

原始ブラックホールの 新しい進化シナリオ

高橋慶太郎

2009年5月12日

with

早崎 (北大) 仙洞田 (京大) 長滝 (京大)

概要

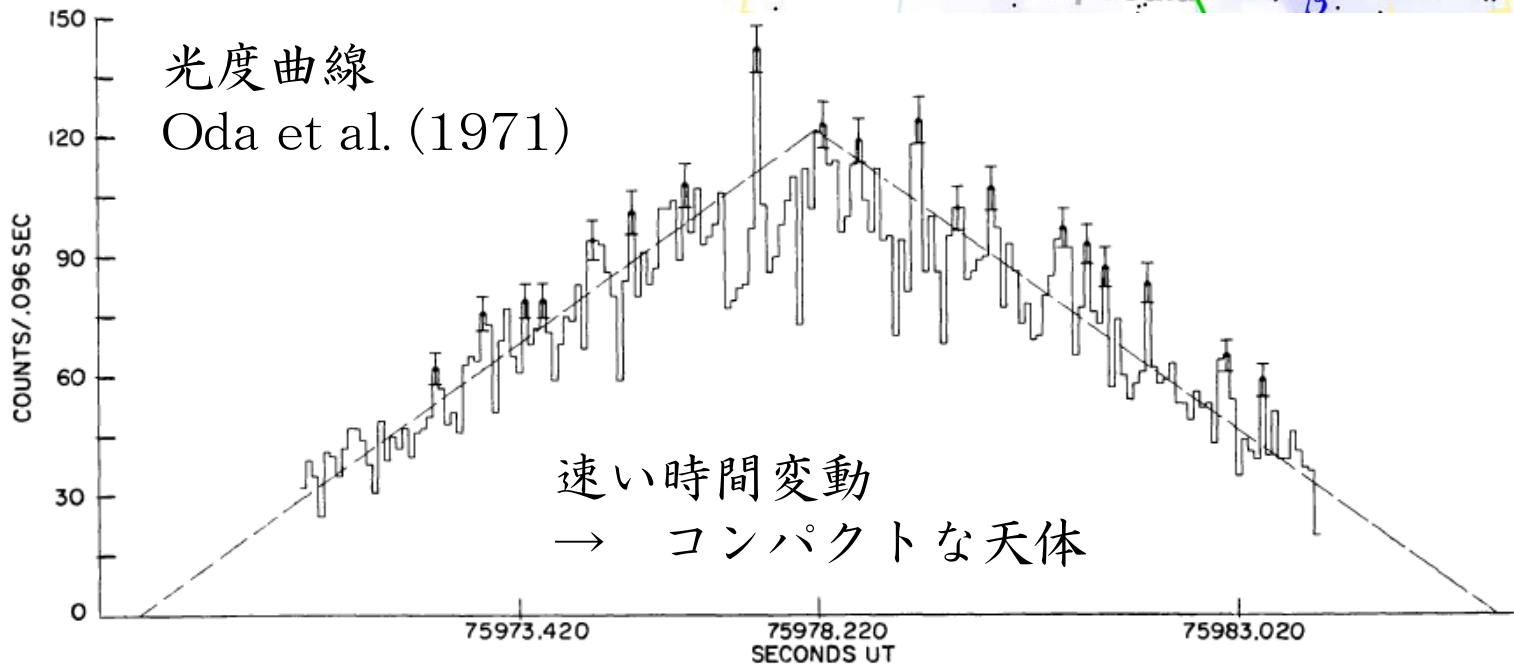
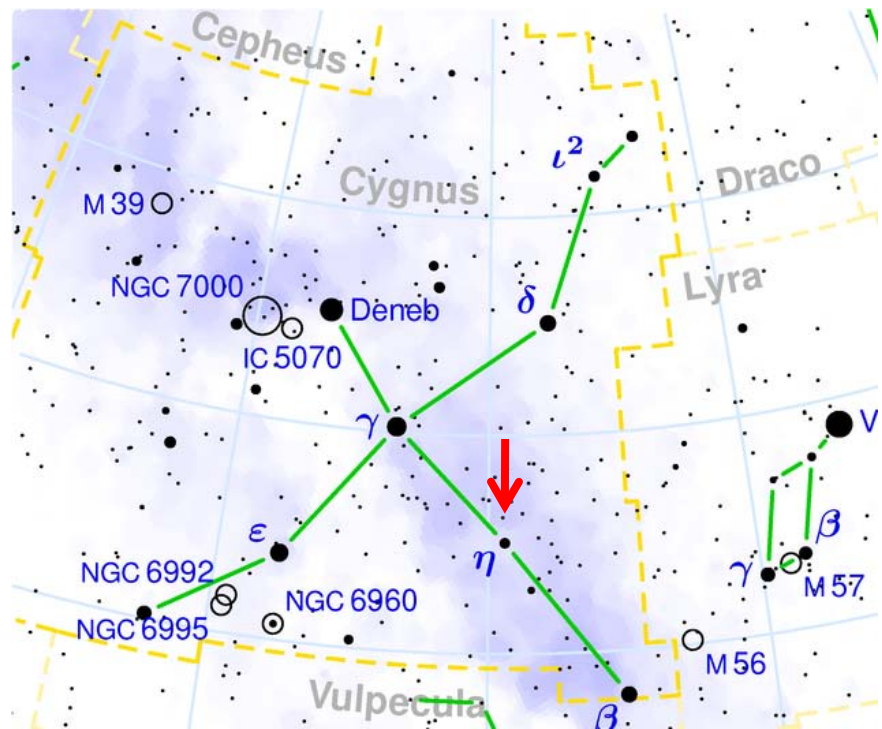
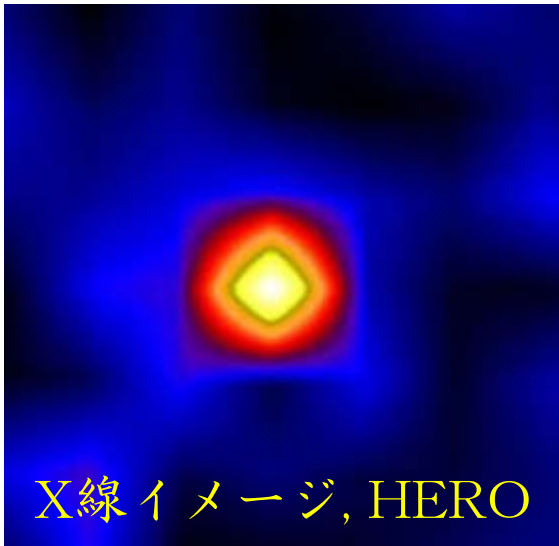
原始ブラックホールのバイナリーの進化過程を考え、その合体や重力波放出について議論する。これまで考えられてきたよりも合体は頻繁に起こり、重力波も大量に放出されることを示す。

目次

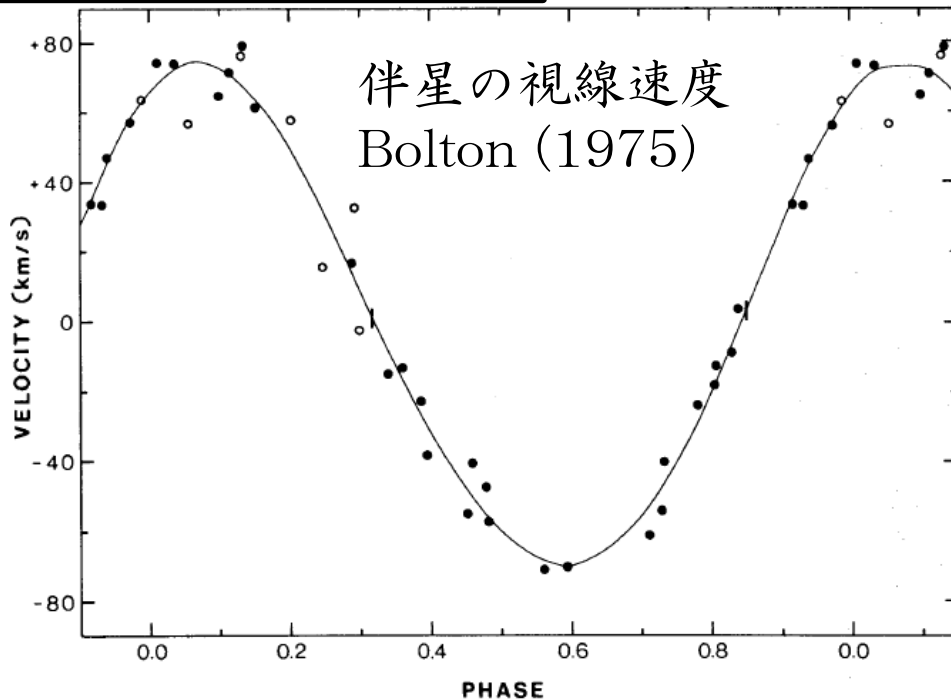
- 1、宇宙におけるブラックホール
- 2、原始ブラックホール
- 3、バイナリー原始ブラックホール
- 4、まとめと展望

1、宇宙における ブラックホール

Cygnus X-1①



Cygnus X-1②



軌道要素から $M \sim 14 M_{\text{sun}}$ と推定された。コンパクトで重い天体と言えば中性子星？いやこんなに重い中性子星はあり得ない。
→ ブラックホール！

想像図



伴星からガスがブラックホールに降着して光っているのだろう。

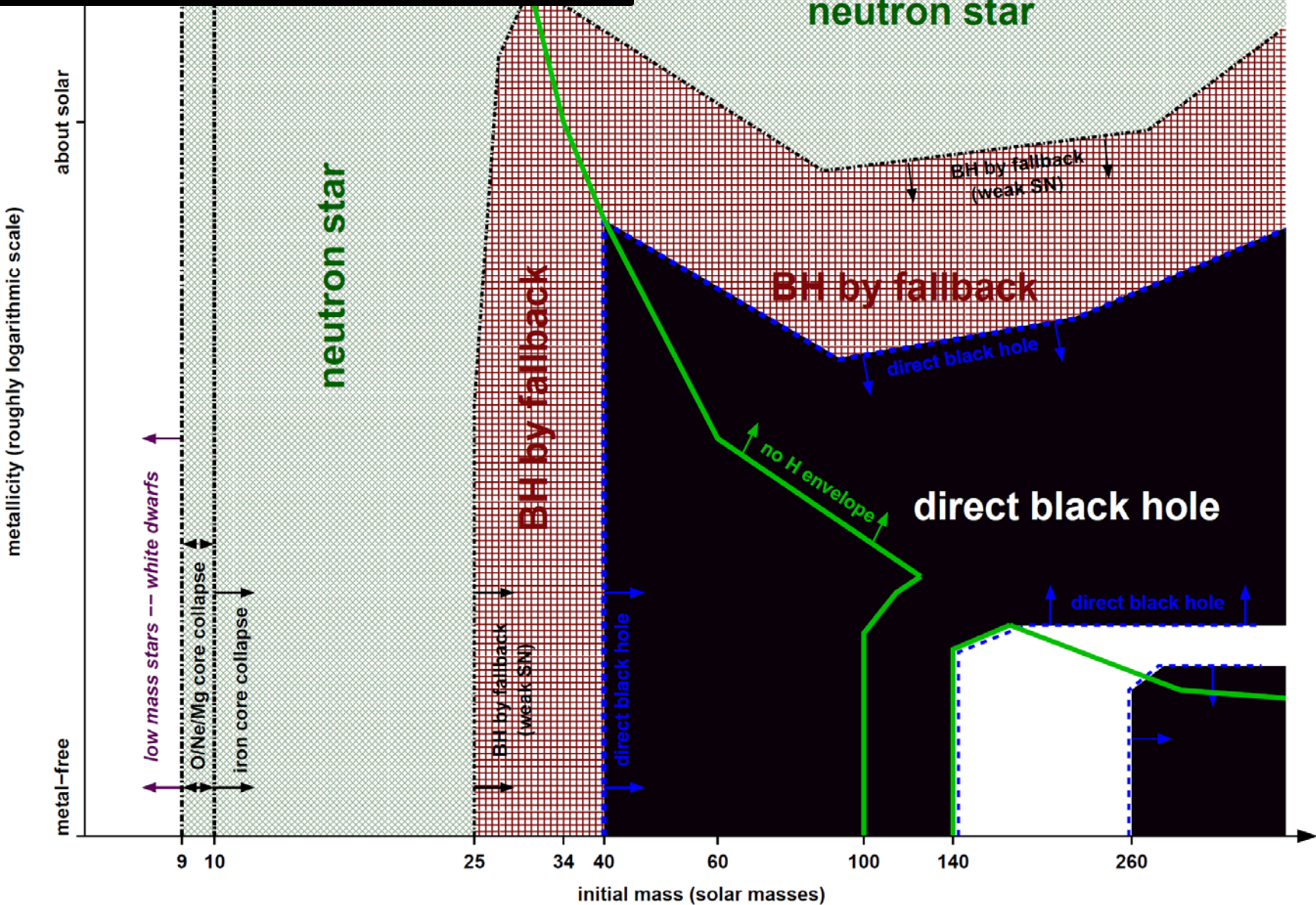
ブラックホールのX線連星系一覧

Coordinate Name	Common ^b Name/Prefix	Year ^c	Spec.	P _{orb} (hr)	f(M) (M _☉)	M ₁ (M _☉)
0422+32	(GRO J)	1992/1	M2V	5.1	1.19±0.02	3.7–5.0
0538–641	LMC X–3	–	B3V	40.9	2.3±0.3	5.9–9.2
0540–697	LMC X–1	–	O7III	93.8 ^d	0.13±0.05 ^d	4.0–10.0: ^e
0620–003	(A)	1975/1 ^f	K4V	7.8	2.72±0.06	8.7–12.9
1009–45	(GRS)	1993/1	K7/M0V	6.8	3.17±0.12	3.6–4.7: ^e
1118+480	(XTE J)	2000/2	K5/M0V	4.1	6.1±0.3	6.5–7.2
1124–684	Nova Mus 91	1991/1	K3/K5V	10.4	3.01±0.15	6.5–8.2
1354–64 ^g	(GS)	1987/2	GIV	61.1 ^g	5.75±0.30	–
1543–475	(4U)	1971/4	A2V	26.8	0.25±0.01	8.4–10.4
1550–564	(XTE J)	1998/5	G8/K8IV	37.0	6.86±0.71	8.4–10.8
1650–500 ^h	(XTE J)	2001/1	K4V	7.7	2.73±0.56	–
1655–40	(GRO J)	1994/3	F3/F5IV	62.9	2.73±0.09	6.0–6.6
1659–487	GX 339–4	1972/10 ⁱ	–	42.1 ^{j,k}	5.8±0.5	–
1705–250	Nova Oph 77	1977/1	K3/7V	12.5	4.86±0.13	5.6–8.3
1819.3–2525	V4641 Sgr	1999/4	B9III	67.6	3.13±0.13	6.8–7.4
1859+226	(XTE J)	1999/1	–	9.2: ^e	7.4±1.1: ^e	7.6–12.0: ^e
1915+105	(GRS)	1992/Q ^l	K/MIII	804.0	9.5±3.0	10.0–18.0
1956+350	Cyg X–1	–	O9.7Iab	134.4	0.244±0.005	6.8–13.3
2000+251	(GS)	1988/1	K3/K7V	8.3	5.01±0.12	7.1–7.8
2023+338	V404 Cyg	1989/1 ^f	K0III	155.3	6.08±0.06	10.1–13.4

* 中性子星のX線連星系もある

星起源のブラックホール

Heger et al., (2003)

