銀河形成

（シミュレーションの話を中心に）

2011年クロスオーバーセミナー

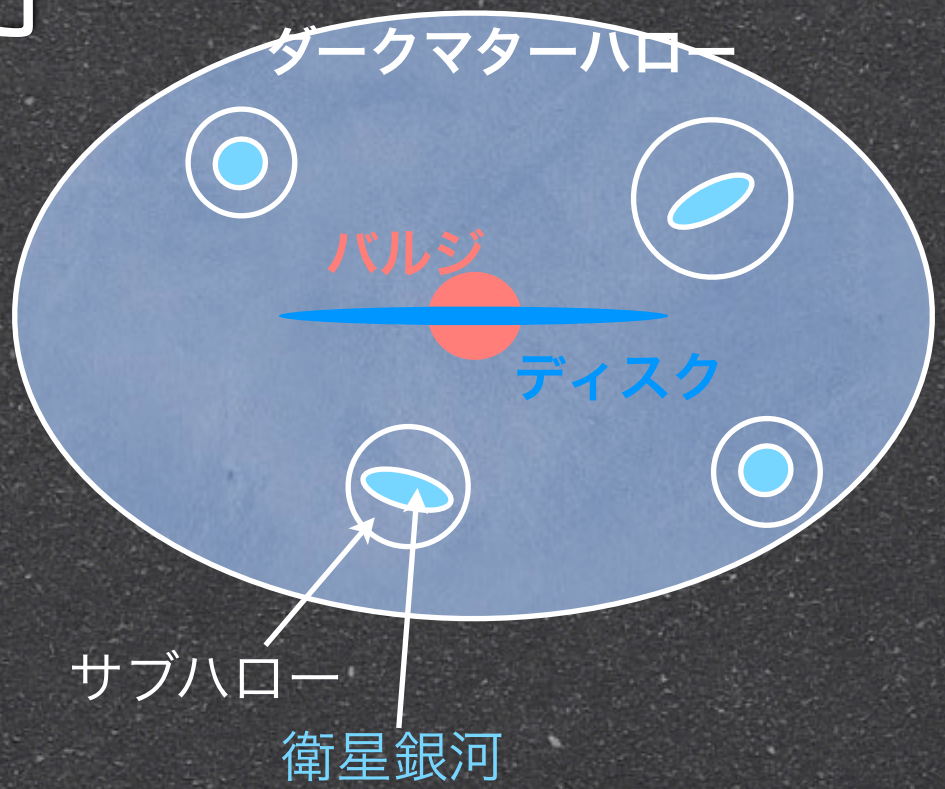
岡本　崇

Talk plan

- 基本的にまとまりのないお話
  - 銀河形成についての一般的なお話
  - 銀河形成シミュレーションってのは具体的に何をやっているのか．歴史的なこと及び最近の展開．
  - 現状
  - 今後

1．銀河形成についての一般的なお話

銀河



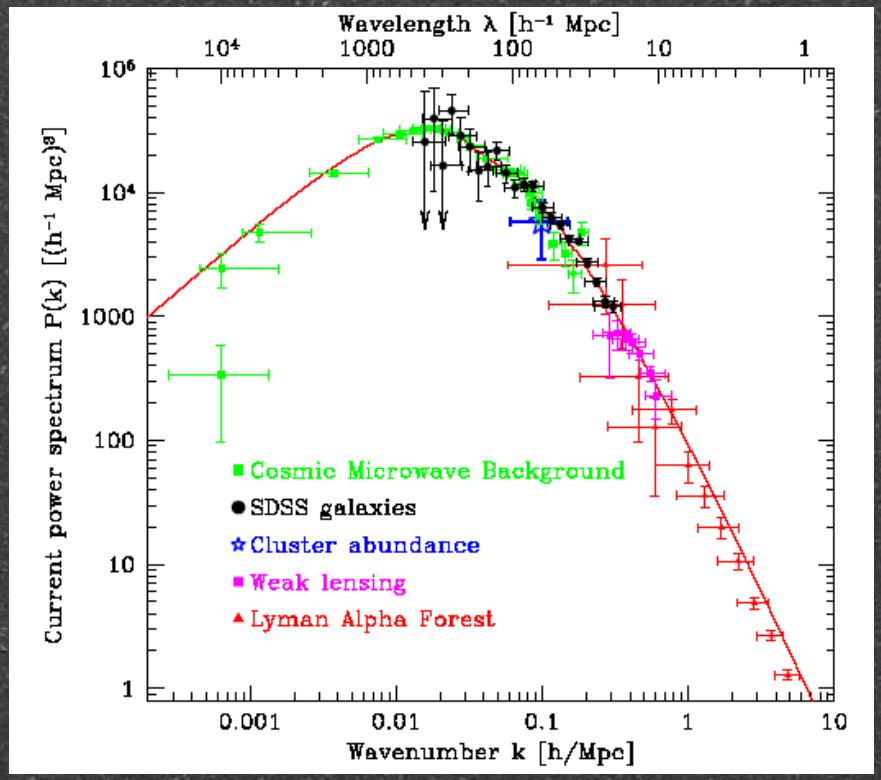
- ダークマターハーローという
  ダークマターの密度揺らぎが
  自己重力崩壊してvirialize
  した天体の中心に存在
- 主にバルジと円盤という２つの
  成分から成る
  - バルジが卓越したもの → 楕円銀河（M87とか）
  - 円盤が卓越したもの → 円盤銀河（Milky Way とか M31 とか）

初期条件

- 銀河や銀河団のような天体は宇宙の初期密度揺らぎから生まれる（初代星がこのような天体で最小のもの）
- 初期密度揺らぎの性質を決めれば初期条件が決まる
  - inflation (flat) + random Gaussian 揺らぎ

ΛCDM: The standard cosmological model

- 宇宙マイクロ波背景輻射の温度揺らぎ，宇宙の大規模構造，遠方 Ia 型超新星爆発の観測から平坦低密度な cold dark matter 宇宙が確立

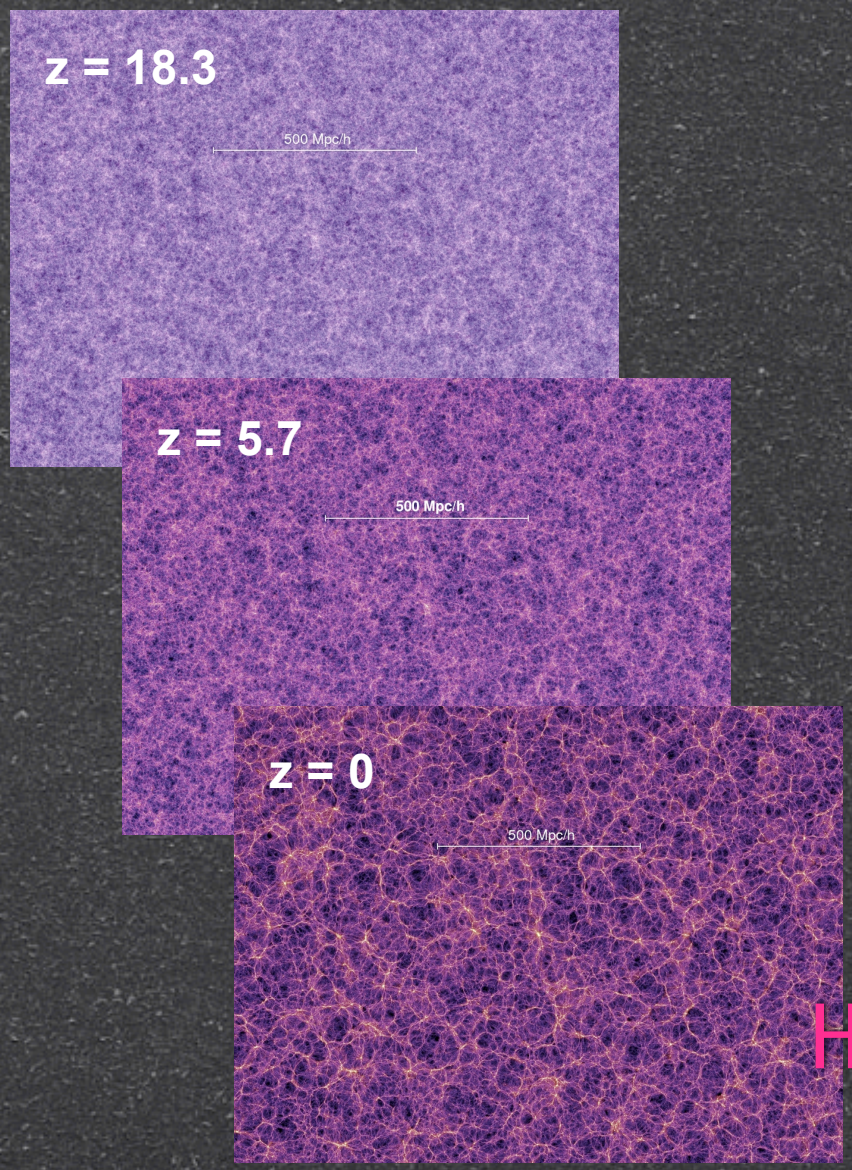


現在の宇宙のエネルギー密度の内訳

- dark matter: 0.23
- dark energy: 0.725
- baryons: 0.045

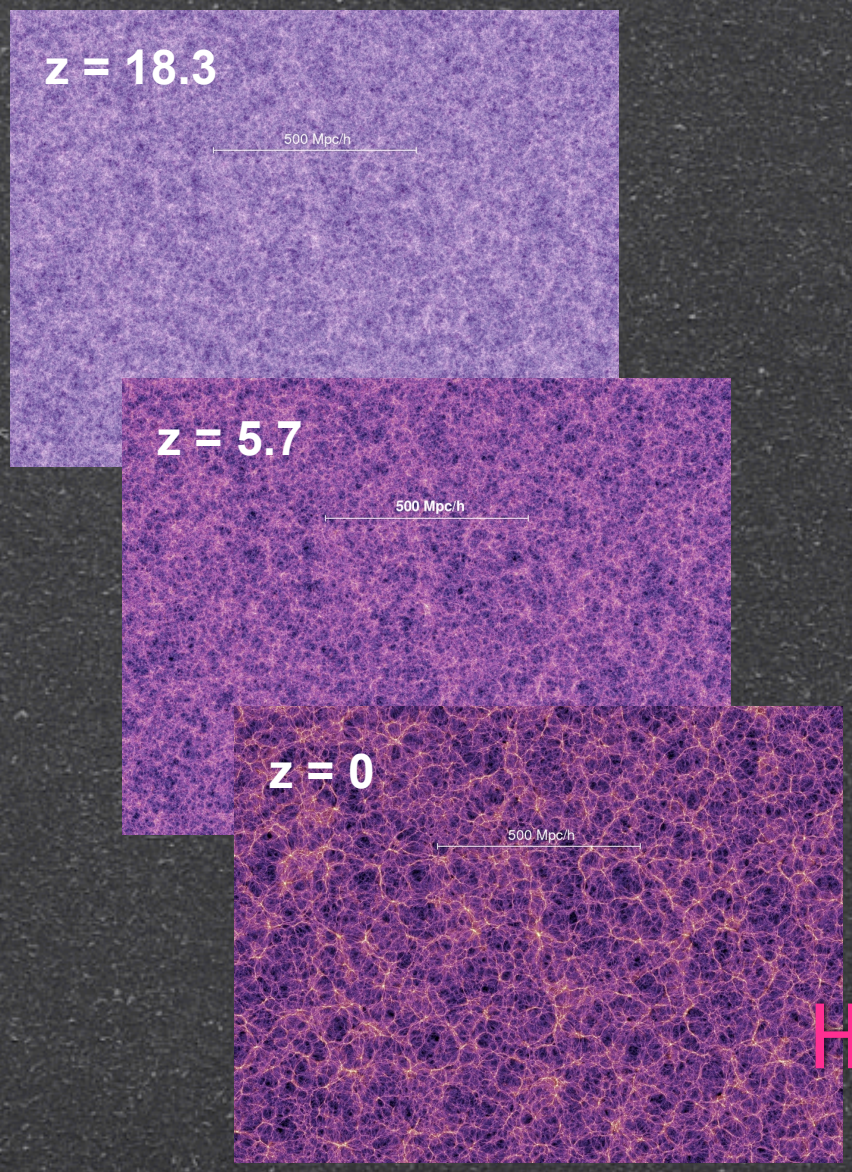
Matter のうち 84% は dark matter ⇒ 初期密度揺らぎの重力不安定性による成長は(主に)dark matterの重力によって進む

