

中間質量ブラックホールからの重力波

理化学研究所 真貝寿明
hshinkai@riken.jp

in collaboration with

理化学研究所 戎崎俊一
東工大地惑D2/理研 松林達史

OUTLINE

- 中間質量ブラックホールの発見と，大質量ブラックホールの形成シナリオ
- 中間質量ブラックホールからの重力波
[M. Coleman Miller, ApJ 581, 438 (2002)]
- 大質量ブラックホールの形成プロセスを決める重力波

中間質量ブラックホール (Intermediate-mass BH, IMBH) の発見

- 近年まで，見つかっていた BH の質量は，両極端のものだった．

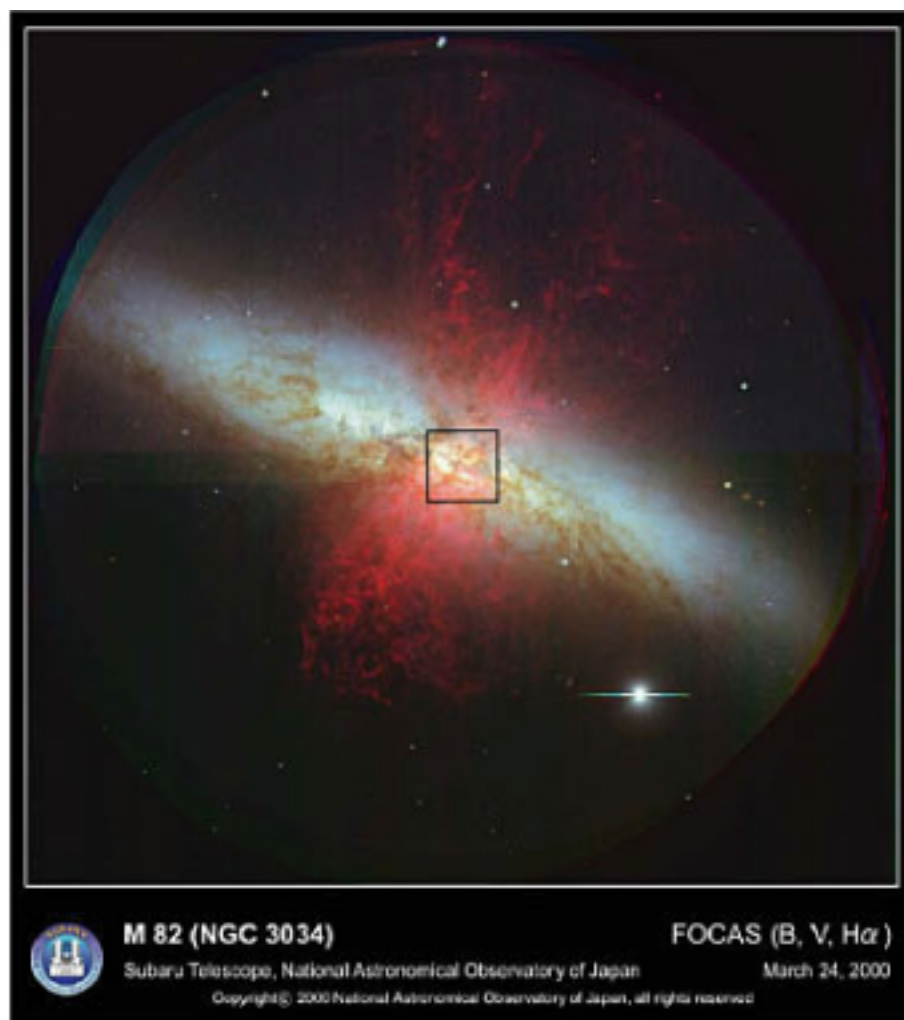
stellar mass BHs	$1 \sim 10 M_{\odot}$	銀河系内全体に分布
super-massive BHs (SMBHs)	$10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$	銀河の中心

- しかし最近，starburst galaxy M82 において，

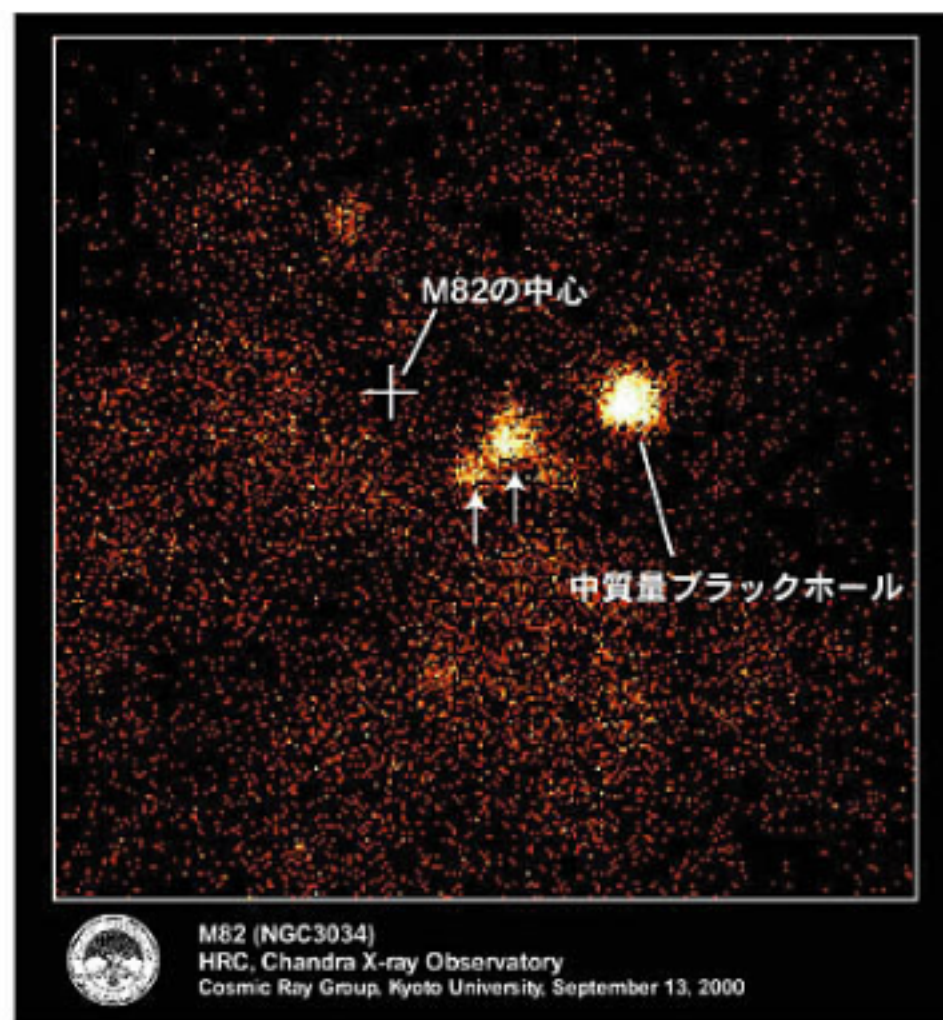
- (1) 「Chandra」X線観測
Matsumoto et al ApJ 547 (2001) L25
9個の明るい点源の存在を発見
銀河中心から 200pc離れている所
明るさから $M_{BH} \geq 700 M_{\odot}$
- (2) 「すばる」赤外線観測
Iwamuro et al
多くの星団候補を発見
X線源の多くは星団候補と重なる

