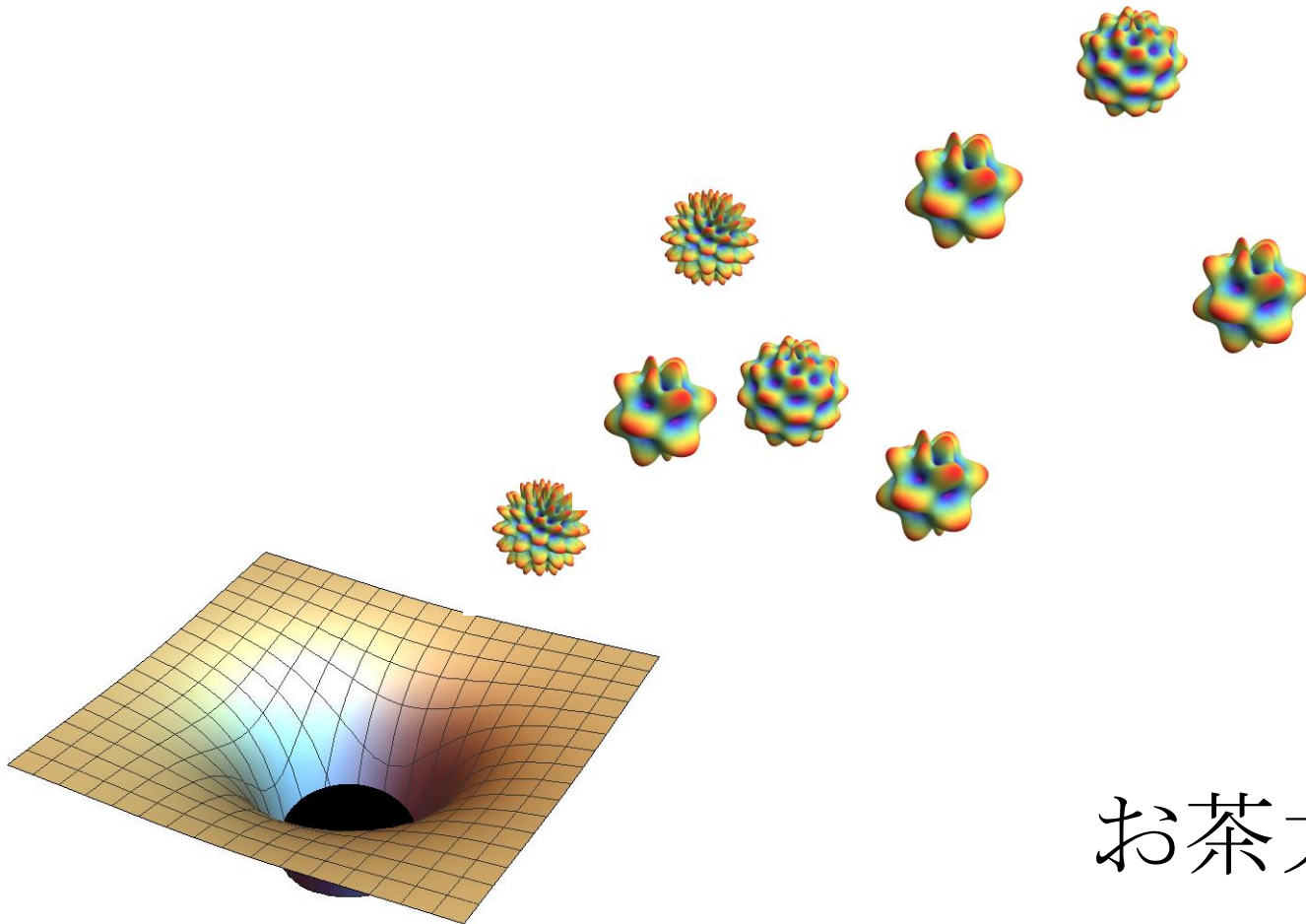


ブラックホールが育てる銀河たち



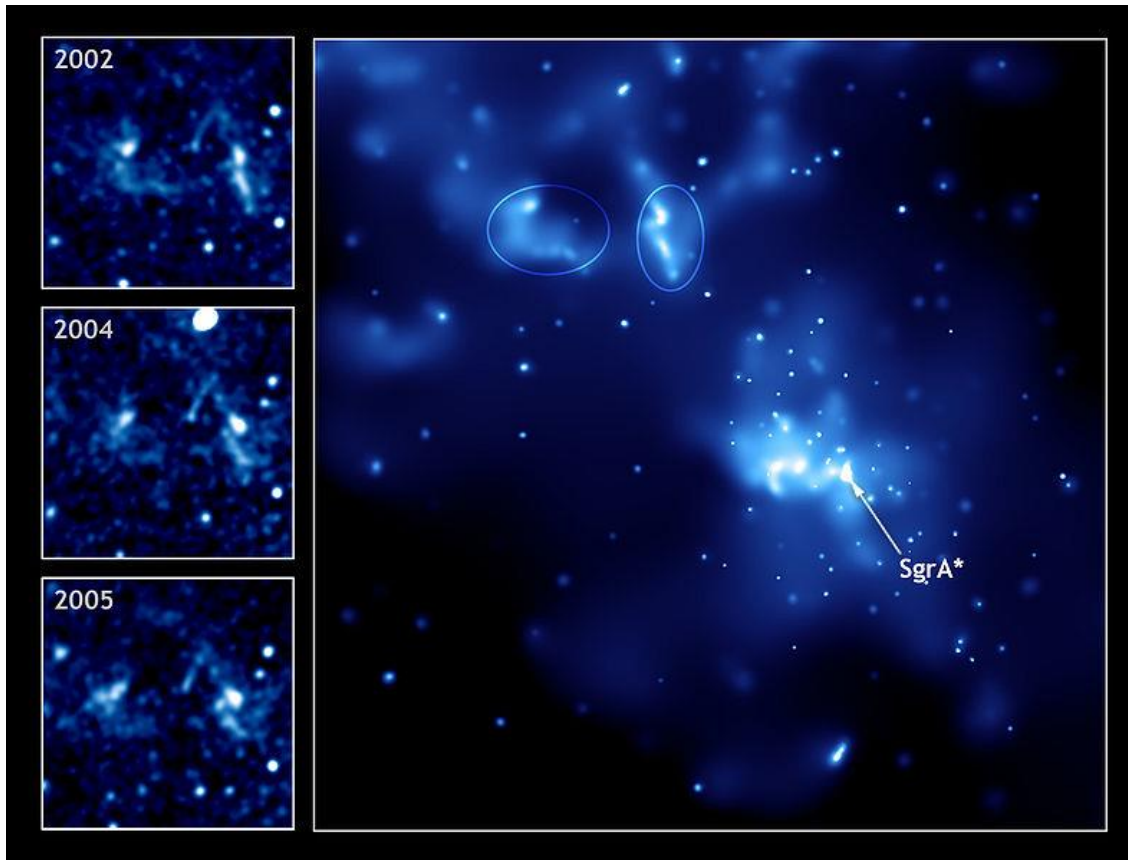
お茶大 物理 森川雅博

arXiv 1508.05436

1. Introduction

超巨大ブラックホール(SMBH)の謎:

- SMBH は銀河の中心を定義する



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gcle.jpg>

- 成熟した SMBH は大昔からあった

P. Marziani and J. Sulentic: *New Astron. Rev.* 56 (2012) 49.

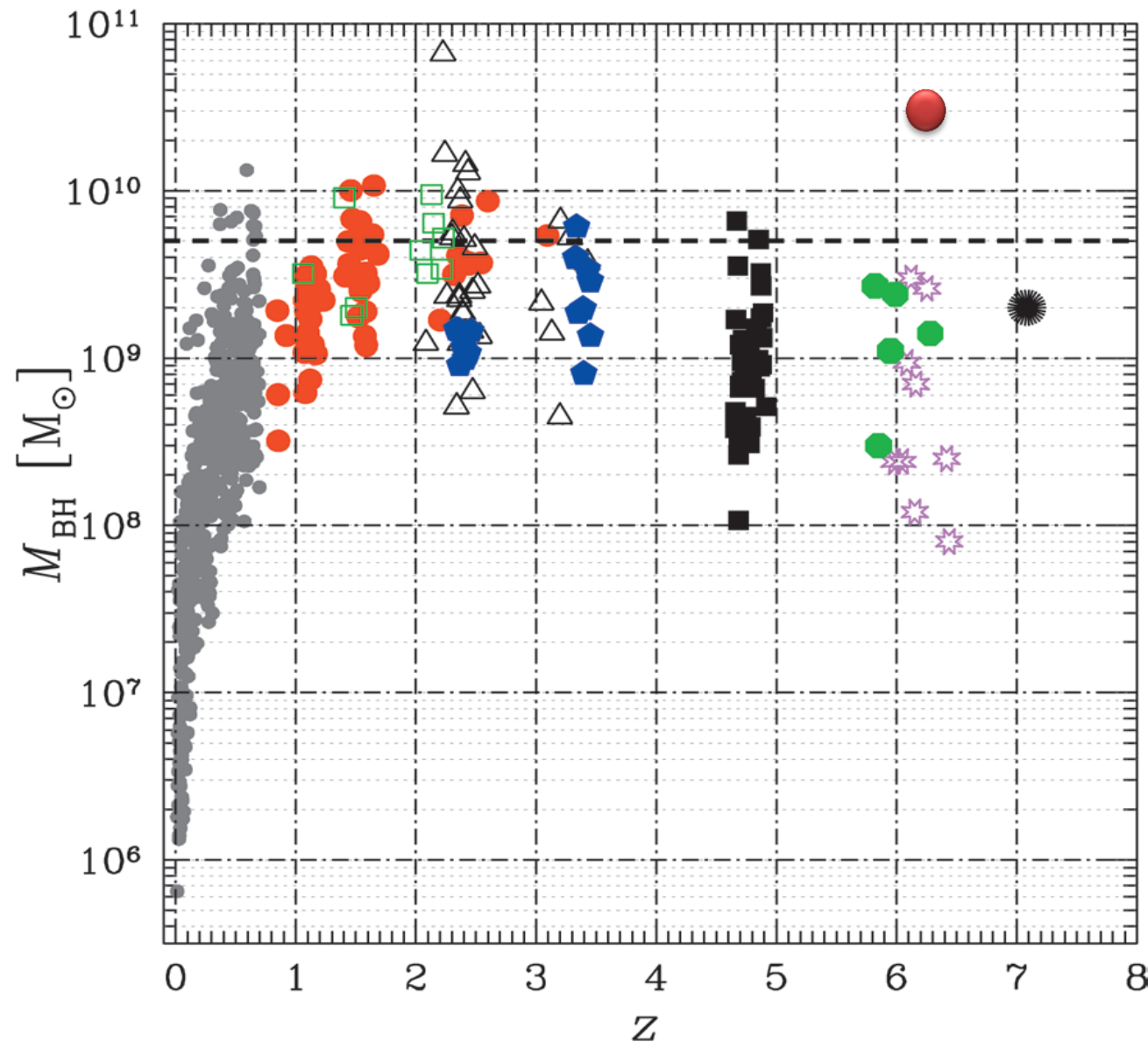
ULAS J1120+0641

@ $z = 7$, $M = 2.0 \times 10^9 M_{\odot}$

2011) De Rosa et al. 2014, *ApJ*, 790, 145

Xue-Bing Wu et al., *Nature* 424

@ $z = 6.3$, $M = 12 \times 10^9 M_{\odot}$



★ SMBH はどのように
できたのか？

木ハハ 至る水 さく ブラックホールのはつくりかた

せかいにはしらないものがたくさんあります
たとえば、ブラックホールのつくりかた。

ブラックホールは①まずおも
いものをもってきて、ものすごい
スピードでぶつけあってで
きます②でもいろんなよ
ほう、こつからぶつけるとブ
ラックホールがでます。

やってみてね!



