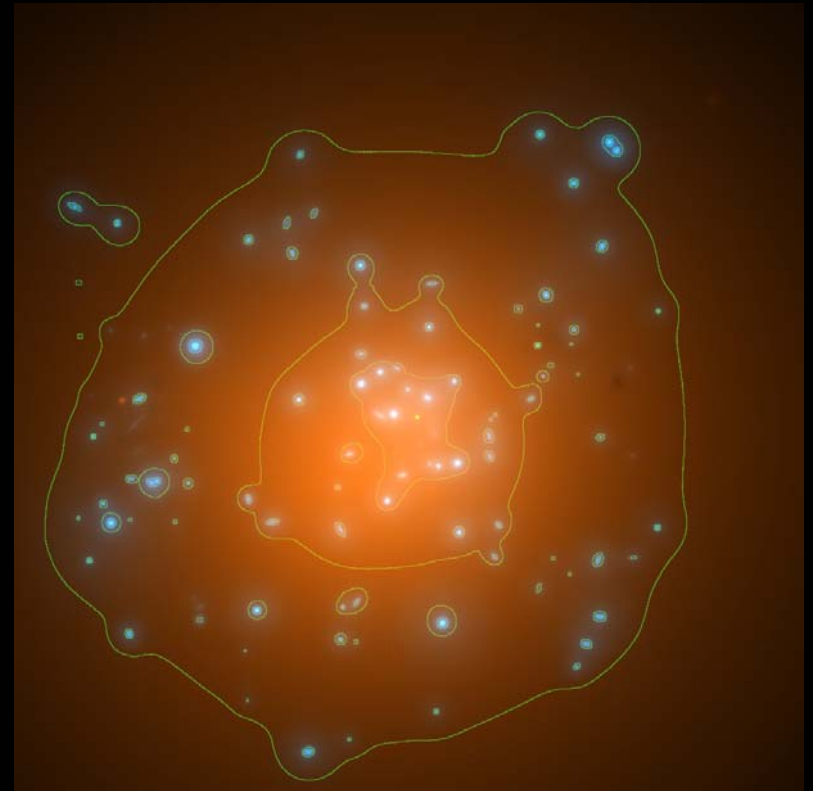
銀河団CL0024+1654の重カレンズ

HST image



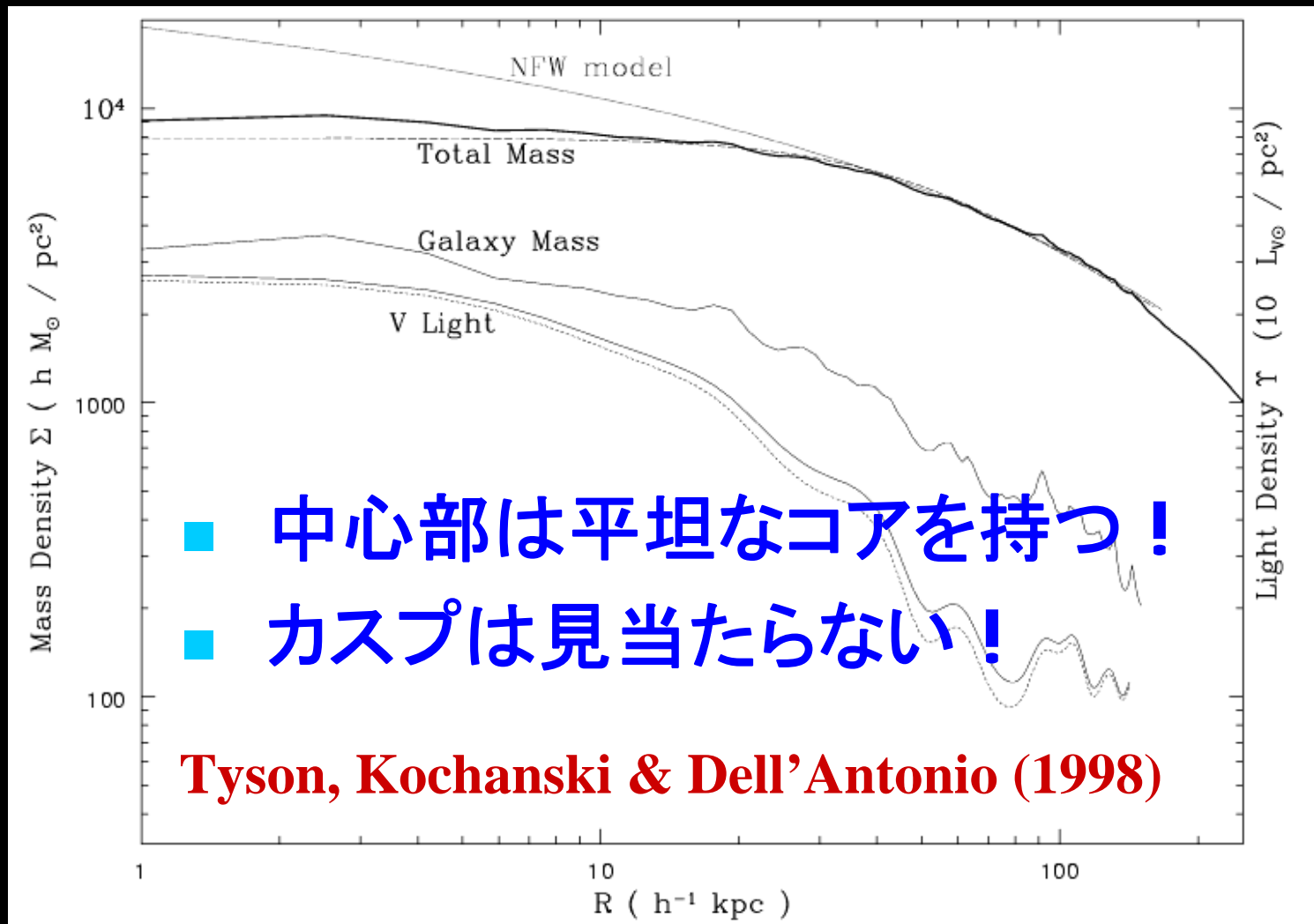
$Z=0.39$, $L_x=5 \times 10^{43} h^{-2} \text{ erg/s}$

