

SMBH/QSO形成

榎 基宏

(国立天文台天文データセンター)

Contents

1. Introduction

2. 銀河+SMBH/QSO形成モデル

Semi-Analytic Galaxy Formation Model (SA-model)

3. 応用1. SMBH連星からの重力波

背景放射、重力波バースト、重力波放射の反跳

4. 応用2. QSOの環境

QSO-QSO空間相関 と QSO-銀河空間相関

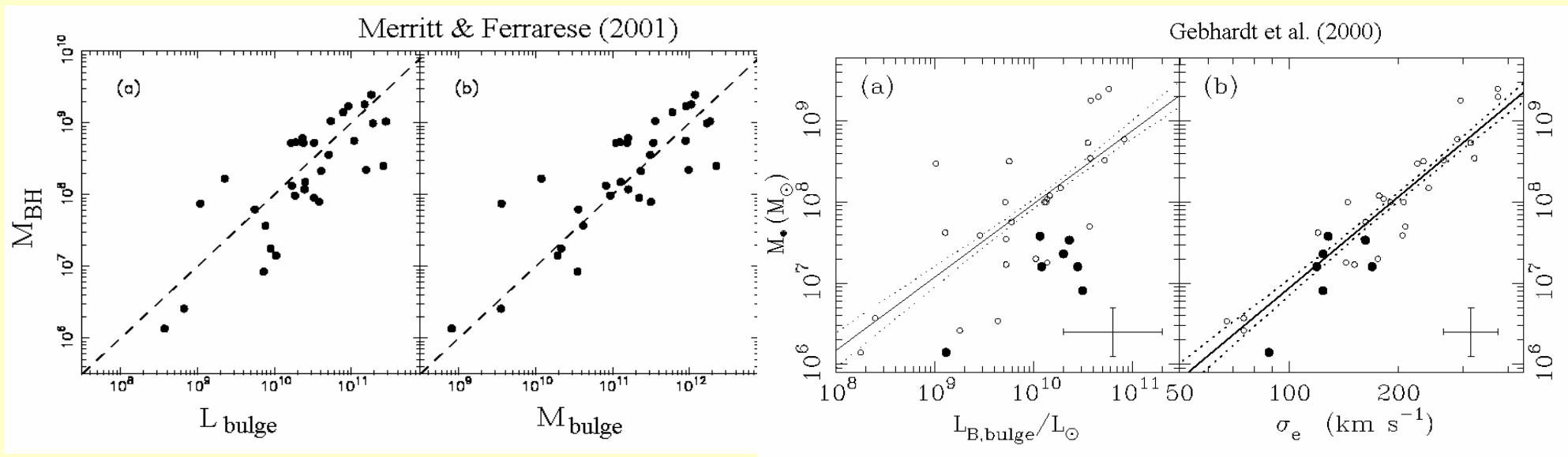
5. 議論

§ 1. Introduction

Spheroids (bulge or elliptical galaxy) in the local universe

多くの銀河の中心に**Super Massive Black Hole (SMBH)**

($M_{\text{BH}} = 10^6 - 9 M_{\text{SUN}}$)



--- $M_{\text{BH}} / M_{\text{bulge}} = 0.001 - 0.006$

--- $M_{\text{BH}} \propto \sigma_{\text{bulge}}^n, n = 3.7 - 5.3$

(e.g. Magorrian et al. 1998, Gebhardt et al 2000, Merritte & Ferrarese 2001)

⇒ 中心BHとバルジ(spheroid)に相関あり

一方high-zでは

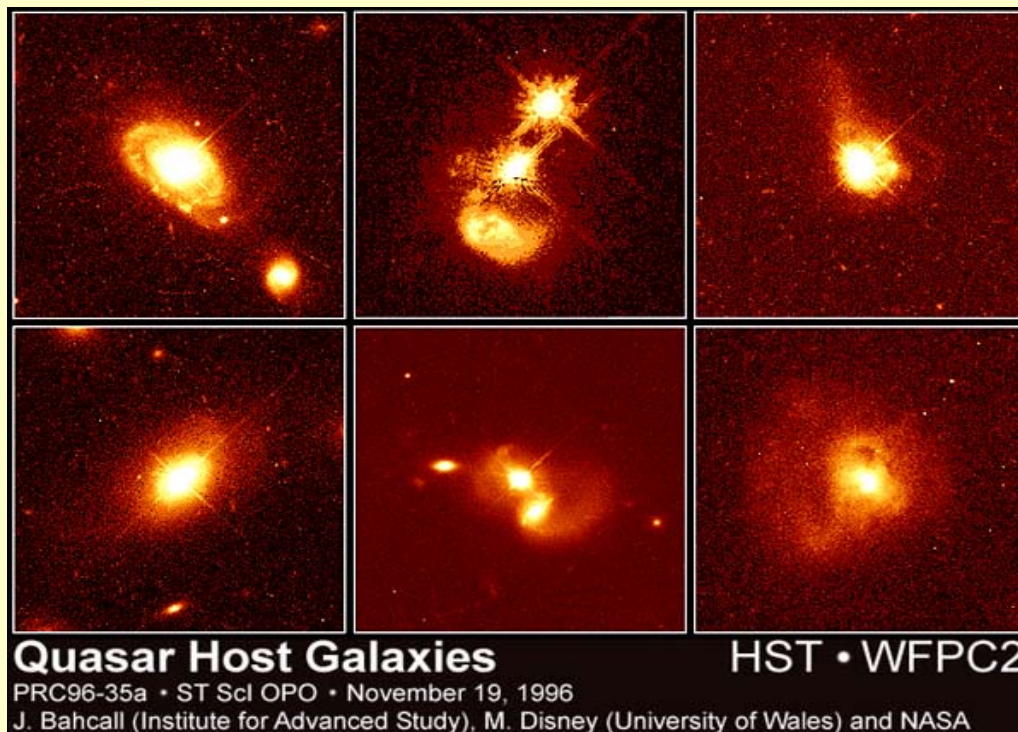
Quasar

非常に明るい ($L > 10^{11} L_{\text{SUN}}$)活動銀河核
銀河中心にあるSMBH への物質の降積が放射機構

*Quasar host galaxy の観測

多くが、**elliptical or bulge dominated** spiral galaxies。

(e.g. Bahcall et al. 1997; McLure et al. 1999)



様々な観測結果は

- Growth of SMBHs
- Formation of spheroids
- Formation of quasars

これらが密接に関連していることを示唆している。

⇒ 銀河形成とSMBHの成長は統一的に論じるべき

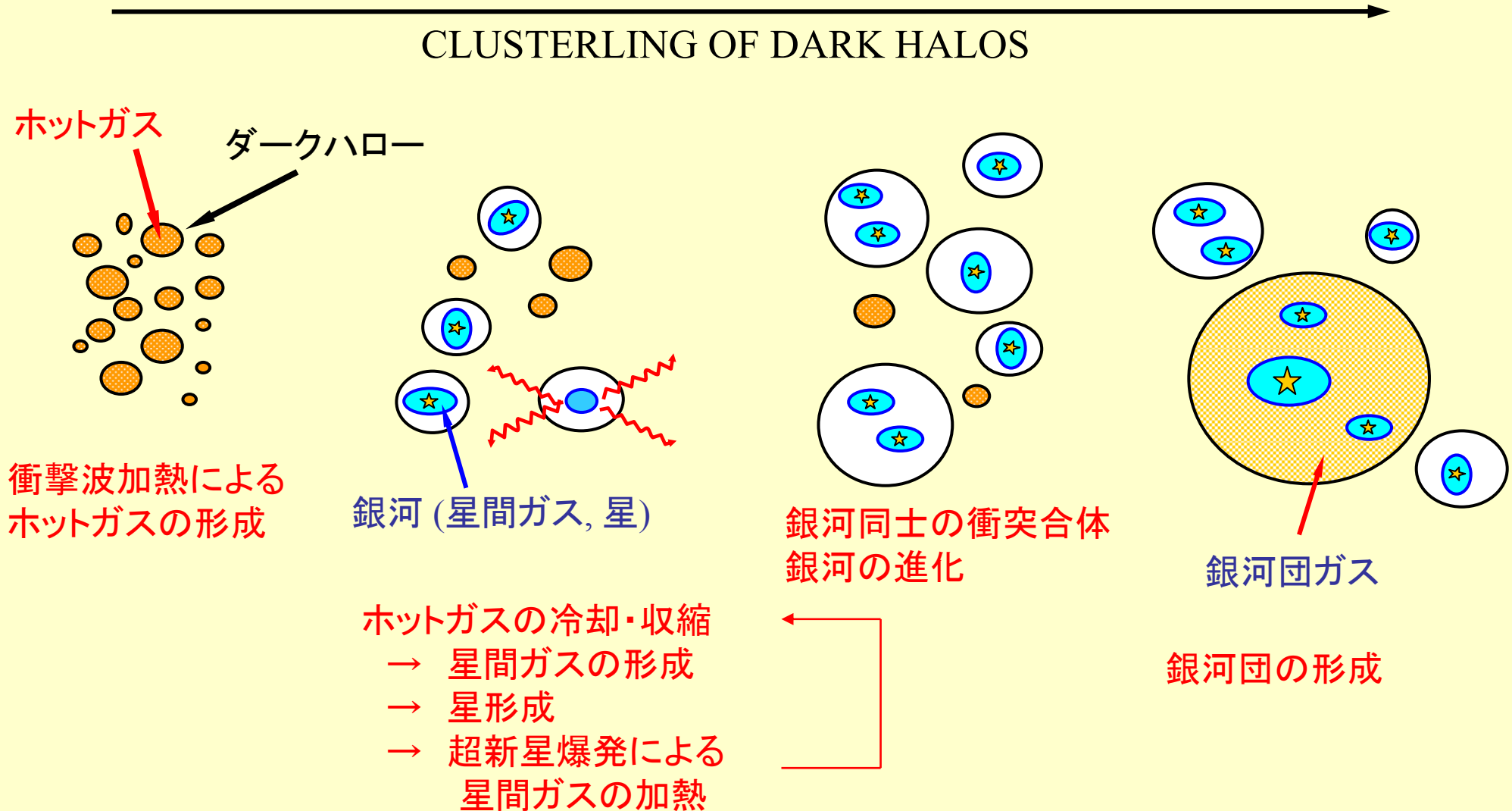
銀河：宇宙における物質分布の基本的な構成単位

銀河形成・SMBH形成

⇒ 宇宙論的な構造形成理論の枠組みの中で考える必要がある。

§ 2. SMBH/QSO Formation Model

Galaxy Formation in Hierarchical Clustering Scenario



SMBH growth model

(Nagashima et al 2001, 2002 + Enoki et al. 2003)

*近傍銀河での中心SMBHとbulge質量が比例

*Gas-dynamical simulation

galaxy major merger \Rightarrow

- starburst,
- bulge formation
- trigger of gaseous inflow

SMBH formation \Leftrightarrow Bulge formation via galaxy merger

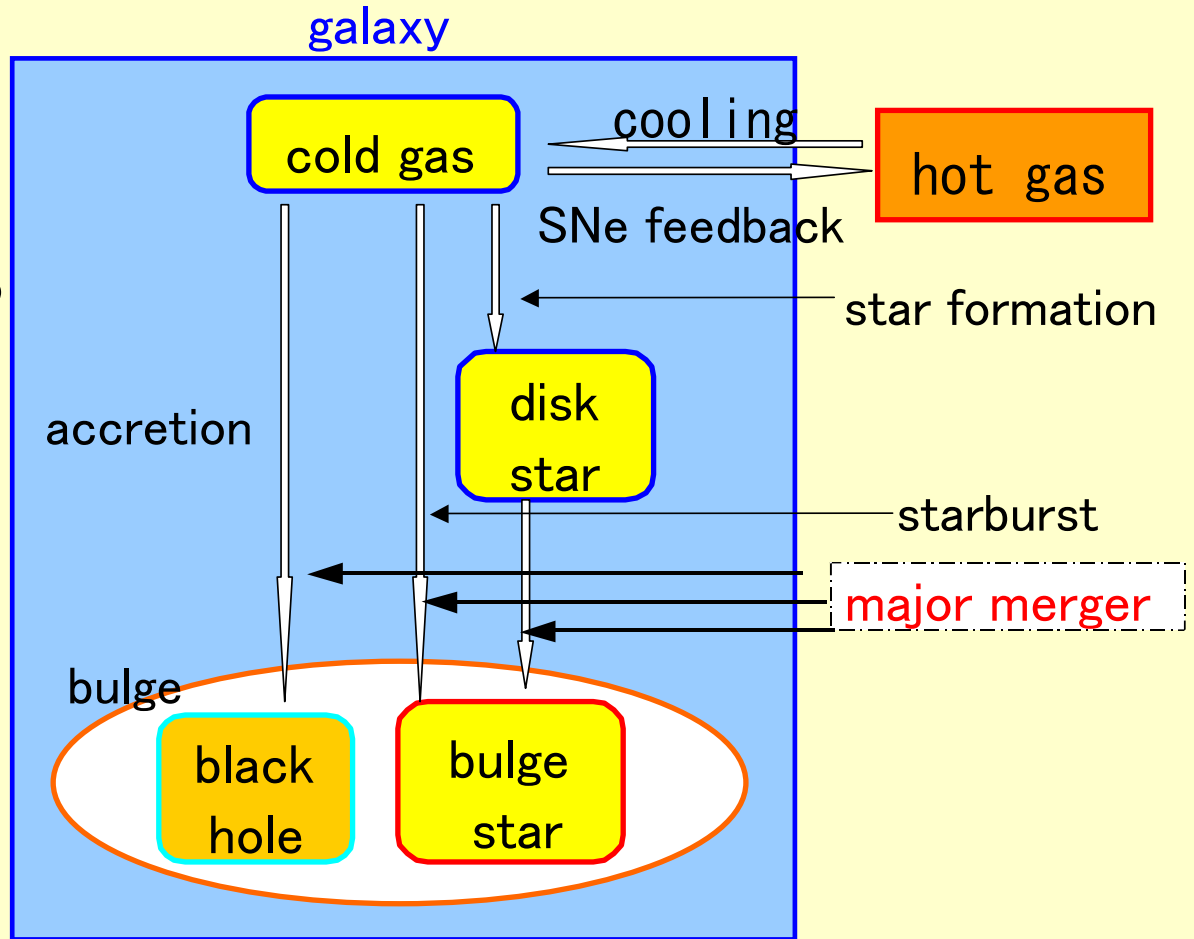
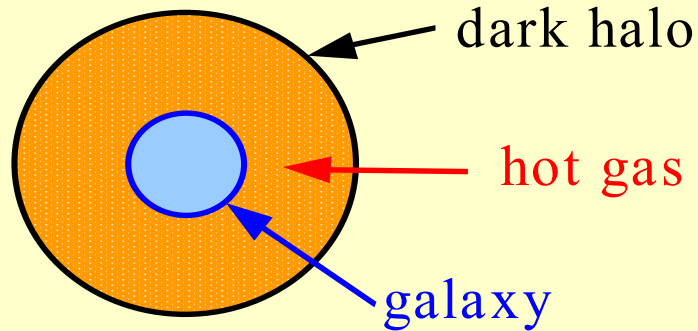
Assumptions

1) 銀河同士の合体が major mergerの時は、 cold gasの一部を SMBHに降着させる。

$$M_{acc} = f_{BH} M_{*,burst}$$

2) 銀河同士がmergeした時、バルジにあるSMBHsは binaryとなり、重力波を出してcoalesceする。

*gasの進化のサイクル



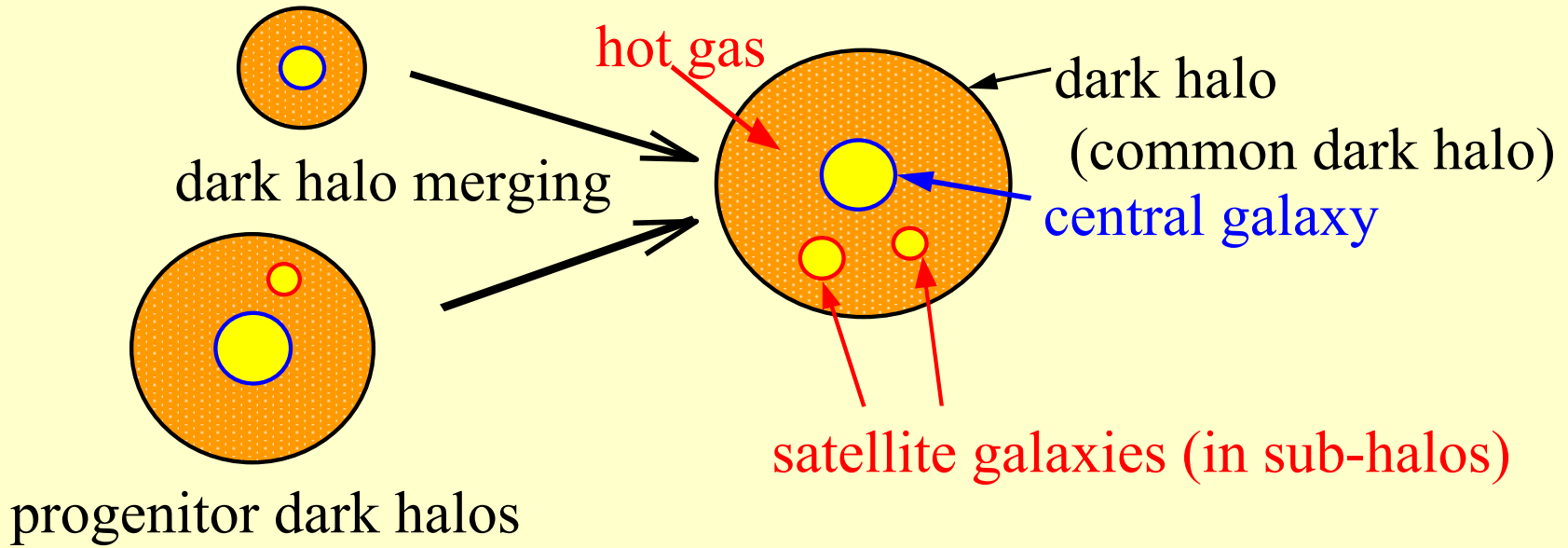
*galaxy = disk + bulge

disk = disk star + cold gas

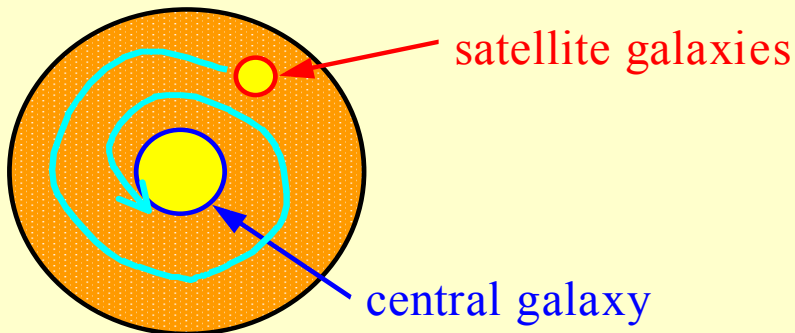
bulge = bulge star + black hole

* hot gas ; diffuse gas, virial temperature

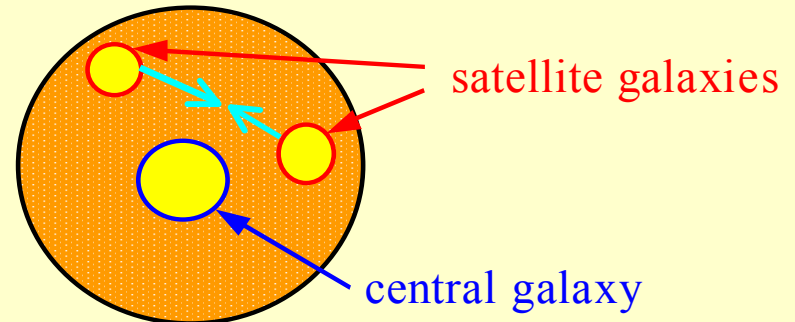
*Galaxy Merging (NOT dark halo merging)