いっせ

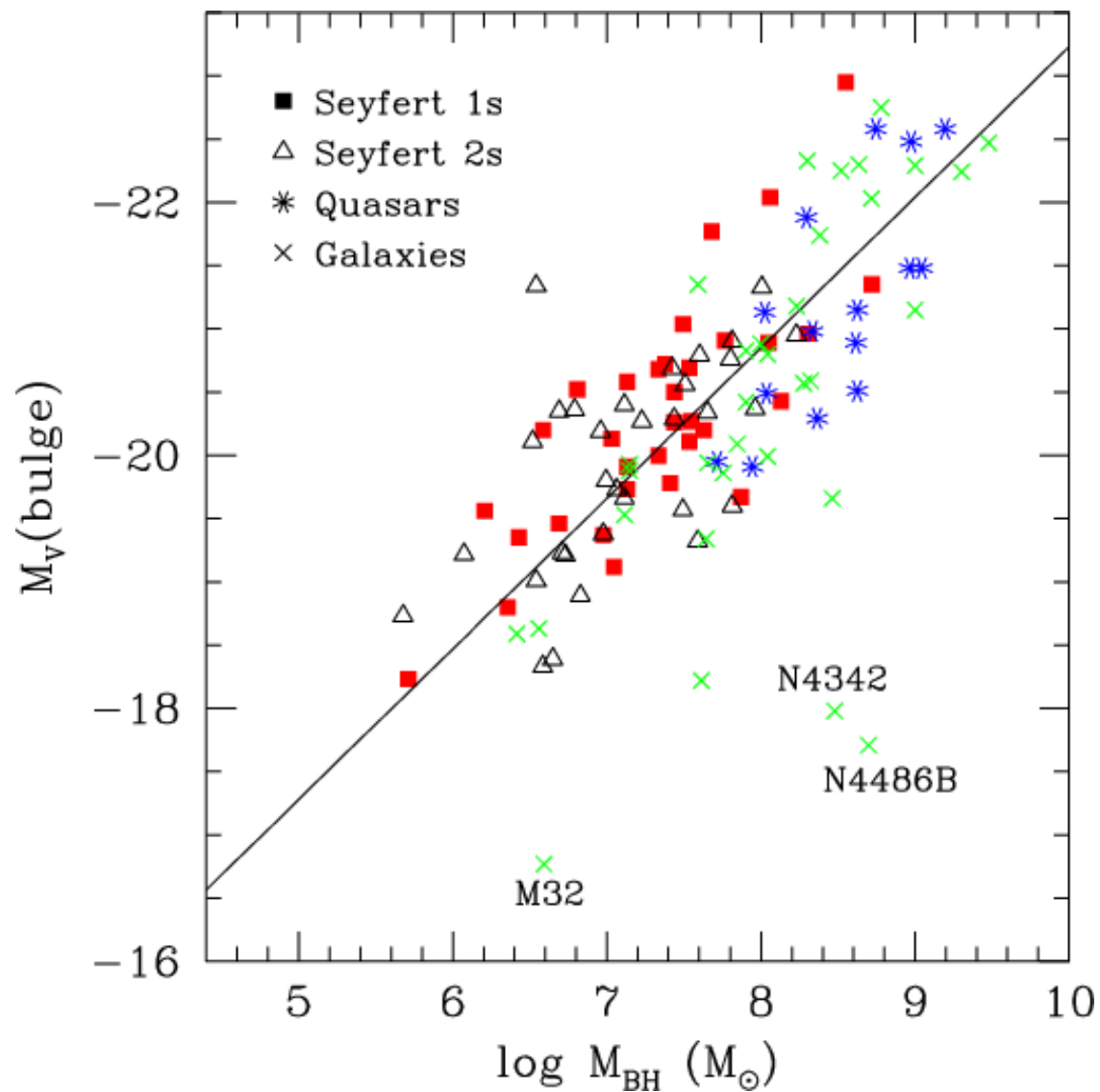


で

さらに...

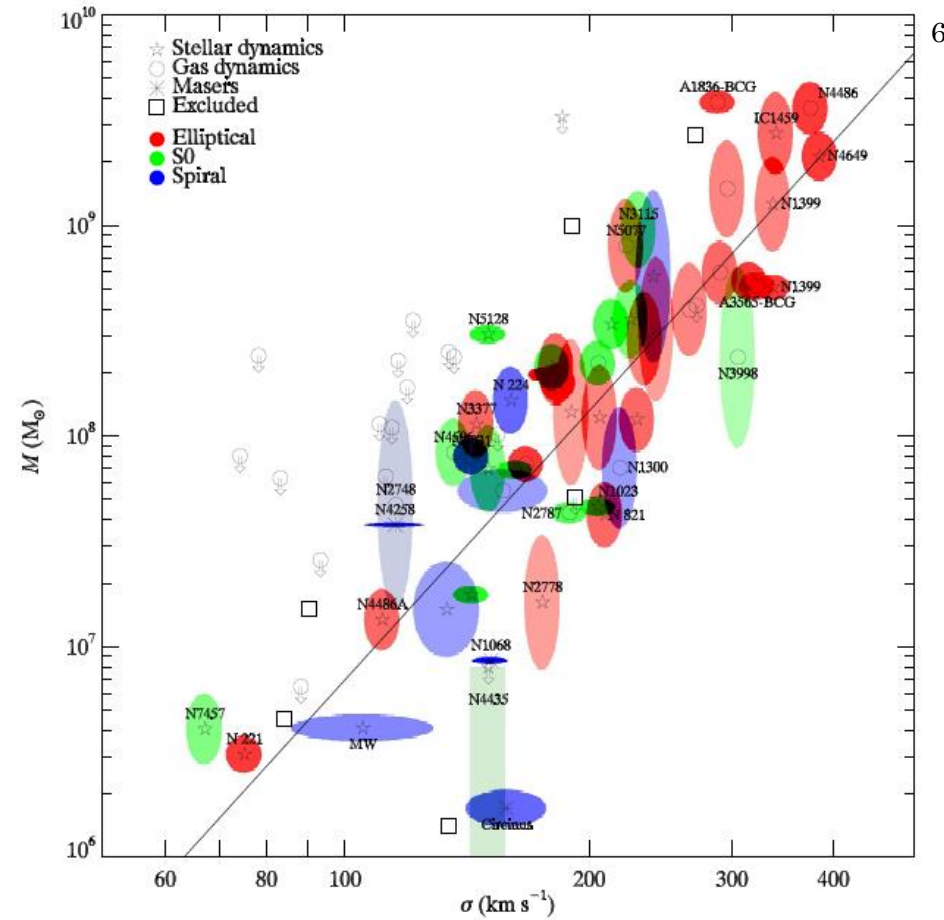
- SMBH は銀河の質量を決める

A&A 380, 31–39 (2001) Wu and Han



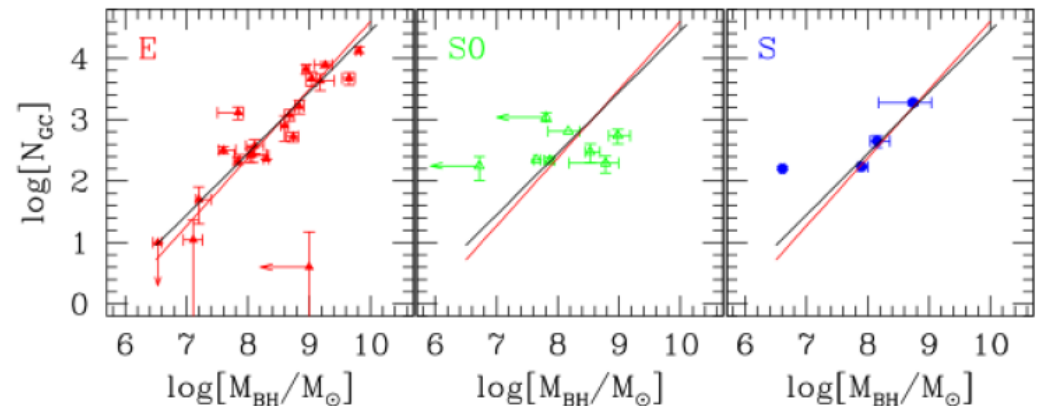
- SMBH は銀河の「温度」(速度分散)を決める

Gültekin, K. et al. (2009)ApJ, 698, 198.