reconstructed mass distribution
(with 512 parameters)

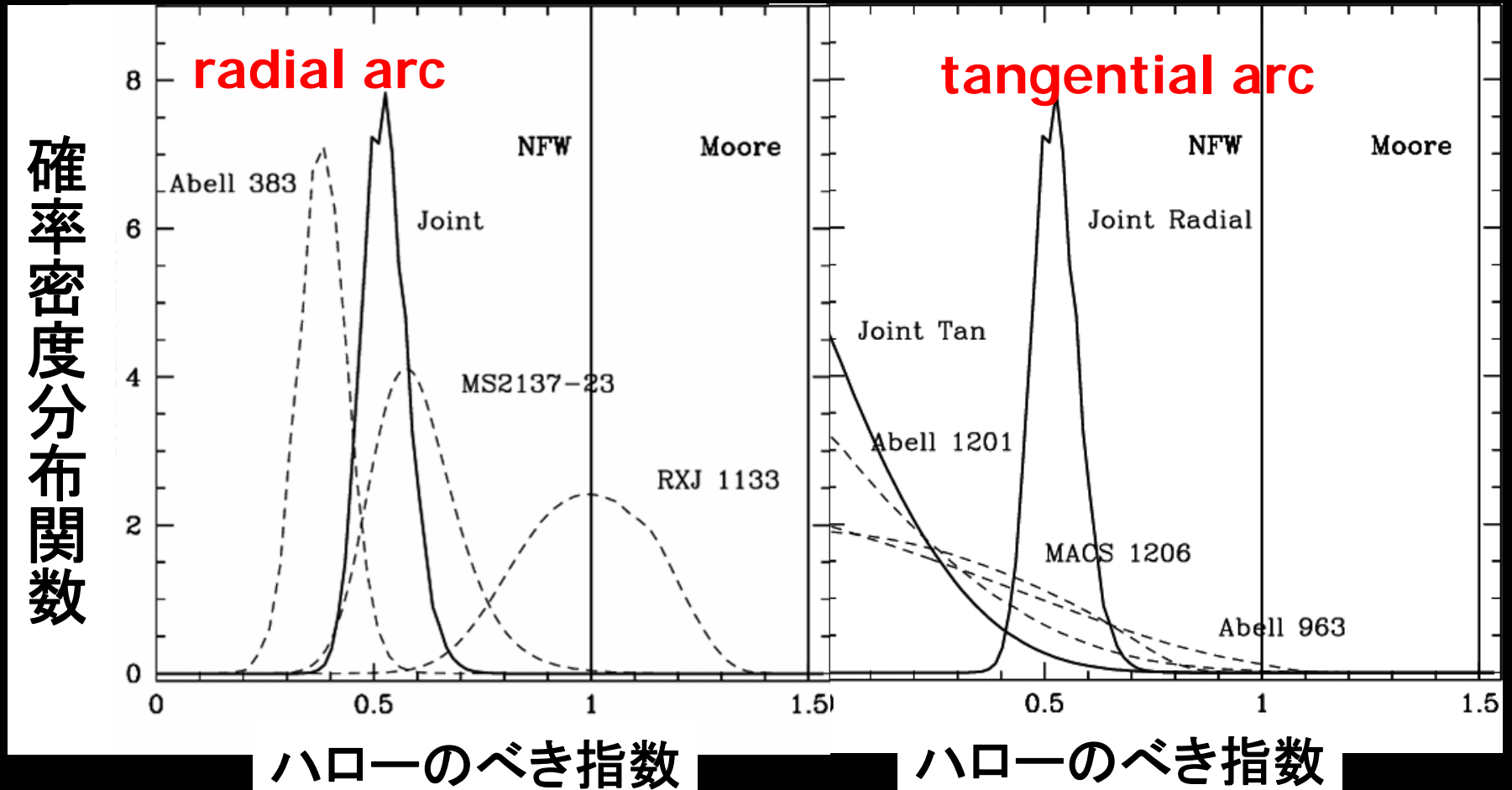


Tyson, Kochanski & Dell' Antonio (1998)

