

円盤銀河の何が問題か？ —天の川銀河から遠方銀河まで—

井上 茂樹

韓国天文宇宙科学研究院 (KASI)

今日のお話:

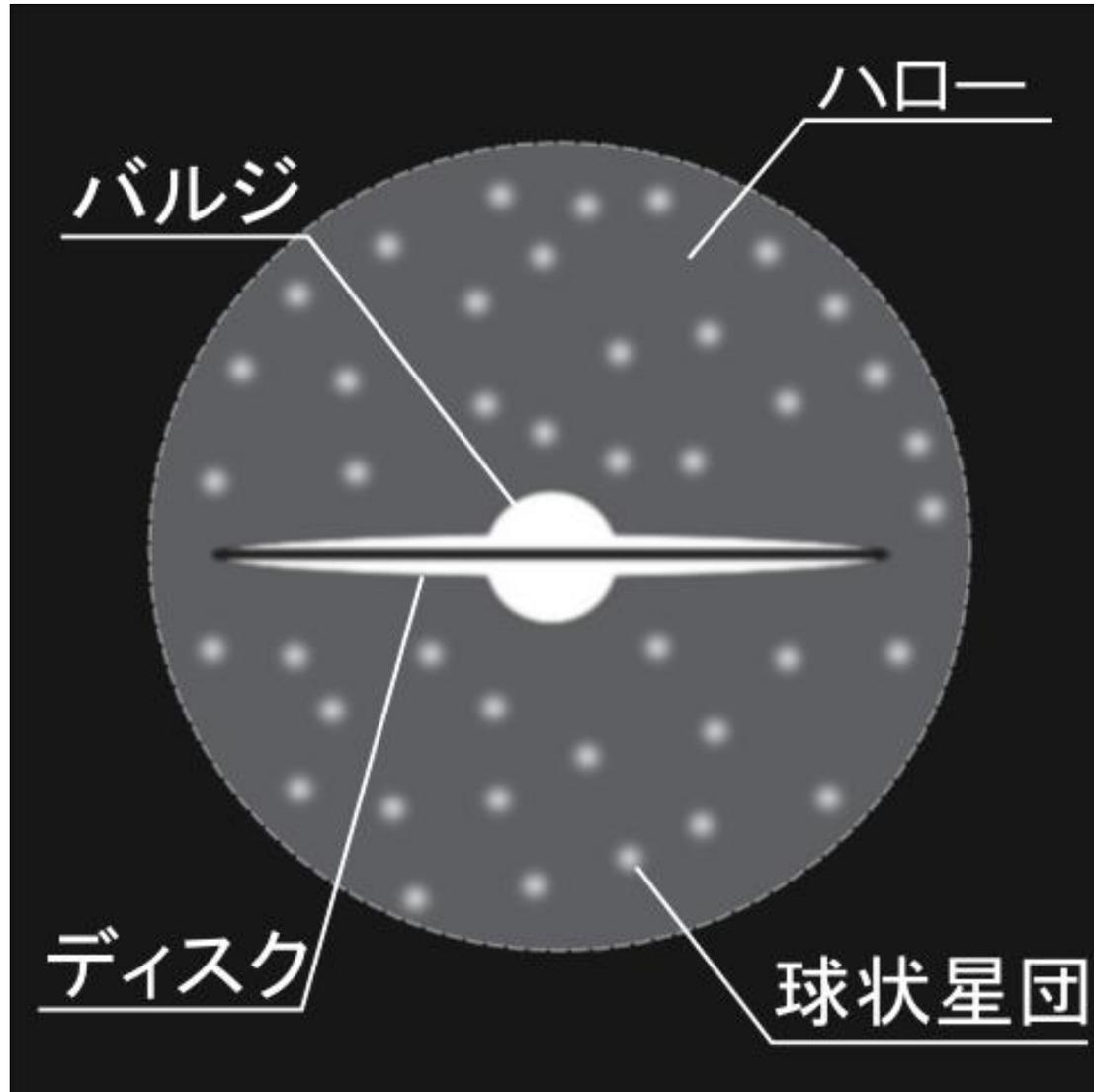
円盤銀河形成に関する最近の研究を広く浅くレビュー

天の川銀河、系外銀河の構造に関する現在の理解と問題点



遠方宇宙での銀河形成

円盤銀河の基本的な構造



バルレジ

バルジの種類

- * バルジには“種類”がある。
 - * classical bulge
 - * pseudo-bulge (Kormendy & Kennicutt 2004)
 - * discy bulge
 - * boxy/peanut bulge (Athanasoula 2005)
- * 理論上、可能性として議論されている種類（あとで話します）
 - * クラumpクラスターで形成されるバルジ (Noguchi 1998, 1999)
 - * 初期のガス降着で形成されるpseudo-bulge (Okamoto 2013)

classical bulge

- * 銀河衝突の痕跡として形成される。

- * いわば楕円銀河の小型版

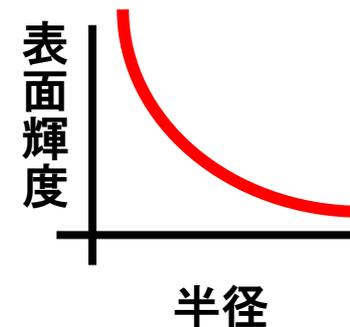
- * de Vaucouleurs則に従う表面密度分布

- * Sersic index $n \cong 4$

- * ほぼ球形、無回転(と言われる)

- * $[\alpha / \text{Fe}]$ の高い、低金属量の古い星で構成

- * 比較的大きい($B/T \sim 0.4$)



- * 例: アンドロメダ銀河



pseudo-bulge

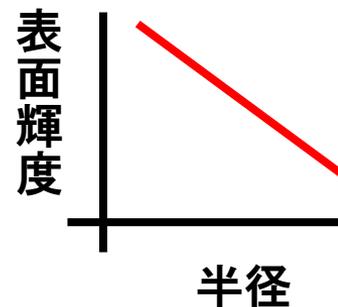
- * 円盤内の渦状腕、棒状構造による力学不安定で形成される

- * discy bulge

- * 衝撃波でガスを銀河中心に落して銀河中心部で星形成を起こす。

- * boxy/peanut bulge

- * 棒状構造の力学不安定(buckling instability)で銀河中心に星を集める。



- * exponential則に従う表面密度分布

- * Sersic index $n \cong 1$

- * 扁平な形状で有意な回転が見られる

- * $[\alpha / \text{Fe}]$ が低く(長期的な星形成)、若い星を含む

- * 比較的小さい($B/T \sim 0.2$)

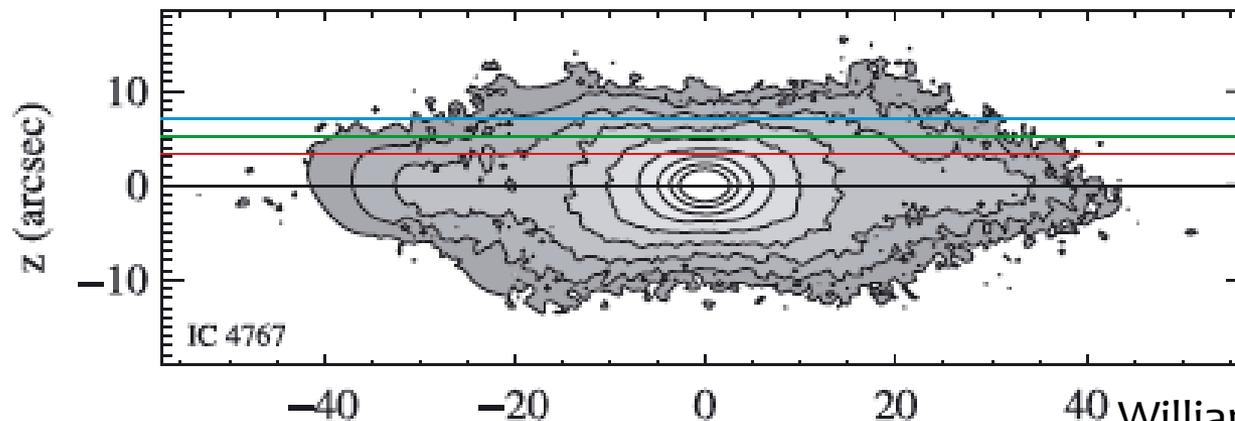
pseudo-bulge

face-on



NGC4565: Kormendy & Barentine (2010)

edge-on



Williams et al. (2011)

バルジの分類は何を物語るか？

- * バルジの種類は過去の銀河形成史を反映している。
 - * **classical bulge**: 過去に銀河衝突・合体を経験している
 - * **pseudo-bulge**: 銀河合体を経験しない静かな形成史だった

* classical bulgeを持つ円盤銀河や楕円銀河の存在度を調べれば、銀河のmerger rateを知ることができる。

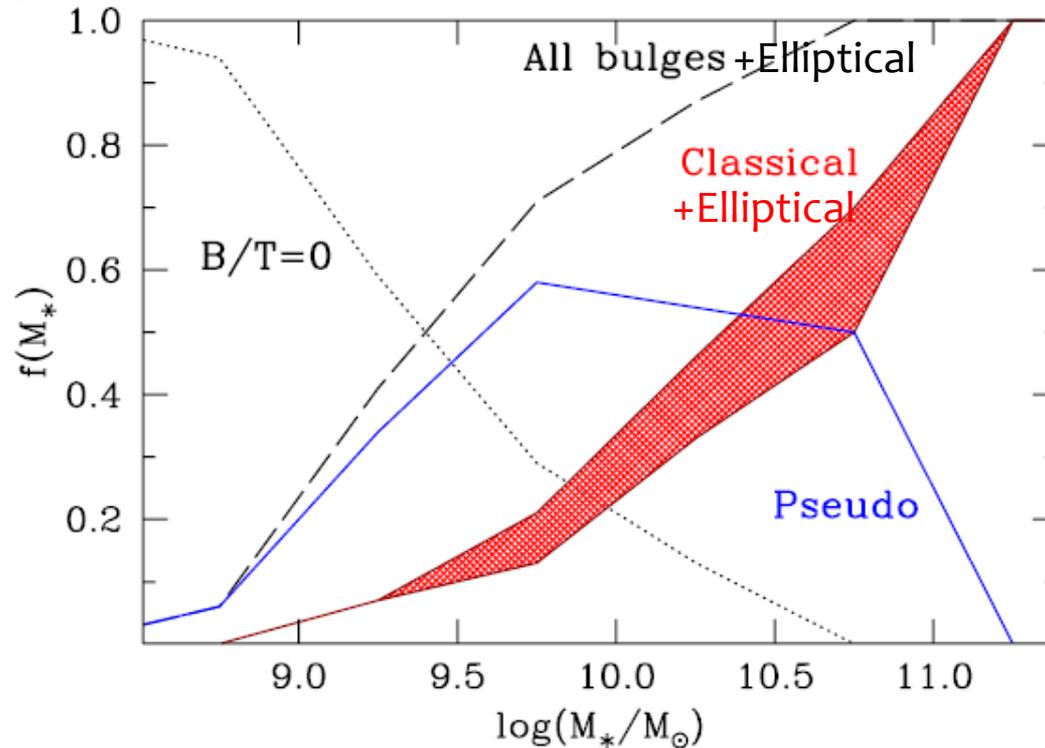
- * 階層的銀河形成論(Λ CDM宇宙論)の描像では、全ての銀河は衝突・合体を繰り返しながら形成される。