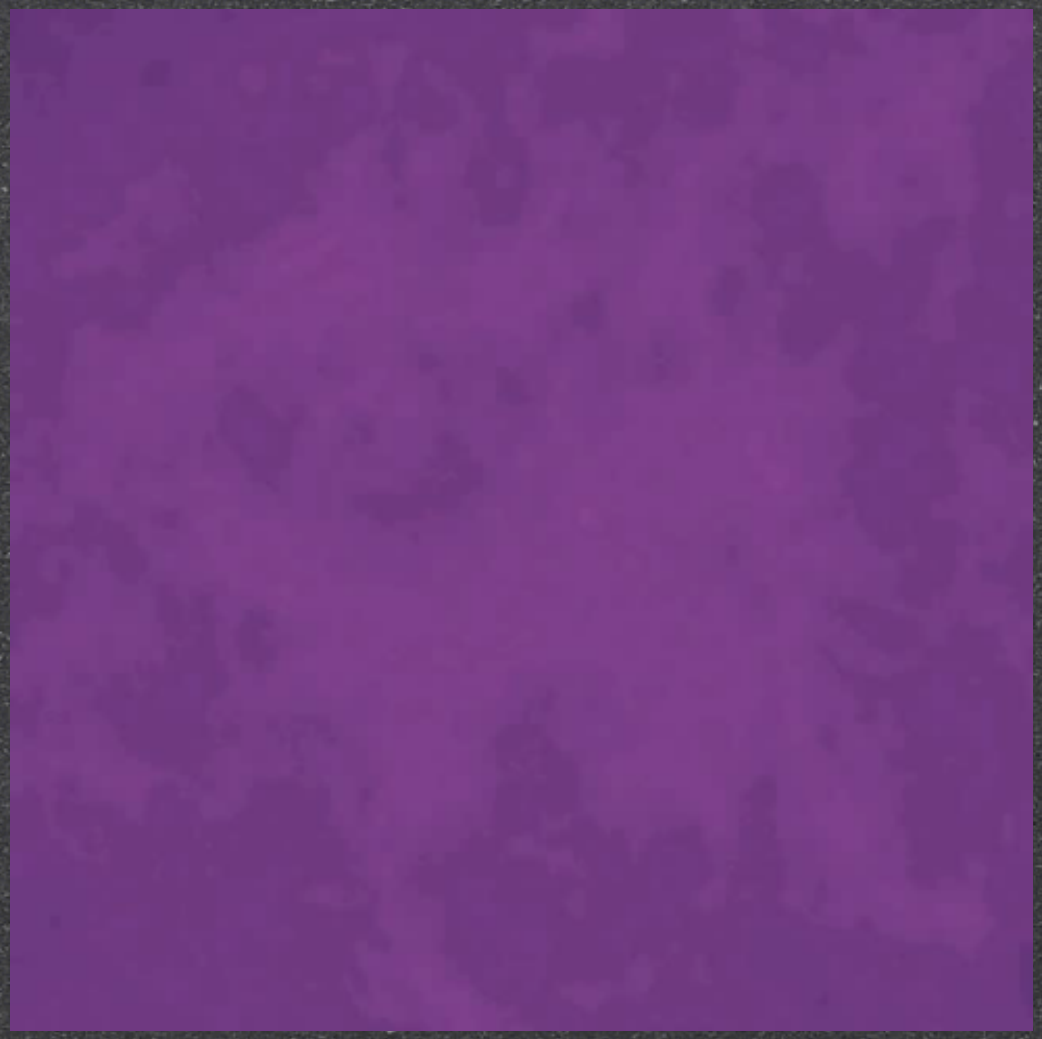
CDM密度揺らぎの成長



Hierarchical clustering
(階層的構造形成)

CDM密度揺らぎの成長





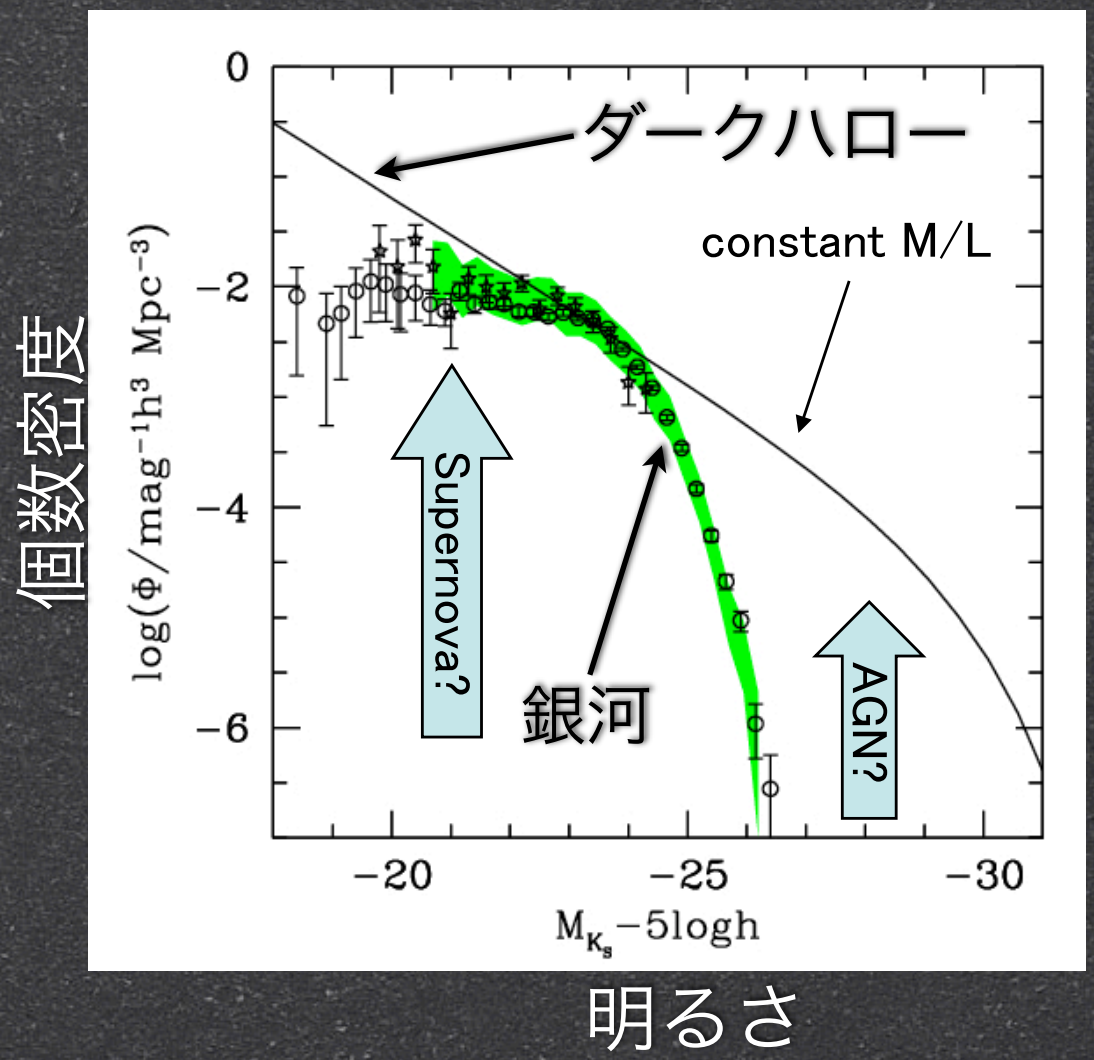
Hierarchical clustering
(階層的構造形成)