- satellite-central merger
dynamical friction



- satellite-satellite merger
random collision



*Galaxy merger time scale

▪ Satellite-Central merger

t_{fric} (dynamical friction time-scale)

$$\tau_{\text{fric}} = \frac{260}{\ln \Lambda_c} \left(\frac{R_H}{\text{Mpc}} \right)^2 \left(\frac{V_{\text{circ}}}{10^3 \text{ km s}^{-1}} \right) \left(\frac{M_{\text{sat}}}{10^{12} M_{\odot}} \right)^{-1} \text{ Gyr},$$

▪ Satellite-Satellite merger

t_{coll} (random collision)

$$\tau_{\text{coll}} = \frac{500}{N^2} \left(\frac{R_H}{\text{Mpc}} \right)^3 \left(\frac{r_{\text{gal}}}{0.12 \text{ Mpc}} \right)^{-2} \left(\frac{\sigma_{\text{gal}}}{100 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-4} \left(\frac{\sigma_{\text{halo}}}{300 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \text{ Gyr},$$

(Makino & Hut 1997)

* 合体のタイプ

▪ Major merger: $m_{\text{small}}/m_{\text{large}} > f_{\text{bulge}}$

→ star burst + bulge formation

▪ Minor merger: $m_{\text{small}}/m_{\text{large}} < f_{\text{bulge}}$

→ 小さい銀河は、大きい銀河のdiskにする

* SMBH growth

$$M_{acc} = f_{BH} M_{*,burst}$$

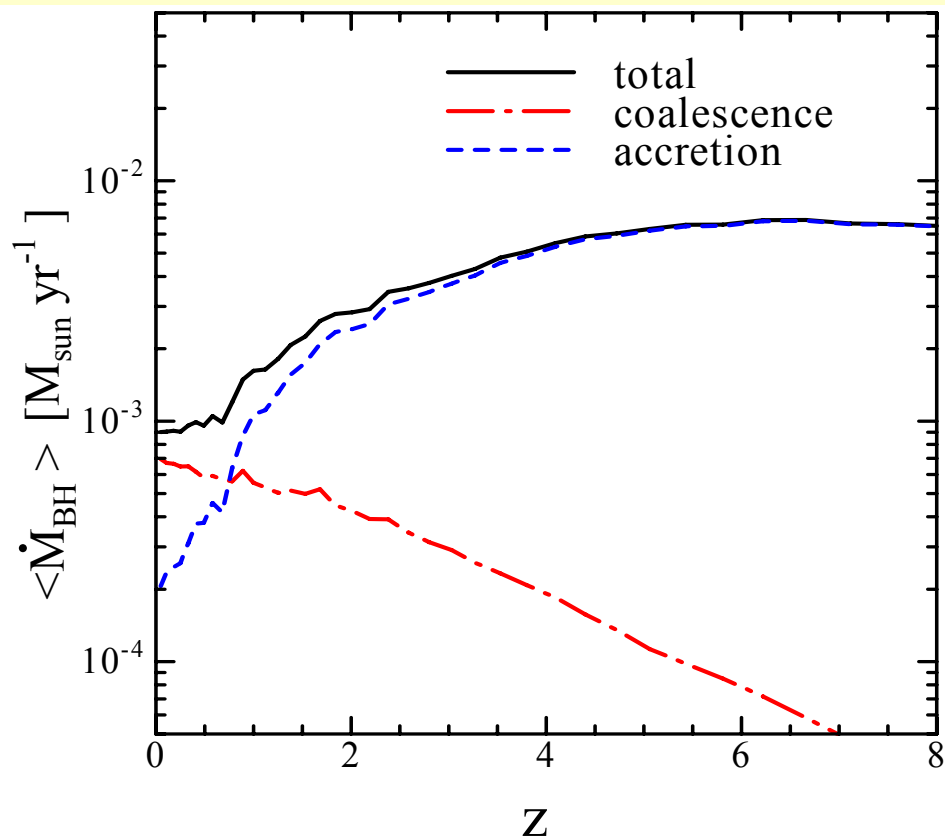
M_{BH} / M_{bulge} の結果と観測結果を
比べて f_{BH} を決める

$$\Rightarrow f_{BH} = 0.03$$

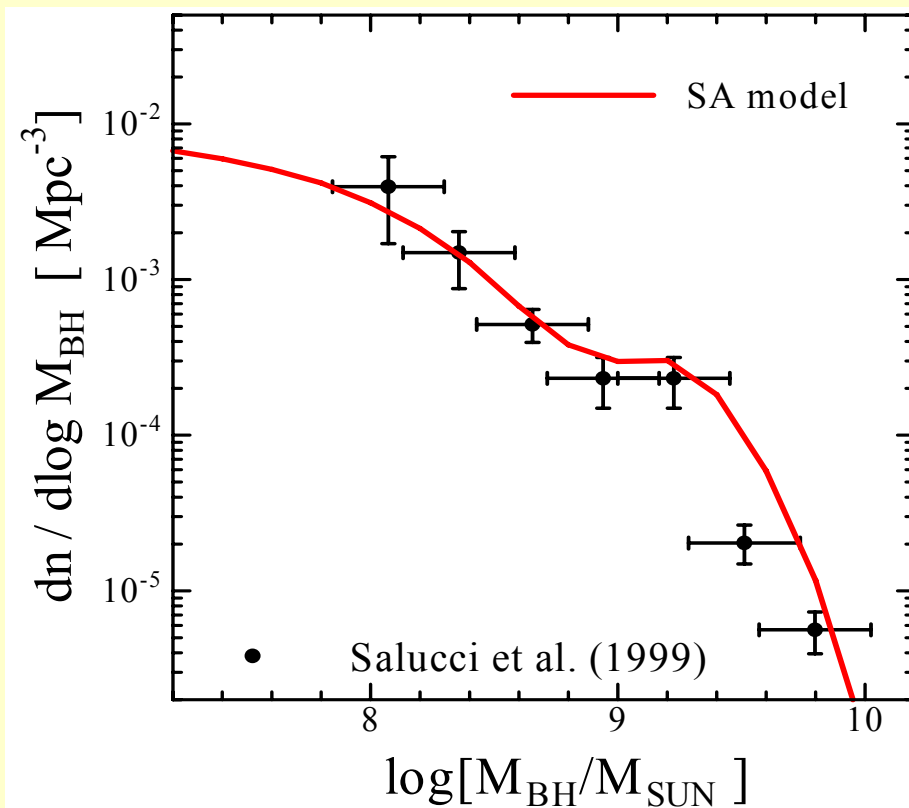
SMBH growth;

*coalescence

*accretion



SMBH mass function

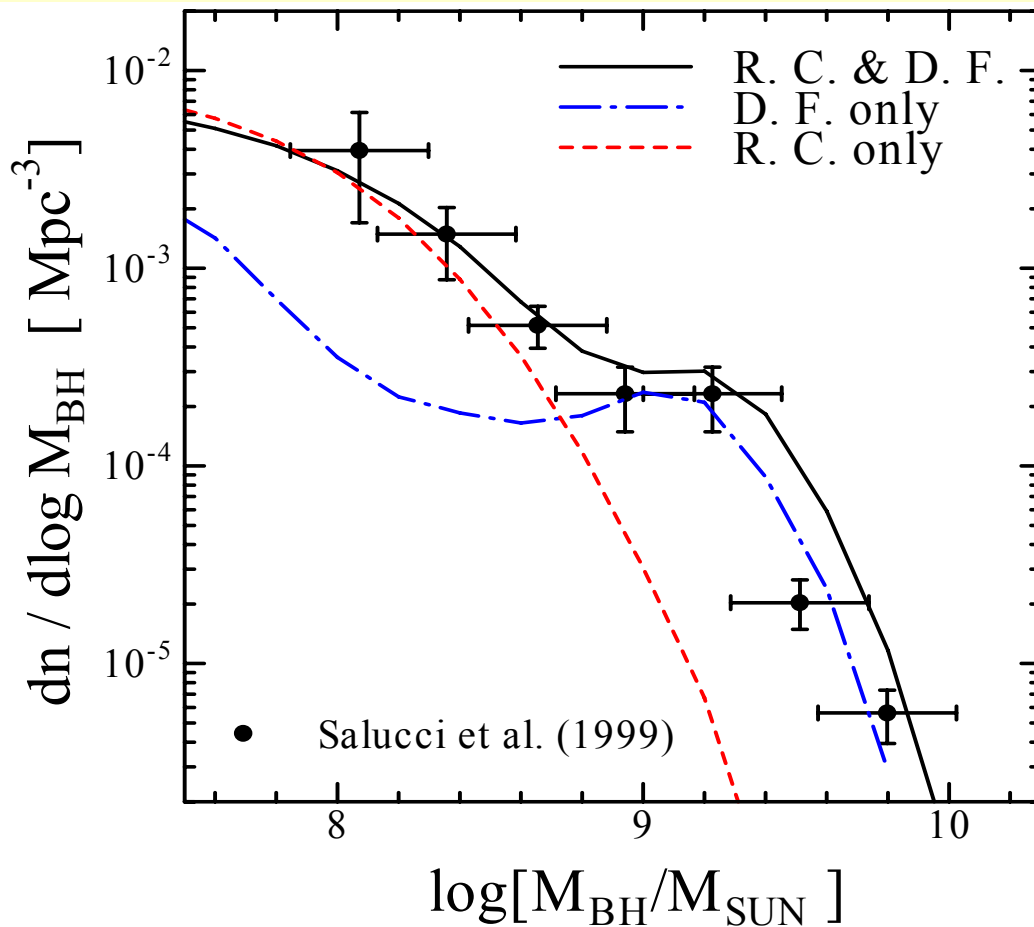


* SMBH mass function

Galaxy merging processes;

*Dynamical Friction [D.F.] (satellite-central merger)

*Random Collision [R.C.] (satellite-satellite merger)



central galaxy 中の SMBH の成長

→ cold gas の降着が主

→ SNe feedback が効く小さい銀河では降着する cold gas が無くなってしまふ。

→ 小さい銀河中では SMBH はあまり成長しない

*QSO formation model

Assumption

銀河同士の合体が major mergerの時は、 cold gasの一部を starburstでできる星の量に比例させてBHに降着させ、以下のlight curve で光るとする。

QSO light curve (B-band)

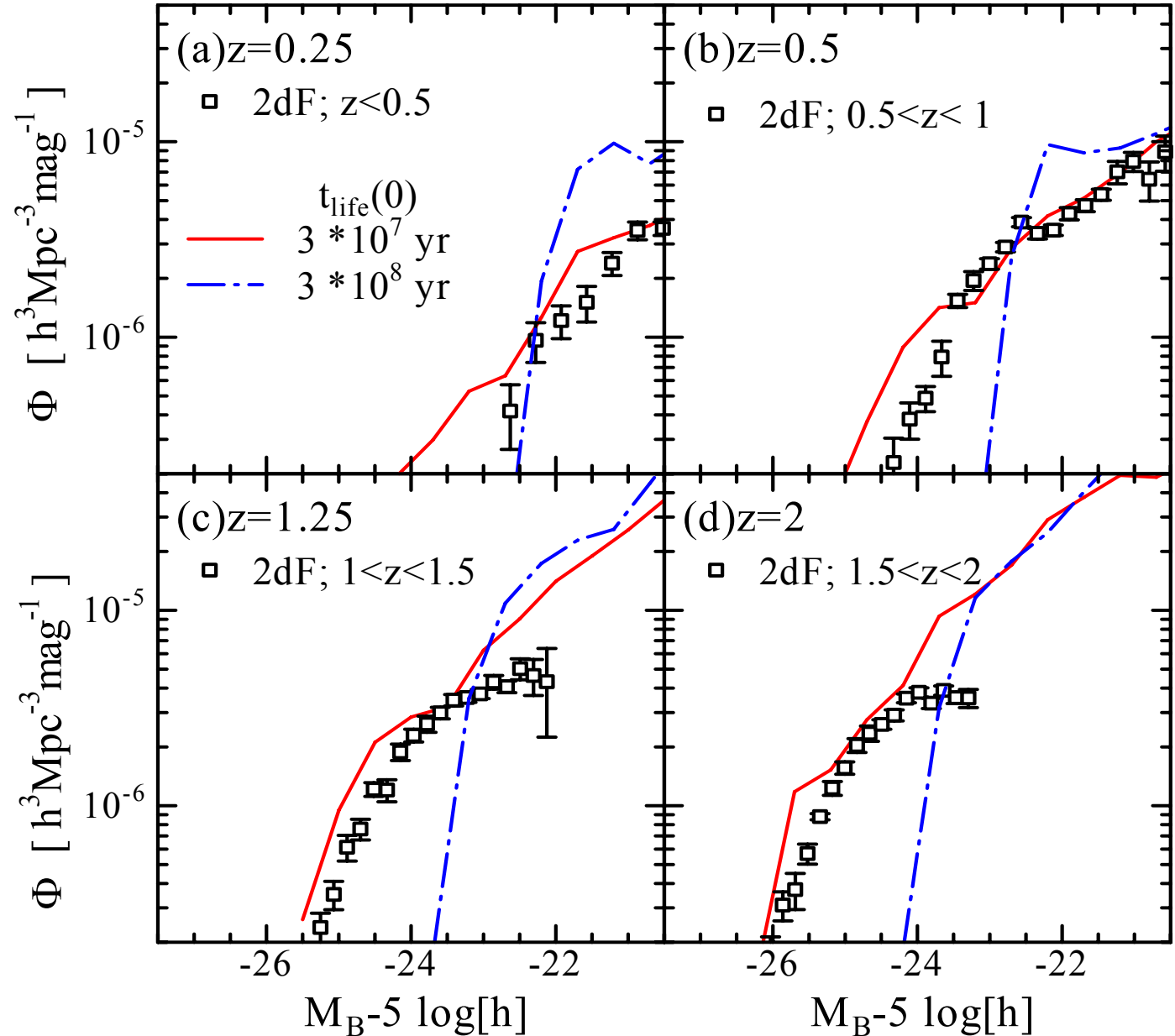
$$L_B(t) = \frac{\varepsilon_B M_{acc} c^2}{t_{life}} \exp\left(-\frac{t}{t_{life}}\right)$$

ε_B : B-bandでの放射効率

$t_{life} = t_{life}(z) \propto t_{dyn}$: QSO lifetime scale

*QSO Luminosity function

放射効率、life timeの決定
=> 様々なredshiftでの
光度函数の比較が
重要



§ 3.SMBH連星からの重力波

CDM宇宙における銀河形成

⇒ *Hierarchical clustering scenario*

銀河は衝突合体を繰り返し成長する

銀河同士が衝突合体(merge)した時、
中心にあるSMBHはどうなる？

⇒ dynamical friction により merger 後の銀河の
中心に沈み込みbinaryとなる。

⇒ 最後には重力波(GW)を放射し合体(coalescence)

- SMBH binary からの重力波の重ね合わせ

 - Gravitational Wave Background Radiation

- SMBHの合体による強い重力波

 - Gravitational Wave Burst

* Coalescence of SMBH binary

1. in-spiraling phase
2. plunge and merge to form a single BH
3. ring-down phase

- An ensemble of GWs from in-spiraling SMBH binaries.

=> Gravitational Wave Background Radiation (GWBR)

$$f \sim 10^{-9} \text{ -- } 10^{-5} \text{ Hz}$$

- Pulsar timingの測定により上限が決まる。
- スペクトルは？

- Coalescence of SMBH (phase 2+3)

=> Gravitational Wave Burst

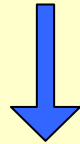
$$h \sim 10^{-18} \text{ -- } 10^{-15}$$

- *LISA* (レーザー干渉型宇宙重力波望遠鏡) なら測定可能。
- 出現確率は？

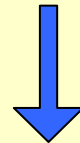
SMBH coalescing rateを知る必要がある。

そこで、

準解析的銀河+SMBH形成モデル
(SA-model)



SMBH coalescence rate



*GW background radiation spectrum from SMBH binaries

* Events rate of GW burst from SMBH coalescence

§ 3-1. SMBH連星からの重力波背景輻射(GWBR)

(Enoki et al. 2004, Enoki & Nagashima 2006)

Phinney (2001)の公式を用いる

現在のGWBGのエネルギー密度

$$\begin{aligned}\rho_{\text{GW}}c^2 &= \int_0^\infty \int_0^\infty n_c(z) \frac{1}{1+z} \frac{dE_{\text{GW}}}{df_r} df_r dz \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty n_c(z) \frac{1}{1+z} f_r \frac{dE_{\text{GW}}}{df_r} dz \frac{df}{f} .\end{aligned}$$

$n(z)$: Number density of GW source

E_{GW} : Energy emitted in GW from a source

f_r : GW frequency in the source's rest frame

*GWBG spectrum

$$\rho_{\text{GW}} c^2 \equiv \int_0^\infty \frac{\pi c^2}{4 G} f^2 h_c^2(f) \frac{df}{f},$$

$h_c(f)$: Characteristic amplitude of GWBG spectrum

$$\begin{aligned} h_c^2(f) &= \frac{4G}{\pi c^2 f^2} \int_0^\infty n_c(z) \frac{1}{1+z} \left(f_r \frac{dE_{\text{GW}}}{df_r} \right) \Big|_{f_r=f(1+z)} dz. \\ &= \frac{4G}{\pi c^2 f} \int_0^\infty n_c(z) \left(\frac{dE_{\text{GW}}}{df_r} \right) \Big|_{f_r=f(1+z)} dz. \end{aligned}$$

重力波源が連星系なら

$$h_c^2(f) = \frac{4G}{\pi c^2 f} \int dM_1 dM_2 dz n_c(M_1, M_2, z) \left(\frac{dE_{\text{GW}}(M_1, M_2)}{df_r} \right) \Big|_{f_r=f(1+z)}$$

$n(M_1, M_2, z)$: Number density of binaries

* Gravitational Wave from a Binary

*円軌道の場合 (weak field /slow motion 近似で)

GWのLuminosity

$$\begin{aligned} L_{\text{GW,circ}}(M_1, M_2, f_p) &= \frac{32}{5} \frac{G^{7/3}}{c^5} M_{\text{chirp}}^{10/3} (2\pi f_p)^{10/3} \\ &= 4.7 \times 10^{48} \left(\frac{M_{\text{chirp}}}{10^8 M_\odot} \right)^{10/3} \left(\frac{2f_p}{10^{-7} \text{ Hz}} \right)^{10/3} \text{ erg,} \end{aligned}$$

$$M_{\text{chirp}} = [M_1 M_2 (M_1 + M_2)^{-1/3}]^{3/5}$$

GW輻射のtime scale

$$\begin{aligned} \tau_{\text{GW,circ}}(M_1, M_2, f_p) &= \frac{5}{96} \left(\frac{c^3}{GM_{\text{chirp}}} \right)^{5/3} (2\pi f_p)^{-8/3} \\ &= 1.2 \times 10^4 \left(\frac{M_{\text{chirp}}}{10^8 M_\odot} \right)^{-5/3} \left(\frac{2f_p}{10^{-7} \text{ Hz}} \right)^{-8/3} \text{ yr.} \end{aligned}$$

*Eccentricity ?