- したがって，

Intermediate-mass BHs (IMBHs) $\sim 10^3 M_{\odot}$ 球状星団中

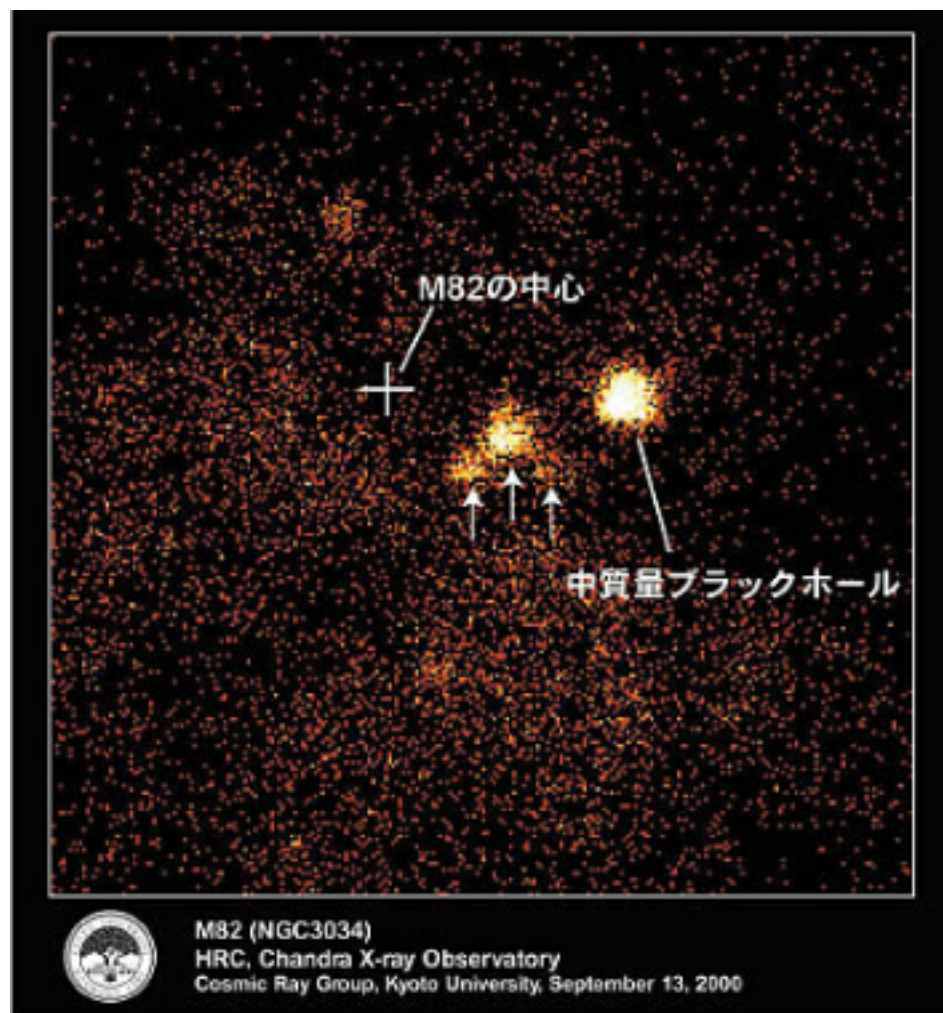


“すばる”望遠鏡に取り付けた微光天体分光撮像装置 FOCAS で得られたおおくま座の不規則銀河 M82 の写真 (国立天文台提供)。スターバスト現象に伴う大量の超新星爆発によって高温に電離されたガスが、銀河から放出されている (写真の赤い部分)



アメリカの X 線天文衛星 “チャンドラ” を用いて共同研究チームが撮影した M82 の中心領域 (左図の四角で囲まれた領域) の X 線写真。最も明るく光っている X 線星が、今回、新たに発見した中質量ブラックホールである。矢印は同時に発見したやや小型のブラックホールを示している。M82 の中心は X 線で非常に暗いこと、中質量ブラックホールは M82 の中心から外れていることに注意。M82 の中心から中質量ブラックホールまでの距離は約 500 光年である。

図 1 : 爆発的星形成銀河 M82 の可視光画像と X 線画像



アメリカのX線天文衛星“チャンドラ”を用いて共同研究チームが撮影したM82の中心領域（図4左の四角で囲まれた領域）のX線写真（提供：京都大学・鶴助教授）。最も明るく光っているX線星が、今回、新たに発見した中質量ブラックホールである。矢印は同時に発見したやや小型のブラックホールを示している。M82の中心はX線で非常に暗いこと、中質量ブラックホールはM82の中心から外れていることに注意。M82の中心から中質量ブラックホールまでの距離は約500光年である。

“すばる”望遠鏡とCISCO観測装置を用いて共同研究チームが撮影したM82の赤外線写真（提供：京都大学・岩室史英助手）。十字は、この観測によって検出された星団を示している。この観測により中質量ブラックホールが存在していると考えられる星団が検出された。

図2：中質量ブラックホールが星団に属していることがわかった

巨大ブラックホール (Super-massive BH) 形成シナリオへの足がかり か？

- 70年代より , 2つのSMBH形成シナリオ . [Rees, 1978]
 - (1) 巨大分子雲の収縮 重力不安定により , 一気にSMBHをつくる
 - (2) 星どうしの合体 密度の高い星団が形成 , それらが進化してSMBHへ
- どちらのシナリオも問題点を抱えていた .
 - (1) 一般に困難 . 途中で円盤状になって分裂
初期にガス雲が球対称かつ角運動量ゼロならOK
 - (2) 初期条件として大質量でコンパクトな星団必要
- が , 若くて密な星団の存在 と IMBHsの発見により , (2) の現実性が高まった .

“Missing link found?”

Ebisuzaki, Makino, Tsuru, Funato, Portegies Zwart, Hut, McMillan, Matsushita, Matsumoto, & Kawabe, ApJ 562 (2001) L19