SMBH は銀河の「要素」(球状星団)の数を決める

Gretchen L.H.Harris and William E. Harris 2010



◆ SMBH と銀河の相関からの示唆：

共進化？



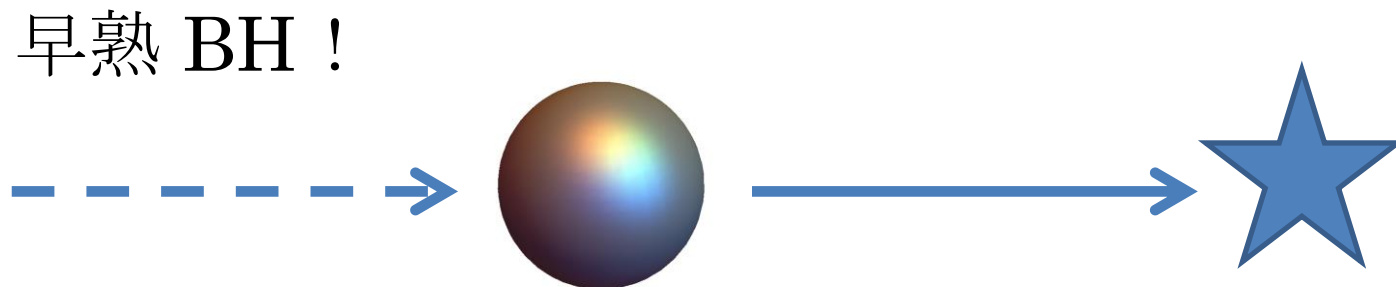
◆ しかし

- **合体**で SMBH を作るのは時間がかかりすぎ不自然
($10^{7-9} M_{\odot}$ ビリアル平衡を超えられない)
- **降着**で SMBH を作るのは時間がかかりすぎ不可能
(Edd. Acc. で $10^3 M_{\odot} \rightarrow 10^9 M_{\odot}$ に $6.2Gy$)

【仮説】 **SMBH が先にできて、銀河を育てる ...**

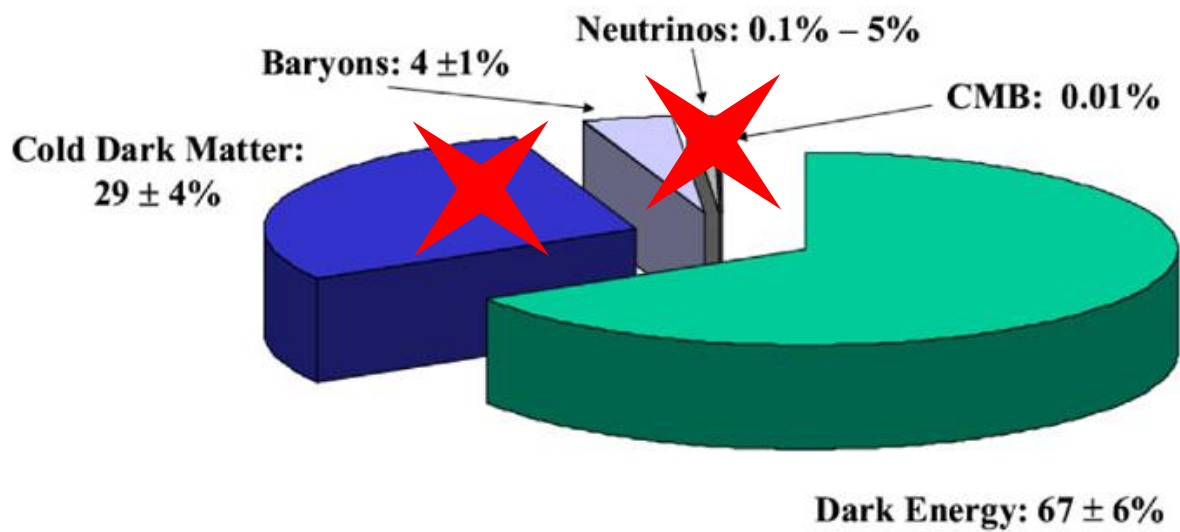
$z \approx 10 - 20$ で SMBH ができたとしよう

→それが銀河をどう作るか？



→では、SMBH はどのようにできたか？

- バリオン(フェルミオン)で作る BH : せいぜい $10^2 M_{\odot}$ ✖
- DMで作る BH: 速度分散によりビリアル平衡になってしまう ✖



https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March03/Freedman/Freedman2_4.html

→ では、暗黒エネルギー (DE) から作る BH

2. SMBH の早期形成 — DE 場が SMBH を作る

DE がボゾン場であれば：コヒーレントにつぶれる。

ボゾン： カウプ限界質量 $M_{kaup} = 0.633 \frac{\hbar c}{Gm} \approx \frac{m_{pl}^2}{m}$ を超えたら崩壊を止める力はない。

cf. BH の臨界現象： Choptuik 1993, Gundlach 2007

$$M_{BH} \propto p - p_*^\gamma$$

→ 中心に **SMBH** + 凝縮が解ける領域(**DM** の熱的分布)
Nishiyama et al. 2004. Fukuyama et al. 2006.

● DE はとにかく潰れる

$$- ds^2 = \alpha(t, r)^2 dt^2 - a(t, r)^2 dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

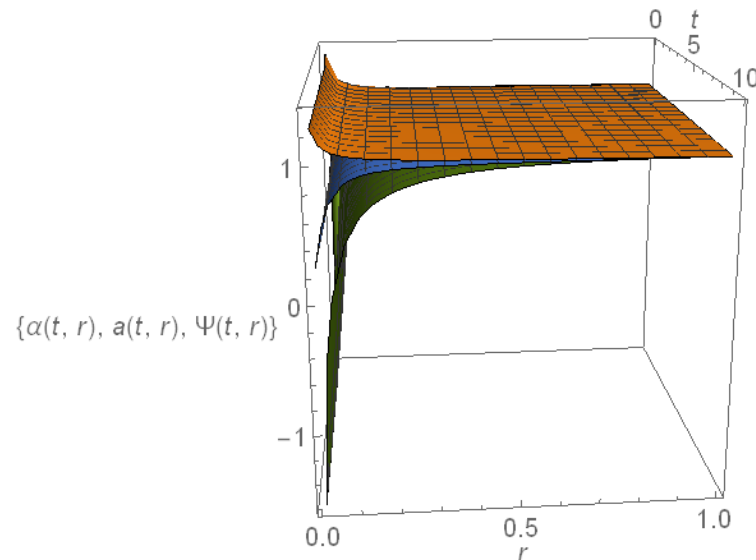
凝縮したボゾン (球対称) のモデル

$$(a^2 - \alpha^2) (-2 a_t + a r \Psi_t \Psi') = 0$$

$$a^3 r \Psi_t^2 - 2 \alpha^2 a' - 2 a \alpha \alpha' + a r \alpha^2 (\Psi')^2 = 0$$

$$-\frac{2}{r^2} - 2 m^2 \Psi^2 + \lambda \Psi^4 + \frac{-2 r \alpha a' + 2 a (\alpha + r \alpha')}{a^3 r^2 \alpha} = 0$$

$$a^3 r (2 \alpha^3 \Psi (-m^2 + \lambda \Psi^2) + \alpha_t \Psi_t - \alpha \Psi_{tt}) + a \alpha^2 ((2 \alpha + r \alpha') \Psi' + r \alpha \Psi'') = r \alpha (a^2 a_t \Psi_t + \alpha^2 a' \Psi')$$

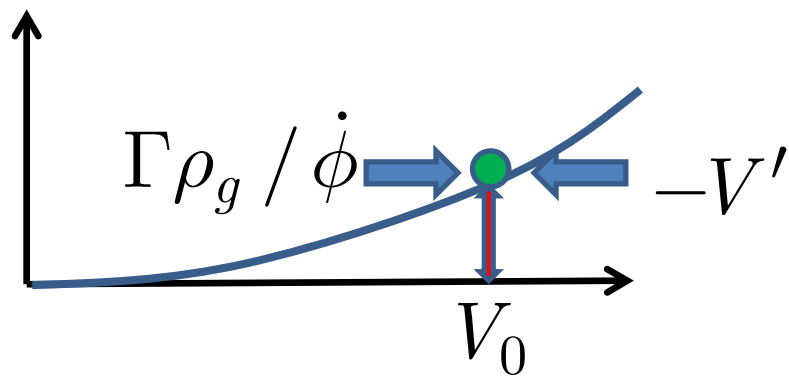
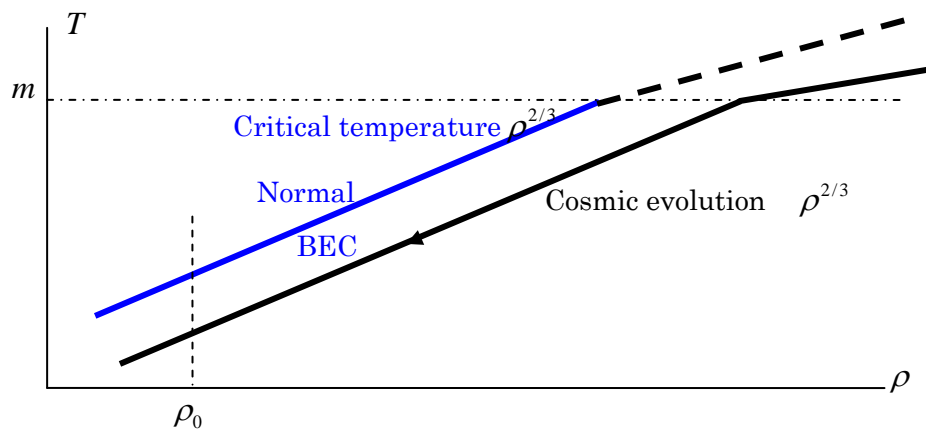


Non rel. boson field condensates in the universe?

$$\rho = \int \frac{k^2 dk}{2\pi^2} \varepsilon_k e^{\varepsilon_k - \mu} \beta^{-1} \propto T^{3/2}$$

- **BEC** if (thermal de Broglie length) > (mean sep. of particles):

$$T < \left(\frac{2\pi\hbar^2}{m} \right) n^{2/3}$$

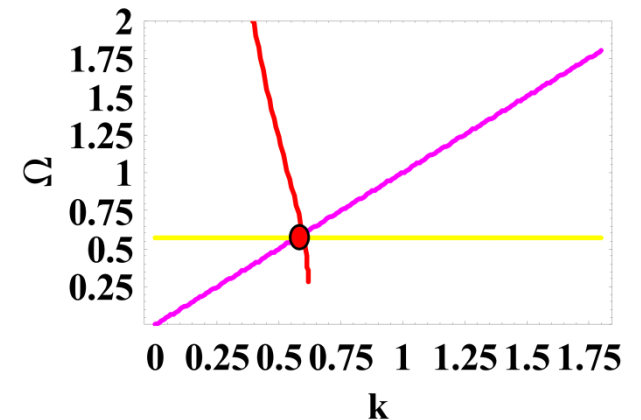


$$H^2 = \frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3c^2} \rho_g + \rho_\phi + \rho_l$$

$$\dot{\rho}_g = -4H\rho_g - \Gamma\rho_g^2$$

$$\dot{\rho}_\phi = -6H\rho_\phi - V - V_0 + \Gamma\rho_g^2 - \Gamma'\rho_\phi$$

$$\dot{\rho}_l = -3H\rho_l + \Gamma'\rho_\phi$$



If $m \approx 1\text{eV}$, $l_* \approx 30(m/1\text{eV})^2 \text{kpc}$.