これまでのSMBH連星系からの重力波背景輻射の研究

→ 連星系の軌道は円と仮定されている

しかし、SMBHを中心に持つ銀河がmergeする時に形成されるSMBH連星の軌道は楕円になることが多い。

- SMBH - IMBH (Matsubayashi et al. 2005)
- SMBH binary + SMBH (Iwasawa et al. 2006)
- SMBH binary + gas disk (Armitage & Natarajan 2005)

連星系の軌道が楕円なら、円の場合と比べて

- 重力波放射のSpectral Energy Distribution が異なる
- 重力波放射のtimescaleが短くなる
- 重力波放射のluminosityが大きくなる

=> GWBRのspectrumの形も変わってくる

*GW from Binaries on Eccentric Orbit

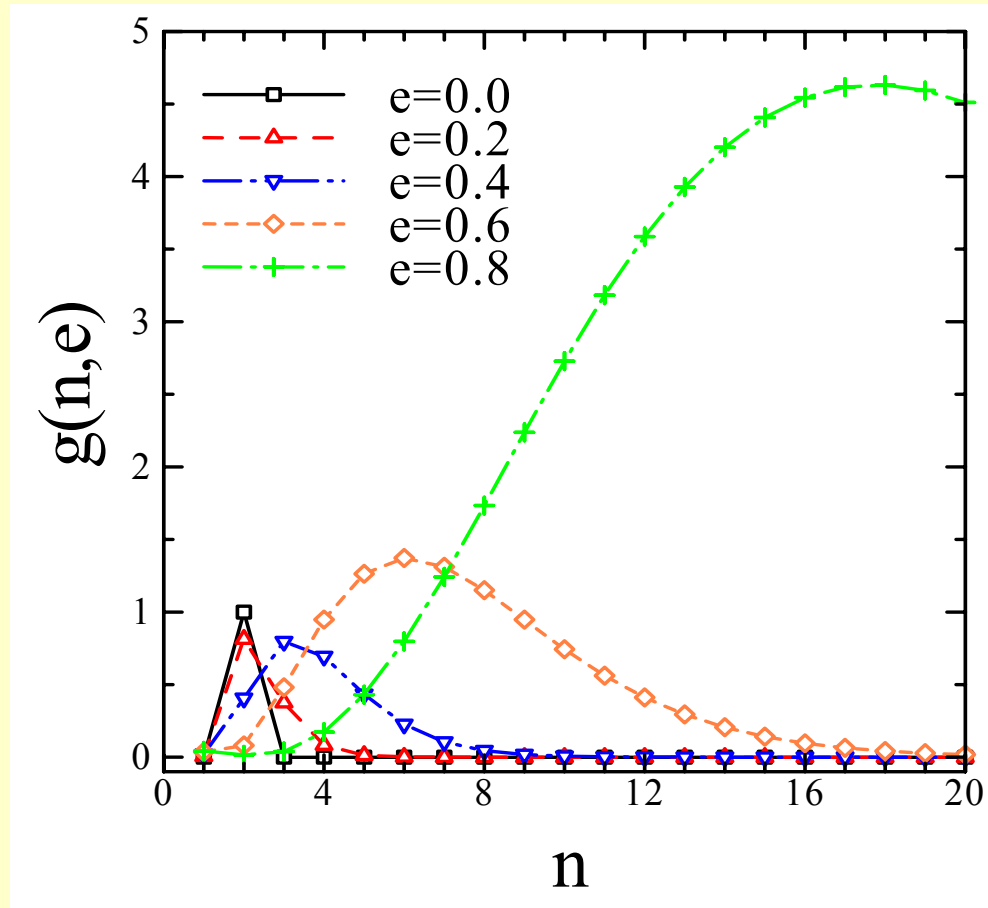
連星系の軌道が楕円であると、
軌道周波数 f_p の整数倍の振動数の高調波が放射される。
(Peters & Mathews 1963)

GWのSED

$$L_{f_r}(e, t_p) = L_{\text{GW,circ}}(f_p) \sum_{n=1}^{\infty} g(n, e) \delta(f_r - n f_p).$$

$$g(n, e) \equiv \frac{n^4}{32} \left\{ \left[J_{n-2}(ne) - 2eJ_{n-1}(ne) + \frac{2}{n}J_n(ne) + 2eJ_{n+1}(ne) - J_{n+2}(ne) \right]^2 \right. \\ \left. + (1 - e^2) [J_{n-2}(ne) - 2eJ_n(ne) + J_{n+2}(ne)]^2 + \frac{4}{3n^2} [J_n(ne)]^2 \right\} \quad (2)$$

*g(n,e)

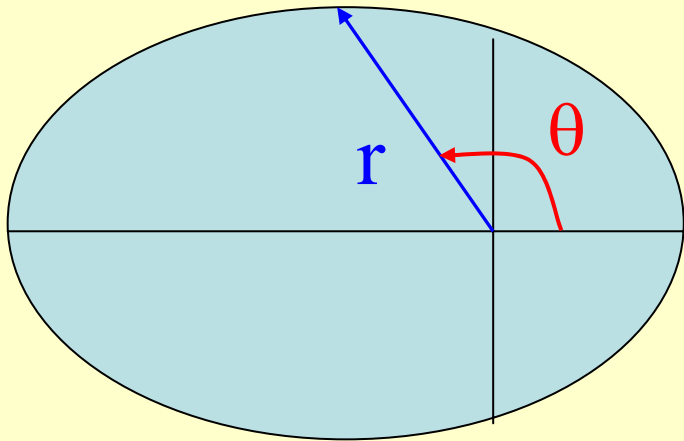


$$g(n, e) \equiv \frac{n^4}{32} \left\{ \left[J_{n-2}(ne) - 2eJ_{n-1}(ne) + \frac{2}{n}J_n(ne) + 2eJ_{n+1}(ne) - J_{n+2}(ne) \right]^2 + (1 - e^2) [J_{n-2}(ne) - 2eJ_n(ne) + J_{n+2}(ne)]^2 + \frac{4}{3n^2} [J_n(ne)]^2 \right\}$$

*Fourier analysis of Kepler motion

軌道周波数 f_p の整数倍の振動数の高調波？

← Kepler運動の各フーリエモードの重力波



軌道長半径: a
離心率: e

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}$$

$$\frac{r}{a} = 1 + \frac{e^2}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2e}{n} J_n'(ne) \cos(n\omega t)$$

*Luminosity & Timescale of GW from Eccentric Binary

GWのLuminosity

$$L_{\text{GW}}(M_1, M_2, f_p, e) = L_{\text{GW,circ}}(M_1, M_2, f_p)F(e),$$

GW輻射のtime scale

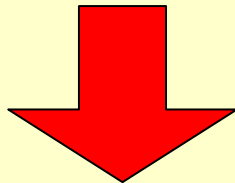
$$\tau_{\text{GW}}(M_1, M_2, f_p, e) = \frac{\tau_{\text{GW,circ}}(M_1, M_2, f_p)}{F(e)}$$

$$F(e) \equiv \sum_{n=1}^{\infty} g(n, e) = \frac{1 + 73e^2/24 + 37e^4/96}{(1 - e^2)^{7/2}}$$

*Evolution of Binary Orbit

重力波放射による、
連星系の軌道長半径(a)、離心率(e)の進化

$$\begin{aligned}\frac{da}{dt} &= -\frac{64}{5} \frac{G^3 M_1 M_2 M_{\text{tot}}}{c^5 a^3 (1-e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4\right) \\ &= -\frac{64}{5} \frac{G^3 M_1 M_2 M_{\text{tot}}}{c^5 a^3} F(e), \\ \frac{de}{dt} &= -\frac{304}{15} \frac{G^3 M_1 M_2 M_{\text{tot}}}{c^5 a^4 (1-e^2)^{5/2}} e \left(1 + \frac{121}{304} e^2\right).\end{aligned}$$



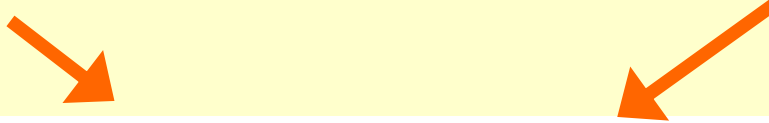
$$\frac{a}{a_0} = \frac{1-e_0^2}{1-e^2} \left(\frac{e}{e_0}\right)^{\frac{12}{19}} \left[\frac{1 + \frac{121}{304} e^2}{1 + \frac{121}{304} e_0^2}\right]^{\frac{870}{2299}}$$

*Energy emitted in GW from a Binary

楕円軌道の場合、軌道周波数の整数倍の周波数の重力波が放射される。

$$\frac{dE_{\text{GW}}}{df_r} = \int_0^{t_{\text{life}}} L_{f_r}(t_p) dt_p.$$

$$L_{f_r}(e, t_p) = L_{\text{GW,circ}}(f_p) \sum_{n=1}^{\infty} g(n, e) \delta(f_r - n f_p).$$


$$\begin{aligned} \frac{dE_{\text{GW}}}{df_r} &= \int L_{\text{GW,circ}}(f_p) \frac{dt_p}{df_p} \sum_{n=1}^{\infty} g(n, e) \delta(f_r - n f_p) df_p \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[L_{\text{GW,circ}}(f_p) \frac{\tau_{\text{GW}}(f_p, e)}{n f_p} g(n, e) \right] \Big|_{f_p=f_r/n}. \end{aligned}$$

f_p : Orbital frequency

τ_{GW} : timescale of the emitting GW

*GWBG from binaries on eccentric orbit

$$h_c^2(f) = \frac{4\pi c^3}{3} \int dM_1 dM_2 dz n(M_1, M_2, z) (1+z)^{-1/3} \left(\frac{GM_{\text{chirp}}}{c^3} \right)^{5/3} (\pi f)^{-4/3} \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{n} \right)^{2/3} \frac{g(n, e)}{F(e)}$$

※円軌道であれば、 $h_c^2 \propto f^{-4/3}$

離心率 e は定数ではない。

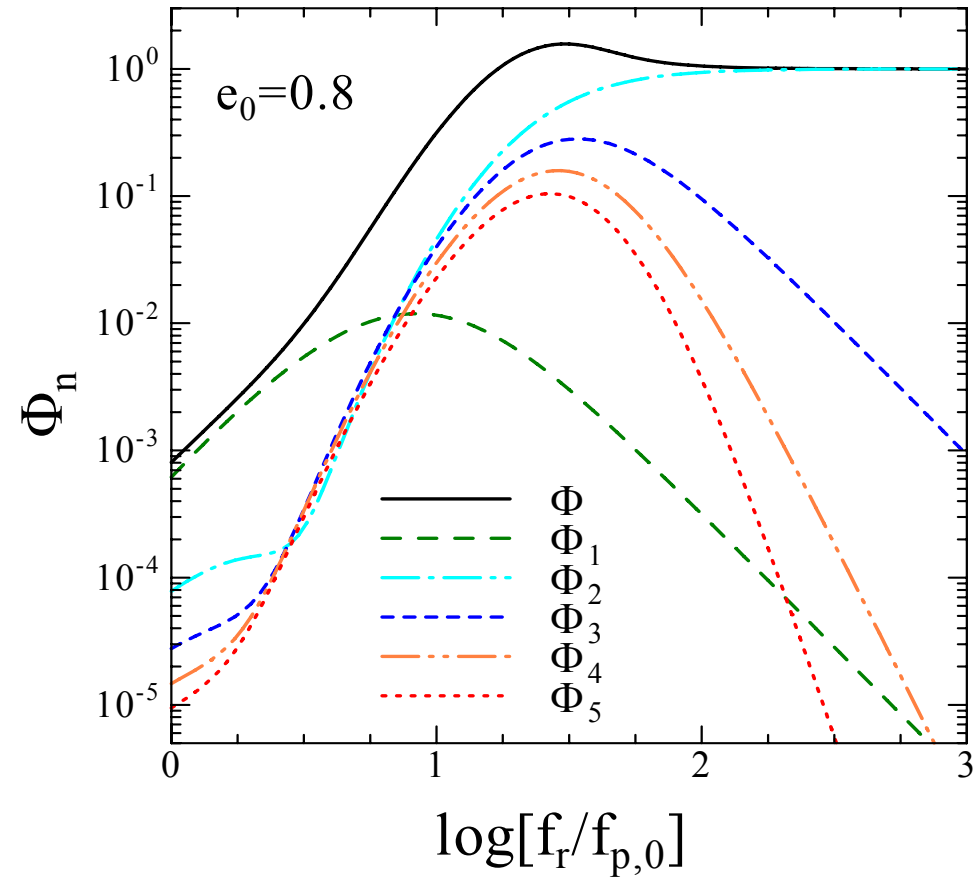
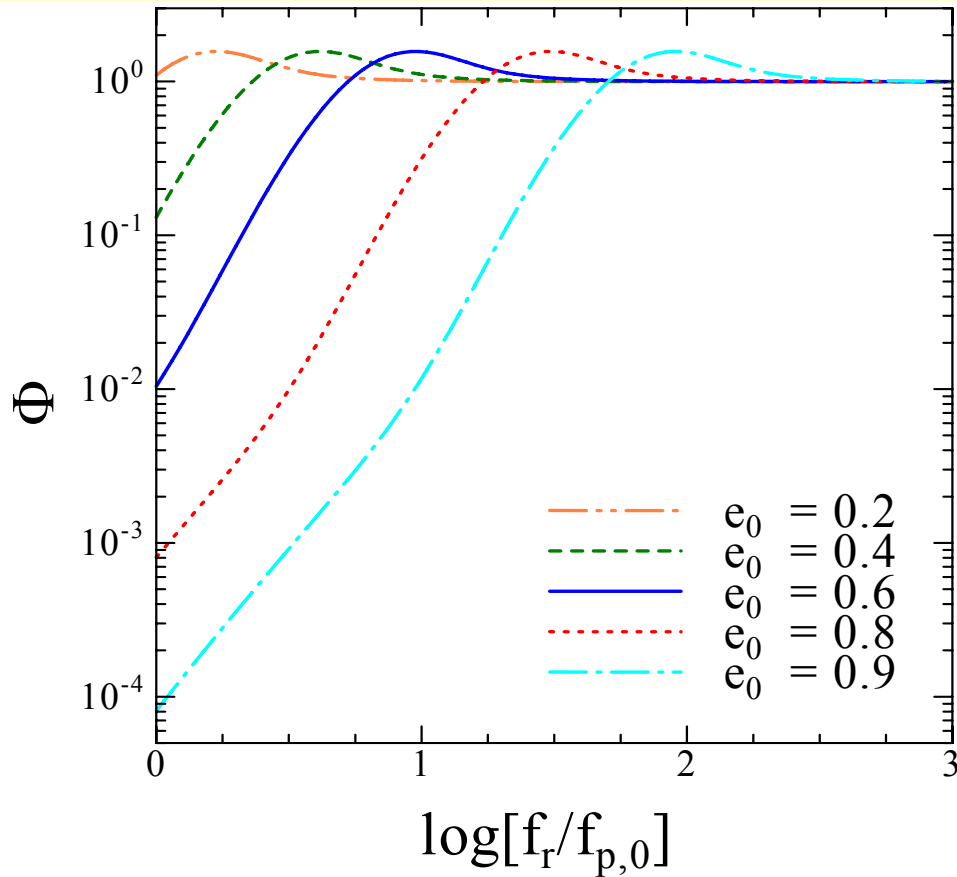
$$e = e(f_p/f_{p,0}, e_0) = e(f_r/nf_{p,0}, e_0) = e[f(1+z)/nf_{p,0}, e_0]$$

$$\frac{f_p}{f_{p,0}} = \left\{ \frac{1 - e_0^2}{1 - e^2} \left(\frac{e}{e_0} \right)^{\frac{12}{19}} \left[\frac{1 + \frac{121}{304}e^2}{1 + \frac{121}{304}e_0^2} \right]^{\frac{870}{2299}} \right\}^{-3/2}$$

ある $f_{p,0}$ での、離心率 e_0 の分布関数が必要。

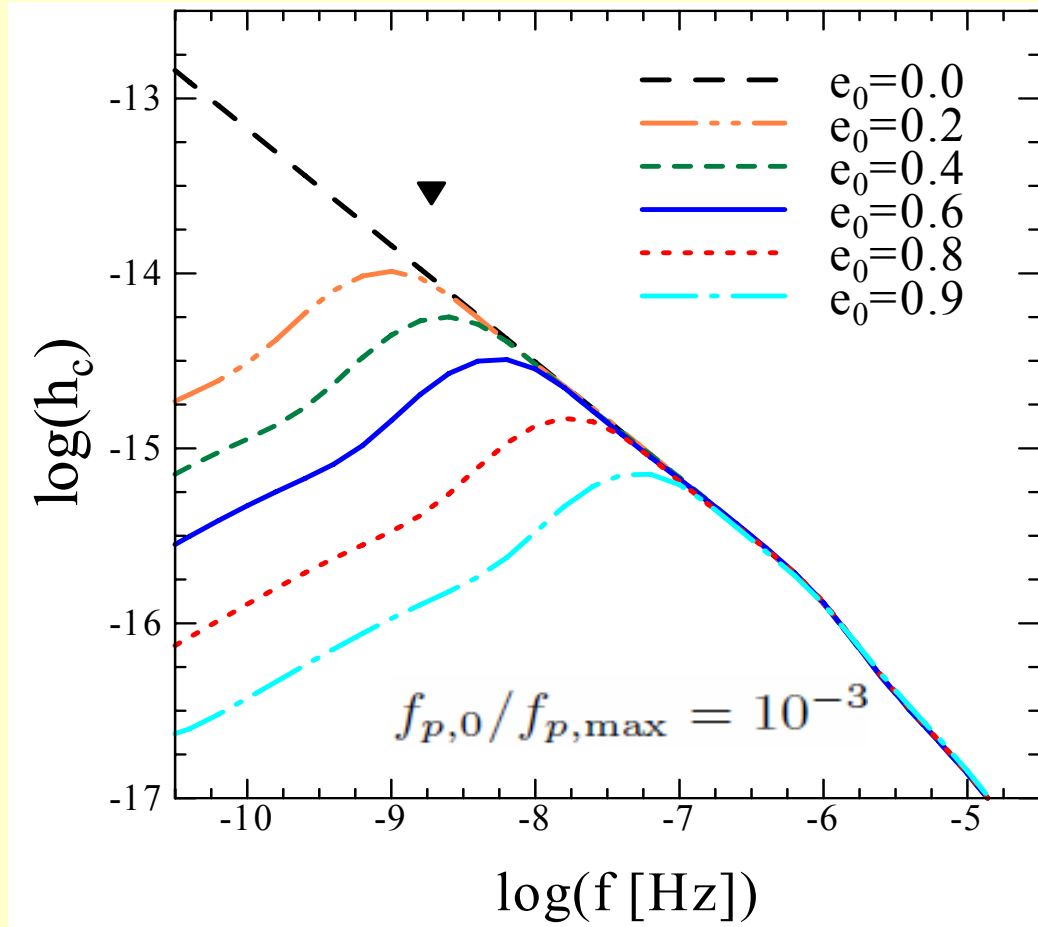
*Spectrum of GWBG

$$\begin{aligned}\Phi &\equiv \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n \\ &\equiv \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{n}\right)^{2/3} \frac{g(n, e)}{F(e)}.\end{aligned}$$



