Cluster of Galaxies Dark Matter の階層構造 (?)

牧野淳一郎
東京大学大学院総合文化研究科

概要

1. 前おき
2. 観測とその解釈
3. 観測の解釈の解釈
4. 数値実験とその解釈
5. 数値実験における困難
6. まとめ

前おき

なぜ銀河団暗黒物質の階層構造という話をするのか？

- 観測的にそういう話がいろいろある
  - 牧島さんのグループによる一連の観測 (Fornax, Hydra A, A1060 等)
    「X 線ガスとダークマターに 2 成分ある」
- 理論
  - Hierarachical Clustering シナリオ — なんか関係ありそう？
  - 銀河団ダークハローの構造に関する「新しい結果」
    Navarro, Frenk, White による "Universal Profile"

どうも観測 — 数値実験 — 解釈 (理論) の関係がすっきりしない。
一応、全体を再構成して、いったいどういう話かを考え直してみる。

「観測事実」

「階層構造」

- Ikebe *et al.* ApJ 481, 666 (1997)

Hydra A クラスタの ASCA による観測

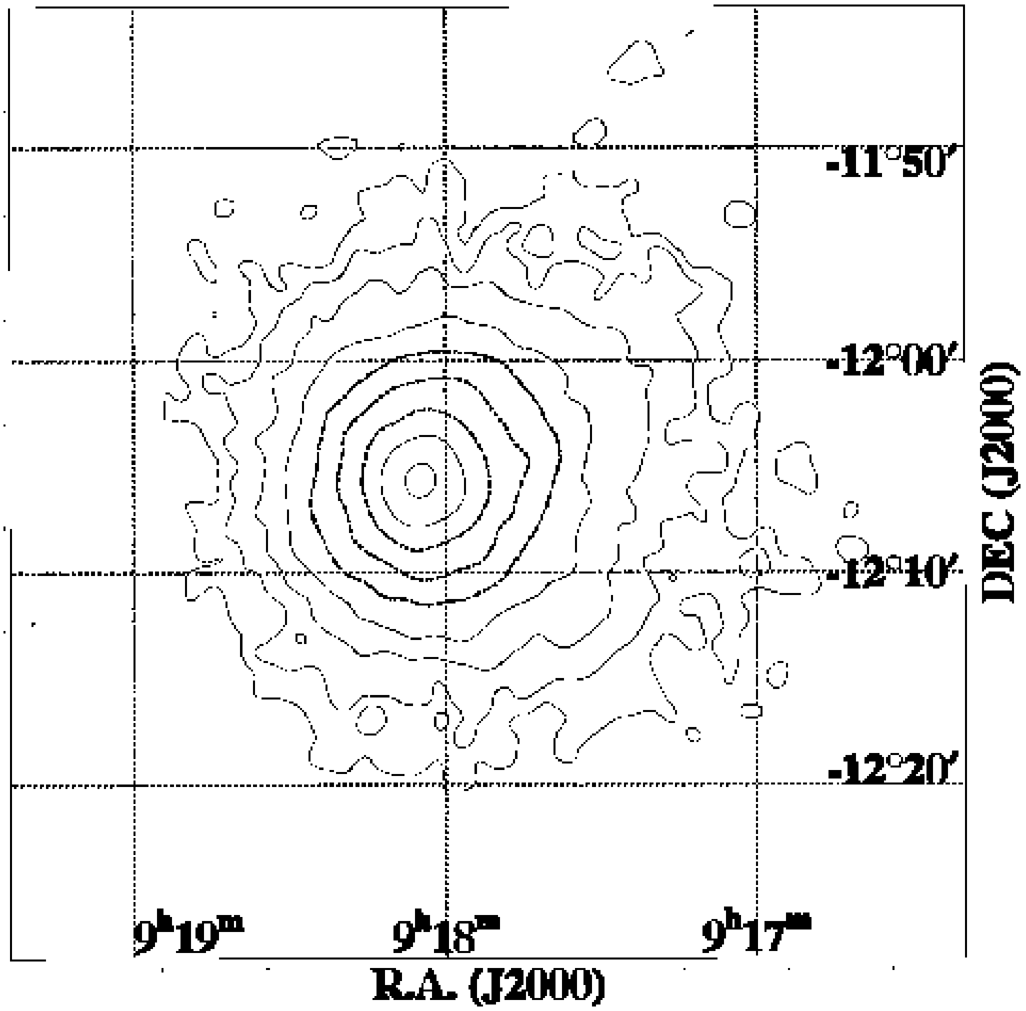


FIG. 1.—X-ray intensity contour map of the Hydra-A cluster obtained with the GIS. The background-subtracted image was convolved with a Gaussian of 1′ FWHM. The contours are logarithmic, where each step corresponds to a multiplicative factor of 2.