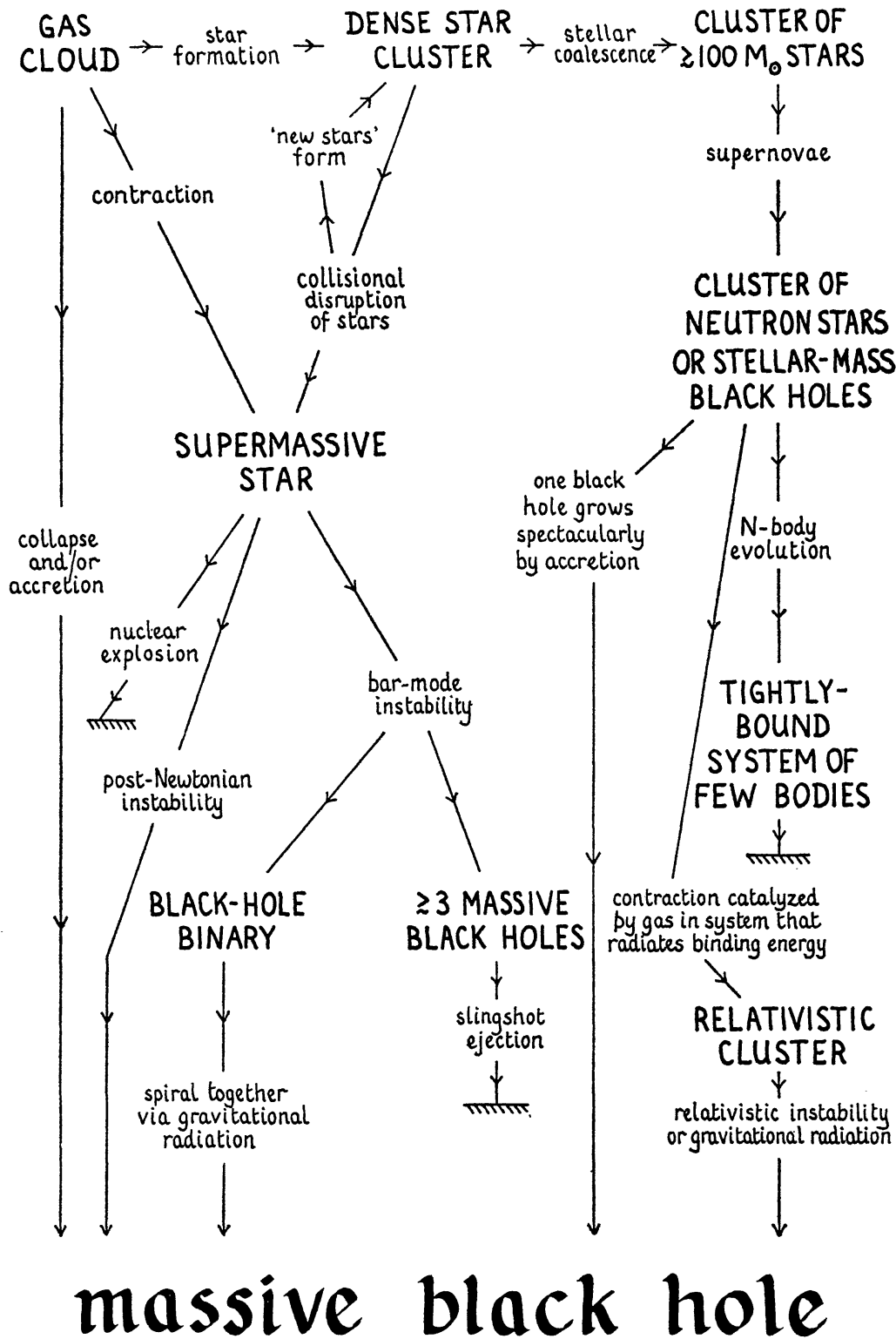


FIG. 2

Possible modes of formation of a massive black hole in a galactic nucleus.

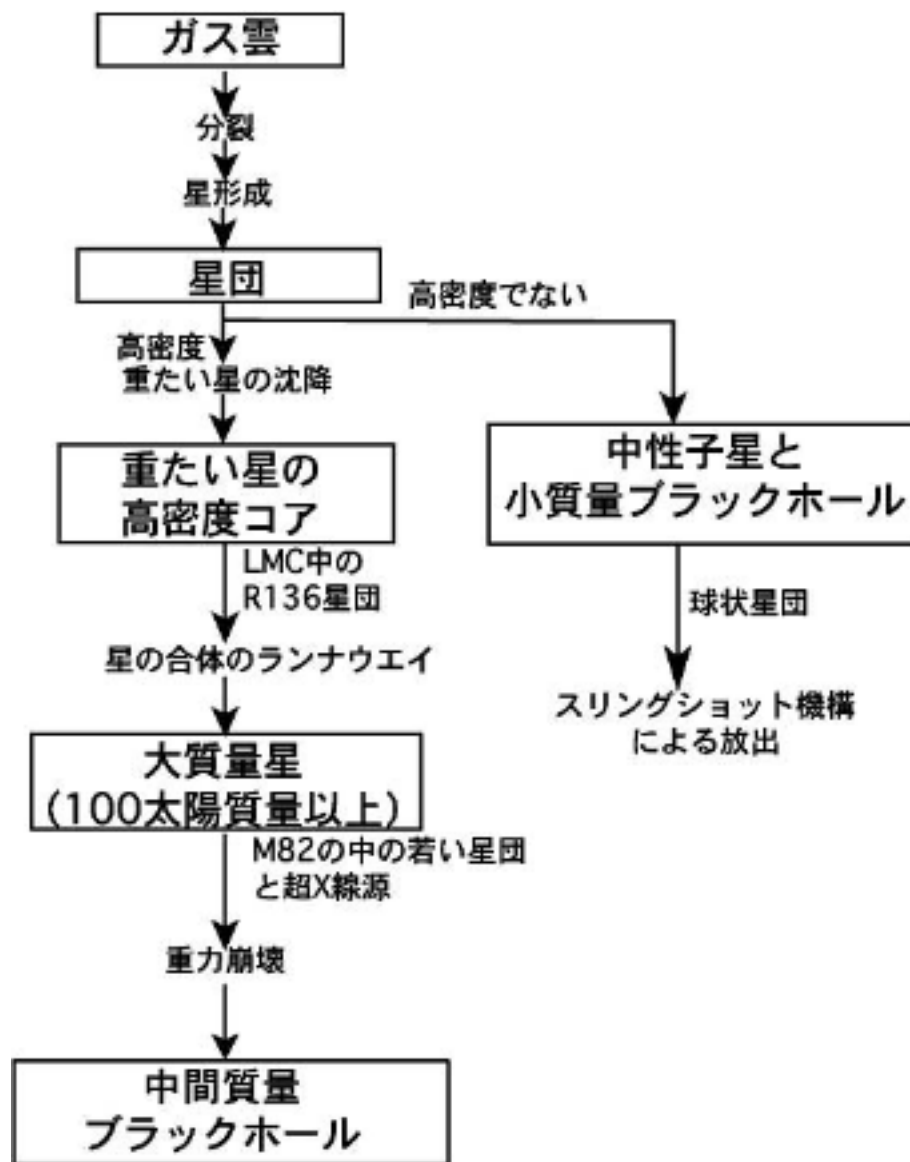


図5：高密度星団における中質量ブラックホール

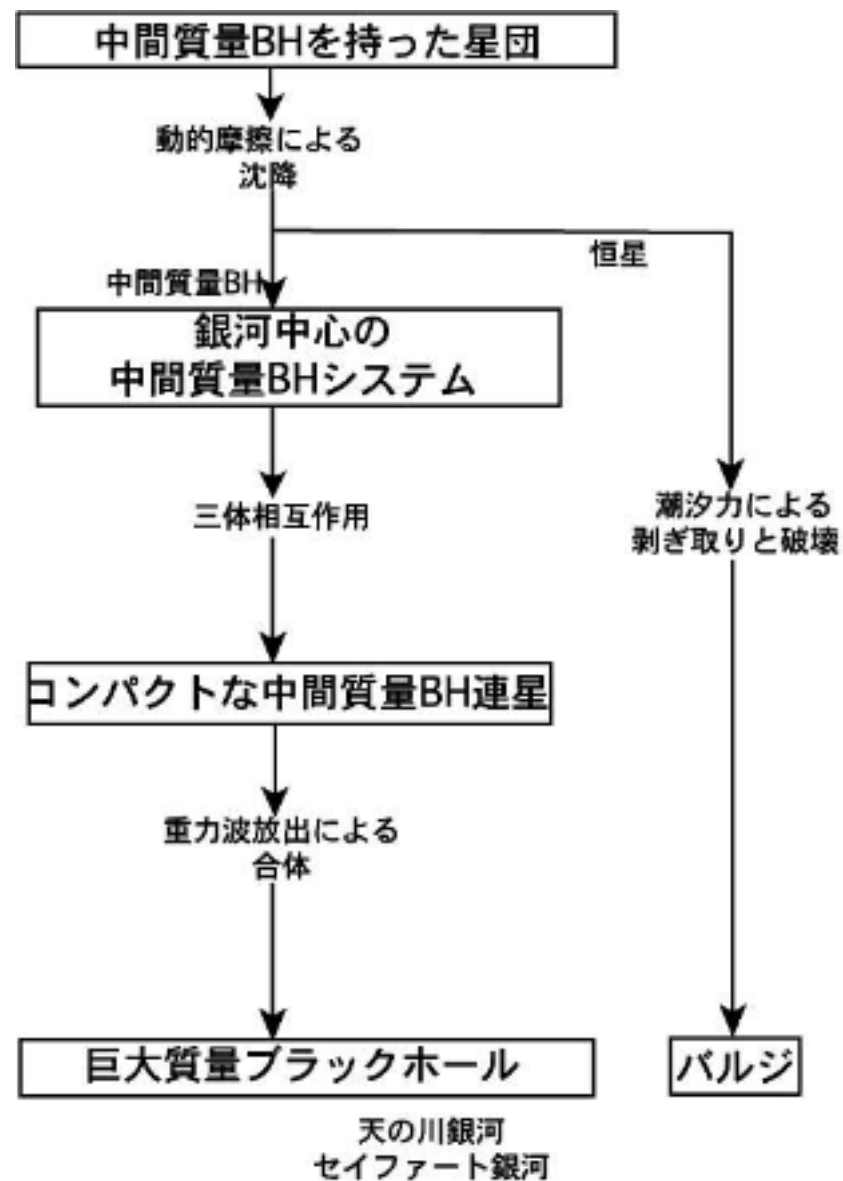
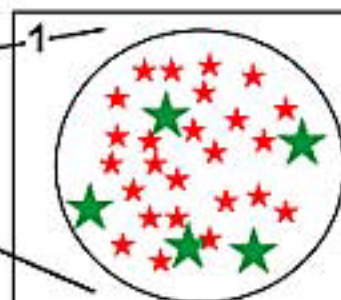
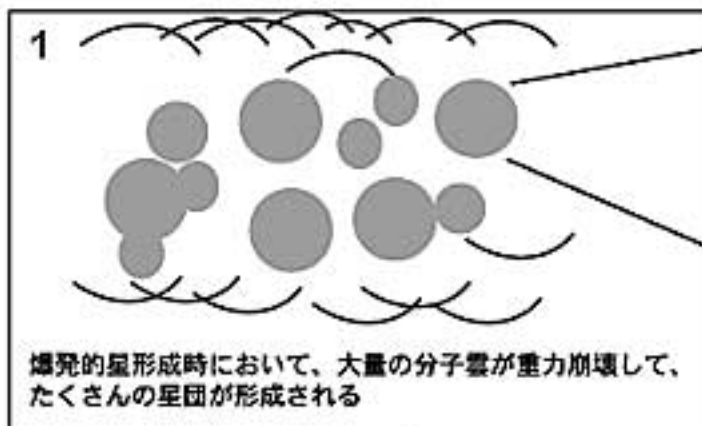