→高調波が出るため、
低周波数側のspectrumの振幅が小さくなる。

*GWBG Spectrum from SMBH Binaries

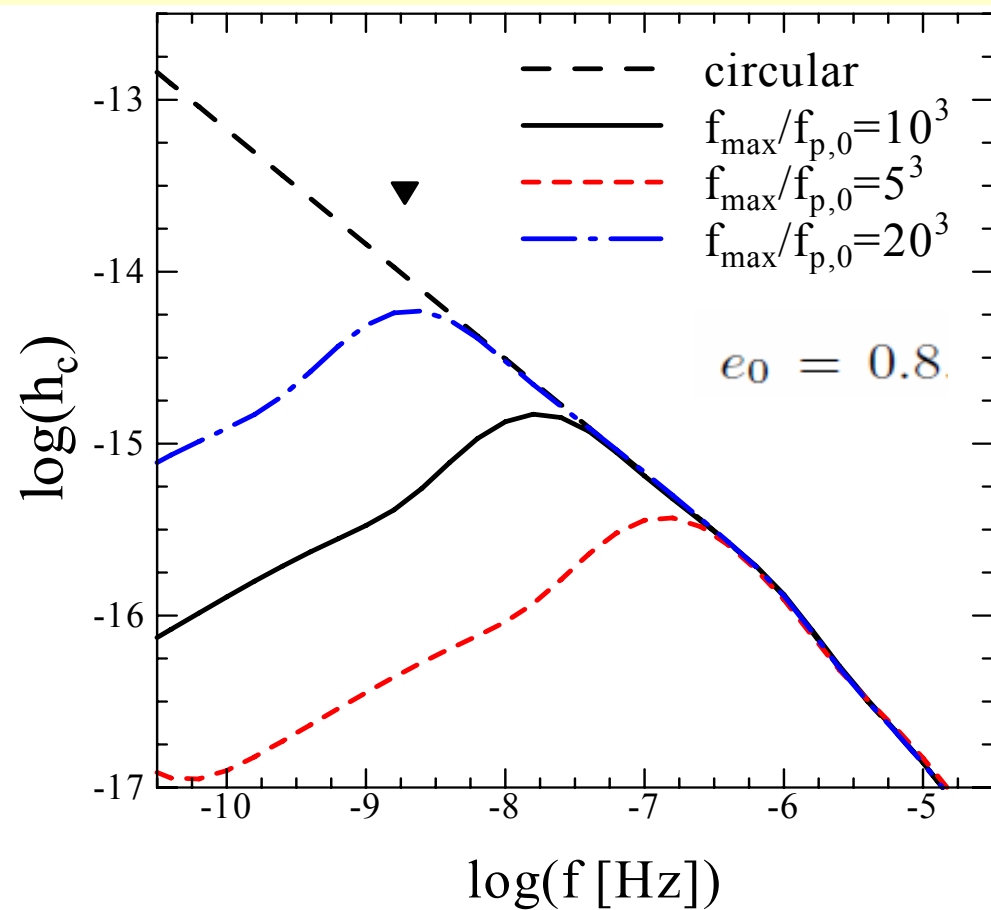
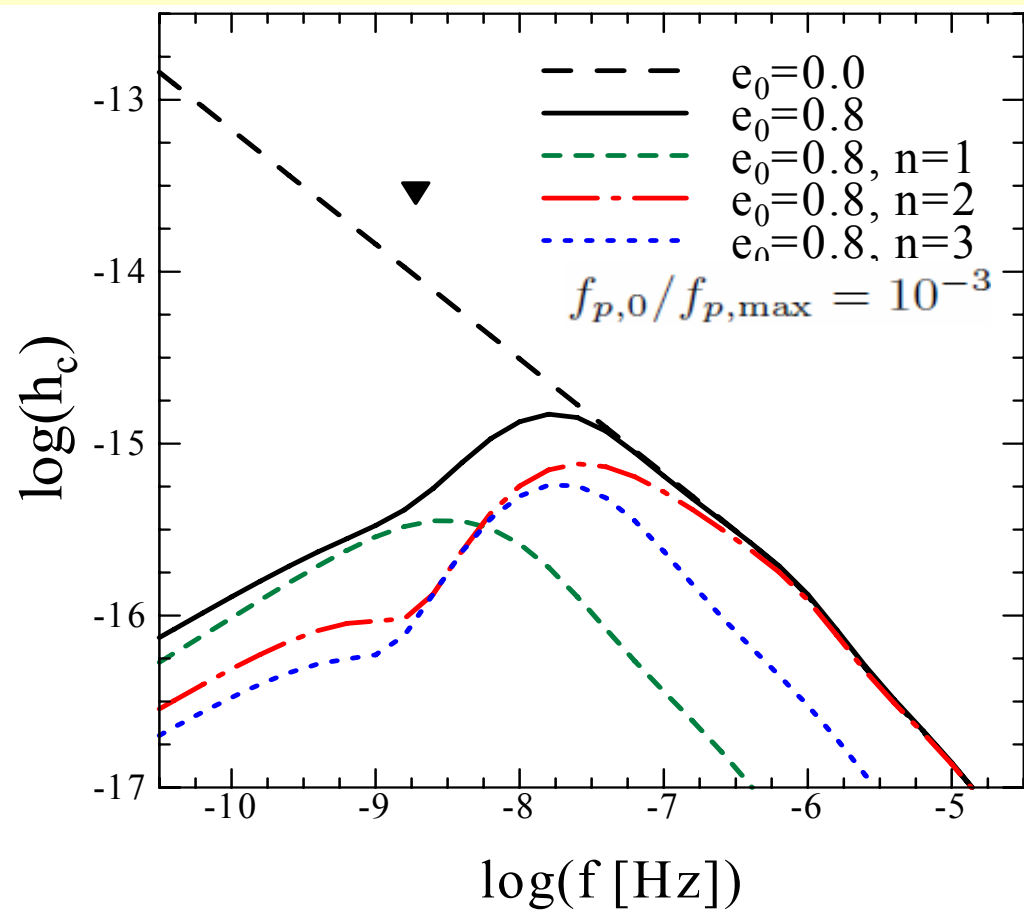


※ e_0 の分布は
考慮していない

f_{\max} ; 考える周波数の上限
<= BH の大きさ

$$f_{\max} \sim 5 \times 10^{-5} (M_{\text{BH}}/10^8 M_{\text{sun}})^{-1} \text{ Hz}$$

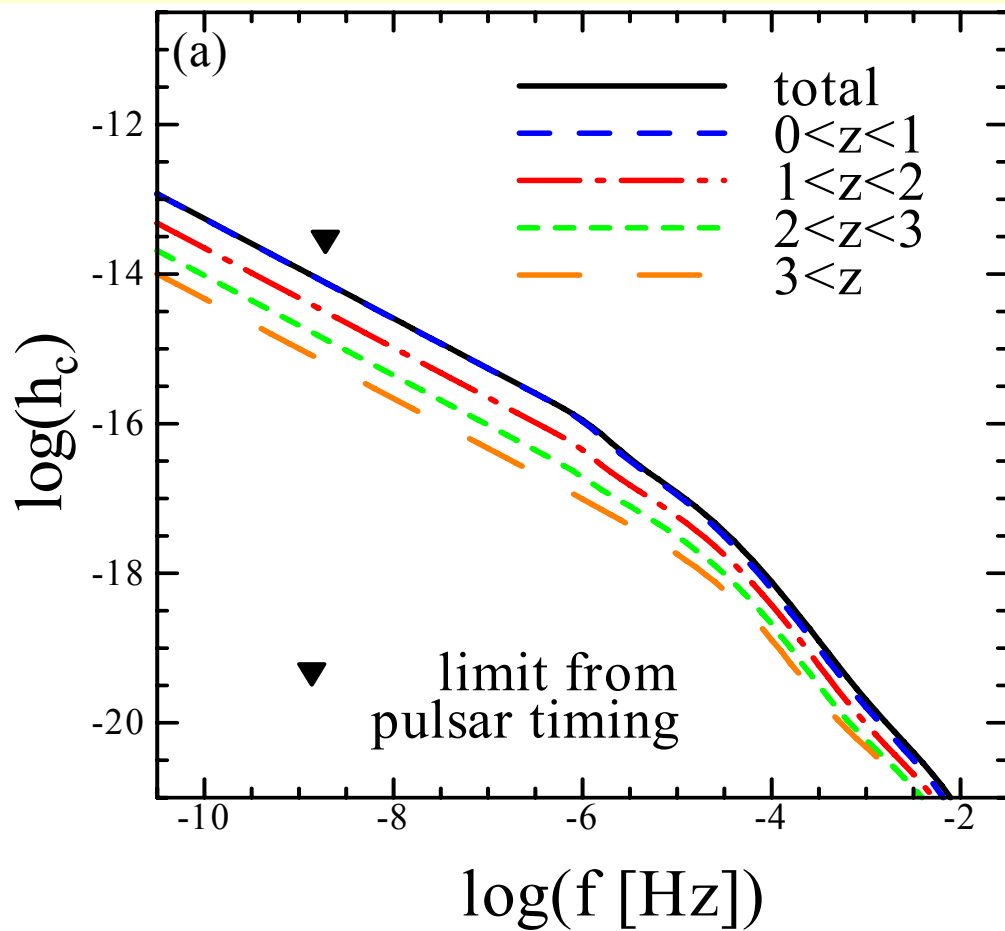
*GWBG Spectrum from SMBH Binaries 2



$$a^3 = GM_{tot} / (2\pi f_p)^2$$

$$a = 0.5 \times 10^{-2} \times (M / 10^8 M_{sun})^{1/3} (f_p / 10^{-8} \text{ Hz})^{-2/3} \text{ pc}$$

*GWBG Spectrum from SMBH Binaries 3



• $f < 10^{-6}$ Hzでは

$$h_c \sim 10^{-16} \times (f / 1 \mu\text{Hz})^{-2/3}$$

• $0 < z < 1$ にあるSMBH binaryからの寄与がほとんど

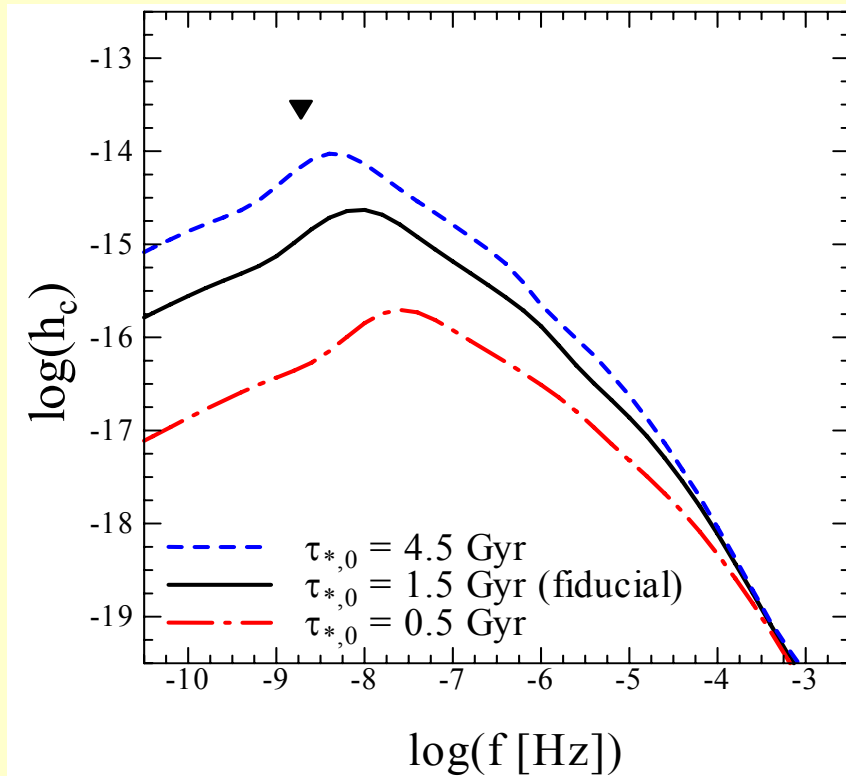
*銀河形成過程の影響

SMBHの成長 \Leftarrow cold gas の降着が主

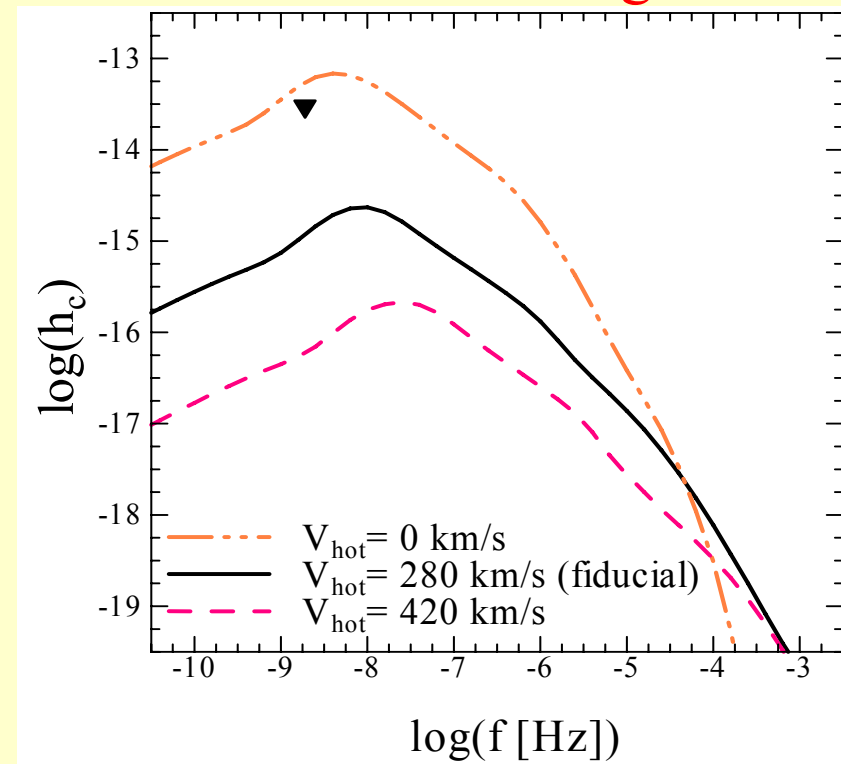
\Leftarrow cold gas の量を左右する過程に依存

\Leftarrow Star formation & SNe feedback

Star formation time-scale:



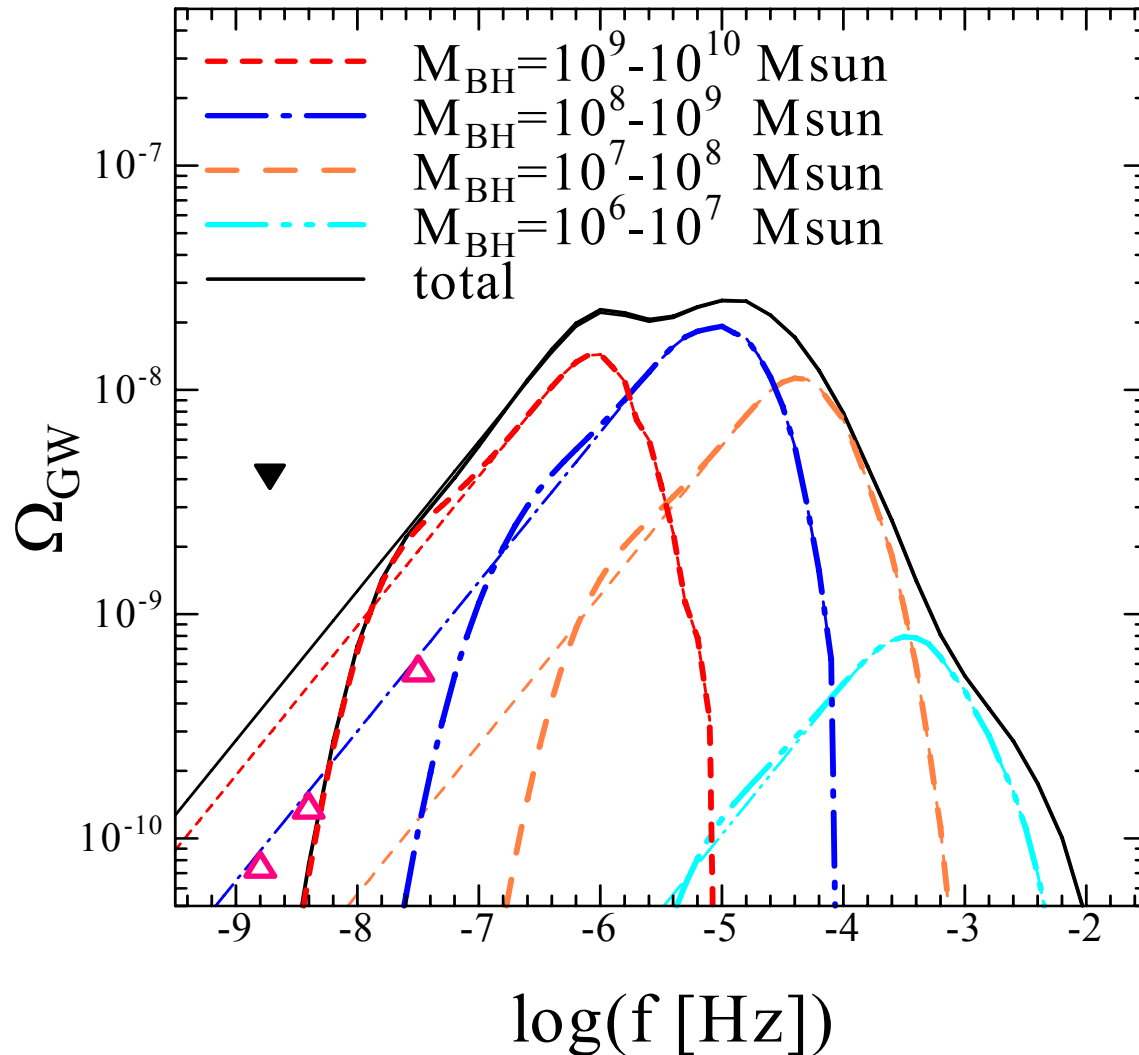
SNe feedback strength:



$$e_0 = 0.8 \text{ and } f_{p,0}/f_{p,\text{max}} = 10^{-3}.$$

*GWBG energy density from SMBH Binaries

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{2\pi^2}{3H_0^2} f^2 h_c^2(f)$$