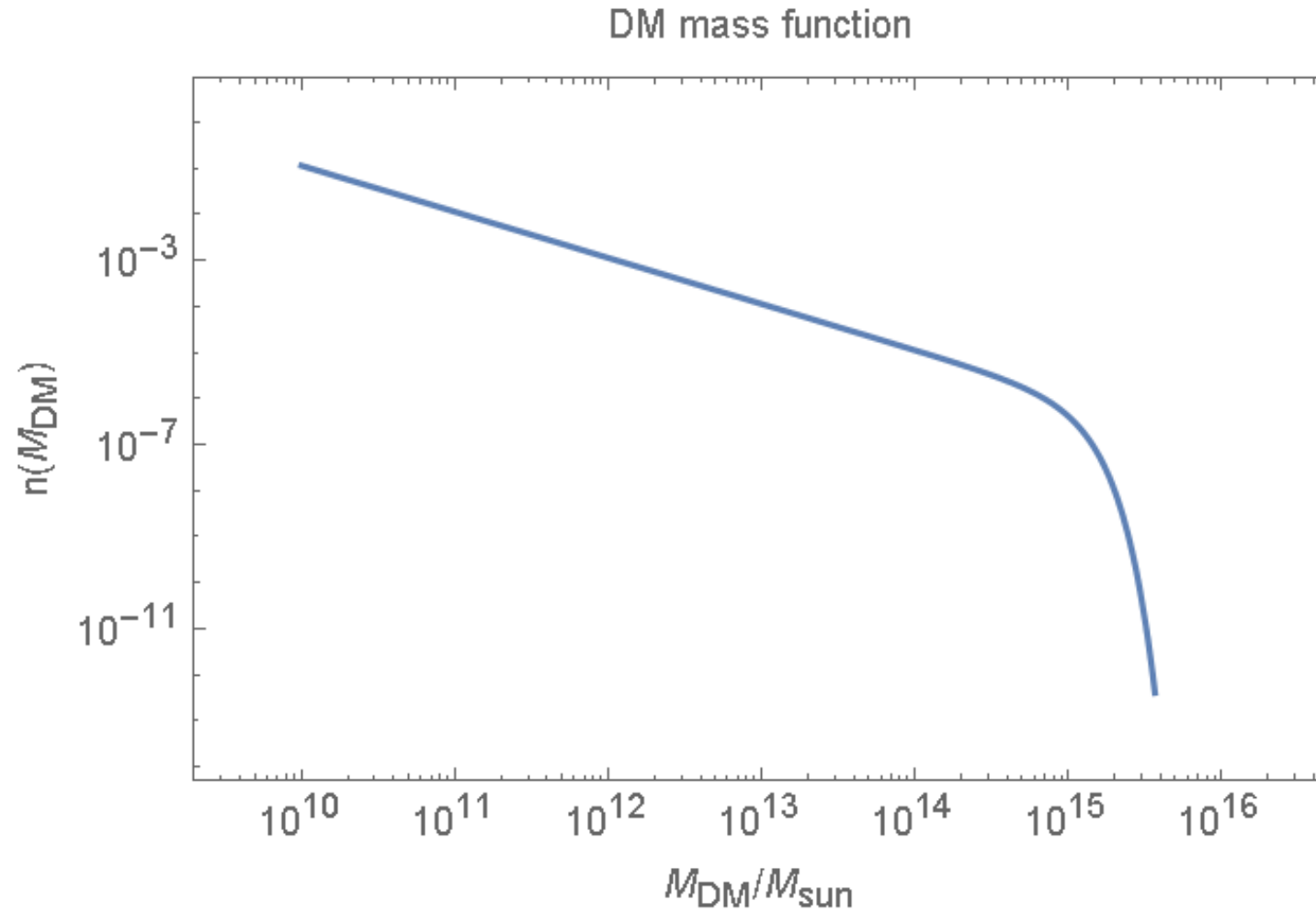
If BEC decays at $z \approx 20$, $M \approx 10^{11} (m/\text{eV})^{-6} M_\odot$

Fukuyama, T., Tatekawa T., and Morikawa, M., 2008, JCAP06, 033

Fukuyama, T., and Morikawa, M., 2009, Phys. Rev. D80, 063520

◆ SMBH mass function

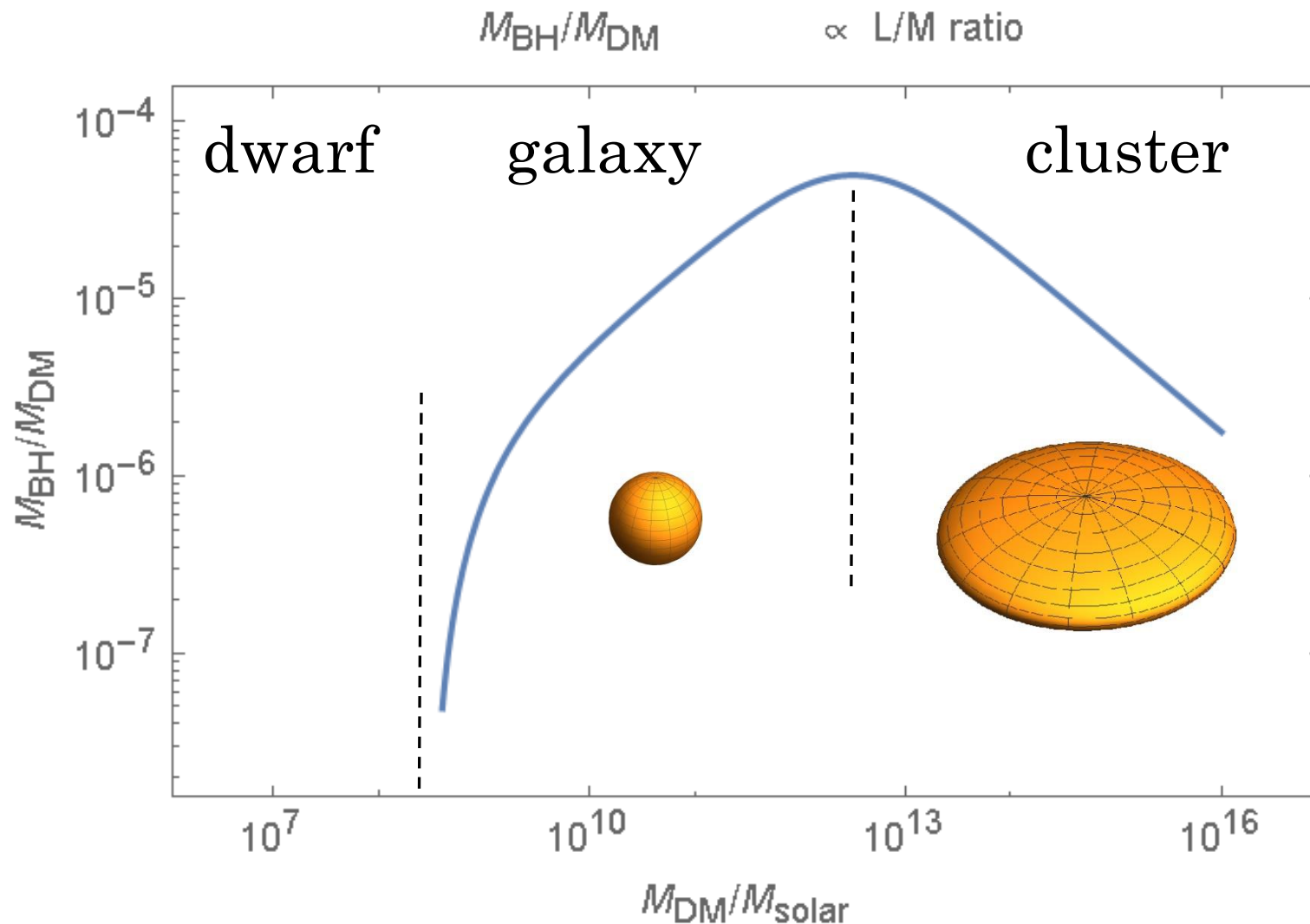
- DM ハロー (Press-Schechter) の中で量子凝縮が進行する



● BH 形成 :

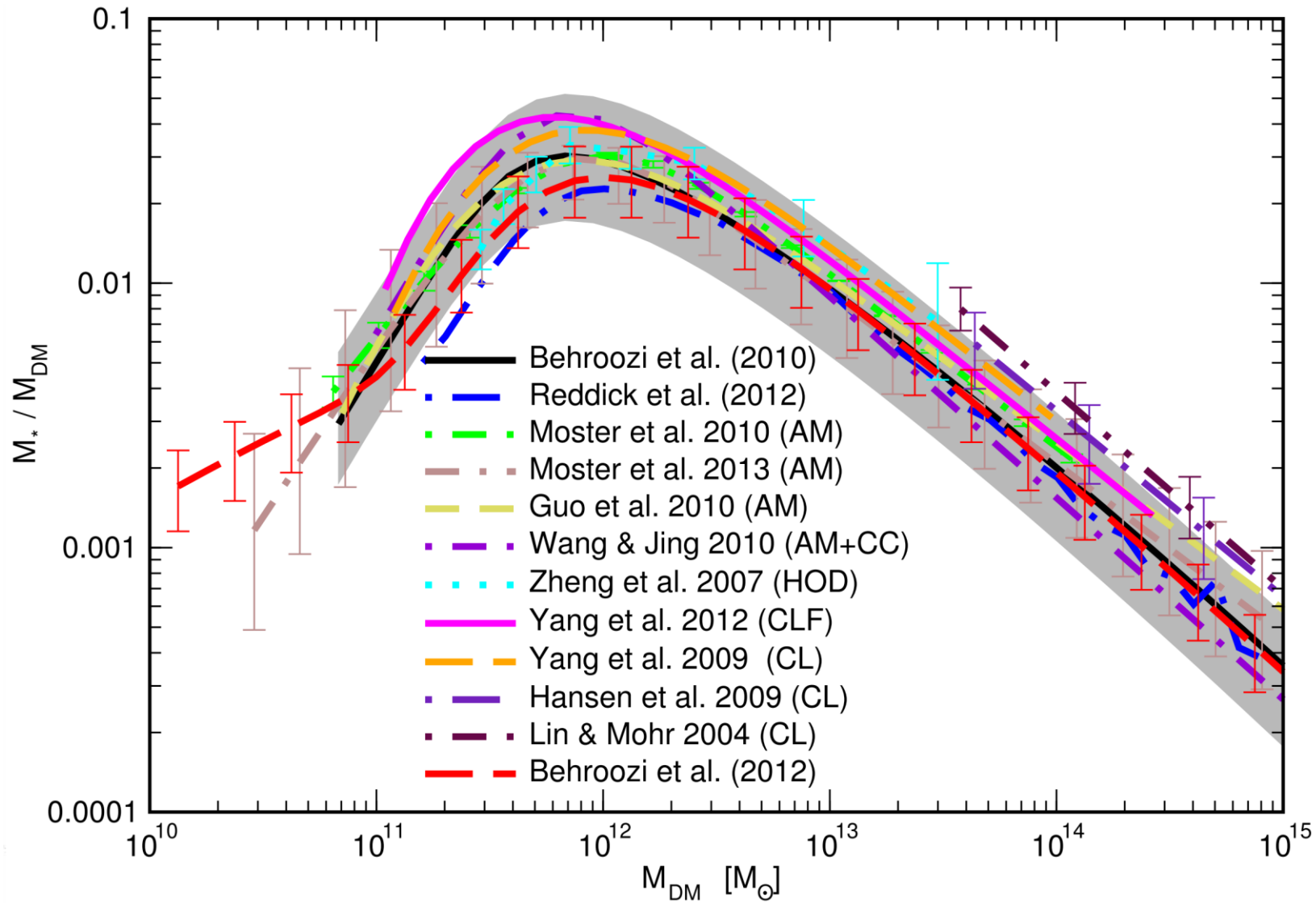
小スケール : 球対称臨界的 $M_{BH} \propto M - M_*^\gamma \quad \gamma = 1.5$