図6：銀河中心における巨大ブラックホール形成



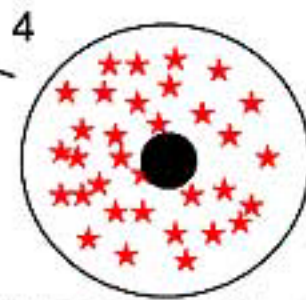
星団が形成される



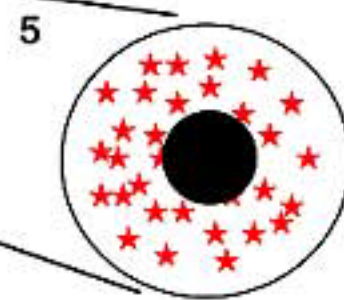
大質量の星が、中心に落下する



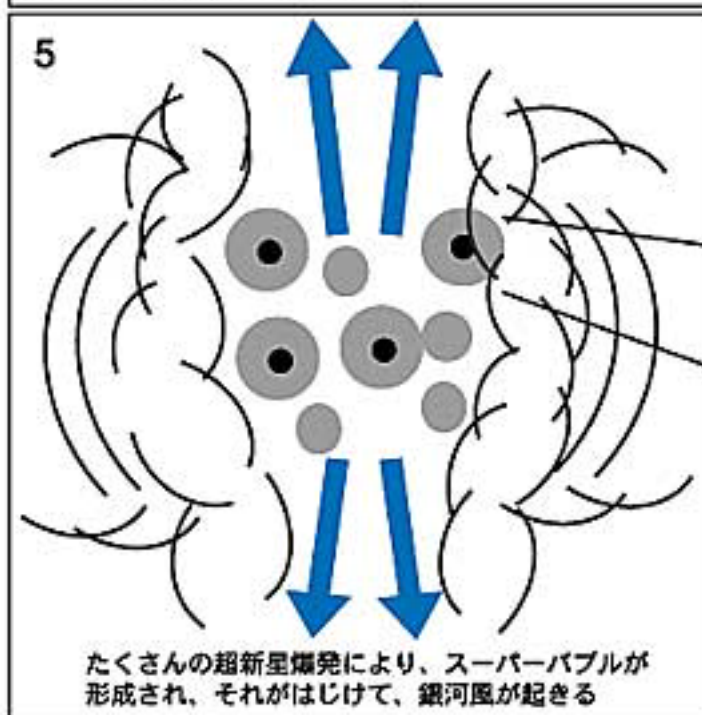
大質量星の合体により、
超大質量星が形成される



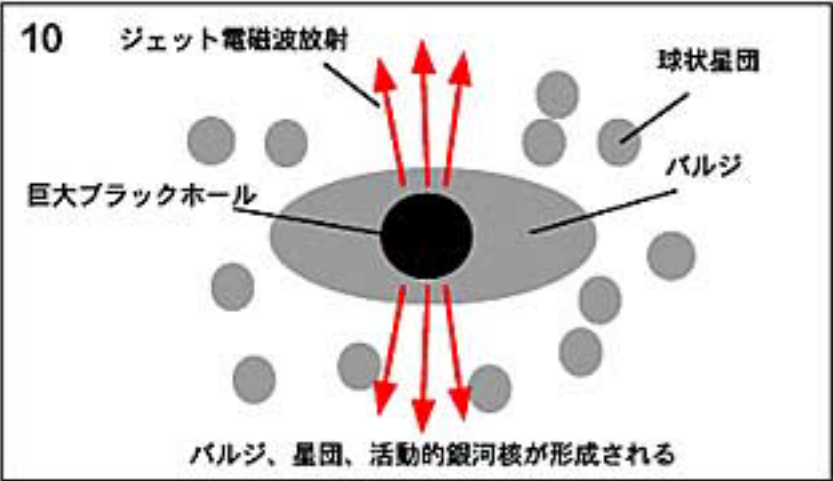
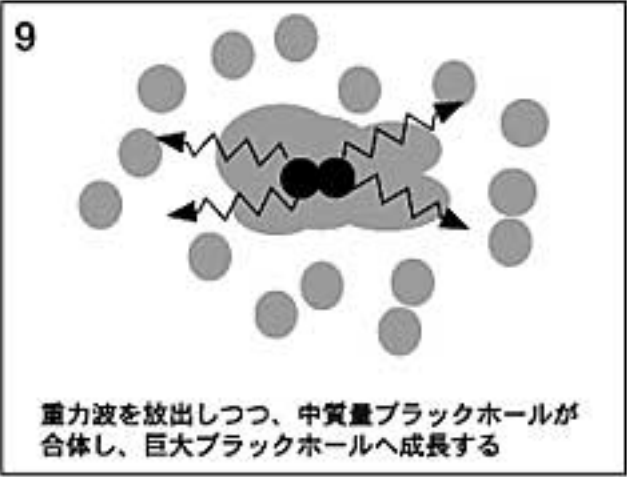
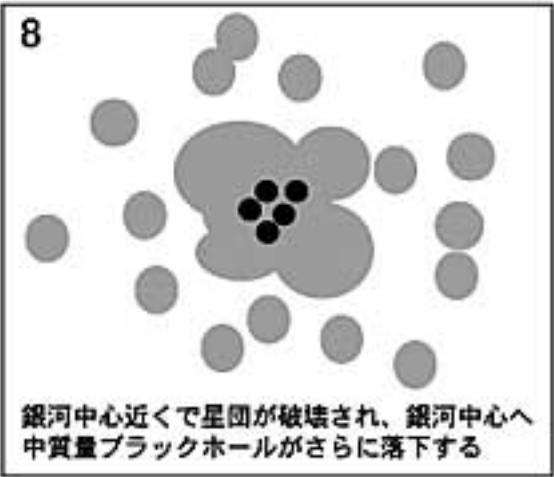
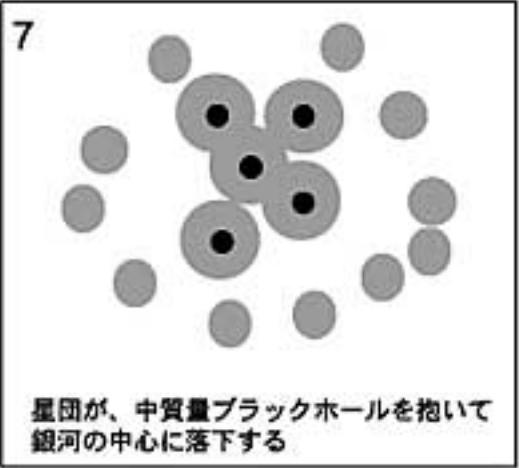
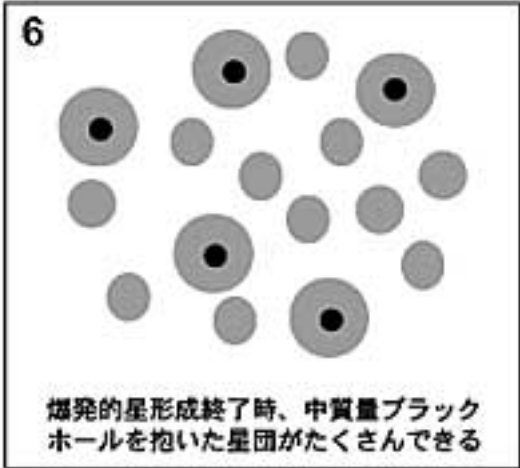
超大質量星が重力崩壊して、
中質量ブラックホールが誕生する