Hydra A の X 線ガスの構造

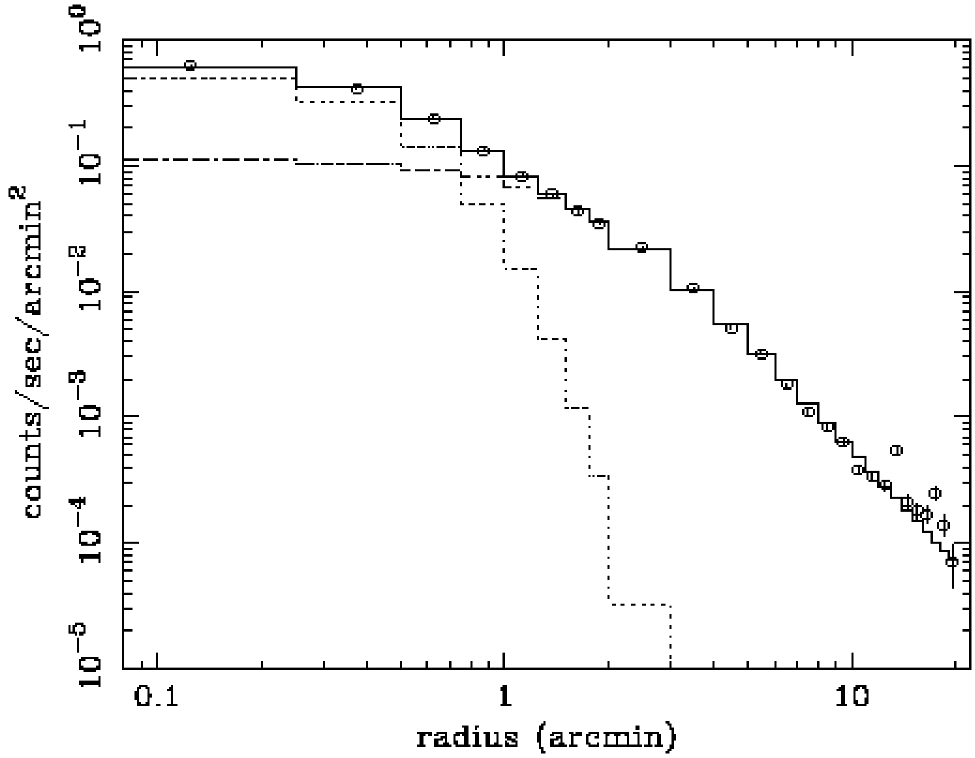


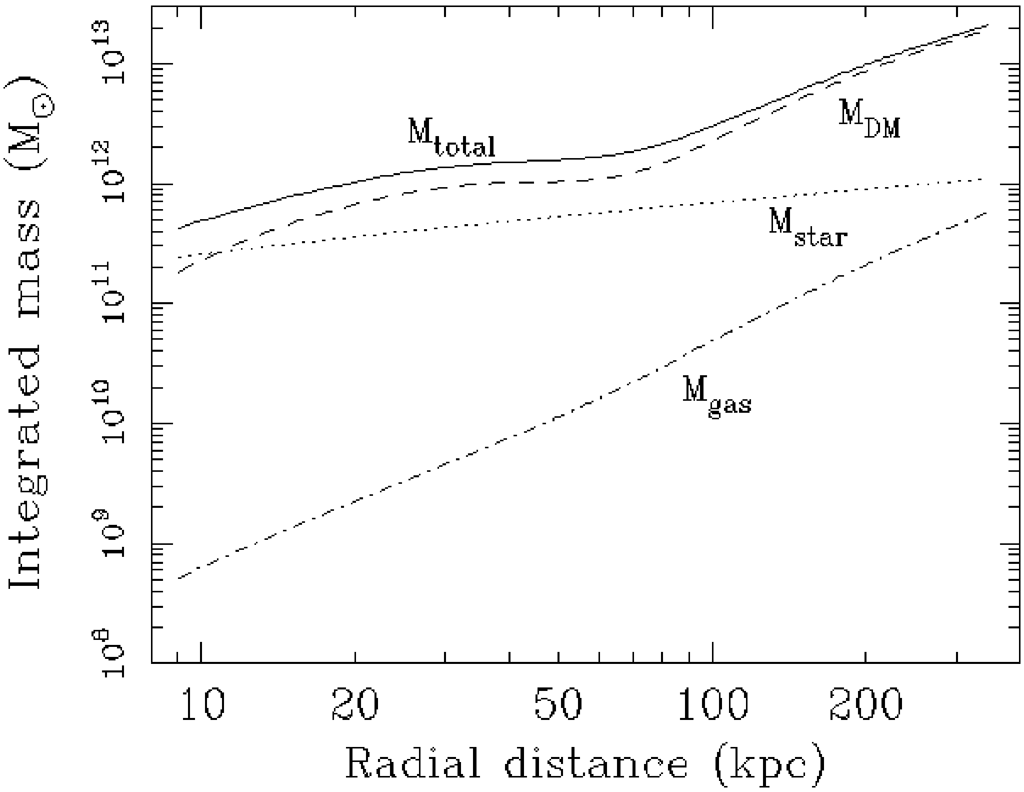
FIG. 8.—Background-subtracted PSPC radial profile fitted with the double β model. Open circles represent the data, and histograms the models.