大スケール : パンケーキ的 $M_{BH} \propto M - M_*^{1/3 \gamma}$

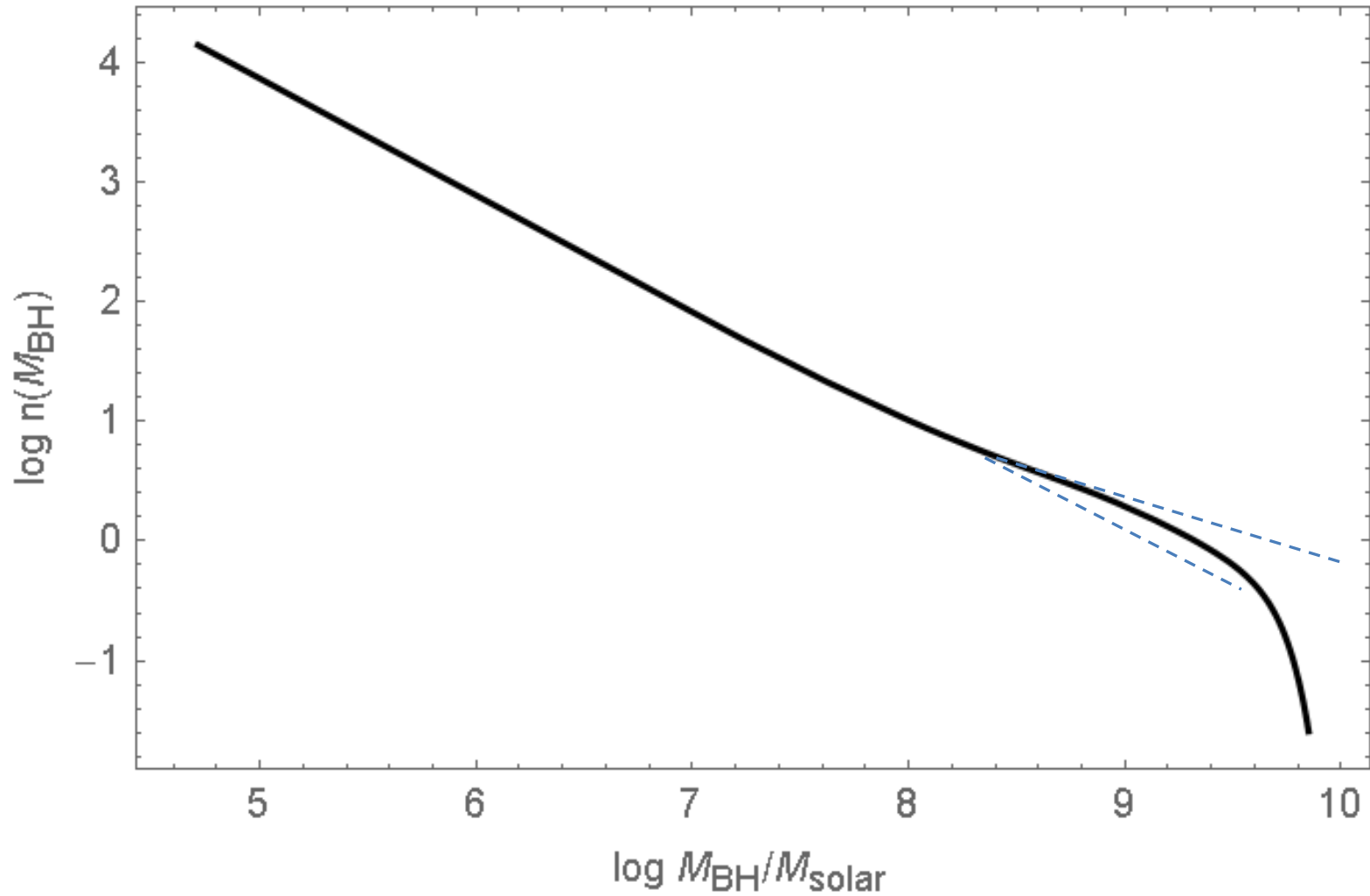


OBS: M_{BH} / M_{DM}

Kormendy & Ho (2013)

