

国立天文台理論研究部集中講義

銀河形成論

長島雅裕(長崎大教育)

もくじ

1. はじめに
2. 一様等方宇宙
3. 密度揺らぎの成長
4. 密度揺らぎの統計
5. ダークハローの質量関数
6. ダークハローの形成史
7. 銀河形成へのアプローチ: 準解析的モデル
8. 銀河形成の物理過程
9. 基礎的な結果
10. 問題点と展望

主に板書

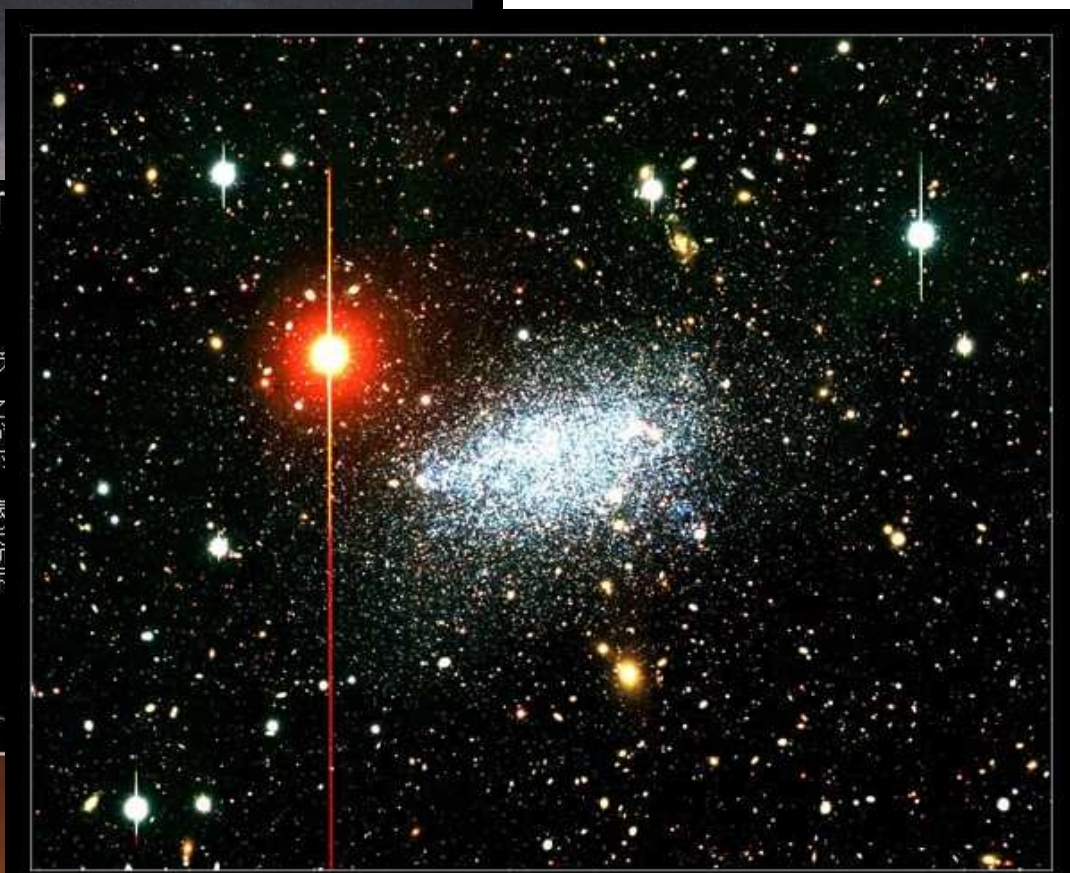
銀河とは何か

M87 (おとめ座銀河団の中にある巨大楕円銀河)



この銀河は、
ホールに伴う
れれているが、
ら噴き出して
なジェットが
い電波を放射

ジェットを表
め、中心部
し、異なる
た画像を右下



Dwarf Irregular Galaxy Leo A

Suprime-Cam (B, R, z')

August 5, 2004

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright © 2004 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12)
液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200 シリーズ)
露出時間: 5分×8, フィルタ: Iバンド
擬似カラー処理

Mar. 4. 1996, 21h02m~21h51m (JST)

H. Fukushima

国立天文台 広報普及室

合体する銀河

- 新しい星が爆発的に生成

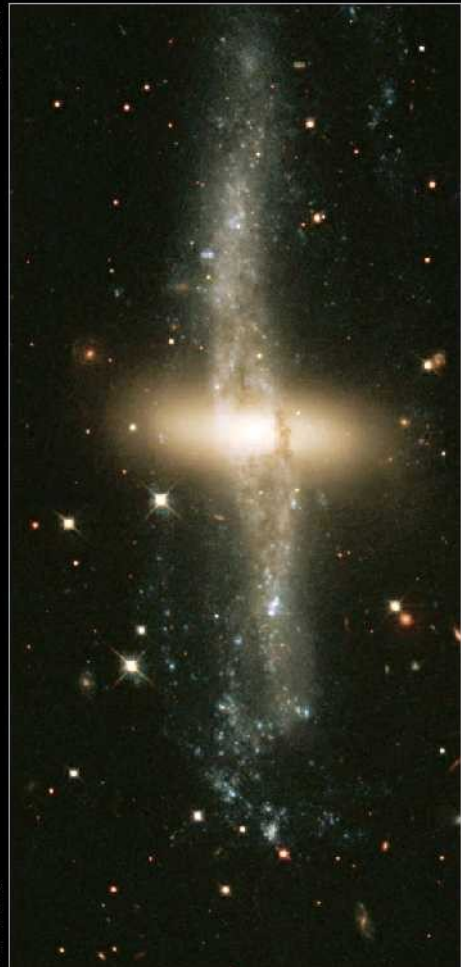
Galaxies NGC 2207 and IC 2163



NGC 4038-4039 • Antennae Galaxies



Polar-Ring
Galaxy
NGC 4650A



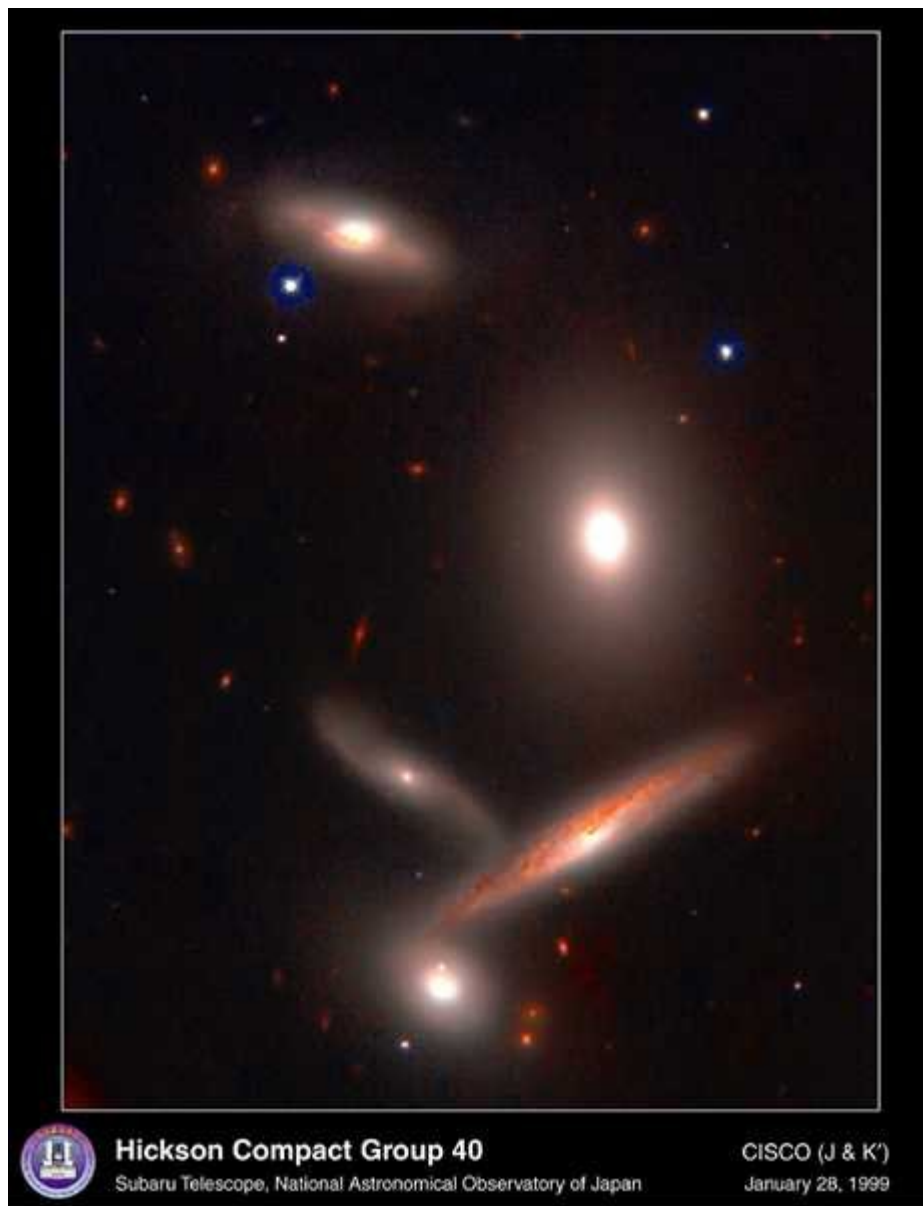
PRC99-16
Space Telescope
Science Institute
Hubble Heritage Team
(AURA/STScI/NASA)

Hubble
Heritage

Heritage

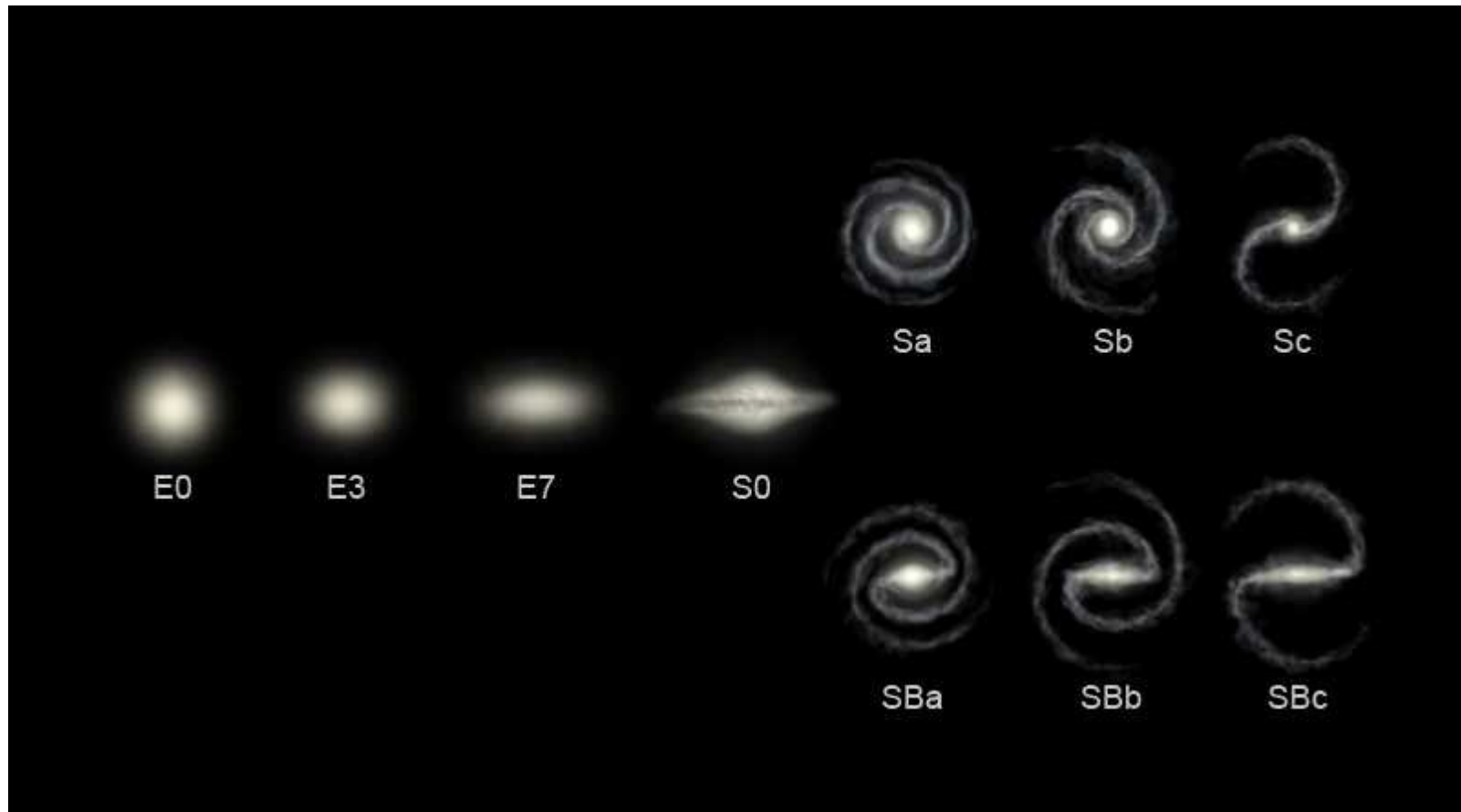
NASA, ESA, and The Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration • HST/ACS • STScI-PRC06-46