星やガスが降着して、中質量
ブラックホールが成長する



(説明図2)



Is a Missing Link Really Found? —

シナリオの検証

1. IMBHs は、本当にできるのか？

- 星団内でIMBHs ができるためには、個々の大質量星が新星爆発してしまう前に合体 (core collapse) する必要がある。
- 銀河は、重力散乱による緩和時間が宇宙年齢よりも長いいため、当初、IMBHs 形成は疑問視されていた。

しかし、最近の数値シミュレーションにより、

- 緩和される前に、力学的摩擦が効いて、大きな星ほど頻繁に衝突を起こし、最後は merging instability / runaway growth となる。～ $200M_{\odot}$ の星へ成長
(Portegies Zwart-Makino-McMillan-Hut, AA, 348 (1999) 117)
(Portegies Zwart-McMillan, ApJ, 576 (2002) 899)
- $30 \sim 50M_{\odot}$ のBHがあれば 飛散せず、3体遭遇効果によって IMBHへ成長
(Miller-Hamilton, MNRAS, 330, 232 (2002))
- $50M_{\odot}$ のBHが $10^5 M_{\odot}$ のcluster中にあると、 $10^3 M_{\odot}$ まで直ちに成長
(Marchant-Shapiro, ApJ, 239, 685 (1980))

2. 星団は銀河中心へ沈降していくことができるのか？

銀河の中心領域では，潮汐力によって星団は壊れやすくなる．また，星団内の超新星爆発による質量損失もある．

- 質量損失モデルに依存するが，現実的なモデルでは星団は力学的摩擦によって銀河中心へ沈降．M82モデルで，中心から 200 pcの星団は 10^8 yr (松林，修論2002)

3. IMBHs の合体によって SMBH は形成されるのか？

銀河の中心に集まった IMBHs の合体は，重力波放出に依る．そのためには，IMBHs どうしが十分に接近・密集しなければならない。

考慮すべき要素は，

- 熱力学的緩和や星の輻射による「蒸発効果」
- 「3体散乱」によって「弾き飛ばされる or 2体の合体が早くなる」
- 合体するものの数が減ることによる「Loss cone 効果」
- 「力学的摩擦」による軌道のdecay
- 「重力波放出」による合体

多くは不明のまま，将来の数値シミュレーションを待たなければならない．

Gravitational Radiation from IMBHs

M. Coleman Miller, ApJ 581, 438 (2002)

- Dense Stellar Clusters からの重力波は，LISA/advanced LIGO に，**有望な重力波源**。

(1)	$10^3 M_{\odot}$ plus M_{\odot}	inspiral*	数~数十 / yr	at LIGO 2	(要spin依存性調査)
		merger	数 / 10 yr	at LIGO 2	(要spin依存性調査)
(2)	M_{\odot} plus M_{\odot}	merger	数 / yr	at LIGO 2	
(1)+(2)			数十 / 5 yr	at LISA	(銀河近傍の球状星団から)

* **inspiral**

- 質量比や軌道の離心率依存性は「merger timeが長い($> 10^6$ yr)から」と切り捨て。
- 離心率は熱分布，合体までの時間はPoisson分布を仮定。
- 重力波源がIMBHであれば，Virgo clusterまで確実にS/Nが5-10以上。
- 近日点移動，Lense-Thirring効果(回転体が引き起こす慣性系のひきずりによる軌道面の変化)，orbital freq.の変化の3つを長期間(10年)追えば，**Virgo clusterまでの距離を重力波のみで特定可能**。あるいはopticalな距離測定と組み合わせれば，これらの測定精度が向上。

* **merger**

- Flanagan-Hughes 1998 (PRD 57,4535/4566)の公式を使用。
- 検出効率，球状星団の数密度 n_{GC} ，質量 M のBHに合体する小天体の率 $\nu(M)$ ，星団内のBHの質量分布関数 $f(M)$ を仮定。

不確定な要素

- dense cluster 内のBHの数?
～ $10 M_{\odot}$ or ～ $10^{2-4} M_{\odot}$? 初期にいくつBHが作られたのかが問題
- BHがclusterから失われてしまうプロセスはいくつもある。しかし、大丈夫だろう。
 - SN?
 - 3体recoil効果? binary-binary相互作用?
 - 合体によるrecoil?
- IMBHを持つ星団の割合?
中心密度が $\sim 10^5 \text{ pc}^{-3}$ 以上である clustersならOK (Miller & Hamilton, 2002)
我々の銀河のglobular systemに当てはめると、40% のもの(Pryor & Meylan 1993).

理論的な課題として

- BH merger後のrecoil speedを強い重力の場合、いろいろなmass比やスピンドで確かめること
- mass比の大きいときの3体相互作用の数値的解明を行い、IMBHができるかどうかを確かめること。
- binary-binary encounters や Kozai resonanceの、詳しい数値解析を行うこと。

Gravitational Radiation from IMBH-IMBH binary

HS, Ebisuzaki, Matsubayashi

Inspiral phase

- Suppose 2 BHs (M_1, M_2) form a binary with a circular orbit of radius a .
We use $R_{grav} = G\mu/c^2$, $\mu = M_1M_2/(M_1 + M_2)$.