"Single β モデルではフィットできない"

"Double β モデルではフィットできた"

Fornax 銀河団のダークマターの構造

（池辺、博士論文）



50—100 Kpc あたりで落ち込む

= 力学的に独立な 2 つの構造？

- Hydra A, Centaurus でも同様の結果 (Ikebe *et al.*)
- いくつかの楕円銀河でも同様の結果 (Matsushita *et al.*, NGC4636)

楕円銀河、銀河団に普遍的な構造？

別の解釈 = Cooling Flow

理論的には：

- 中心で「温度が下がっている」
- 中心で Cooling time が宇宙年齢より短い

→ 放射で失われているエネルギーを、内向きのガスフローで供給する必要がある。
= Cooling Flow

問題点

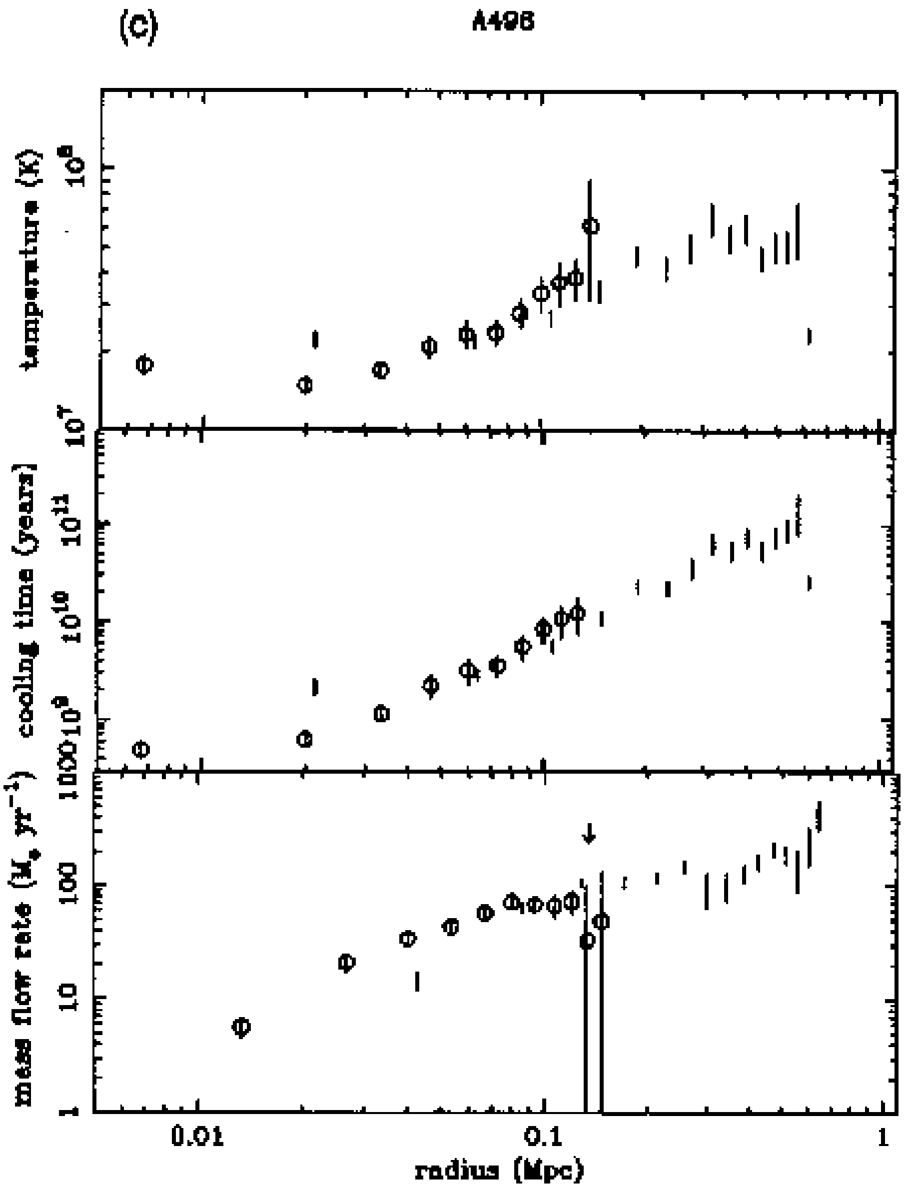
- 中心にいったガスはいったいどうなるのか？
- それ以外の解釈はないのか？

Cluster	Cooling time (Gyr)	Mass flow $M\odot$/yr
Centaurus	0.5	20
A1060	2.2	10
Hydra-A	1.8	300