銀河群、銀河団



多様性の背後の法則性を探る

- 最初の一歩



銀河形成の難しさ

- 物理は物事を単純化して考える→対称性
 - 宇宙論: 一様等方…ノッペラボーの宇宙
 - 星: 球対称、軸対称、…
- 摂動を加えて物事を理解する
 - 宇宙初期の密度揺らぎの成長
 - 星の振動
- 銀河は非対称・非線型の極限
 - 取扱が難しい
 - さらに、関与する物理過程が多い

「銀河進化」論

CDM確立前の現象論的モデル

→ Monolithic cloud collapse model

Traditional Galaxy Evolution Models

→ Monolithic Cloud Collapse Scenario



なぜかはわからないが、high- z で巨大なガス雲がスターバースト→楕円銀河

なぜかはわからないが、ゆっくりとしたガス降着 & 星形成→渦巻銀河

→観測($z=0$)を結構うまく説明できた

monolithic model の成功

- 太陽近傍星の重元素分布をうまく再現できた
- もし、ゆっくりとしたガス降着がなければ、大量の metal-poor star ができてしまう (G-dwarf problem)

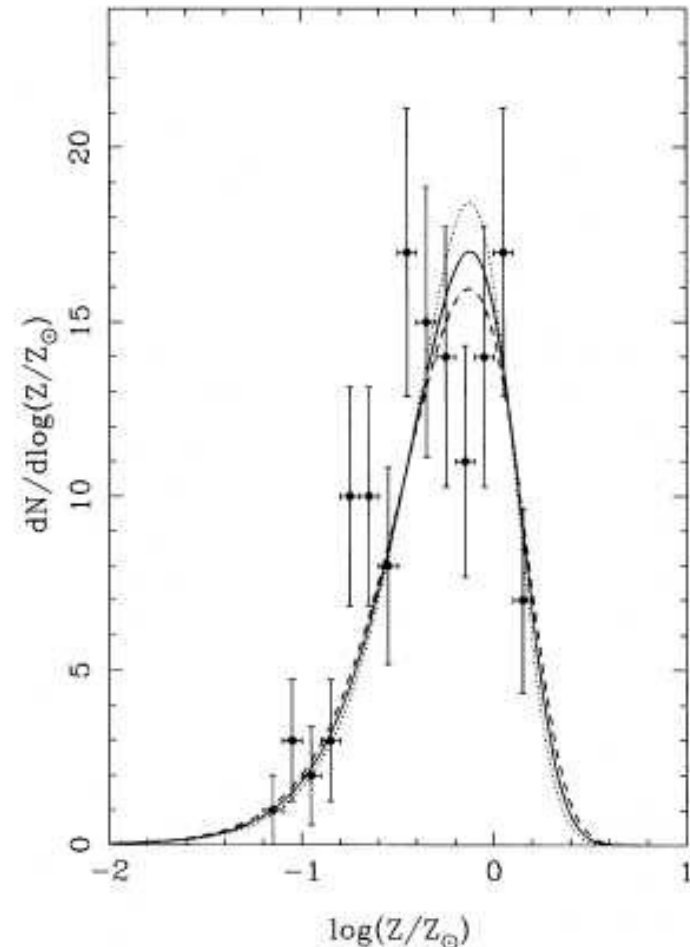


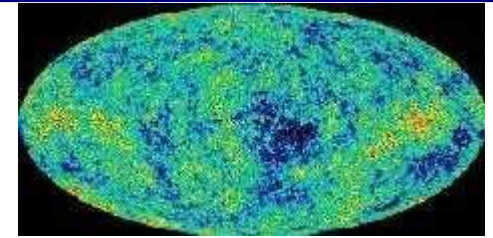
Fig. 1. Metallicity distributions of infall models with $n = 1$ (11). Parameters used are $x = 1.35$, $k = 0.3 \text{ Gyr}^{-1}$, $\beta = a/xk = 0.8$ (dotted-line), 1.0 (solid-line), and 1.2 (dashed-line). Filled circles are data for G-dwarfs in the solar neighbourhood taken from Pagel (1989)

モデルの限界

- monolithic collapse model は、あくまでも「現在の銀河の特徴を再現するように作られた」モデルである
- 過度に信用してはいけない
- 星形成史についてしか言えない
 - star formation history \Leftrightarrow mass assembly
- 本質的にはダークマターの密度揺らぎの進化から考えなおす必要がある

宇宙論の進展

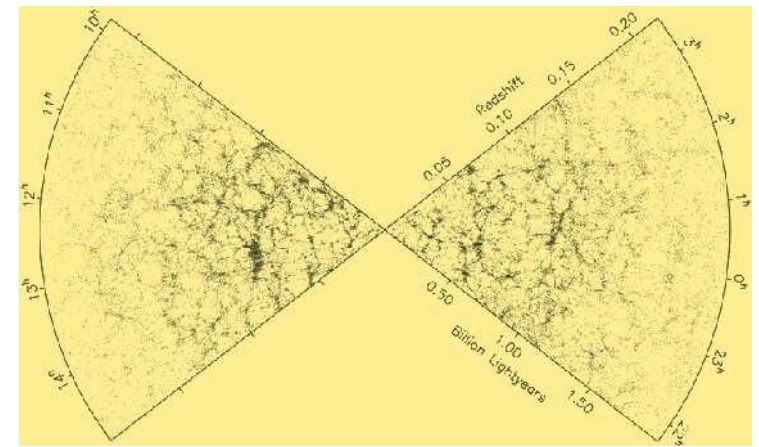
宇宙論・構造形成論の理論・観測の進展
→ Cold Dark Matter (CDM) model



WMAP

CDM model から導かれる
構造形成過程

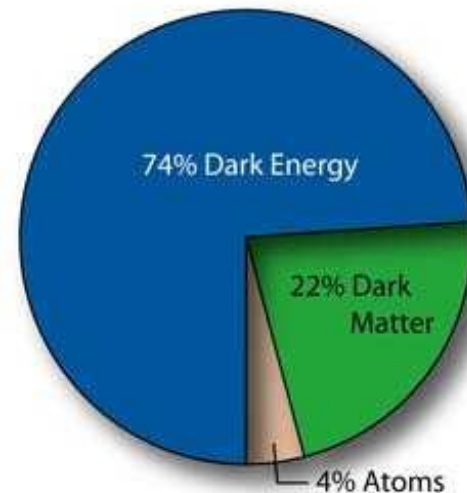
→ hierarchical clustering 説
小さい天体から先に形成
大きい天体は小さい天体の
合体により形成



2dF

$$\Omega_{\text{CDM}} \gg \Omega_{\text{baryon}}$$

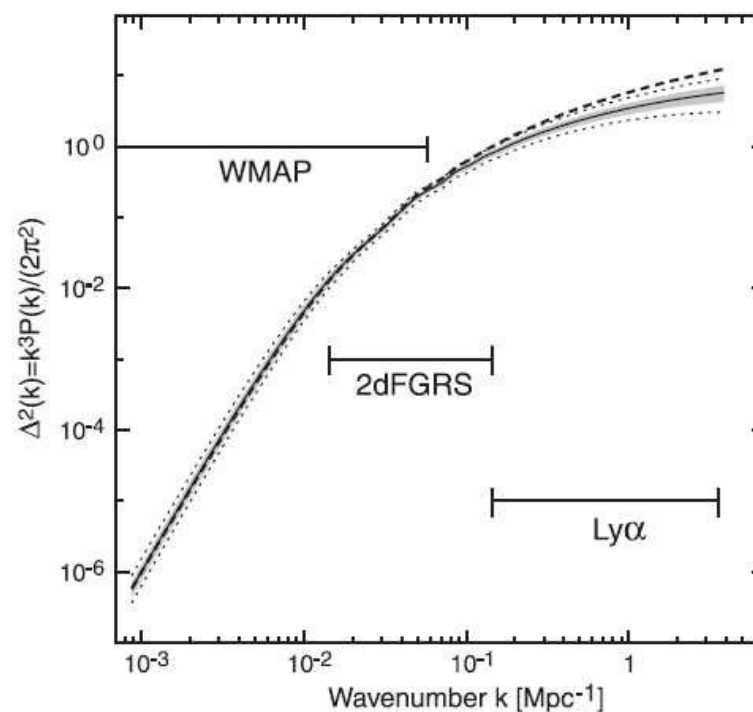
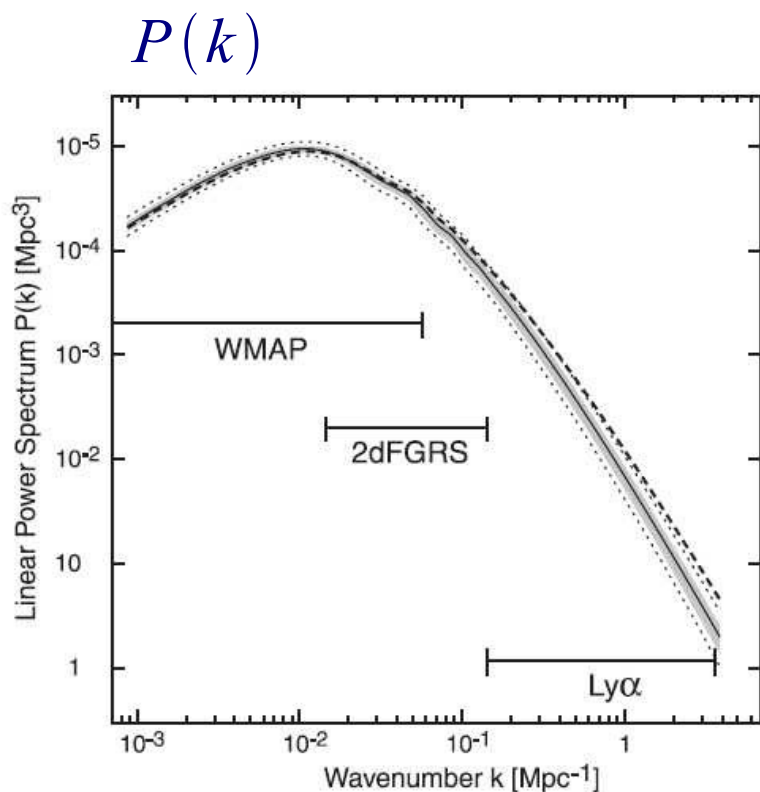
→ 銀河形成も合体成長する
ダークマターハローの形成史
の枠組で考える必要がある



密度揺らぎのPower Spectrum

small scale の密度揺らぎの
振幅が大きい

$k^3 P(k) \simeq \langle \delta_M^2 \rangle$: 揺らぎの振幅



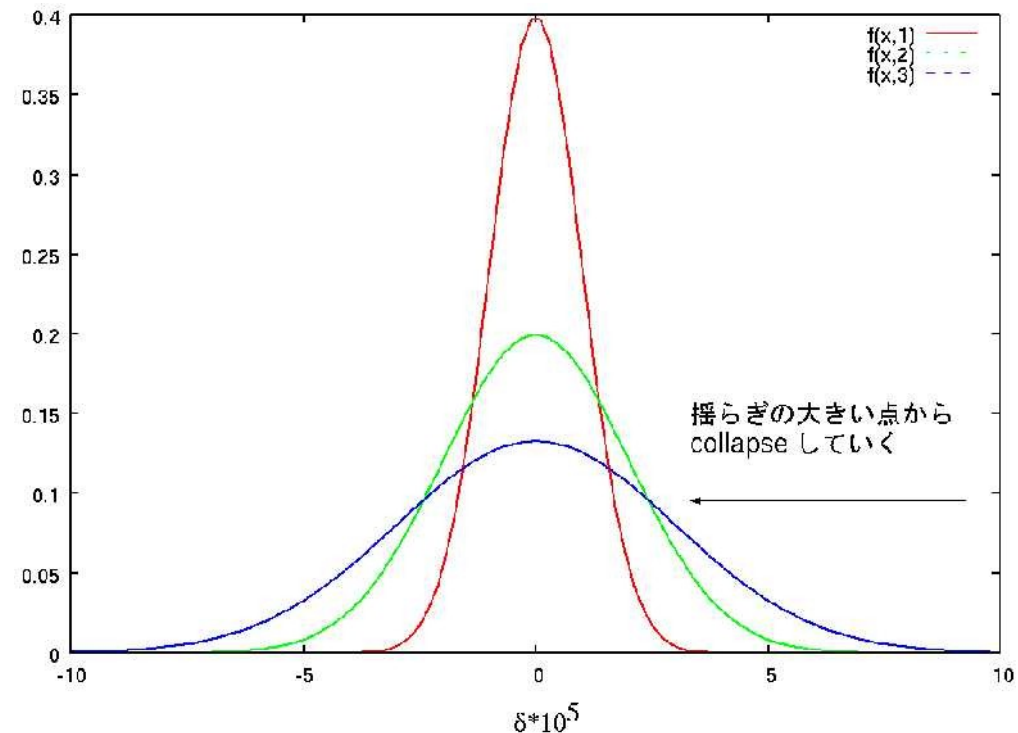
大スケール \Leftrightarrow 小スケール

FIG. 9.—*Left*: The shaded region in the figure shows the 1σ contours for the amplitude of the power spectrum as a function of scale for the running spectral index model fit to all data sets. The dotted lines bracket the 2σ region for this model. The dashed line is the best-fit power spectrum for the power-law Λ CDM model. *Right*: The shaded region in the figure shows the 1σ contours for the amplitude of the amplitude of mass fluctuations, $\Delta^2(k) = k^3 P(k) / (2\pi^2)$, as a function of scale for the running spectral index model fit to all data sets. The dotted lines bracket the 2σ region for this model. The dashed line is the best fit for the power-law Λ CDM model.