- the time to coalesce t_{coal}

$$t_{coal} \sim 1.55 \times 10^{-3} \left(\frac{a}{R_{grav}} \right)^4 \left(\frac{\mu}{10^3 M_\odot} \right)^4 \left(\frac{10^3 M_\odot}{M_1} \right) \left(\frac{10^3 M_\odot}{M_2} \right) \left(\frac{10^3 M_\odot}{M_1 + M_2} \right) \text{ sec}$$

- typical frequency

$$f_{insp} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}} \sim 22.7 \left(\frac{a}{R_{grav}} \right)^{-3/2} \left(\frac{\mu}{10^3 M_\odot} \right)^{-3/2} \left(\frac{M_1 + M_2}{10^3 M_\odot} \right)^{1/2} \text{ Hz}$$

- dimensionless amplitude

$$h_{insp} \approx \frac{2}{aR} \frac{GM_1}{c^2} \frac{GM_2}{c^2} \quad \text{where we used the distance } R = \frac{z}{1+z} \frac{c}{H_0},$$

$$\sim 1.2 \times 10^{-20} \left(\frac{1+z}{z} \right) \left(\frac{H_0}{72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}} \right) \left(\frac{R_{grav}}{a} \right) \left(\frac{10^3 M_\odot}{\mu} \right) \left(\frac{M_1}{10^3 M_\odot} \right) \left(\frac{M_2}{10^3 M_\odot} \right)$$

Merger phase

- dominant quasi-normal frequency f_{QNM} of a merged black hole (of mass M)

$$f_{QNM} \approx \frac{\ell c^3}{\sqrt{27}GM} \sim 0.78 \times 10^2 \left(\frac{10^3 M_\odot}{M} \right) \text{ Hz}$$

- dimensionless amplitude h_{coal}

$$h_{coal} \approx 3.7 \times 10^{-21} \left(\frac{\epsilon}{0.01} \right)^{1/2} \left(\frac{1+z}{z} \right) \left(\frac{H_0}{72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}} \right) \left(\frac{M}{10^3 M_\odot} \right).$$

We applied the estimation from the energy balance eq. by Thorn-Braginsky (ApJ, 204, L4 (1976))

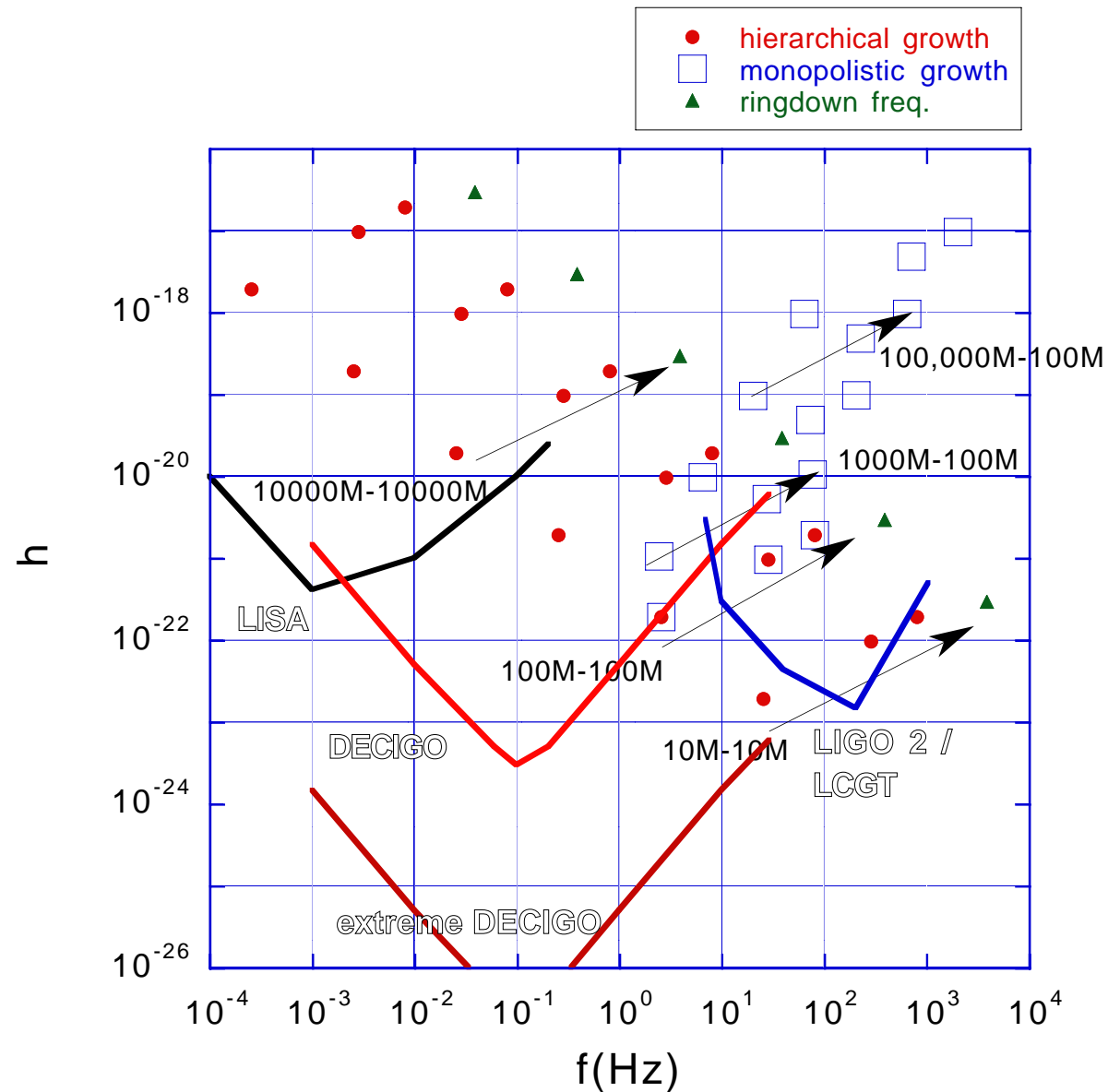
$$\epsilon M c^2 = \left(\frac{c^3 h_{coal}^2}{8\pi G \tau^2} \right) (4\pi R^2) \tau (1+z),$$

