

自称「若手研究者」のビジョン 平成20年2月14日

# 「兆」規模の時代に シミュレーションが進む道

名古屋大学大学院 理学研究科

素粒子宇宙物理学専攻

理論天体物理学研究室

吉田 直紀

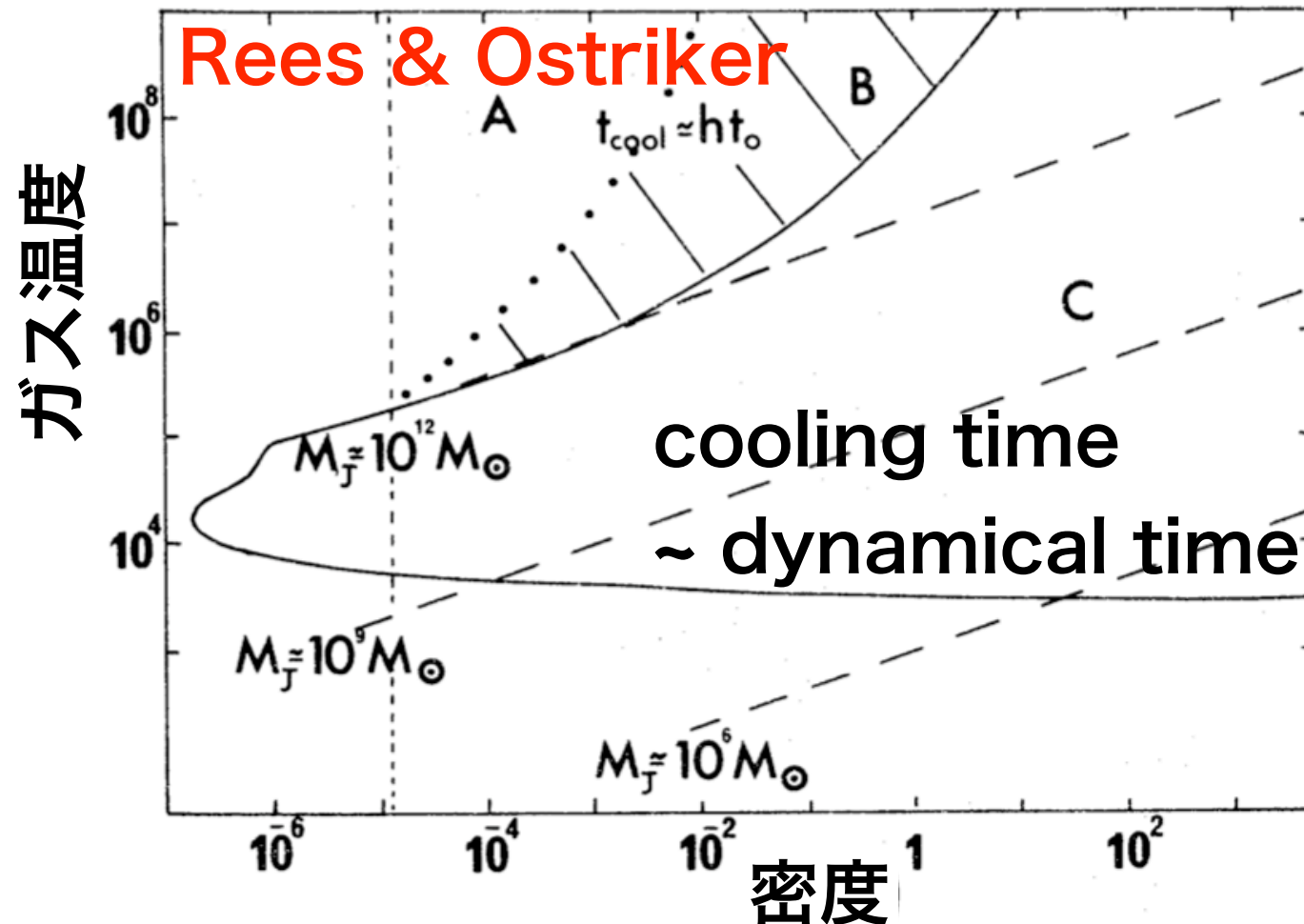
# 「銀河研究」の進化

- 30年前の銀河形成論
- 25年前の構造形成理論
- 15年前の分岐点
- 現在の銀河形成シミュレーション: MFB<sup>2</sup>H
- 5年後の銀河観測
- 5年後の銀河形成シミュレーション
- 2020年 「兆」を迎えるとき

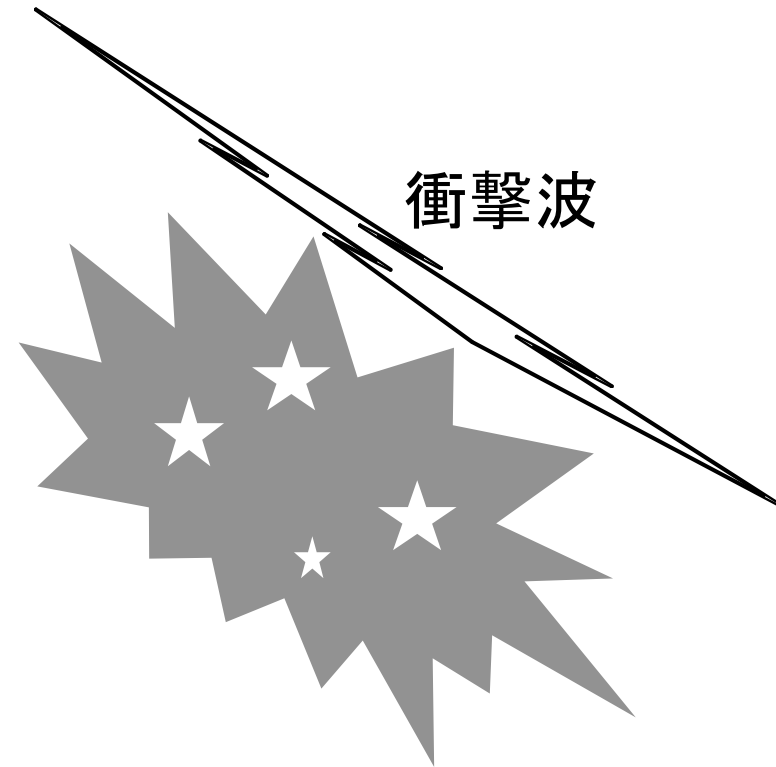
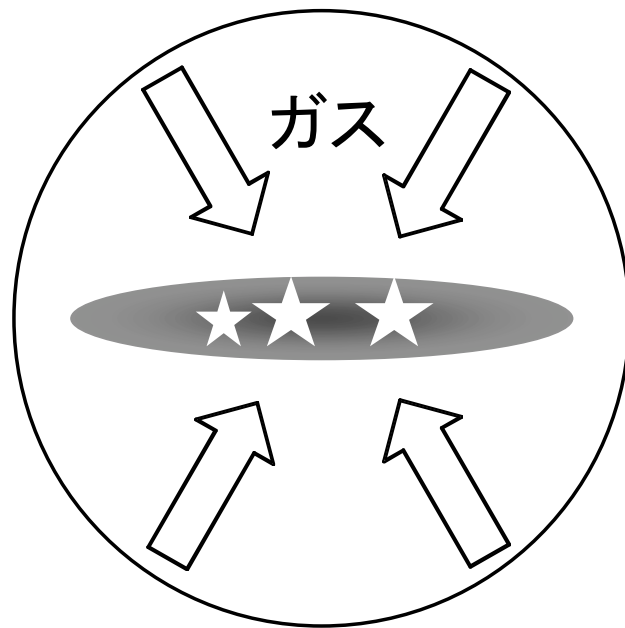
\*よりプロフェッショナルな話は  
昨年の理論懇でのレビュー参照

# 銀河形成の基本(30年前)

銀河の大きさになぜ上限があるのか



# それがどうやっておこるのか



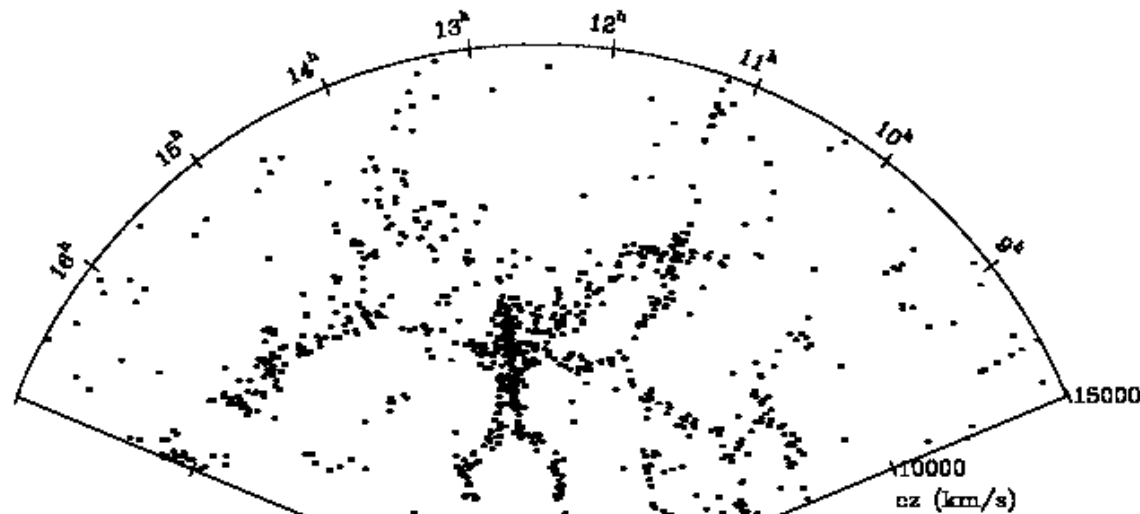
1980年代初頭

ダークハローモデル (左) と爆発誘起モデル (右)