揺らぎの性質

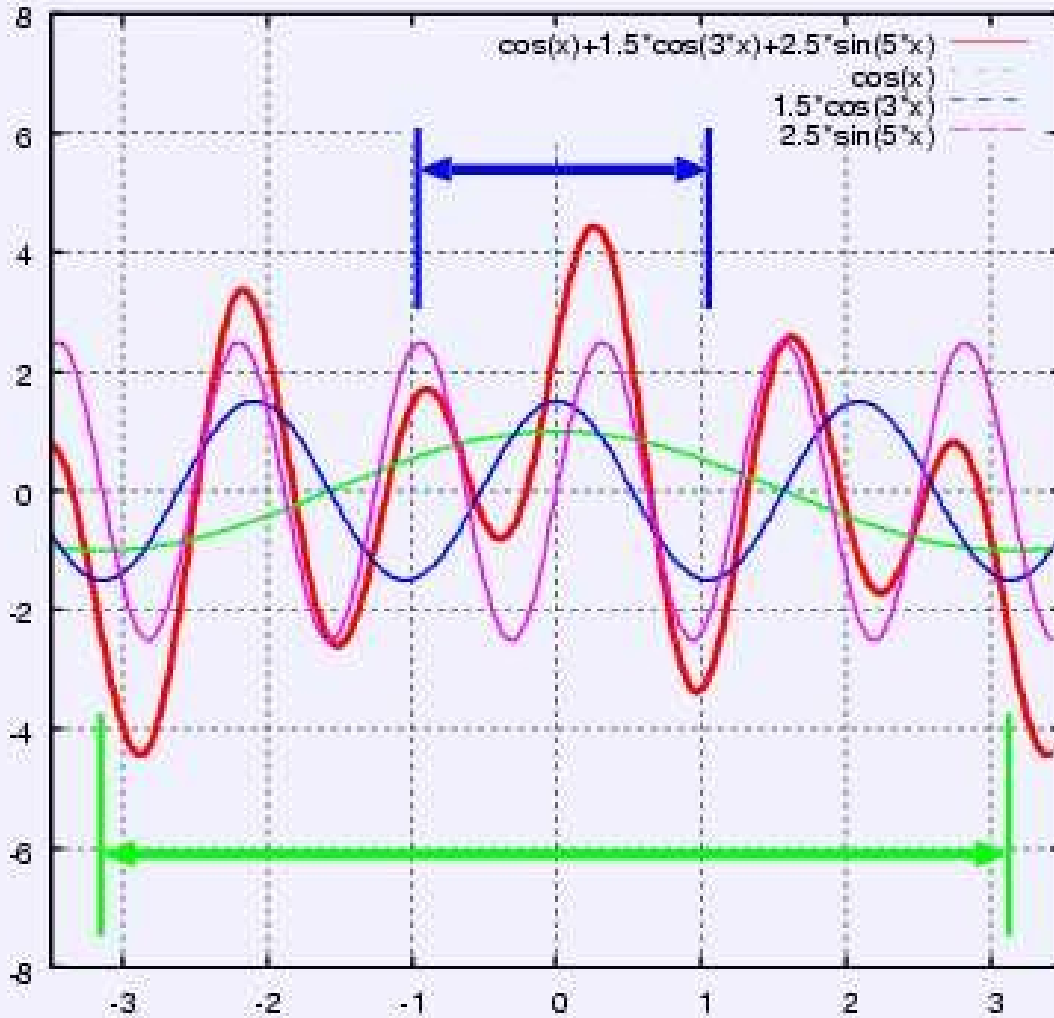
- ・温度揺らぎ→密度揺らぎ: ほぼ Gaussian
- ・構造は密度揺らぎ(〜温度揺らぎ)が種となり、自己重力により成長して出来た(揺らぎの濃い領域は、相対的に強い重力でより物質を集める)

- ・揺らぎの振幅は、
小スケールほど大きい
揺らぎの大きい領域から
collapse していく
→ Hierarchical Clustering
(ボトムアップ)

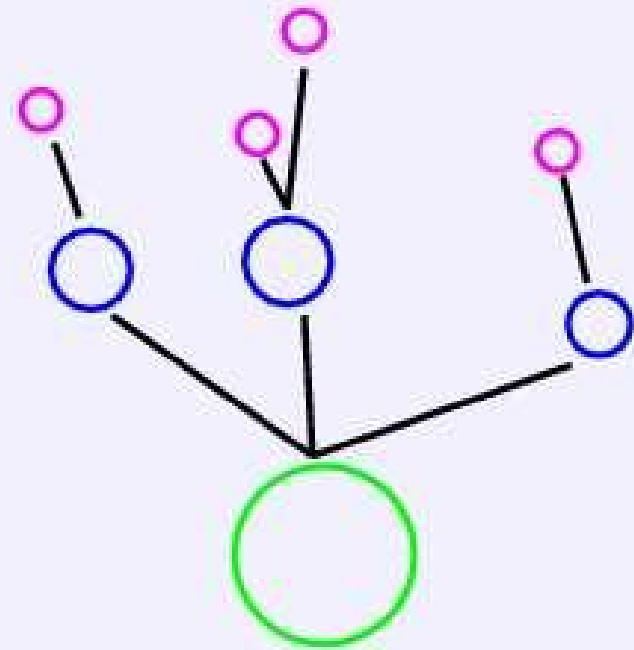


Hierarchical Clustering

small scale の揺らぎの振幅が大



揺らぎの高い点から
ハロー形成
→biased formation



銀河形成の構図

observation
- detection limit

extinction
- dust
- intervenning clouds

mergers of galaxies
- dynamical friction
- random collision
- merger-induced starburst

baryonic processes
- gas cooling
- star formation
- supernova feedback

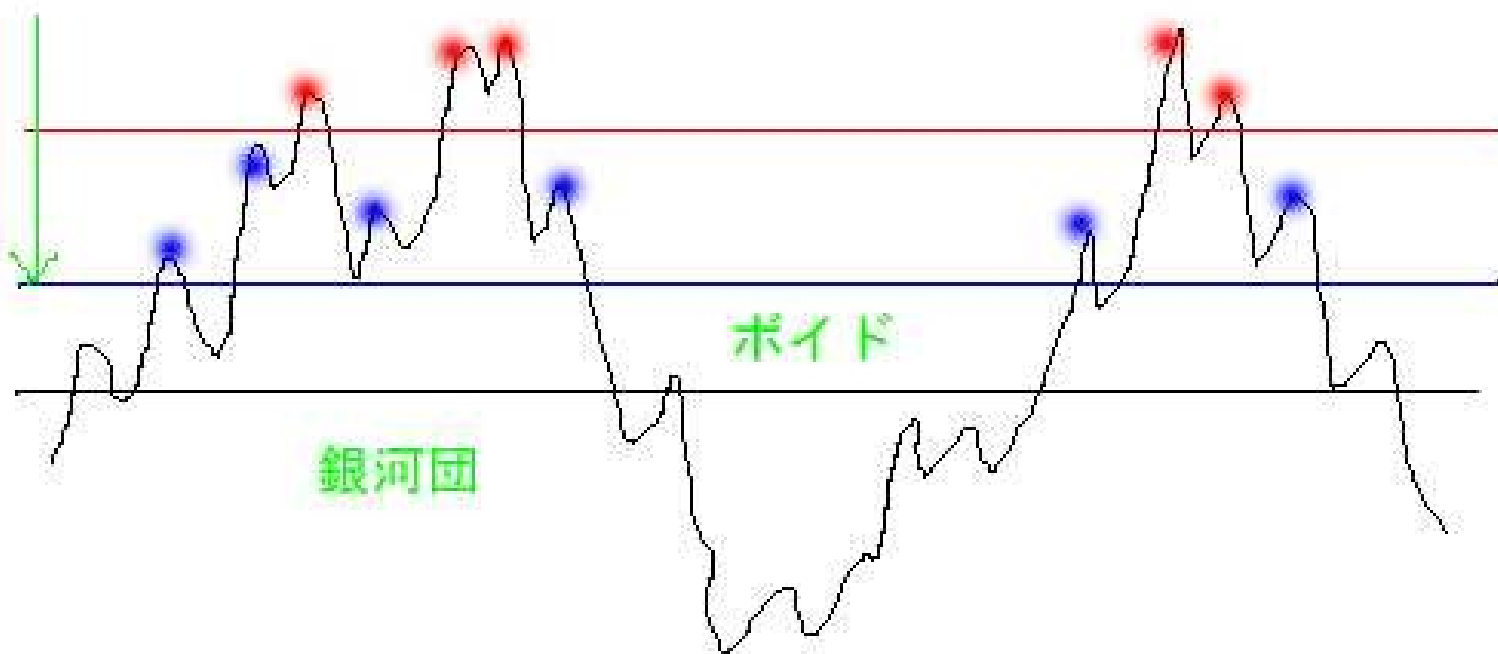
background radiation
- reionization
- photoheating/ionization