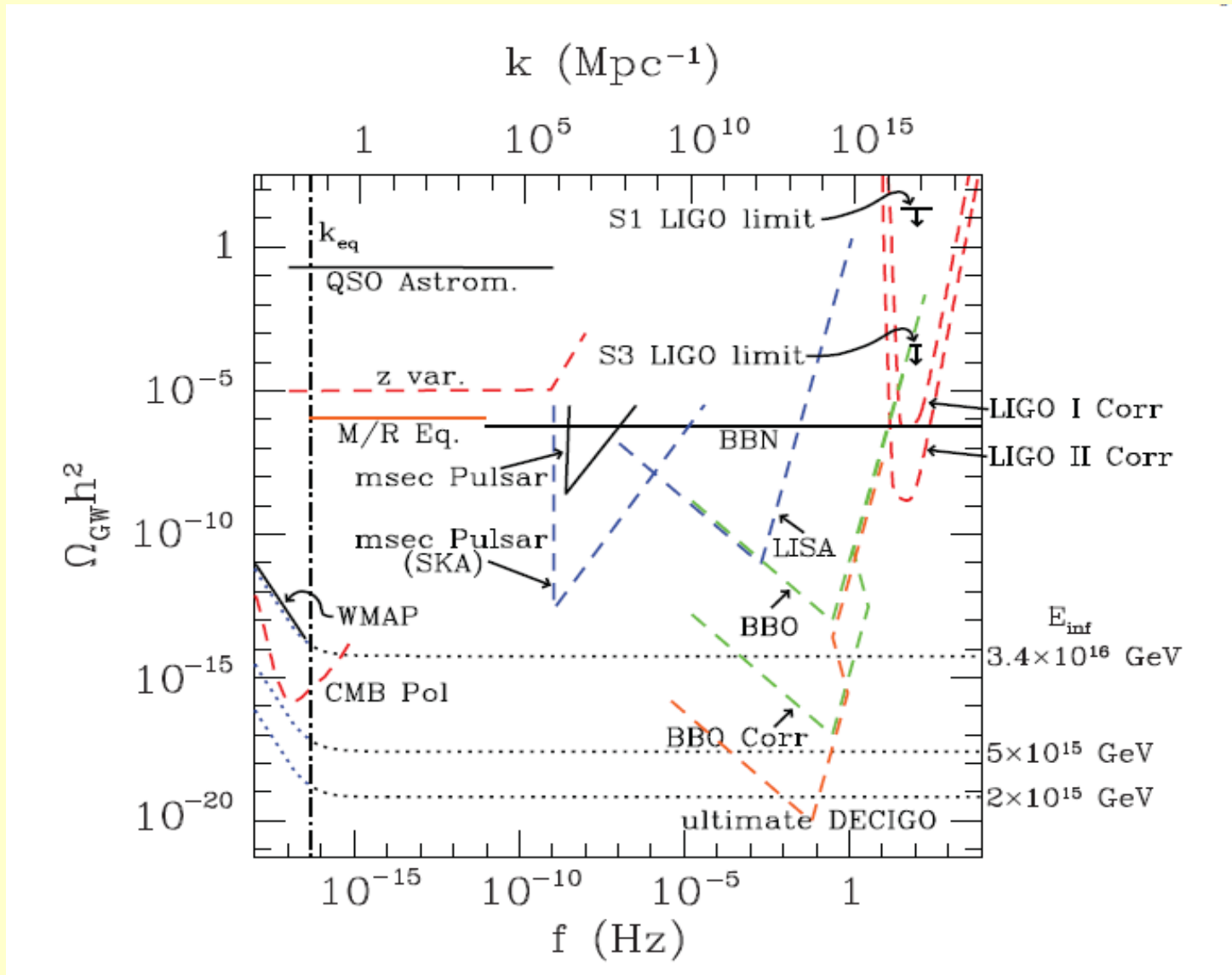


$$e_0 = 0.8$$

$$f_{p,0}/f_{\text{max}} = 1/10^3$$

$$f_{\text{max}} \propto 1/M_{\text{BH}}$$

*GWRB detection limit



Smith et al. astro-ph/0506422 (Phys. Rev. D **73**, 023504 (2006))

§ 3-1. のまとめ

- 準解析的銀河形成 + SMBH形成モデルを用いて、GW BR spectrumを計算した。

Spectrumの全体的な振幅

<= 銀河形成過程に大きく依っている。

連星の軌道が楕円であると、高調波が出るため、低周波数側のspectrumの振幅が小さくなる。

- pulsar timingにより離心率の影響の測定可能性あり。
- 離心率分布を求めることが重要！

§ 3-2. GW burst from SMBH coalescence

(Enoki et al. 2004)

*Gravitational Wave Burst

coalescenceの最後にエネルギー $\epsilon M_{\text{BH}} c^2$ の重力波をバースト的に出す(Thorne & Braginsky 1976)。

--The GW amplitude

$$h^2 = \frac{2G F_{\text{GW}}}{\pi c^3 f_c^2},$$

--The observed characteristic frequency

$$f_c = \frac{c^3}{3^{3/2} G M_{\text{tot}} (1+z)}$$

--The GW energy flux

$$F_{\text{GW}} = \frac{\epsilon M_{\text{tot}} c^2 f_c}{4\pi D(z)^2 (1+z)}$$

$$f_c = 3.9 \times 10^{-4} \left(\frac{M_{\text{tot}}}{10^8 M_{\odot}} \right)^{-1} (1+z)^{-1} \text{Hz}$$

$$h_{\text{burst}} = 7.8 \times 10^{-16} \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\text{tot}}}{10^8 M_{\odot}} \right) \left[\frac{D(z)}{1 \text{ Gpc}} \right]^{-1}$$

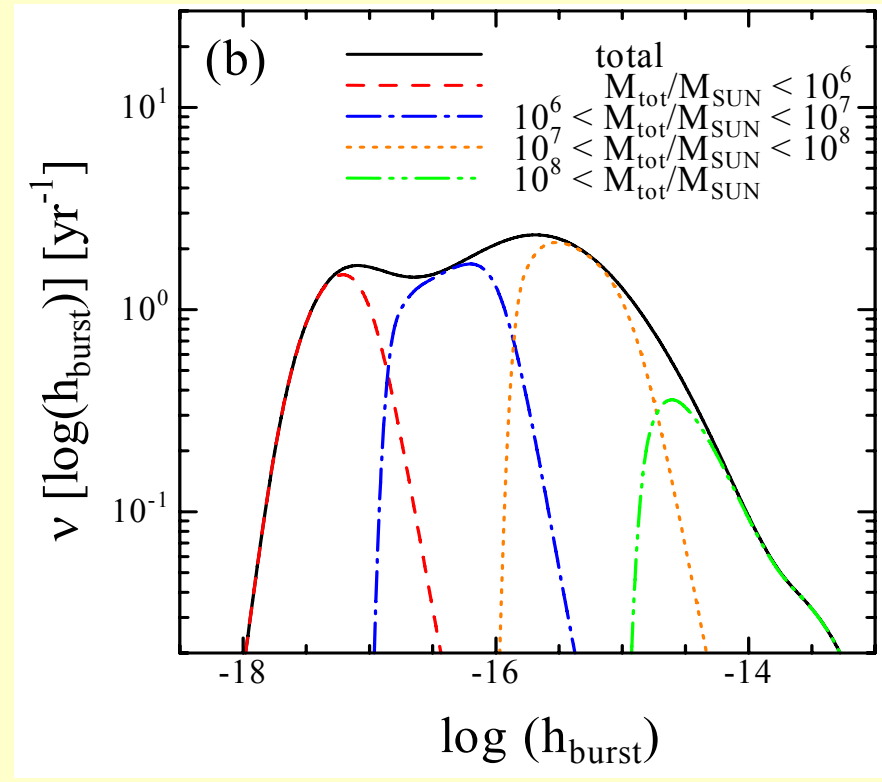
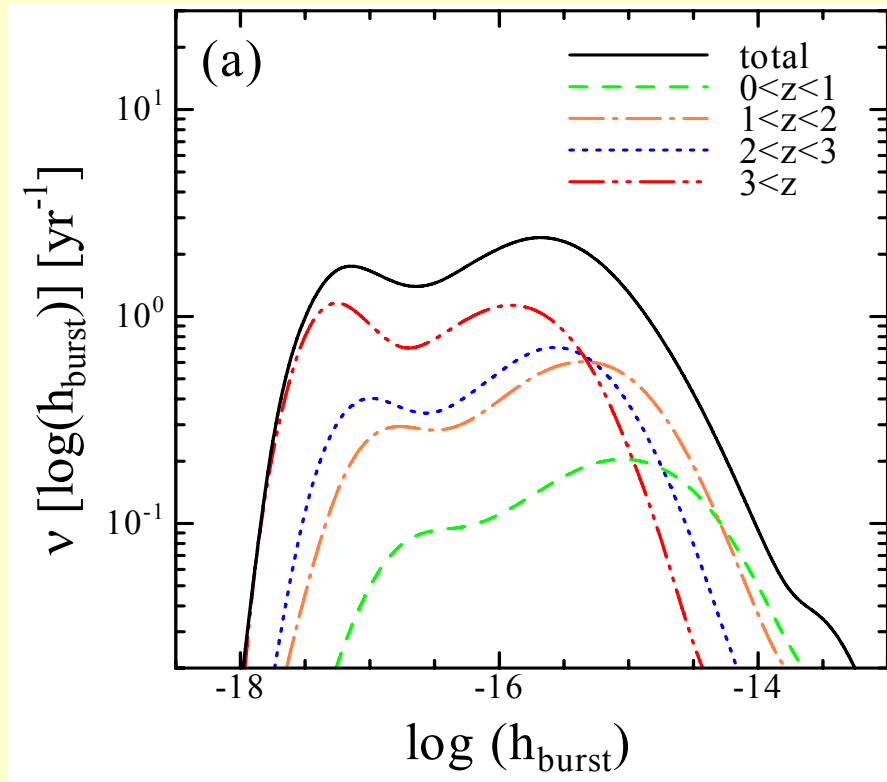
--The expected event rates of GW burst

$$\nu_{\text{burst}}(h_{\text{burst}}, f_c) = \int n_{\text{burst}}(h_{\text{burst}}, f_c, z) \frac{dV}{dt_0} dz$$

*SA model \Rightarrow the SMBH coalescence rate; $n_c(M1, M2, z)$
 \Rightarrow GW burst \mathcal{D} rate; $\nu(h, f)$

*Integrated GW burst rate

Integral event rate of GW burst; $\nu(\log[h])$

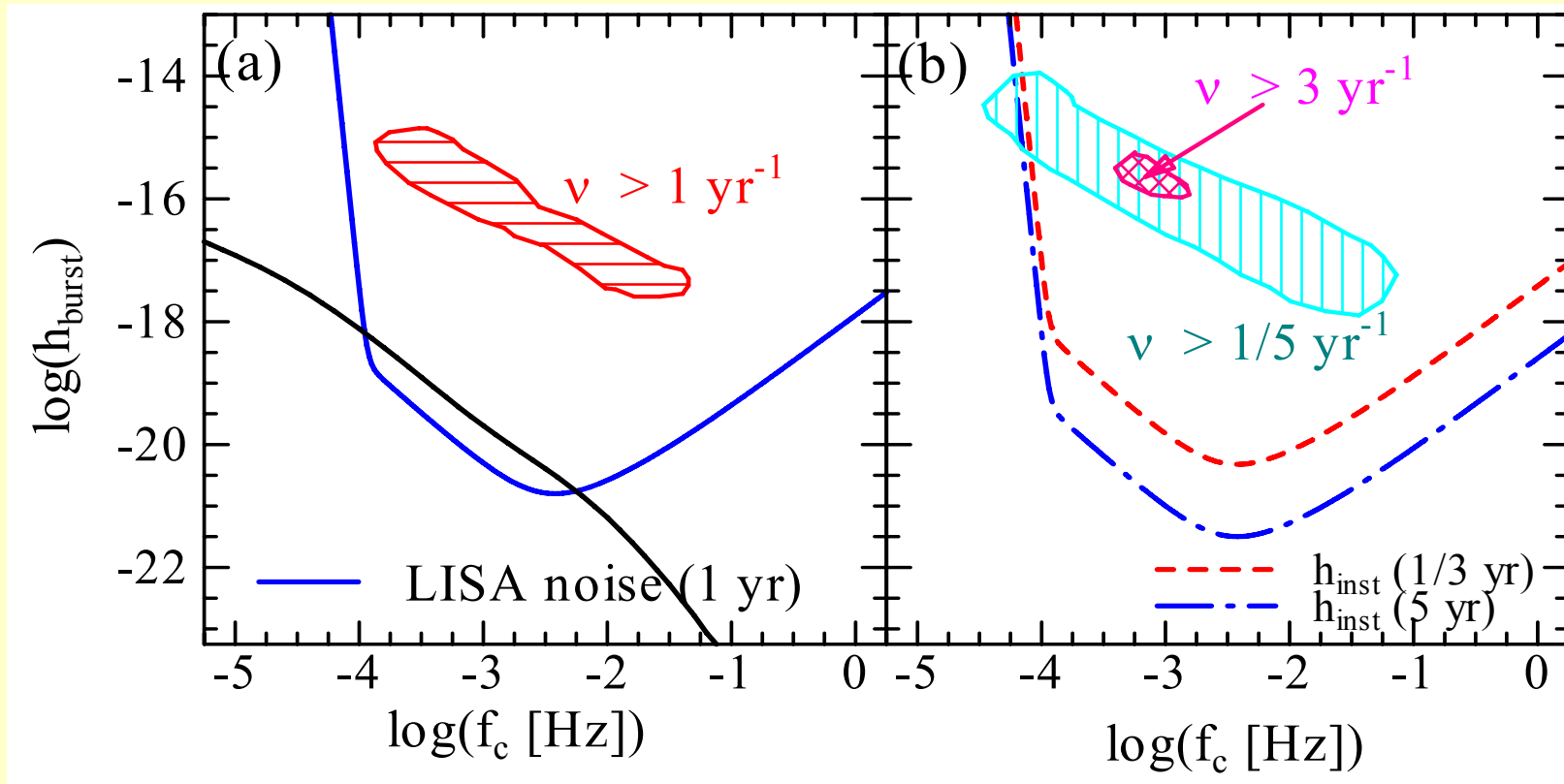


h^{-17} ; $M_{BH} < 10^6 M_{\text{sun}}$ from $z > 3$

h^{-15} ; $M_{BH} \sim 10^7 - 10^8 M_{\text{sun}}$ from $z < 3$

*GW burst rate

Expected signals of GW burst; $\nu(\log[h], \log[f])$



We adopt $\varepsilon = 0.1$

Note; $h \propto \varepsilon^{1/2}$

§ 3-2. のまとめ

*準解析的銀河+SMBH形成モデル(SA model)を用いて、**SMBH coalescence rate** を求め、SMBH coalescenceによる

・Gravitational wave burst rate

を計算した。

*GW background

⇒ $z < 1$ のSMBHからの寄与が主

*GW burst rate

⇒ $z > 2$ のSMBHからの寄与が主

LISAで 0.1~1/yr の割合で見つかる可能性あり

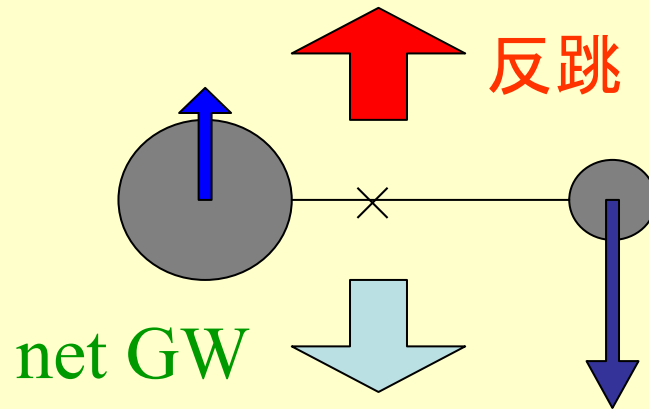
観測⇔理論予言 → SMBH合体形成モデルへの制限

§ 3-3. Gravitational Radiation Recoil

等質量ではない連星の出す重力波

=> 重力波は非等方に放射される

=> 連星は非等方重力波放射による反跳を受ける



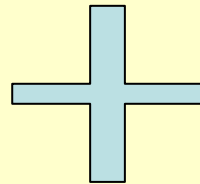
反跳によってSMBH連星が得た速度 (Kick Velocity) が、銀河の脱出速度より大きいと、SMBH連星は銀河から飛び出してしまふ。

=> **SMBHの成長にも影響を与える可能性あり。**

(e.g. Merritt et al. 2004, Madau & Quataert 2004, Libeskind et al.2006)

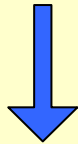
そこで、

準解析的銀河 + SMBH形成モデル
(SA-model)



(Nagashima et al 2001,
Enoki et al 2003)

Kick Velocity > Circular Velocity
なら、SMBH連星は反跳で飛び去る



SMBHの質量関数がどのようなものになるか？

* Gravitational radiation recoil from SMBH binaries

Kick velocity (Fitchett 1983)

$$V_{\text{kick}} = 1480 \left[\frac{f(q)}{f_{\text{max}}} \right] \left[\frac{2G(M_1 + M_2)/c^2}{a} \right]^4 \text{ km/s}$$