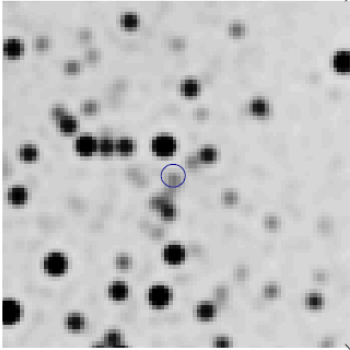


X線連星系は重い星と軽い星の連星からできたのだろう。

銀河系中心

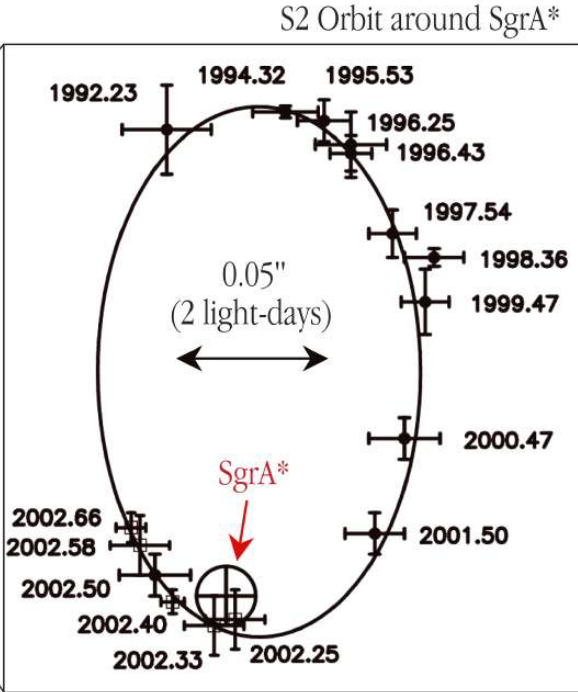
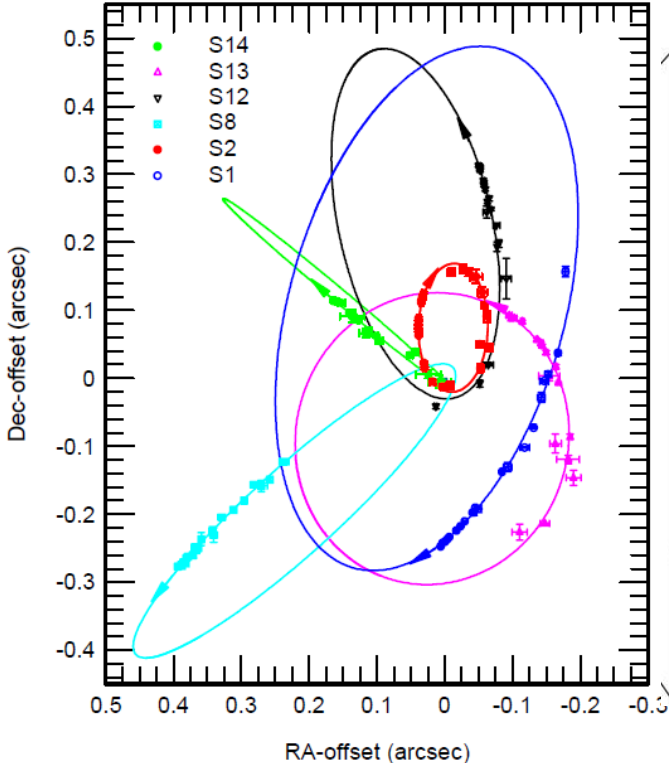
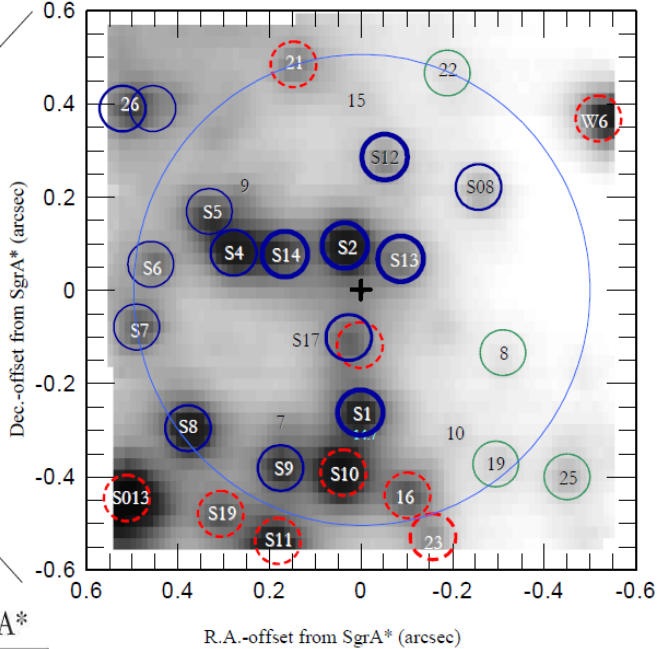
銀河系中心 (Sgr A*)
 の電波源のまわりの
 星の運動を追った。
 (Eisenhauer et al. (2005))

NACO 10.06.04: H (40mas)



0.5" (23 light days)

SINFONI 18.08.04: K(75 mas)



いくつかの星が
 共通の天の周りを
 まわっている。
 その質量は
 $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$
 ほどである。
 → 大質量BH!

活動銀河核

とても明るい天体がある
 $L \sim 10^{44-46}$ erg/sec

天体はどこまで明るくなれるか (球対称) ?

静水圧平衡
$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM\rho}{r^2}$$

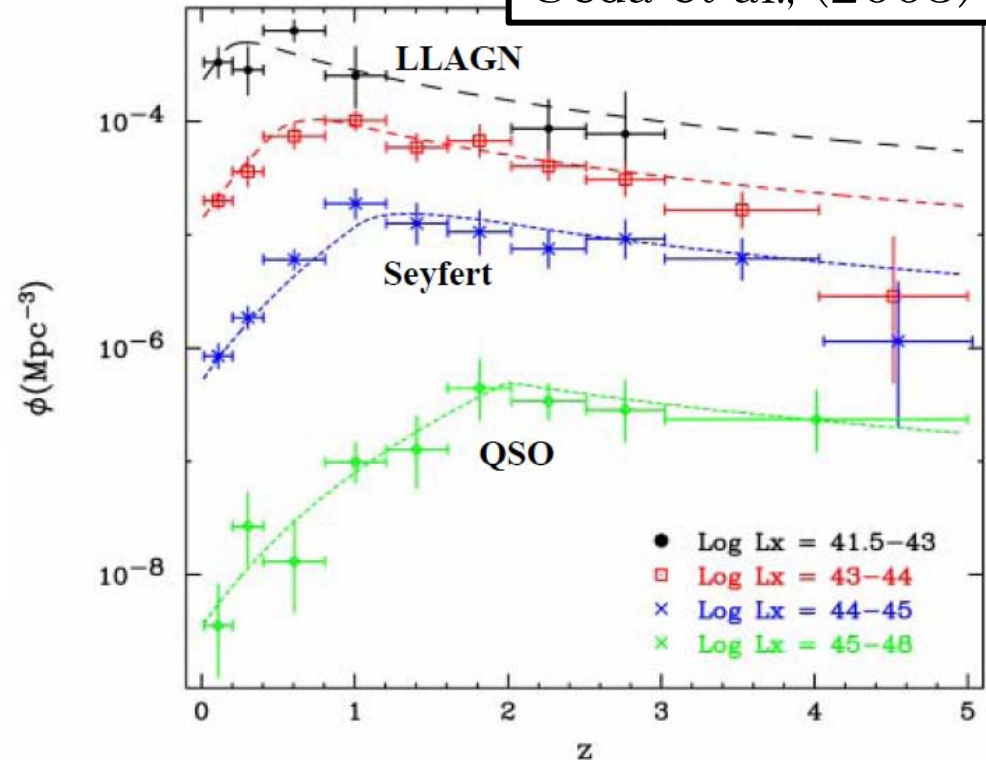
輻射圧
$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\sigma_T \rho}{m_p} \frac{L}{4\pi r^2}$$

Eddington luminosity

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p}{\sigma_T} \approx 10^{38} \left(\frac{M}{1M_\odot} \right) \text{ erg/sec}$$

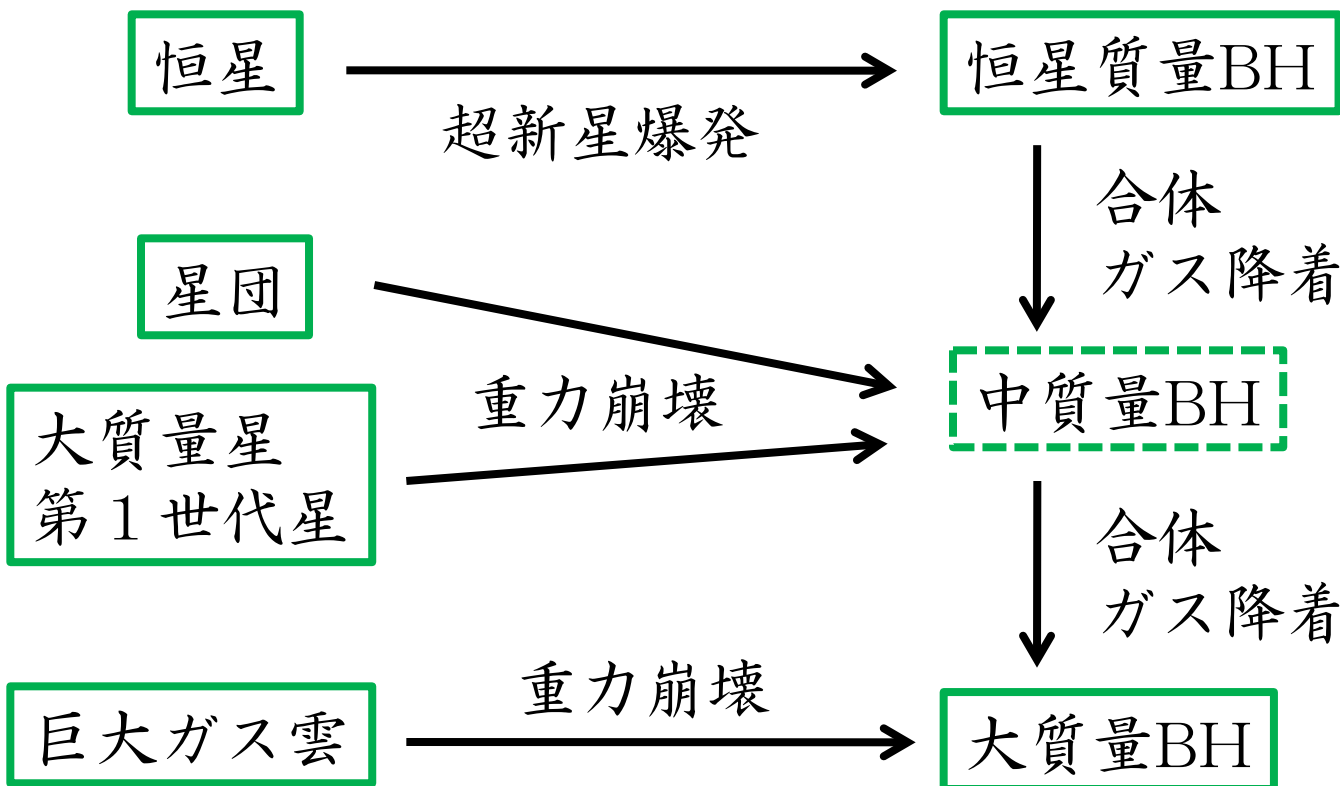
これ以上明るい天体が吹き飛んでしまう。
AGNは 10^{6-8} Msun程度のブラックホールだろう。

Ueda et al., (2003)



いろいろなブラックホール

種類	質量	場所	起源
恒星質量	1~10 Msun	X線連星	星
中質量?	10^{2-3} Msun	X線天体	??
大質量	10^{6-8} Msun	銀河中心	??



最近 $z \sim 6$ で
 10^9 Msunの
 BHが見つ
 かった。
 これを説明
 するのは
 難しい？

原始ブラックホール (PBH)

特徴

- ・初期宇宙（放射優勢）にできる
- ・質量はとりあえずどのくらいでもよい
- ・できる量もとりあえずどのくらいでもよい

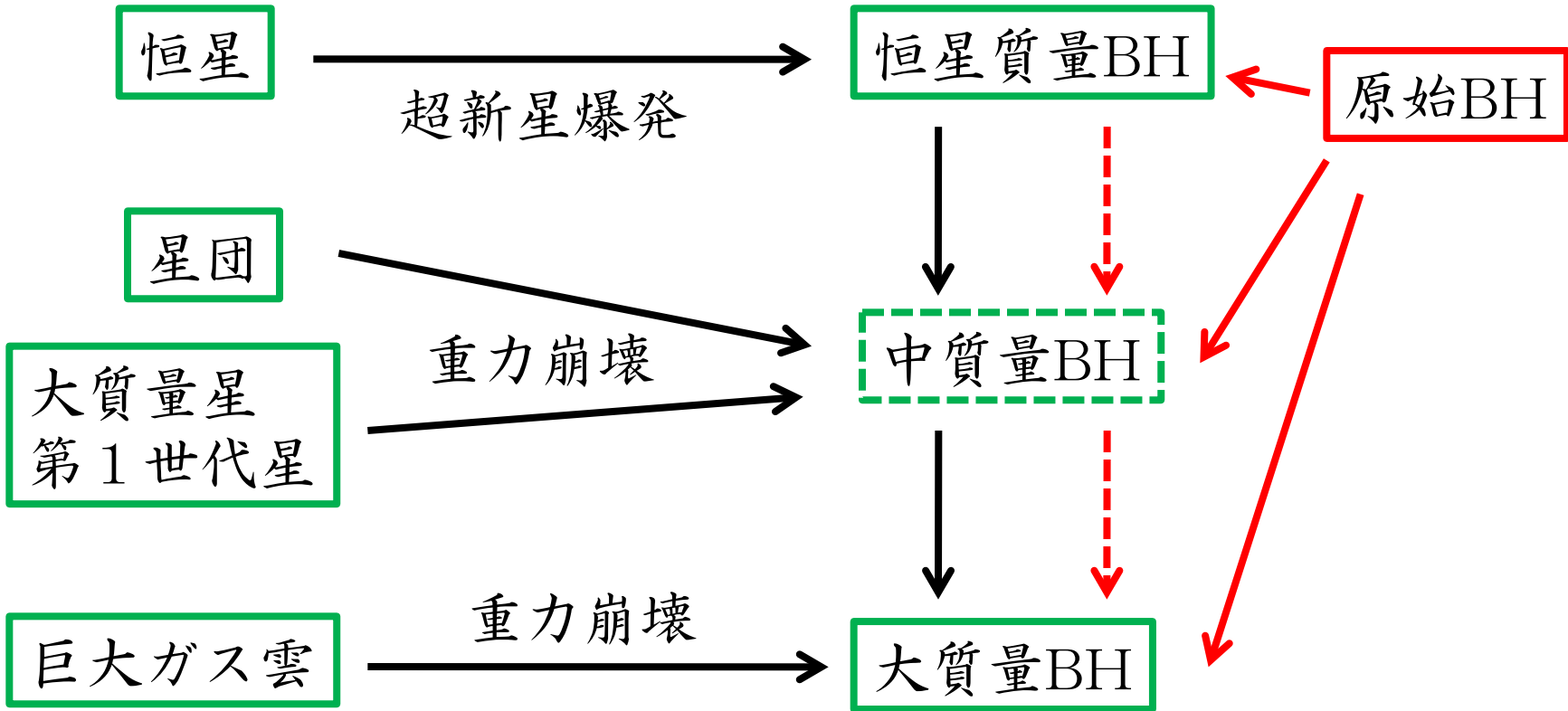
宇宙論的影響

- ・ダークマターに寄与しているかもしれない
- ・CMBに影響するかもしれない
- ・重力波を出すかもしれない
- ・大質量ブラックホールの形成に寄与しているかもしれない