ダークマター分布の進化

バイアス

High-z では銀河（ハロー）の clustering が強い
→ダークマター分布に対する「バイアス」

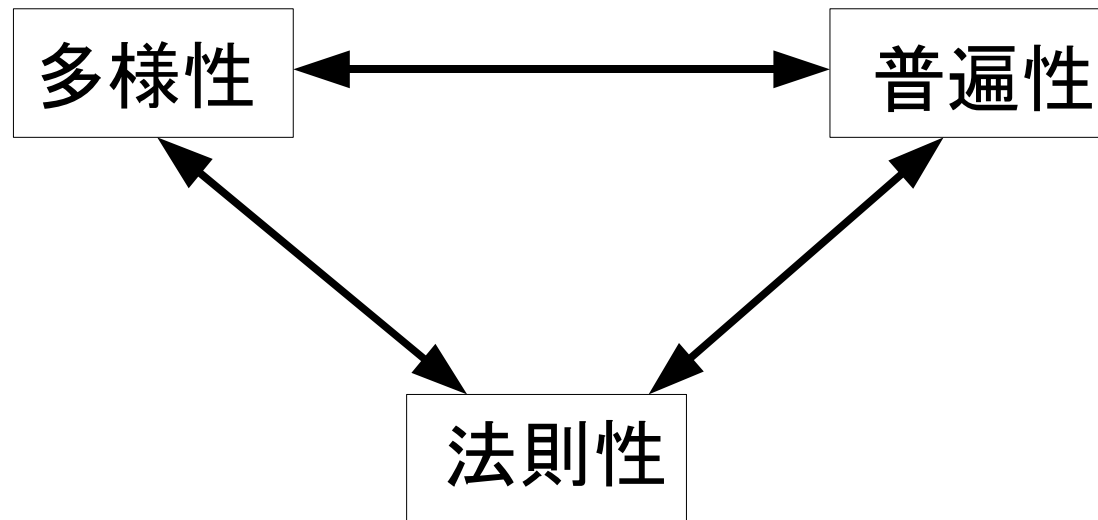
徐々に低密度領域も collapse



High-z ではハロー、銀河のクラスタリングが強い

どう考えるか？…複雑系

- 観測結果の解釈→普遍性を探る
- 普遍性から法則性を探る
- 法則性が生みだす多様性を理解する



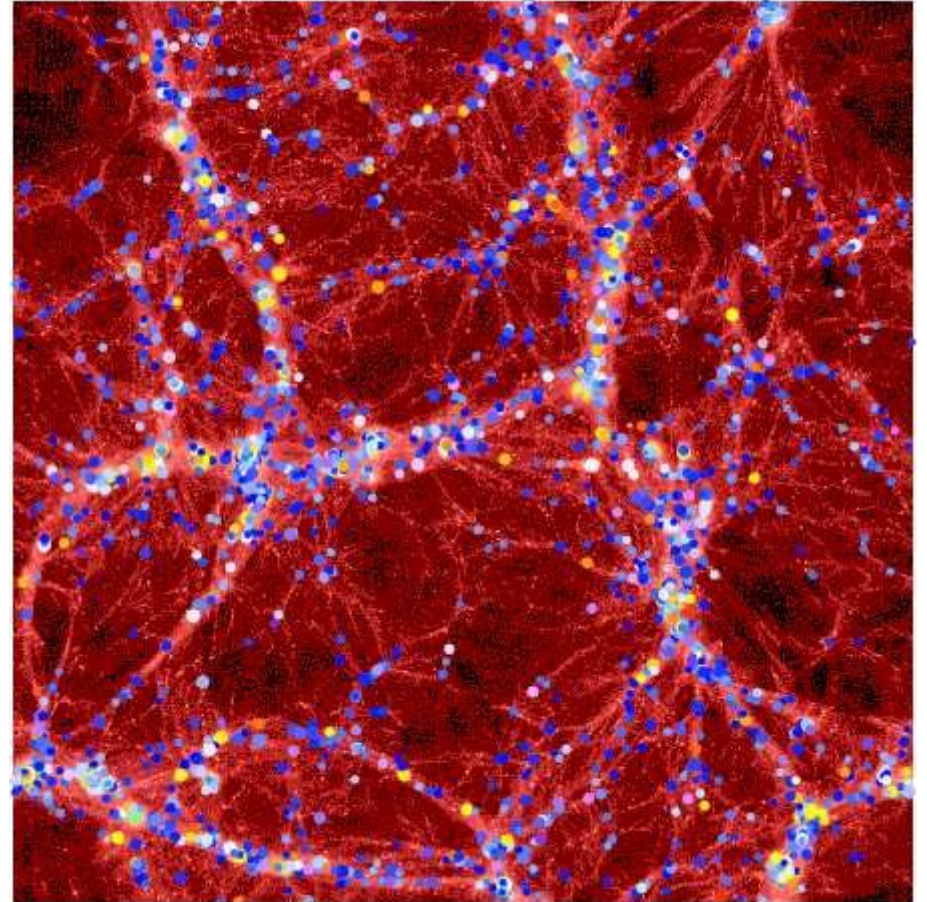
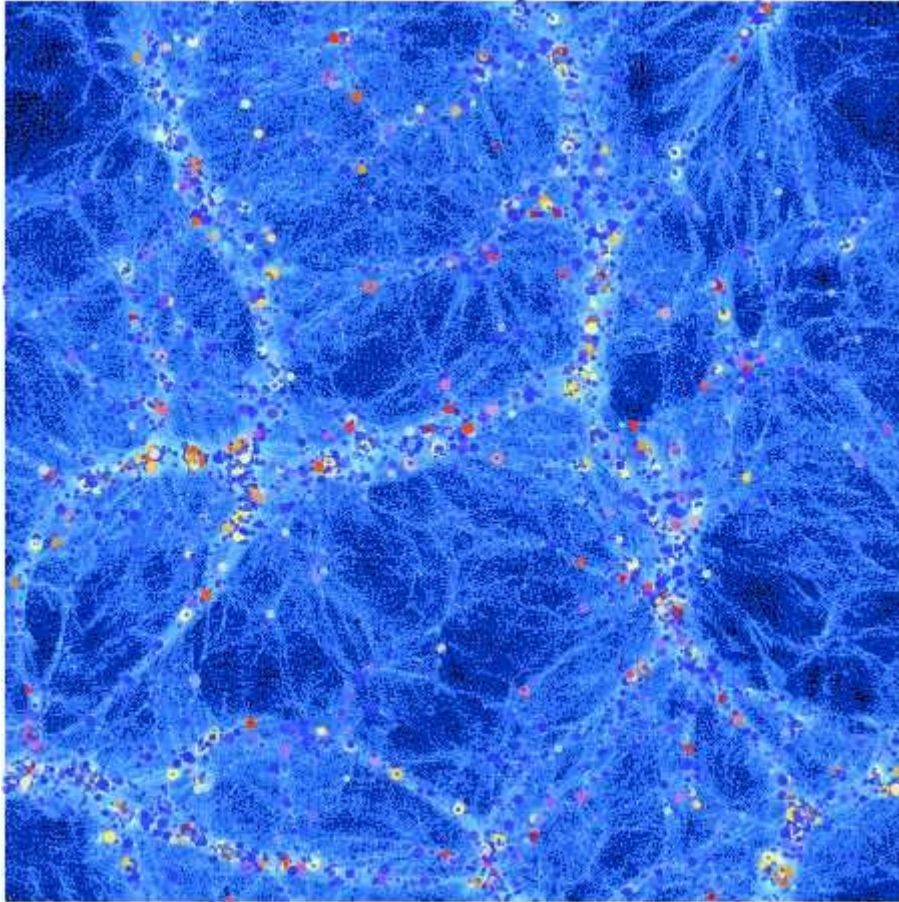
視点の多様性が必要

- ひとつとびに「すべて」を理解することはできない
- 「何を」「どこまで」「どの精度で」明らかにしたいのかを常に考慮すべき
- それにふさわしいアプローチを採用する
- 様々な面からの結果を総合的に解釈して、はじめて「銀河の姿」を理解できるようになる(だろう)

Numerical Galaxy Catalog

青はダークマター、白は銀河(後述)
国立天文台4D2Uでダウンロード可能

100x100x10Mpc

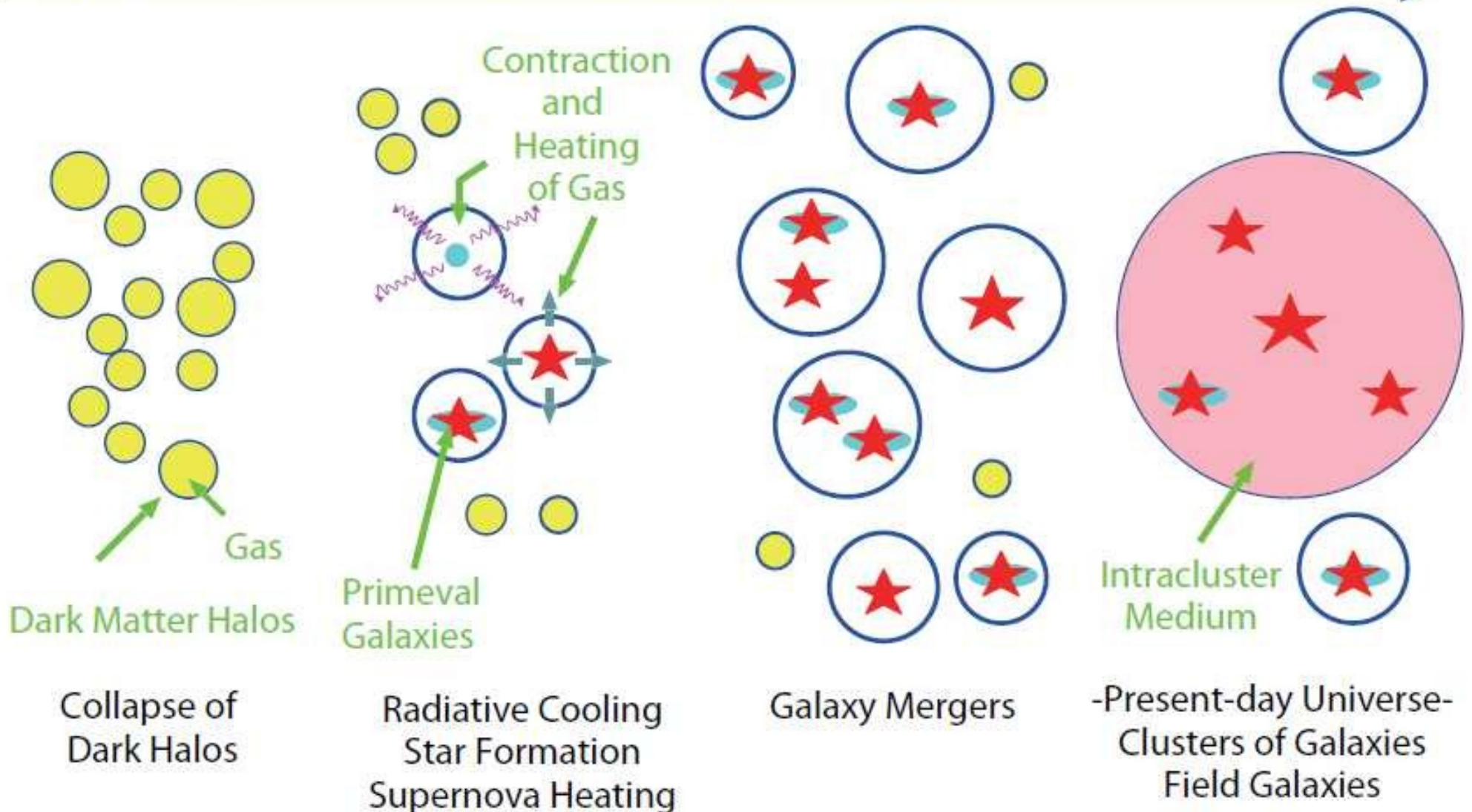




Galaxy Formation in the Hierarchical Clustering Scenario

early Universe

present day



今回の講義の目的

- 銀河形成を考えるにあたって、おさえておくべき「理論ミニマム」を理解する
- 理論的アプローチの一つとして有力な「準解析的モデル」について、その概略と基本的な結果を理解する
- これらを通じて、当面解決すべき問題と、今後の展望を概観する