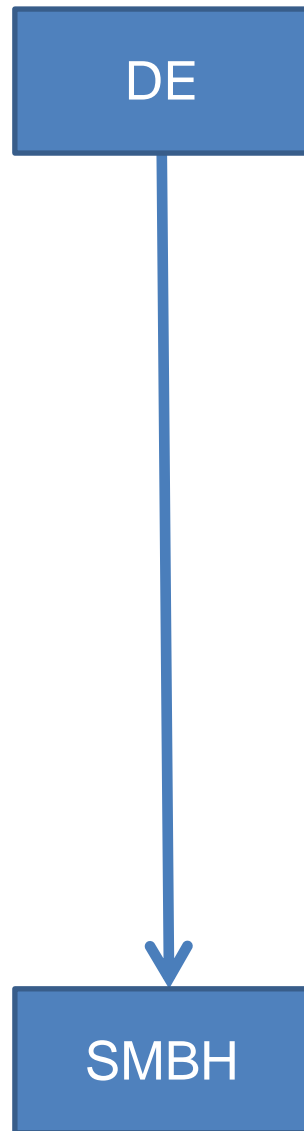


● SMBH mass function 上の組み合わせで
SMBH mass function

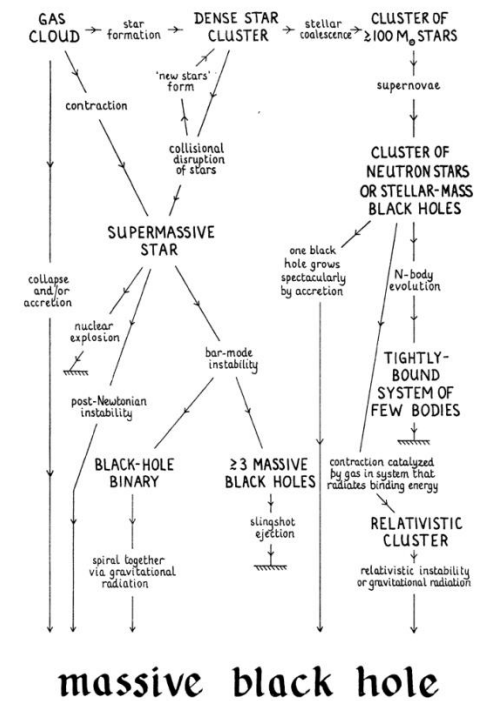


べき + べき + 指数関数減衰

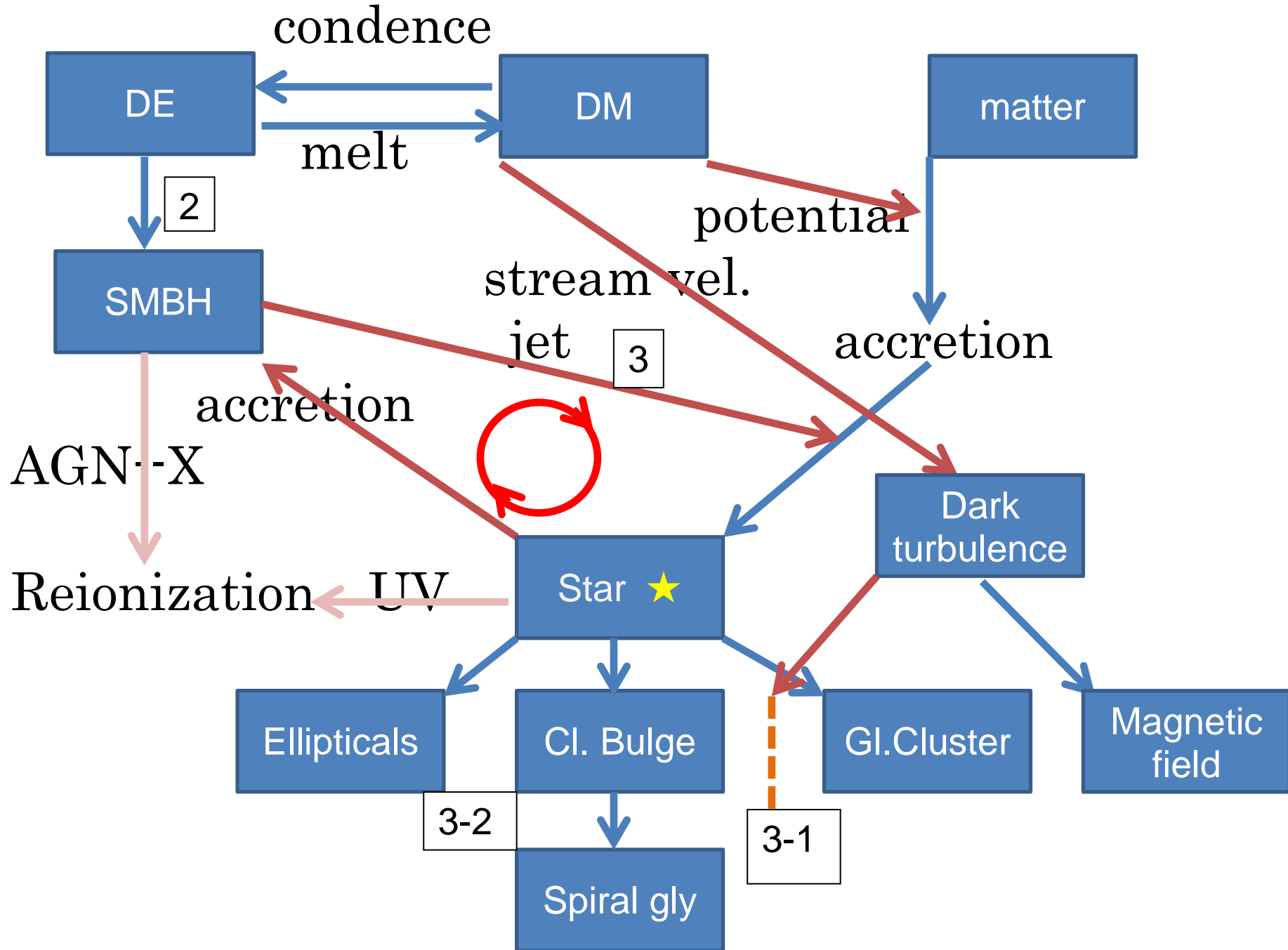
● Updated Rees chart



Rees chart 1978



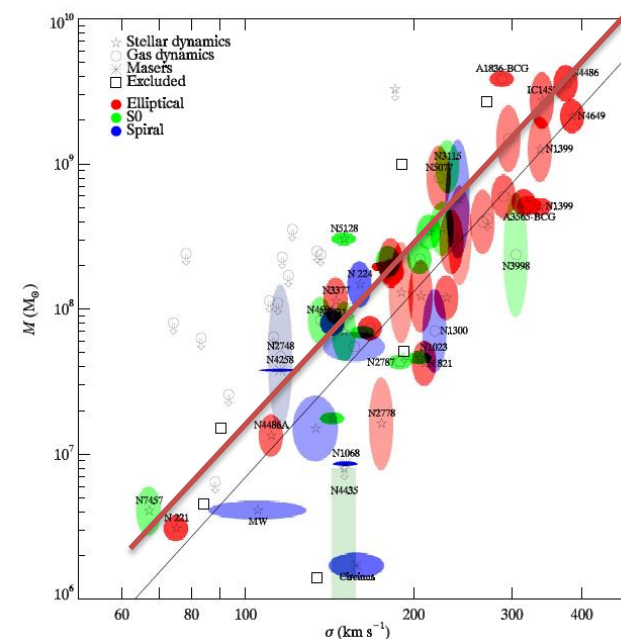
◆ Updated Rees chart - detailed version



- SMBH → jet → 星生成を促進? あるいは
- 星生成を阻害?

Edd. Acc. + バリオン割合 f から (King2003)

$$M_{BH} = \begin{cases} \frac{f\kappa\sigma^4}{4\pi G^2} \propto \sigma^4 & \text{pressure balance} \\ \frac{f\kappa\sigma^5}{4\pi cG^2} \propto \sigma^5 & \text{energy balance} \end{cases}$$



観測から $M_{BH} \propto \sigma^4$

従って、ジェットは星生成を促進するだろう！

3. SMBH が育てる星・銀河

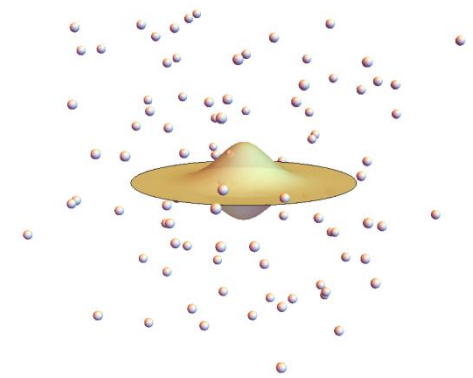
- SMBH ($10^{8-9} M_{\odot}$ @ $z \approx 10$) が初代の星・銀河を作って行く。

- ジェットは落下するバリオンと衝突して星形成する。

初期の古い星(in GC, バルジ, 楕円銀河)はどれも似ている。それらの区別がほとんどないなら同じもの！→ 同一起源だろう。

- (1) Bulge の境界は比較的明確、GC は銀河ハロー内に偏在

➤ 相が違うだけか？



- (2) 楕円銀河と渦巻銀河(特にバルジ部分) は区別できない。

➤ 相が違うだけか？



- 問題：同じ種族で相が違うだけの天体をどう区別して作るか？

3-1 GC と Bulge: 2つの速度を持つガスによって相分離した2種の形態

ジェットの照射にトリガーされて銀河遠方で生成 (GC) したか、近傍で生成 (Bulge) したかの違い。それらを分けるのは2成分の速度場。

- DM による速度

$$v_{vir} \approx 200 \frac{\text{km}}{\text{sec}}$$

$$\varepsilon \approx 0.3 \frac{\text{cm}^3}{\text{sec}^3}$$

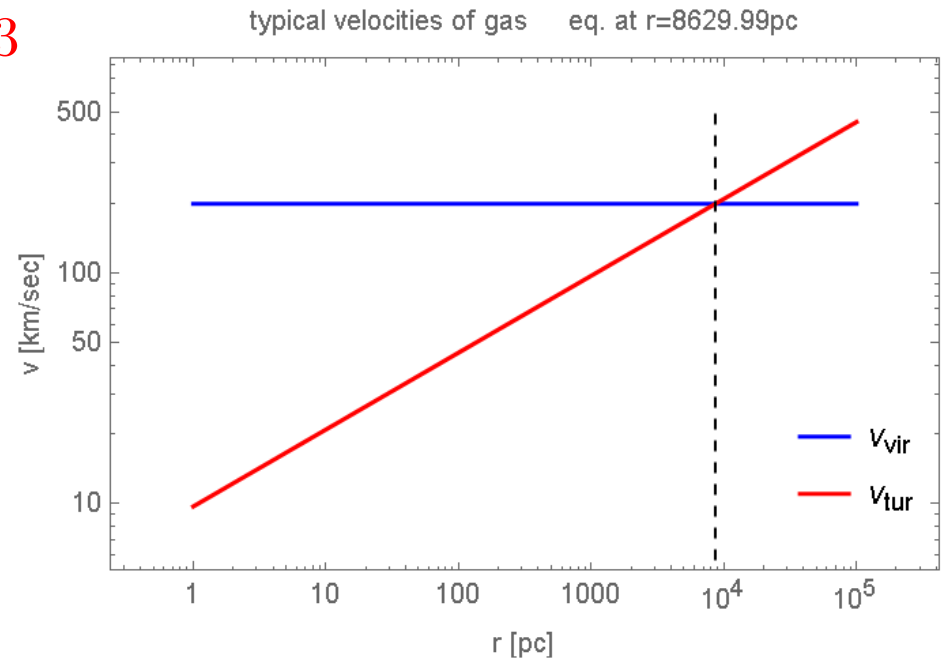
- 乱流による速度

$$v_{tur} \approx (\varepsilon r)^{1/3}$$

Crossover at $r_* \approx 8.6 \text{ kpc}$

内→Bulge, 外→GC

A. Nakamichi and M. Morikawa, JCAP01, 011 (2010).



3-2 渦巻銀河と楕円銀河: ジェットの強さによって相分離した2種の形態

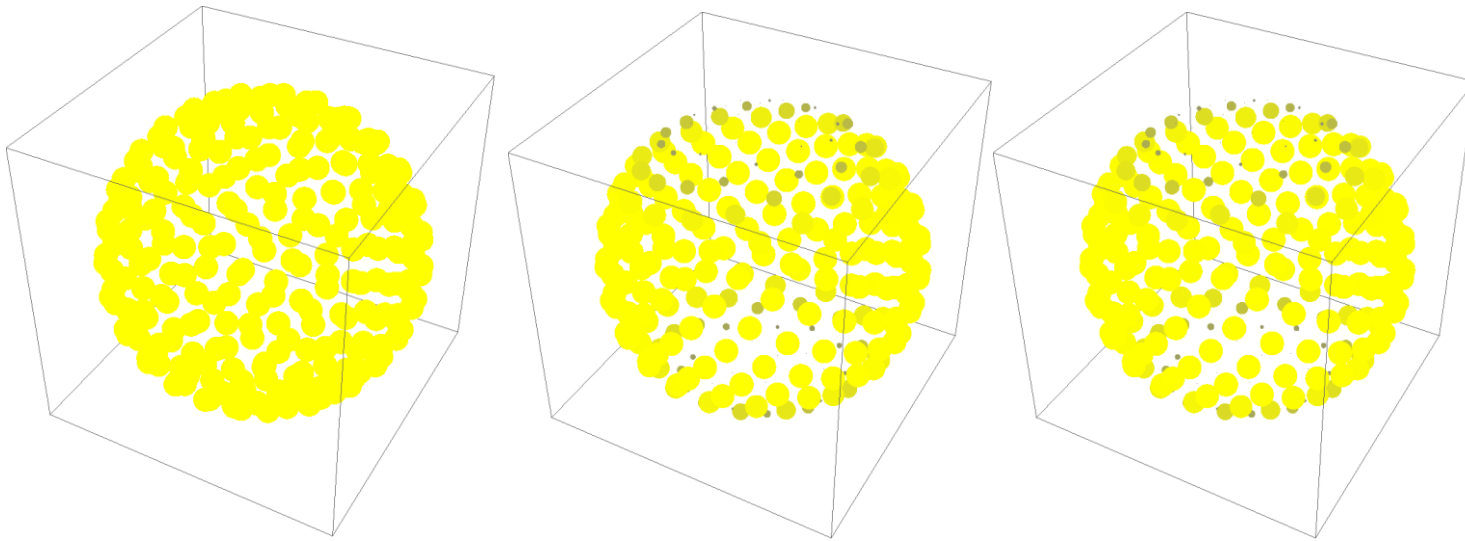
● モデル:

- 全天の方位 i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) にあるガスの量 G_i がジェット \vec{J} に照射されて確率 μ で星形成を起こし、中心に落下する。
- 一部(割合 λ) が BH にトルクを与えジェットの方向を変える
- 新たなガスが星形成&落下トルク

$$\begin{aligned} \dot{G}_i &= -\mu |\vec{J} \cdot \vec{n}_i| G_i \\ \dot{\vec{J}} &= -\lambda \vec{J} \times \sum_i \dot{G}_i \end{aligned}$$

- 2つの場合が考えられる:

(1) ジェットが弱い場合：[jetflippingSpiral.avi](#)