重カレンズデータから再構築された CL0024+1654の密度分布



銀河団中心部の重力レンズ観測データから推定されたハロー密度プロファイルのべき指数



Sand, Treu, Smith & Ellis (2003)

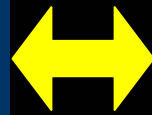
まとめⅡ： ダークマターハロー 密度プロファイル研究の現状

銀河・銀河団の中心部の観測
平坦なコアが存在、せいぜい弱いカスプ？



理論

普遍性の説明は困難
初期条件に依存？



シミュレーション

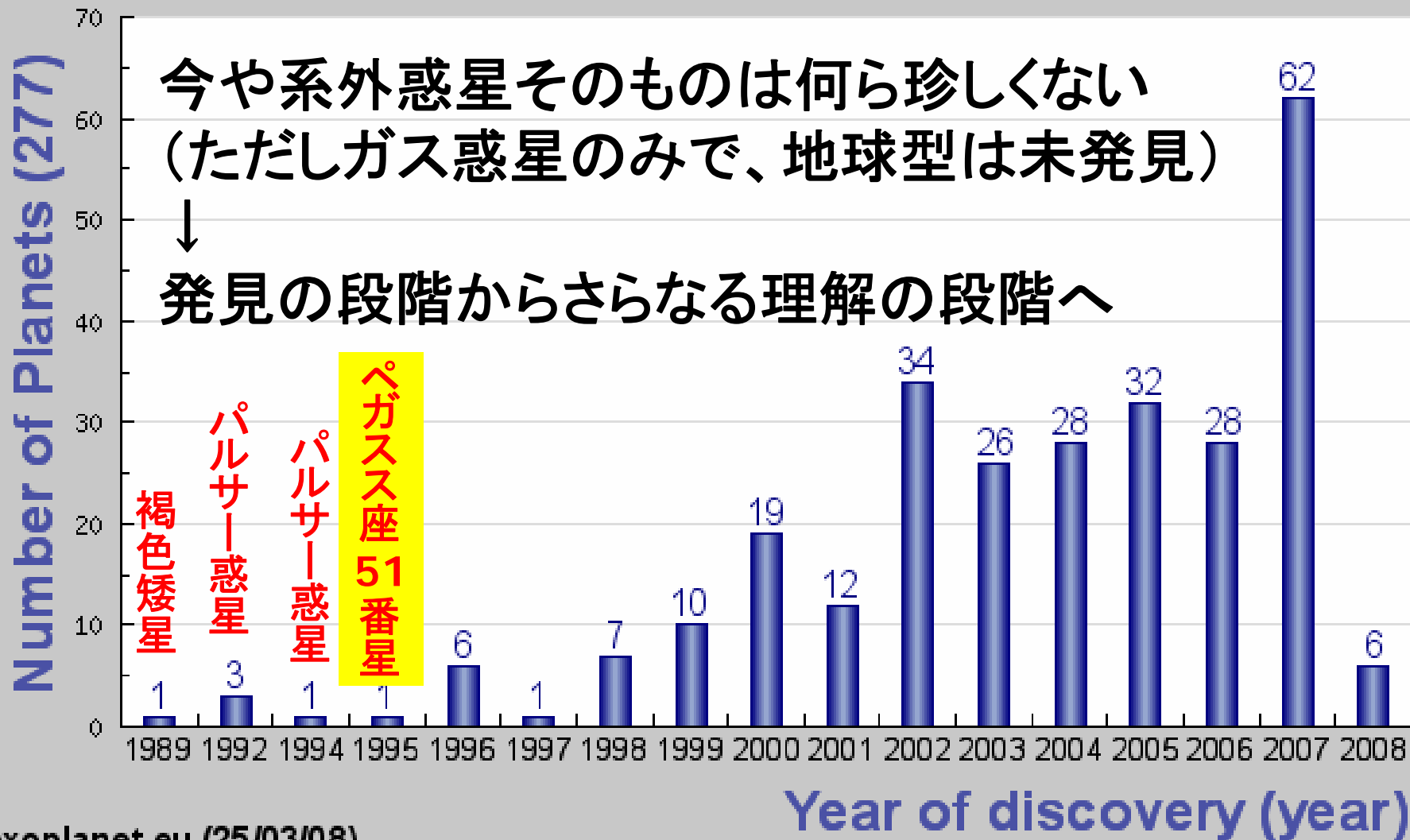
中心にカスプが形成(べき
指数は $-1 \sim -1.5$)