$q = M_1 / M_2$: mass ratio ($M_1 < M_2$)

$$f(q) = q^2(1-q)/(1+q)^5$$

$$f_{\text{max}} \sim 0.0179 \text{ @ } q \sim 0.382$$

* 近似 (quasi-Newtonian) を使っており、不定性が大きい

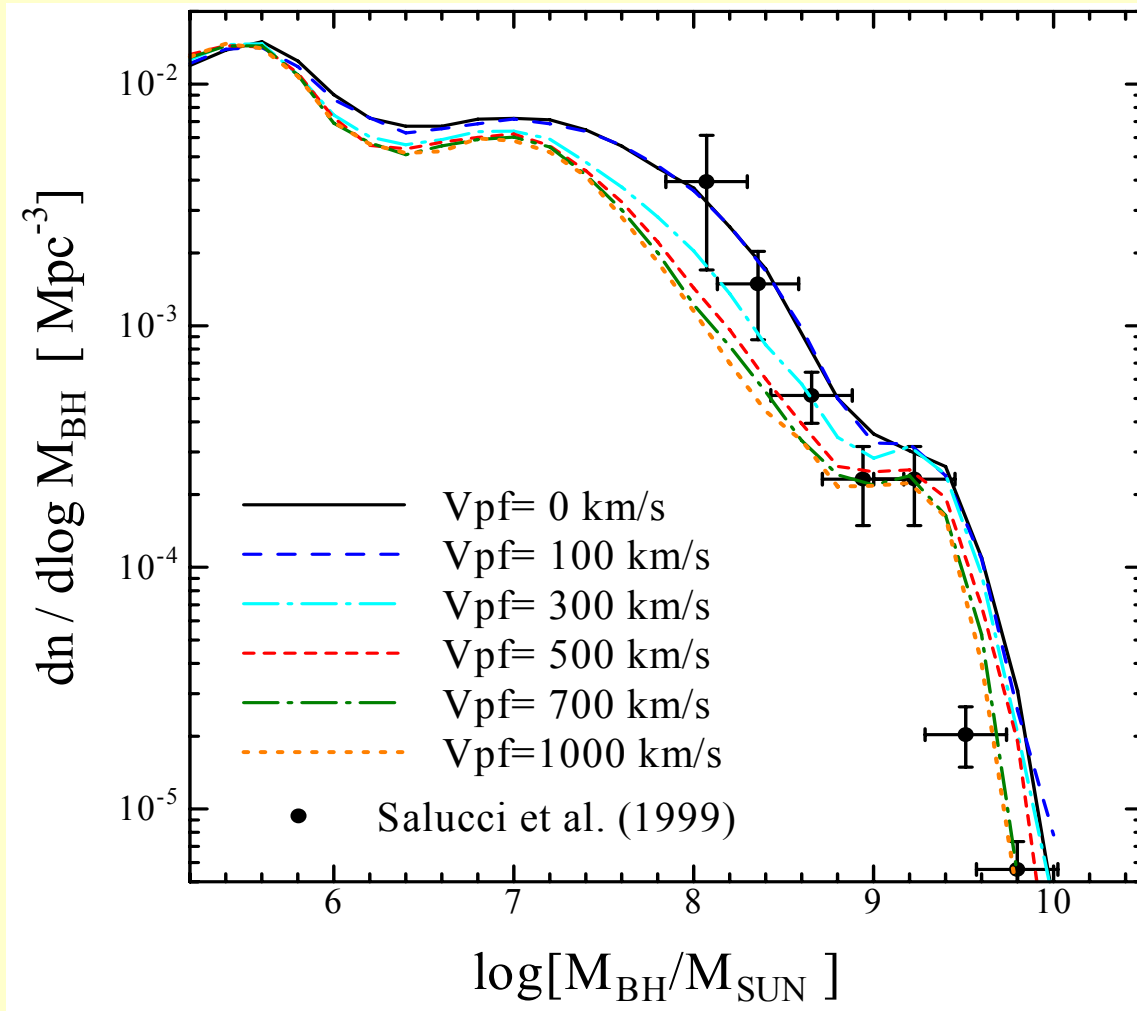
$$V_{\text{kick}} = V_{\text{pf}} \left[\frac{f(q)}{f_{\text{max}}} \right]$$

V_{pf} をパラメータとする。

$V_{\text{kick}} > V_c$ なら、

SMBH binary は銀河から飛び出し戻ってこない、と仮定

* SMBH mass function 1

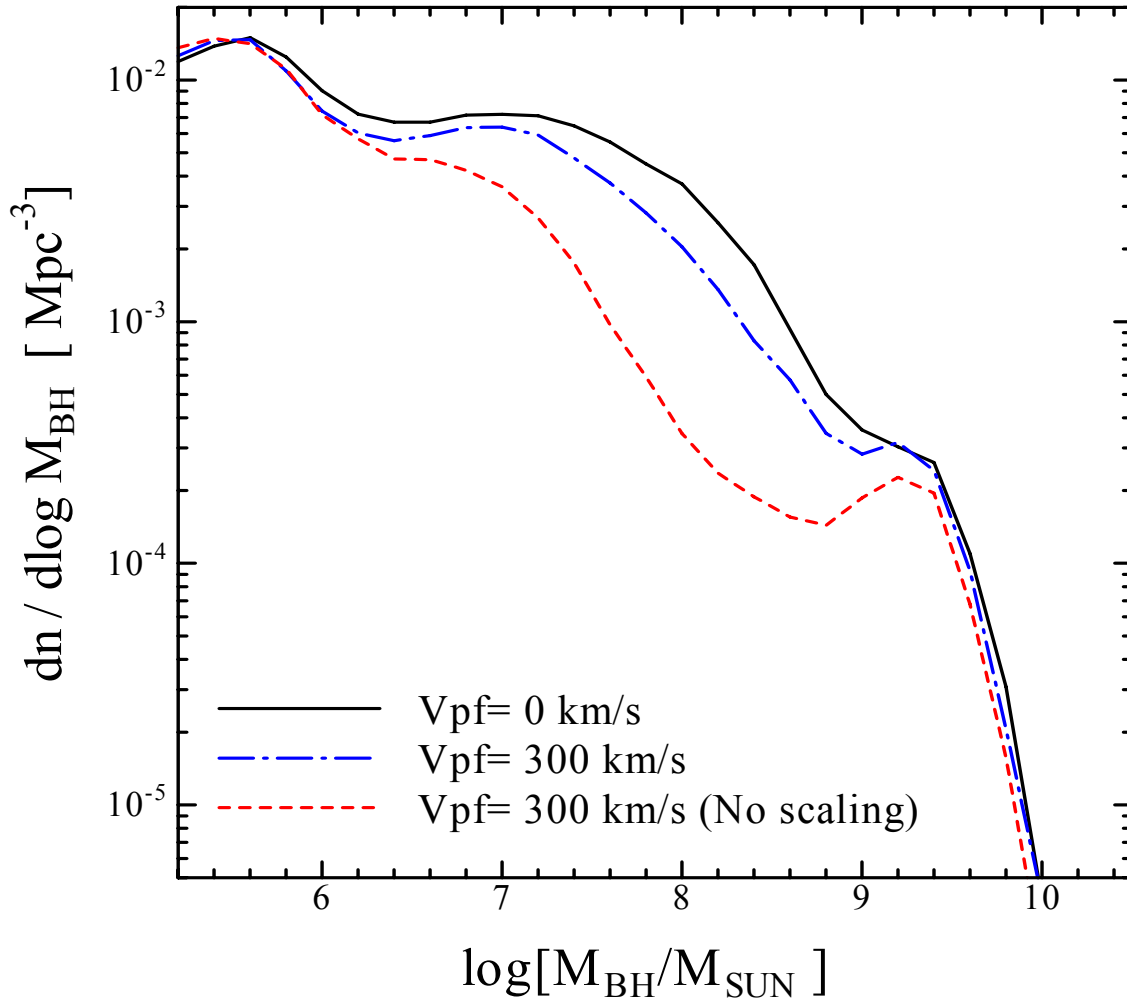


$$V_{\text{kick}} = V_{\text{pf}} \left[\frac{f(q)}{f_{\text{max}}} \right]$$

$10^6 \sim 10^9 M_{\text{sun}}$
のBHが減少する

* SMBH mass function 2

上限: $10^9 M_{\text{sun}}$?



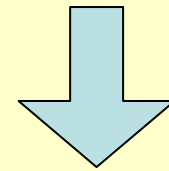
Scaling

$$V_{\text{kick}} = V_{\text{pf}} \left[\frac{f(q)}{f_{\text{max}}} \right]$$

No-scaling

$$V_{\text{kick}} = V_{\text{pf}}$$

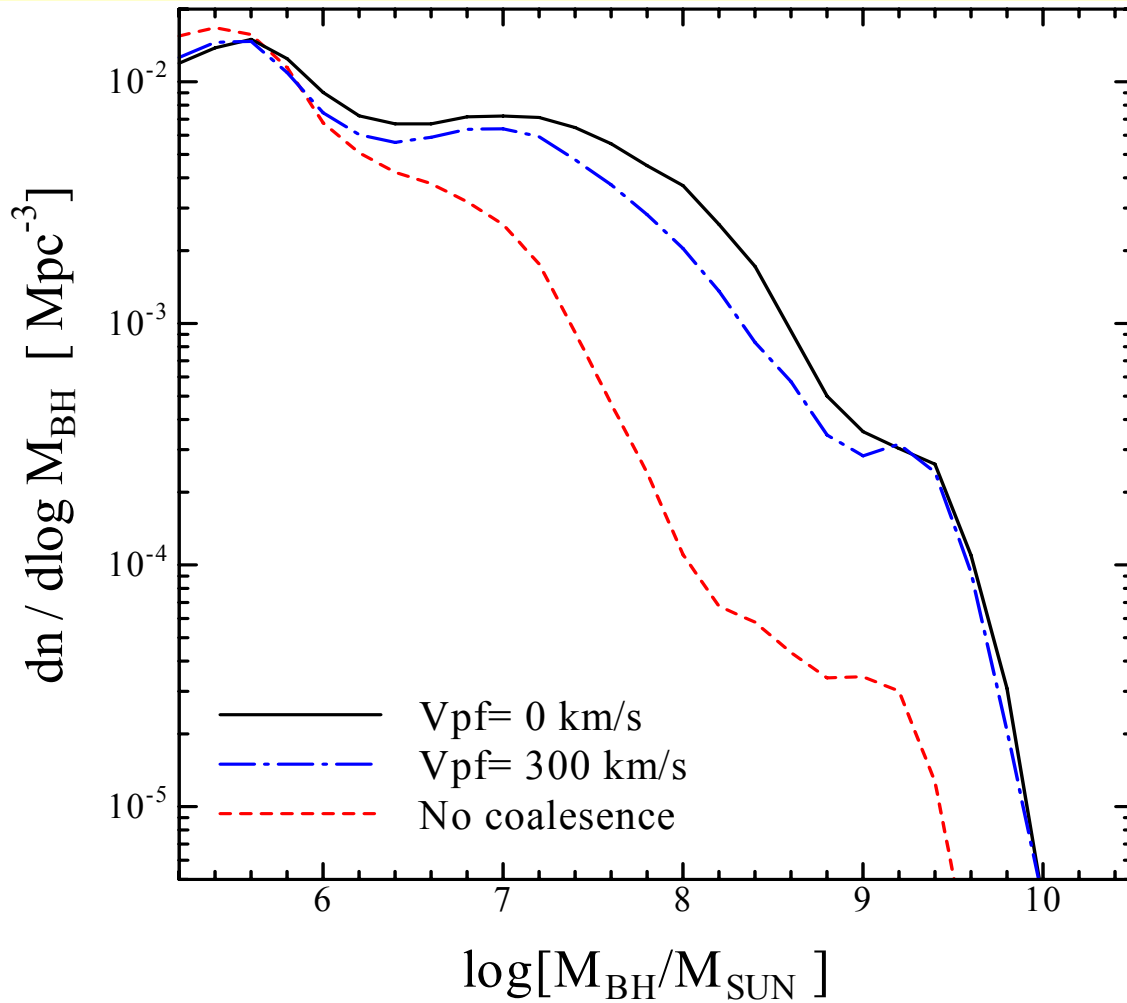
$$M_{\text{BH}} = f M_{\text{bulge}} = f \frac{\Omega_b}{\Omega_0} M_{\text{DH}}$$



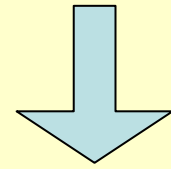
$$M_{\text{BH}} \sim 10^9 \left[\frac{V_c}{300 \text{ km/s}} \right]^3 M_{\text{Sun}}$$

* SMBH mass function 3

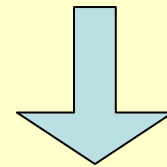
下限: $10^6 M_{\text{sun}}$?



一度合体を経験した
SMBHを取り除く

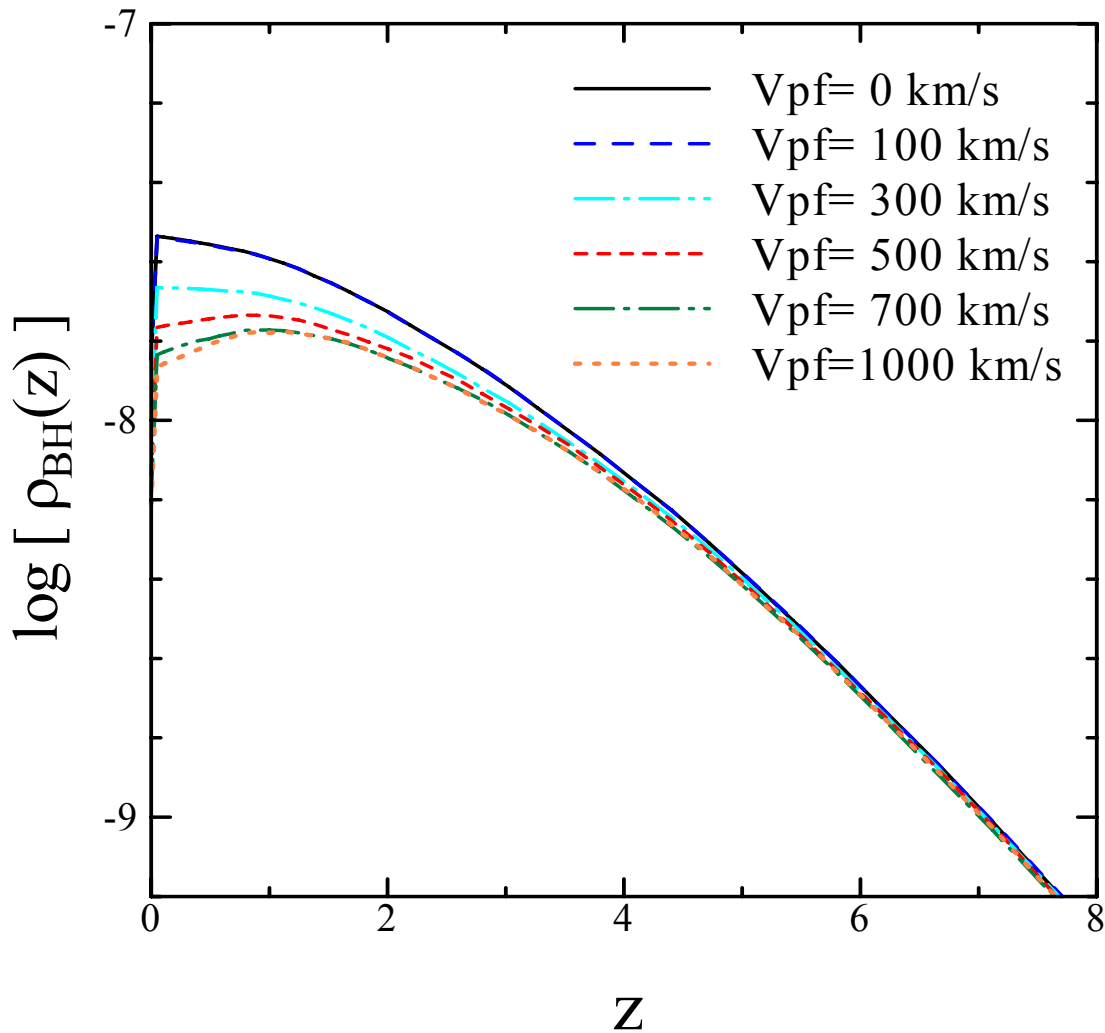


合体をしてない
SMBHのみ残る



$M_{\text{BH}} < 10^6 M_{\text{sun}}$ の SMBH
は殆ど合体を経験して
いない

* SMBH mass density



$$V_{\text{kick}} = V_{\text{pf}} \left[\frac{f(q)}{f_{\text{max}}} \right]$$

$V_{\text{pf}} = 300$ km/s の場合、
 $z=0$ で、36% 減っている。

§ 3-4. のまとめ

*準解析的銀河+SMBH形成モデル(SA model)を用いて
SMBH合体時の重力波放射の反跳の効果を考慮した場合、SMBH
の質量関数がどのような影響を受けるか解析した。

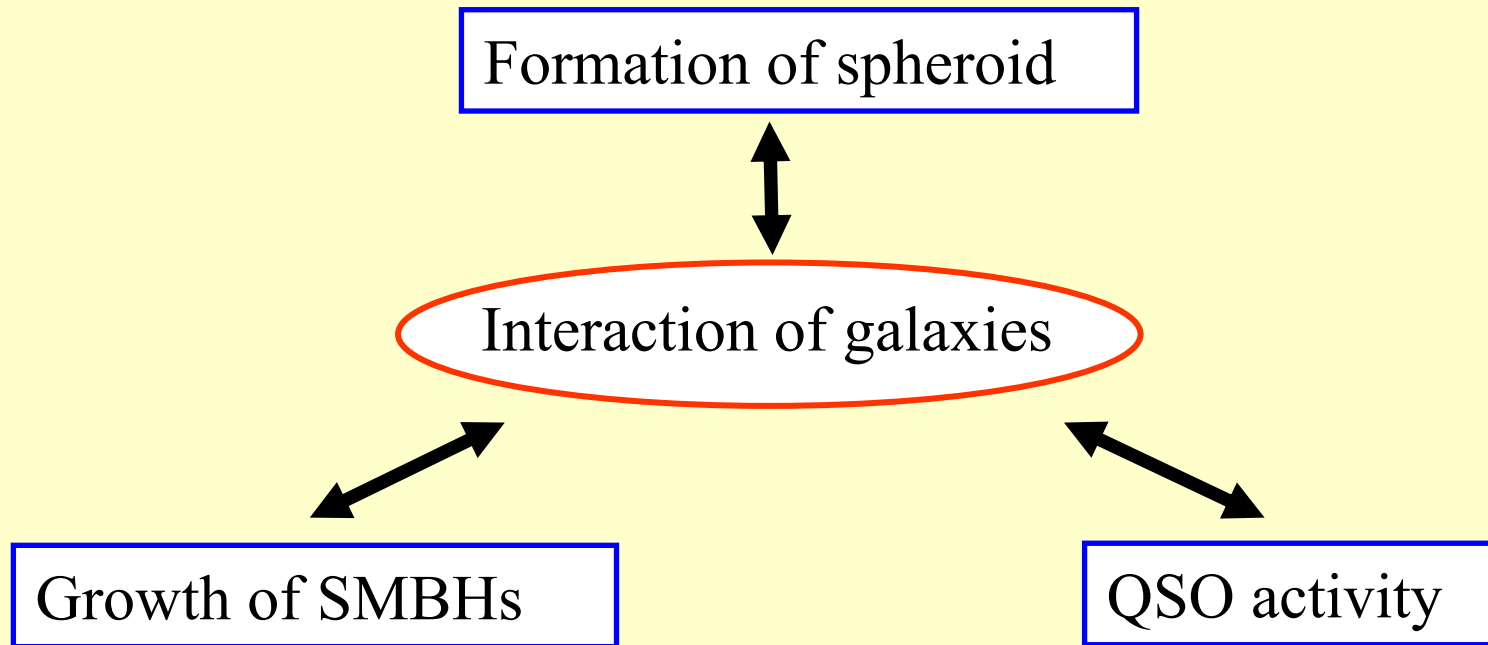
仮定

「 $V_{\text{kick}} > V_c$ なら、SMBH連星は銀河から飛び出し戻ってこない」

結果: $10^6 \sim 10^9 M_{\text{sun}}$ のBHが減少する

- $10^9 M_{\text{sun}}$?
大きなSMBHは V_c の大きな銀河にいる。
→ 反跳を受けても、銀河から飛び出さない。
- $10^6 M_{\text{sun}}$?
小さなSMBHは最近できる。
→ 合体を殆ど経ていない。
→ 反跳を受けない