今回の話は

- ・原始ブラックホールのバイナリー
- ・背景重力波の見積もり

はるかな展望



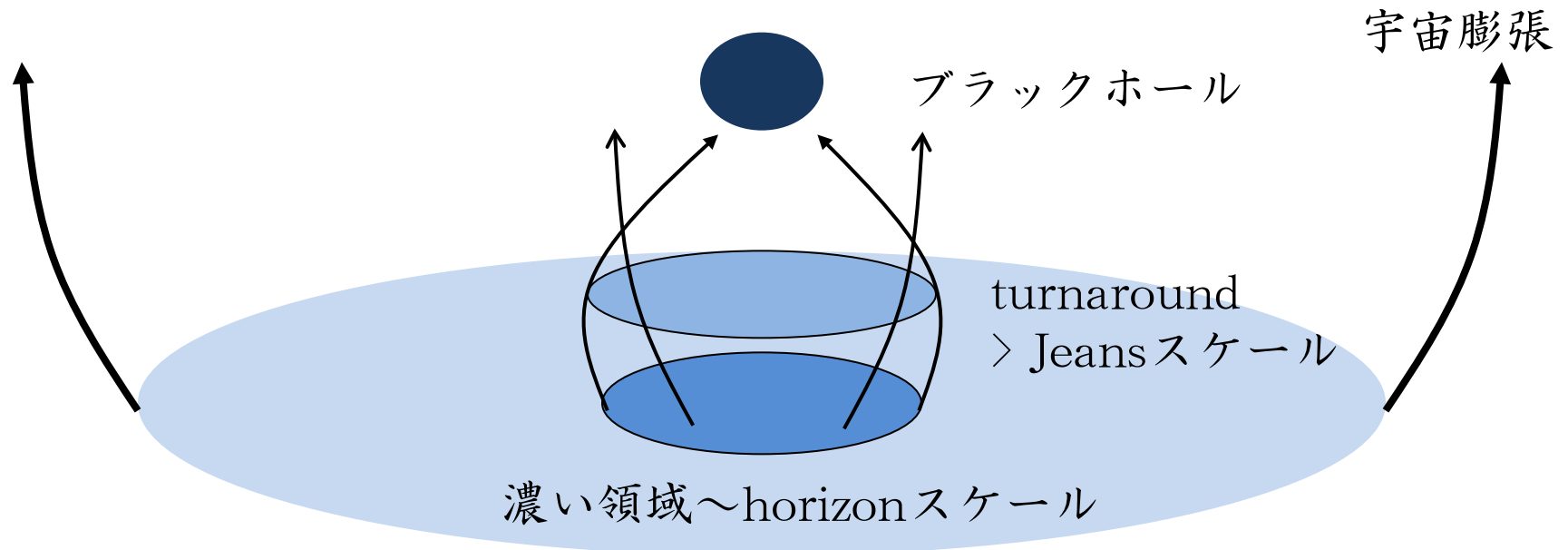
いきなり大きな原始BHができるとしたのでは「仮定＝結論」である。小さなBHから始まって合体を繰り返して大質量になれる???

2、原始ブラックホール

原始ブラックホールの形成①

濃い領域が重力崩壊してブラックホールになる。

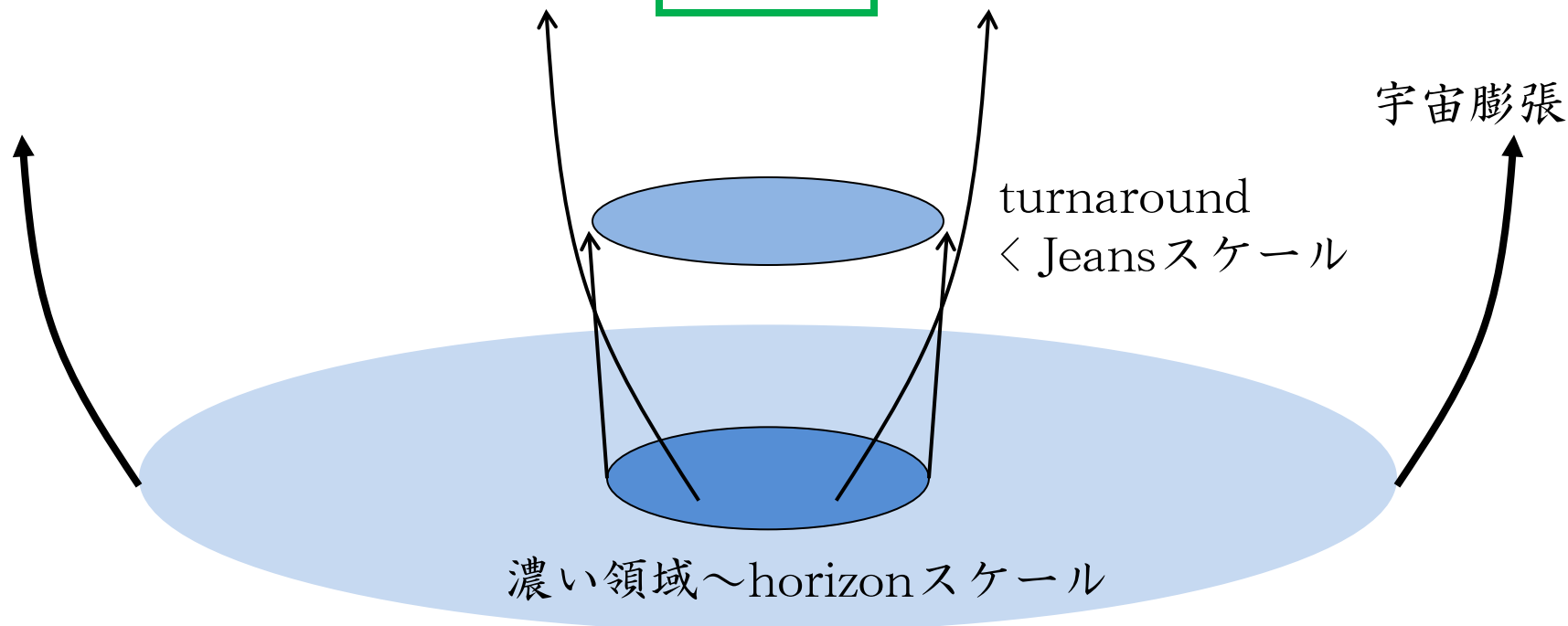
- ・ horizonスケールの濃い領域はclosed universeのようなもの
- ・ しばらくすると膨張が止まる (turnaround)
- ・ このときの領域の大きさがJeansスケールより大きければ収縮するだろう
- ・ その後重力崩壊してブラックホールになる



原始ブラックホールの形成②

ただし最初に十分に濃くないとturnaroundが遅れてその間にJeansスケールは濃い領域よりも大きくなってしまふ。そうすると収縮できない。そのcriticalなゆらぎの大きさは

$$\delta_c = \frac{1}{3}$$



原始ブラックホールの形成③

宇宙の平均密度と同じ密度のBHの大きさは？

$$r_g = GM_{\text{BH}} = Gr_g^3 \rho(T)$$

$$\Rightarrow r_g = \frac{1}{\sqrt{G\rho(T)}} = H^{-1}(T)$$

つまり horizon スケール。その質量は

$$M_{\text{BH}} = H^{-3}(T)\rho(T) = \frac{M_{\text{P}}^3}{T^2} = 1M_{\odot} \left(\frac{T}{1 \text{ GeV}} \right)^{-2}$$

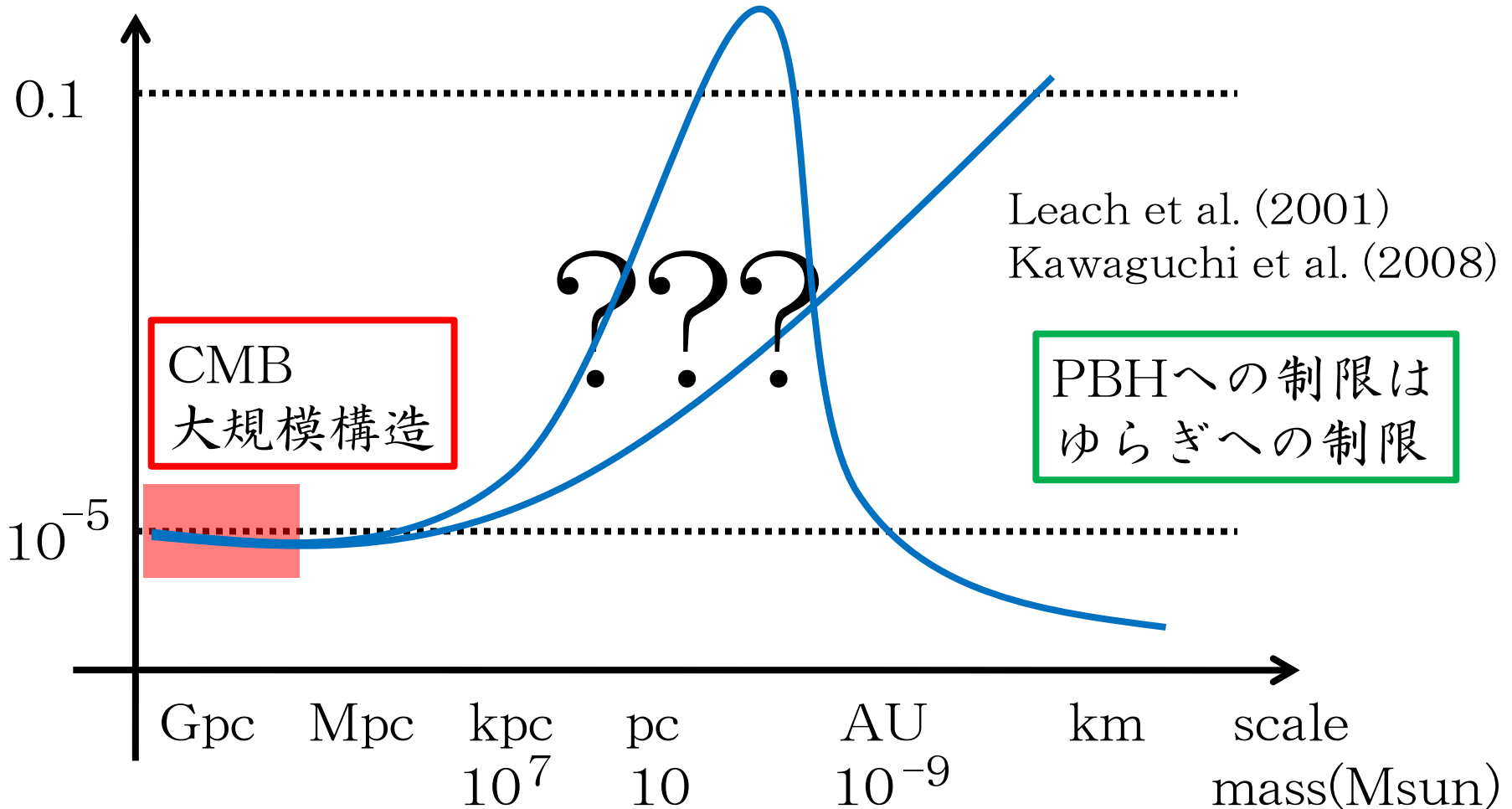
逆にBHの生成時刻は質量の関数として

$$T_{\text{BHF}} = 1 \sqrt{\frac{1M_{\odot}}{M_{\text{BH}}}} \text{ GeV}$$

軽いものほど早くできる。

大きなゆらぎ? ①

しかしそんな大きなゆらぎがあるのか? 実はゆらぎの大きさはほとんどのスケールでたいした制限がない。小スケールでゆらぎは大きいかもしれない。

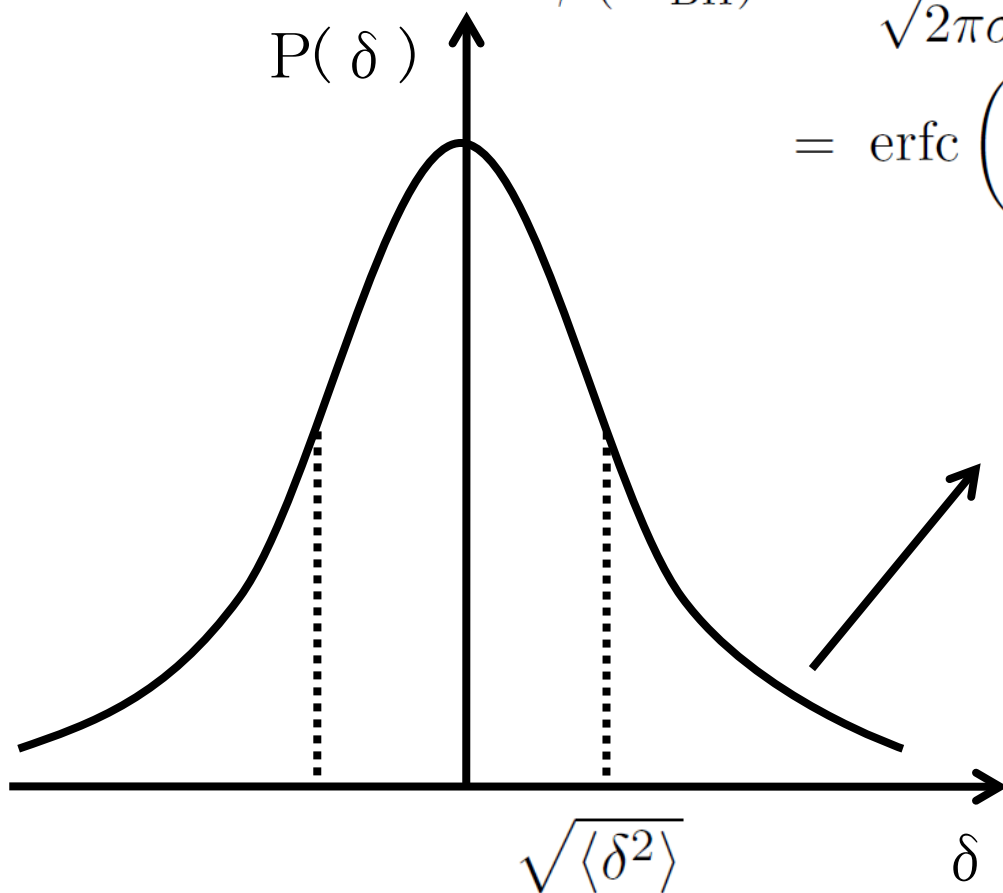


大きなゆらぎ? ②

$\sqrt{\langle \delta^2 \rangle} = 0.3$ である必要はない。

形成当時のBHの密度パラメータは

$$\begin{aligned}\beta(M_{\text{BH}}) &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma(M_{\text{BH}})} \int_{\delta_c}^{\infty} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2(M_{\text{BH}})}\right) d\delta \\ &= \text{erfc}\left(\frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma(M_{\text{BH}})}\right)\end{aligned}$$



この辺の裾でもできるので
 $\sqrt{\langle \delta^2 \rangle}$ が小さくてもBHは
できる。

Hawking radiation

ブラックホールは量子論的な効果で黒体放射する

$$T_{\text{BH}} = \frac{1}{8\pi G M_{\text{BH}}} \approx 1 \text{ GeV} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^{13} \text{ g}} \right)^{-1}$$

$$L_{\text{BH}} = -\frac{dM_{\text{BH}}}{dt} \sim T_{\text{BH}}^4 r_{\text{Sch}}^2 \sim G^{-2} M_{\text{BH}}^{-2}$$

$$\sim 10^{22} \text{ GeV/sec} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^{13} \text{ g}} \right)^{-2}$$