- 観測、シミュレーション、理論がすべて不整合
⇒ やっぱり物理的なモデルの構築が不可欠

Ⅲ 太陽系外惑星のバイオ マーカーと(本当の)宇宙天 気予報の重要性

太陽系外惑星（候補）の発見年表

Number of planets by year of discovery



発見された系外惑星（候補）の統計

検出法	惑星	惑星系	多重惑星系
ドップラー法	261	225	25
トランジット法	36	36	0
重力レンズ	6	5	1
直接撮像	5	5	0
パルサータイミング	5	3	1
総計	277	238	27

2008年3月26日時点 <http://exoplanet.eu/>

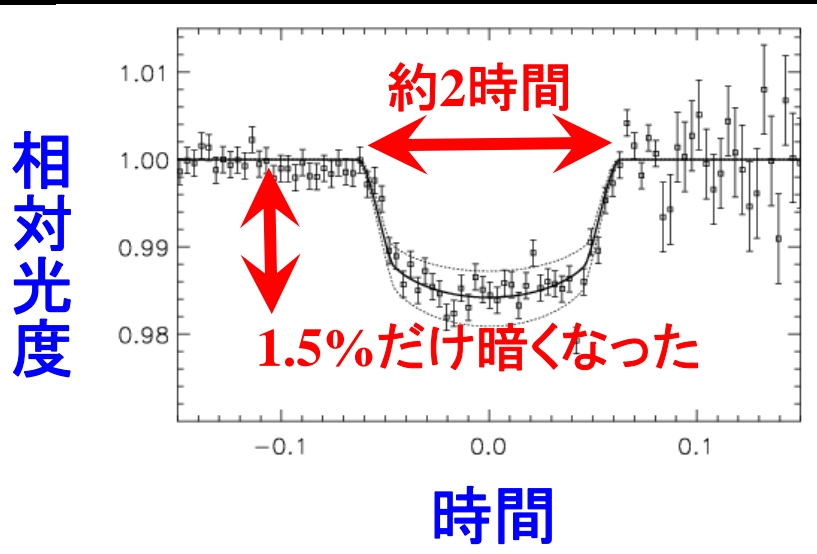
トランジット惑星とは