§ 4. QSO environments



銀河同士の衝突合体がQSOの活動性を引き起こすなら、QSOがどんな所にいるのか(環境)を明らかにすることは重要。

* QSO-QSO空間相関 (large scale)

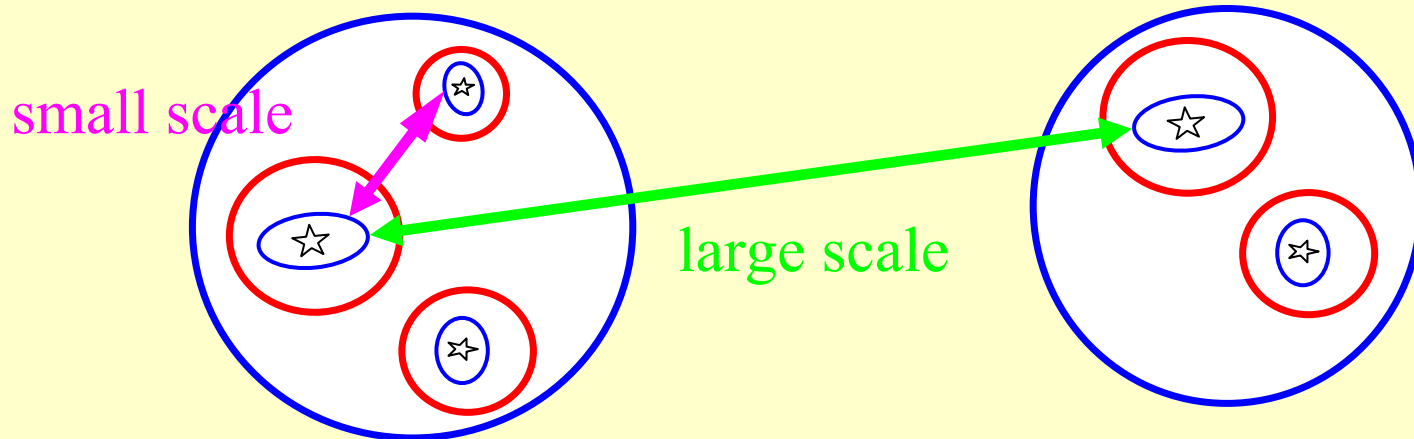
* QSO-galaxy空間相関 (small scale)

*QSO auto-correlation & QSO-galaxy cross-correlation

銀河とクエーサーの相互相関

small scale ($< 1\text{Mpc}$) なら、

一つのdark halo中での銀河とクエーサーの分布を反映



merger がQSOの活動性の原因？

host galaxy？

QSO周囲の銀河の分布を知ることが重要

cluster？ group？ field？

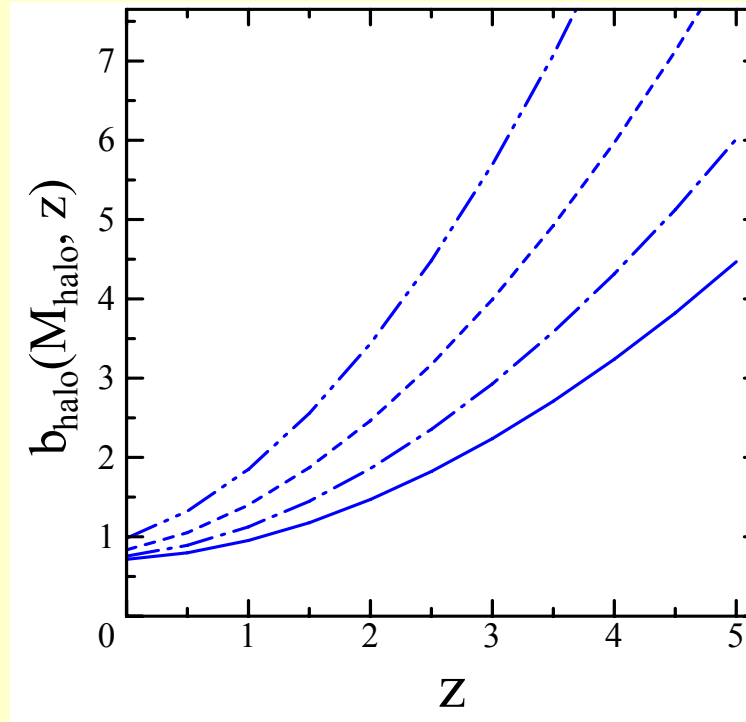
§ 4-1. QSO auto-correlation

QSO-QSO空間相関関数から何が分かるのか？

Correlation function

$$\xi_{QSO} = b_{QSO}^2 \xi_{DM}$$

dark halo のバイアス
(Jing 1998)



- DM halo bias ($10^{11.5} M_{\text{sun}}$)
- - - DM halo bias ($10^{12.0} M_{\text{sun}}$)
- · - · DM halo bias ($10^{12.5} M_{\text{sun}}$)
- · · DM halo bias ($10^{13.0} M_{\text{sun}}$)

観測より求めた b_{QSO} と、 b_{halo} と比べると、
QSOのいる典型的なdark halo (host halo) の質量が分かる。

*QSO auto-correlation

QSO形成モデルとの比較

Halo Model の利用

Effective bias
(Baugh et al. 1999)

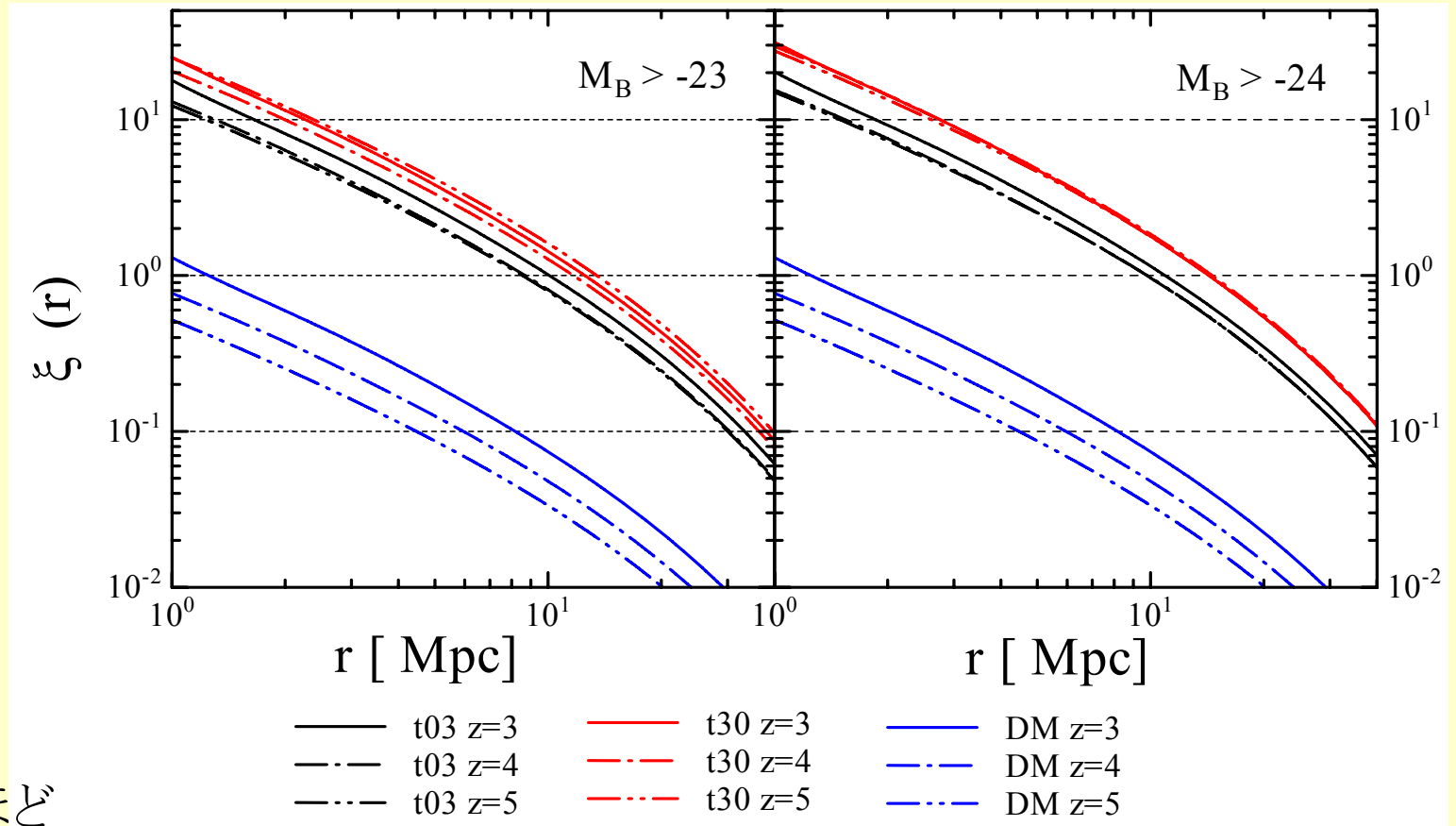
$$b_{QSO,eff} = \frac{\int b_{halo}(M) \langle N_{QSO}(M) \rangle n(M) dM}{\int \langle N_{QSO}(M) \rangle n(M) dM}$$

- * $b_{halo}(M)$: 質量 M のdark halo のbias
- * $n(M)$: dark halo の mass function
- * $\langle N_{QSO}(M) \rangle$: 質量 M のdark haloに存在するQSOの平均個数

QSO 形成モデルから予言されるべき量

* QSO のlife time、放射効率、などに依存

*QSO auto-correlation function; $z > 3$



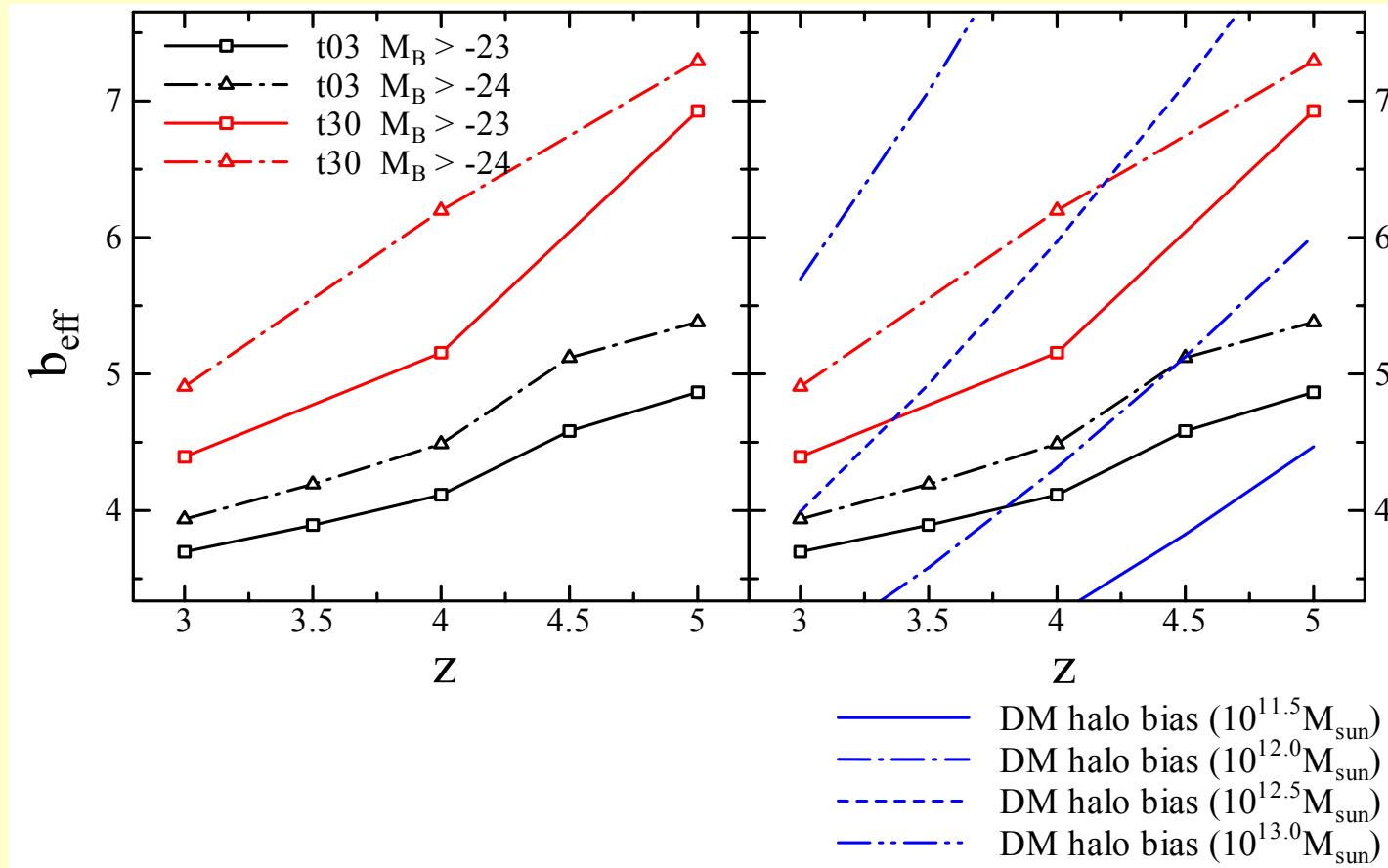
high- z に行くほど

1. dark matterの相関は弱くなる

2. QSOのバイアスは強くなる

となるので、QSO(や銀河)の相関長の進化は見られなくなる(強くなる)

*QSO effective bias



QSOは主に $M_{\text{halo}} = 10^{12-13} M_{\text{sun}}$ のdark haloにいる。

*dark halo 中でのgalaxy の merger rate

=> $M_{\text{halo}} = 10^{12-13} M_{\text{sun}}$ (group ぐらい) で最大

§ 4-2. QSO-Galaxy cross correlation

small scaleまで見たい

=> 銀河・クエーサーの位置情報が必要

=> N 体計算との結合

**Semi-analytic model of galaxy formation
and QSO/SMBH formation**

+Cosmological N -body simulation

Numerical Galactic Catalog : nGC

Numerical Galactic Catalog

N-body simulation

Yahagi's Adaptive Mesh Refinement code

Carried out on the VPP5000@ADAC/NAOJ

- Cosmology

$$\Lambda\text{CDM}; \Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, h = 0.7, \sigma_8 = 0.9, \Omega_b = 0.048$$

- Box size: 70 Mpc/h
- Number of particles: 512^3
- Effective halo mass resolution: $10^{11} M_{sun}$