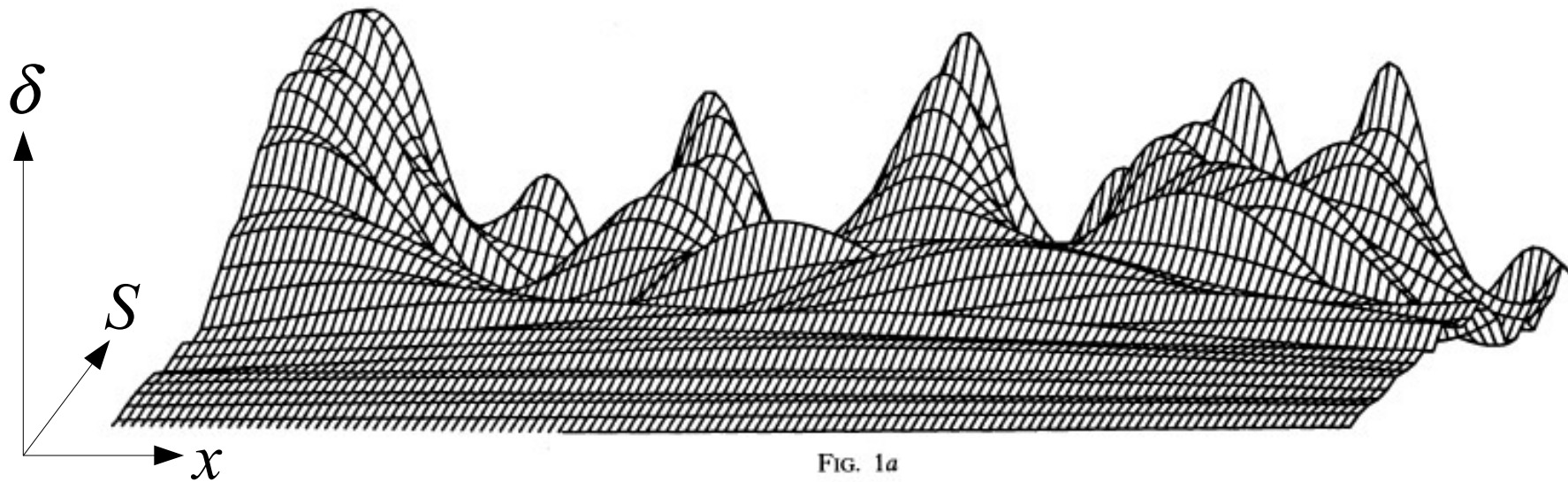


FIG. 1a

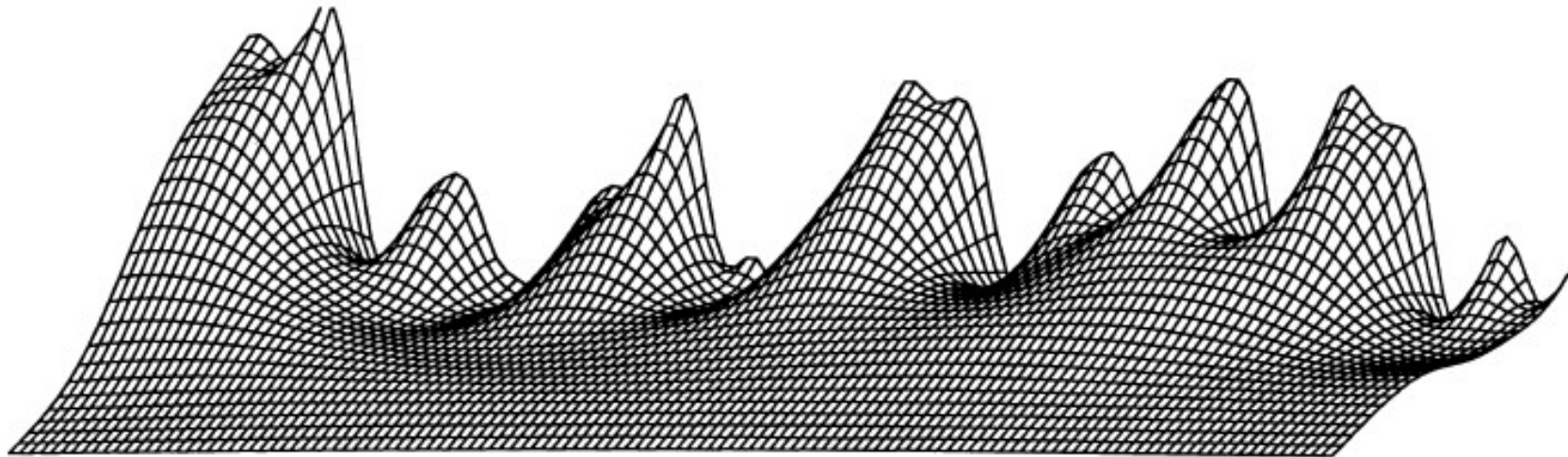
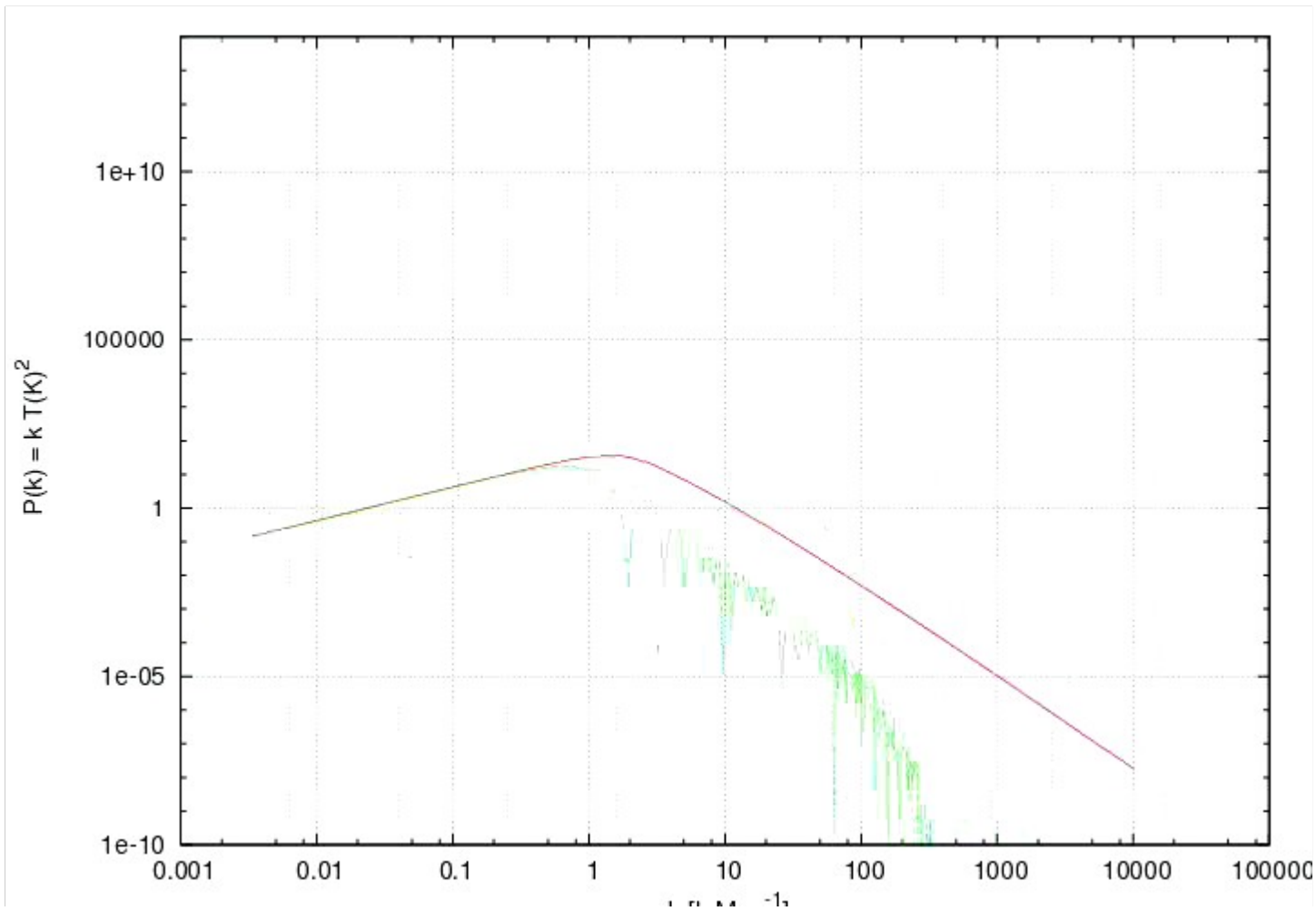


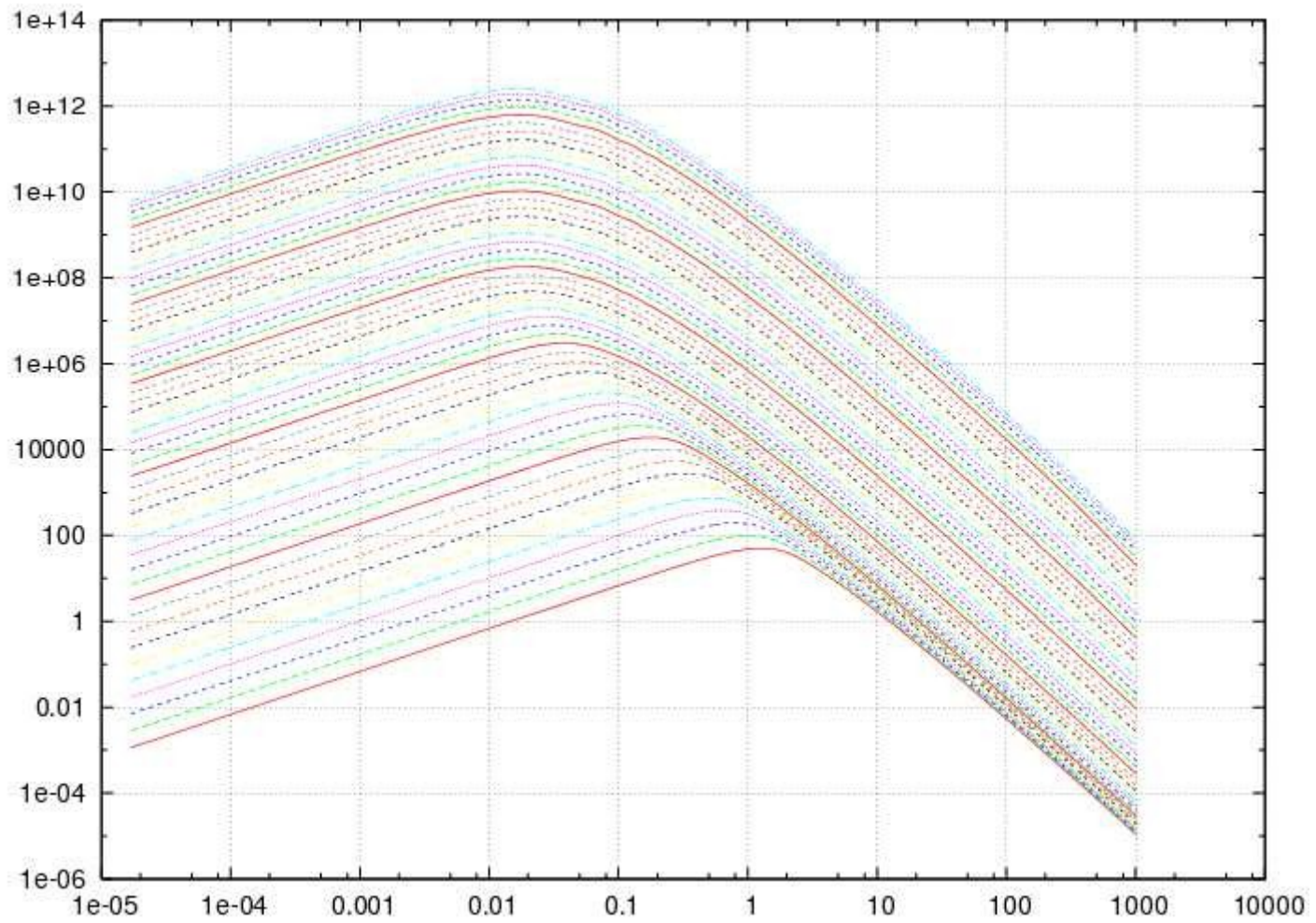
FIG. 1b

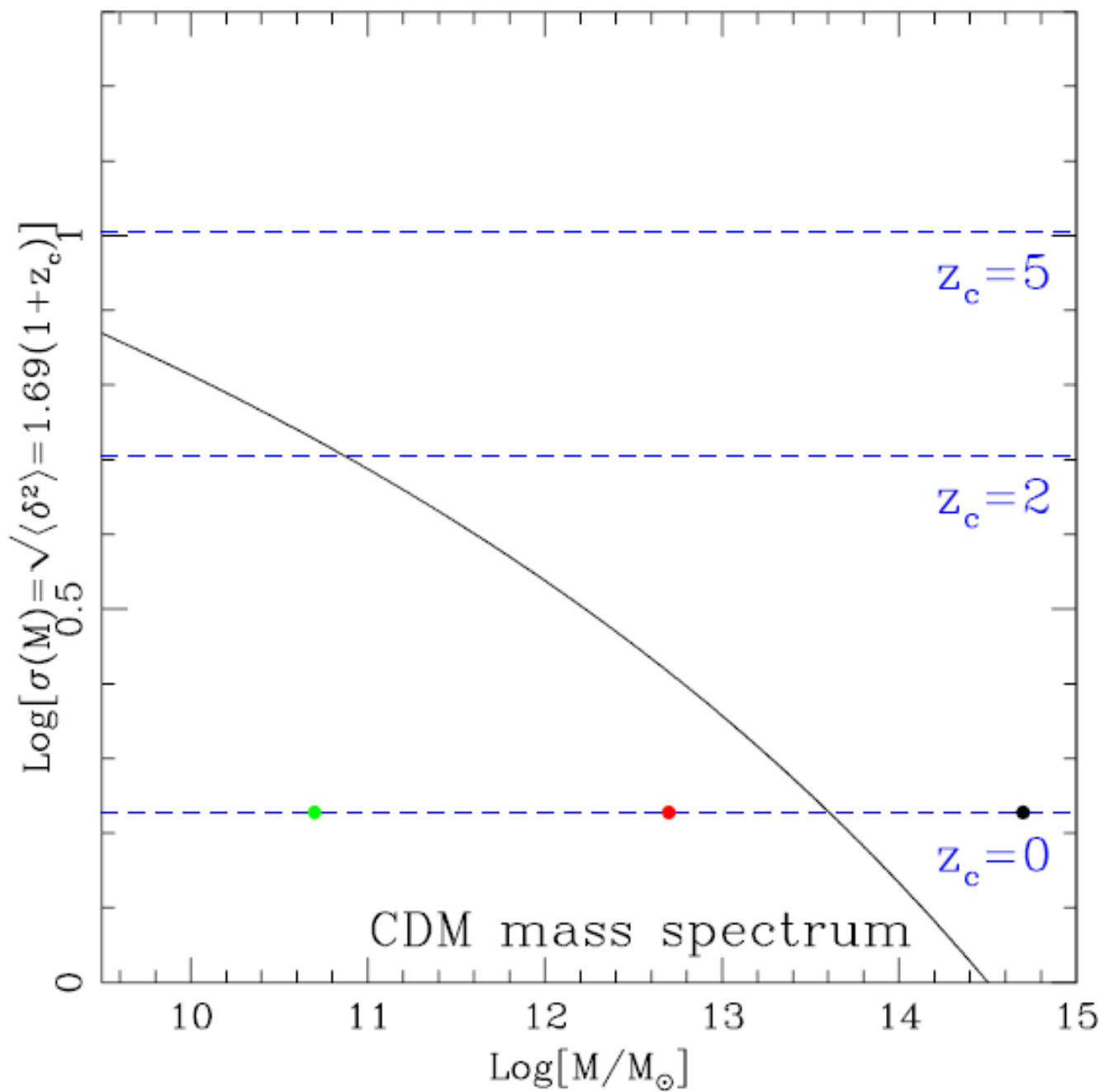
FIG. 1.—Topographical maps of one-dimensional Gaussian random density fields $F(r, \Lambda)$ as a function of position and resolution for (a) sharp k -space filtering and (b) Gaussian filtering. The spectra are $n = 0$ power laws. The depth dimension is $\log_{10}(R_f)$, with a spacing of 0.06 and depth coverage a factor of 1.5. The horizontal dimension is position r , the range is $1/64$ of the box the field was generated on. The range in the rms amplitude is $(32)^{1/2}$.