# 情報は大規模構造から

←形成現場を見たわけではない

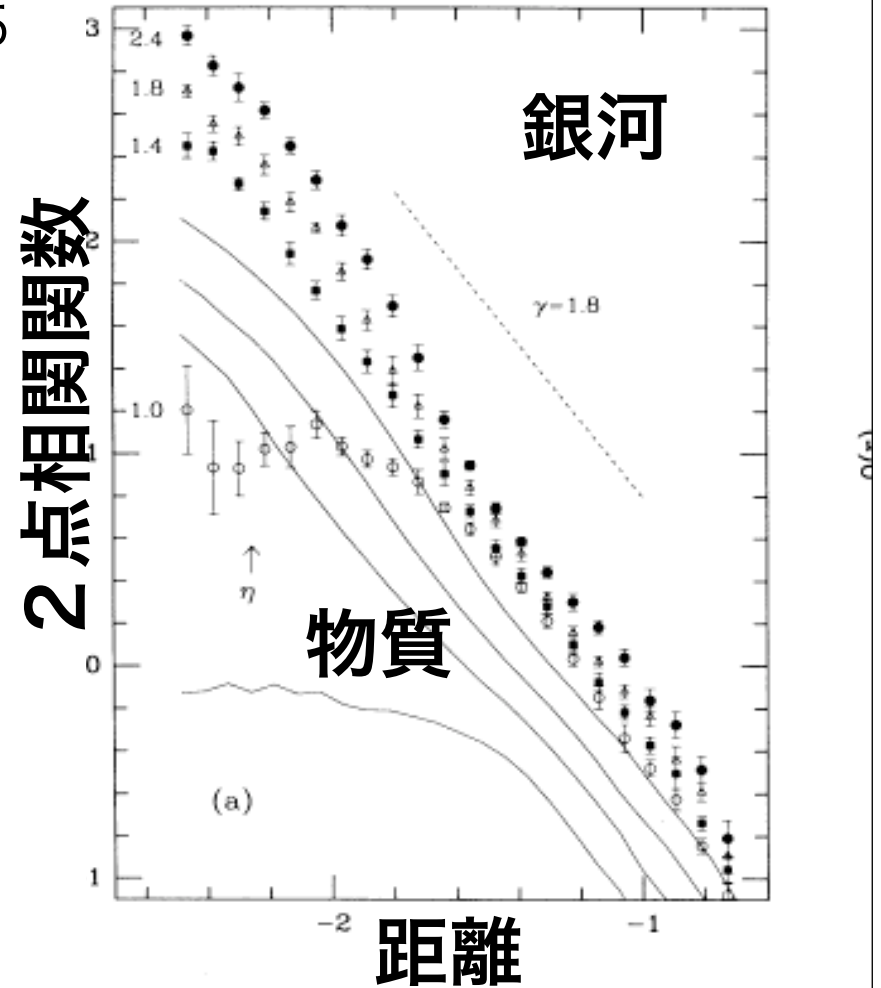
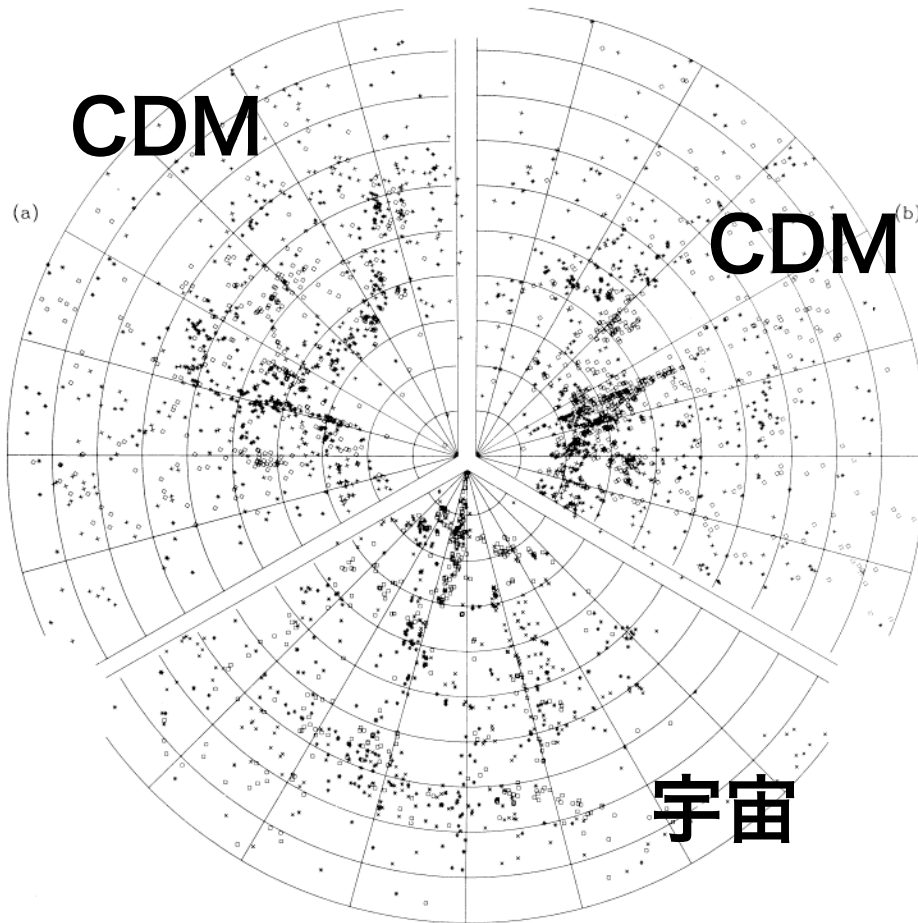
CfA galaxy redshift survey in early 80's



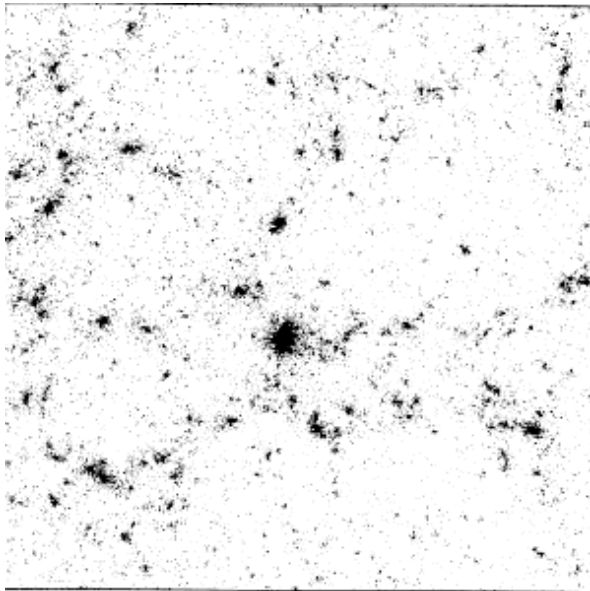
銀河形成と宇宙論との接点、  
銀河形成シナリオを間接的だが決定的に  
確かめる可能性が生まれた

# Inflation + Cold Dark Matter

Davis, Efsthathiou, Frenk, White 85



# The Cosmological Simulation



32の3乗の粒子のシミュレーションで基本的な事柄は全てやりつくした。

物質と銀河の分布は異なる  
(べきである) という

「バイアス」の概念を導入した。

...というわけで、以降行われた宇宙論的N体シミュレーションはすべて20年以上も前のDEFW85の亜流にすぎない。(100億使っても一緒)



# ちょっといい話

「ジャコブとモノーの研究（オペロン説）の亜流から抜け出したかった。ジャコブとモノーでは説明できない遺伝子の発現機構を見つけたことが最大の貢献だと思っている。」 利根川進