* 全ての円盤銀河はclassical bulgeを持っているはずである。

バルジの分類は何を物語るか？

- * 近傍11Mpc以内のサーベイ観測 (Fisher & Drory 2011)



- * $M_* > 10^9 M_\odot$ の銀河に限ると…

- * classical bulge + Elliptical galaxies **17 ± 10 %**

- * pseudo-bulge **45 ± 12 %**

- * bulgeless disc galaxies **35 ± 12 %** (個数比)

バルジの分類は何を物語るか？

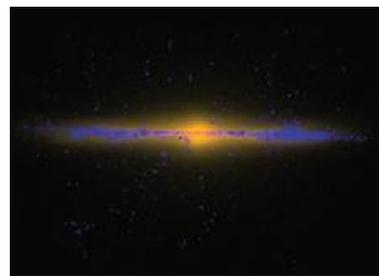
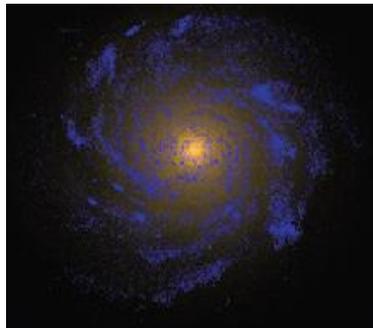
- * 予想に反してclassical bulgeを持つ円盤銀河は少ない。
- * Sc型よりも晩期型な銀河に至っては、classical bulgeを持つ銀河は皆無である。
- * mergerを経験した銀河が少ない？

* Λ CDM宇宙論とは正しいのだろうか？

- * $M_* > 10^9 M_\odot$ の銀河に限ると…
 - * classical bulge + Elliptical galaxies **17 ± 10 %**
 - * pseudo-bulge **45 ± 12 %**
 - * bulgeless disc galaxies **35 ± 12 %** (個数比)

考えられる解決案

- * 2011年以降、宇宙論的初期条件の銀河形成シミュレーションで、『classical bulgeを持たない(pseudo-bulgeを持つ)円盤銀河が普通にできる』という報告が相次ぐ。
 - * Guedes et al. (2011), Hopkins et al. (2011), Brook et al. (2012), Bird et al. (2013), Okamoto (2013), Marinacci et al. (2013) etc...



Guedes et al. (2011)

* 銀河合体してもclassical bulgeが出来るとは限らない？

- * 銀河合体によって円盤が掻き乱され、ガスが銀河中心に溜まっても、星からのフィードバックでガスを吹き飛ばす。(Brook et al. 2012)
 - * シミュレーション解像度の向上、フィードバックモデルの改善のおかげ

残る問題

* バルジのない円盤銀河(pure-disc galaxies)はどう説明するか？

* bulge-less disc galaxies $35 \pm 12\%$ (Fisher & Drory 2011)

* 例:M33



* 現在の数値シミュレーションでは、バーもバルジも持たない円盤銀河は作れない。

* DMハローをN体粒子で表現すると、円盤が角運動量を奪われて、どうしても棒状構造を作ってしまう。(Athanassoula 2002)

* 棒状構造が出来る \Rightarrow pseudo-bulge形成

* late-type LSB銀河の多くはpure disc。

* 珍しい天体でもない。

天の川銀河のバルジはどっちの種類か？

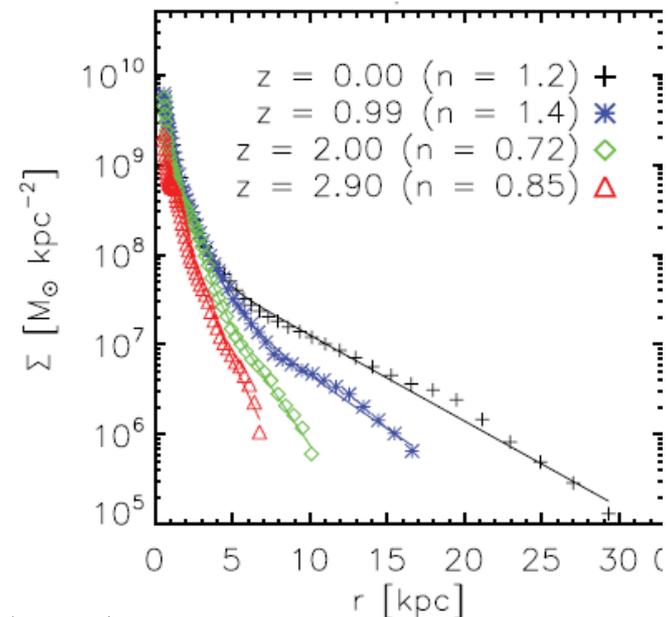
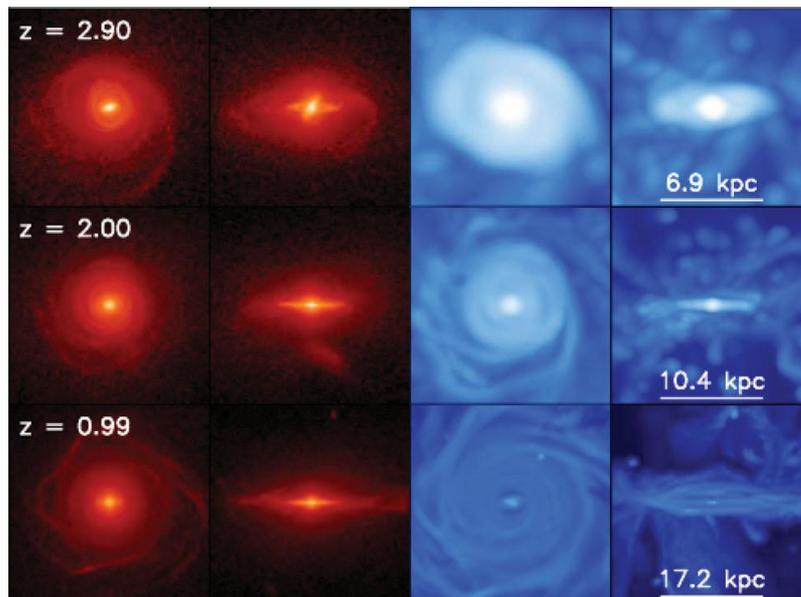
- * pseudo-bulgeであると一般的に言われている。
 - * exponentialな表面密度分布
 - * boxy/peanut shape (X-shape)
 - * 有意な回転
- * **だが**、classical bulgeのような側面も持っている。
 - * バルジ星は古い、というのは「昔からの常識」(11~13 Gyr)
 - * $[\alpha / \text{Fe}]$ が高く、短期間の星形成で出来たと思われる。

* 天の川銀河のバルジはどちらとも言えない、例外的なバルジである。

他にもあり得るバルジの種類？

* 初期のガス降着で形成されるバルジ

- * Okamoto (2013), Obreja et al. (2013), Guedes et al. (2013)
- * 宇宙論的な円盤銀河シミュレーションを行うと、pseudo-bulgeのような構造が円盤より先に出来るものがある。
- * cold streamの方向の変化

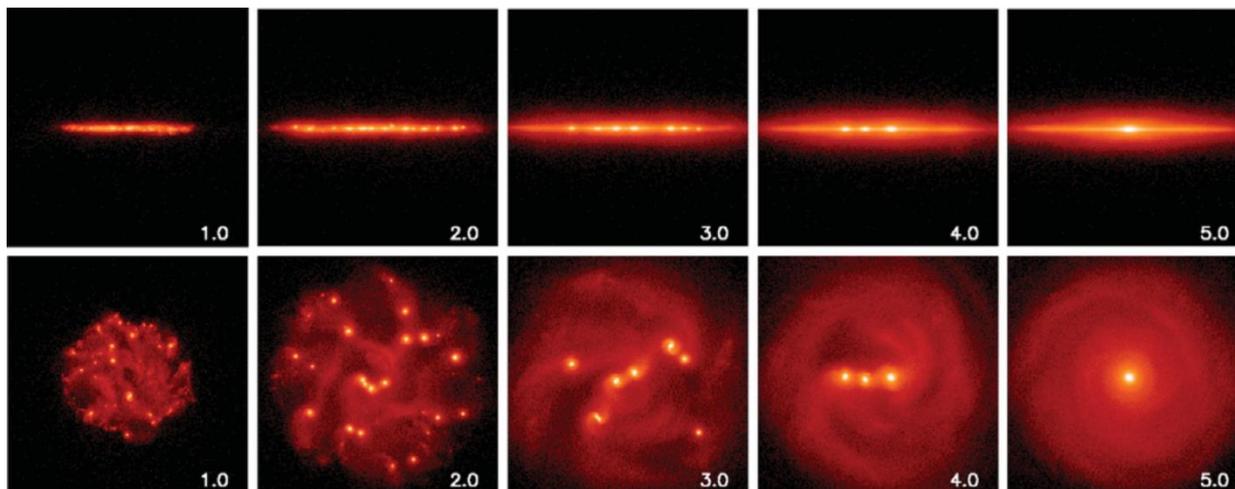


Okamoto (2013)

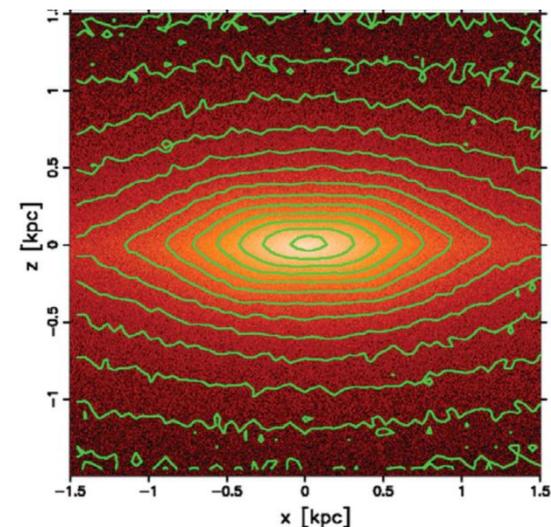
他にもあり得るバルジの種類？

* クラumpクラスターで形成されるバルジ

- * Noguchi (1998, 1999), Inoue & Saitoh (2012)
- * 円盤銀河は形成初期にクラumpクラスターと呼ばれる状態を経験すると考えられている。
- * その時のクラumpが銀河中心で合体し、バルジを作る。
- * 構造的にpseudo-bulge的であり、古い星で構成される。
- * が、classical bulge的だという結果もある。(Elmegreen et al. 2008)



Inoue & Saitoh (2012)