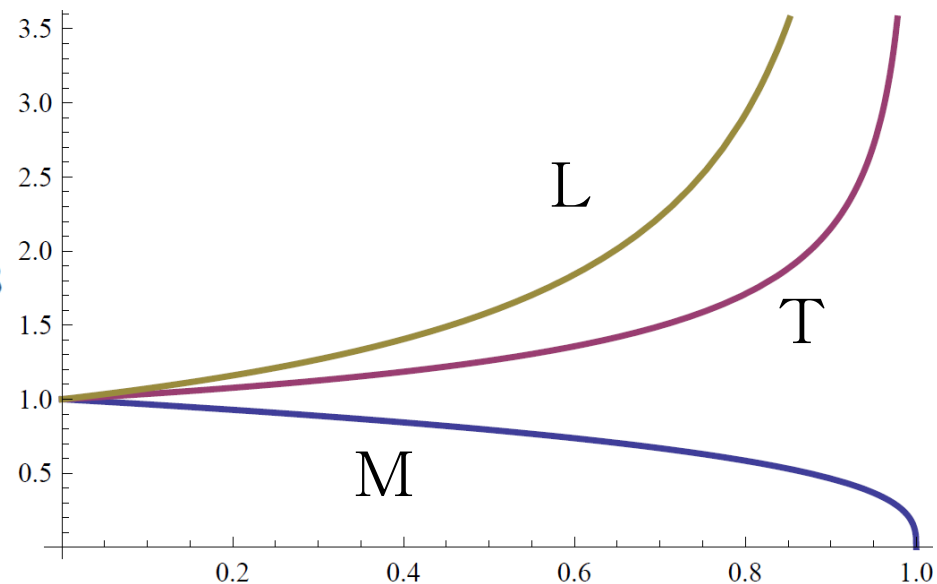
軽いほど温度が高く明るい。

寿命は

$$t_{\text{eva}} \sim G^2 M_{\text{BH}}^3$$

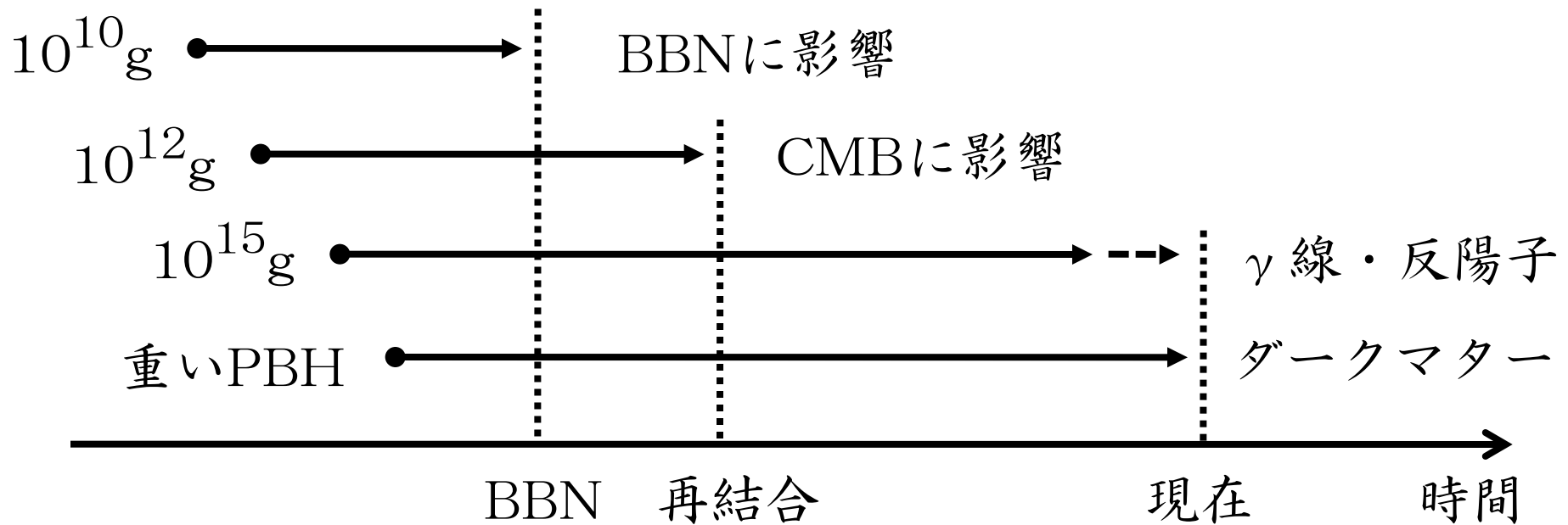
$$\sim 10^6 \text{ year} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^{13} \text{ g}} \right)^3$$

で、軽いほど短い。



PBHの進化

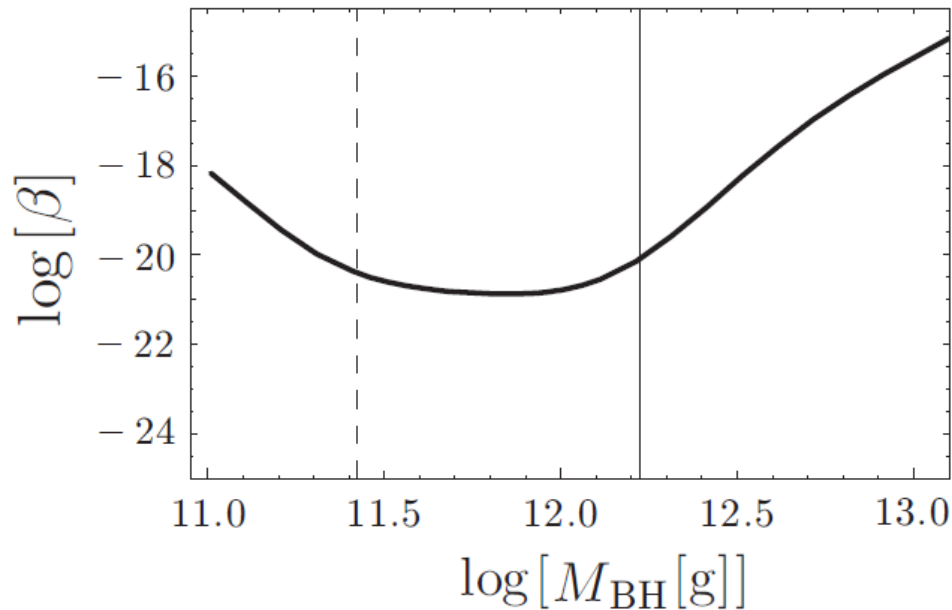
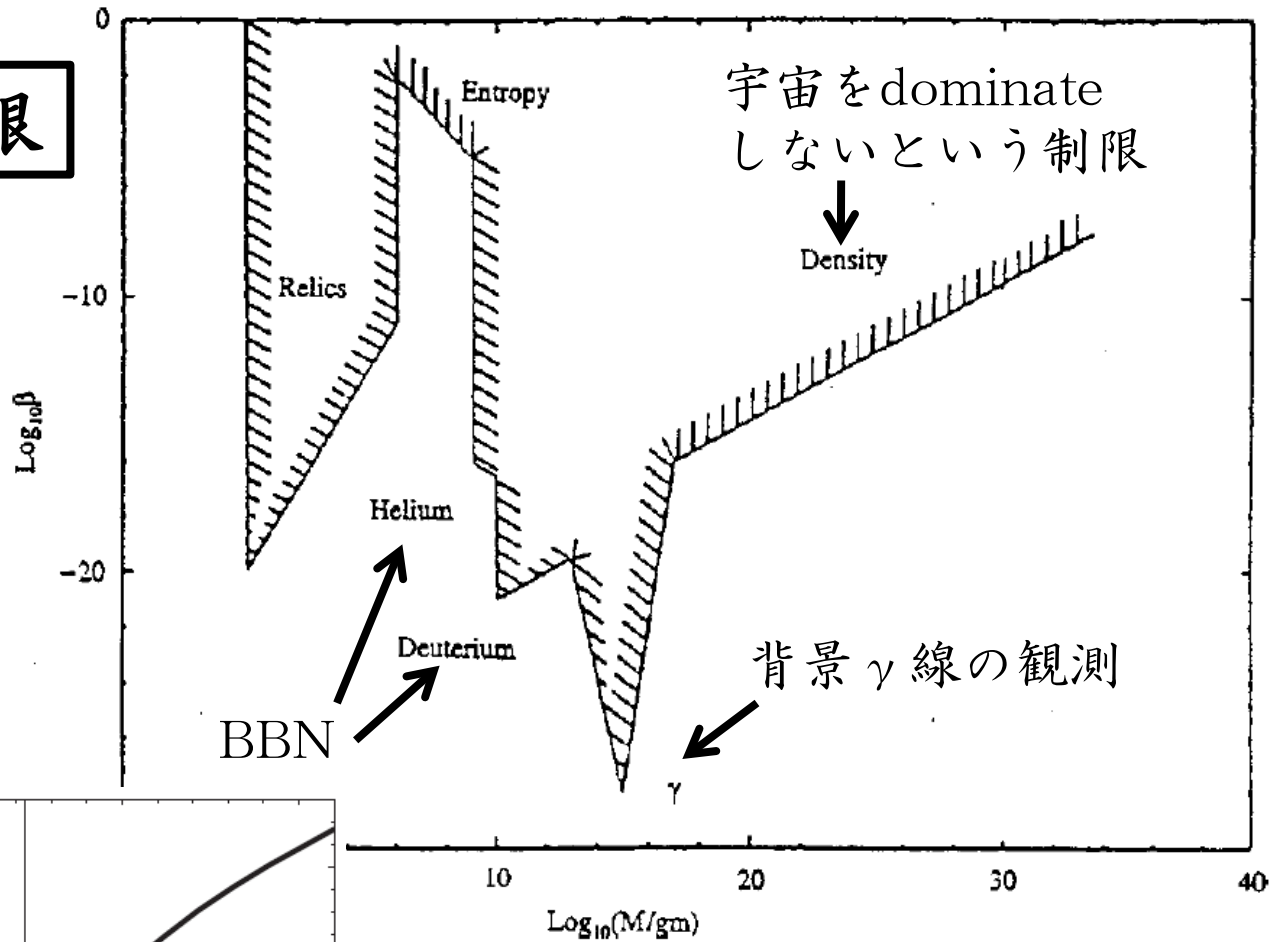
質量によって運命が異なる。宇宙年齢のうちに蒸発できるかどうか1つの分かれ目。



軽いPBHは宇宙年齢以内に蒸発して γ 線その他を放出し様々な現象に影響を及ぼす。重いPBHは蒸発せずに残ってダークマター (MACHO) になる。

軽いPBHへの制限

Carr (2003) →
 これまでの制限を
 まとめたもの



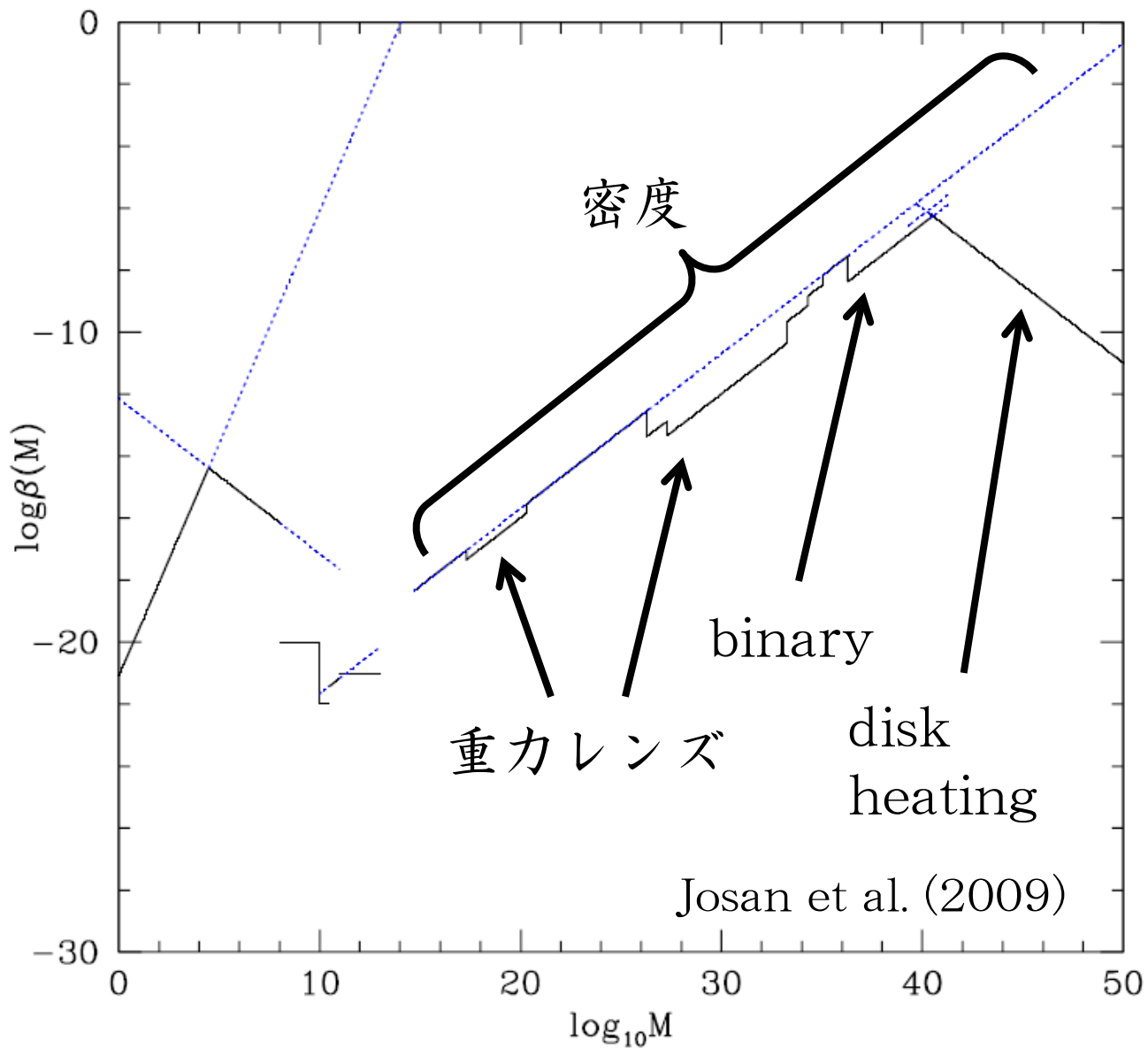
←
 Tashiro & Sugiyama (2008)
 CMBの黒体スペクトルからの
 ずれによる制限。

重いPBHへの制限①

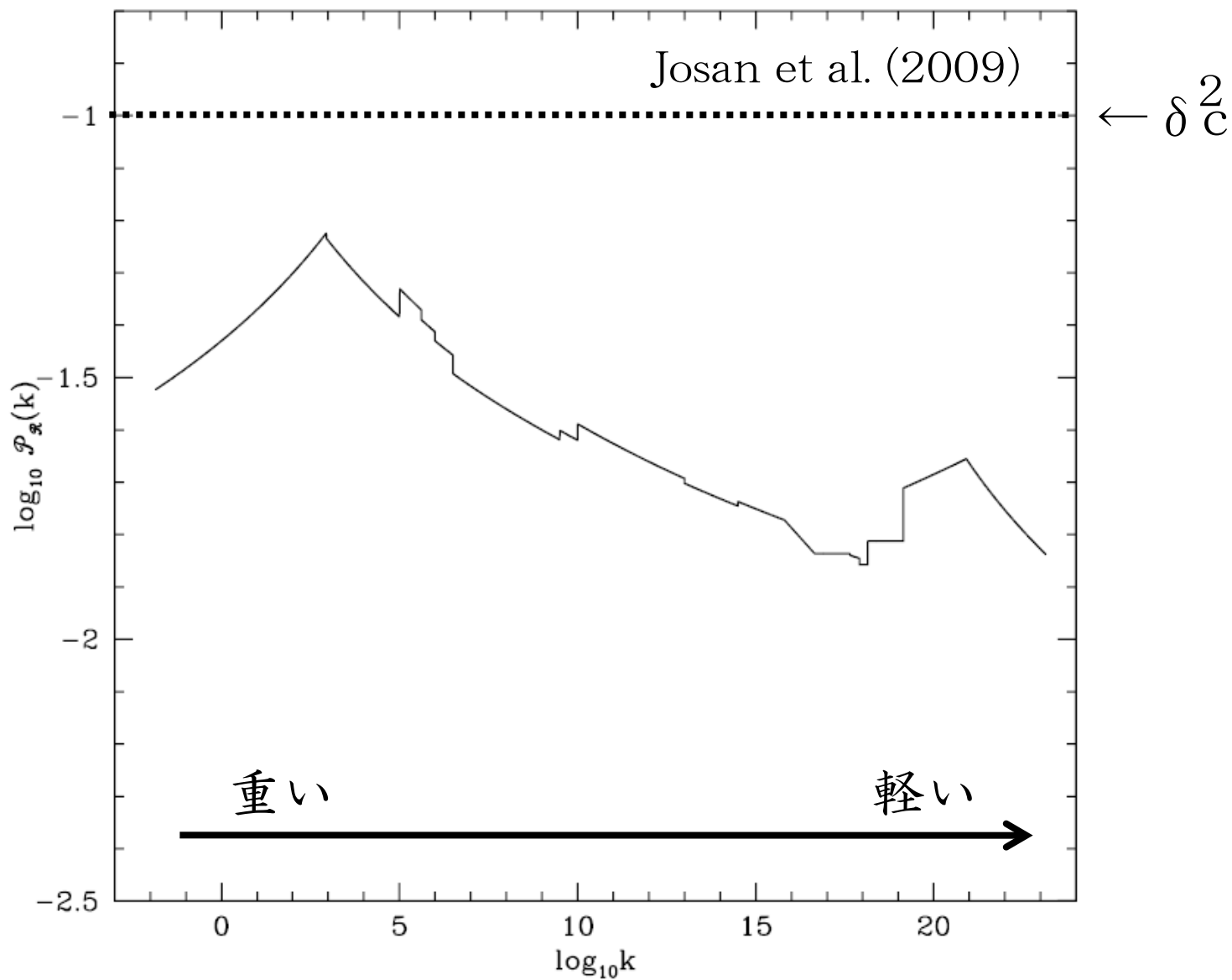
- ・ 重カレンズ
- ・ wide binary disruption : BHが通りがけるとbinaryが壊れる
- ・ disk heating : diskの速度分散が大きくなる