今日のテーマ

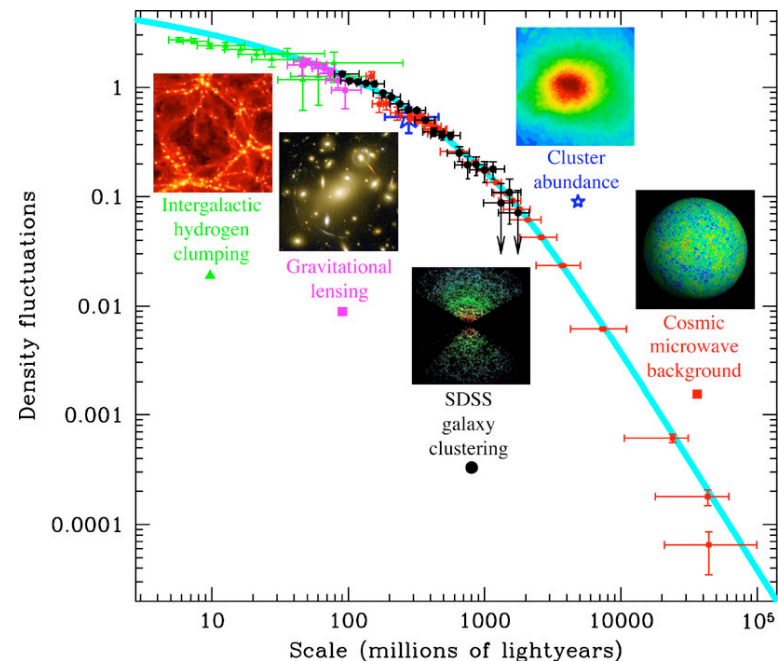
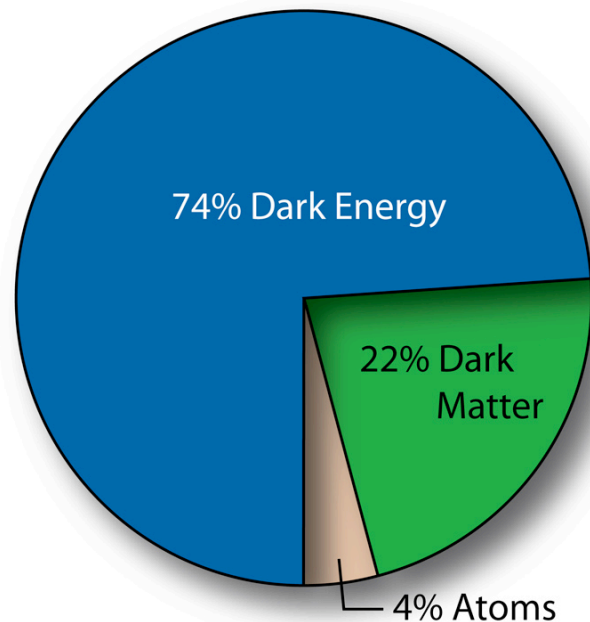
シミュレーションは  
これから銀河形成に  
どういう貢献が  
できるのか

# 宇宙論の到達点は銀河形成理論の始点

The 精密初期条件

$\Lambda$ CDMモデル, ガウシアン密度揺らぎ ( $P_k$ のみ重要)

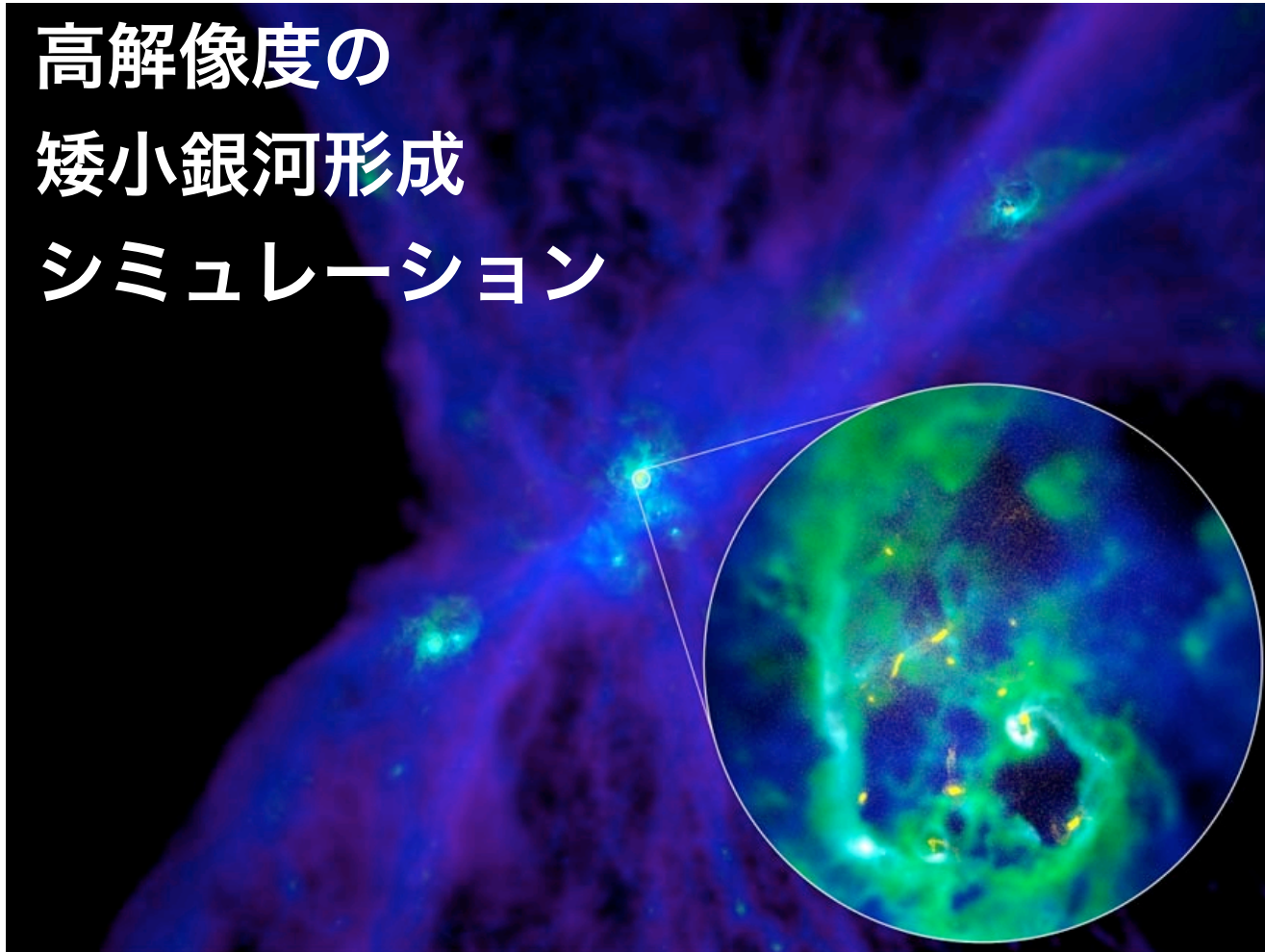
ダークマター + バリオン + 背景放射 in 膨張宇宙



# Cosmological Gal. Form.

Maschenko, Wadsely, Couchman (2008)

高解像度の  
矮小銀河形成  
シミュレーション



# シミュレーションの大きな分岐点

## DISSIPATIONAL GALAXY FORMATION. II. EFFECTS OF STAR FORMATION

NEAL KATZ<sup>1</sup>

Princeton University Observatory and Steward Observatory

*Received 1991 May 31; accepted 1991 December 4*

### ABSTRACT

We present numerical simulations of hierarchical galaxy formation, including gasdynamics, star formation, and supernova feedback. The simulations model the collapse of isolated constant-density perturbations, initially in solid-body rotation and in Hubble flow. The perturbations are made of dark and baryonic matter in a 10:1 ratio. Small-scale power is added using the Zel'dovich approximation, assuming a power-law slope of  $-2.5$ . We are successful in making a three-component system that resembles a spiral galaxy: a thin disk made of stars and gas, a spheroidal component made of stars, and a dark matter halo. The disk has a flat rotation curve and an exponential surface density and surface brightness profile. Many stars form in the dissipated gas cores of dark matter clumps that form during the collapse. The remaining gas merges to form a disk, while the dark matter and stars merge to form a spheroidal distribution. Most of the supernova energy is radiated away and does not greatly affect the evolution of the galaxy. The star formation history is combined with population synthesis models to determine the absolute and apparent brightness of the simulated galaxy in many color bands. Simulated observations are also made. The system is brightest during a burst of star formation that occurs as the disk forms. It first reaches its peak  $I$ -magnitude of 22 at  $z = 2$  and is fainter than  $B = 24.5$  at  $z = 1$ .

*Subject headings:* galaxies: formation — galaxies: spiral — hydrodynamics — methods: numerical

# 銀河の中の星形成

## 現代シミュレーションのオリジン

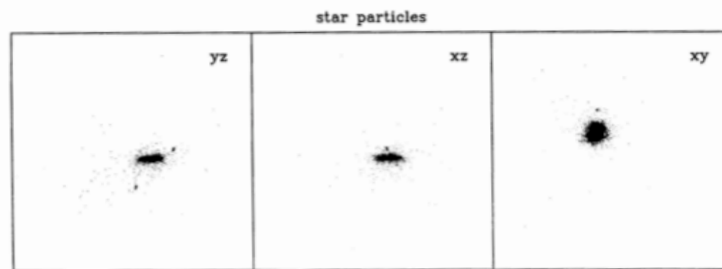
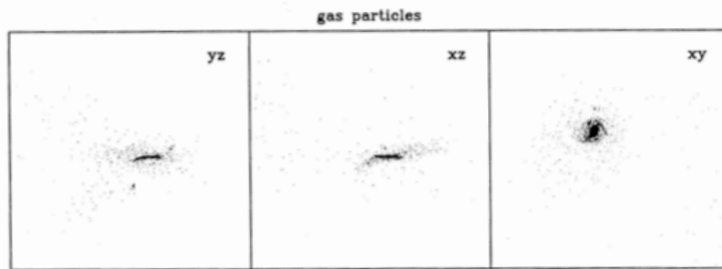
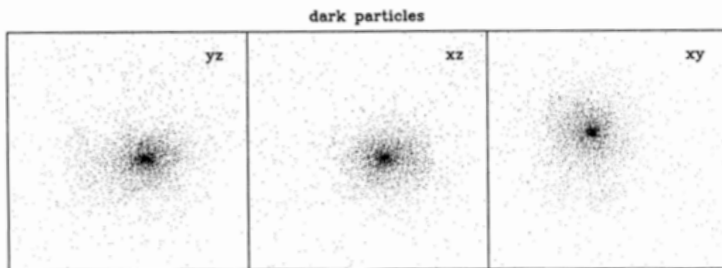


FIG. 11

**Katz (1992 ApJ)** この論文で  
「銀河なのかもわからないもの」

から

「銀河のようなもの」へ

と”進化”した

しかし...