Cooling Flow Cluster の例

Edge *et al.* MNRAS 1992, 258, 177

EXOSAT + EINSTEIN, A496



- 典型的には中心で 1 桁近く温度が下がる

解析はなにをやっているのか？

疑問：

「階層構造」と「Cooling flow」：いったいどういう関係なのか？
要するに、それぞれどうやって解析しているのか？ということ。

＝「β モデルとは何か？」ということ

どちらのモデルも、「β モデルで合わないものを説明する」という論理になっている。

通常の説明：

β モデルとは

- 等温分布のダークハロー（星も合わせて）
- 等温ガス
- 速度分散の比 $= \beta$

β モデルとは何か？

等温分布の方程式：

$$\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\log\rho}{dr}\right) = -\frac{4\pi Gm}{k_BT}\rho r^2$$

ガスの速度分散 = 恒星系の速度分散なら、ガスの方程式：

$$\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\log\rho_g}{dr}\right) = -\frac{4\pi Gm}{k_BT}\rho_s r^2$$

（ρ_s は星と DM の合計）

解：

$$\rho_g = C\rho_s$$

ガスと恒星系（無衝突物質）の温度比：$T_g/T_s = 1/\beta$

ガスの密度が従う方程式：

$$\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\log\rho_g}{dr}\right) = \beta[\text{上の式の右辺}]$$