Bond, Cole, Efsathiou & Kaiser (1991)



baryon は recombination 間に
small scale の power が落ちる
→ Silk (collisional) damping; photon の拡散に
baryon が引き摺られるため

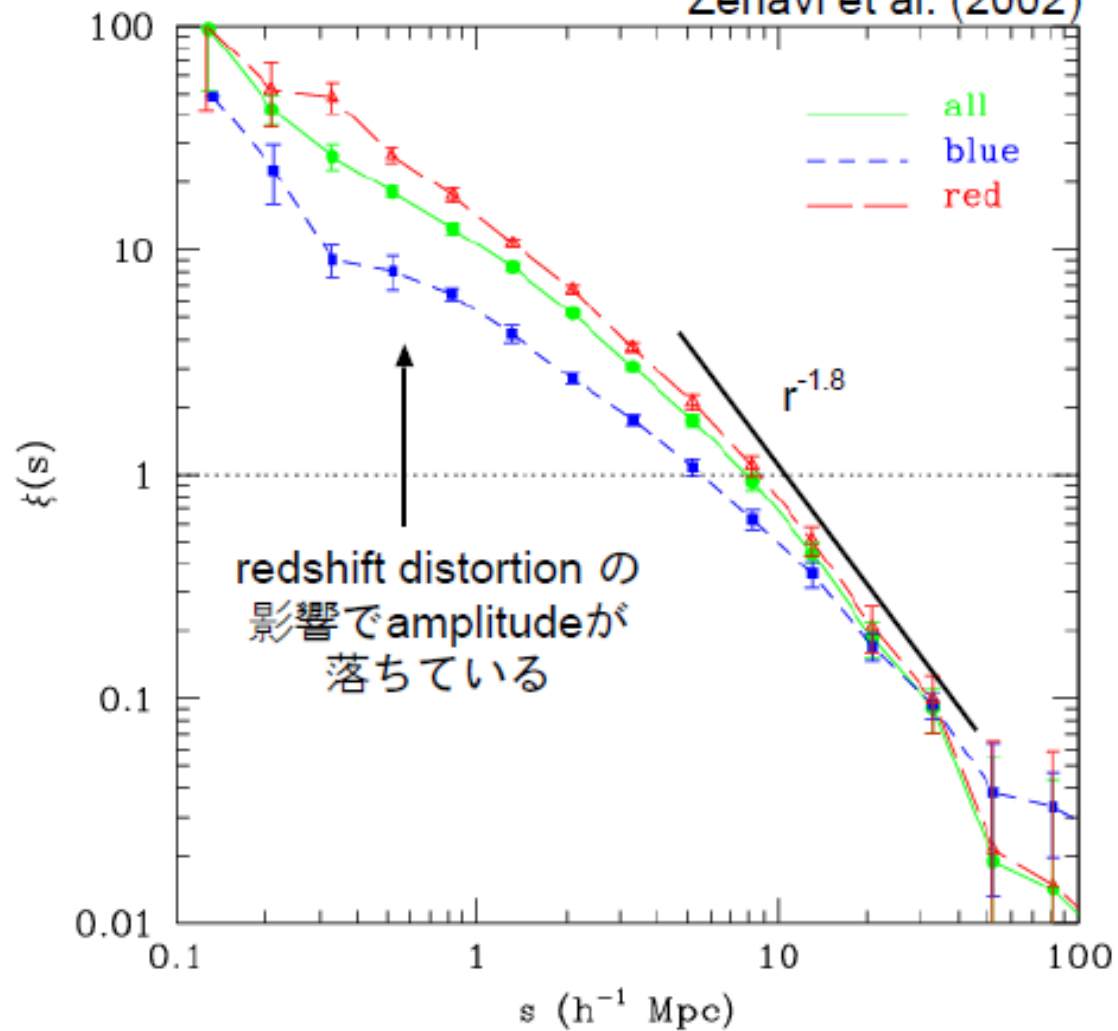


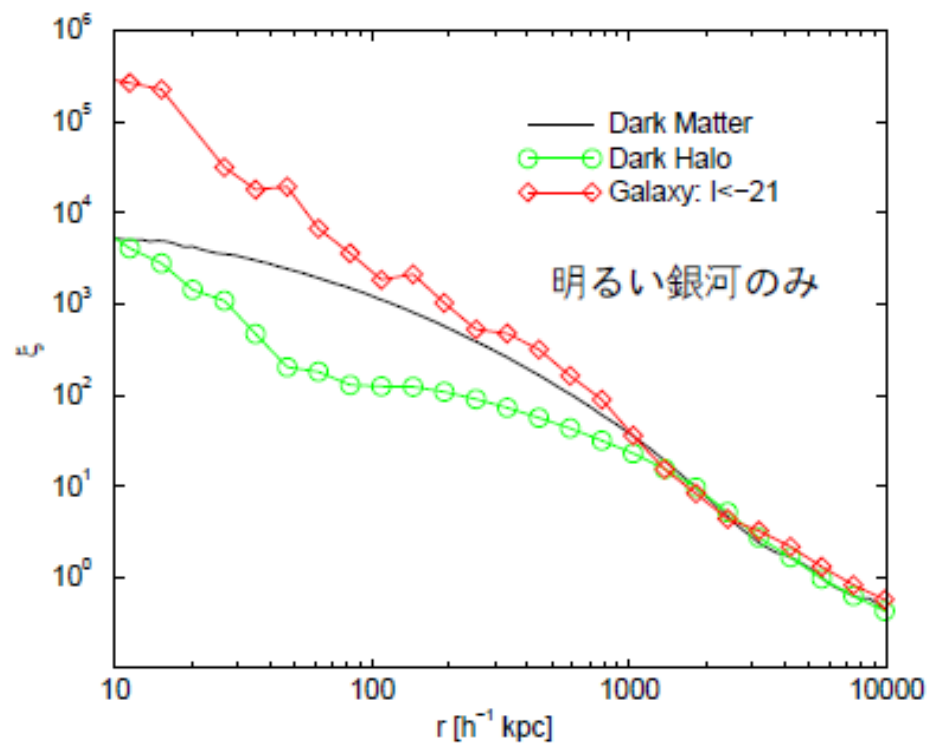
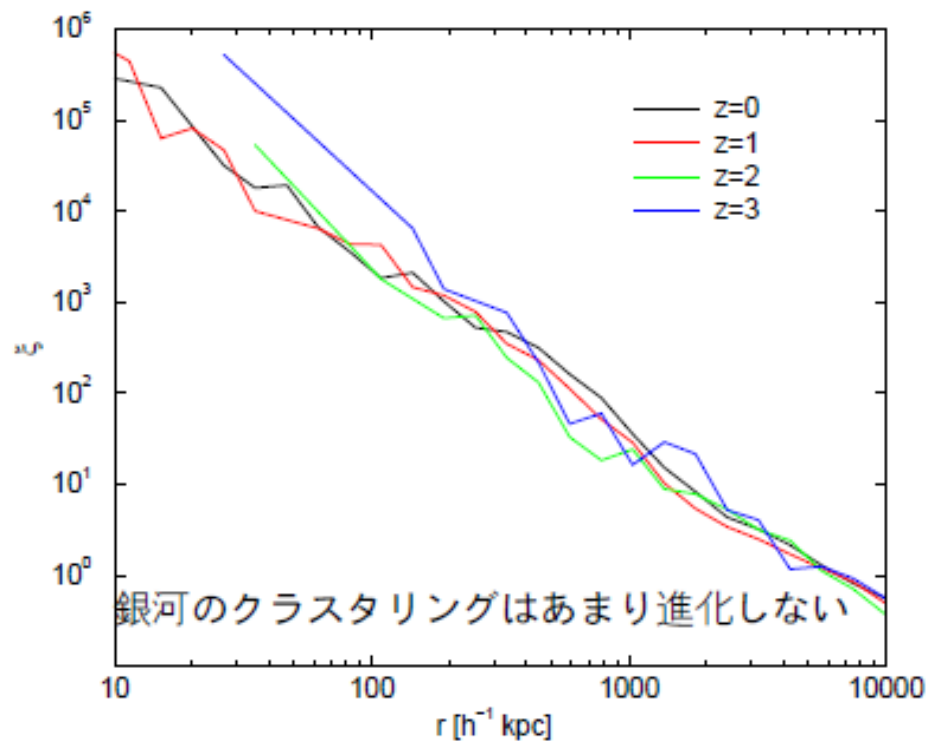


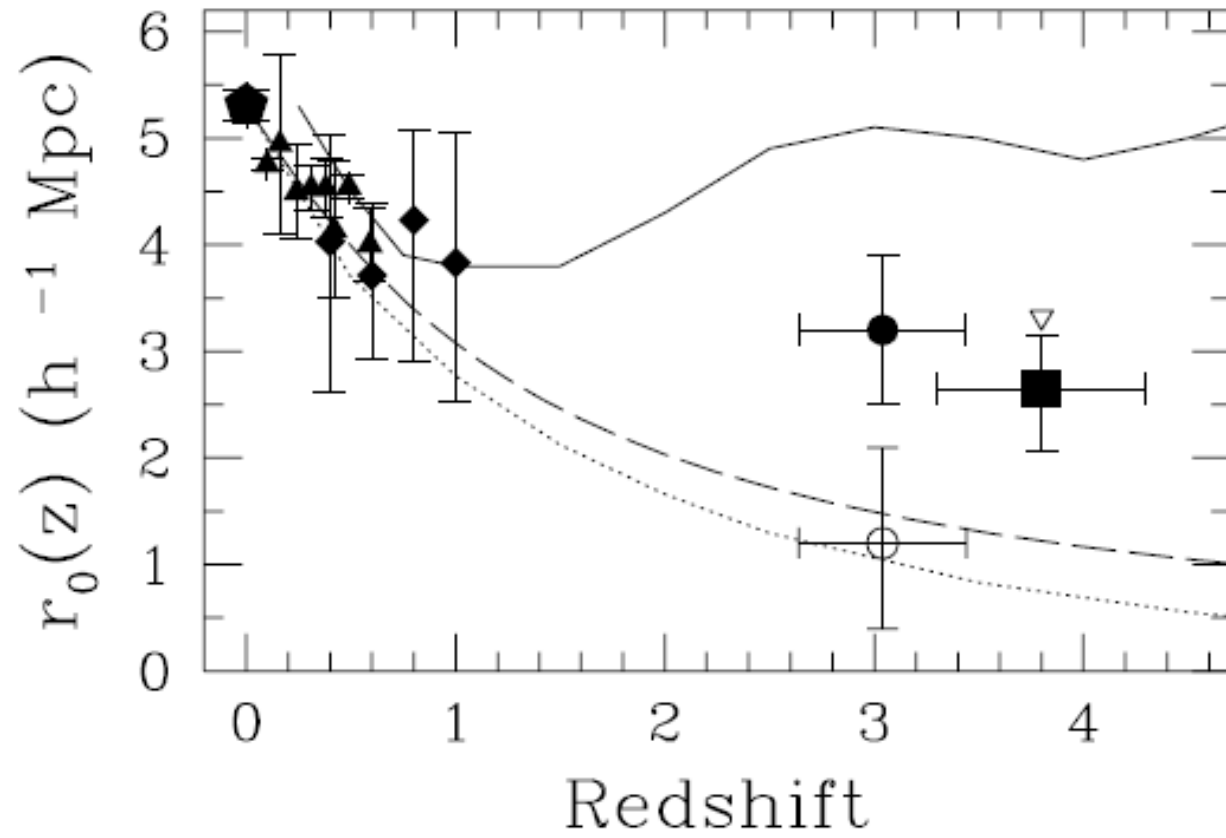
SDSS 三次元データによる相関関数

赤方偏移空間であることに注意

Zehavi et al. (2002)