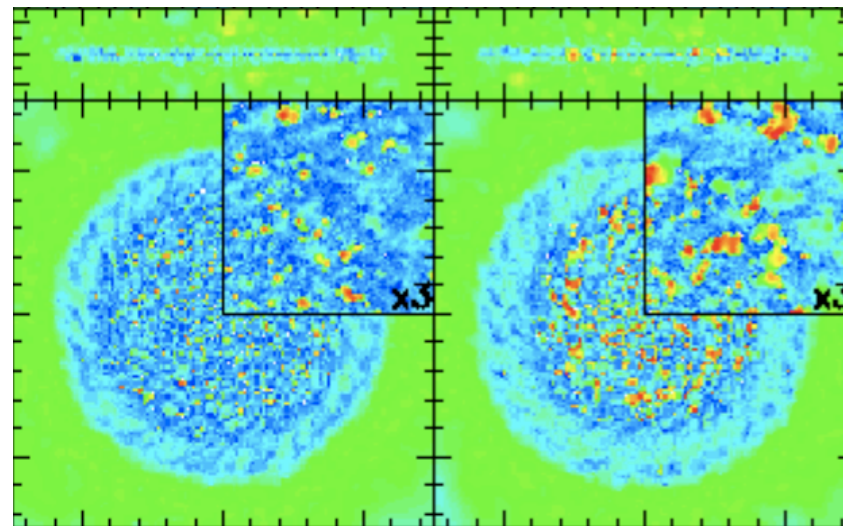
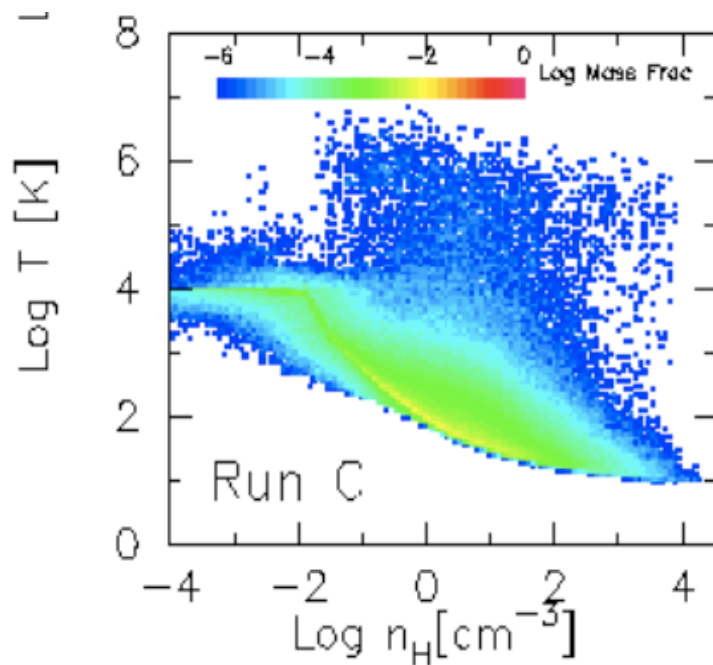
「銀河そのもの」へ

続く道にはつながらなかった

# 銀河形成シミュレーションの先端

Saitoh and Amanogawans (2008)

“Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation”

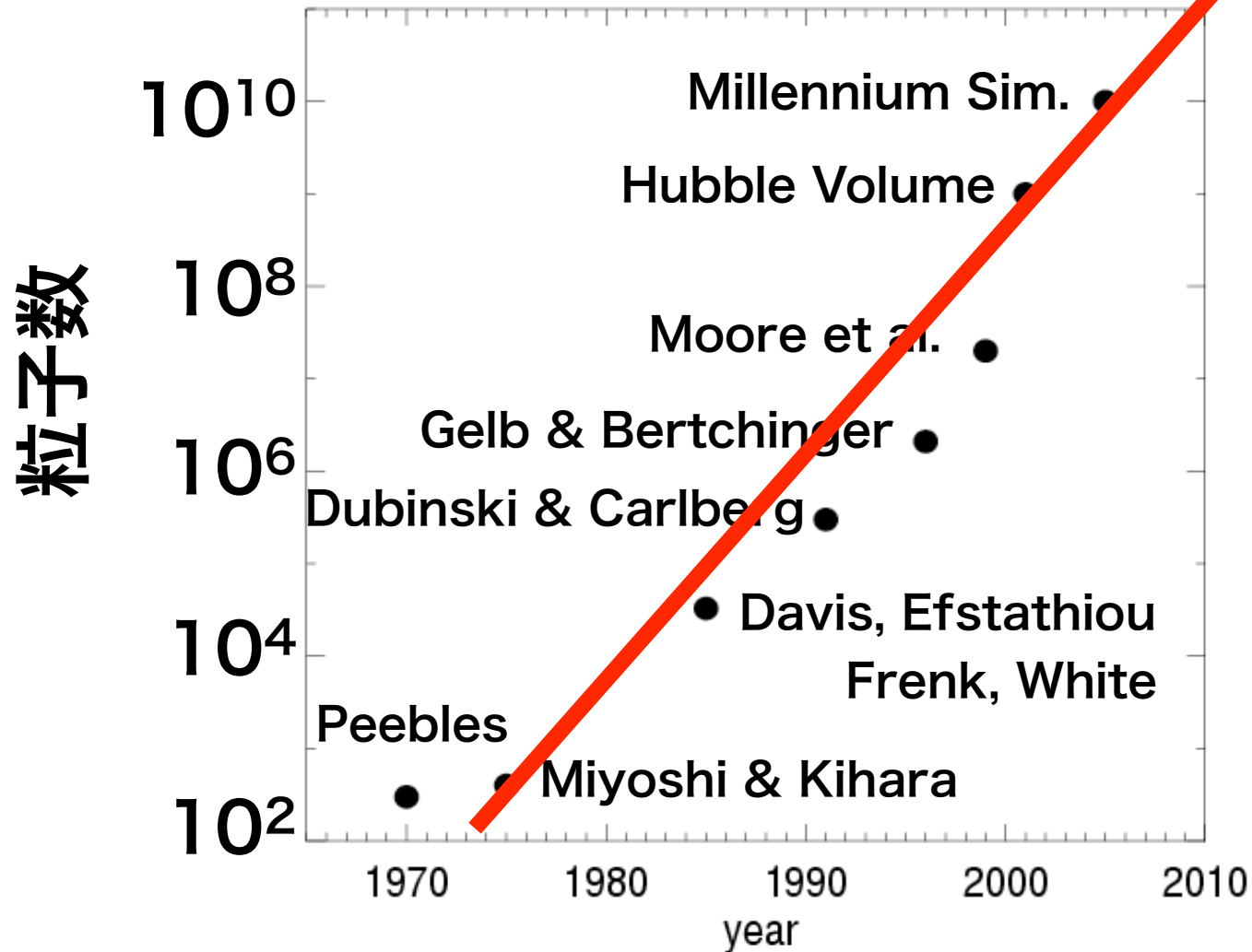


1000万体の粒子で銀河円盤を表現。  
これが「兆」規模になったとき  
世界が変わる！

Amanogawans:

Saitoh, Daisaka, Kokubo, Makino, Okamoto, Tomisaka, Wada, Yoshida

# N体計算の歴史



この先意味があるのか



# 将来...

●まず、最近は10の11乗個（1千億）  
のシミュレーションが行われたらしい。  
(Horizon Simulation)

★2013年には  $N = 1$  兆個

★2020年までに  $N = 10$  兆個

...