解：

$$\rho_g = C\rho_s^{\beta}$$

温度が高ければ等温解に比べて傾きが緩くなり、低ければより急になる。

等温解と β モデル

以下の質量分布

$$\rho = \rho_0[1 + (r/r_c)^2]^{-3/2}$$

を考える。
これは $r < 2.5r_c$ 程度ならば等温解の非常によい近似になっている。
これを恒星系の分布と思えば、ガスの分布は

$$\rho = \rho_0[1 + (r/r_c)^2]^{-3\beta/2}$$

と解析関数で書ける。 X 線の強度は、これは密度の 2 乗を視線方向で積分したものと思っていい。つまり

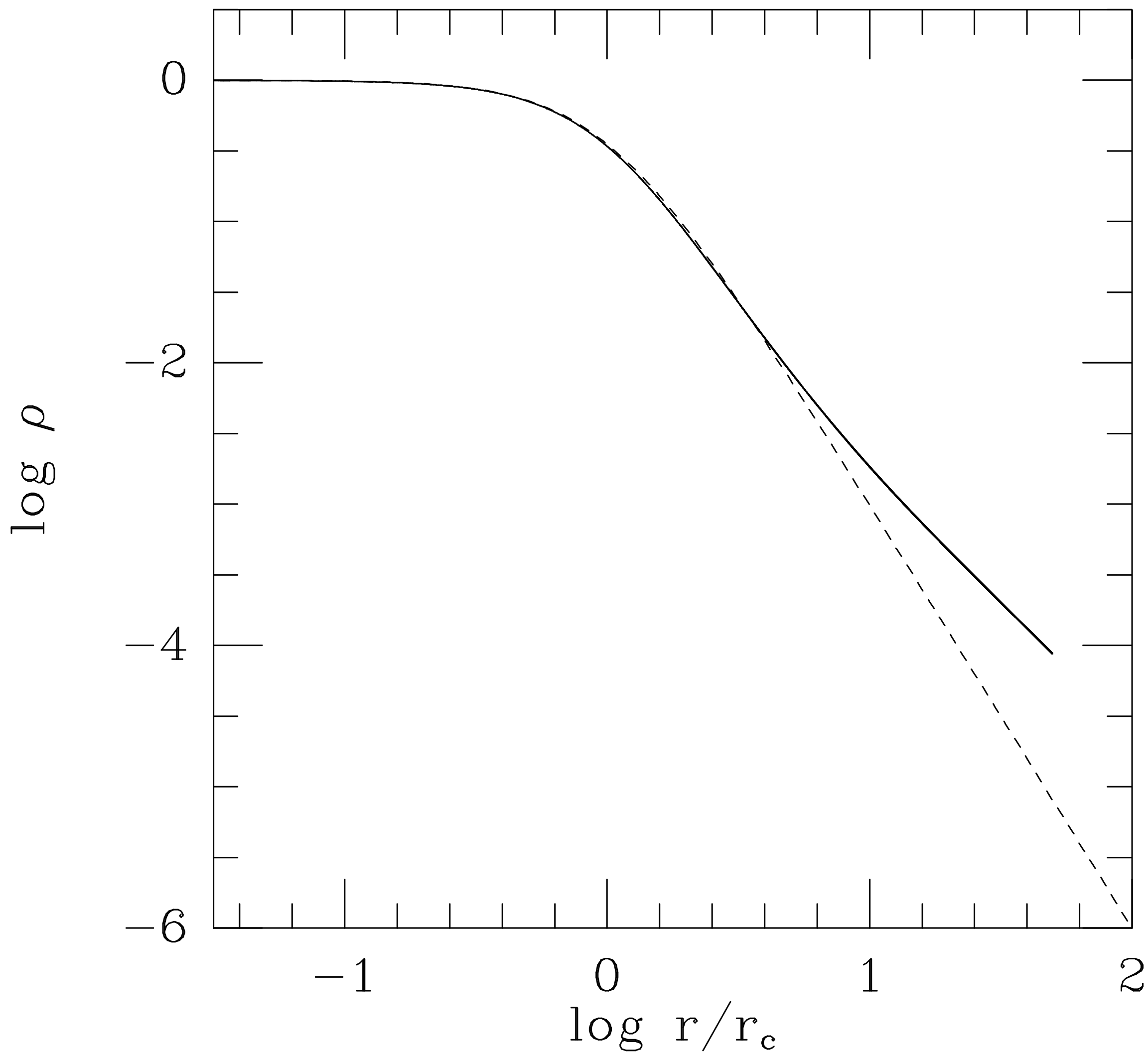
$$I(r) = 2\int_0^\infty \rho(\sqrt{r^2 + z^2})^2 dz$$

となるわけだが、これは積分できて、

$$I(r) = C[1 + (r/r_c)^2]^{-3\beta+1/2}$$

$r > 3r_c$ では？

等温解と β モデル



実線：等温解

破線：β モデル

結構すぐに合わなくなる

「階層構造」の論理

「単一 β モデルでは合わない」

→ 残りをもう一つ β モデルを持ってきて合わせる
→ ダブル β で合わせると観測結果は誤差の範囲で説明出来る
「もっとも単純なモデル」

<u>問題点</u>

ダークマター（＋星）の分布に β モデルを仮定する必然性はない
「β モデルを 2 つ重ねる」ことの物理的な意味が明確でない。
$r > 3r_c$ でもそのまま使われている
2 つ重ねるから、滑らかにならない = DM 分布の「階層構造」の起源

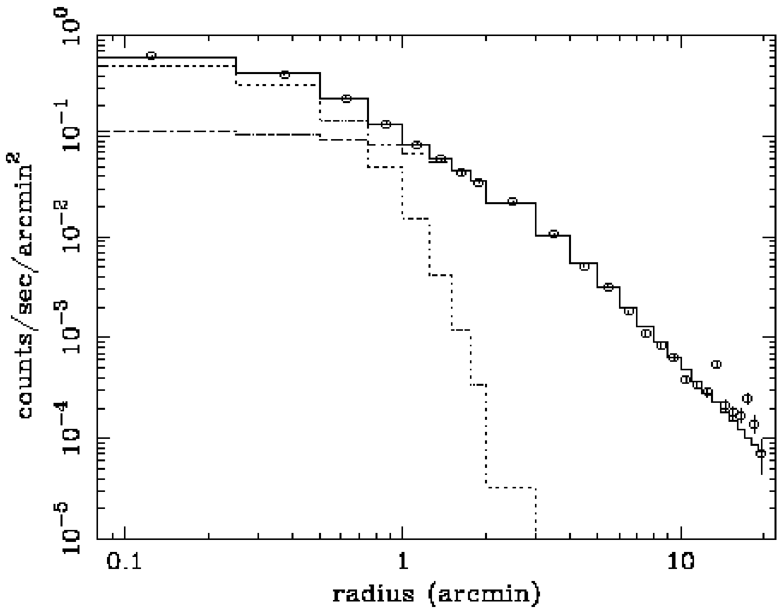


FIG. 8.—Background-subtracted PSPC radial profile fitted with the double β model. Open circles represent the data, and histograms the models.