- 極方向の付近のガスだけが星形成して落下：小さなバルジを作る
- 赤道方向の冷たいガスは残り、そのうち薄い円盤を作る。

→渦巻銀河になる

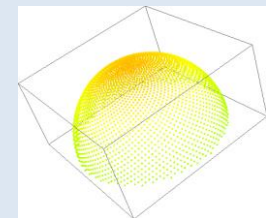
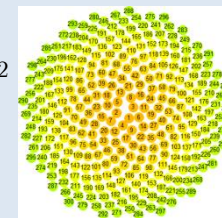
$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{5} + 1 = 1.61803\dots$$

$$\beta = \frac{2\pi}{1 + \alpha}, \gamma = \beta i$$

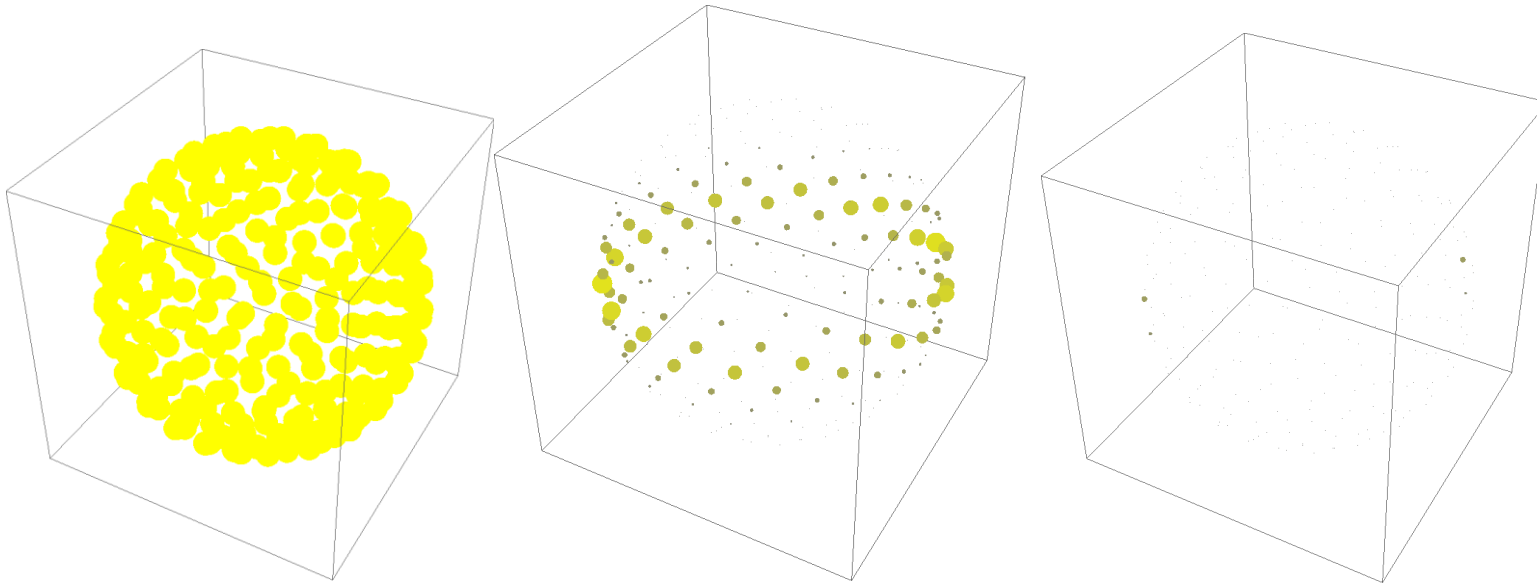
$$c = 1 - 2 \left(\frac{i}{i_{total}} \right), s = 1 - c^2{}^{1/2}$$

$$\vec{n}_i = s \sin \gamma, s \cos \gamma, c$$

ひまわり座標



(2) ジェットが強い場合：[jetflippingElliptical.avi](#)



- 全方向のすべてのガスが星形成して落下：大きなバルジを作る（ガスが残らず（あっても熱い）、全体がバルジ）
- 円盤も腕もできない。→楕円銀河になる

【つまり】

- 強いジェットは激動(暴走)して、ガスは残らない→楕円銀河
- 弱いジェットは小さな歳差運動、赤道にガス残存→渦巻銀河

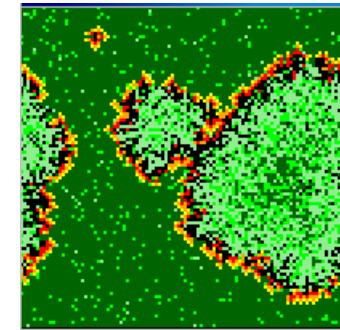
◆ 【背景にある物理】 パーコレーション相転移

- ジェットやガスの量によってコントロールされる相転移。
 - ジェットが大きい→ジェットの暴走→ガス全消費
(*i. e.* 正のフィードバック)
 - ジェットが小さい→正のフィードバック無→ガス残る

● 森林火災モデル http://www.iba.t.u-tokyo.ac.jp/software/Swarm_Software/forest_fire.html

CA ルール 格子上に木を植える。各時間ステップごとに以下の規則で進む。

1. 更地には確率 p_1 で木が生える
2. 木は確率 p_2 で発火
3. 発火した木に隣接する木は確率 p_3 で延焼する
4. 木が燃えたら更地になる



→結果は

Bak, P., and Tang, C., 1990, Phys. Lett. A 147, 297

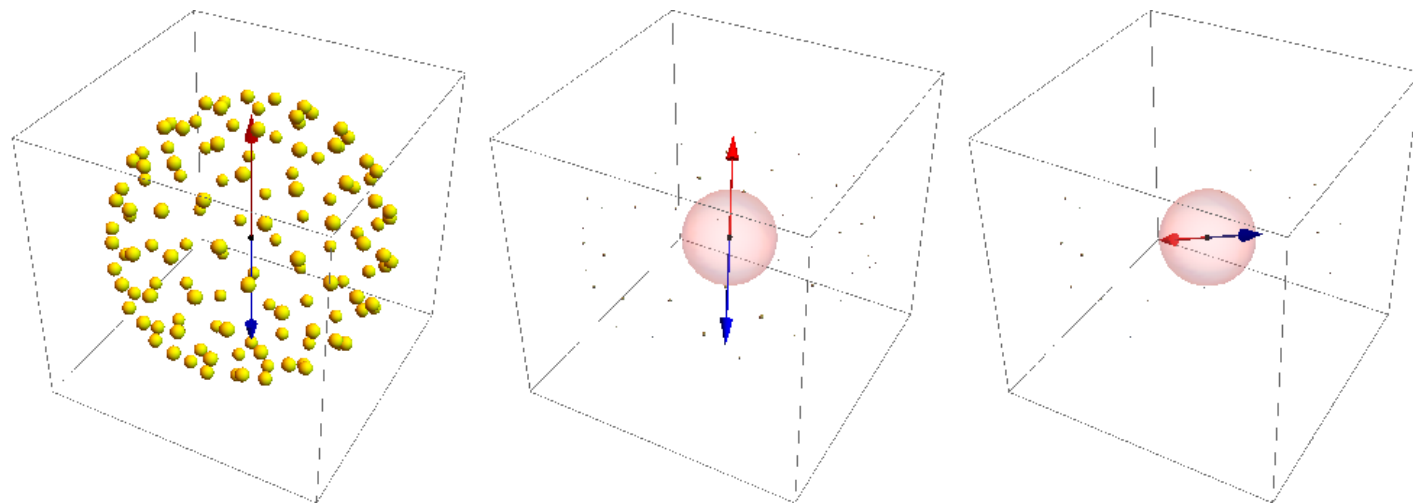
森が全焼する (パーコレート・暴走)