	Gravitational constraints	Josan et al. (2009)
present day PBH density	$M_{\text{PBH}} > 5 \times 10^{14} \text{ g}$	$< 2 \times 10^{-19} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
GRB femtolensing	$10^{-16} M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < 10^{-13} M_{\odot}$	$< 1 \times 10^{-19} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
Quasar microlensing	$0.001 M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < 60 M_{\odot}$	$< 1 \times 10^{-19} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
Radio source microlensing	$10^6 M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < 10^8 M_{\odot}$	$< 6 \times 10^{-20} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
Halo density ^a		
LMC Microlensing	$10^{-7} M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < 10^{-6} M_{\odot}$	$< 3 \times 10^{-20} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
	$10^{-6} M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < M_{\odot}$	$< 1 \times 10^{-20} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
	$M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < 10 M_{\odot}$	$< 5 \times 10^{-20} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
Wide binary disruption	$10^3 M_{\odot} < M_{\text{PBH}} < 10^8 M_{\odot}$	$< 3 \times 10^{-20} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{f_M 5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{1/2}$
Disk heating	$M_{\text{PBH}} > 3 \times 10^6 M_{\odot}$	$< 2 \times 10^6 \frac{1}{f_M^{1/2}} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{5 \times 10^{14} \text{ g}} \right)^{-1/2}$

重いPBHへの制限②



ゆらぎへの制限



最近の発展

重いPBHはもっと活動的だ (Ricotti, Ostriker & Mack, 2008)

PBHへのガスの降着

- 降着円盤から紫外線やX線が出る
- 宇宙の熱史、再イオン化史を変える
- CMBゆらぎ、黒体スペクトルに影響する

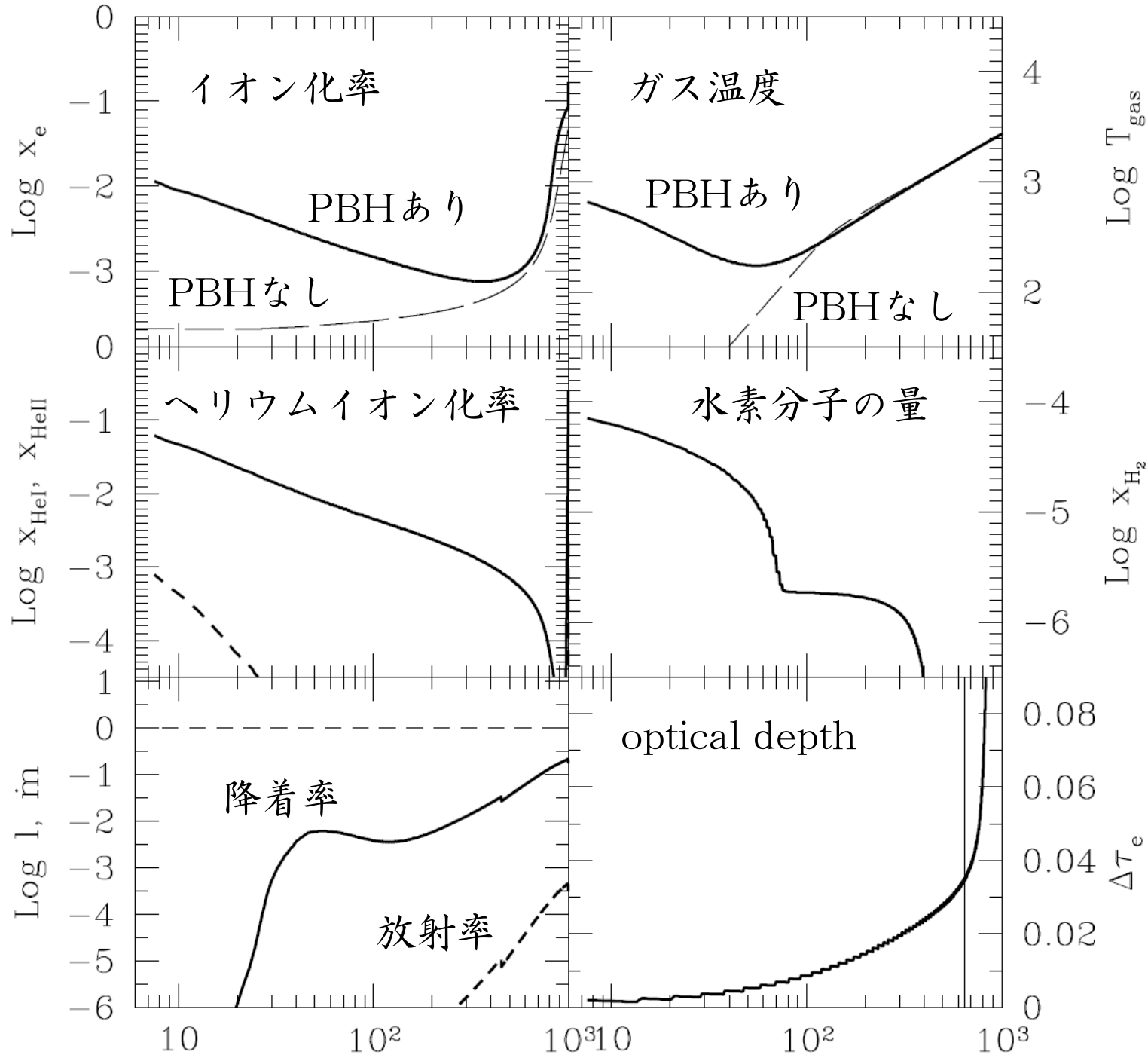
考えるべきこと

- ・ PBHへのダークマターの降着
- ・ ガスの降着と円盤の形成
 - PBHの固有運動
 - ガスの角運動量、音速、粘性
- ・ 円盤の放射
 - 紫外線：localにイオン化 → ガスの降着に影響
 - X線：globalにイオン化、加熱 → 熱史、再イオン化史

計算例

100Msun
f = 0.01%
の場合の
計算結果

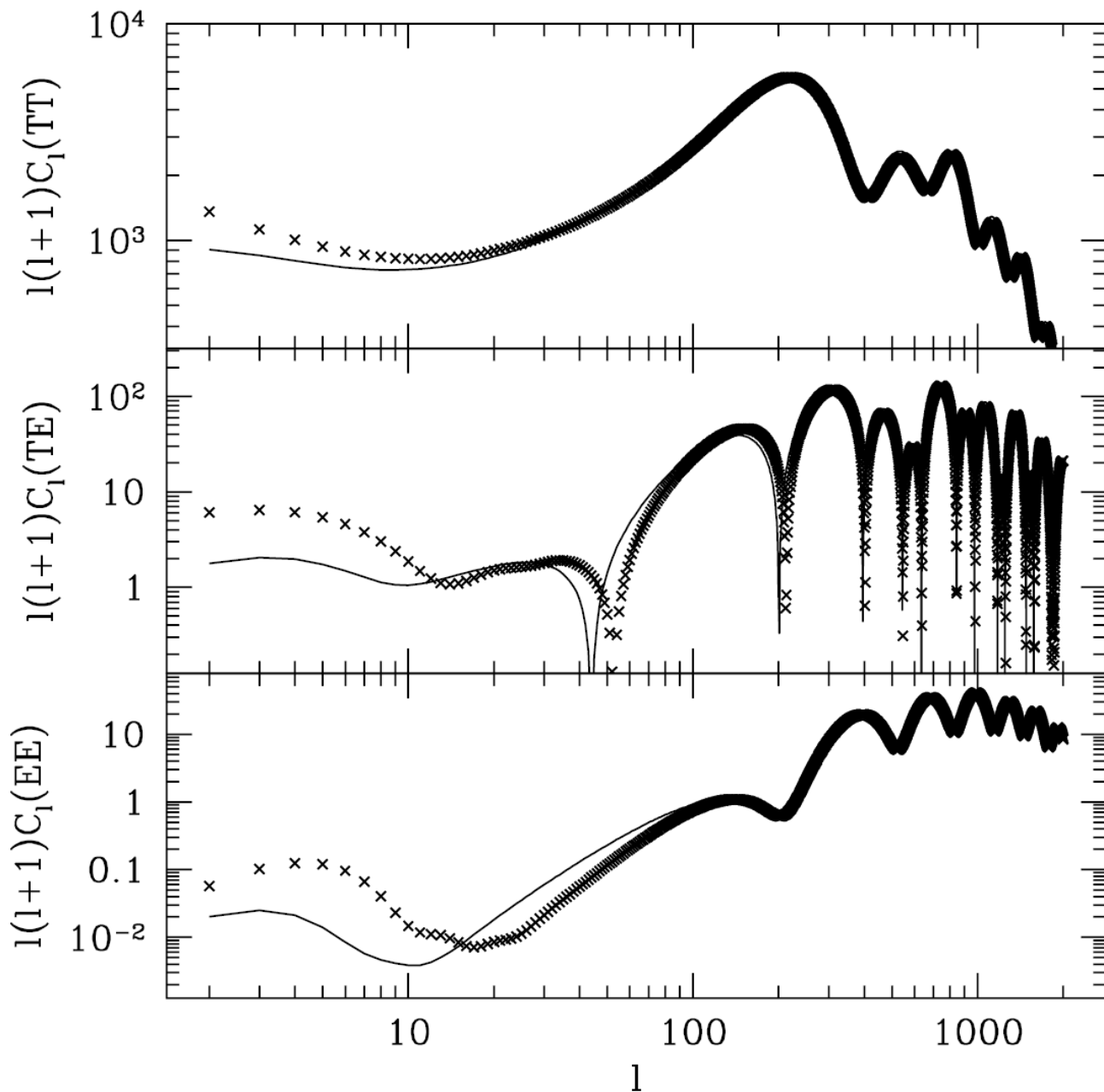
ちなみに
これは
OKな場合



CMBゆらぎ

PBHではすごく
早く再イオン化
→ ゆらぎは
小スケール
→ WMAPで言う
 $\tau \sim 0.1$
には寄与せず

右図は同じ τ で
 $z_{\text{re}} = 7, 11$
の場合のゆらぎ

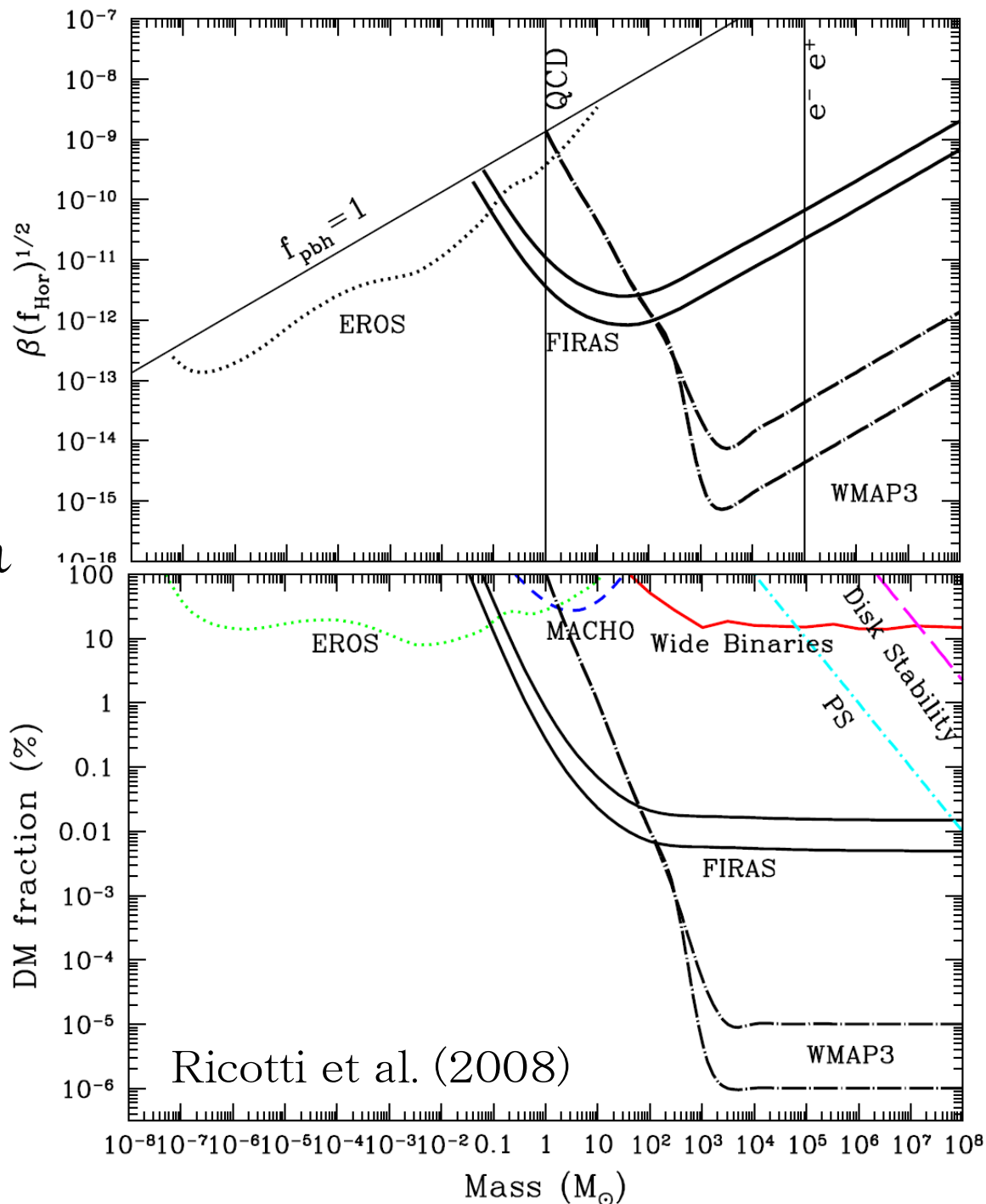


重いPBHへの制限

CMBによる重いPBHへの制限。
 これまでよりも
 何桁も改善している。

FIRAS：黒体からのずれ
 WMAP3：ゆらぎ
 (duty cycle = 0.1, 1)