銀河円盤

銀河円盤は2層構造

* 厚さの異なるふたつの円盤

* thin disc

* $h_z \sim$ 数100 pc

* 金属量が高く、 $[\alpha / \text{Fe}]$ が低い、若い星で構成

* thick disc

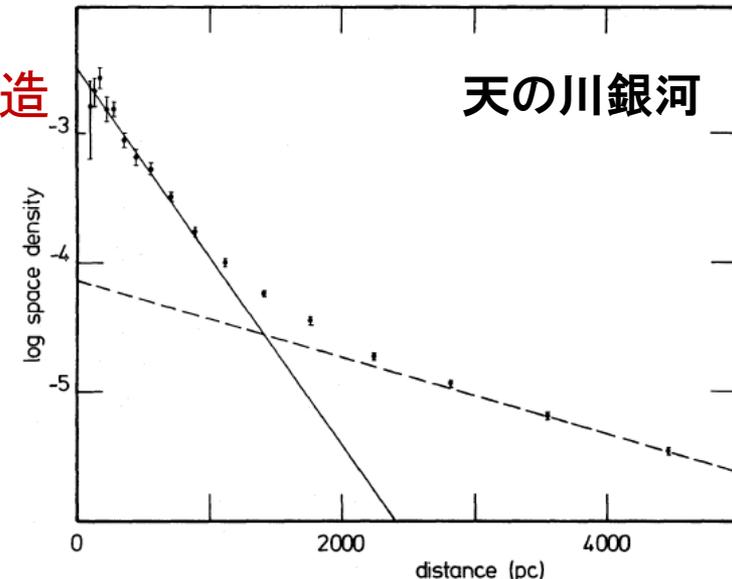
* $h_z \sim$ 1 kpc

* 金属量が低く、 $[\alpha / \text{Fe}]$ が高い、古い星で構成

* 天の川銀河だけでなく円盤銀河に一般的な構造

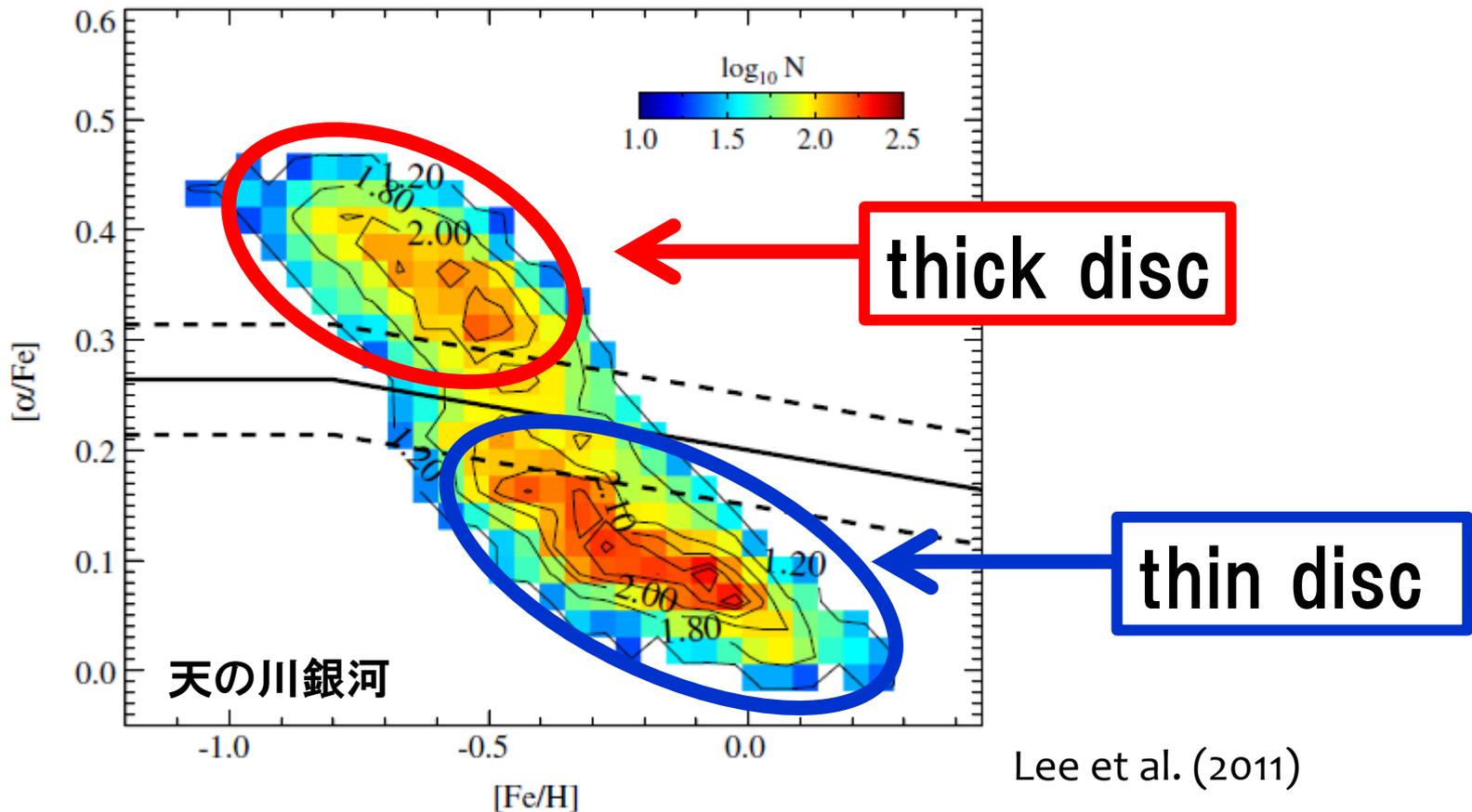
2層構造の銀河円盤

Gillmore & Reid (1983)



銀河円盤は2層構造

- * 厚さだけでなく、化学組成も異なる
- * つまり、異なる星形成史を持つ。
- * 円盤形成は2回に分けて起こっている？



thick discの形成シナリオ

- * thick discの形成シナリオはわかっていない
 - * というか、候補がありすぎる…
 - * 先にthin discがあり、矮小銀河がそれを力学的に加熱する
 - Villalobos & Helmi (2008)
 - * 壊れた矮小銀河の星が円盤に降り積もる
 - Abadi et al. (2003)
 - * gas-richな矮小銀河が降着し、円盤にガス供給・星形成する
 - Brook et al. (2004, 2005)
 - * 渦状腕などによるradial migrationで星を外側へ移動
 - Sellwood & Binney (2002)
 - * クラumpクラスタのクラumpで円盤を力学的に加熱する
 - Bournaud et al. (2009)

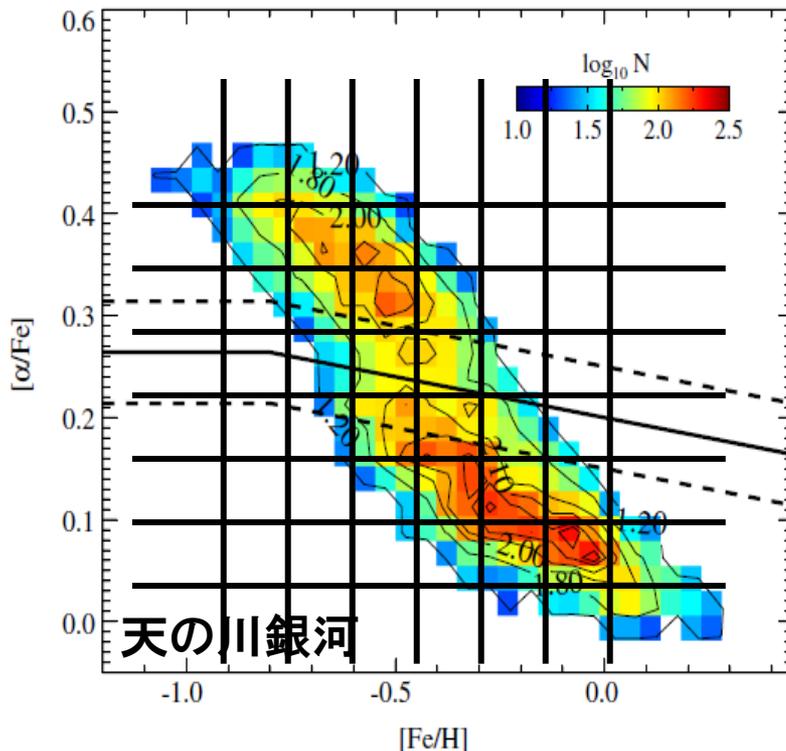
などなど…

明確なthick discはあるのか？

* thin/thin discは連続的につながっていて、わざわざ2回に分けて形成されたのではない？

* Bovy et al. (2012)

* mono-abundance population



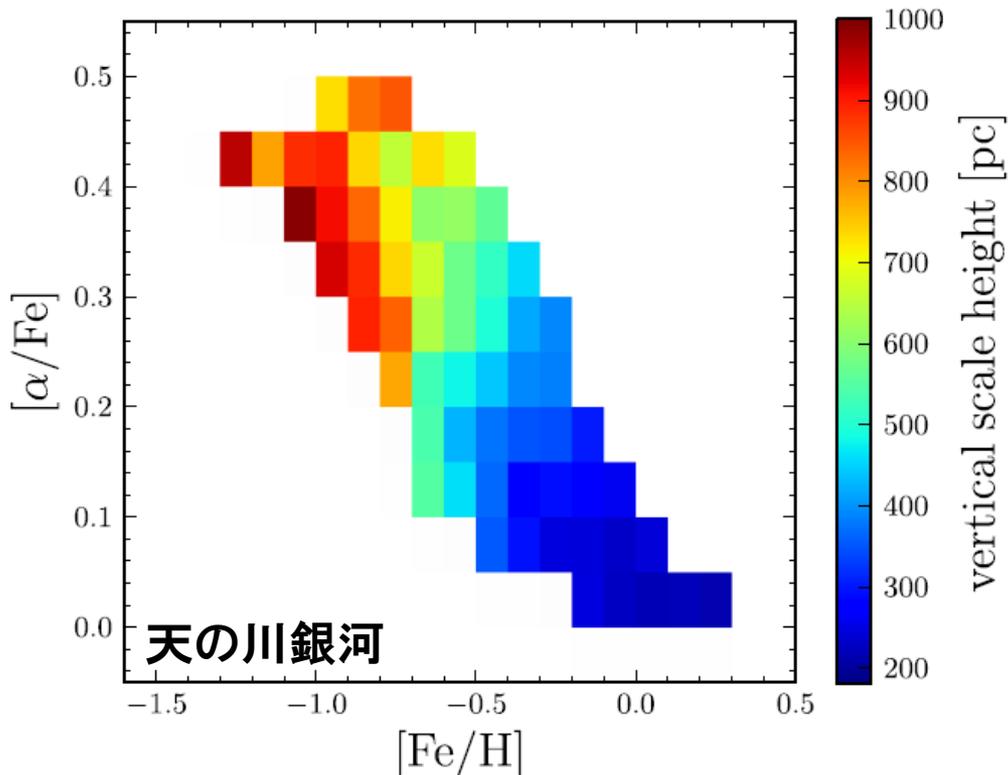
- $[\text{Fe}/\text{H}]$ - $[\alpha/\text{Fe}]$ 平面上で細かく区切る。
- それぞれのpopulationで円盤の厚さを求める。