「Cooling Flow」の論理

「単一 β モデルでは合わない」

$\rightarrow$ ずれは温度分布のせいであるとする
$\rightarrow$ 温度がきちんと決まっている観測はないので、あらゆる観測に合わせられる

<u>問題点</u>

ダークマター（＋星）の分布に β モデルを仮定する必然性はない
$r > 3r_c$ でもそのまま使われている
「Cooling Flow」?

原理的な問題点：温度が決まってない
ASCA の分解能ではほとんどの銀河団で中心を分解できない
ASCA で温度を決めるのは非常に難しい（PSF が複雑怪奇）
EINSTEN, ROSAT は温度がわからない（$3 \sim 4$keV あたりまでしか測れない）

確実にいえること：
「ダークマターの分布は β モデルとはだいぶ違う」

数値実験とその解釈

観測は難しそうなので、理論（数値実験）でなにかいえないか？

宇宙論的 N 体計算で銀河団のダークマター分布がどうなるか調べよう！

Navarro, Frenk, White (1996, 1997)

「高分解能」N 体計算でなにが出来るか調べた

結果："universal profile"

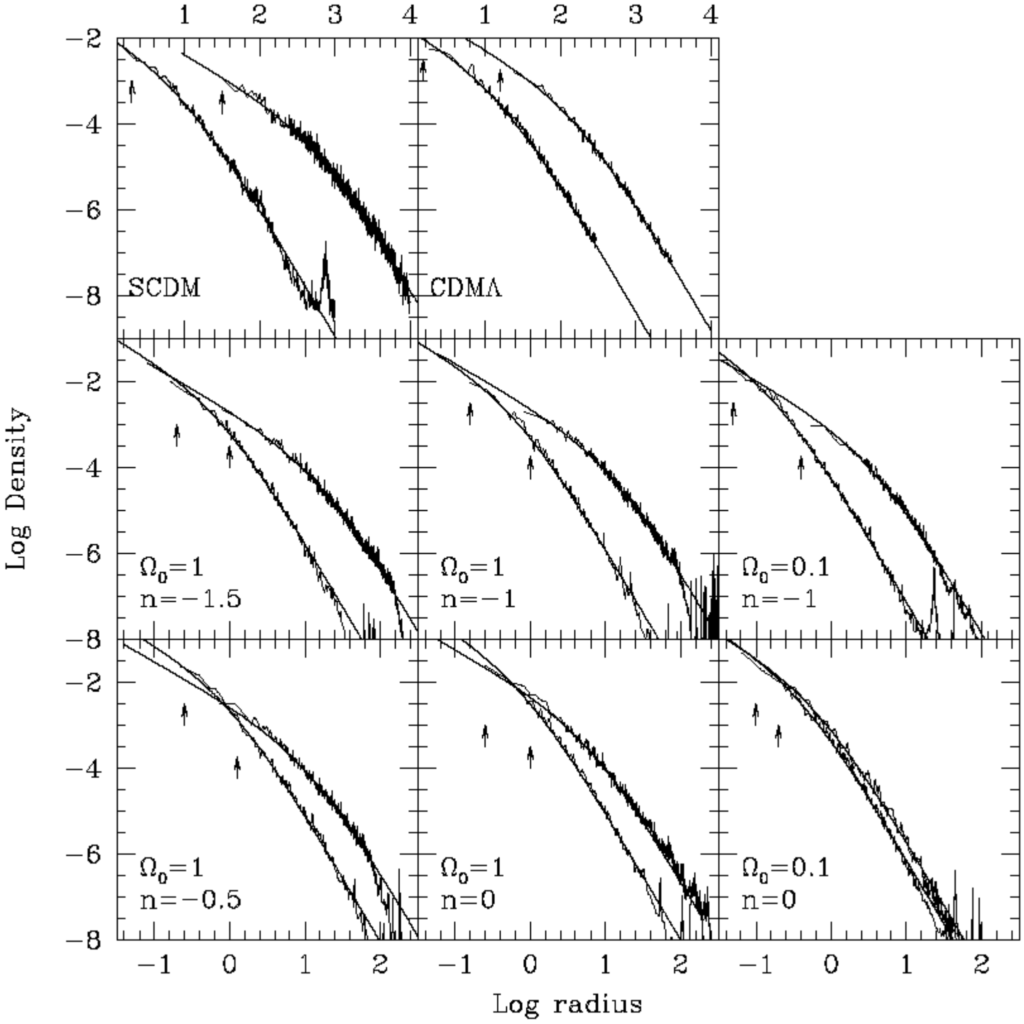
- CDM シナリオによる構造形成を考えた時、 CDM が作る自己重力系（ガスとか星を考えない）は

$$\rho \propto \frac{1}{r_*(1+r_*2)^2}$$

  の形に書ける

- この形はユニバーサルで、例えば一つの銀河でも銀河団でも同じである (NFW 1997)