where τ is the redshifted burst time scale,

$$\tau \sim \sqrt{27} (1+z) \frac{GM}{c^3},$$

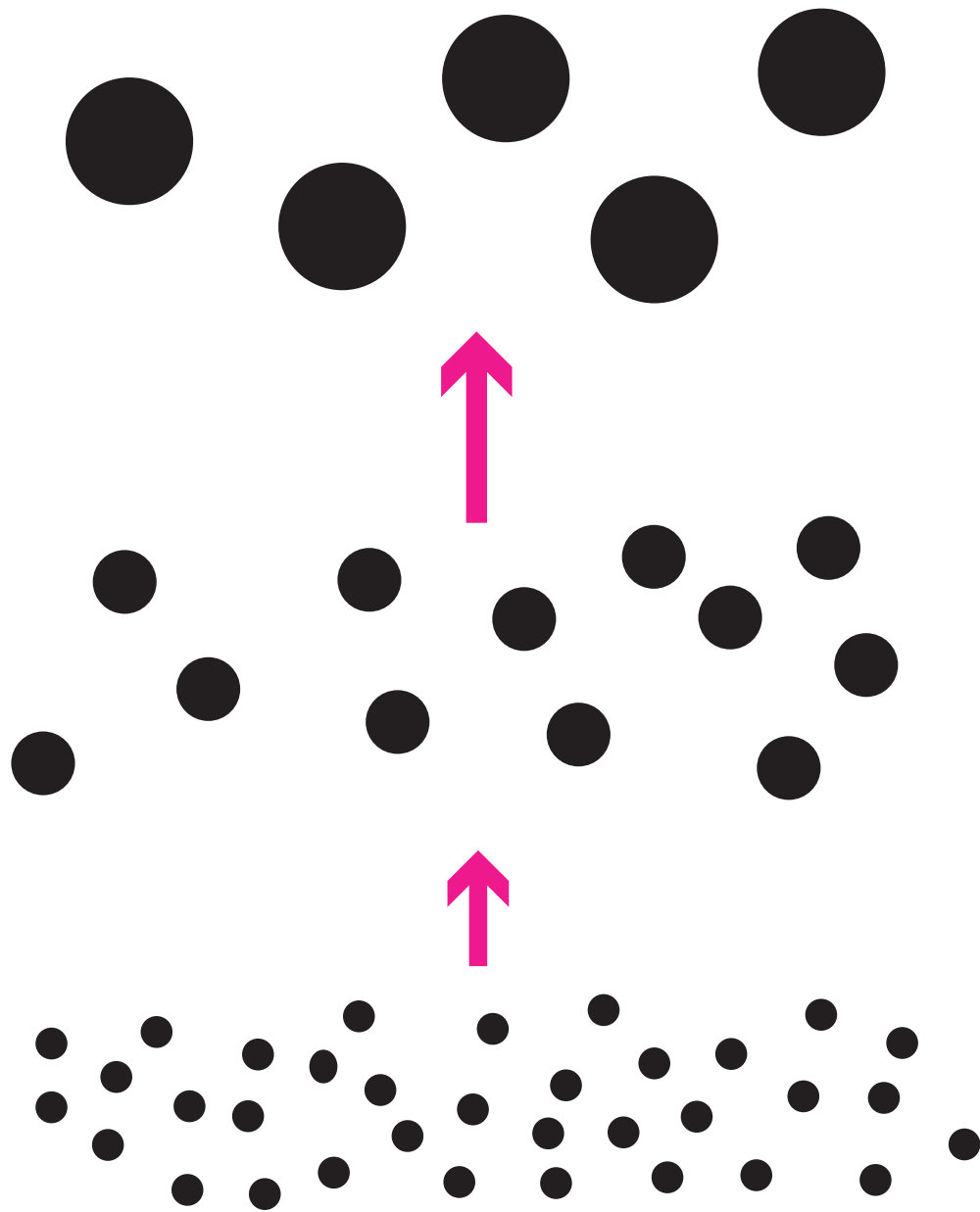
and ϵ is the efficiency.

Expected Gravitational Radiation Bursts from Merging IMBHs

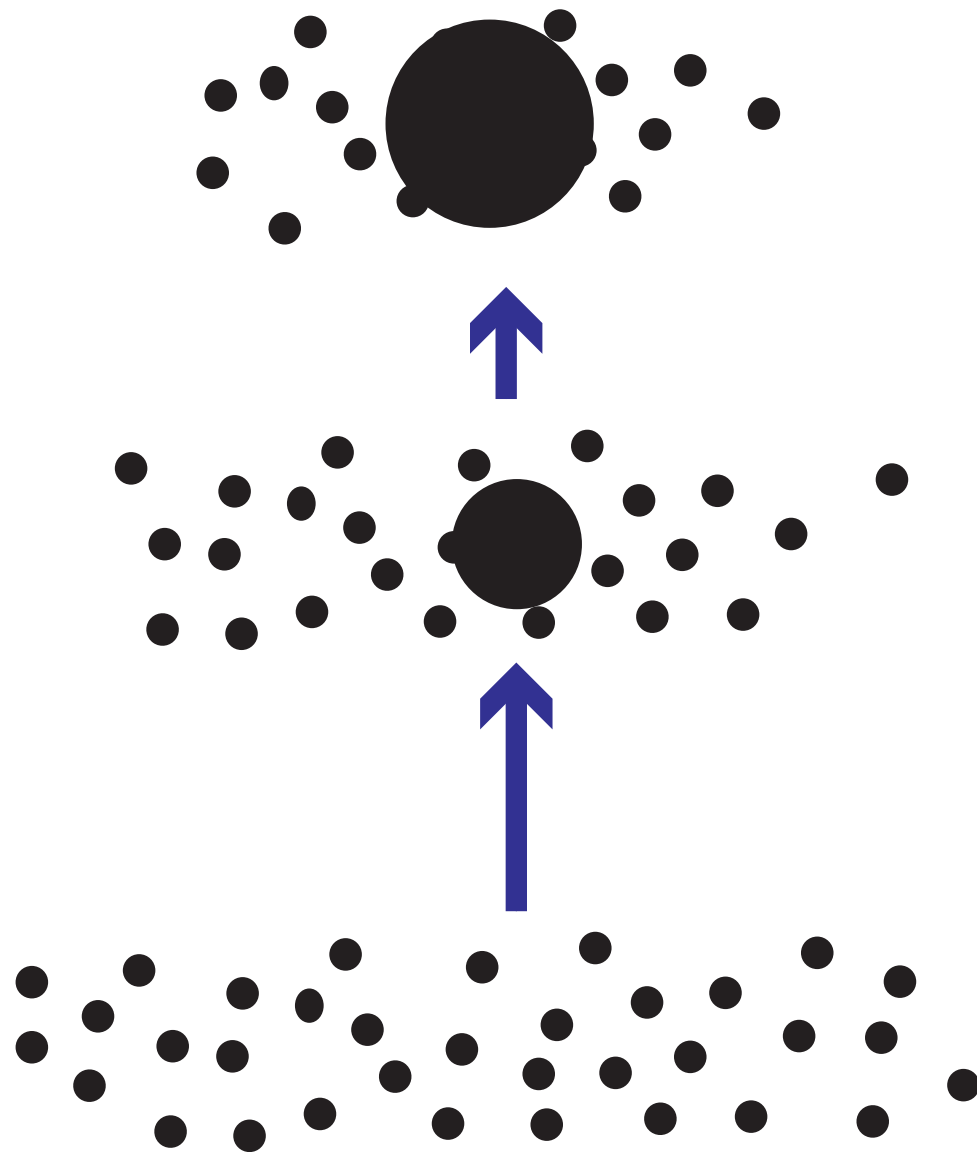


Expected gravitational radiation bursts from merging IMBHs. The dots and squares are the amplitude (f_{insp}, h_{insp}) for different mass combinations. The dots are for equal mass binaries of the range $(M_1, M_2) = (10M_\odot, 10M_\odot) \cdots (10^6M_\odot, 10^6M_\odot)$ (as supposed to the cases of hierarchical growth model), while the squares are fixing one component to be $100M_\odot$ BH, $(M_1, M_2) = (100M_\odot, 100M_\odot) \cdots (10^6M_\odot, 100M_\odot)$ (as supposed to the cases of monopolical growth model). Plots are of $a = 50, 10$ and 5 , respectively for each cases, and evolve as the arrows indicate. Triangles are (f_{QNM}, h_{coal}) of $M = 20, 200, \dots, 2 \cdot 10^6 M_\odot$. Lines are the sensitivity of the future detectors; LISA, DECIGO, LIGO 2, and LCGT, taken from Fig. 1 in Seto et al. (2001). The data are evaluated at the distance $R = 1$ Gpc and $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