明確なthick discはあるのか？

* thin/thin discは連続的につながっていて、わざわざ2回に分けて形成されたのではない？

* Bovy et al. (2012) using SDSS

* mono-abundance population



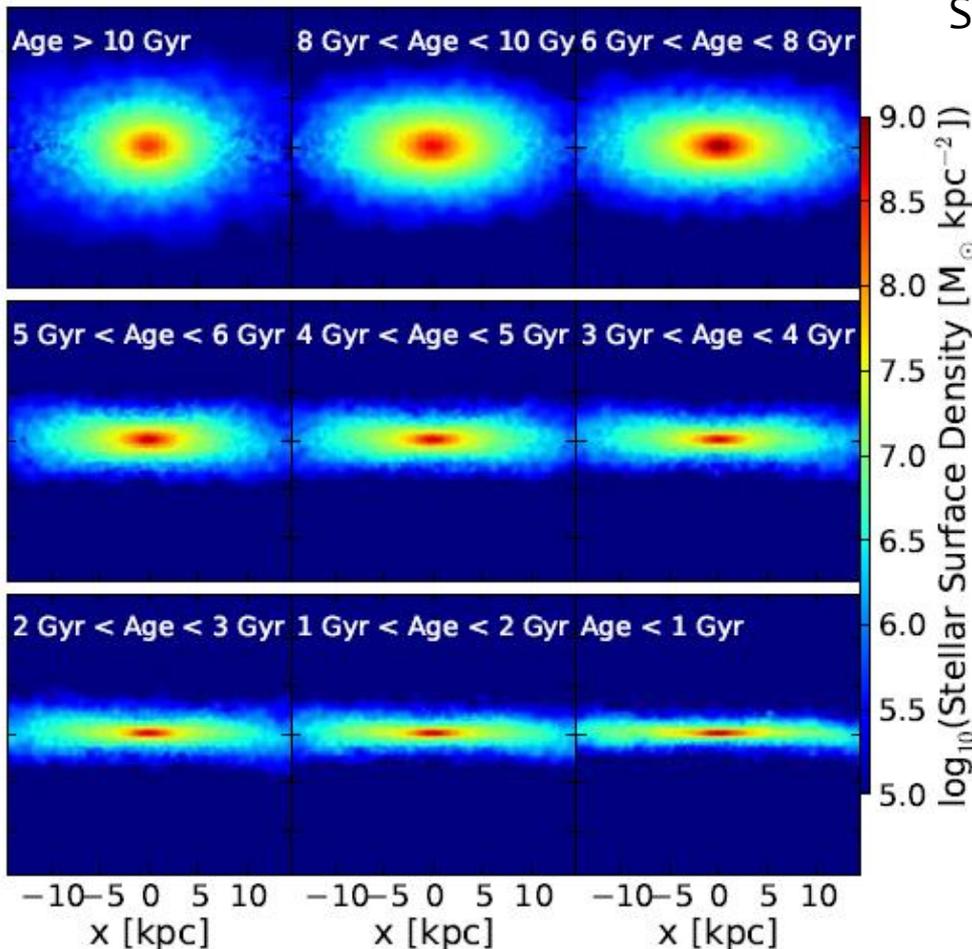
- thick discでもthin discでもない、中間的な厚さを持つpopulationも存在している。
- 個々のpopulationはsingle-exponential
- 全部重ねるとdouble-exponentialの密度分布になる

円盤の形成はthin discからthick discに連続的に起こっており、明確な区別はない。

明確なthick discはあるのか？

- * 宇宙論的初期条件のシミュレーションでも同じような描像で円盤銀河が形成される。

Stinson et al. (2013)



- 円盤形成初期は丸い形状の円盤が形成され、それが徐々に薄い円盤になっていくという描像。

- **だが、thick discの形成のメカニズムは未だはっきりしない。**
- 例えば、初期のガス乱流なのか、矮小銀河の降着なのか、など...
- 連続的なscale heightの遷移が必要。