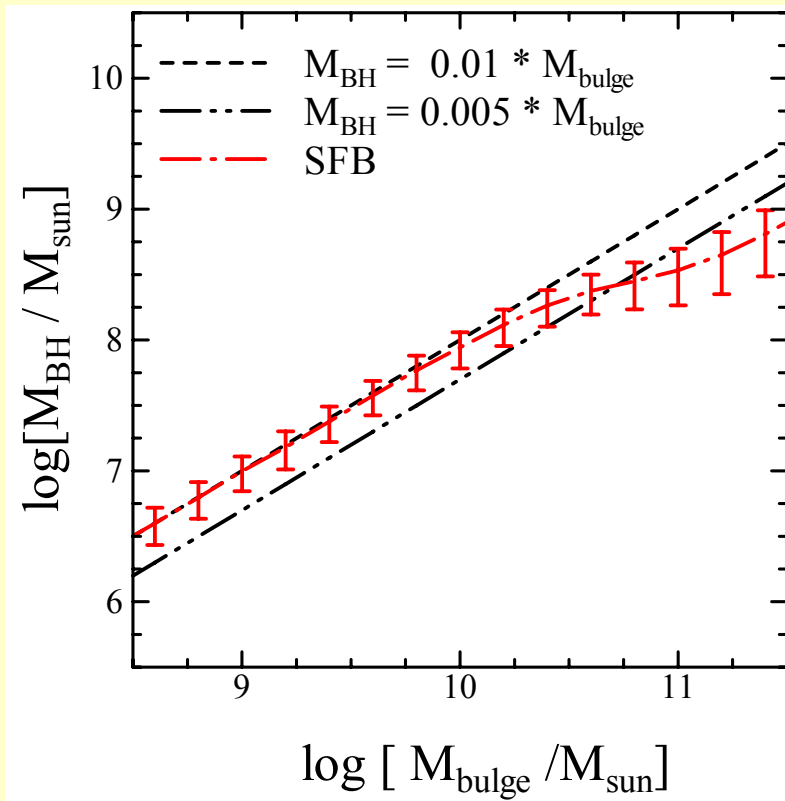
Galaxy formation model parameters

近傍の銀河の観測結果と比較して決定。

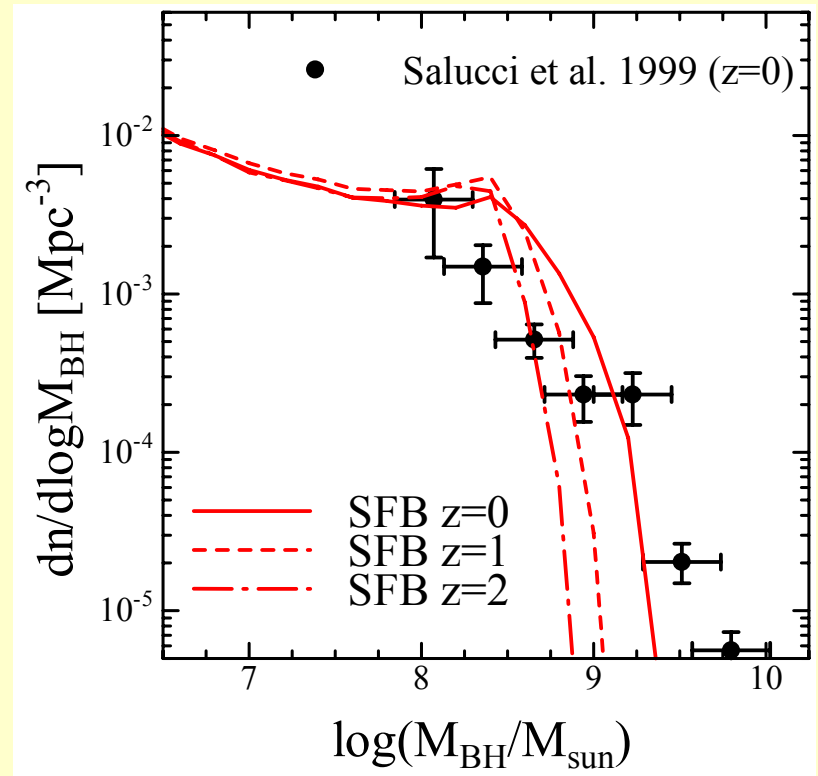
* SMBH growth

$$M_{acc} = f_{BH} M_{*,burst}$$

SMBH 質量函数の計算結果



$f_{BH} = 0.01$ とした



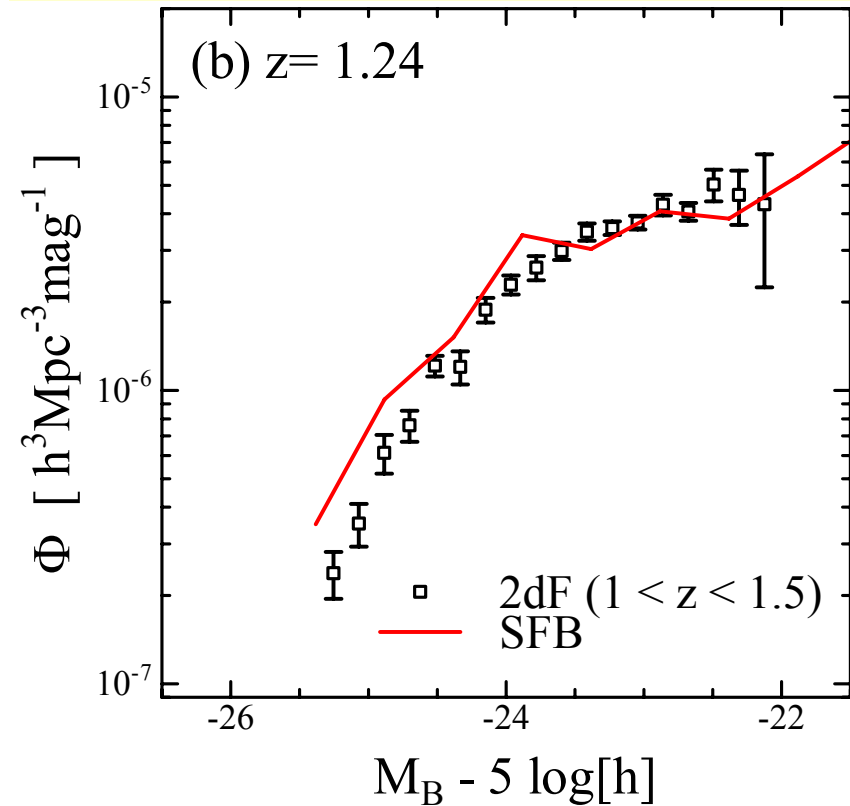
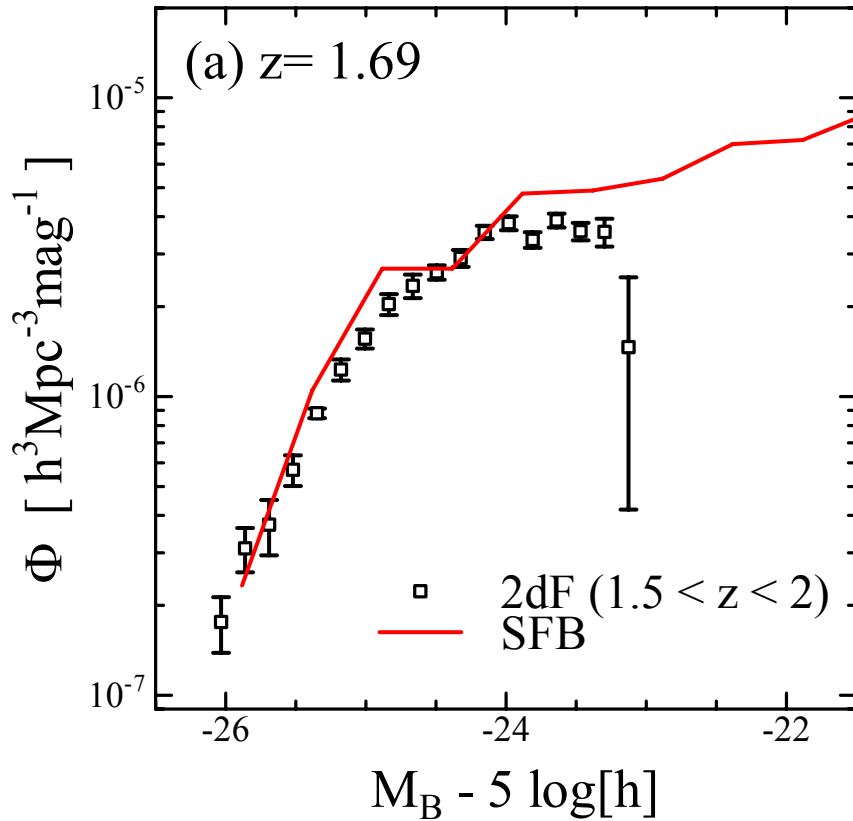
*QSO Luminosity function

QSO light curve (B-band)

$$L_B(t) = \frac{\varepsilon_B M_{acc} c^2}{t_{life}} \exp\left(-\frac{t}{t_{life}}\right)$$

ε_B : B-bandでの放射効率

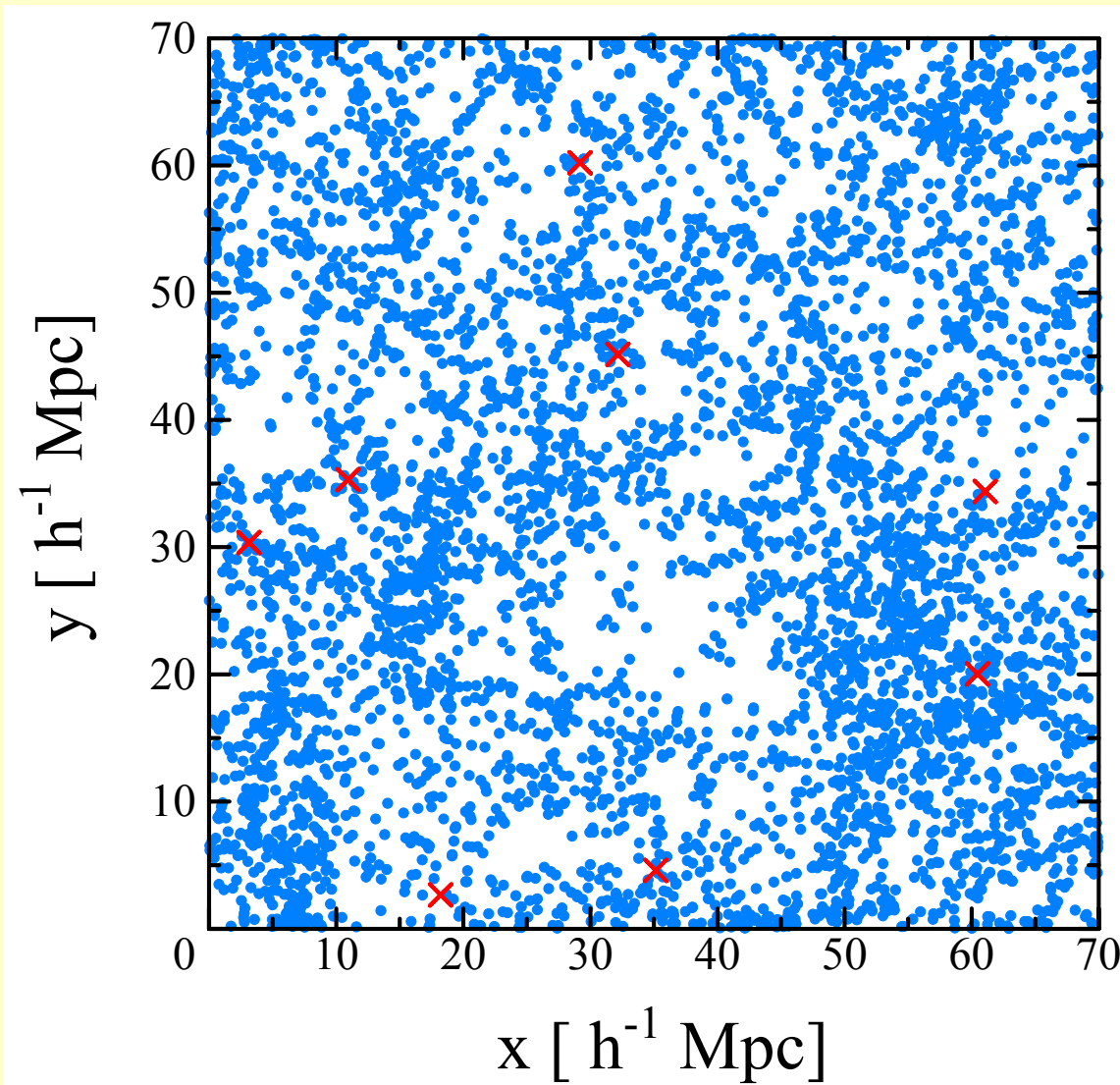
$t_{life} = t_{life}(z) \propto t_{dyn}$: QSO lifetime scale



SFB : $t_{life}(0) = 1.0 \times 10^7 \text{ yr}$, $\varepsilon_B = 0.0045$

QSO environments

Projected distributions of galaxies and QSOs in vGC.



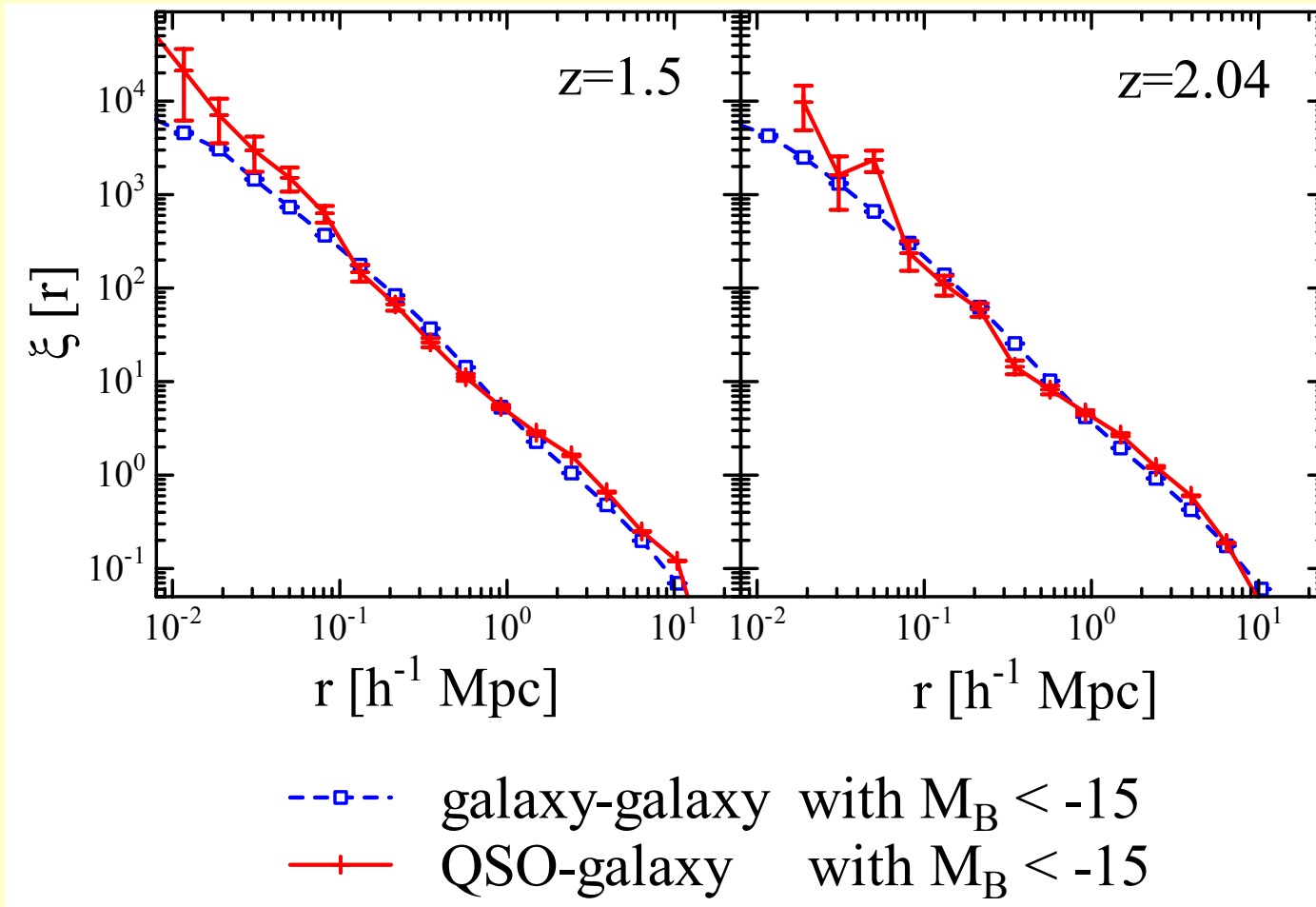
SFB @z=1.5

× : QSO

• : galaxy $M_B < -18.0$

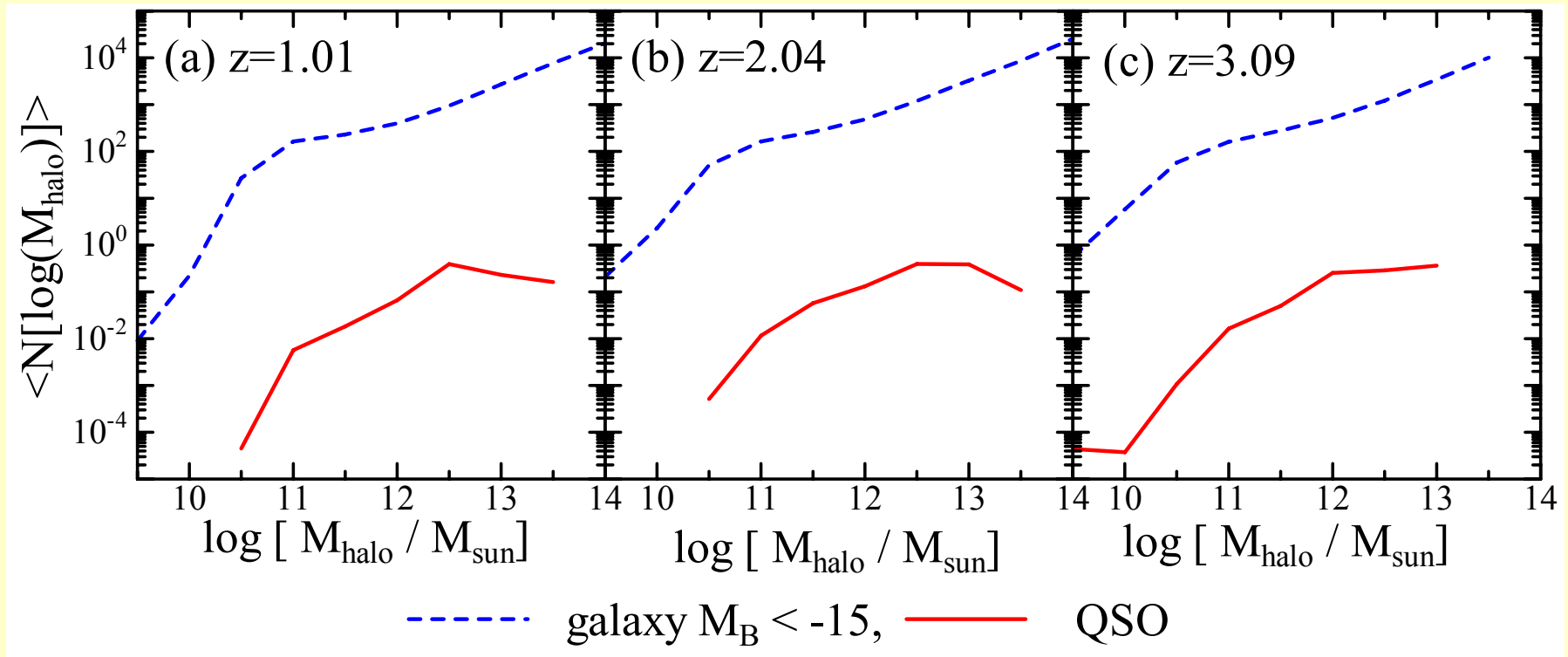
*Clustering of galaxies around QSOs

QSOgalaxyの空間相関関数 と 銀河同士の空間相関関数



*The mean occupation functions

1つのdark haloにある、平均の銀河個数と QSOの個数



QSOは質量が $10^{12} \sim 10^{13} M_{\text{sun}}$ のdark halosにいる傾向がある。

* galaxy merger rate

- 1つの dark halo 中の銀河の個数が増えれば、増大。
- dark haloの速度分散が大きくなれば、減少。

⇒ 最大になるのは、 $M_{\text{halo}} \sim 10^{13} M_{\text{SUN}}$

§ 4のまとめ

Environments of QSO (QSOはどこにいるのか?)

- QSO-QSOの空間相関関数
- 1つのdark halo中のQSOの平均個数
- QSO-Galaxy 空間相関関数

このモデルでは

QSO activity

← galaxy major merger

← merger rate は 質量が $10^{12} - 10^{13} M_{sun}$
のdark haloで最大。

=> QSOはGroups of galaxiesにいる傾向がある。

モデル結果と観測結果との比較により,

galaxy merging process

QSO formation scenarios

に制限が加えられる。

§ 5. 議論

このSMBH/QSOモデルの問題

- SMBHの合体をちゃんと解いていない。
本当に合体するのか？
銀河中心部の構造？、3体相互作用が必要？ etc
- ガスの降着過程を解いていない。
→ QSOのlight curve のモデル化に影響
- QSOがガスを加熱することによるfeedback
→ ガスの降着だけでなく、星形成にも影響大？
どこまで効くの？ どう入れる？ 禁断の果実!
- QSOのトリガーは銀河のmergerだけ？
→ QSO環境の観測で、本当に制限できる？
- Dark halo の merger tree (EPS vs N-body)
→ どっちが正しいの？