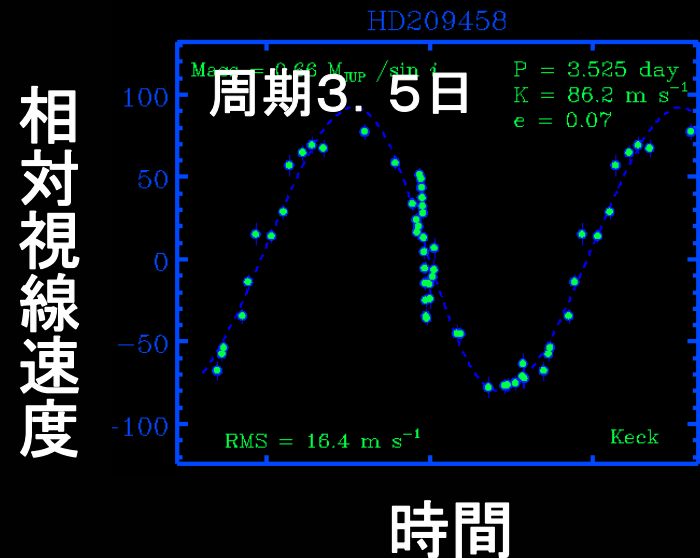
■ 惑星のシルエット観測

- 惑星軌道がたまたま恒星の前面を横切る
- 惑星系をより深く理解する重要な手段
- 2008年3月時点で、14個が知られている

地上望遠鏡による
HD209458の光度曲線



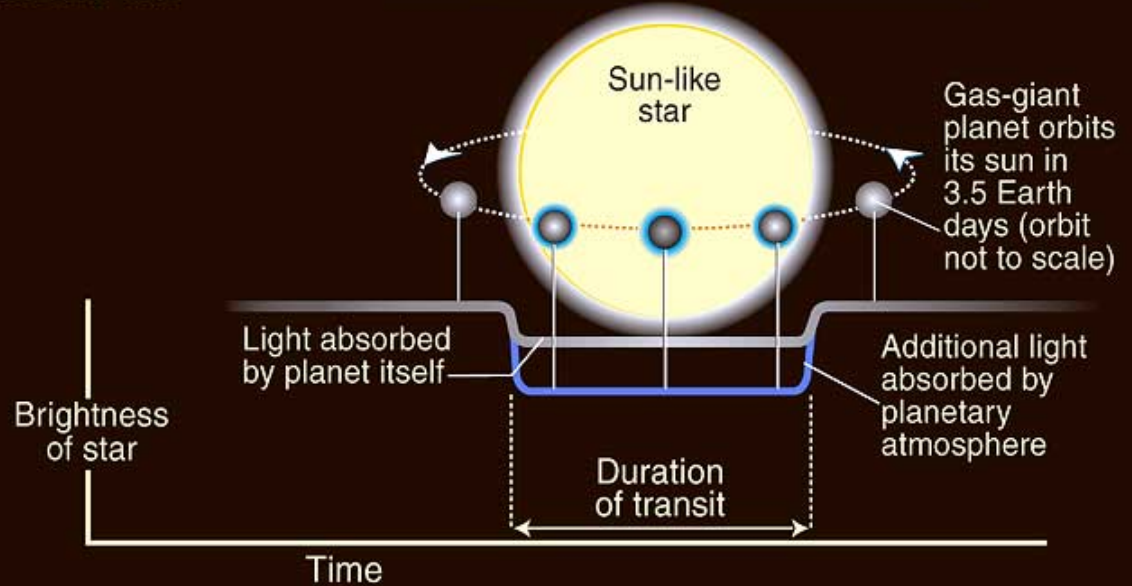
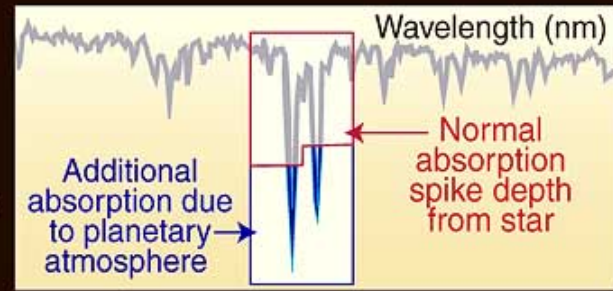
地上望遠鏡による
HD209458の速度時間変化



最初のトランジット惑星 HD209458b

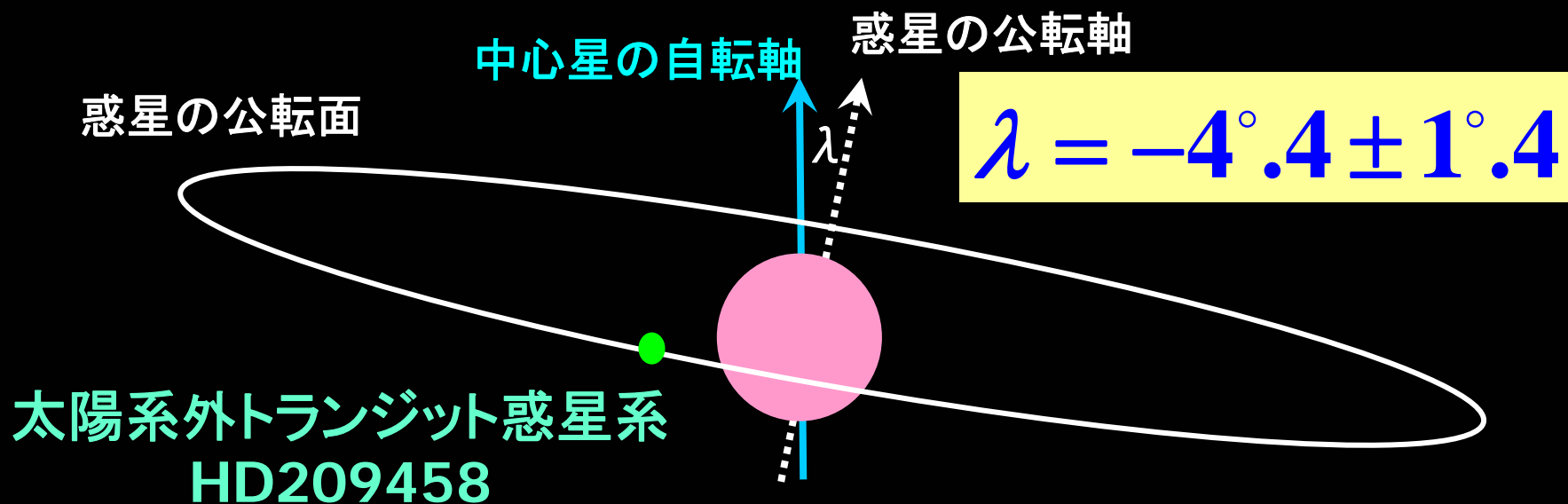
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/>