NFW の結果



Log Density
Log radius
SCDM
CDMΛ
Ω0=1
n=−1.5
Ω0=1
n=−1
Ω0=0.1
n=−1
Ω0=1
n=−0.5
Ω0=1
n=0
Ω0=0.1
n=0

もしも NFW が正しければ、、、

Makino, Sasaki Suto (1998, ApJ 497, 555) は NFW profile のもとで静水圧平衡の式をといて、 X 線ガスの分布を求めた。

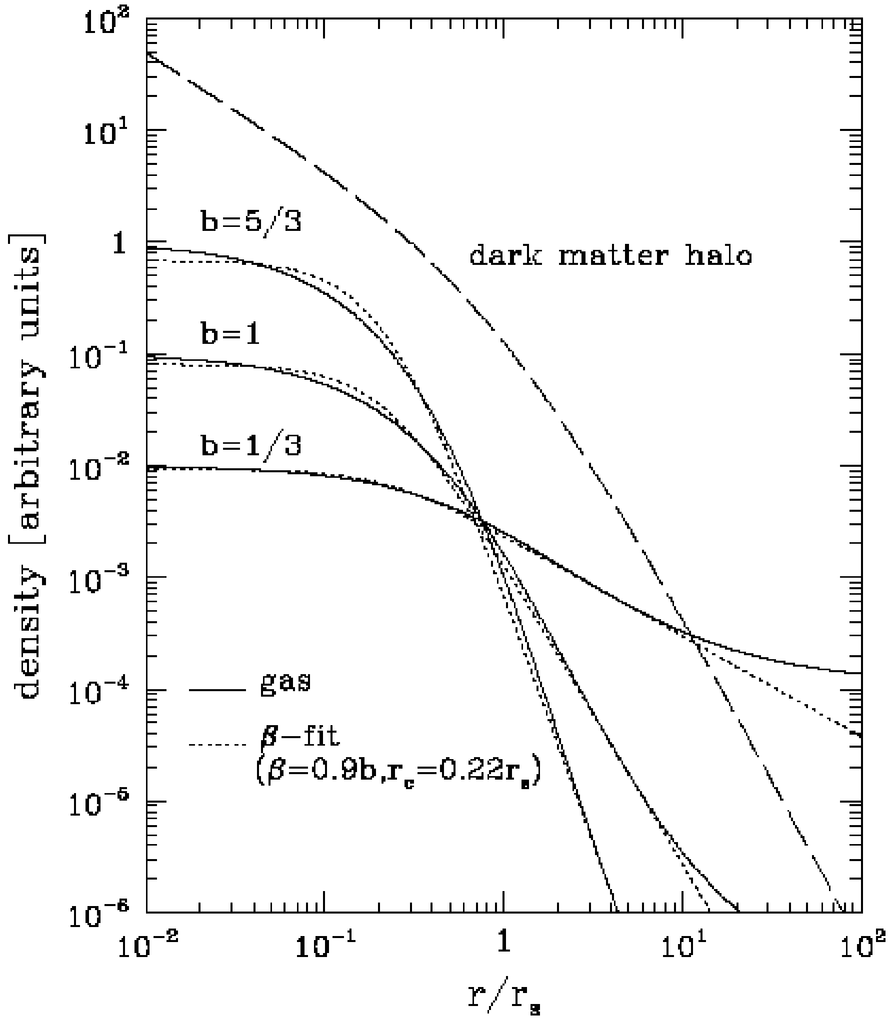


FIG. 1.—Gas density profile (*solid lines*) expected from the universal density profile of dark matter halo (*dashed line*) for $b = 1/3$, 1, and 5/3. For comparison, the best-fit β-models with $\beta = 0.9b$ and $r_c = 0.22r_s$ are plotted in dotted lines.

NFW を信じられるか？

NFW の計算：ハロー一つに典型的には 10^4 体程度

問題点：中心部での二体緩和時間が宇宙年齢よりはるかに短い

緩和時間を「十分長く」した計算は出来ないか？
とにかく粒子数を増やしてみよう
Fukushige and Makino 1997 (ApJ 477, L9)

- NFW がいっているような中心で $1/r$ になる分布にはならない
- $\rho \sim r^{-1.4}$ 程度になった
- 信用できるのは 1-2kpc まで