遠方宇宙での銀河形成の描像

ふたつのガス降着

- * ガスが冷える時間と収縮する時間スケールを考える。

$$* \tau_{cool} \sim \frac{\text{ガスの温度}}{\text{単位時間あたりの温度冷却}}$$

$$\tau_{comp} \sim \frac{\text{ガス球の半径}}{\text{動径方向運動速度}} \approx \tau_{dyn}$$

- * $\tau_{cool} < \tau_{comp}$ であれば、

- * ガスは力学平衡になる前に冷え切ってしまう、ガス球素早く収縮できる

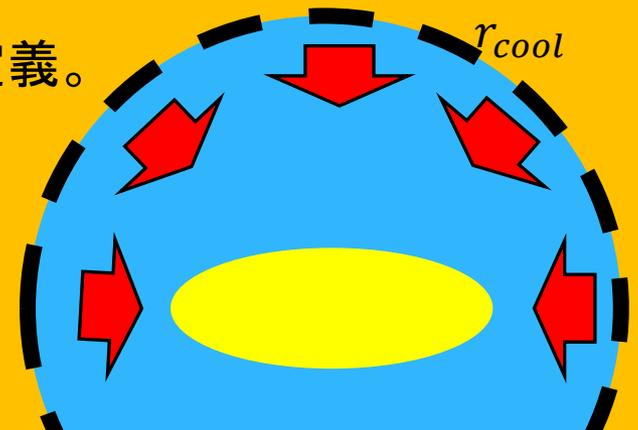
- * $\tau_{cool} > \tau_{comp}$ であれば、

- * ガスは力学平衡を保ちながら徐々に冷えていき、ガス球ゆっくり収縮する

- * 一般的に $\frac{\tau_{cool}}{\tau_{comp}}$ は半径と共に増加する。

- * $\frac{\tau_{cool}}{\tau_{comp}} = 1$ の半径を r_{cool} (クーリング半径) と定義。

高温ハローガス



ふたつのガス降着

* 大きな銀河ハローの場合

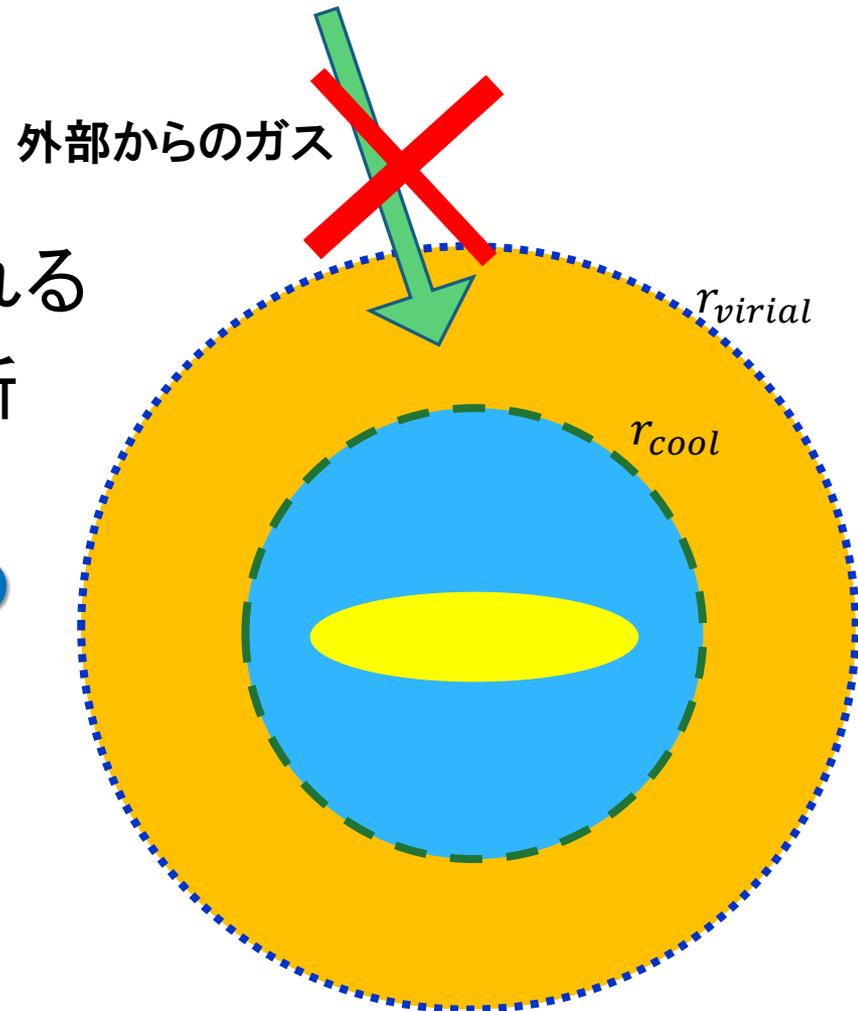
* $r_{virial} > r_{cool}$

* ハローが高温ガスで覆われる

* 外部からのガス降着を遮断

* 徐々に冷えるハローガスの
ゆっくりとしたガス降着。

hot accretion



ふたつのガス降着

- * 小さな銀河ハローの場合

- * $r_{virial} < r_{cool}$

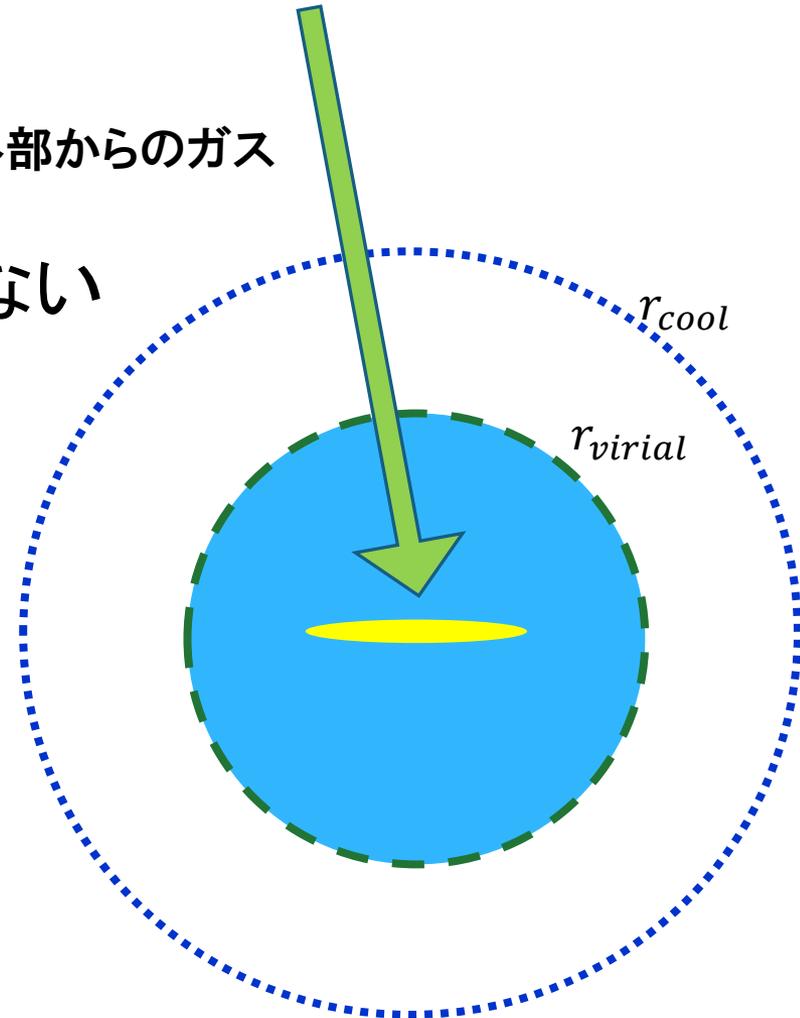
- * ハローが高温ガスで覆われない

- * 外部からガスが降着できる

- * 外部からのガス供給を受け入れる急激なガス降着。

cold accretion

外部からのガス



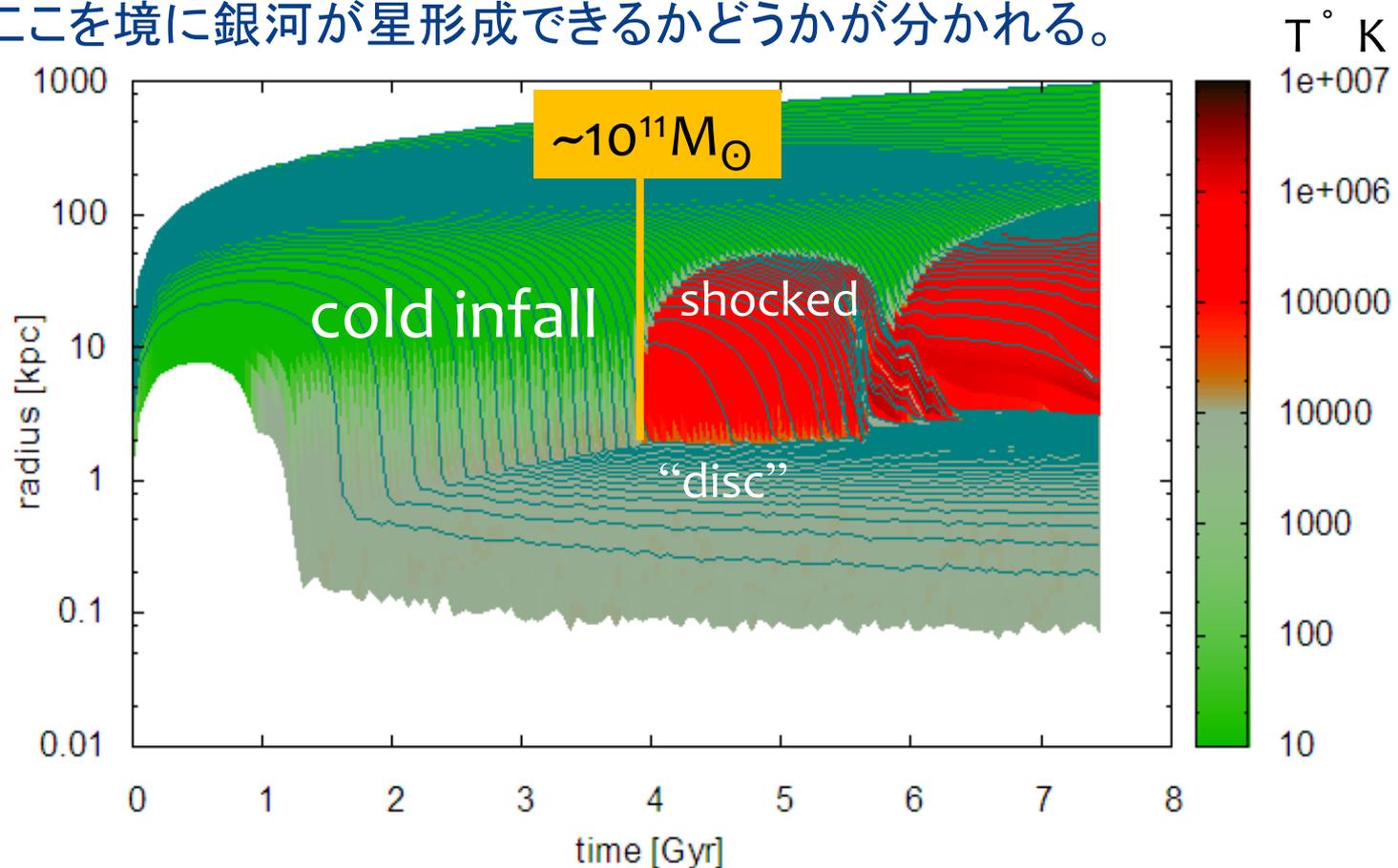
ふたつのガス降着

* 徐々に成長するハローでの、球対称モデル流体計算

* Birnboim & Dekel (2003)

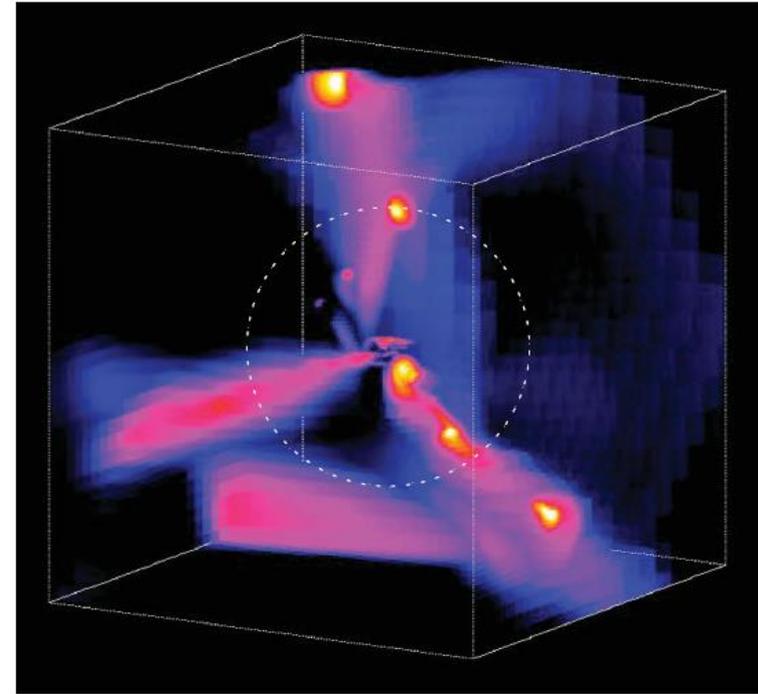
* $\sim 10^{11} M_{\odot}$ あたりでaccretionモードが切り替わる。

* ここを境に銀河が星形成できるかどうか分かる。

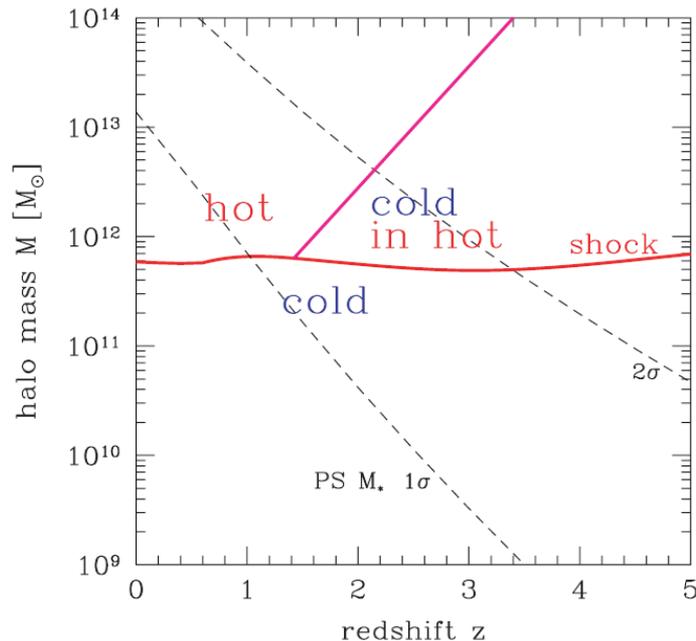


cold stream

- * 宇宙論的シミュレーションだと、cold accretionは”cold stream”としてガスが降着する。
- * 天の川銀河サイズの円盤銀河においては、主なバリオン獲得はmergerではなく、むしろcold accretionである。
- * merger $\sim \frac{1}{3}$, smooth accretion $\sim \frac{2}{3}$



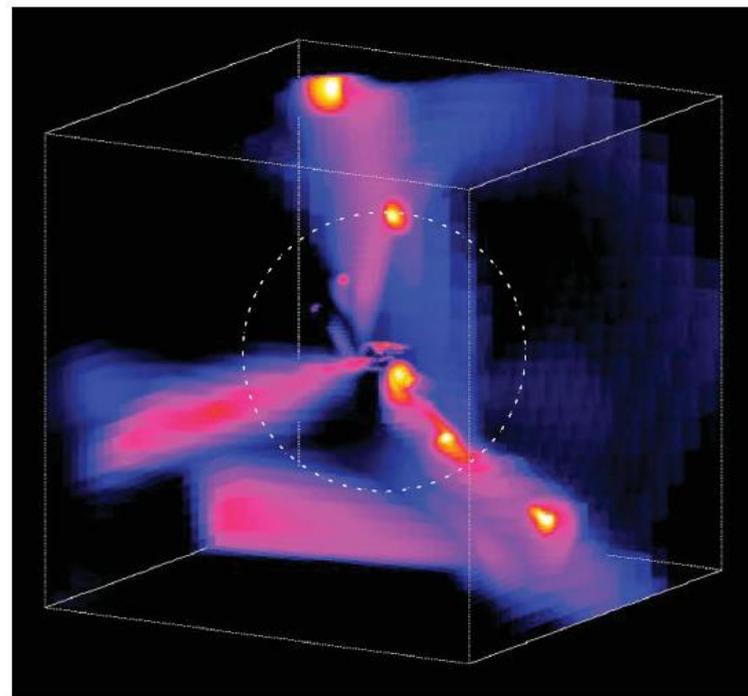
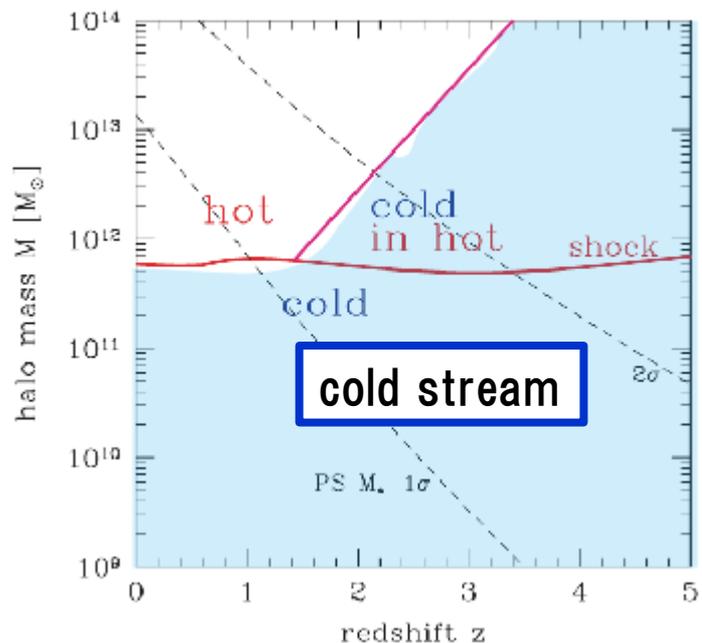
Dekel et al. (2009)