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



- 2000年 系外惑星のトランジットを初検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見

ロシター効果を利用したHD209458の 中心星自転軸と惑星公転軸のずれの発見

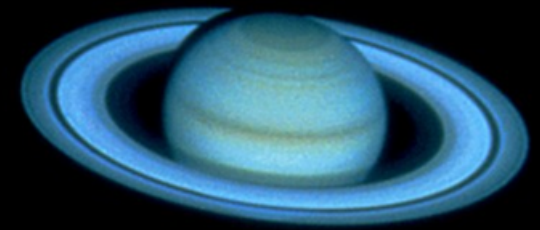


太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた

Ohta, Taruya & Suto: ApJ 622 (2005) 1118 摂動論によるモデル化

Winn et al.: ApJ 631 (2005) 1215 実際のデータ解析

トランジット惑星と原子模型 “長岡半太郎に学ぶ階層性”



■ 長岡の土星型原子モデル

- Nagaoka, H. : Phil. Mag. 7(1904) 445
- 量子論の先駆け

■ トランジット惑星

- 惑星の軌道角運動量 (L): 視線速度
- 主星のスピン (S): ロシター効果
- 惑星のスピン (s): リング、衛星

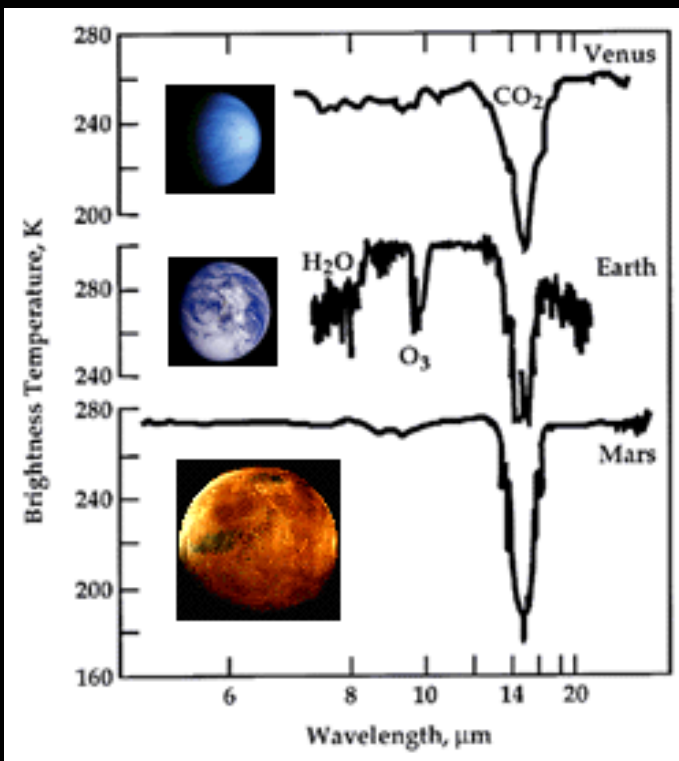
■ 惑星系から原子物理学へ

■ 原子物理(分光)学から惑星系へ



写真 2: 長岡半太郎 (1865-1950)

太陽系外惑星： そのさきにあるもの “天文学から宇宙生物学へ”



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、植物、核爆発、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に
生物が存在するかどうかを天文観測だけで説得
できるか？ Biomarker を特定できるか？

やっぱりSETIか？

バイオマーカー（生物存在の証拠）の同定

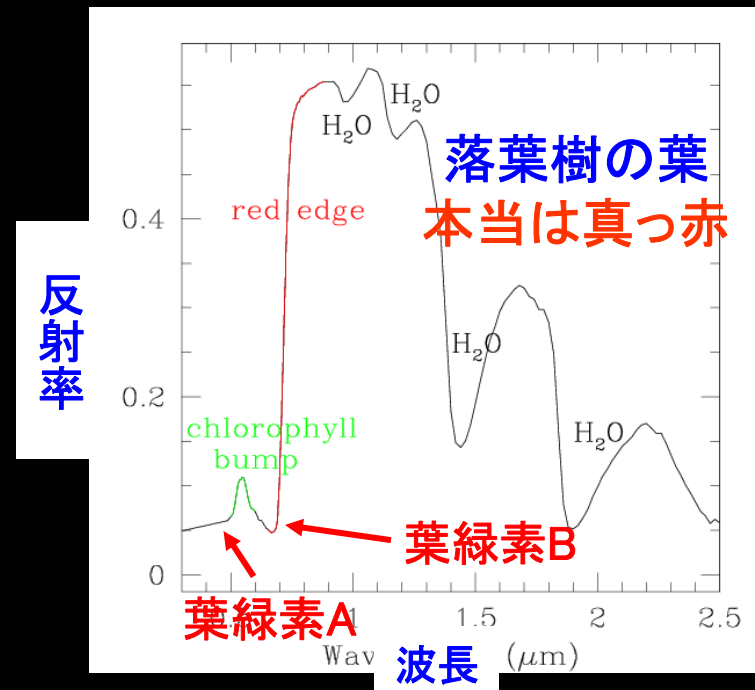
- (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

■ Biomarker の探求

- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物のred edge
- *Extrasolar planets from extrasolar plants (E. Turner)*
- とにかく超精密分光観測

■ やっぱりSETIか?