ガスや星(バリオン)は？

銀河の光度関数とダークハローの質量関数は形が全く異なる

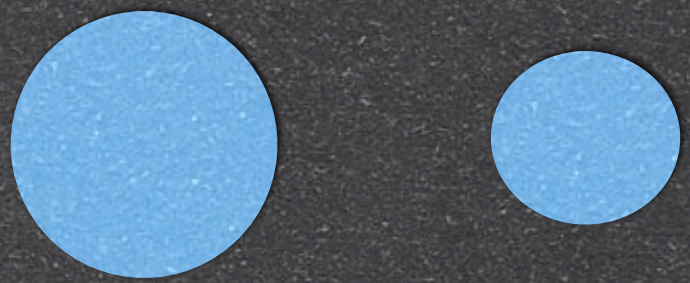
銀河（星)の形成効率は一定ではない

バリオンの物理が重要

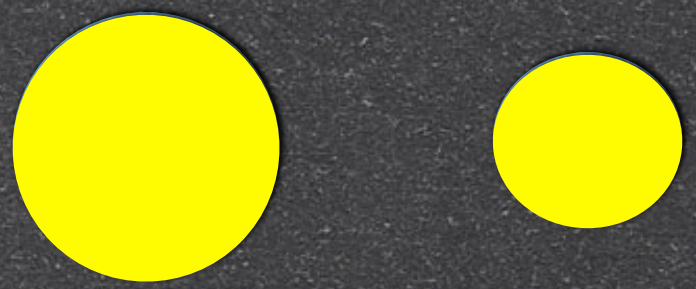


銀河形成の標準的描像

ダークハローの形成



銀河形成の標準的描像



ダークハローの形成
衝撃波加熱でガスはビリアル温度
まで加熱される

銀河形成の標準的描像

ダークハローの形成

衝撃波加熱でガスはビリアル温度まで加熱される

放射冷却によりガス円盤が形成

銀河形成の標準的描像

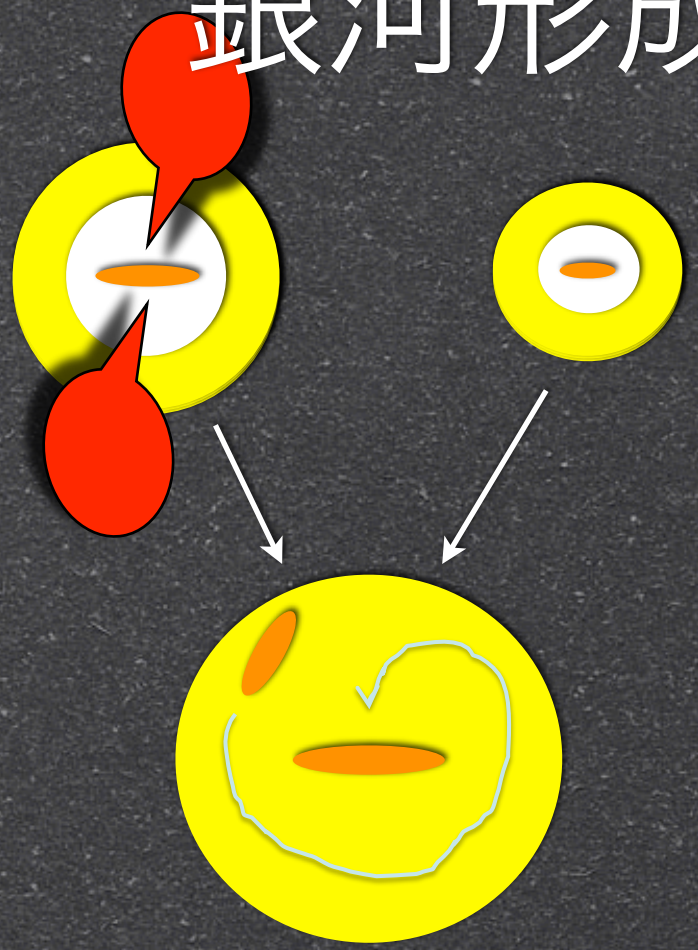
ダークハローの形成

衝撃波加熱でガスはビリアル温度まで加熱される

放射冷却によりガス円盤が形成

星形成, そして超新星爆発

銀河形成の標準的描像



ダークハローの形成

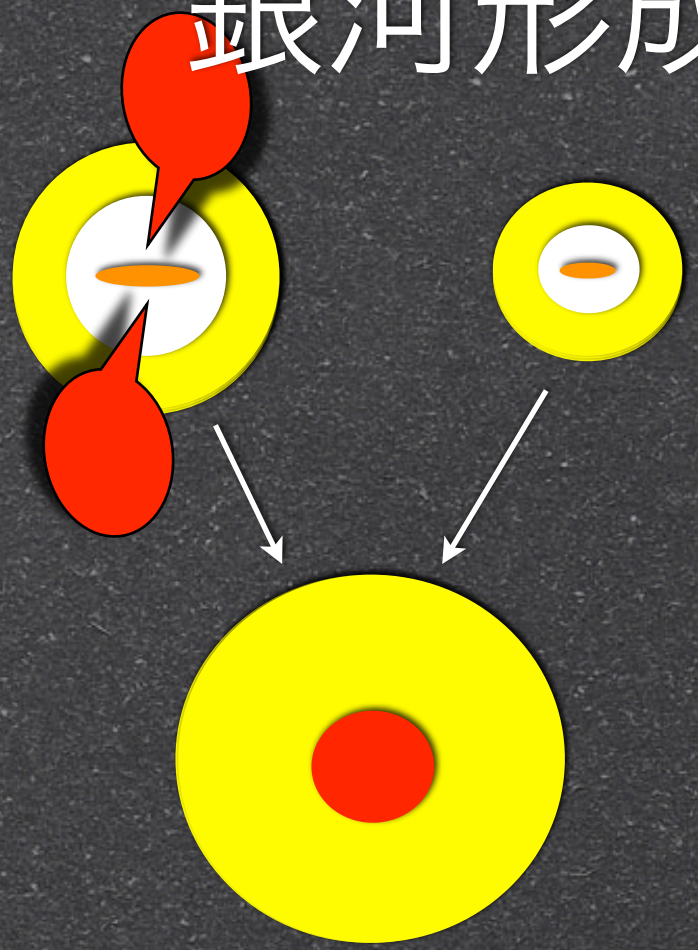
衝撃波加熱でガスはビリアル温度まで加熱される

放射冷却によりガス円盤が形成

星形成, そして超新星爆発

ハロー同士の合体

銀河形成の標準的描像



ダークハローの形成

衝撃波加熱でガスはビリアル温度まで加熱される

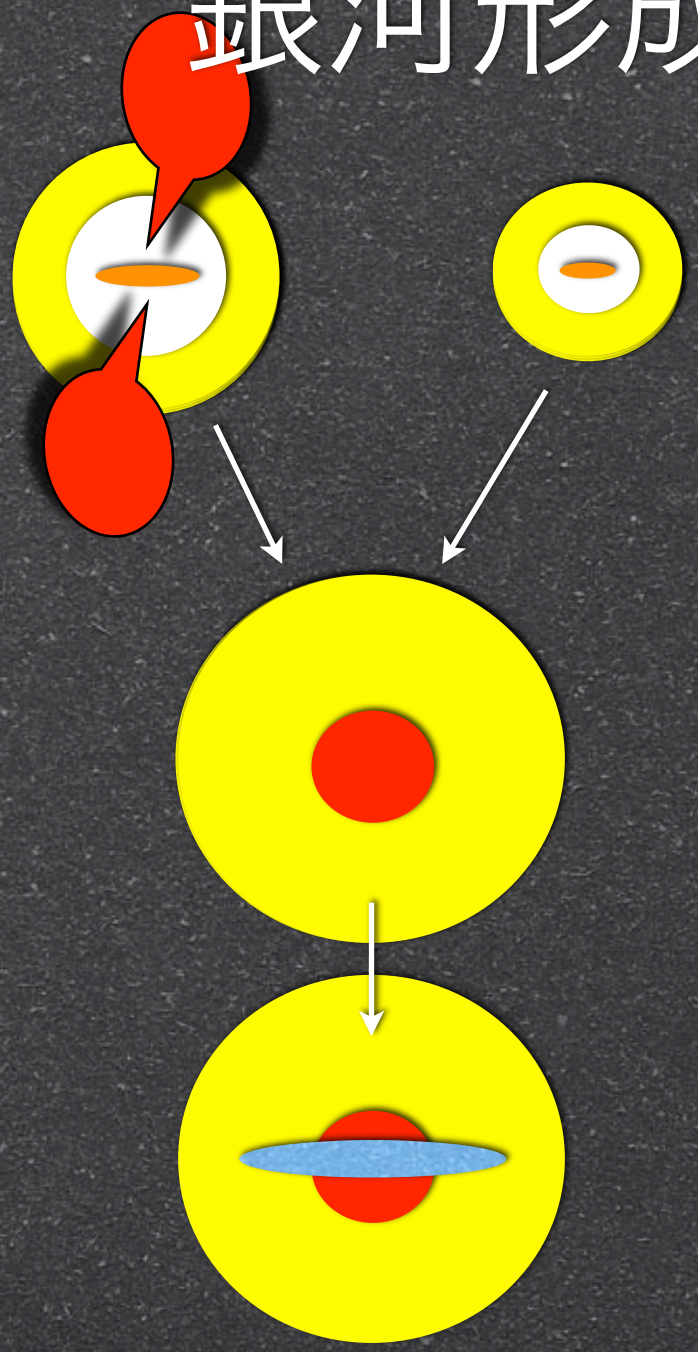
放射冷却によりガス円盤が形成

星形成, そして超新星爆発

ハロー同士の合体

バルジ (楕円銀河)の形成

銀河形成の標準的描像



ダークハローの形成

衝撃波加熱でガスはビリアル温度まで加熱される

放射冷却によりガス円盤が形成

星形成, そして超新星爆発

ハロー同士の合体

バルジ (楕円銀河)の形成

さらなるガス冷却による新たな円盤の形成

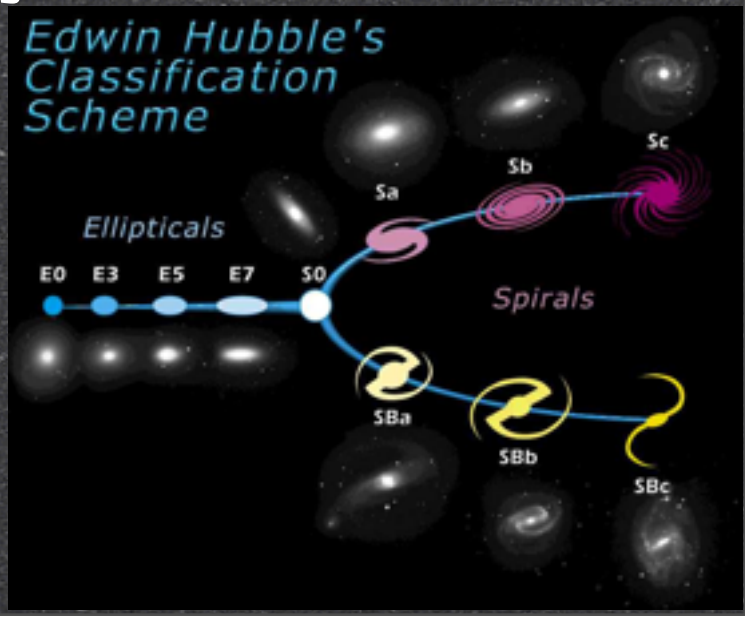
考えるべき物理過程

- 初期条件: ΛCDM (特定の銀河の特定の初期条件を与えるわけではない)
- 自己重力: DM + ガス + 星
- Gas dynamics: 流体力学
- ガスの放射冷却, 化学反応
- 星形成
- 加熱過程 (フィードバック)
- 化学進化 (重元素汚染)

バリオンの物理

目標

- 銀河形成を理解する
  - 適切な初期条件から始めて, 光度関数, Tully-Fisher 関係, fundamental plane 等の観測結果を再現
  - 様々な銀河がどのように形成されたか
- CDM モデルの小スケールでの検証
  - 小さなスケールではバリオンの重力が支配的になるため, これを考慮しないと観測と理論の比較が適切に行えない



2. シミュレーション

実際の扱い方

- 自己重力: 適当な Poisson solver, 粒子系はN体として
- 流体: SPH, AMR 等の Lagrange 的な方法を用いることが多い
- 放射冷却: cooling function, Λ(T, Z)
  - なんらかの平衡を仮定する
  - 非平衡化学反応も解く場合は大抵 Z = 0

subgrid

- 星形成: 低温・高密度のガスから星 (stellar population) を作る. IMF は仮定. 星形成領域は分解できない
- フィードバック: 超新星爆発. 周囲のガスにエネルギーを与える. 高密度領域にエネルギーを与えてもすぐに冷えてしまう.
  - 運動エネルギーの形で与えたり, 一定時間ガスの冷却を止めたり
  - AGN feedback, cosmic ray feedback, etc.

星形成

- 低温・高密度のガス（$\rho > \rho_{th}$ & $T < T_{th}$）から星粒子（Simple stellar population: SSP）を作る
  - SSP: Initial mass function (IMF), age, and metallicity で特徴付けられる
  - $\nabla \cdot v < 0$ 等の条件を付け加えることも（あまり意味はない）
- Schmidt law: $\dot{\Sigma}_* \propto \Sigma_{\rm gas}^{1.4}$ ← わりと何をやっても再現されてしまうので強い制限にならない

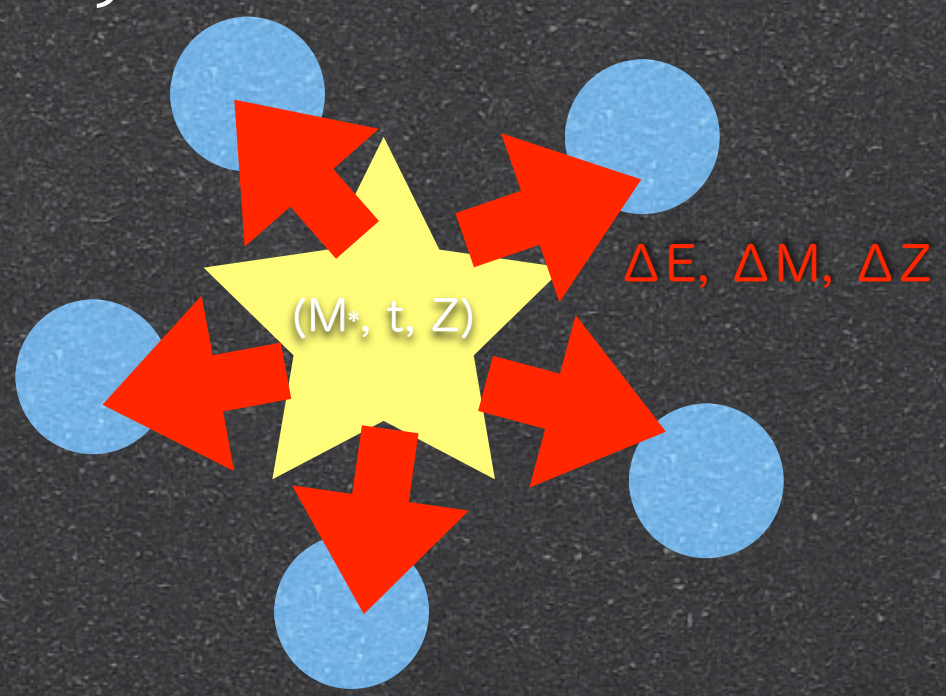
$$t_* \propto t_{\rm dyn} \propto \rho^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow \dot{\rho}_* = \frac{\rho}{t_*} = C_* \frac{\rho}{t_{\rm dyn}} \propto \rho^{1.5}$$