延焼が食い止められる

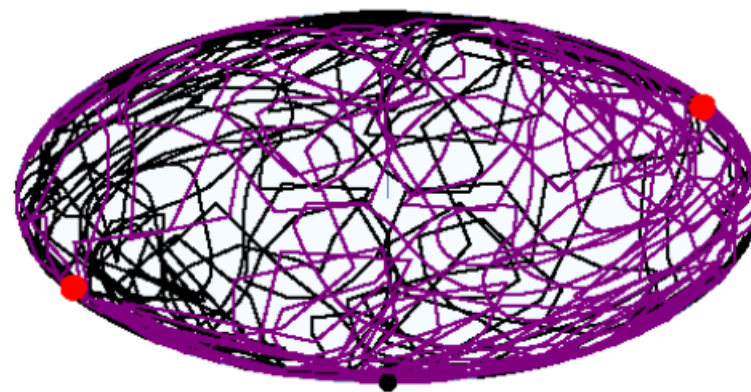
のどちらか

◆ 2つの種族

1) 降着率 λ が大きいと

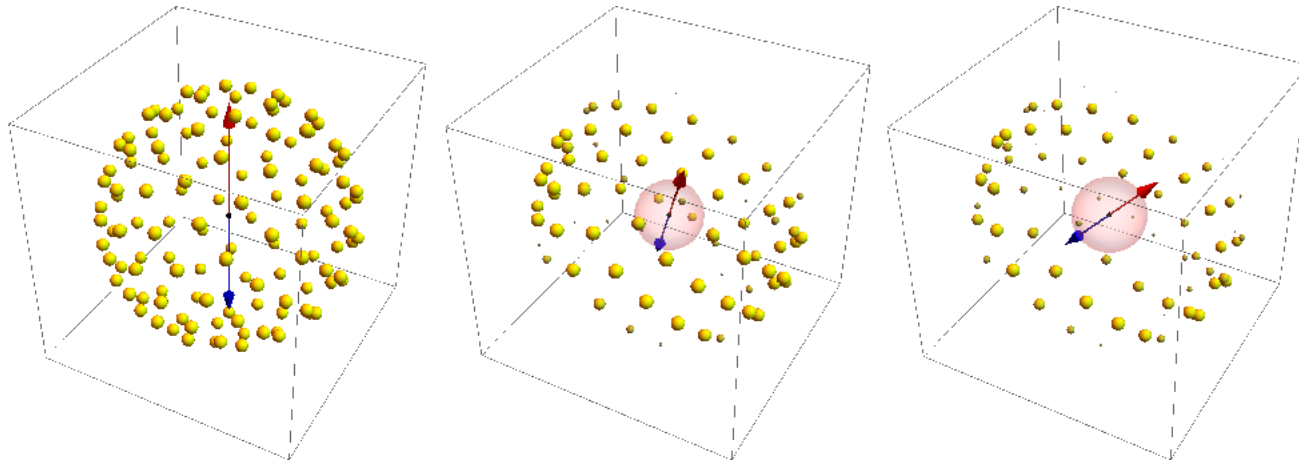


楕円銀河ができる



ジェット軌跡

2) 降着率 λ が小さいと

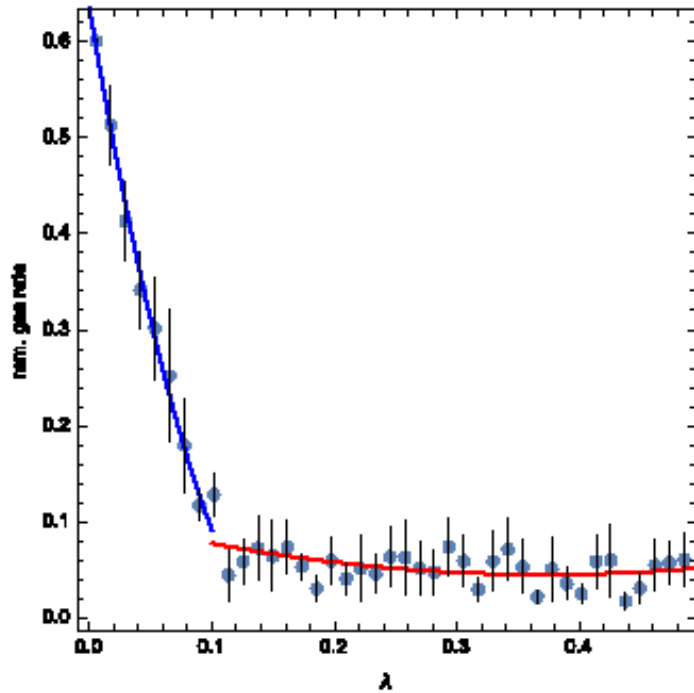


(ガスが輪状に残って) 渦巻銀河ができる。

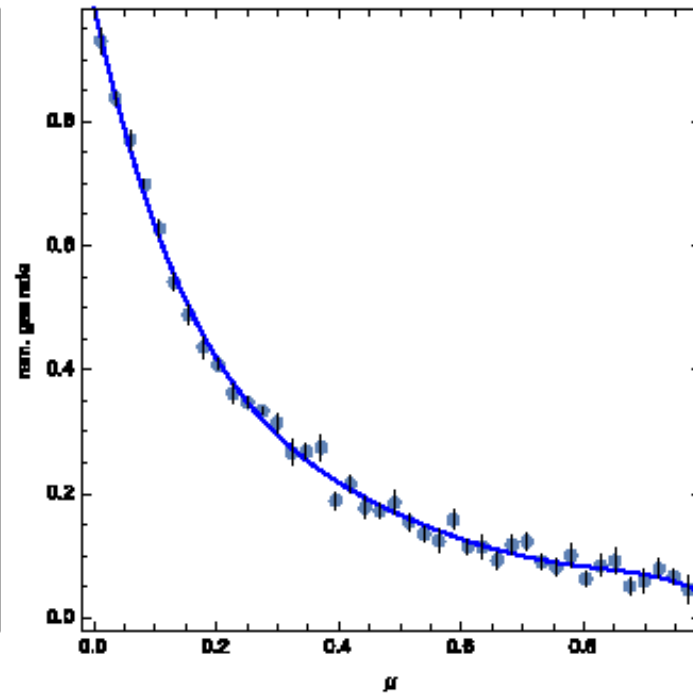
ジェット軌跡



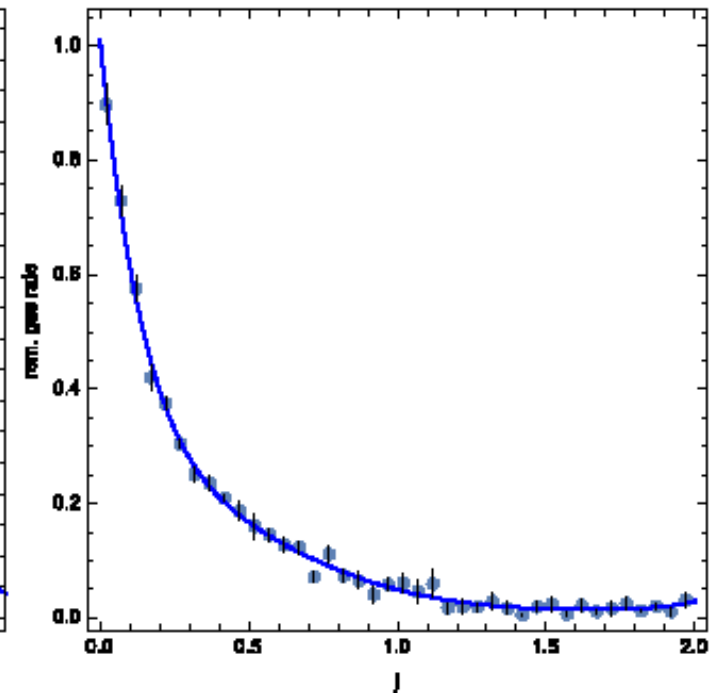
◆ どのパラメーターが重要か？



降着率 λ



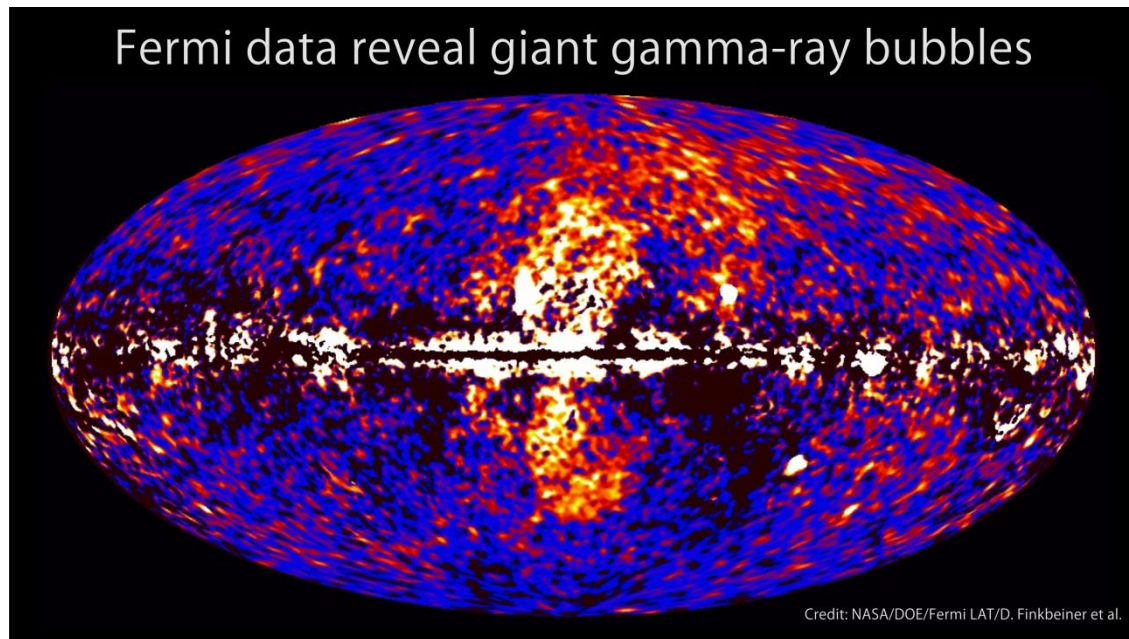
星生成率 μ



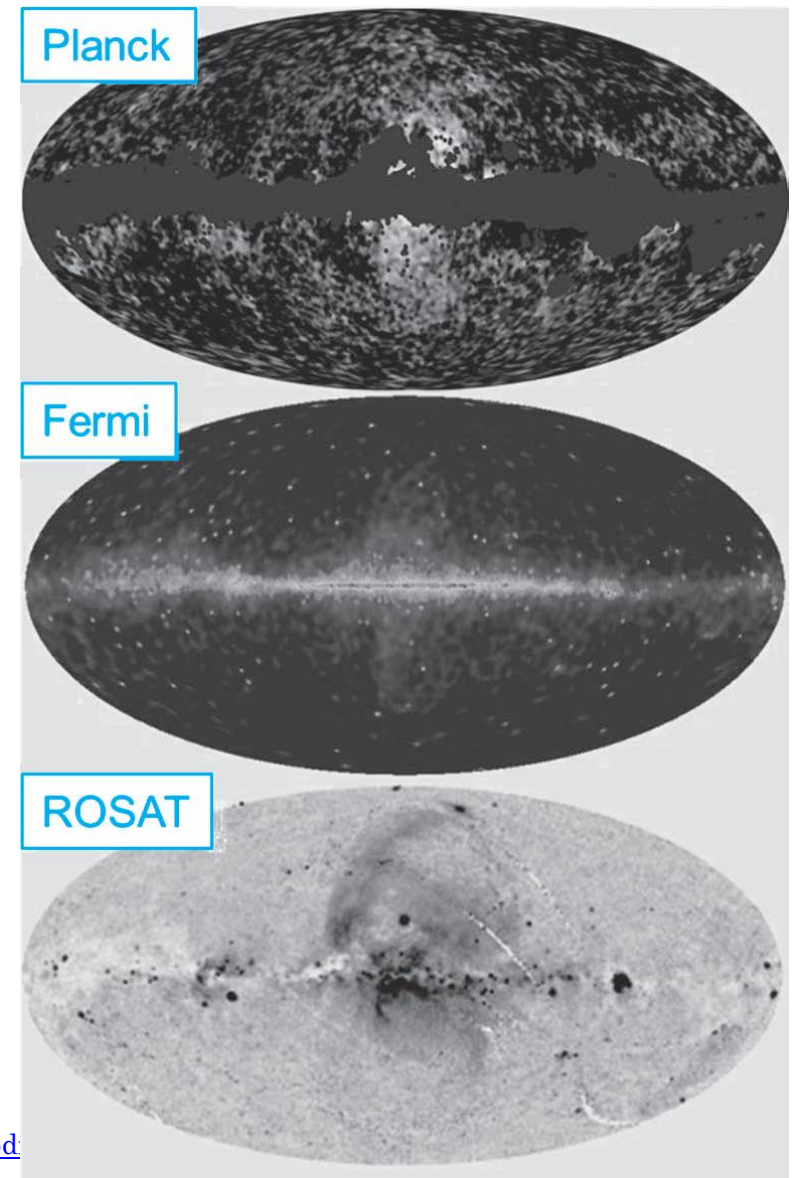
ジェットの強さ J

降着率 λ が、相転移の重要な秩序変数らしい。

◆ (近代の jet 活動の) 痕跡? cf) Fermi bubble in the Galaxy



http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/new-structure.html



Radio lobe in other galaxies

近代の活動ジェット &
星形成の痕跡?

www.spxg-lab.phys.waseda.ac.jp/paper/2012_Kataoka_ASJ.pdf

cf) SgnA* 銀河中心領域 ?

4. まとめ 結論と展望

【結論】 銀河形成のシナリオ (案)

DE 場の崩壊 → SMBH 形成 → Jet(Outflow) →

→ 星形成 {
→ GC/Bulge 要素形成
速度場の 2 階層構造から
→ Sp/Ell 銀河形成
パーコレーション相転移

【コメント】 基本的な問題

1. なぜ $z=7$ で SMBH が急成長? → *DE* 場シナリオでは自然
 2. 銀河中心で SMBH バイナリがあまりないのはなぜか?
→ *BH* の合体でないから
 3. 銀河中心をはずれた SMBH がなぜないのか?
→ *SMBH* が周りに銀河を作るから
 4. SMBH の無い(と推測される)銀河がなぜ少ないのか?
→ *SMBH* が顕著な銀河を作るので
 5. 銀河からはじき出された裸の SMBH がなぜ見つからないのか? → *SMBH* は必ず周囲に星の集団を作るから
- Pop III stars/DC/共進化/「sp.から ell.」... 要再考?

Updated Rees chart - detailed version