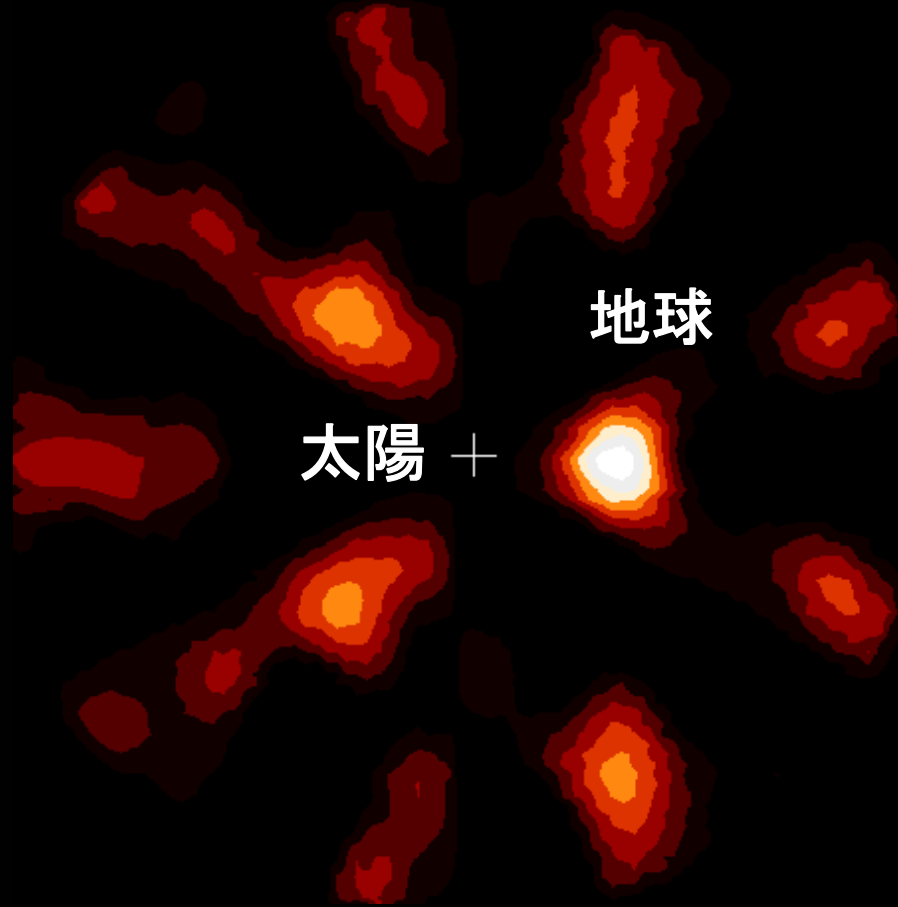
- 可能性は低くともこれ以上に確実なものはない
- まっとうなバイオマーカーではやはり隔靴搔痒



ダーウィン衛星

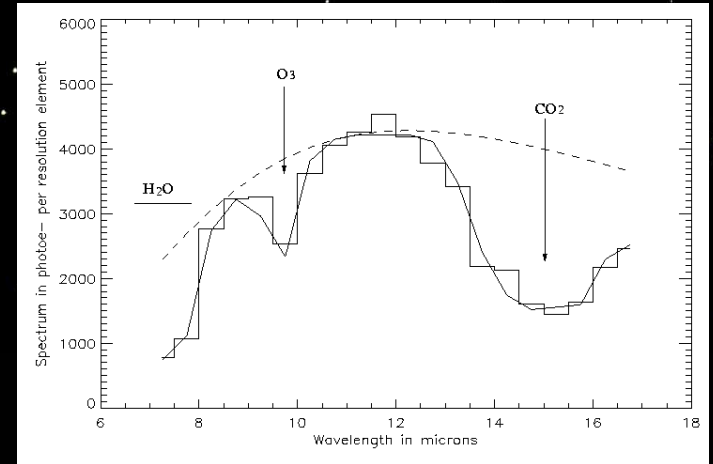
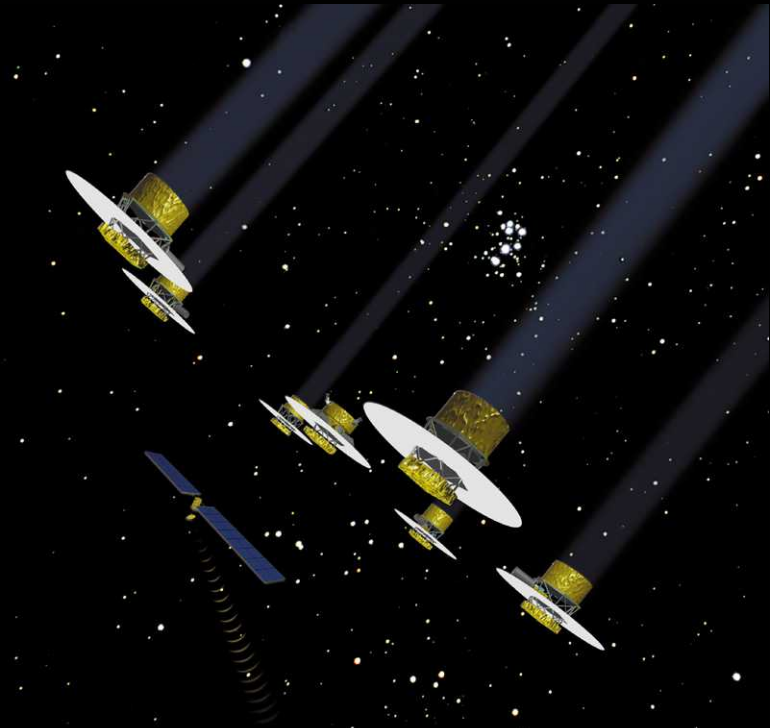
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