Moore *et al.* (1998, ApJ 499, L5) も同様な結果

Fukushige & Makino の結果

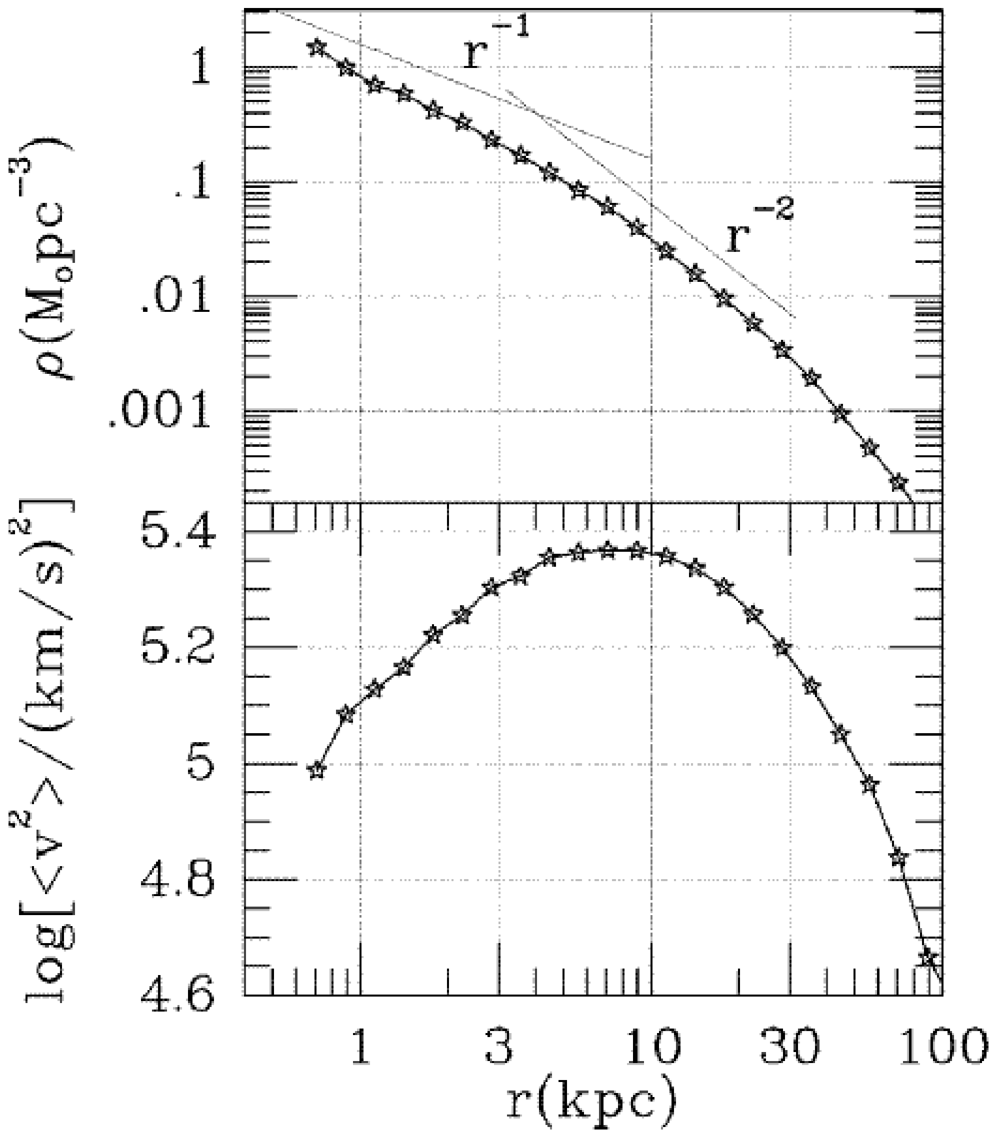


FIG. 2.—Density and temperature structures of the halo at $z = 1.8$ in the N-body simulation shown in Fig. 1. The position of the center of the halo was determined using potential minimum and averaged physical values over each spherical shell.

NFW の結果の解釈

- 「universal」になったのは数値計算の誤差のためであった（すべての計算で粒子数が同じ程度、ソフトニングパラメータも同じ程度だったので、結果がその 2 つで決まっていた）。
- ちゃんと計算したらどんなものができるかはまだわからない。

Fukushige & Makino : GRAPE-4 で 1 週間
Moore *et al.*: 計算機等不明

どこでもできるような計算ではない

まとめ

- 「観測から示唆される階層構造」というものが、モデル化と解釈による artefact でないと判断するのは難しい
- 数値実験からは、かりに standard CDM とかモデルを決めても、クラスター内のダークマターの構造についてはっきりしたことをいうのは結構難しい

言い替えれば、、、、

- 高分解能の観測（特に 10 keV 程度で空間分解能の高い観測
- 高精度（大粒子数）のシミュレーション

が、現在の理解とはまったく違った描像をもたらす可能性はそんなに低くない

- AXAF
- GRAPE-6