- timestep, Δt, 間に質量 M のガスから形成される星の質量 m_* は $m_* = M\left[1 - \exp\left(-\frac{t_*}{\Delta t}\right)\right]$
- m_* は一般に非常に小さいので，確率 p_* で質量 M_* の星粒子を作る：$p_* = \frac{M}{M_*}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_*}{\Delta t}\right)\right]$

星形成を粗くサンプリングしている（統計的に正しい）

(超新星)フィードバック

- IMF を決めると初期質量 M_*, 年齢 t, 金属量 Z の SSP で Δt 間に起こる超新星爆発の数 n_{SN} が決まる
  - もしくは instantaneous recycling approximation を用いて大質量星は生まれた瞬間にII型超新星爆発を起こして死ぬと仮定する
- $E_{FB} = \eta_{FB}\ n_{SN}\ E_{SN}$ のエネルギーを周囲のガスに与える (同時に質量や金属を与える)

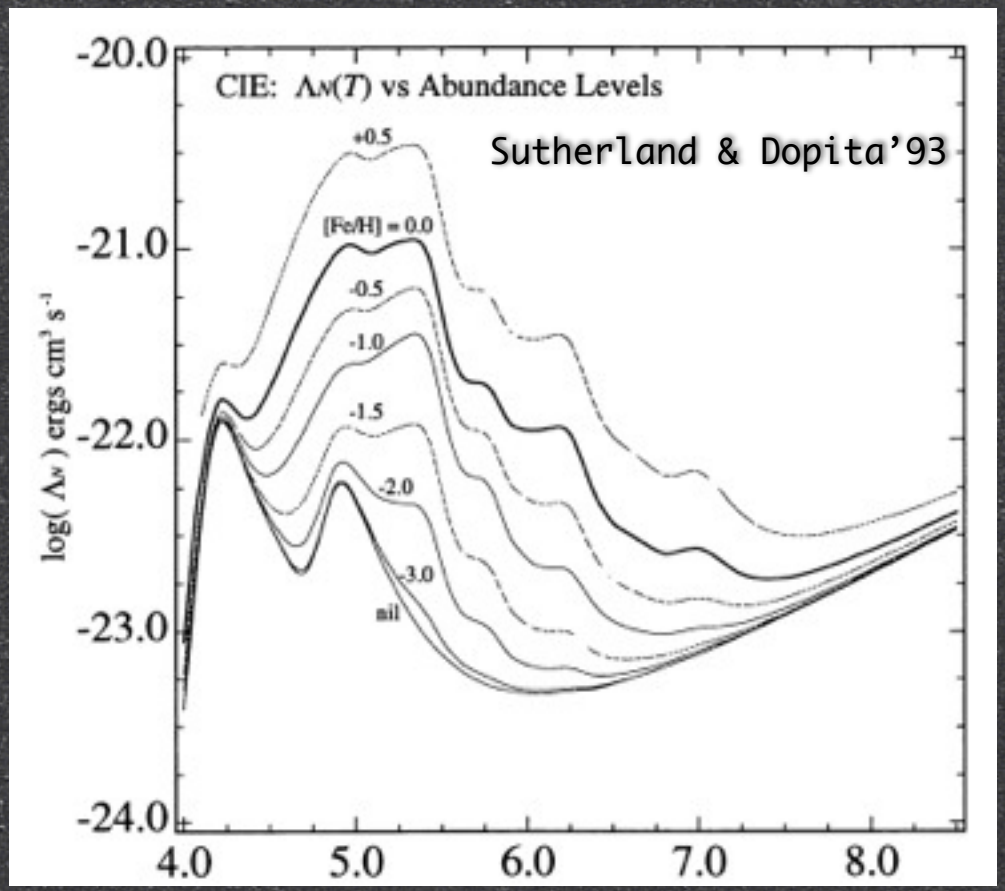


フィードバック(続き)

- 若い星の周囲のガスは一般に高密度なのでエネルギーを与えてもすぐに放射冷却で失われる (Katz'92)
  - 90年代や0年代初期には，星間ガスの多相構造が分解できれば，解決できる問題であると信じられていた
- 処方箋 1: 暫くの間，加熱されたガスの cooling を止める (断熱膨張させる; e.g. Thacker & Couchman'01, Stinson+'06)
  - しばらくの間って？
    Stinson+'06 にはΔt_{ad} を決める処方箋が書いてあり physically-motivated model と呼んでるが明らかになんか勘違いした導出になっている (not based-on but motivated?).
    が，色々上手く行ってるようではある
  - どれだけの量のガスにエネルギーを与えるかの不定性
    Cooling function は温度の関数

フィードバック

(cooling function)



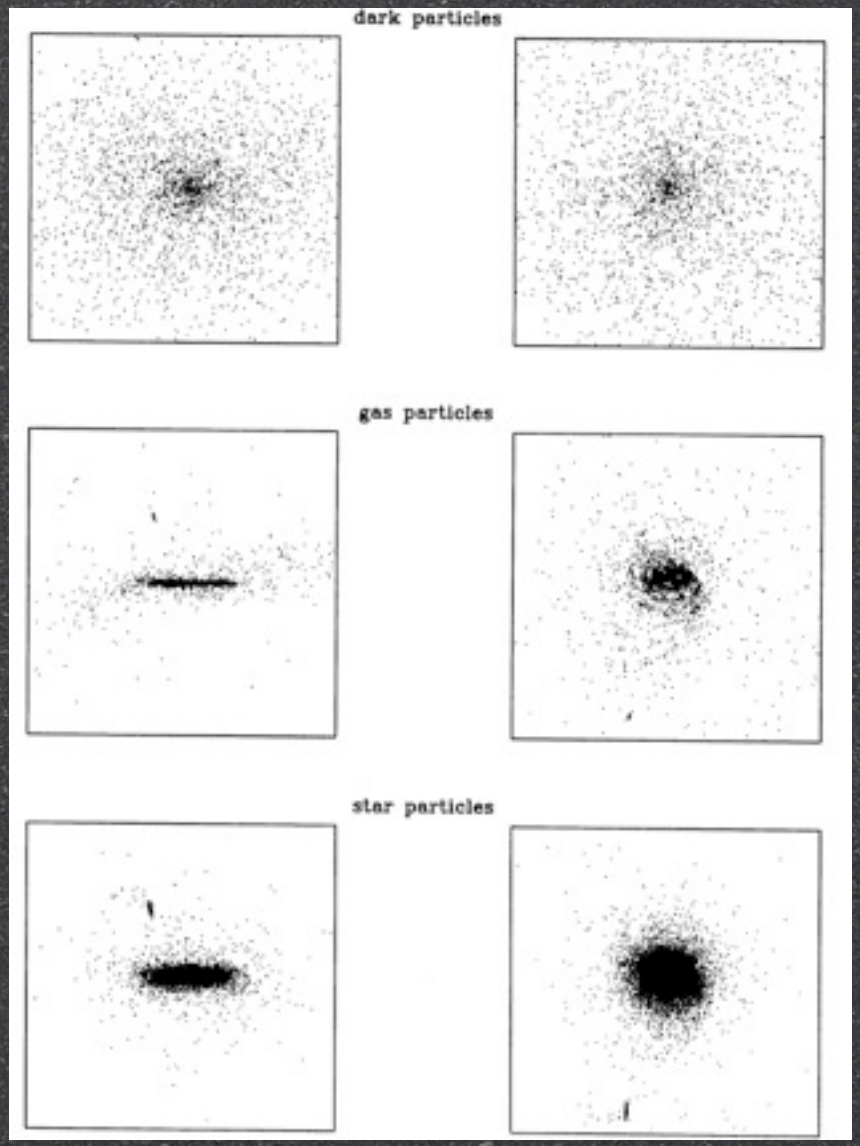
log(T)

- ある E_{FB} をどれだけのガスに与えるかで結果が異なり得る
  (個々の超新星残骸が分解できているわけではない)

フィードバック(kinetic)

- 処方箋 2: 運動エネルギーとして与える
  - そのうち thermalize して cooling でエネルギーが抜けるが熱として与えるよりマシ (e.g. Navarro & White'93)
  - 高密度ガスの所ですぐ止まってしまって thermalize するのを防ぐため, kick した粒子の hydrodynamic interaction をしばらく切ったりもする (e.g. Springel & Hernquist 2003)
  - $E_{kin} = 1/2\ m\ v^2$
    - m と v にどのようにエネルギーを割り振るかに不定性あり
    - 当然同じエネルギーを与えても結果は全然異なる (Okamoto+'10)

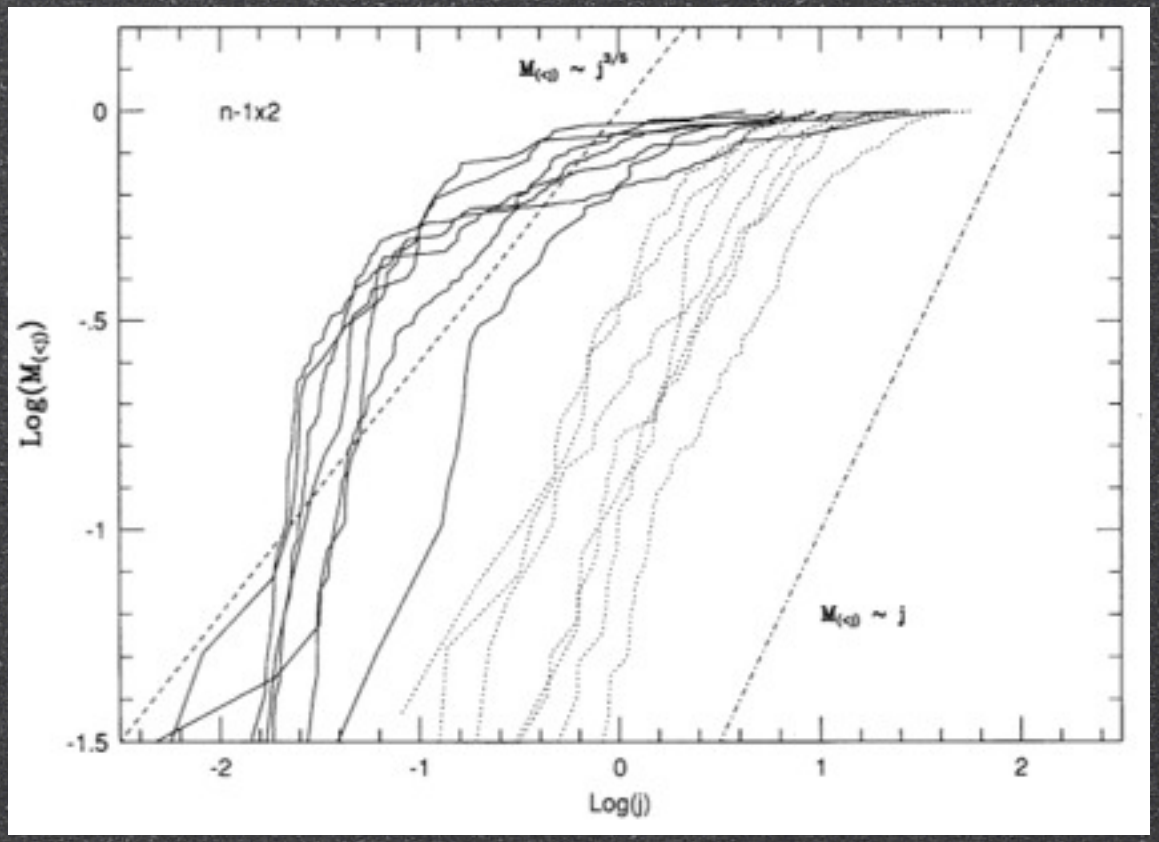
原型



Katz'92

- CDM っぽい初期条件から，放射冷却と星形成，超新星爆発を入れ，銀河っぽいものができた．
- 現在の銀河形成のレシピも基本的にはこんな感じ
- この時の星形成のレシピをそのまま使ってる人も多いが，害にしかならないものもあるのでよく考えてから人の真似をするように