★2070年には**アボガドロ数！**

# 22世紀までに何がおこるか

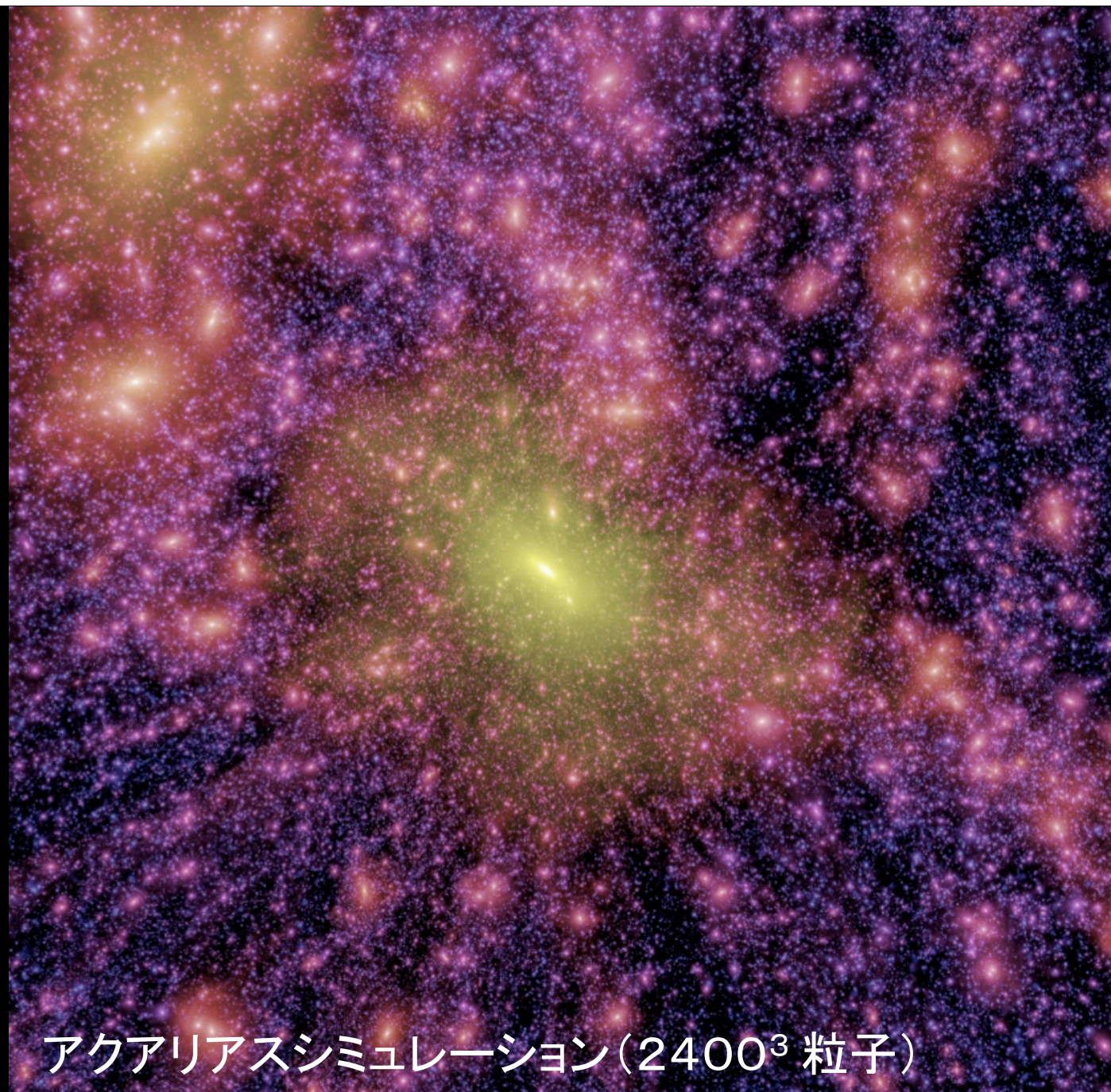
- 1 Large Nを目指すだけの（実質的には）  
何の進歩のない分野はすぐに廃れる
- 2 画期的な計算方法、あるいは計算機が  
あらわれて、N体計算なぞというものは  
歴史の1ページになっている
- 3 いずれにしるiPS細胞以外の科学には  
お金がつかなくなっている

**全部同時におこる可能性もあります**

一つの極端

ダークマターシミュレーション

冷たい暗黒物質モデルの予言



アクアリアスシミュレーション(2400<sup>3</sup> 粒子)

# 極超解像度シミュレーション “AQUARIUS”

NUMERICAL PARAMETERS OF AQUARIUS RUNS

Springel, Navarro, Jenkins, White,  
Frenk, Yoshida et al. (2007)

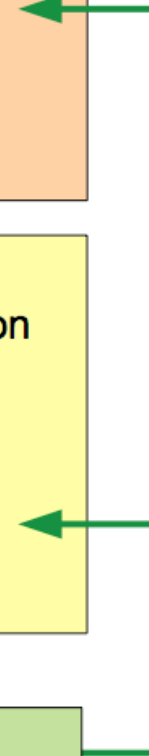
Halo A	Particle number in largest FOF group	# of substructures in largest group	mass resolution
400 <sup>3</sup>	5.546.052	1.412	2.49 x 10 <sup>5</sup> M <sub>⊙</sub> /h
800 <sup>3</sup>	44.049.741	9.490	1.67 x 10 <sup>5</sup> M <sub>⊙</sub> /h
1200 <sup>3</sup>	157.239.052	30.178	1.00 x 10 <sup>4</sup> M <sub>⊙</sub> /h
2400 <sup>3</sup> (15 x <i>Via Lactae</i> )	<u>1.258.000.000</u>	~450.000	1.25 x 10 <sup>3</sup> M <sub>⊙</sub> /h (10 pc/h softening)

Halo B	Particle number in largest FOF group	# of substructures in largest group	mass resolution
700 <sup>3</sup>	38.608.777	6.353	2.49 x 10 <sup>5</sup> M <sub>⊙</sub> /h
800 <sup>3</sup>	54.991.282	8.897	1.67 x 10 <sup>5</sup> M <sub>⊙</sub> /h
1200 <sup>3</sup>	191.836.727	34.018	4.95 x 10 <sup>4</sup> M <sub>⊙</sub> /h

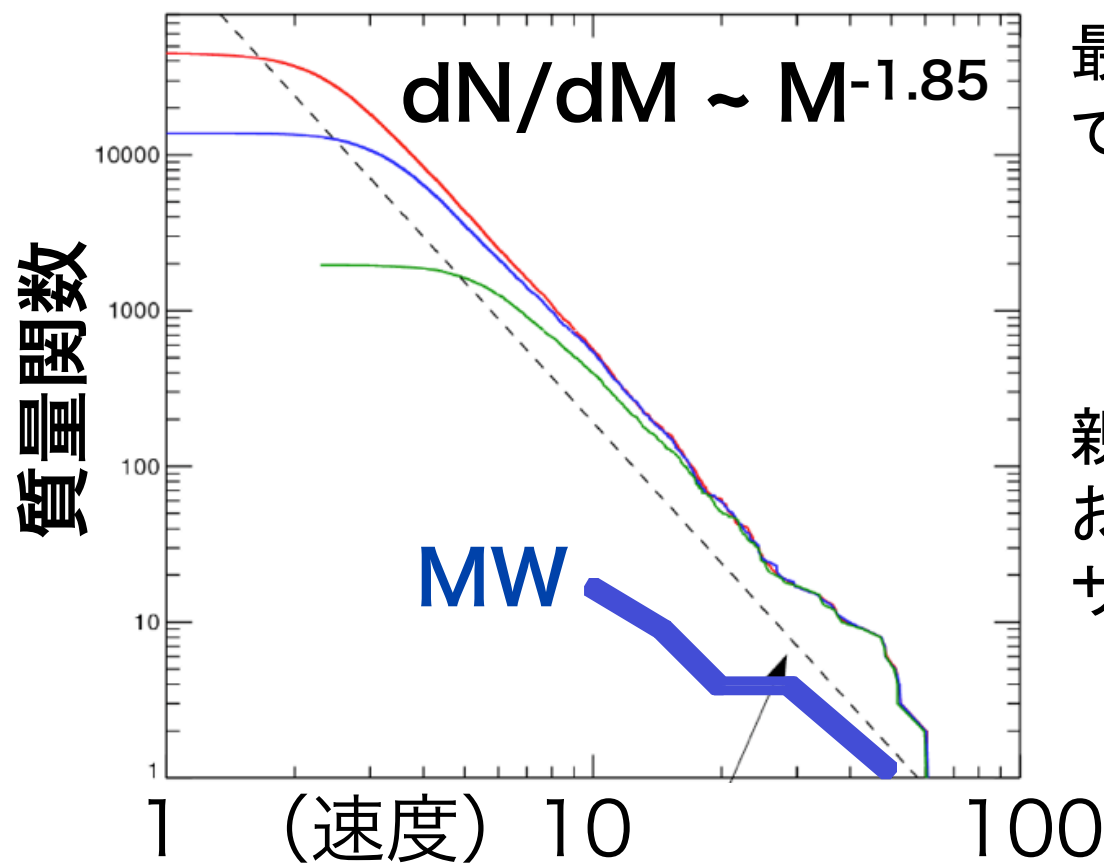
Diemand, Kuhlen & Madau (2007):

“Via Lactae simulation”