Dekel & Birnboim (2006)

cold stream

- * 宇宙論的シミュレーションだと、cold accretionは”cold stream”としてガスが降着する。
- * 天の川銀河サイズの円盤銀河においては、主なバリオン獲得はmergerではなく、むしろcold accretionである。
- * merger $\sim \frac{1}{3}$, smooth accretion $\sim \frac{2}{3}$



Dekel et al. (2009)

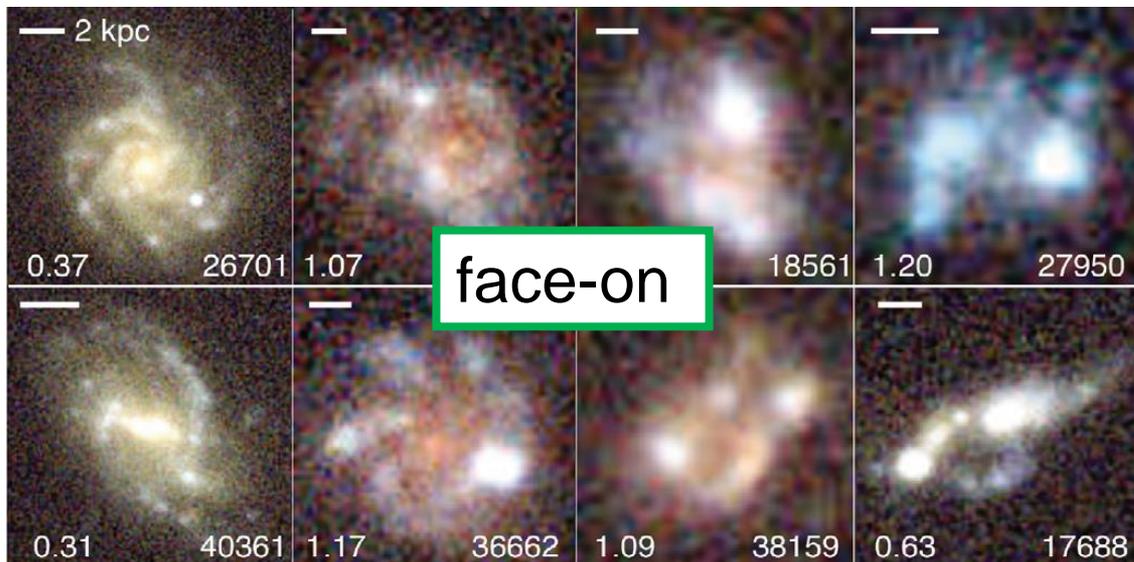
しかし、まだ観測的な証拠はない

Dekel & Birnboim (2006)

遠方宇宙での円盤銀河形成

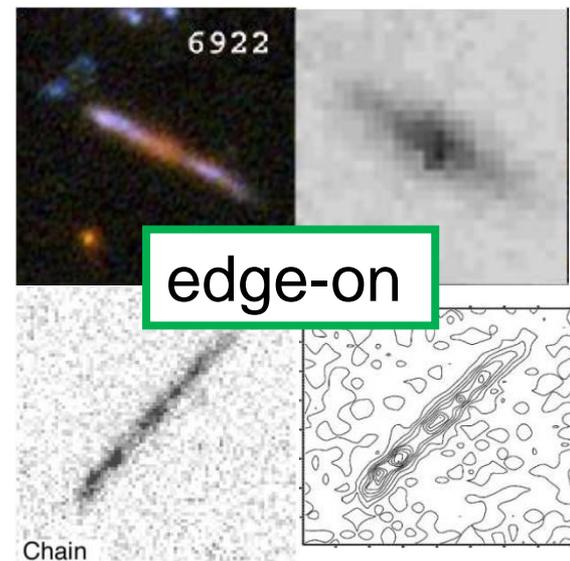
遠方で観測される銀河

* clump clusters / chain galaxies ($z < 1$)



Elmegreen et al. (2009)

Elmegreen et al. (2009)



Elmegreen et al. (2004)

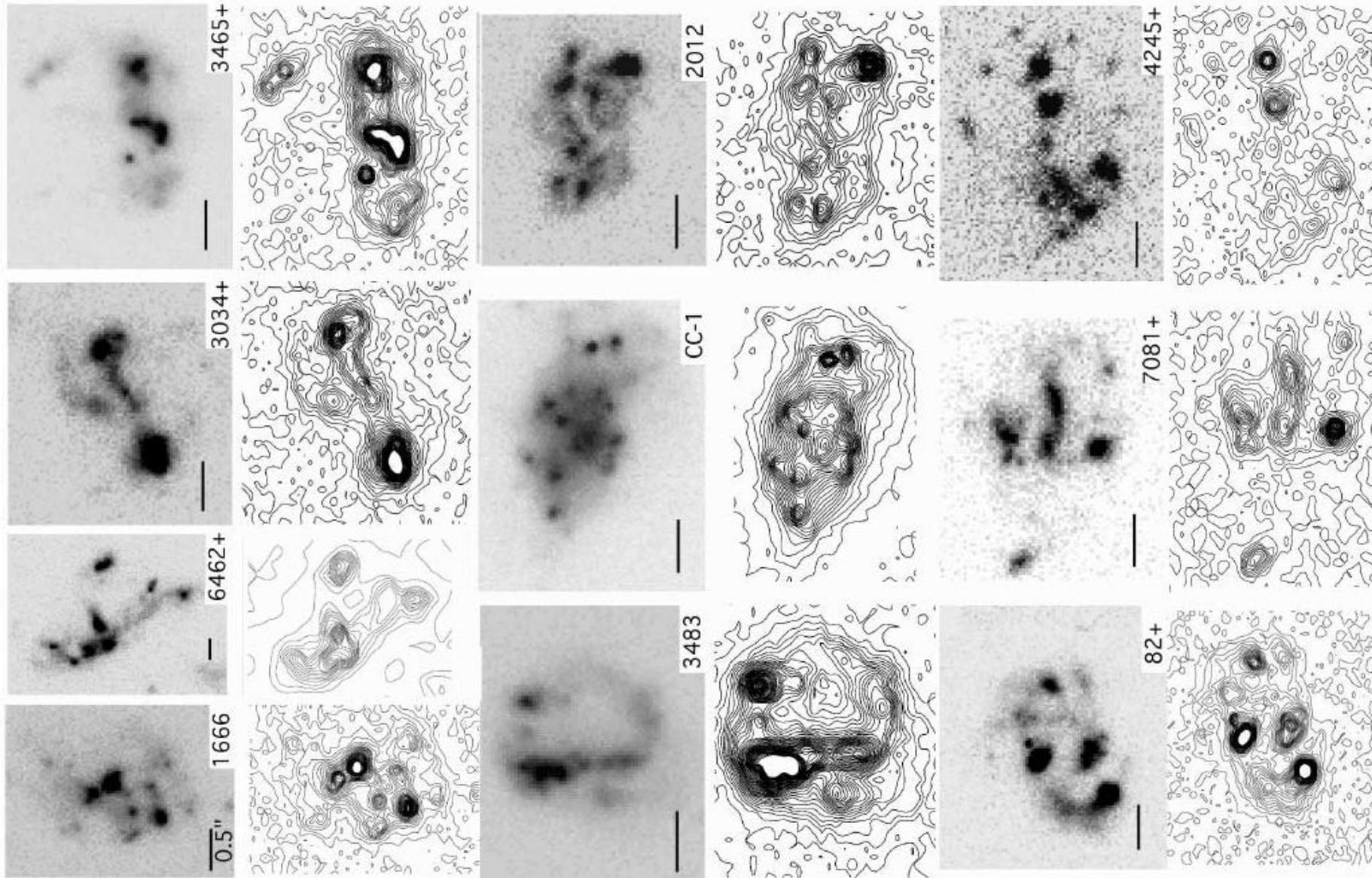
* **円盤銀河の形成途中の姿と考えられている。**

* 形成中の円盤の中に複数の“クランプ”（巨大星団）が見られる。

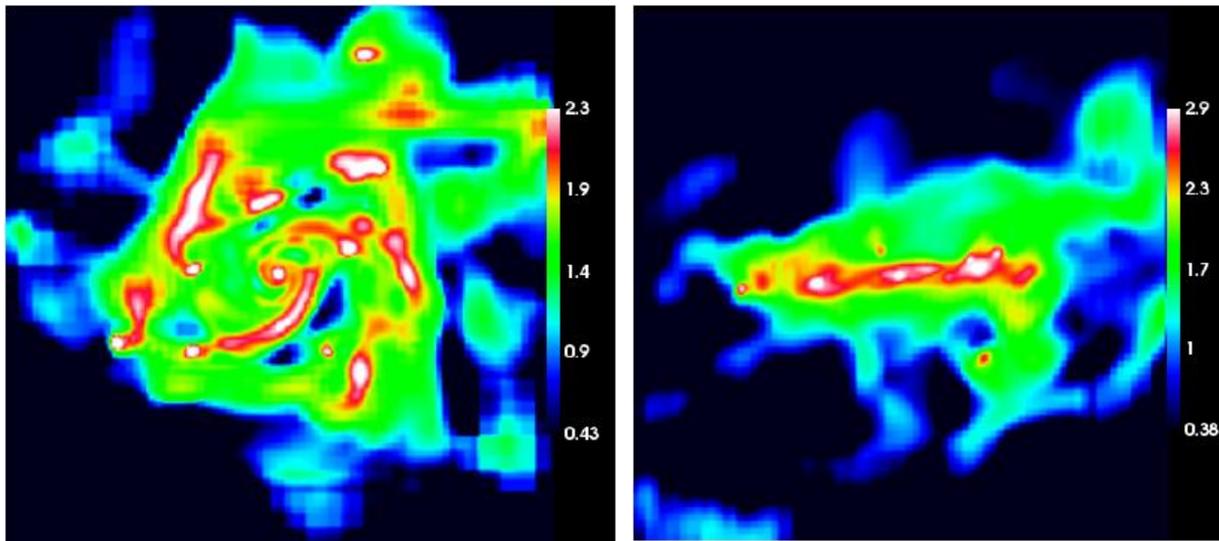
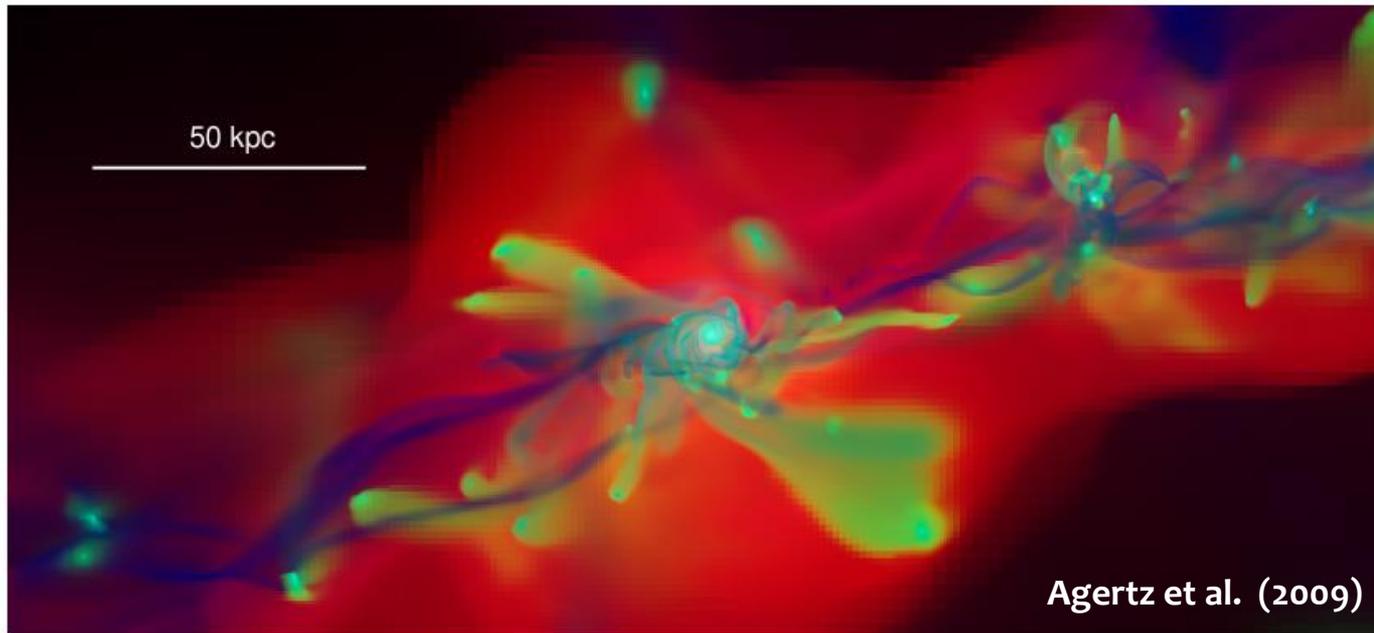
* Clump mass $< 10^{8-9} M_{\odot}$