今後、太陽質量±数桁の
 重いPBHを想定する



まとめ

原始ブラックホール

- ・初期宇宙に大きなゆらぎがあるとできる
- ・小スケールではゆらぎは制限されていない
- ・基本的にどんな質量でもあり得る
- ・軽いPBHはホーキング放射で蒸発し、
BBN、CMB、背景 γ 線、宇宙線反陽子などに影響
- ・重いPBHはMACHOとして重力的な現象を
引き起こし、その他にもガス降着を通して
再イオン化、CMBに影響

PBHがあれば面白いし、なくてもゆらぎへの制限となる

これまでの描像はバイナリーを考えると大きく変わる可能性がある。

3、バイナリー 原始ブラックホール

Nakamura et al. (1997)①

当時のMACHO探索 (LMCのmicrolensing)

- ・ MACHOが銀河のハロー質量の6割を占める
- ・ MACHOの質量は $0.5M_{\text{sun}}$ 程度
- ・ 8イベントのうち1つはバイナリーイベント

MACHOの正体は？

- ・ 普通に考えると白色矮星では数が足りない
- ・ ブラックホールだとするとPBHでしかあり得ない

PBHの一部はバイナリーになるだろう

- ・ バイナリーイベントを説明できるか
- ・ 合体したバイナリーからの重力波

やったこと

- ・ バイナリー形成条件
- ・ バイナリーの軌道要素の分布関数

結果

- ・ バイナリーイベントの比率を説明
- ・ LIGOで受かるイベントがseveral/year

Nakamura et al. (1997)②

バイナリーの形成過程

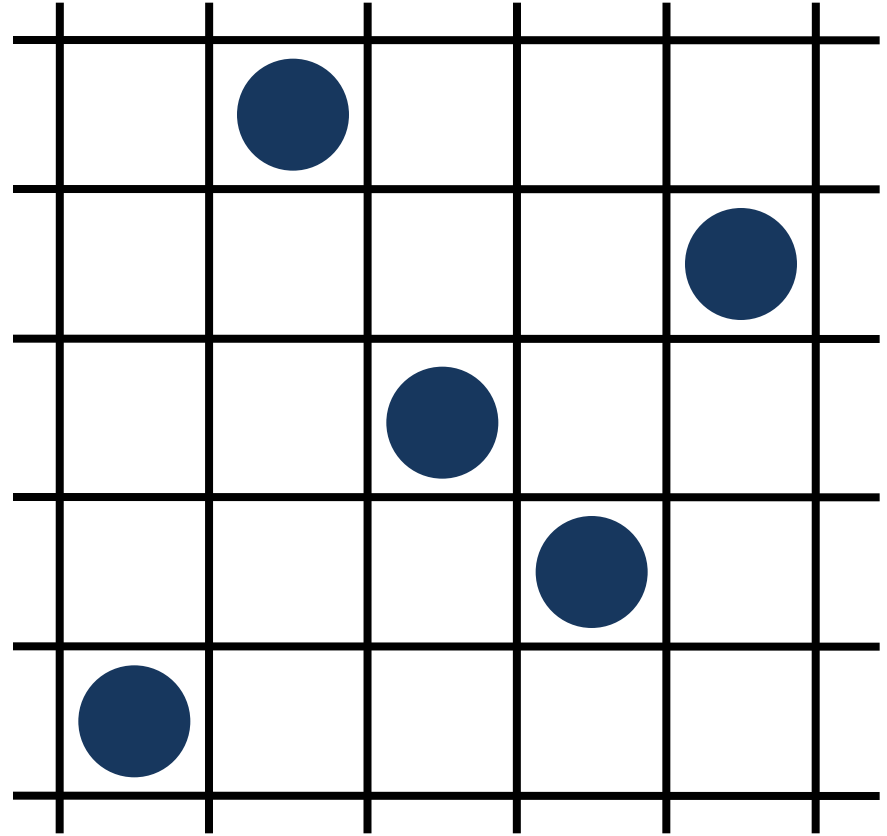
(i)生成時、どのhorizonがBHになるかはランダムに決まる。すると一番近いペアのseparationは平均間隔よりもだいたい小さい。

(ii)BHの生成後、しばらくするとペアは1つのhorizonに入る。

(iii)ペア周辺でlocalなBHエネルギー密度がダークマターのエネルギー密度よりも大きければ、そのうちペアはturn aroundして宇宙膨張からdecoupleする。

→ バイナリーの形成

→ その後重力波放射でいつか合体



Nakamura et al. (1997)③

軌道要素の決定

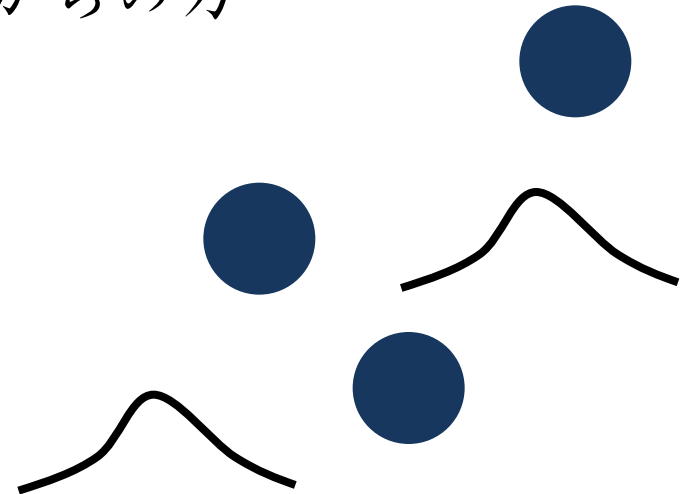
- 単純に考えるとturn aroundの後2つのPBHは合体してしまう
- しかし様々な効果で相対的な角運動量が生まれる
 - PBHの固有運動
 - 第3のPBHからの潮汐力
 - 放射やダークマターのゆらぎからの力
- ペアの分布関数

$$r_0 = \alpha \bar{r}$$

$$\bar{r} = M_{\text{Pl}}^{-3/2} T_{\text{eq}}^{-1/3} M_{\text{BH}}^{5/6}$$

$$P(\alpha) = 3\alpha^2 e^{-\alpha^3}$$

$$\int_0^\infty P(\alpha) d\alpha = 1$$



Nakamura et al. (1997)④

軌道要素の分布関数

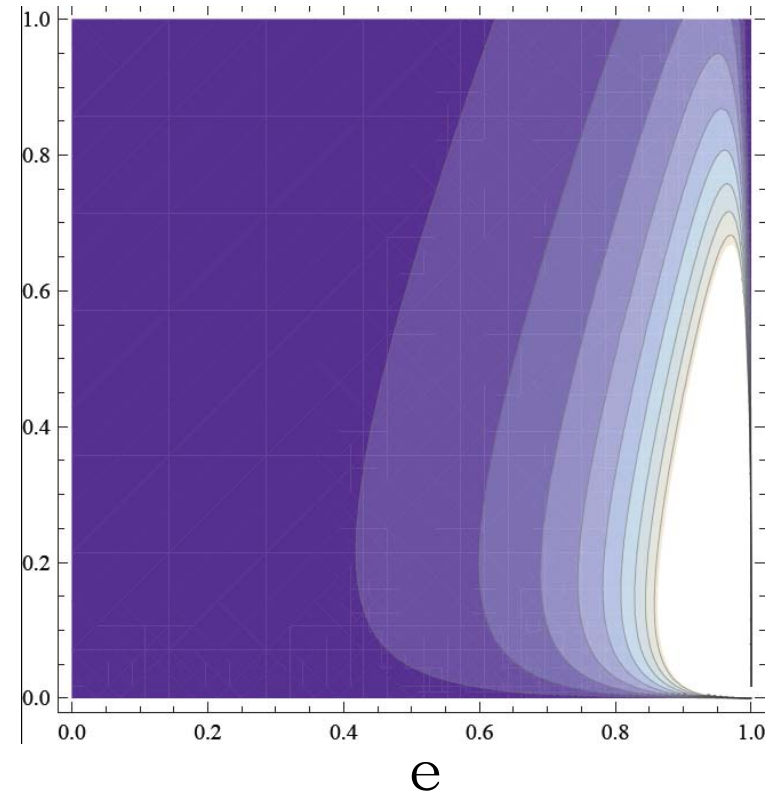
$$\frac{dP}{da de} = \frac{3}{2a_M} \sqrt{\frac{a}{a_M}} \frac{e}{(1-e^2)^{3/2}} \exp \left[- \left(\frac{a}{a_M} \right)^{3/4} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \right) \right]$$

↑ 第3のPBHを考慮に入れる

$$P(\alpha, \delta\alpha) = 18\alpha^2 (\alpha + \delta\alpha)^2 e^{-\alpha^3 - (\alpha + \delta\alpha)^3}$$

$$\int_0^\infty d\alpha \int_0^\infty d\delta\alpha P(\alpha, \delta\alpha) = 1$$

a/a_M



Nakamura et al. (1997)⑤

重力波放出で合体する時間スケール

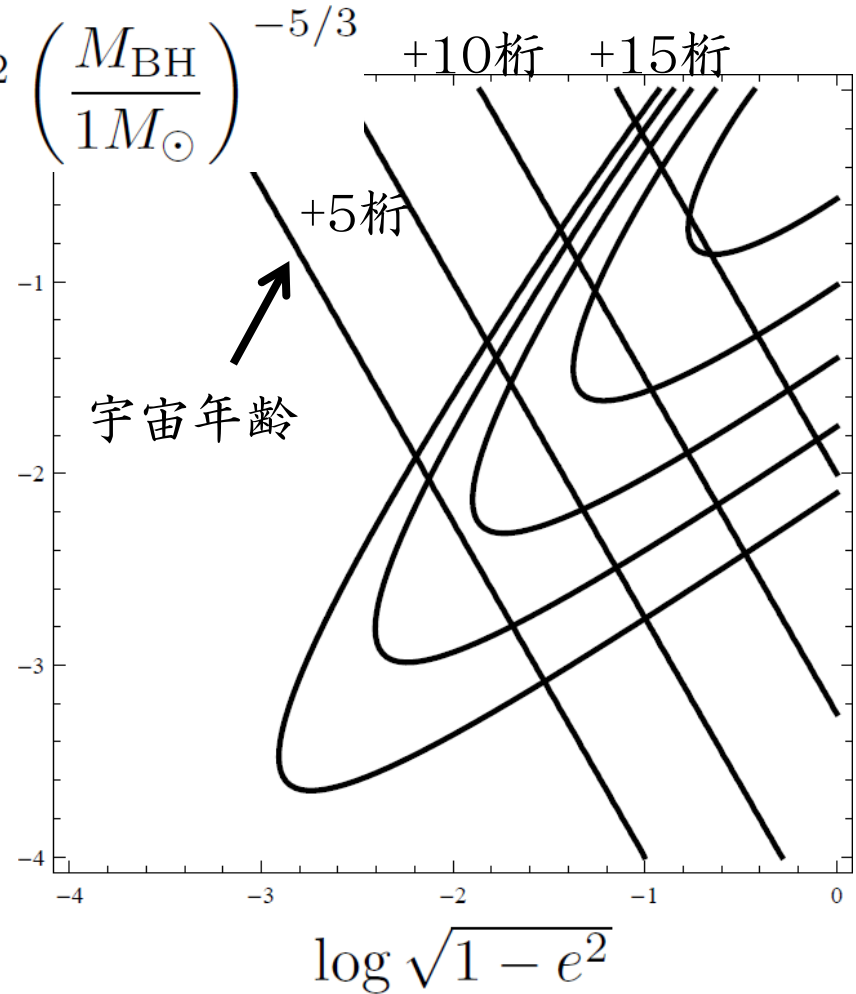
$$t_{\text{gw}} = \frac{5a^4}{256G^3 M_{\text{BH}}^3} (1 - e^2)^{7/2}$$

$$\approx 4 \times 10^{33} \left(\frac{a}{a_M} \right)^4 (1 - e^2)^{7/2} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{-5/3}$$

$$\log \frac{a}{a_M}$$

軌道要素の確率分布関数と
重力波放出の時間スケール

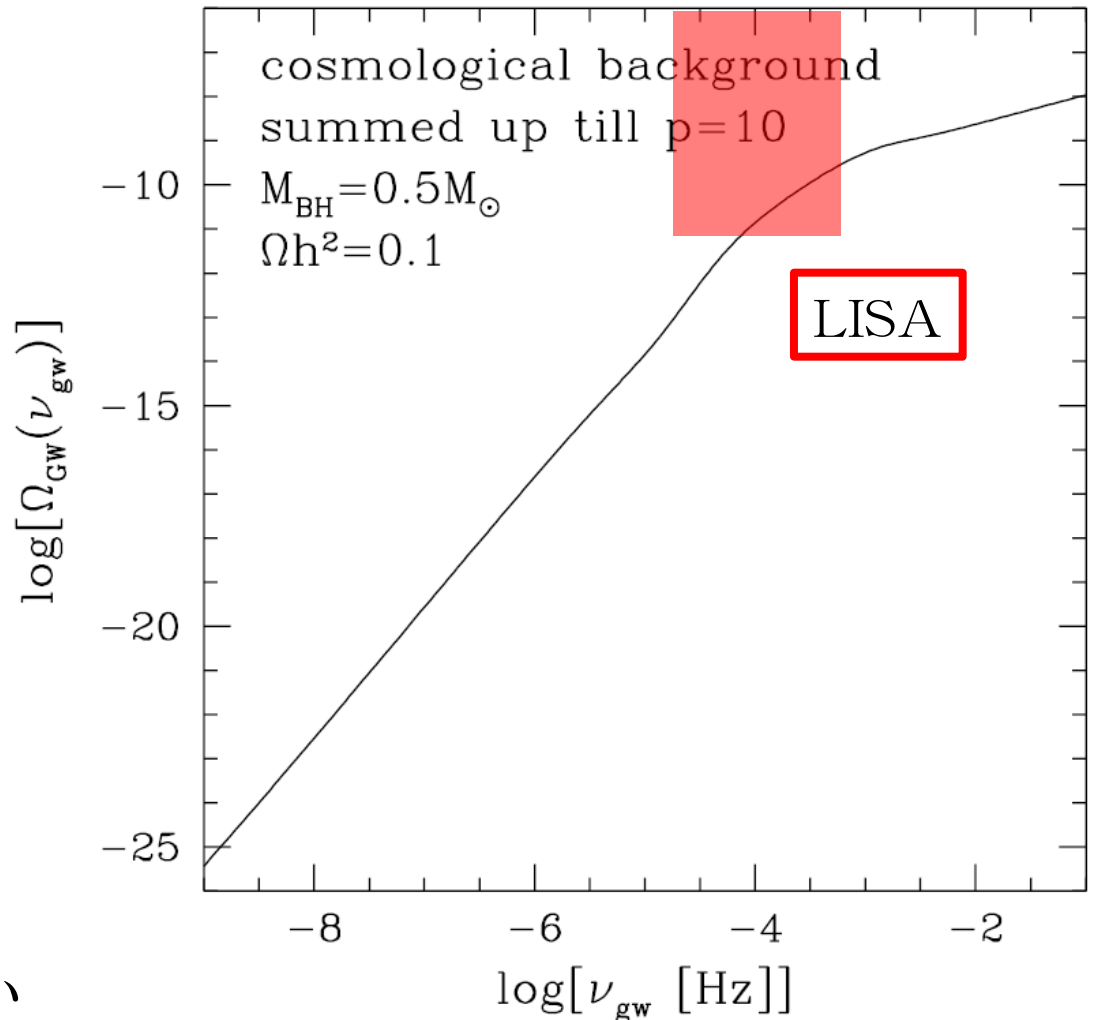
合体するのは全体の3%ほど
(小さな α と大きな $\delta \alpha$)



Nakamura et al. (1997)⑥

Ioka et al. (1999)
背景重力波への寄与

ごく一部のPBHしか
合体していないが
重力波はなかなか多い



新たなシナリオ

PBH生成



turn aroundによりbinary形成



ダークマターの降着 ($f \ll 1$ を想定)