~84.700.000      ~10.000      1.53 x 10<sup>4</sup> M<sub>⊙</sub>/h



# サブハロー速度関数



最小スケール (~km/sec)  
で数十万個のサブハロー

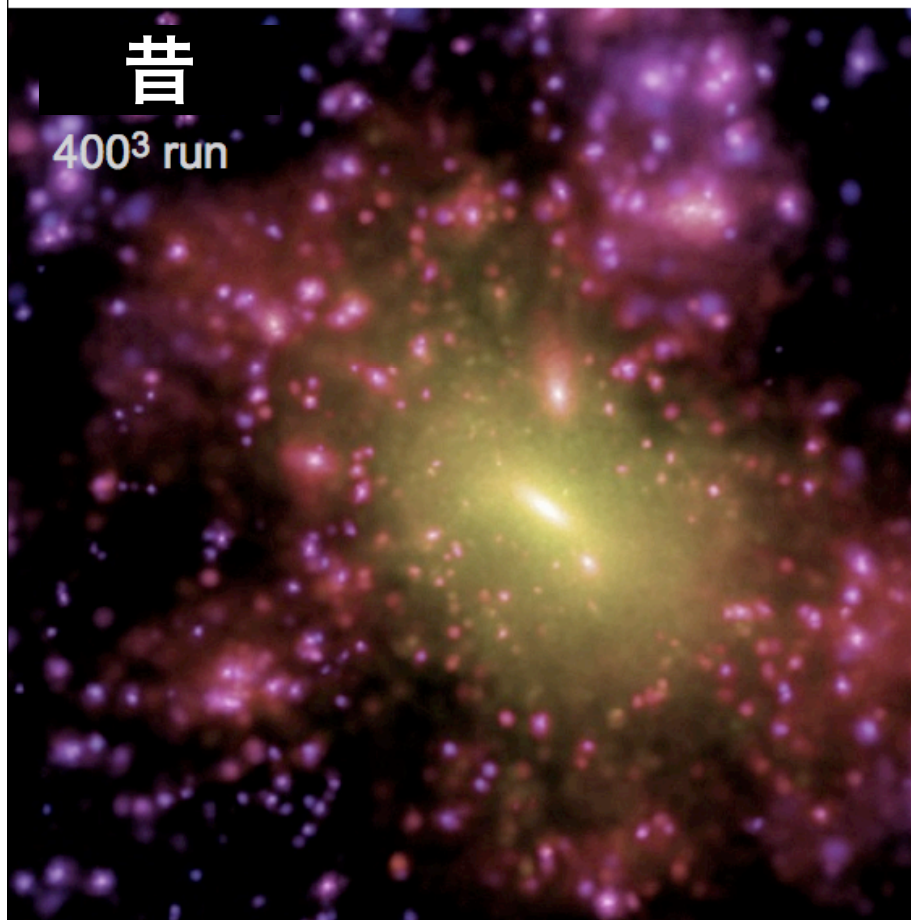
親ハローの質量の  
およそ1割程度が  
サブハローに含まれる。

fit by Reed et al. (2005)

# 一部の問題を除いてこれで十分

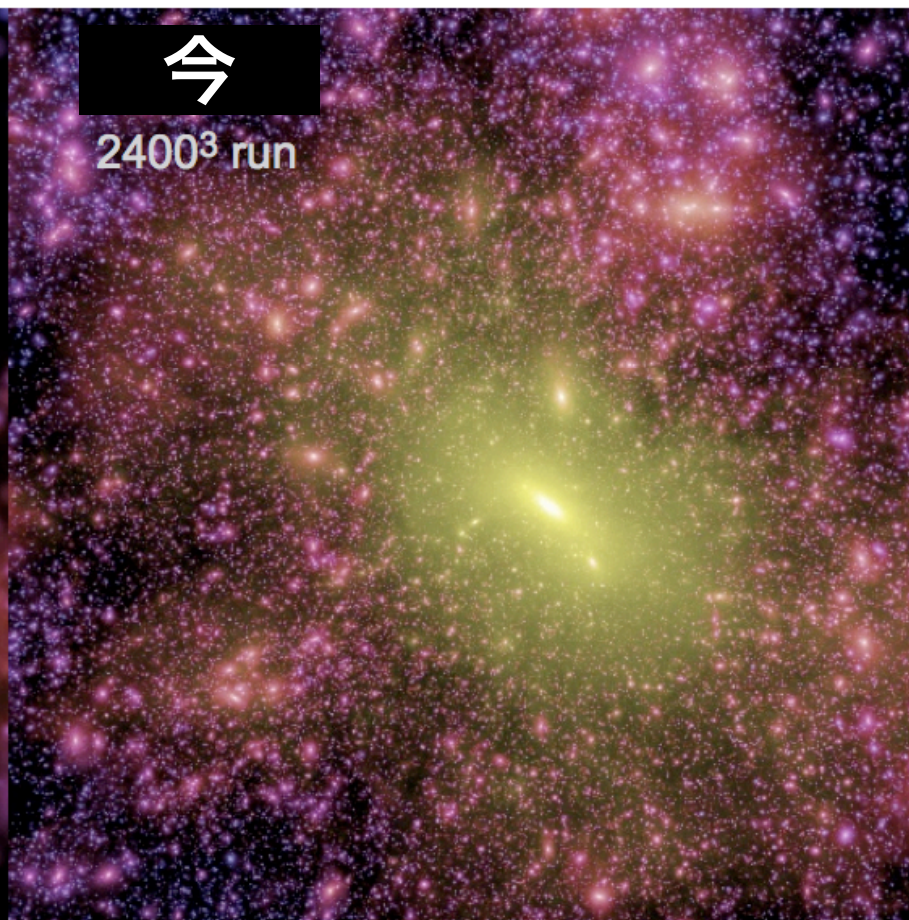
昔

400<sup>3</sup> run



今

2400<sup>3</sup> run



The Virgo Consortium (2008)