遠方で観測される銀河

Elmegreen & Elmegreen (2005)



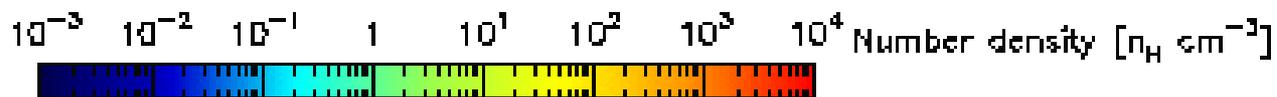
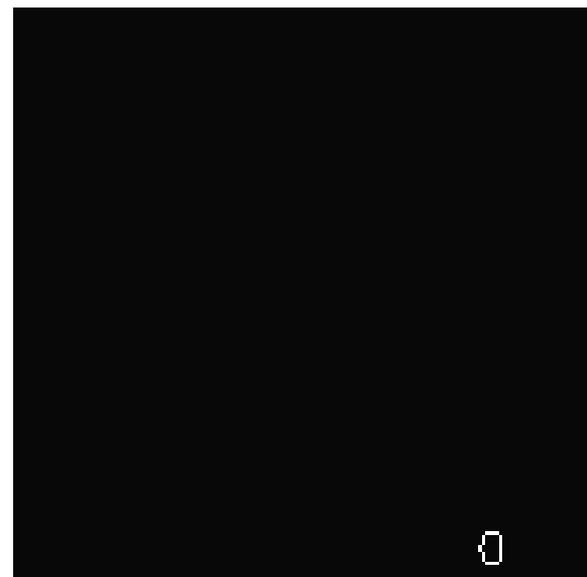
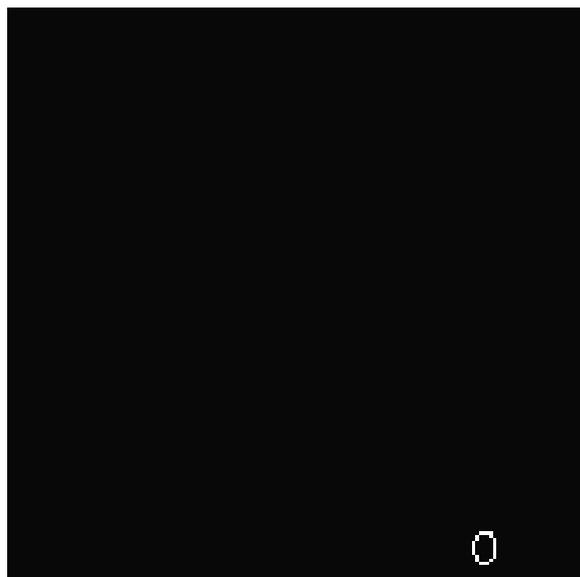
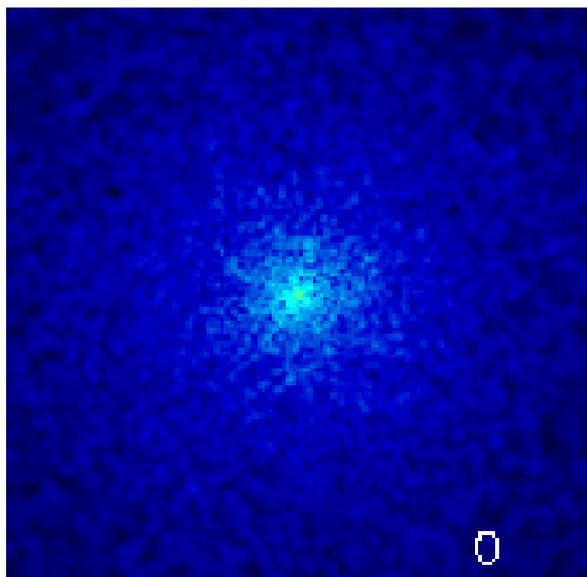
クラumpクラスター



Dekel et al. (2009)

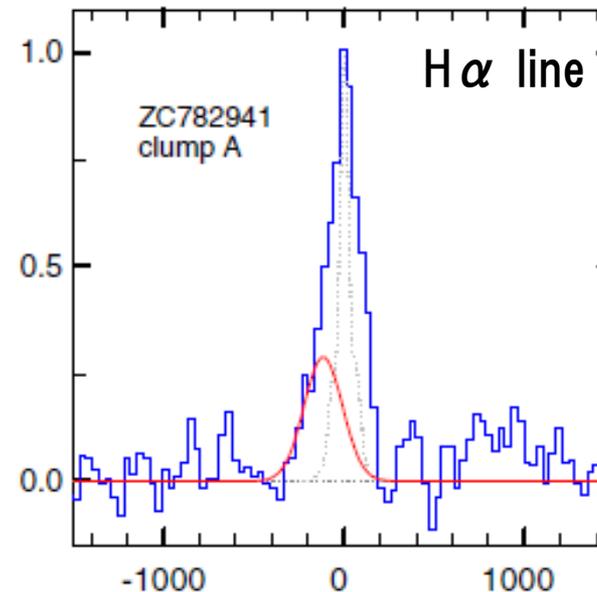
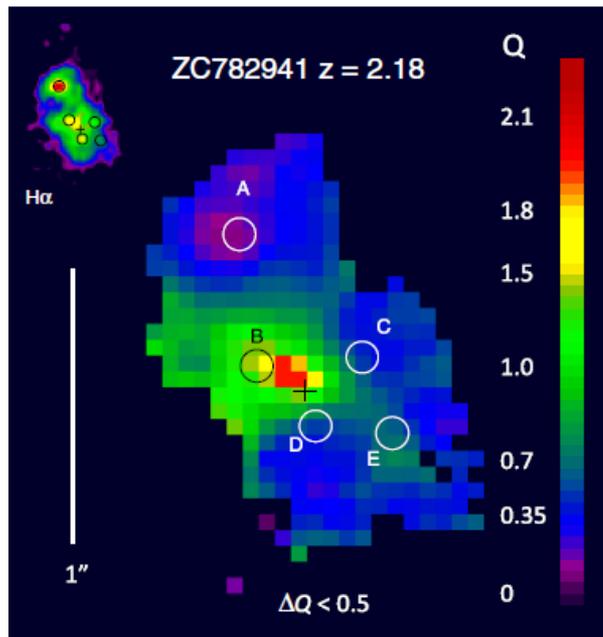
クラumpクワスタ

Inoue & Saitoh (2011, 2012)



クランプの質量放出

- * クランプからはガスのアウトフローが観測されている。
 - * Genzel et al. (2011), Newman et al. (2012)
- * 銀河の脱出速度を超えている場合もある。



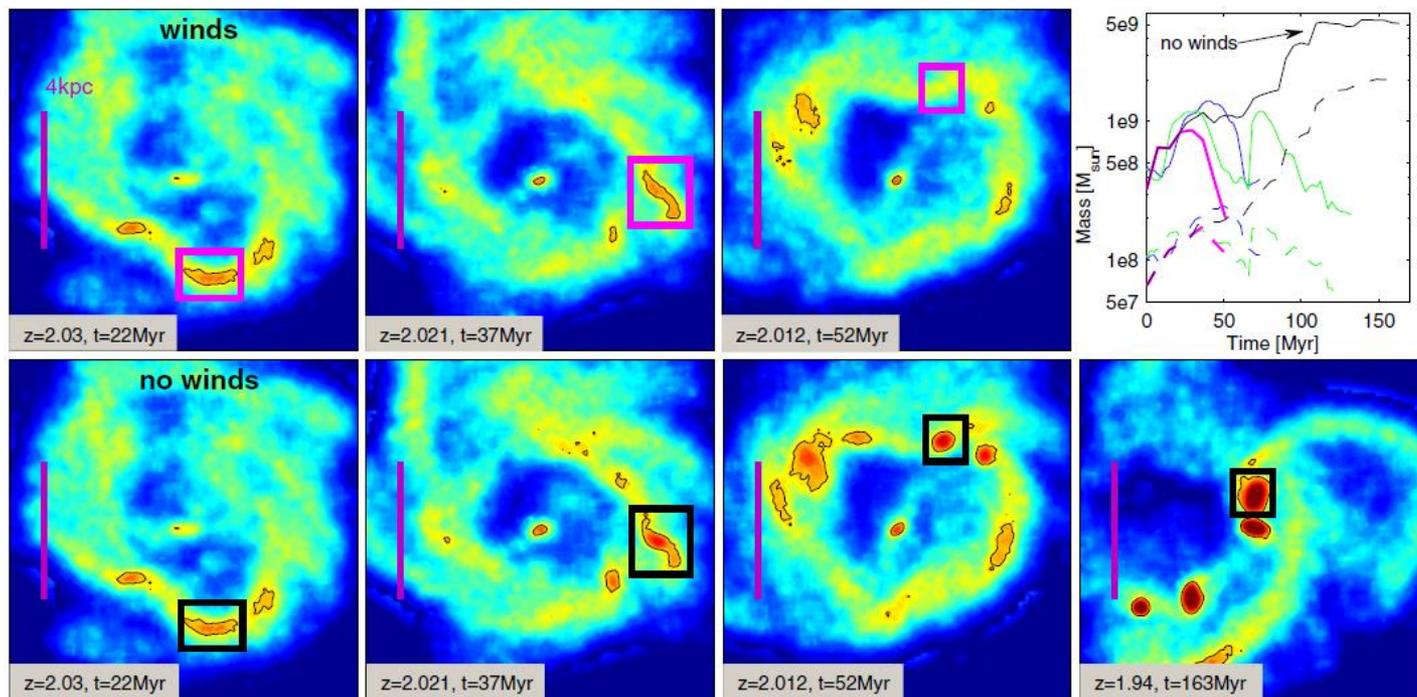
Genzel et al. (2011)