ダークハロー形成



dynamical frictionによりseparationが縮まる

hard binary形成



ガス降着

circumbinary disk形成



放射効率up



diskとbinaryの重力的相互作用

さらに距離が縮まる



重力波放出が効き始める

合体



より厳しい制限

PBH生成からturn aroundまで

ある1つの質量のブラックホールを考える

$$T_{\text{BHF}} = 1 \sqrt{\frac{1M_{\odot}}{M_{\text{BH}}}} \text{ GeV}$$

$$r_0 = \alpha \bar{r}$$

$$\bar{r} \sim 10^{-10} f^{-1/3} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{5/6} \text{ pc} \quad f: \text{ dark matter fraction}$$

turn aroundの条件

$$\rho_{\text{pair}} = \alpha^{-3} \rho_{\text{BH}} = \alpha^{-3} f \rho_{\text{DM}} = \rho_{\gamma}$$

$$T_{\text{ta}} = \alpha^{-3} f T_{\text{eq}}$$

$$r_{\text{ta}} = \frac{T_{\text{BHF}}}{T_{\text{ta}}} r_0 = \alpha^4 f^{-4/3} T_{\text{eq}}^{-4/3} M_{\text{BH}}^{1/3}$$

$$\sim 0.05 \alpha^4 f^{-4/3} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{5/6} \text{ pc}$$

$\alpha^3 f^{-1} < 1$
でなければ
そもそも
t.a.しない。
 $\alpha \lesssim f^{1/3}$
を考える。

数勘定

ダークマターのうちPBHの割合

$$\frac{\rho_{\text{PBH}}}{\rho_{\text{DM}}} = f$$

初期separationの分布関数

$$\frac{dP}{d\alpha} = 3\alpha^2 e^{-\alpha^3}$$

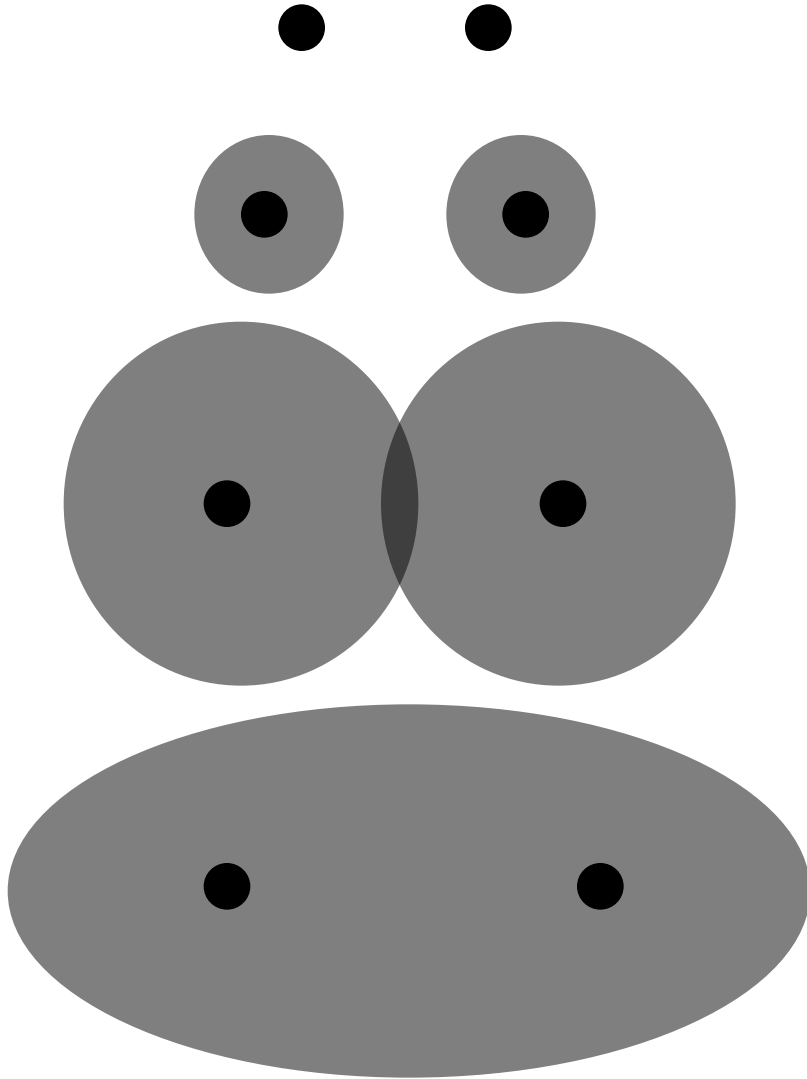
PBHのうちbinaryになる割合

$$\int_0^{f^{1/3}} \frac{dP}{d\alpha} d\alpha = \left[e^{-\alpha^3} \right]_{f^{1/3}}^0 = 1 - e^{-f} \approx f$$

ダークマターのうちbinary PBHになる割合

$$\frac{\rho_{\text{bPBH}}}{\rho_{\text{DM}}} = f^2$$

ダークハローの形成



PBH生成

PBHのまわりのダークマターが
turn aroundしてハローになる

ハローがだんだん成長

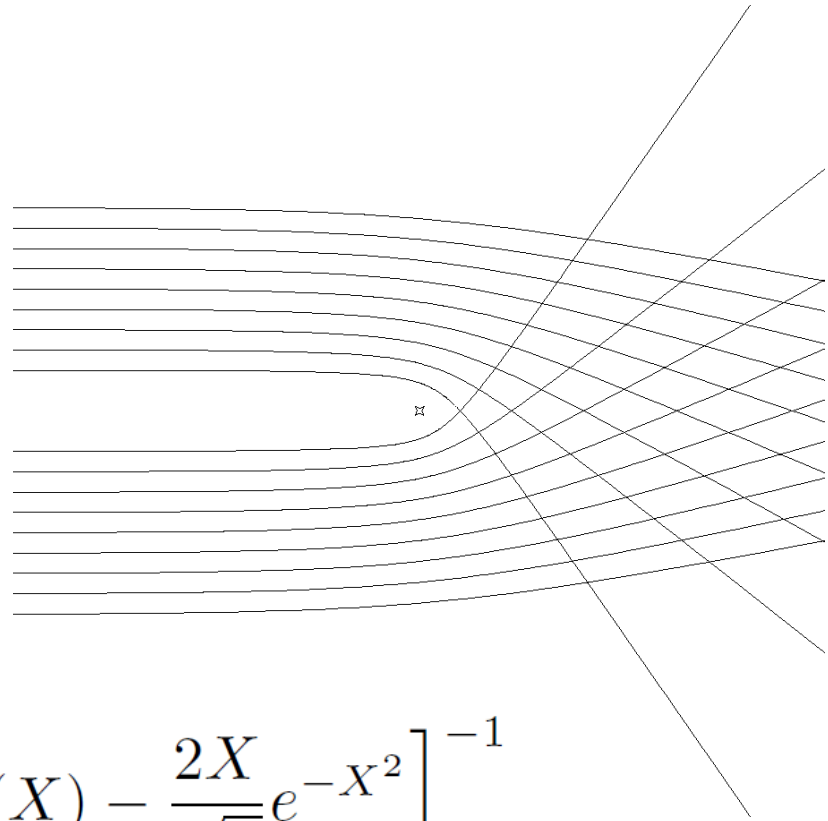
2つのPBHがturn aroundして
ハローも合体

$$M_{\text{halo}} \sim \rho_{\text{DM}} r_{\text{ta}}^3 \sim \alpha^3 f^{-1} M_{\text{BH}}$$

ハローはBHよりちょっと軽い

dynamical friction

PBHがダークハローの中を運動するとき、dynamical frictionを受けて相対的な角運動量を失い、軌道が縮まる。



時間スケール

$$t_{\text{df}} \sim \frac{v_{\text{BH}}^3}{4\pi G^2 M_{\text{BH}} \rho_{\text{DM}} \ln \Lambda} \left[\text{erf}(X) - \frac{2X}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} \right]^{-1}$$
$$= \Gamma \alpha^3 f^{-1} \frac{M_{\text{Pl}}}{T_{\text{eq}}^2} \sim 10^4 \alpha^3 f^{-1} \text{year} \quad X \equiv v_{\text{BH}} / (\sqrt{2}\sigma)$$

$$H t_{\text{df}} = \Gamma \alpha^{-3} f \left(\frac{T}{T_{\text{ta}}} \right)^2 = \Gamma \alpha^3 f^{-1} \left(\frac{T}{T_{\text{eq}}} \right)^2 \quad \Gamma = O(0.1)$$

hard binaryの形成

dynamical frictionはbinaryがhard、つまりまわりのダークマターの影響を受けなくなるまで続く。

$$\frac{GM_{\text{BH}}^2}{a_{\text{h}}} = \rho_{\text{halo}} a_{\text{h}}^3$$

$$a_{\text{h}} = \alpha^{9/4} f^{-3/4} M_{\text{Pl}}^{-1/2} T_{\text{eq}}^{-1} M_{\text{BH}}^{1/2}$$

$$\sim 5 \times 10^{-5} \text{ pc } \alpha^{9/4} f^{-3/4} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{1/2}$$

turn around半径から3桁縮まった。dynamical frictionが終了したときにeccentricityがどうなっているかはよくわかっていない。重力波放射を考えるならば $e = 0$ とするのがconservative。すると $e = 0$ でも重力波放出の時間スケールが12桁縮まった！（でもまだ宇宙年齢より10桁長い。）

circumbinary diskの形成①

球対称にガスがPBHに降ってくる
(Bondi降着)。Bondi半径は

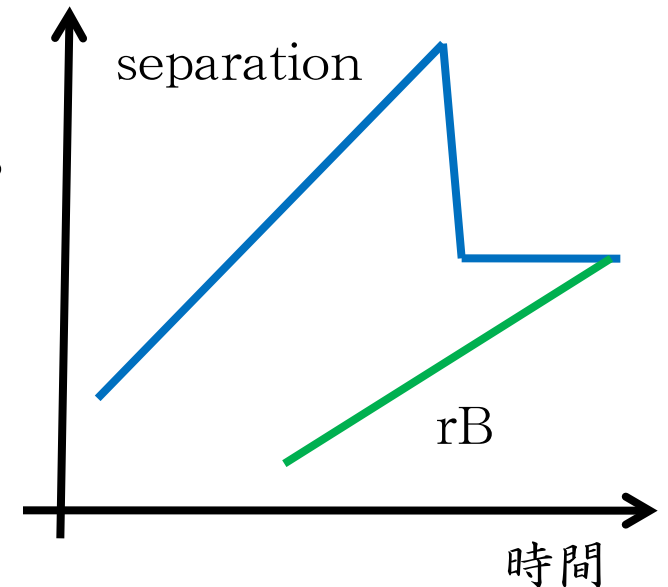
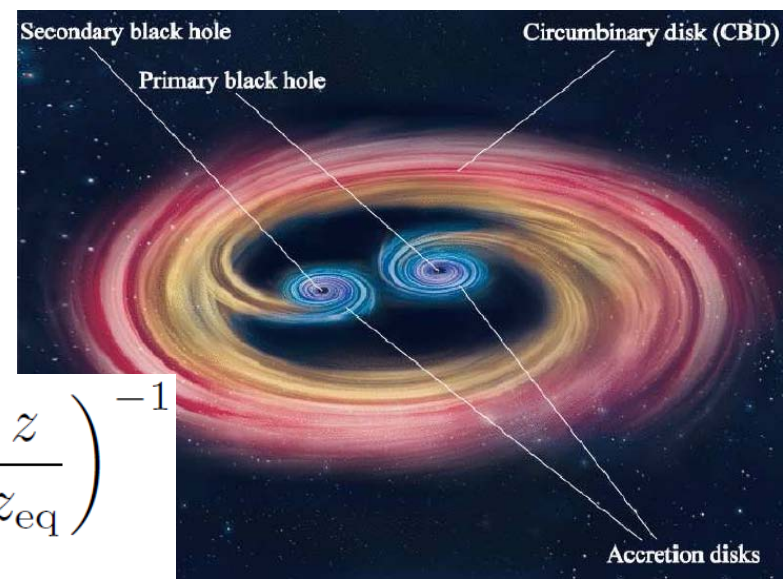
$$r_B = \frac{GM_{\text{BH}}}{c_s^2} \sim 4 \times 10^{-5} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_\odot} \right) \left(\frac{1+z}{1+z_{\text{eq}}} \right)^{-1}$$

$$c_s \sim 3 \left(\frac{1+z}{1+z_{\text{eq}}} \right)^{1/2} \text{ km/s}$$

初めのうちは個々のPBHに自由落下するが、Bondi半径がseparationを超えるとcircumbinary diskを形成する。

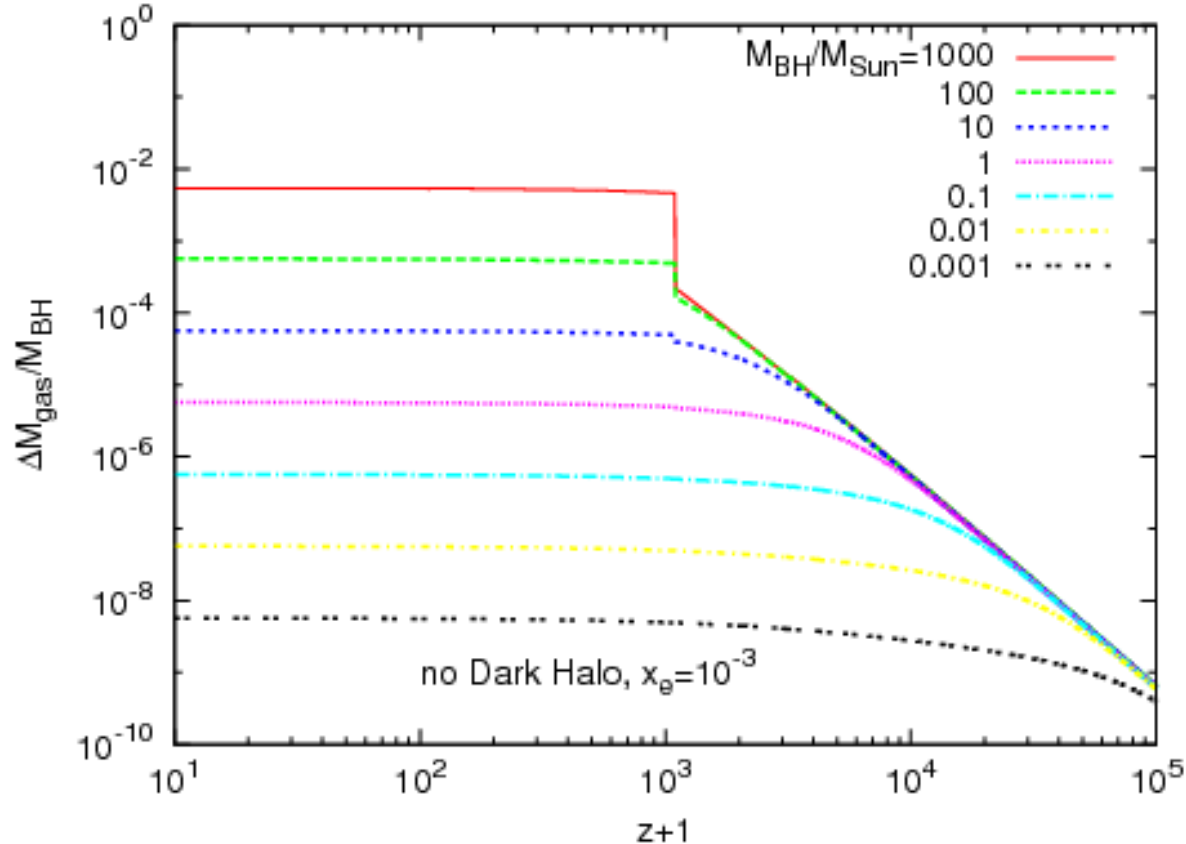
$$\frac{a_h}{r_B} \sim \alpha^{9/4} f^{-3/4} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_\odot} \right)^{-1/2} \left(\frac{1+z}{1+z_{\text{eq}}} \right)$$

$$z_{\text{cbd}} \sim z_{\text{eq}} \alpha^{-9/4} f^{3/4} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_\odot} \right)^{1/2}$$



circumbinary diskの形成②

Ricotti et al. (2008)でsingle PBHへのガスの降着量が調べられている。 $a < r_B$ ならこれはcircumbinary diskの量を見積もるのに使ってもいいだろう。