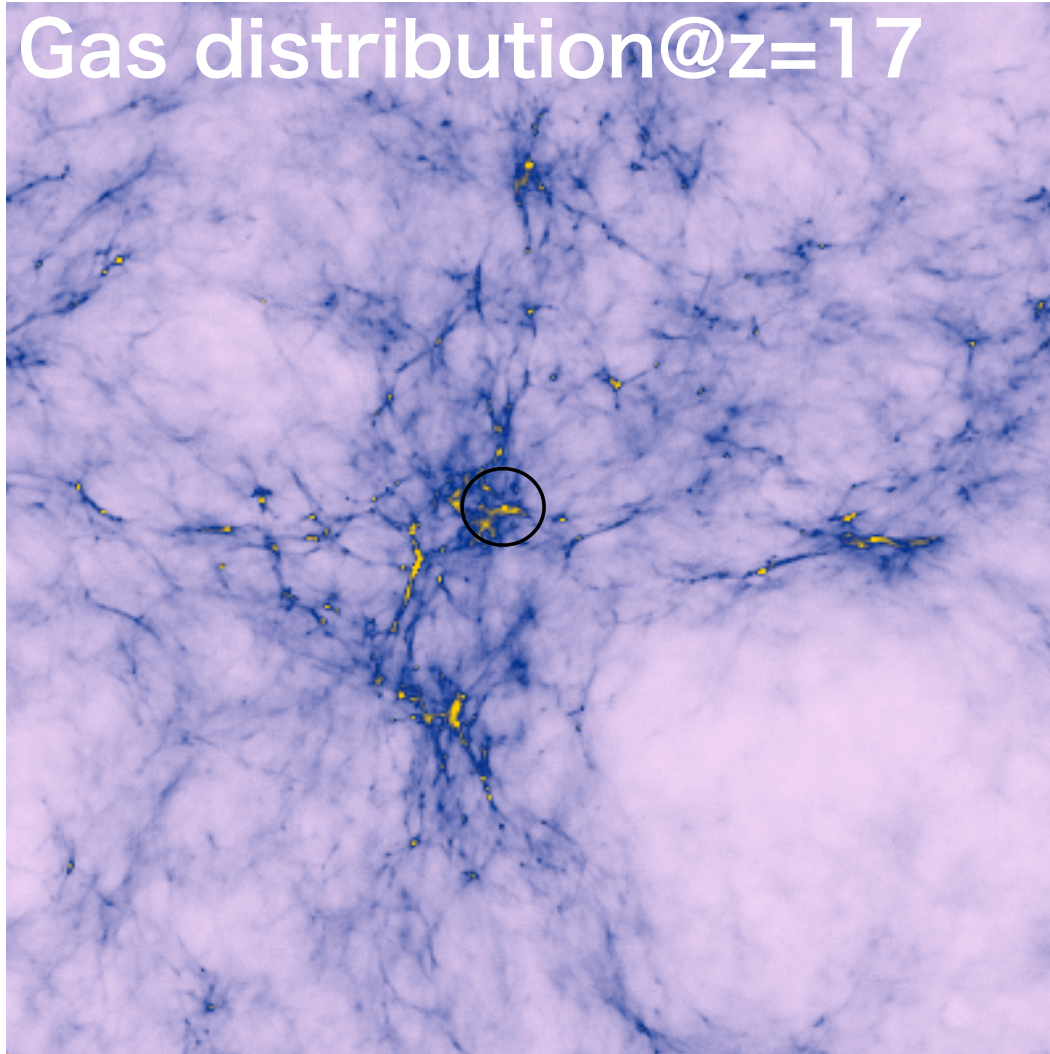
これから空間解像度  
よりも  
重要になる物理解像度

～プロトタイプとしての  
PopIII形成シミュレーション～



# Molecular Gas Clouds at High-z

Gas distribution@z=17



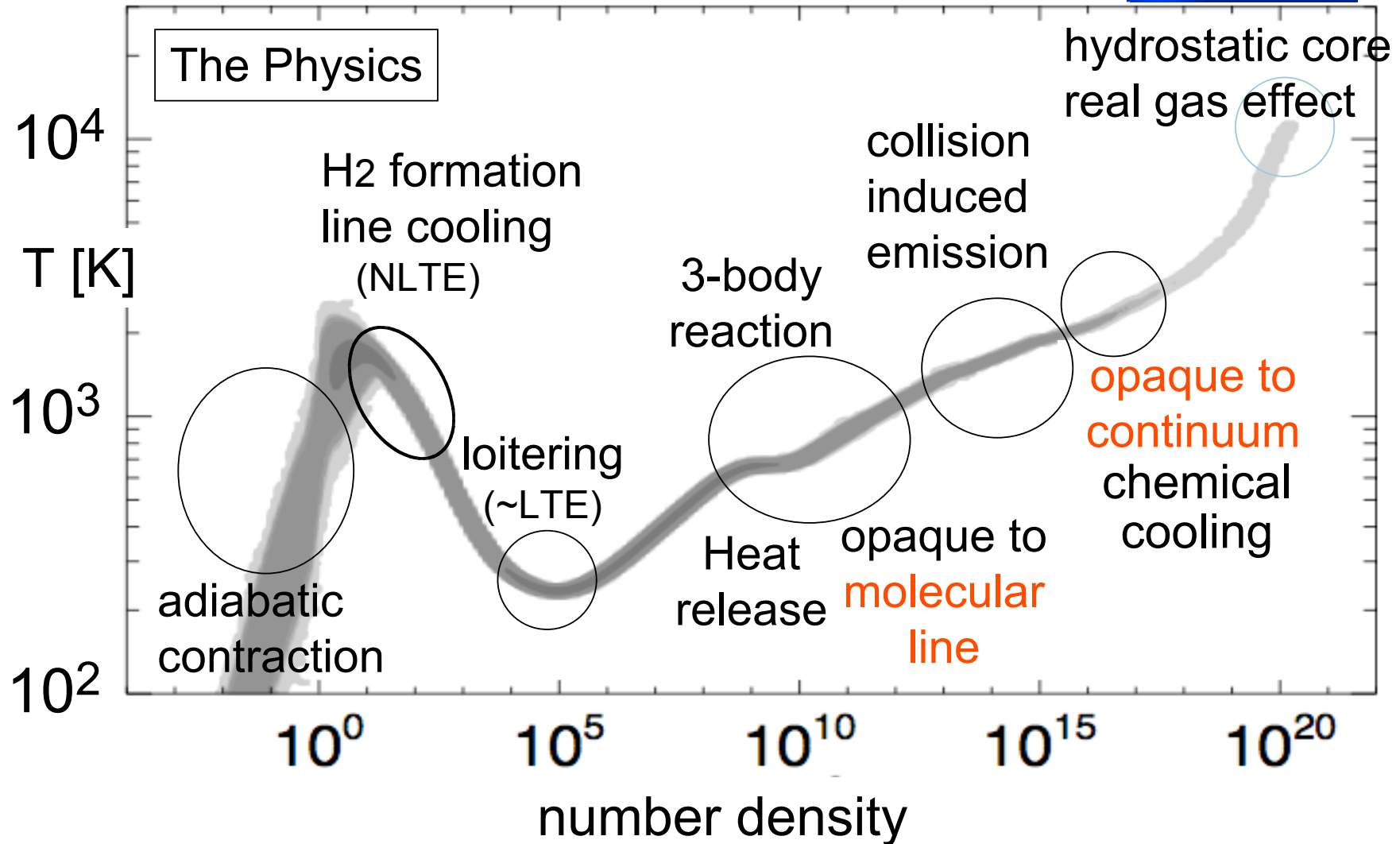
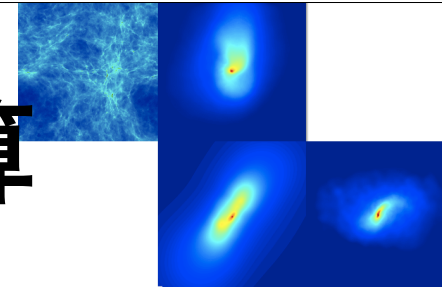
Yellow spots at the intersections of filaments  
“1 cloud per halo”

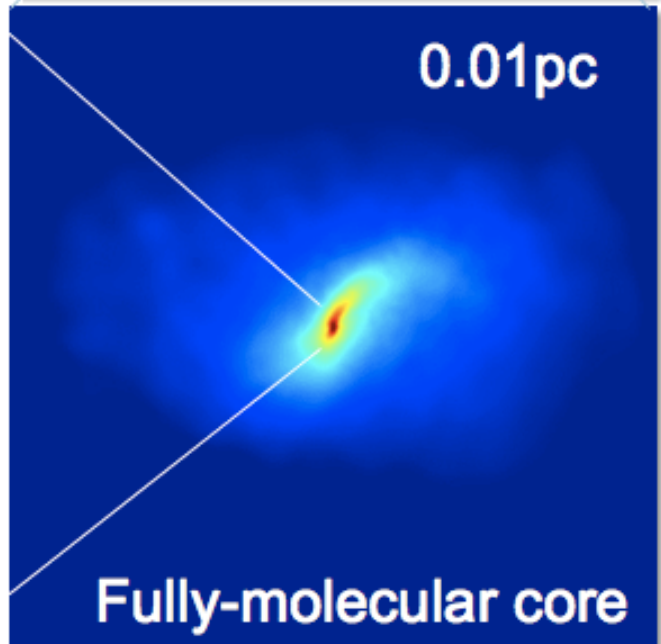
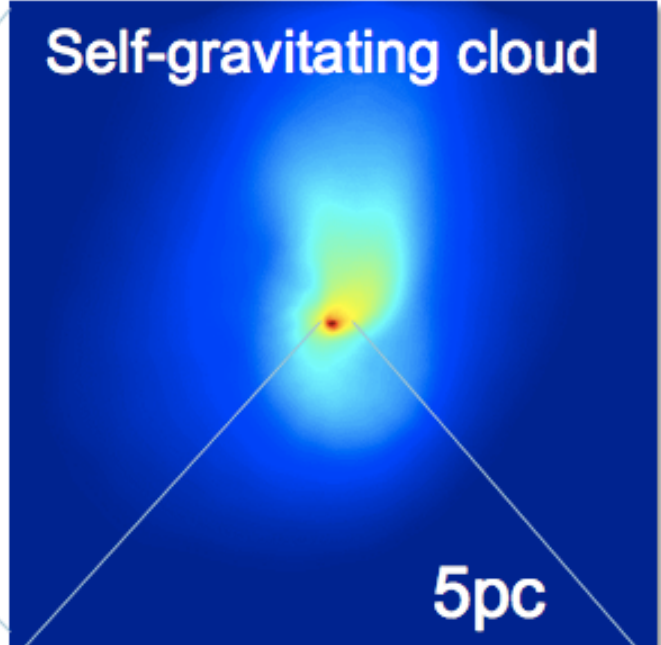
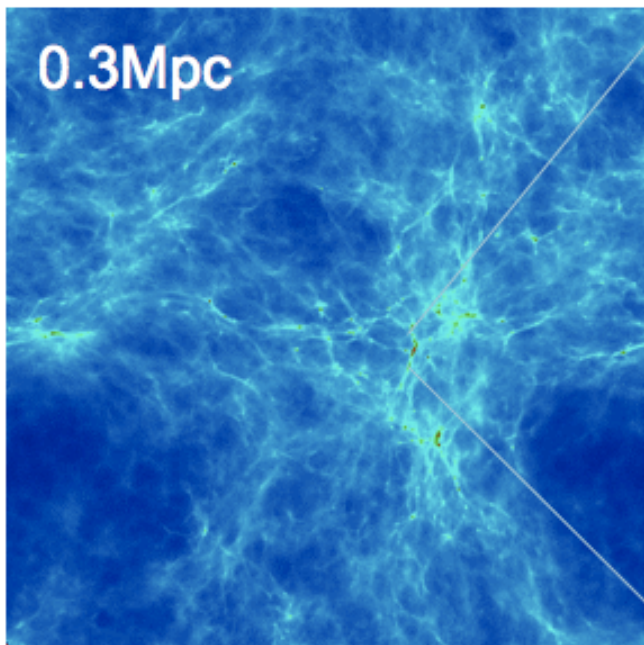
Host dark halos:  
 $M \sim 10^6 M_{\text{sun}}$   
 $T_{\text{vir}} \sim 1000 \text{ K}$

Strongly clustered, large bias.

Yoshida, Abel, Hernquist, Sugiyama 2003

# 熱化学進化の直接計算





# 現状

- 質量解像度 500冥王星質量



- ダイナミックレンジ1兆

~ Mpc → R<sub>sun</sub> !

- 全域で局所ジーンズ質量を解像
- 重要な物理はすべて第一原理的

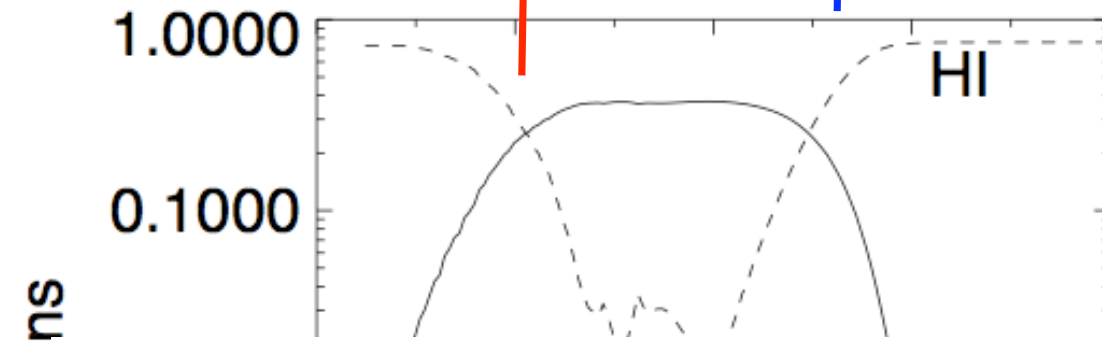
にとりいれている

シミュレーションの一つの究極の形

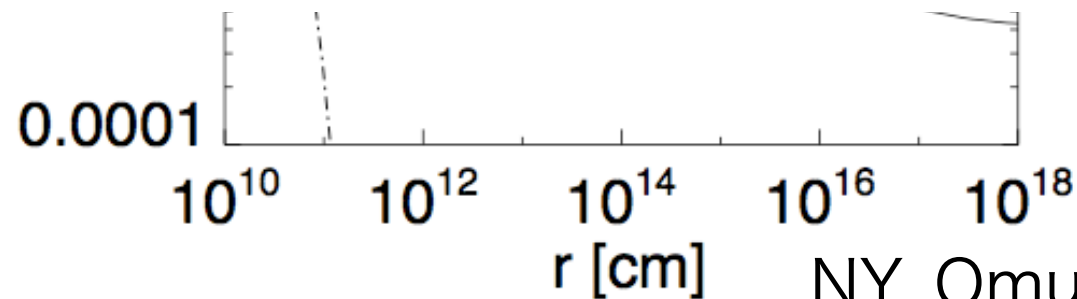
# ガスコア内部構造

1 Msun fully molecular cloud

0.01 Msun atomic core



このレベルで説明できるようになった



NY, Omukai in prep.