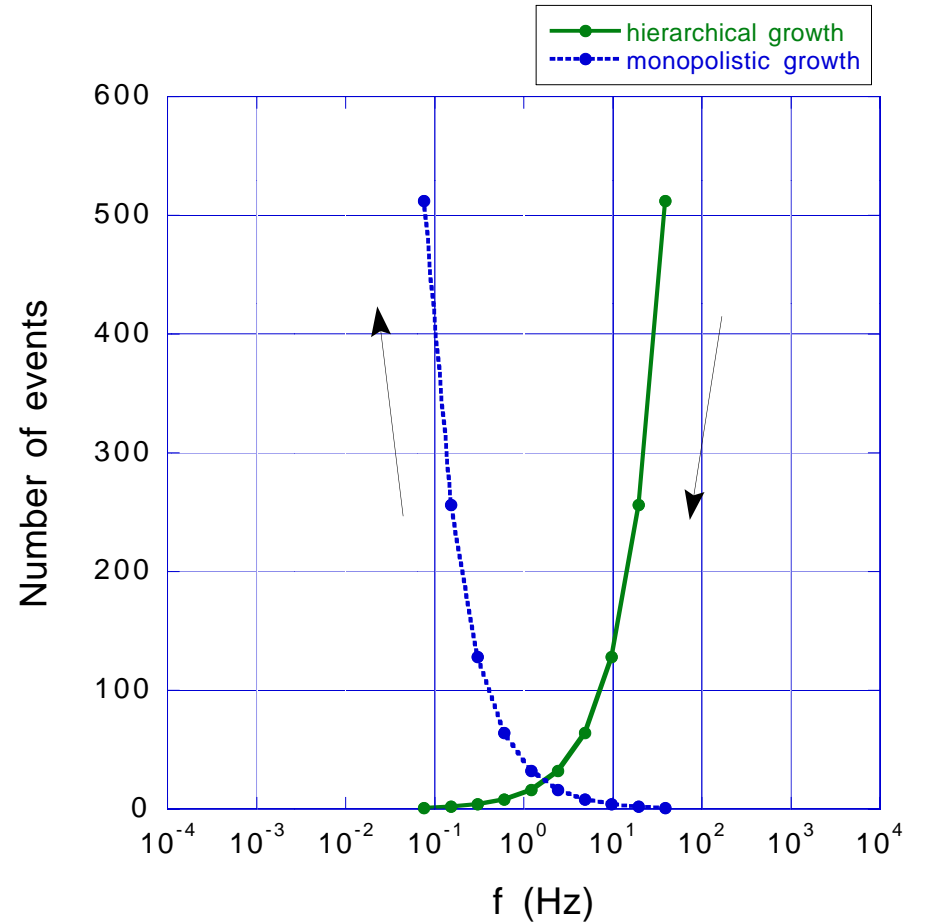
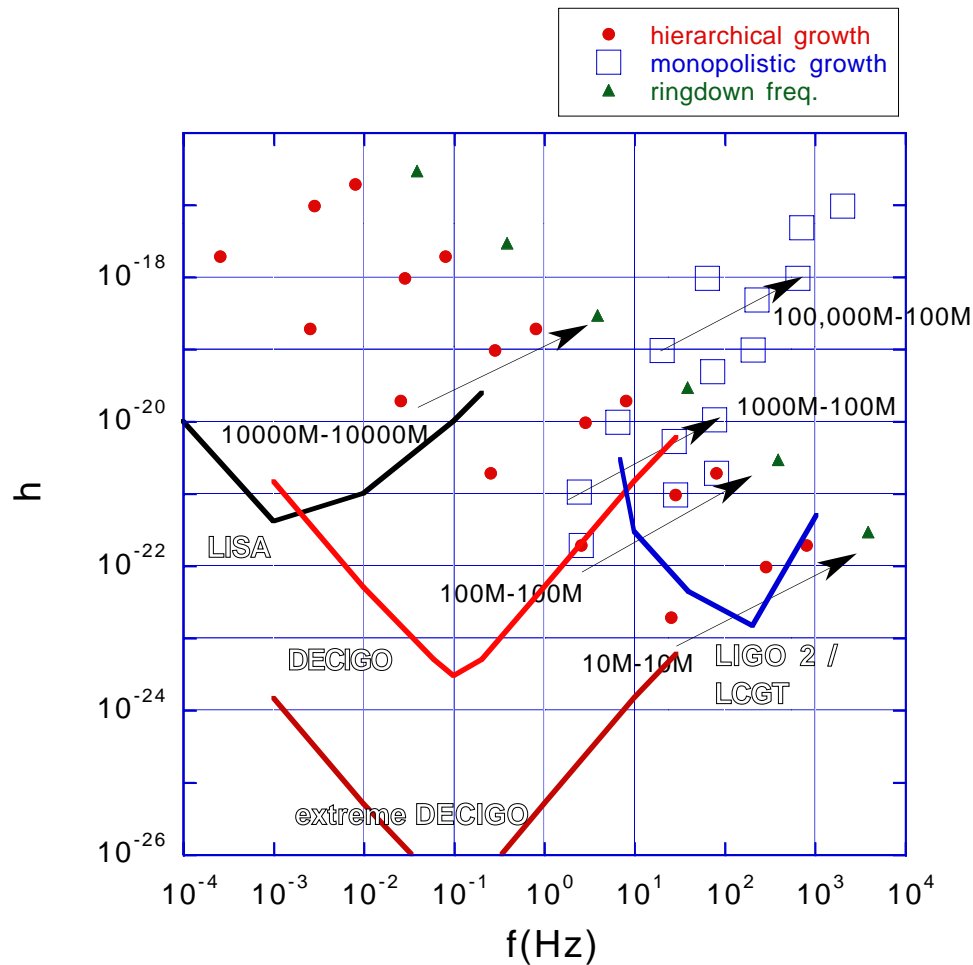
Hierarchical growth model



Monopolistic growth model



Hierarchical growth vs Monopolistic (or runaway) growth



Event numbers of mergers starting with a thousand of $10^3 M_{\odot}$ IMBHs. The solid line is the hierarchical growth model, that is each two equal-mass IMBHs merge together simultaneously. The dotted line is the monopolistic growth model, that is one single BH eats all other $10^3 M_{\odot}$ IMBHs and grows itself. Ringdown frequency f_{QNM} , is used for the plot. The arrows indicate a plausible evolution behavior.

Merging event rate

- Merger event rate ν

$$\nu \approx (12 \sim 37) \left(\frac{n_{el}}{3 \times 10^{-3} \text{Mpc}^{-3}} \right) \left(\frac{N}{10^3} \right) \left(\frac{H_0}{72 \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}} \right) \text{yr}^{-1}$$

where n_{el} is the number density of the elliptical galaxies.

- If we include spiral galaxies, events may become 3-5 times more.

We applied the estimation by Fukushige-Ebisuzaki-Makino, ApJ, 396, L61 (1992).

Burst frequency is

$$\nu = \int_0^{H_0/c} 4\pi R^2 N_m(R) dR \quad \text{yr}^{-1}$$

where R is the distance to the burst source, $N_m(R)$ is the frequency of merging (Mpc^{-3}), and consider two limiting cases

$$N_m(R) = c n_{el} N \delta(R - R_{z=2.5}) \quad (1)$$

$$N_m(R) = \begin{cases} \frac{c n_{el} N}{R_{z=2.5}} & (R \leq R_{z=2.5}) \\ 0 & (R > R_{z=2.5}) \end{cases} \quad (2)$$

まとめ

中間質量ブラックホール IMBHs ($100M_{\odot} < M < 10^6 M_{\odot}$) からの重力波

- 銀河中心に存在することがわかっている大質量ブラックホールの，形成シナリオとして，「star clusters からのrunaway growth」の説を裏付ける有力な証拠
 - 存在するのだから，それを作るシナリオが必要だ（ほぼconfirm）
 - その後の振る舞いを考えることが重要（そういう研究はまだない）
- 成長するシナリオによれば，どんどん合体するはず．重力波も出るだろう．

$$f = 10 \sim 10^{-2} \text{Hz}$$

すべての楕円銀河で 10^3 回の衝突があるならば，年間 数十 events
渦巻き銀河まで含めれば，その数倍

- 大質量ブラックホール形成までのプロセスは不明だが，極端な2つのモデル (Hierarchical growth / Monopolistic growth) を考えると，ブラックホール質量を固定したときの重力波イベント頻度が異なるので，合体時の周波数統計をとることで，大質量ブラックホール形成のモデルを決めることができる．
- そのための有力な観測手段は， LISAよりDECIGOである めでたしめでたし