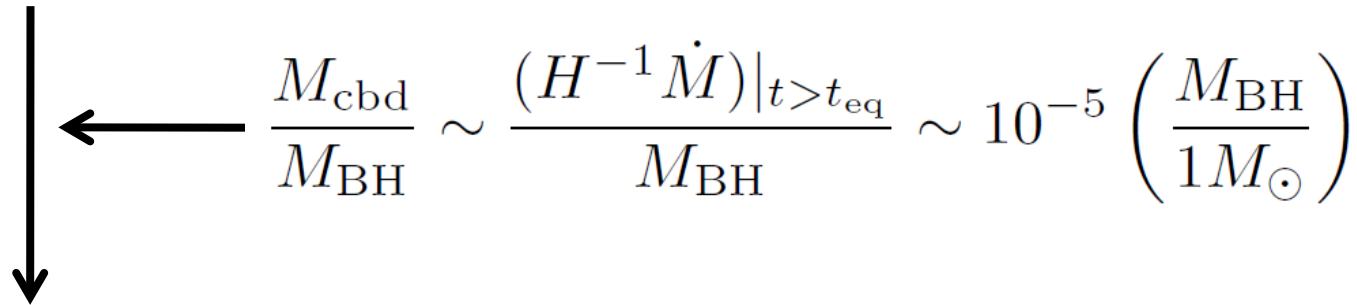
$$\frac{M_{\text{cbd}}}{M_{\text{BH}}} \sim \frac{(H^{-1} \dot{M})|_{t > t_{\text{eq}}}}{M_{\text{BH}}} \sim 10^{-5} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1 M_{\odot}} \right)$$

circumbinary diskとbinaryの相互作用

Hayasaki (2008)によるとbinaryがcircumbinary diskに角運動量を渡して合体する時間スケールは、粘性の時間スケールとBH/disk mass比によって決まる。

$$t_{\text{gas}} = t_{\text{vis}} \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{cbd}}}$$

$$t_{\text{vis}} \sim 50 \text{ year } \alpha^{9/8} f^{-3/8} \left(\frac{a}{a_h} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{3/4}$$


$$\frac{M_{\text{cbd}}}{M_{\text{BH}}} \sim \frac{(H^{-1} \dot{M})|_{t > t_{\text{eq}}}}{M_{\text{BH}}} \sim 10^{-5} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)$$

$$t_{\text{gas}} \sim 5 \times 10^6 \text{ year } \alpha^{9/8} f^{-3/8} \left(\frac{a}{a_h} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{-1/4}$$

重力波フェイズへ

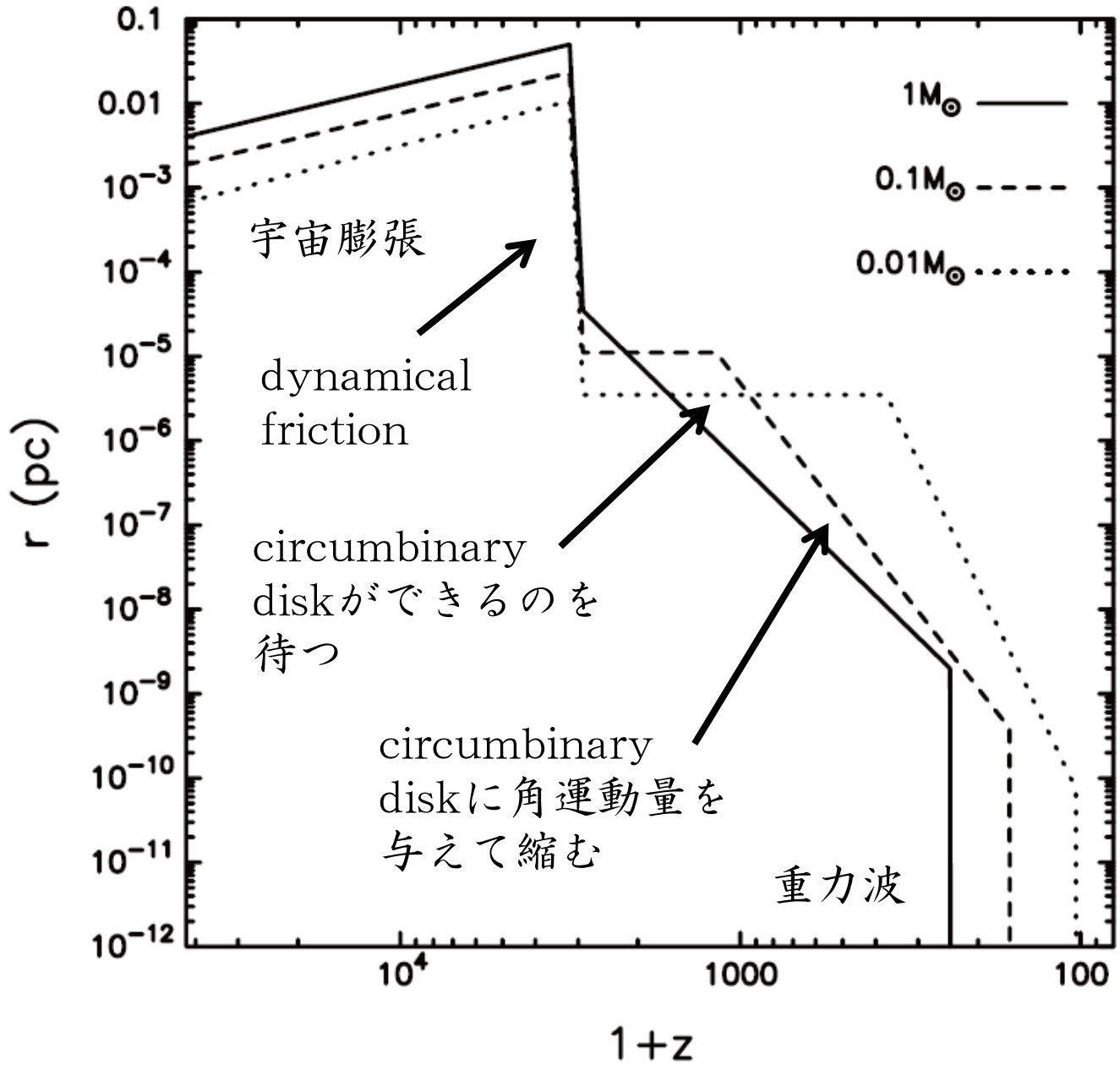
separationが縮んでいくと最後の最後に重力波が一番効くようになる。その時刻とそのときのseparationは

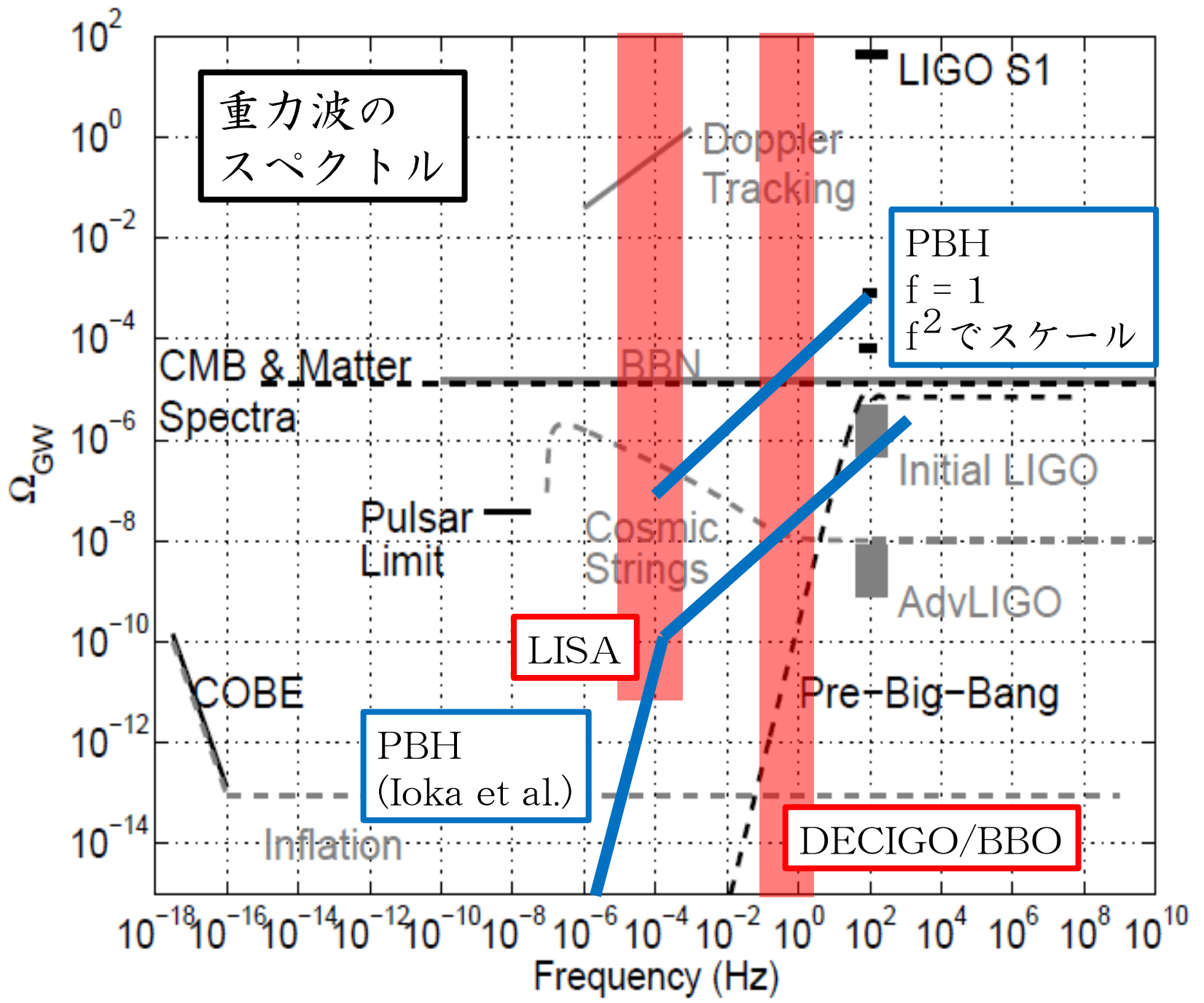
$$z_{\text{gw}} = 200\alpha^{3/4}f^{-1/4} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{-1/6}$$

$$a_{\text{gw}} = 3 \times 10^{-9}\alpha^{-9/4}f^{3/4} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1M_{\odot}} \right)^{3/14}$$

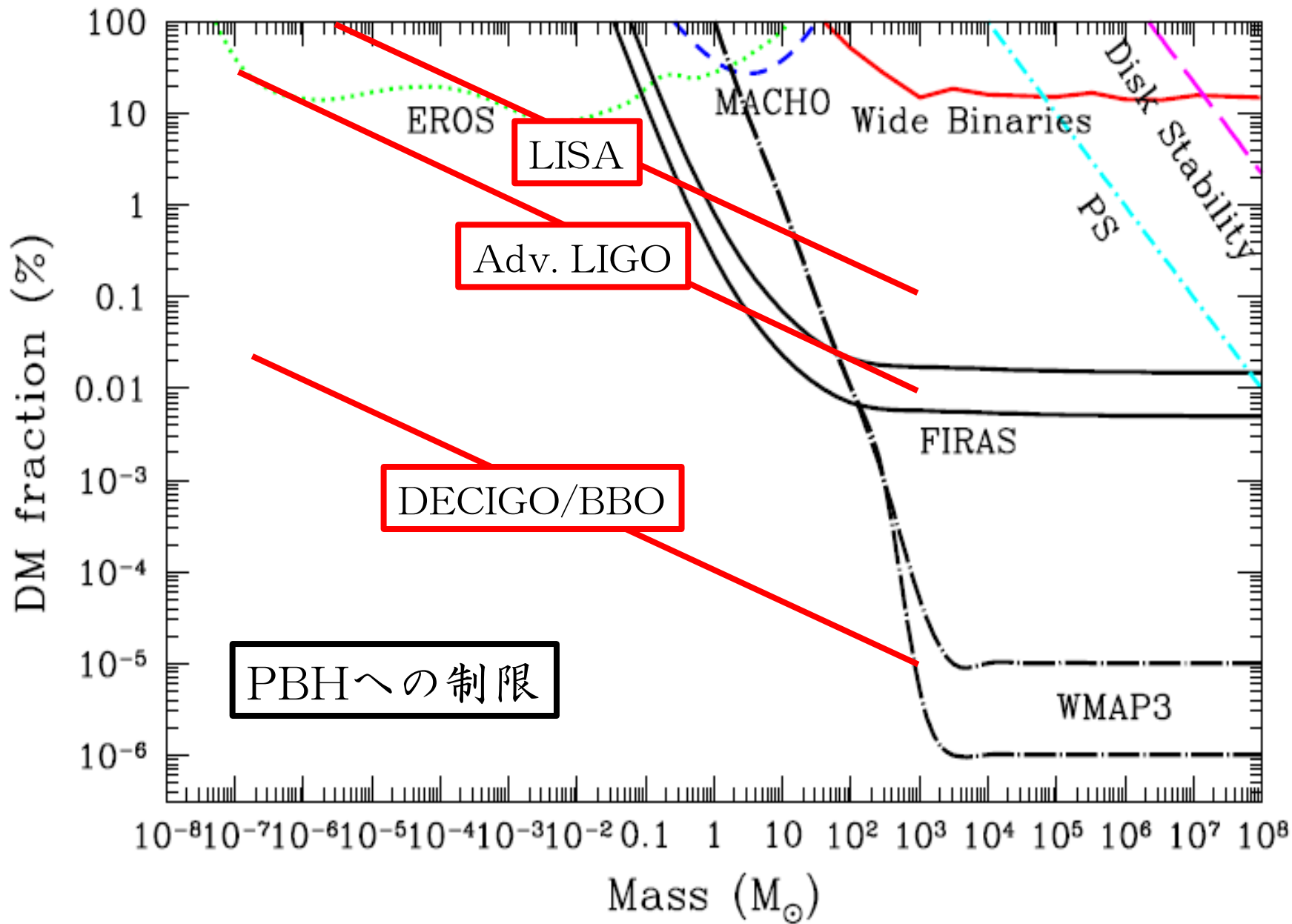
これで $\alpha \lesssim f^{1/3}$ というそんなに特殊でないペアでも $z = 200$ で合体することがわかった。

ペアの進化のまとめ





重力波によるPBHへの制限



4、まとめと展望

まとめ

binary PBHの新しい進化シナリオ

- binary PBH : PBHのうち f の割合で存在
- ダークハローを形成
- ダークマターからdynamical friction
- ガスが降着してcircumbinary diskを形成
- 角運動量をdiskに渡して縮む
- 最後は重力波放出で合体
- 一般的にかなり早い時期に合体してしまう
- 重力波がたくさん出る

展望

- 1、円盤からの放射、そして再イオン化、さらにCMBへ。
 - ・制限はだいぶ厳しく広範囲になるはず
 - ・相当大変な仕事だがやる価値はあるだろう
- 2、1回合体した後、さらに合体する？
 - ・単色スペクトルではなく、連続スペクトルだとPBHはランダムにできるのではなく、クラスターになっているだろう
 - ・球状星団はbinaryばかりだ
 - ・PBHは1回合体した後また他のPBHとbinaryを組んでまた合体して・・・最終的にだいぶ大きく成長するのではなかろうか
 - ・わりとどんな質量のPBHを出発点としても大質量BHを説明できたりしないだろうか