# 理論が先か観測が先か

よくある誤りはわれわれの理論をあまりに  
真剣にうけとることではなくて、われわれの  
理論を十分真剣に受け取らないことである。  
私たちが机の上でいじっているこれらの  
数字や方程式が、実際の世界とかかわって  
いるということを実感するのは  
いつでも難しいことである。

— スティーブン ワインバーグ

# 自称「一若手研究者」の ビジョン

# 銀河の形成進化の理解には

大域的な物質の分布

ダークマターの分布、星の分布

ガス全体の分布、冷たいガスの分布

ガスから星の形成

星からのエネルギーの供給

ブラックホールの分布、質量

放射場の変動

星の重元素量、ガス中の重元素分布

ダストの生成、分布

.... (まだまだ続く)



# 銀河形成数値シミュレーション

- ▶ 宇宙論的設定での銀河形成に関しては、今のところセミアナと同じことを表現している。(したがって実効的解像度で常に劣勢)
- ▶ ガスや塵の分布や運動が重要になればそれなりに重要になる (かも)。

問題点) 高密度領域で星粒子を”つくる”という以上のアイデアがなかなか出てこない。

# 2020年までに...

★  $N = 10$ 兆!

★ 銀河形成シミュレーションでは

質量解像度が10分の1太陽質量

→ 従来のIMF/Feedback使えません

どんなsubgridやりますか、  
direct simulation できますか、  
それともシミュレーションやめますか

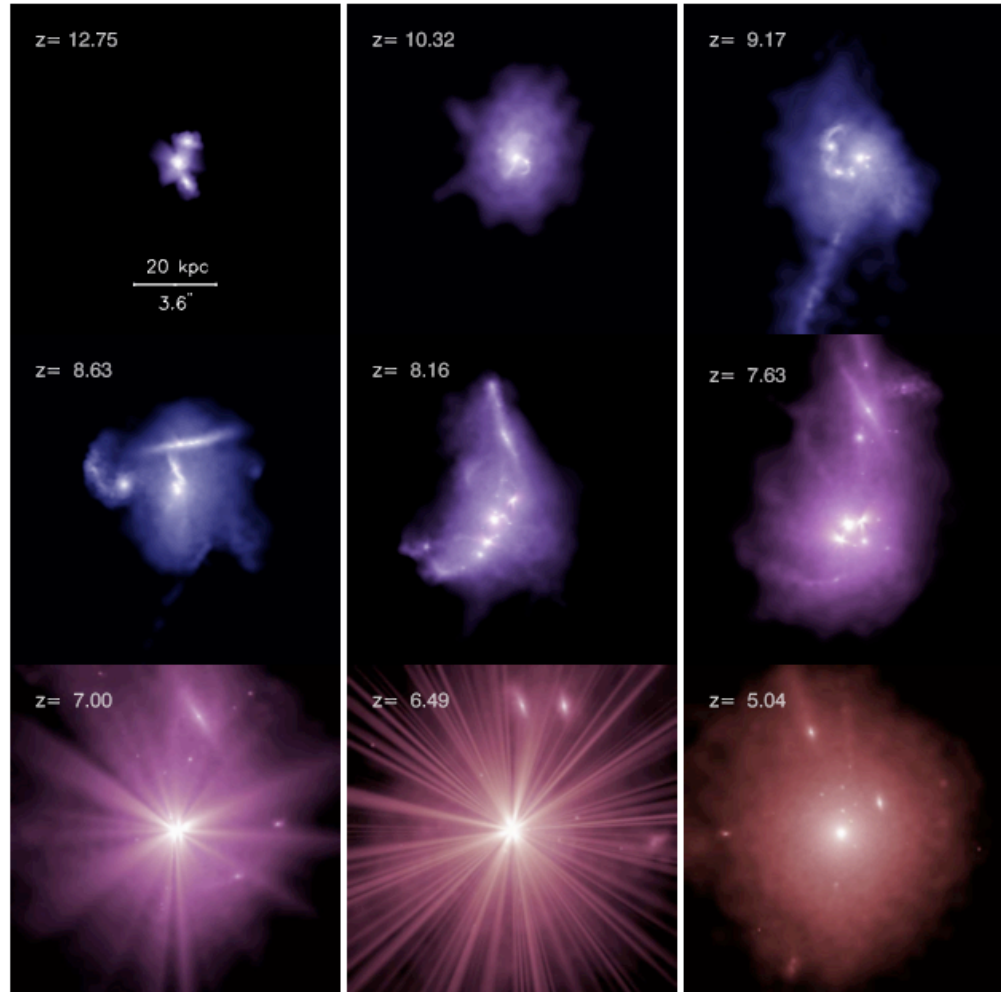
# 星形成やりますか...

- 磁場、ダスト、宇宙線、  
局所／背景放射 ... 非常にややこしい  
一つの方角性 → 次の斎藤講演
- High-z ならもう少し状況は楽なのではないか（希望的観測）  
少なくとも小さなシステム（矮銀河程度）、低金属量からはじめられる。

# 銀河規模の星形成

- ★ 分子ガス雲の質量関数や分布、  
生き残り確率の研究はすこしずつ  
進んできた。観測、理論  
これからALMA/Herschel
- ★ 銀河円盤のシミュレーションも  
reviveしている。

# ブラックホールの形成進化



また別の機会にでも

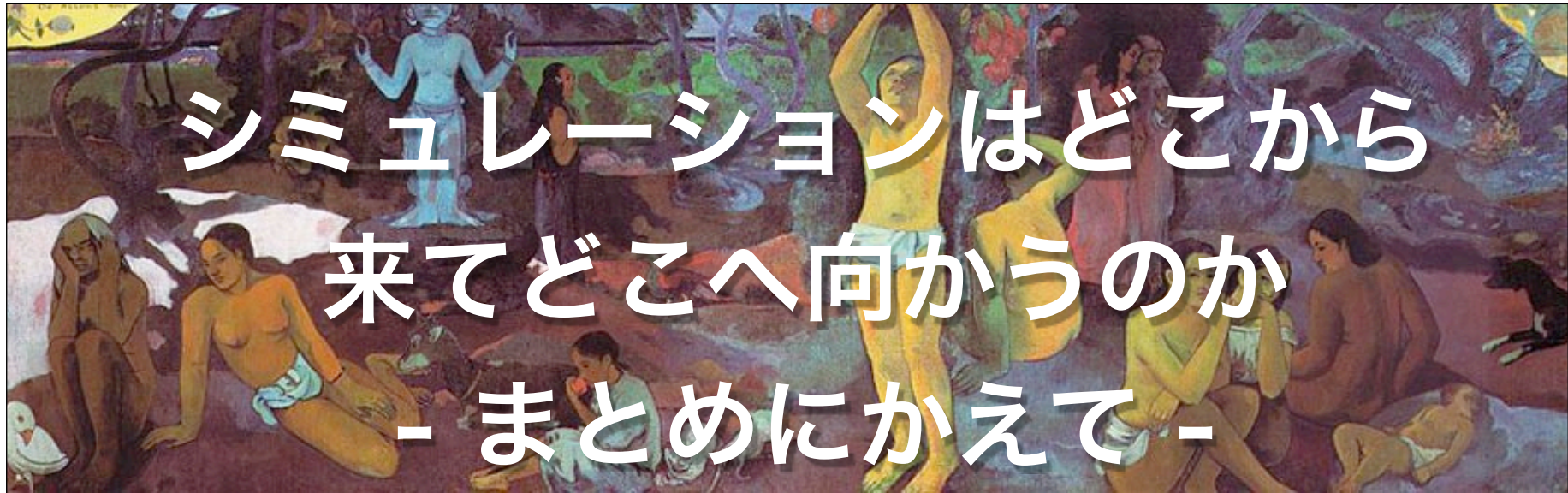
参照 Li et al. 2007

PopIIIの残骸を種にして合体とガス降着でBH成長

かなり限界の仮定を

してz~6でようやく

$10^9 M_{\text{sun}}$ のBHになる



★Nを増やす方向で解決できることは大方解決してきた

★すでに収穫逡減の法則にしたがいつつある

マンモスの道：大きな計算に見合う成果が出なくなり、  
一部のマニアックなものになる

(イ)バラの道：「銀河のようなもの」から脱却して  
計算機上に「本当の銀河を表現する」

# ただし

初期条件はあたえられ、  
もういくつ寝るとALMA時代  
—銀河形成が一番おもしろい!

「兆」規模シミュレーションの展望  
—未知数 日本 の優位性

そもそも星や銀河がどうやってでき、  
進化してきた、それこそが人類共通  
の「知」となりうる。“Fundamental”