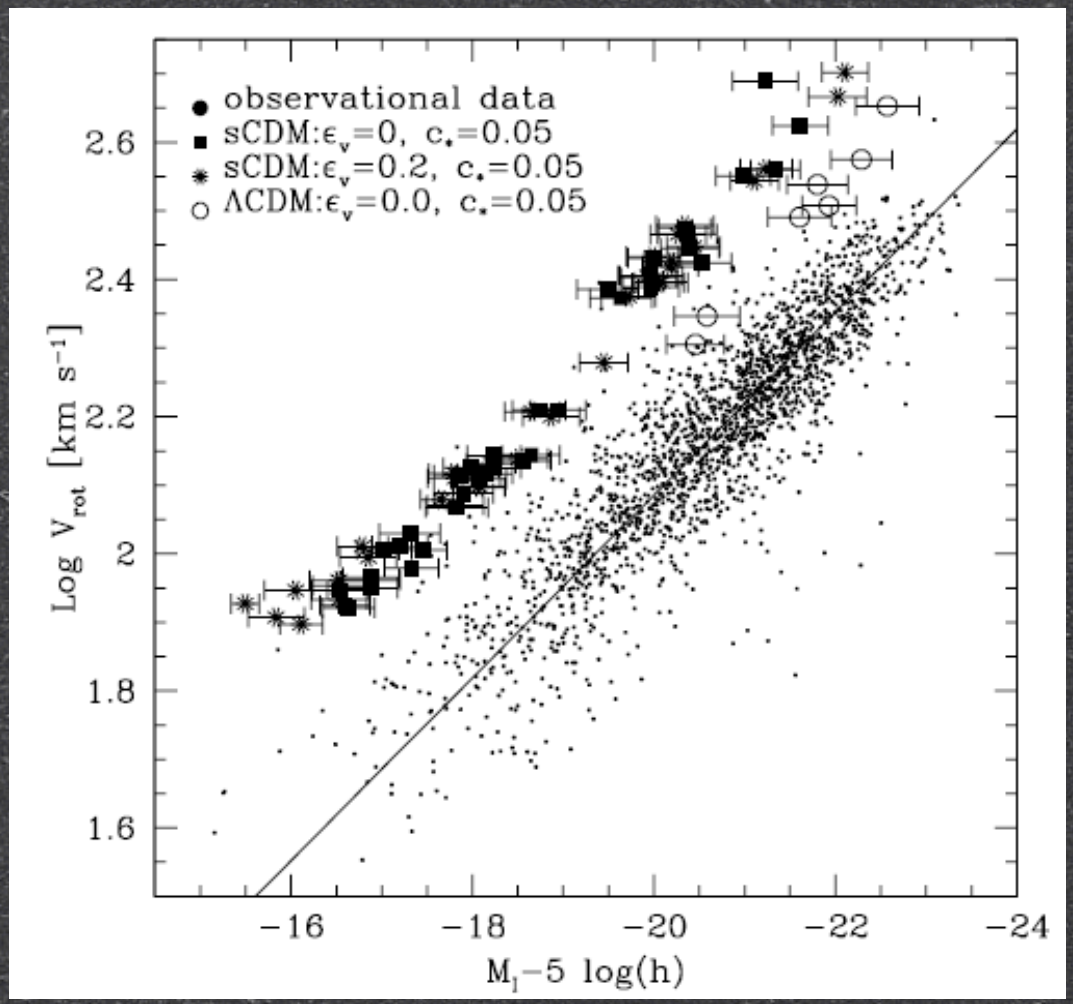
角運動量問題



Navarro & Benz'91

- $P(k) \propto k^{-1}$
- わりとちゃんとした cosmological sim.
- gas cooling あり, star formation なし
- gas は DM に比べて非常に小さな specific angular momentum を持つ成分が多い

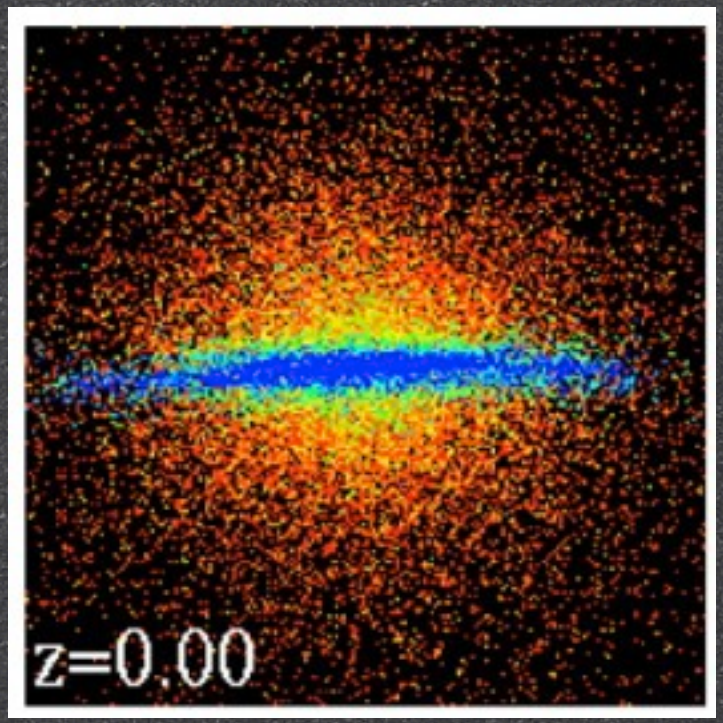
Tully-Fisher 関係



Navarro & Steinmetz'00

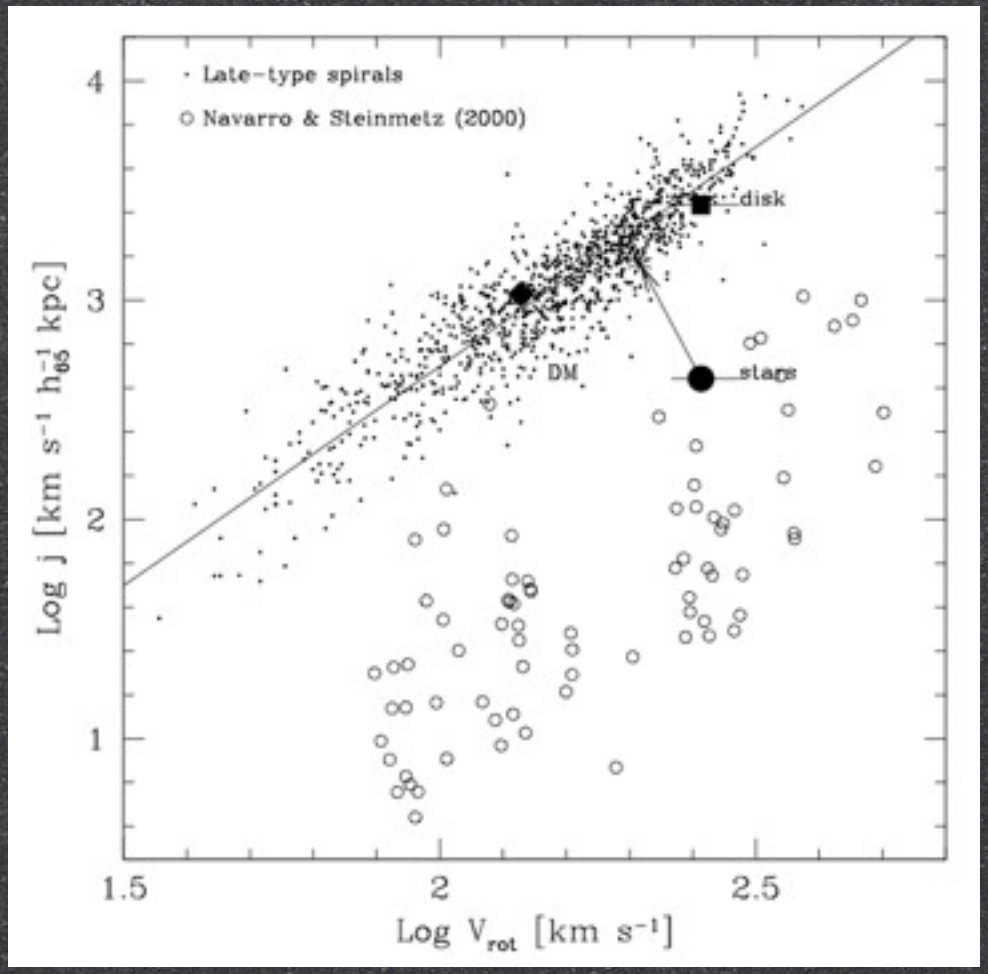
- 円盤銀河の回転速度と絶対光度の間の観測的関係
- シミュレーションで得られた銀河は光度に対して回転速度が速すぎる ⇒ 質量が中心集中し過ぎている
- sCDM よりは ΛCDM の方が観測とのズレが少ない
- sCDM の s は "standard" の "s"!!
- sCDM: $\Omega_0 = 1$ and $\Omega_\Lambda=0$