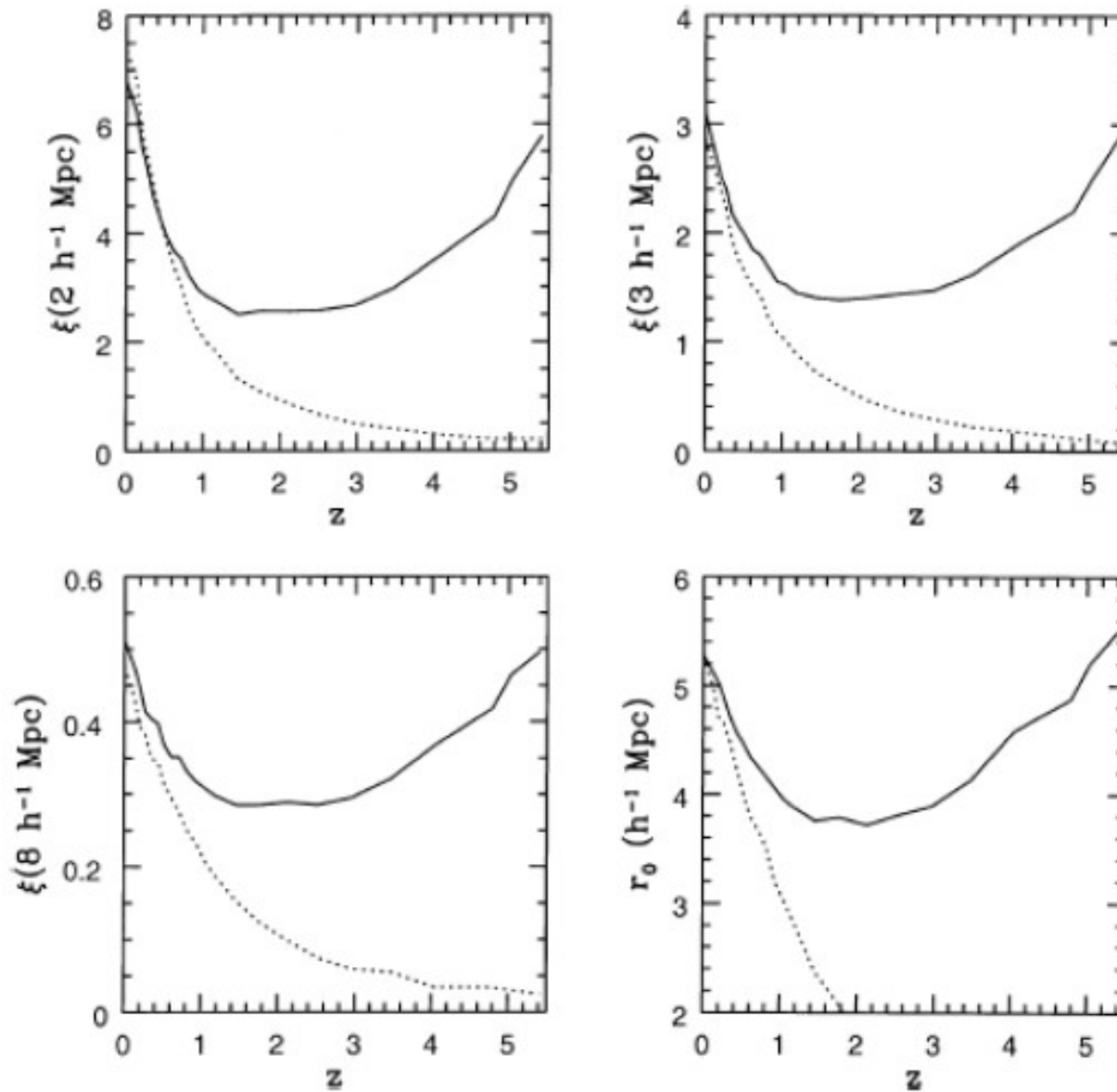


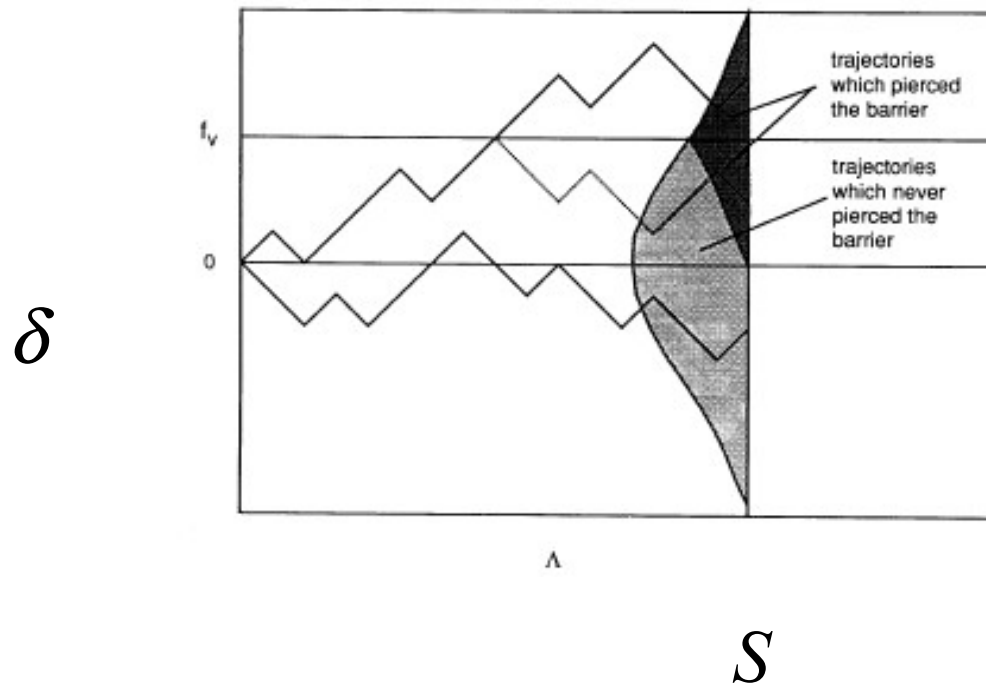




Ouchi et al. (2001)

Kauffmann et al. (1999)





Bond, Cole, Efsathiou & Kaiser (1991)

mode間相関

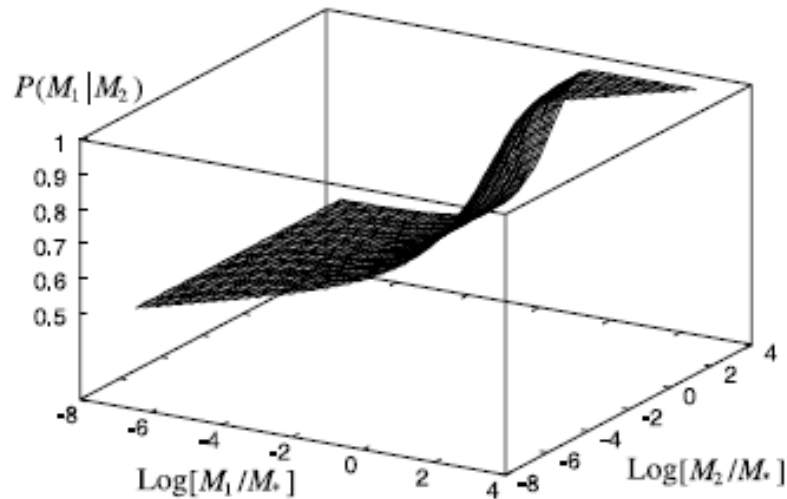


FIG. 1.—Probability $P(M_1|M_2)$ for the Gaussian filter in the case of the spectral index $n = 0$. The surface of the probability is plotted only against the region $M_1 \leq M_2$.

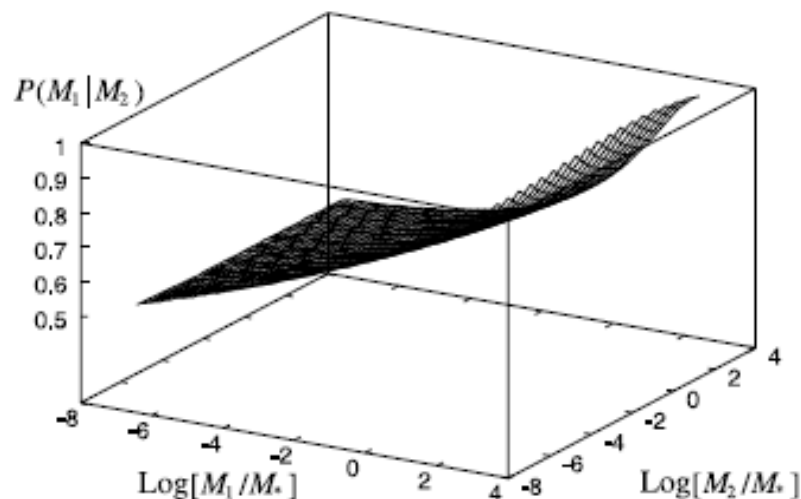


FIG. 2.—Same as Fig. 1, but for the top-hat filter and for $n = -2$

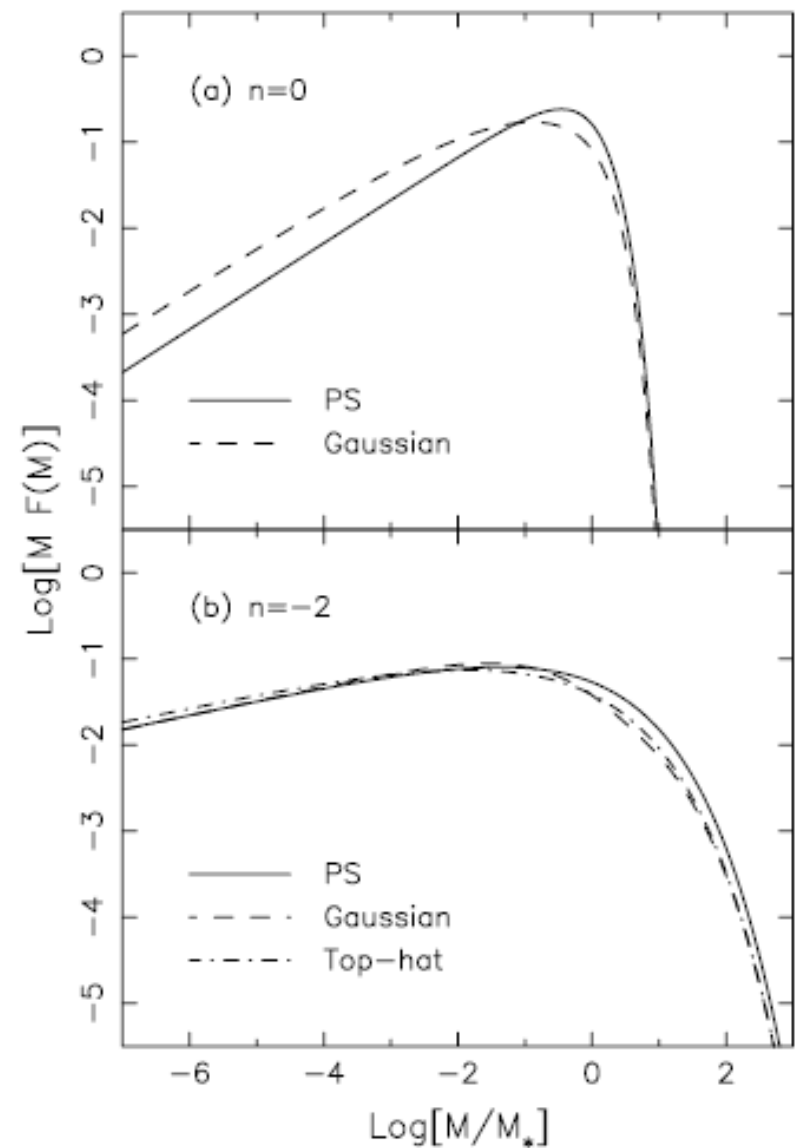


FIG. 3.—Differential multiplicity functions $F(M)$ with the filtering effect. In panel *a*, $n = 0$; in panel *b*, $n = -2$. The solid, dashed, and dash-dotted lines denote $F(M)$ for PS, the Gaussian filter, and the top-hat filter, respectively. Note that $F(M)$ for the sharp k -space filter and for the top-hat filter with $n = 0$ are identical with PS.