クランプの運命

* 短命説

- * クランプはアウトフローによってガスを放出し、あまり成長できない。潮汐破壊ですぐに崩壊し、短命である。
- * 観測されているアウトフロー速度をシミュレーションにパラメータとして入れるとクランプが崩壊する。

Genel et al. (2012)



アウトフローあり

アウトフローなし

クランプの運命

* 長寿 & バルジ形成説

- * クランプはアウトフローでも生き残り、最終的に銀河中心に到達しバルジを形成する。
 - * 銀河中心に近いクランプほど年齢が高いことが観測されている。つまり外側で出来たクランプが内側に移動している。
 - * Förster Schreiber et al. (2012), Guo et al. (2012)

- * クランプが銀河中心に到達するかどうかは不明。
- * 星形成銀河に関してはシミュレーションもまだ未熟。
 - * over-cooling problem

天の川銀河はクランプクラスターだったのか？

- * 遠方銀河はまだ明るい銀河しか見えていない。
 - * 天の川銀河相当の銀河に進化すると思われるサイズのクランプクラスターは未だ観測されていない。
- * 現在観測されているクランプクラスターは大型銀河。
 - * こうした大型銀河が本当に円盤銀河に進化するかは不明。例えば、銀河合体で楕円銀河などになるかもしれない。
- * 全ての円盤銀河がクランプクラスター期を経験する訳ではないかもしれない。
 - * 宇宙論的シミュレーションの結果ではむしろ珍しい天体。クランプクラスターになるのは激しいガス降着を経験したものだけ。

まとめ

* バルジ

- * classical bulgeが少なすぎる
- * pure-disc galaxiesが多すぎる
- * 天の川銀河のバルジは例外的である

* 銀河円盤

- * thick discの形成起源は未だにわからない

* クランプクラスター

- * cold streamの観測的な証拠はまだない
- * クランプは短命か、生き残ってバルジを形成できるか？
 - * シミュレーションのover-cooling problem、feedbackの理論的理解
- * 近傍の円盤銀河や天の川銀河は本当にかつてクランプクラスターだったのか？
 - * 観測限界等級の制限

ひとつの銀河にふたつのバルジ？

* **バルジ星**はbimodalな金属量分布を持つ。

* Hill et al. (2011), Bensby et al. (2011)

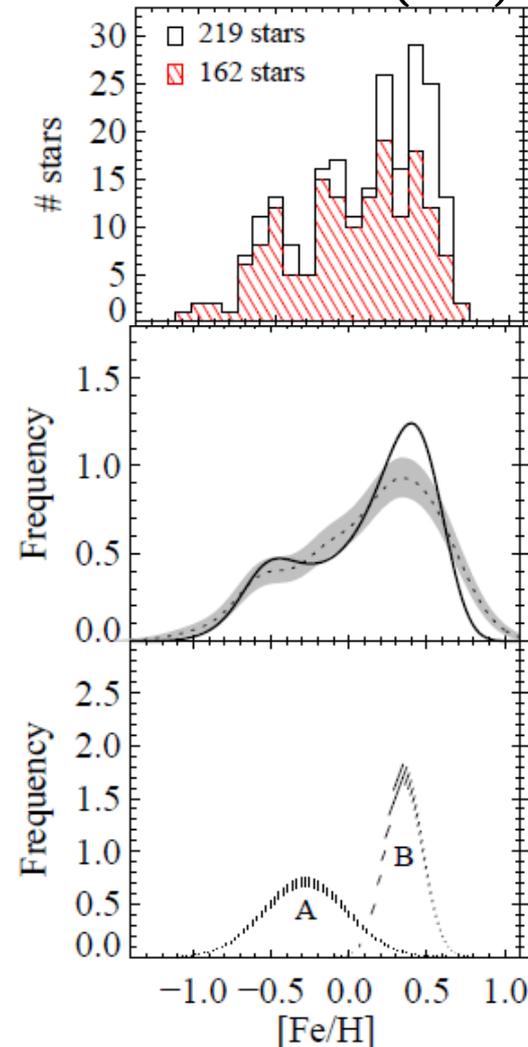
* pseudoとclassicalの重ね合わせ？

* metal-poor/rich、およそ半々。

* **反論**: 力学的にはclassical bulgeは存在しない？

* 15%以下 (Shen et al. 2010)

Hill et al. (2011)

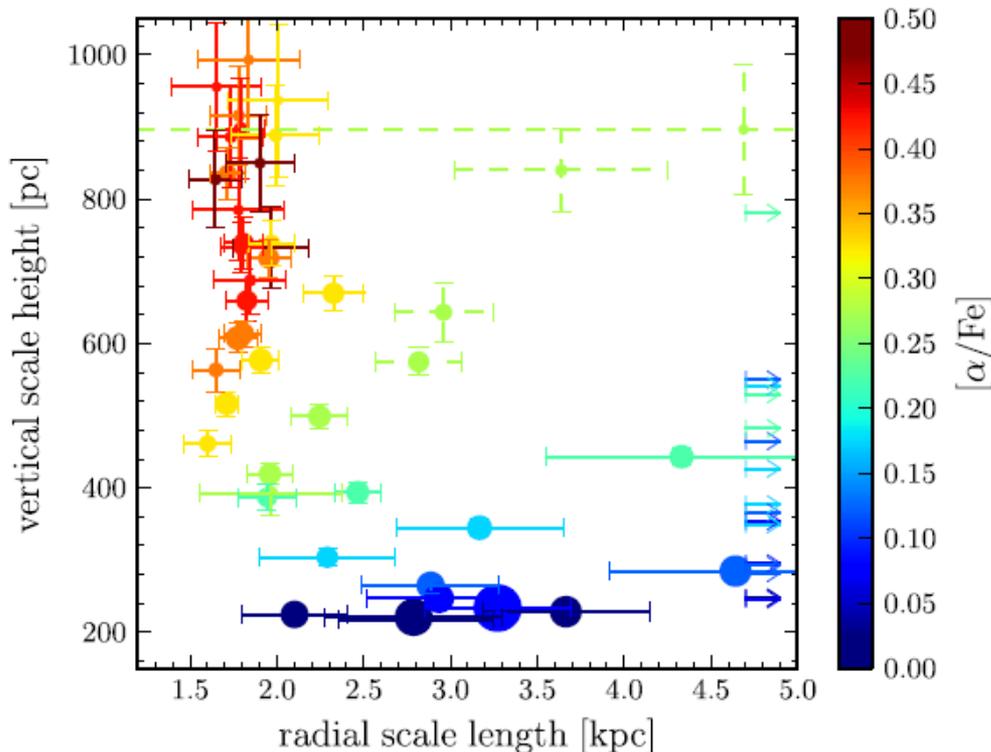


明確なthick discはあるのか？

* thin/thin discは連続的につながっていて、わざわざ2回に分けて形成されたのではない？

* Bovy et al. (2012)

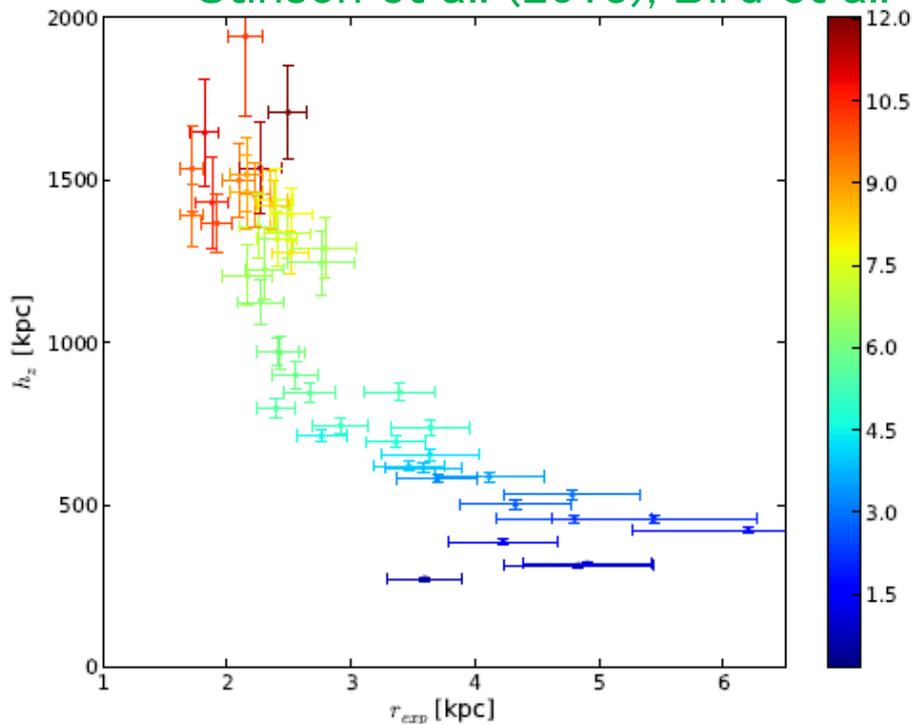
* mono-abundance population



- 円盤の大きさ(半径)も連続的に変化している
 - thick discは小さな半径
 - thin discは大きな半径
- 円盤形成初期は丸い形状の円盤が形成され、それが徐々に薄い円盤になっていくという描像。

明確なthick discはあるのか？

- * thin/thin discは連続的につながっていて、わざわざ2回に分けて形成されたのではない？
- * 宇宙論的初期条件のシミュレーションでも同じような描像で円盤銀河が形成される。
- * Stinson et al. (2013), Bird et al. (2013)



Stinson et al. (2013)

- 円盤の大きさ(半径)も連続的に変化している
 - thick discは小さな半径
 - thin discは大きな半径
- 円盤形成初期は丸い形状の円盤が形成され、それが徐々に薄い円盤になっていくという描像。

やはり何か起こってた？

- * 観測的には、thick disc形成期は～8 Gyr前まで続き、thin discに連続的に切り替わっているようだ。
- * thick disc形成期の天の川銀河は $5M_{\odot}/\text{yr}$ 以上のスターバースト期
 - * Haywood et al. (2013)