結局何が問題なの？



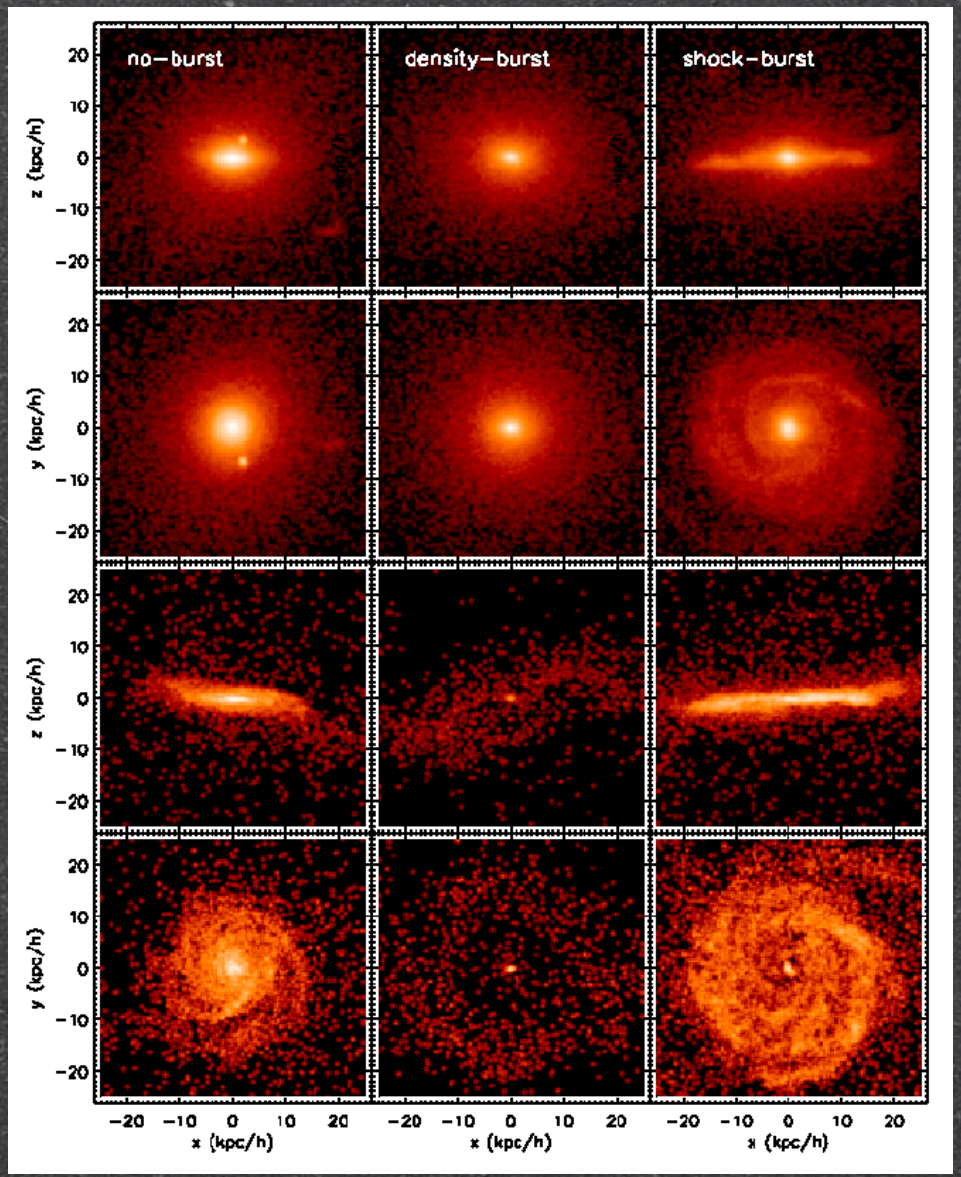
全体としてはS0的だが，
若い星は disk を形成
している

Abadi+'03



- disk 成分の specific angular momentum は問題ない（質量が問題）
- バルジが大き(重)過ぎる
- bulge-dominated galaxies が多過ぎ

フィードバックの役割



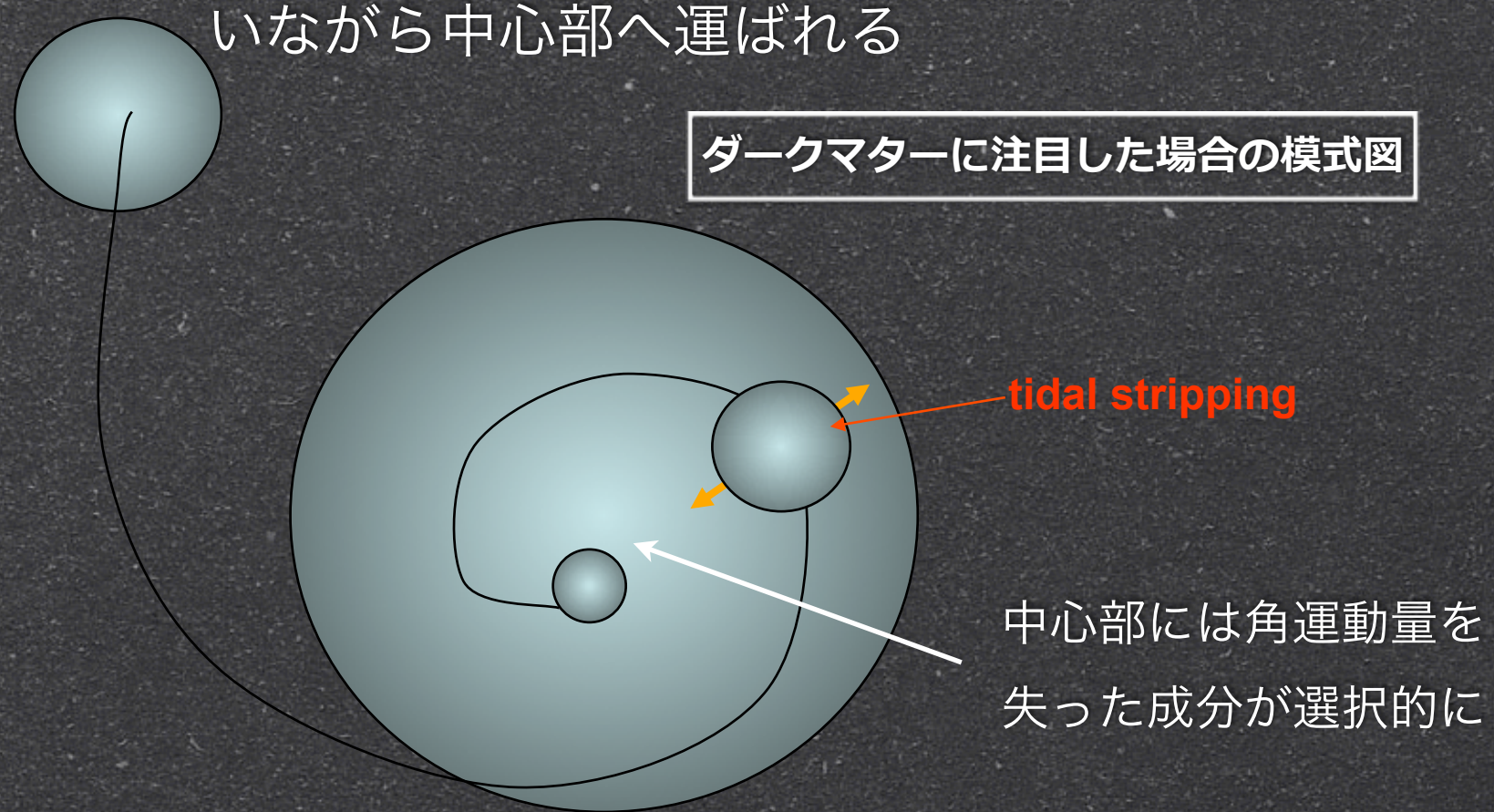
ガス: face-on ガス: edge-on 星: face-on 星: edge-on

- 50 h^{-1} Mpc comoving box 内の MW-size のあるハローに注目
- 同じ初期条件で，フィードバック（FB）を変えて計算
- 左：一般的な FB
- 中央：銀河中心部に強い FB
- 右：銀河が合体したときに強い FB
- **ちゃんと「効く」強さで入れると FB は銀河の形態に強い影響を与える**

Okamoto+'05

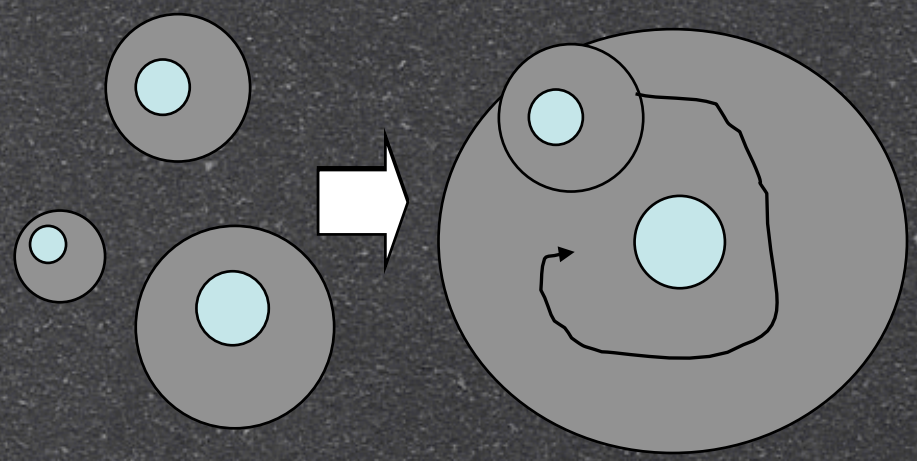
何が起こっているのか？

- Hierarchical clustering による角運動量輸送
  - 合体してきたサブハローは，dynamical friction（力学的摩擦）によりエネルギーと軌道角運動量を失いながら中心部へ運ばれる



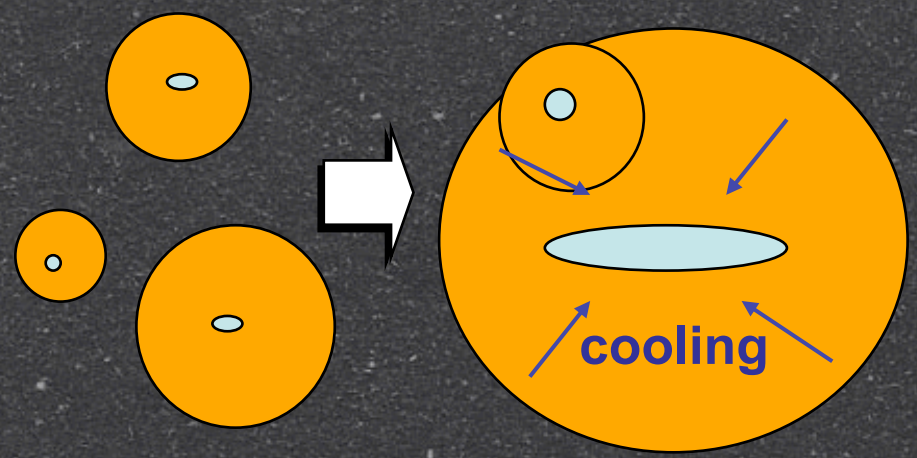
冷却と加熱を考える

FB が弱い場合



1. 高赤方偏移では halo の密度が高いため，ガスはあっという間に冷えてハローの中心部に．
2. 合体してサブハローとなり力学的摩擦で中心部へ沈むとき，サブハローの中心部に集まったバリオンも軌道角運動量を失い，親ハローの中心へ．
3. 角運動量問題

FB が十分強い場合



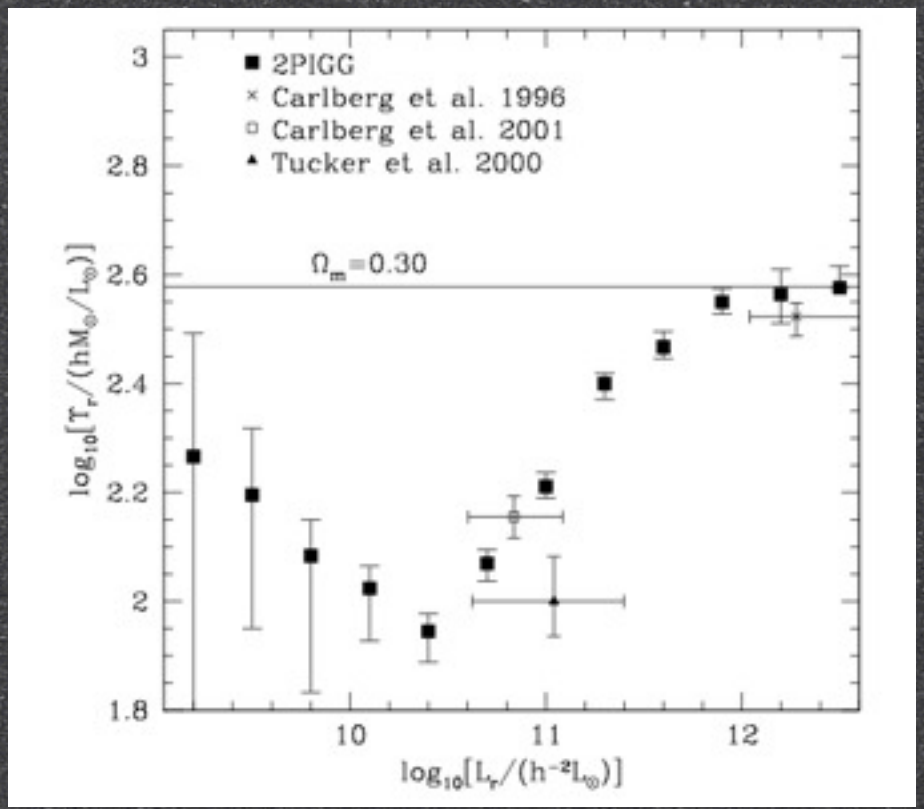
1. ガスが冷えて星が（少し）形成されると，超新星爆発からの FB で中心に集まったガスは再び広がった分布に
2. 合体してサブハローとなった時，広がったhot gasは親ハローのhot gasと混ざり，軌道角運動量を失わない
3. 角運動量を保存しながらガスが冷え，円盤形成

see Zavala+'08 for more details

Where are the stars?