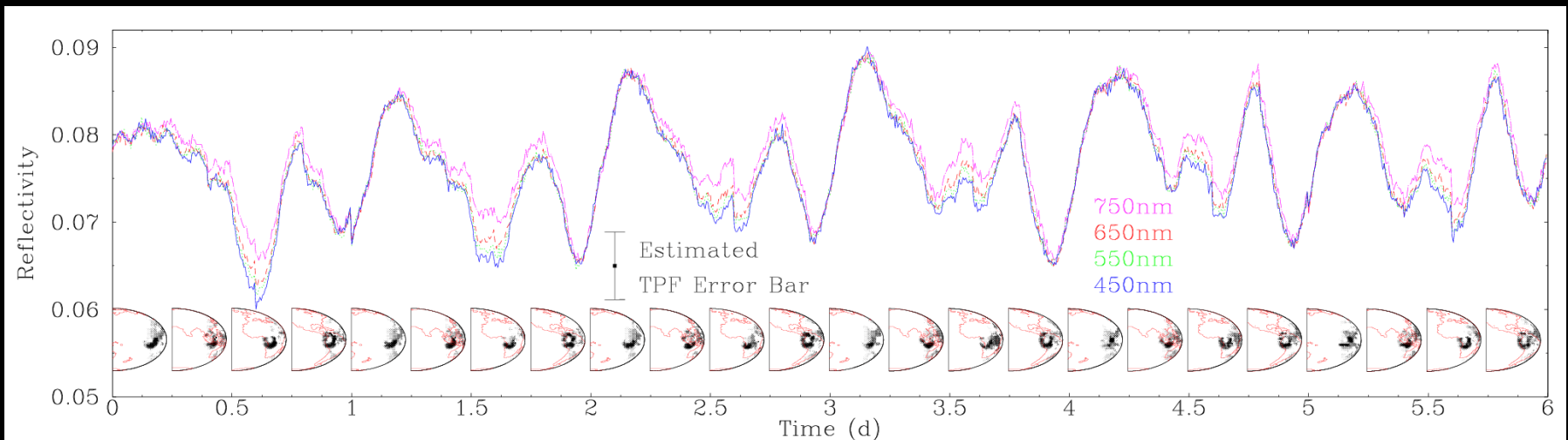
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>



宇宙赤外線干渉計群
測光分光観測

30光年先に双子の地球がある として、生物の痕跡を同定 できるか？



Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **10%レベルの日変化は検出可能**
 - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- **雲の存在が鍵**
 - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

まとめⅢ： 太陽系外惑星に対する"宇宙" 天気予報の重要性

- 仮に生物が存在したとしても、大気が厚い雲で覆われていれば、外から観測することは困難
- 雲の時間変動を予報できなければ観測データを正しく解釈できない
- 中心星のスペクトル型、公転半径、自転軸傾斜角、大気組成などを与えた場合、惑星の表面がどの程度観測できるか(雲が覆う割合)を理論的に予想することは可能か
- やっぱりSETIか、、、

おまけ：トランジット惑星とSETI

- トランジット惑星はめったにない (~15/300、5%程度)
- 見つければ、長時間モニターする(される)のは当然
- 他の文明がその存在を知らせたいならば、トランジットが観測できる天体に向かって選択的に信号を発しているはず
 - トランジット惑星を電波(21cm)で観測してほしい
 - 我々も地球がトランジット惑星として観測される方向の天体に向かって常に信号を発するのがマナー
- **性善説**：他の文明と知り合うことで、互いに心が豊かになる。これを通じて地球が平和になる。
- **性悪説**：圧倒的に強大な他の文明の餌食となり破滅
 - SETIの信号は邪悪な文明からのspam-mailかも
 - 決して返信してはいけない。ましてや、自らのアドレスを無防備に知らせまくるのは愚の骨頂か？