Nagashima (2001)

空間相関

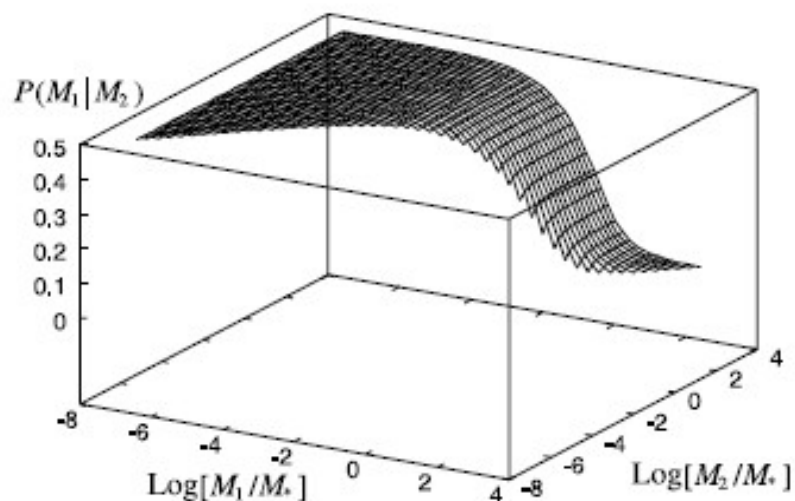


FIG. 6.—Probability $P(M_1|M_2)$ with the effect of the spatial correlation for the sharp k -space filter in the case of $n = 0$.

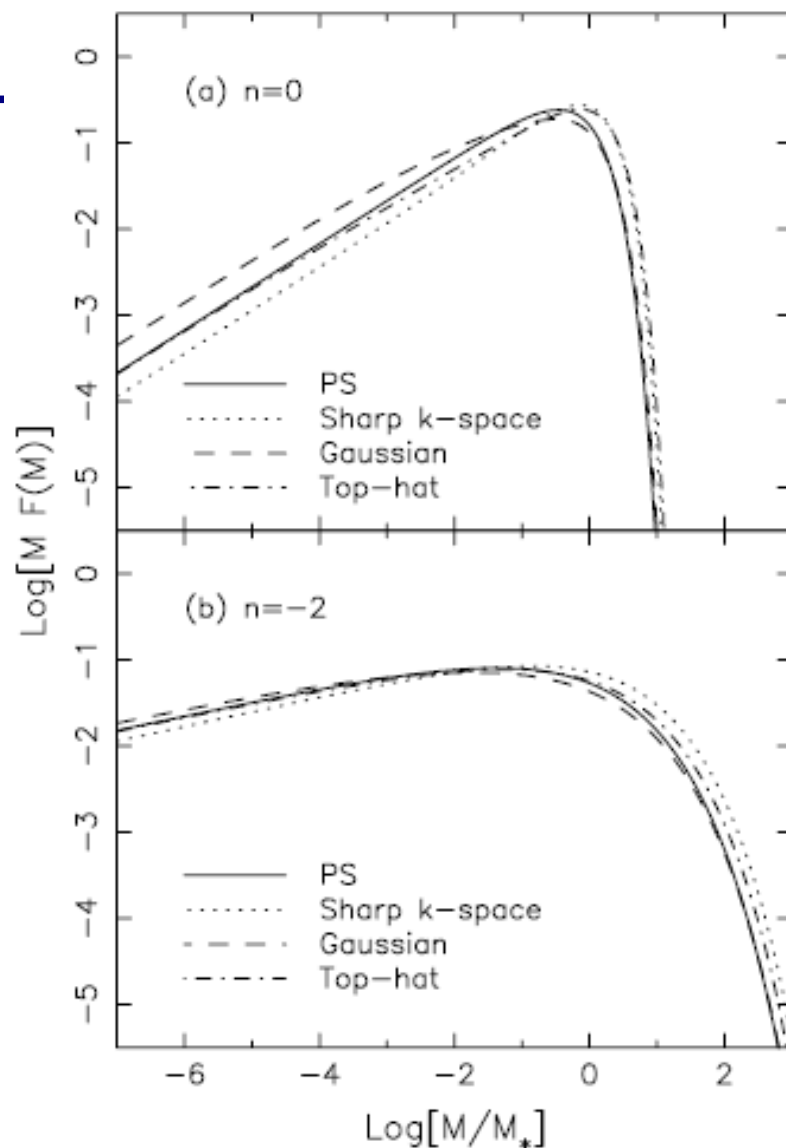


FIG. 9.—Differential multiplicity functions $F(M)$ with the effect of the spatial correlation. In panel a , $n = 0$; in panel b , $n = -2$. The solid, dotted, dashed, and dash-dotted lines denote $F(M)$ for PS, the sharp k -space filter, the Gaussian filter, and the top-hat filter, respectively.

CDM

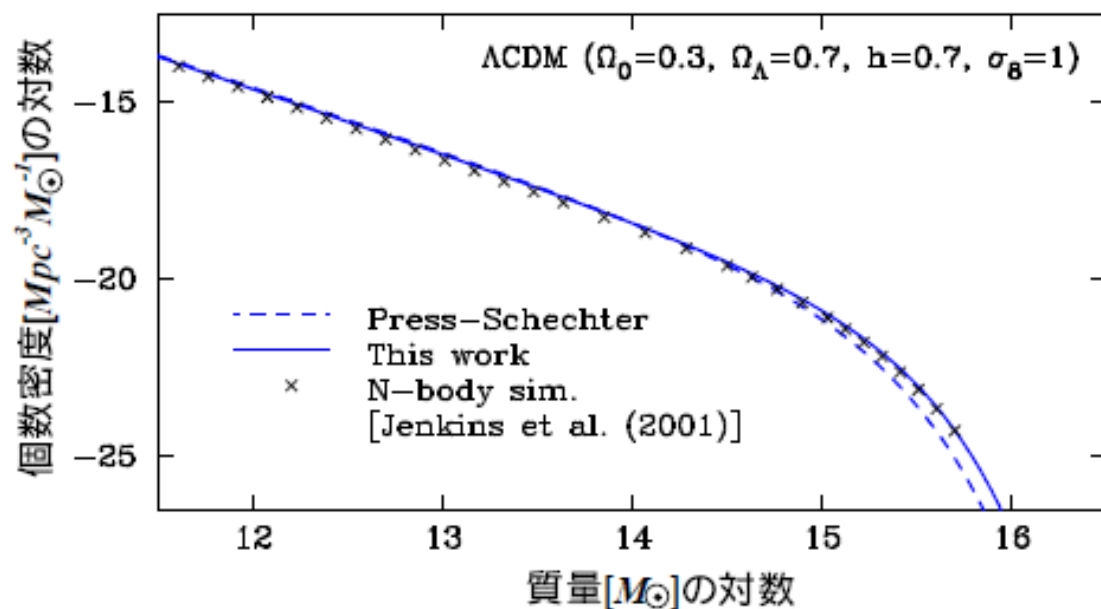


図 2: 質量ごとの天体の個数密度。 M_{\odot} は太陽質量。宇宙論モデルは最近の標準的な宇宙項入りの平坦なモデルである。

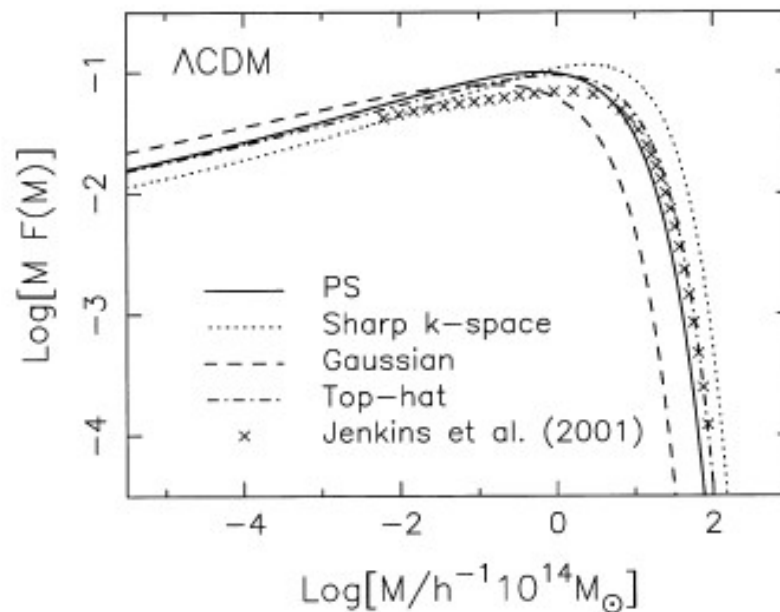


FIG. 13.—Differential multiplicity functions $F(M)$ with the effect of the spatial correlation in a Λ CDM model. The solid, dotted, dashed, and dash-dotted lines correspond to PS, the sharp k -space, the Gaussian, and the top-hat models, respectively. The crosses indicate the mass function which was obtained by fitting their N -body simulation results.

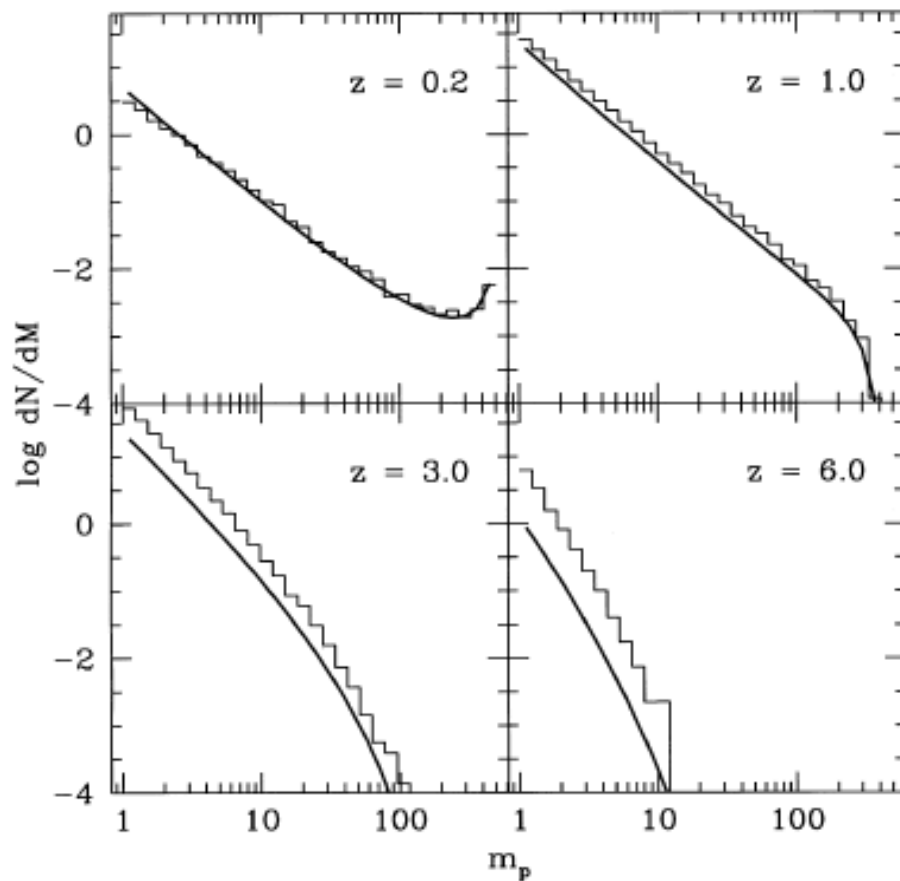


Figure 2. The number of progenitors with mass M for a halo with initial mass $M_0 = 500$, at various redshifts as shown in the figure. The solid lines are the predictions of the extended Press–Schechter theory. The histograms show the results for merger trees constructed using the Binary Tree Method without accretion, which is essentially the algorithm proposed by Lacey & Cole (1993). The trees have an excess of haloes compared to the Press–Schechter model, and the discrepancy increases with redshift.

Somerville & Kolatt (1999)