Eke+'04

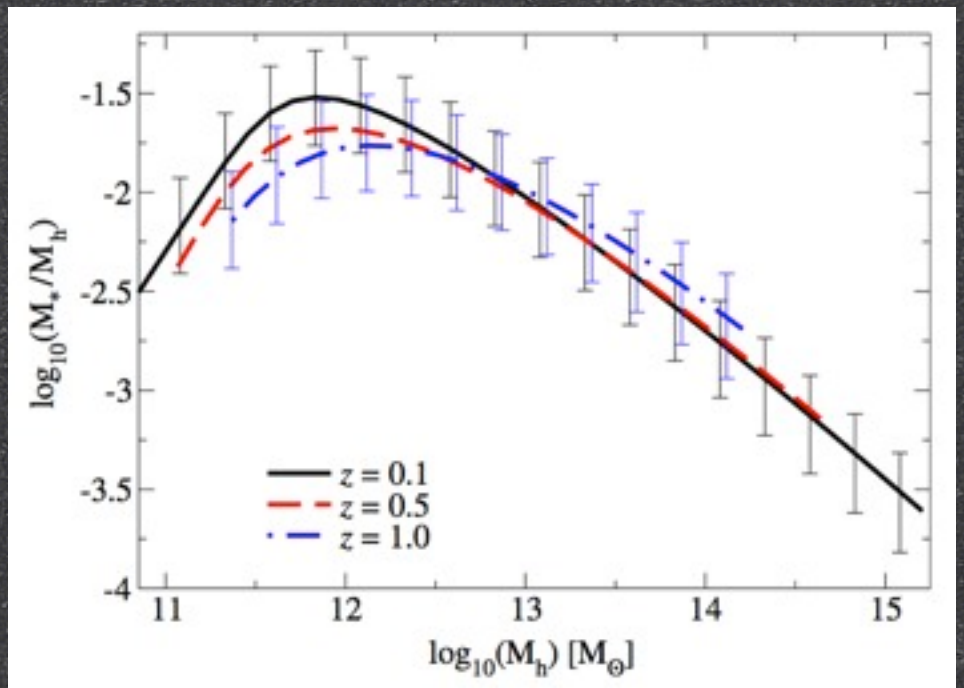
mass-to-light ratio



group luminosity

Behroozi+'10

stellar mass fraction



host halo mass

- MW mass halo のあたりで星形成効率が一番高い
  - それでも星になってるのはハロー内に含まれるべきバリオンの高々 20%
- $M_h < M_{MW}$: ポテンシャルが浅く, FB の効果が強い
- $M_h > M_{MW}$: $t_{hubble} > t_{cool} > t_{dyn}$: inefficient cooling? AGN feedback?

Simulated galaxies

Guo+'10

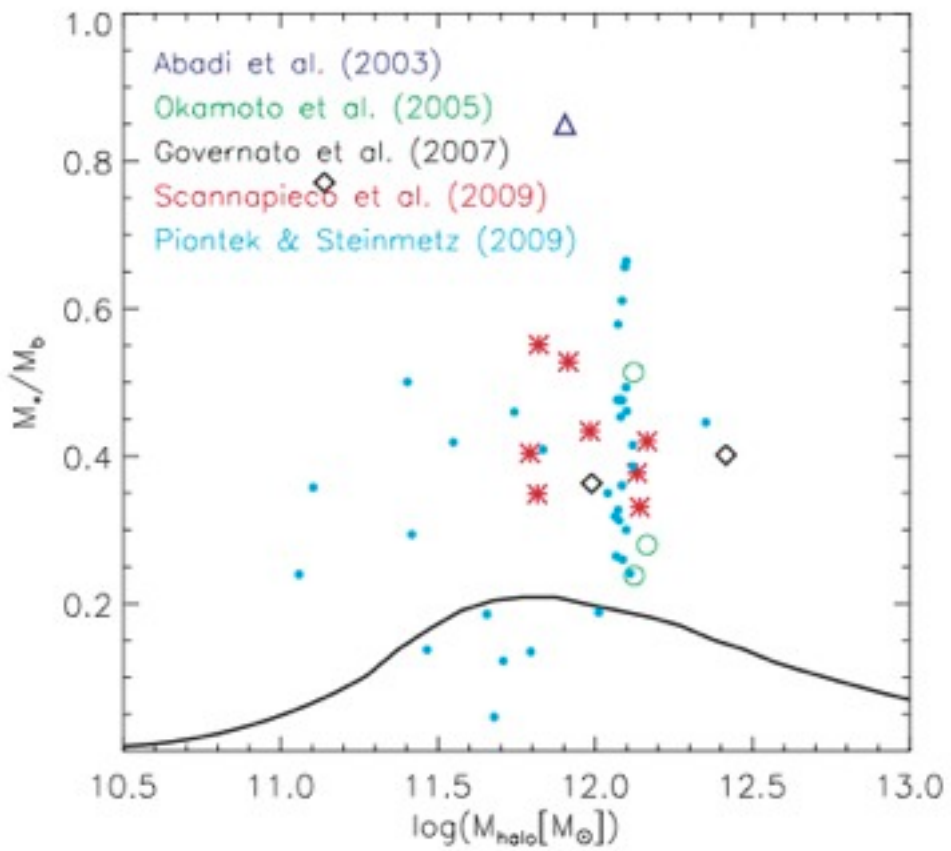


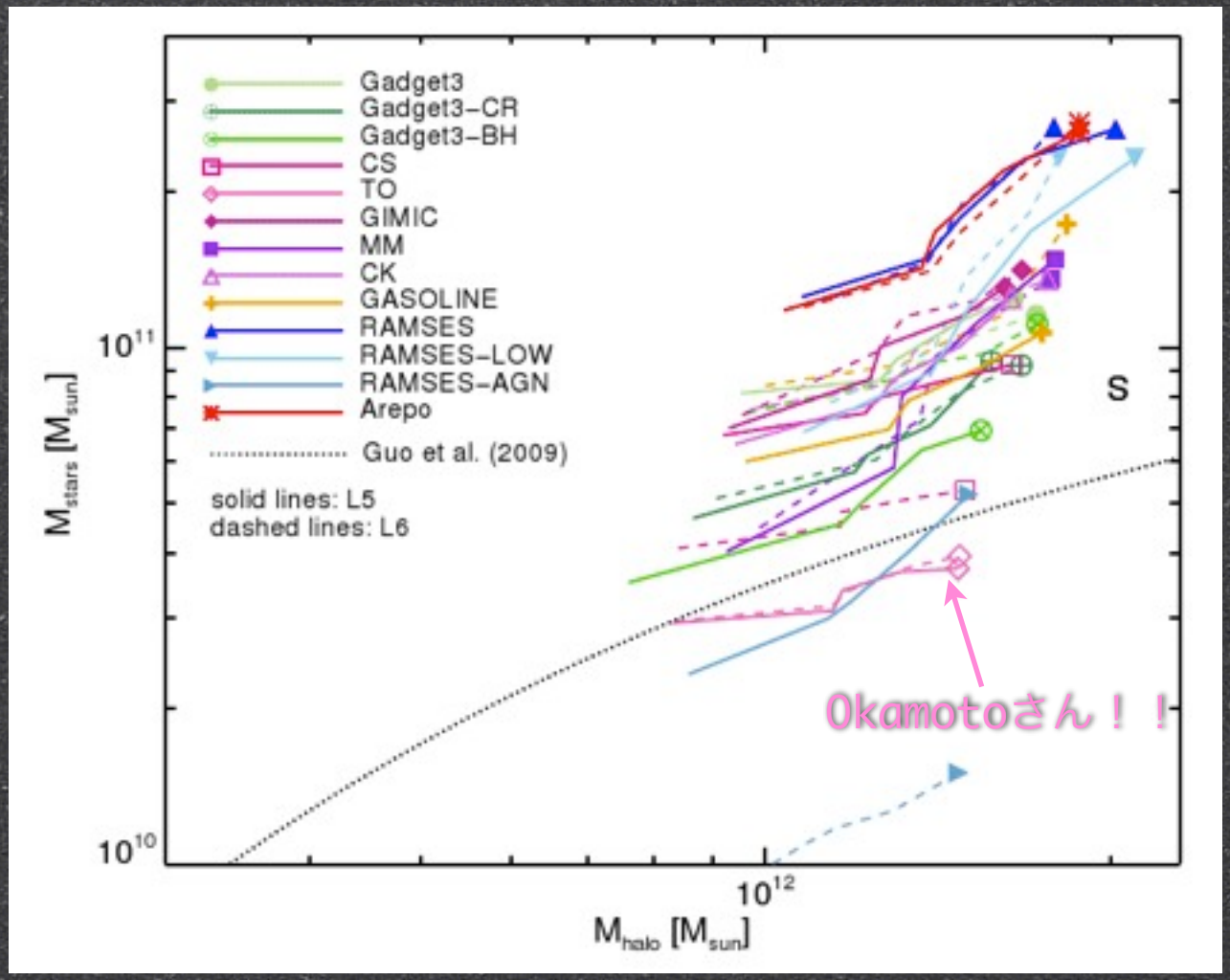
Figure 5. Galaxy formation efficiency as a function of halo mass. The black curve indicates the values required if a ΛCDM universe is to fit the observed SDSS/DR7 stellar mass function. Coloured symbols show the values found for a large number of recent simulations of the formation of individual galaxies from ΛCDM initial conditions. Different colours correspond to simulations by different authors as noted. The simulation results vary widely, but the great majority lock too many baryons into stars to be viable models for the bulk of the real galaxy population.

- シミュレーションで作った銀河は星が出来過ぎている（冷えるガスの量が多すぎる）
- 2005 年の論文ではちょっとやり過ぎたかと思っていたが実はそうでもなかった
(2010年の Okamoto さんは実はもうちょっとがんばってる)

現状

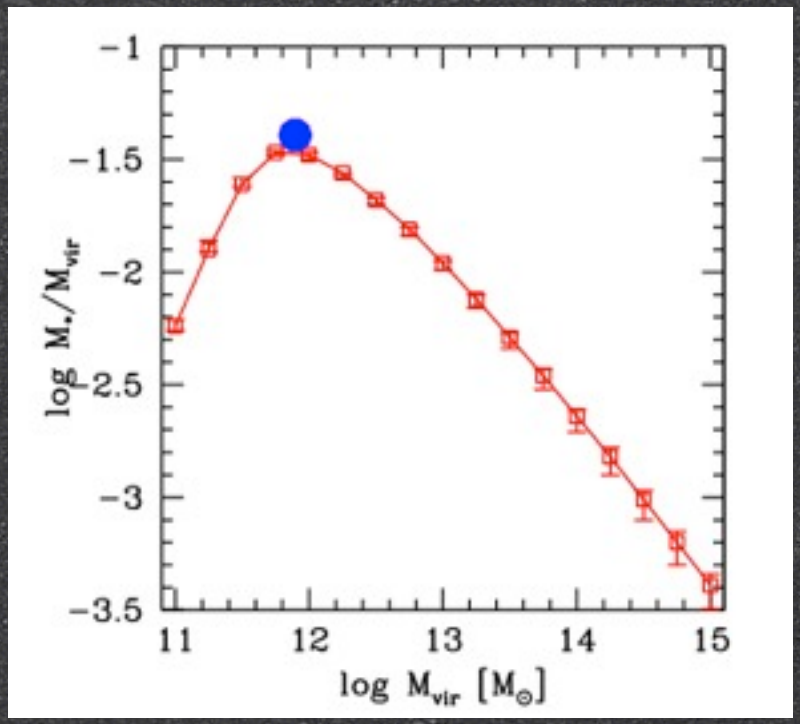
M_{stars}-M_{halo} in recent simulations

Navarro+ in prep?



Aq-C halo

Guedes+'11



The Eris simulation

上手く行ってるように見える人達は何をやってるの？

- Okamoto
  - 超新星爆発のエネルギーを全てガスの運動エネルギーに
  - kick されたガスの速度はダークマター粒子の速度分散の 5 倍の速度
  - 別段物理的根拠はないので phenomenological model と呼んでる
  - 結果が resolution によらないような設計
  - コロキウムで詳しくやります
- GASOLIN ちゃん (Governato とか Mayer とかその辺)
  - Stinson+'06 の model
  - ようするに一定時間 cooling を止める例のアレ
  - いろいろアレだが本人達もアレなので physically-motivated model とか言っちゃってる (結果は resolution 等いろいろなものに依存)
  - 詳報でさっきの The Eris simulation を紹介します
- **ありそうもないないほど強いフィードバックを仮定しないと上手くいかない**

今後（個人的な意見）

メインストリーム

- より大きな計算機，より高い数値分解能
  - 星間ガス（ISM）の多相構造を分解し，より実際に星が形成されるような密度で星を作る
  - Hot bubbles が分解できれば FB の効率は高くなるはず
  - 多分皆やる…
  - とは言え，SN のエネルギーだけで足りるのかどうかという結論を出すためには誰かがやるべき．
  - 日本では天文台の齋藤さんを中心としてやることになってる(天の川創世プロジェクト)

個人的な問題意識

- 物理足りてる？
  - 例えば私の計算では SN のエネルギーの 100% をガスの運動エネルギーに変換し，なおかつ，kick されたガスの hydrodynamical interaction をしばらく off にしてる
  - ISM の多相構造を分解したとしてもこんな効率は出ないような気が...
- 輻射とか効かないのかしら？
  - 星からの輻射がダストに吸収されて輻射圧で銀河風を駆動したりなんかしちゃったりして
  - ということで輻射+SNを考慮した simulation を準備中(年度内にはなんとか…)

今回触れなかった話題

- AGN Feedback
  - M_{BH}-M_{bulge} 関係が AGN feedback によるものだとすれば，バルジが存在する銀河では必ず考慮すべき
  - Quasar とかで効かないとは思えない
  - M_{BH}-M_{bulge} 関係自体は AGN FB によるものではなかったとしても，楕円銀河を作る上では鍵になる可能性は高い
  - quasar mode FBとか radio mode FB とか色々あるがまだ理論屋が自分に都合の良いことを言ってるだけという感じは拭えない
  - 若い人で誰かやりません？

当面の課題

- 観測からの要請
  - high-redshift compact massive passively-evolving galaxies (e.g. van Dokkum+'08)
    - どうやって作るか？
    - どうやって z = 0 までに膨らませるか
    - てか何になるのか？
  - high-redshift rotating disks (e.g. Stark+'08)
    - high-redshift gals の gas は回転してる
    - でも速度分散も同じくらい
    - 何を見てるのか？
    - Simulation でも再現できてるような気がするが，観測の分解能の方が高い…

銀河考古学

(Galactic Archeology)

- 我々の銀河の星の6次元位相空間上の情報，年齢，金属量，abundance pattern 等から銀河形成史を明らかにする
- GAIA etc. があるのできっとこれからしばらく流行る
  - data の解釈には simulation の助けが必要
  - 詳しくは去年の河田さんのフォーラムの資料等参照

宇宙論への貢献

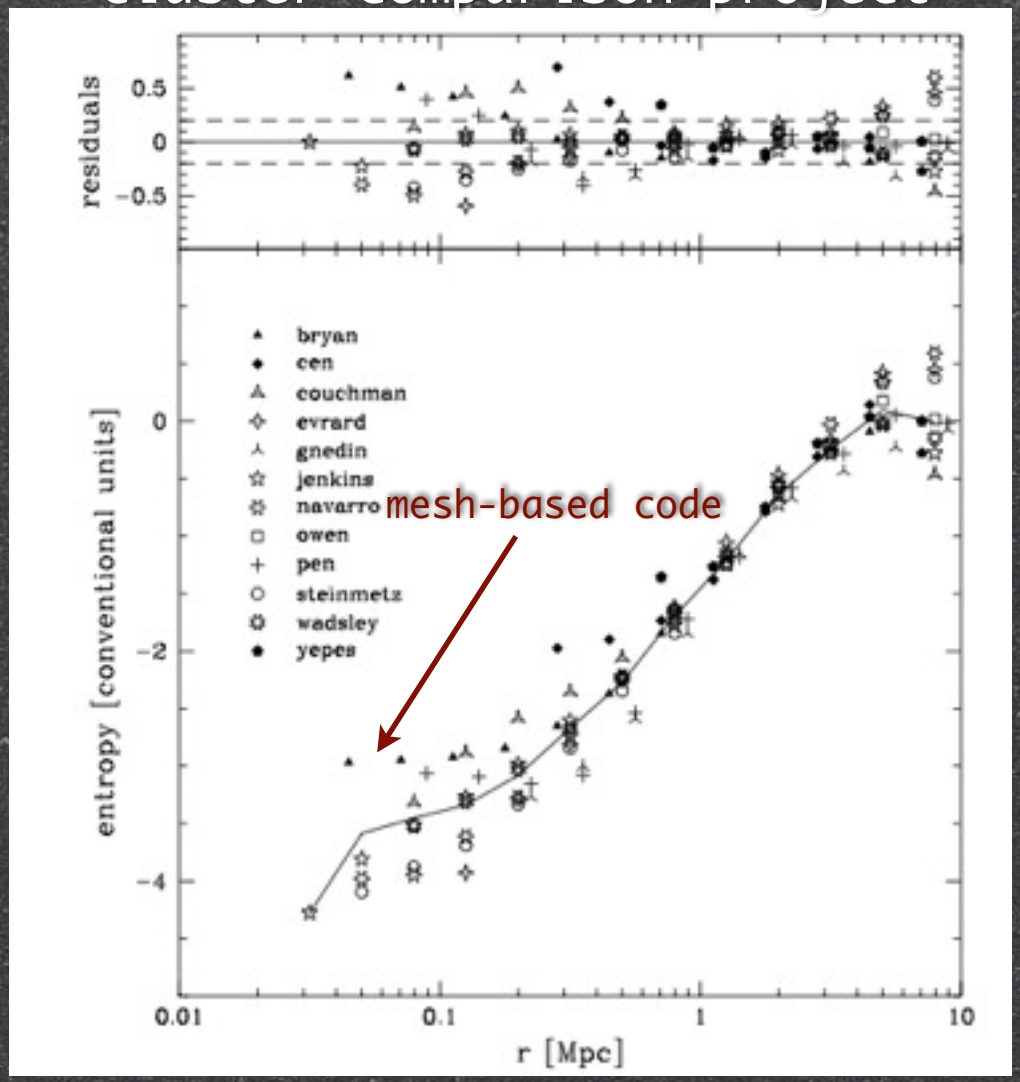
- dark energy, dark matter, neutrino mass, etc.
- dark energy や neutrino mass に制限をつけようとする場合，密度分布の氷山の一角としての銀河が必要なだけ (bias とかが必要なだけで銀河形成そのものがどう，ということはあまりない)
- dark matter がどこまで cold か，dark matter annihilation による γ-ray flux はどんだけか，みたいな制限をする上ではバリオンの働きを明らかにすることは重要（色々な物理がらむので大変）

もっと基本的なこと

- （初期条件で）密度揺らぎの短波長成分はどこまで考慮すれば十分なのか？
  - 究極的には dark matter はどこまで cold なのかという問題（DM mass）
  - そこまで行かなくても，それ以下は考慮してもバリオンには影響を与えない波長とかがあるとうれしい

もっともっと基本的なこと

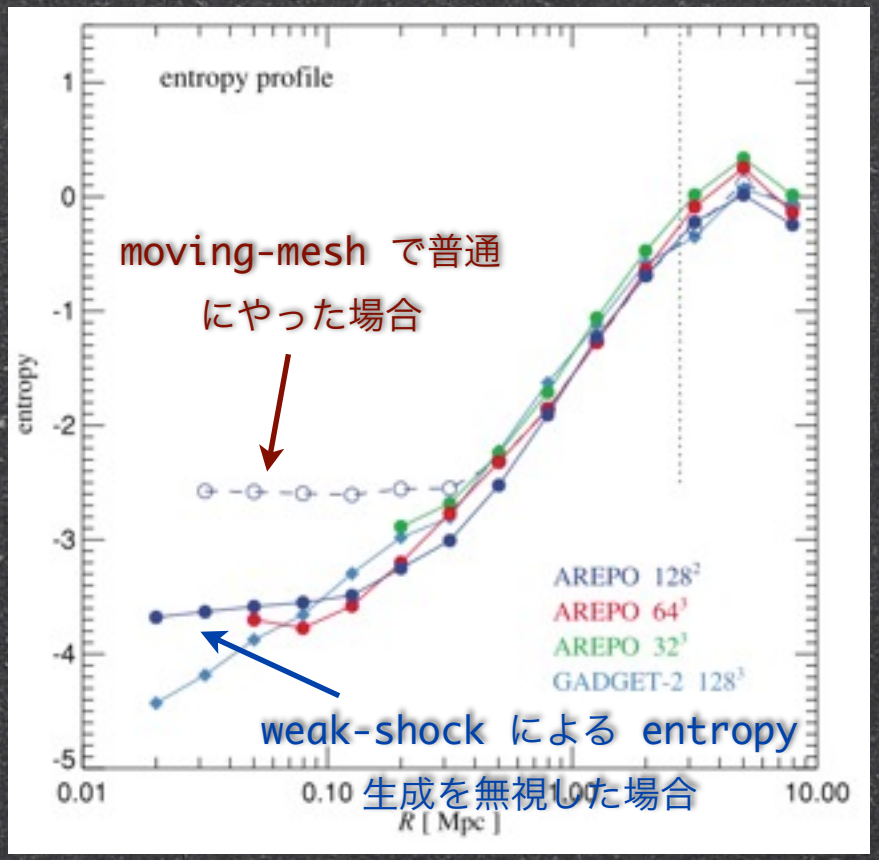
Frenk+'99: Santa Barbara cluster comparison project



SPH と AMR で系統的な違いが

この後，色々なコードで確認される

Springel'10



- Volker 先生の主張: mesh code は N 体粒子が作るポテンシャルのでこぼこによる weak-shock を拾ってる
- 私の感想: DM を連続体として扱わないと結論が出ない ⇒ **吉川さん！やっておしまいなさい！**

気になってること

- Classical bulge と pseudo-bulge
  - classical bulge: 速度分散で支えられた系，回転していない．銀河合体によってできたと考えられている
  - pseudo-bulge: 回転してる．MW のもコレ．円盤の不安定性から形成されたと考えられている．
- Pseudo-bulge が多すぎる (e.g. Kormendy+'10)
- Pseudo-bulge の形成についてもうちょっと調べたい（じゃじゃじゃ JASMINE?）

答え合わせ

- 個々の密度揺らぎからどんな銀河が形成されるべきかは知らない
- 各銀河を十分分解できる resolution で，統計が取れるだけの大きな volume を計算して，観測と比較する必要がある
(光度関数，Tully-Fisher 関係，morphology-density 関係，色-光度関係，etc.)

その他

- 観測の人がどんなことを考えているかは，TMT サイエンス検討会の資料等を見るとなんとなくつかめるかも
- あと ALMA とか 21cm とか
- 観測を気にしないという選択肢