

初代星・初代銀河研究会2016 2016.10.25-27

(GW150914から示唆される)

# 銀河系内ブラックホール の観測可能性

京都大学 天体核研究室

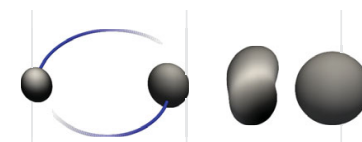
## D2 松本達矢

共同研究者: 井岡邦仁、寺木悠人(京大基研)

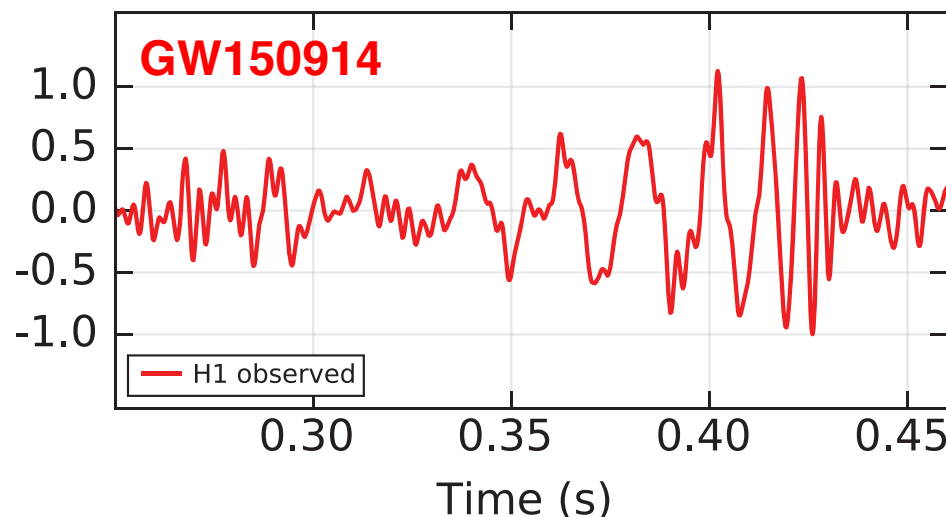
# Gravitational Wave detection

- 連星BH合体からの重力波初観測

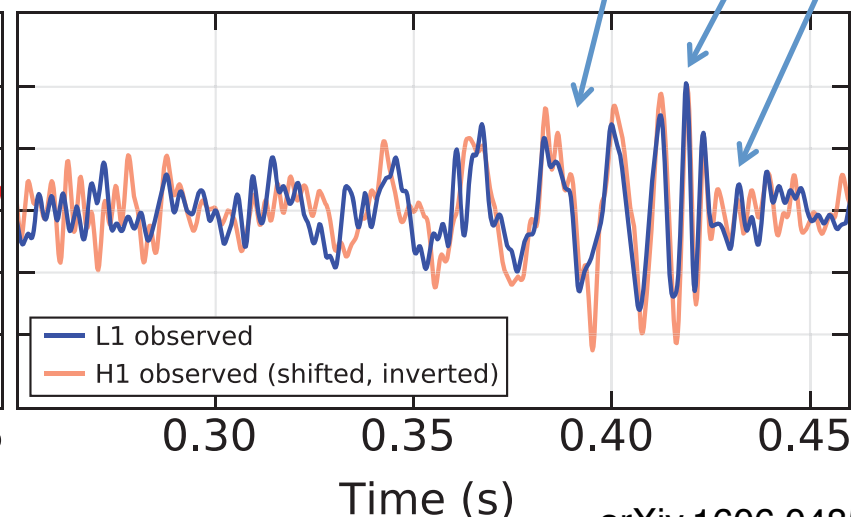
Abbott et al. 2016



Hanford, Washington (H1)



Livingston, Louisiana (L1)



arXiv.1606.04856

Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Primary mass [ $M_1/M_\odot$ ]	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$23^{+18}_{-6}$
Secondary mass [ $M_2/M_\odot$ ]	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$13^{+4}_{-5}$
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$

# Post Merger BHs

- Event rate:

$$R = 9 - 240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$$

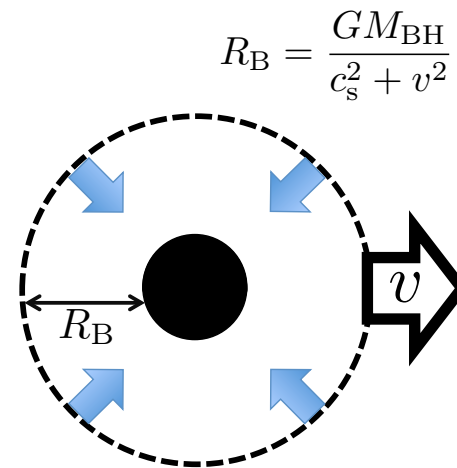
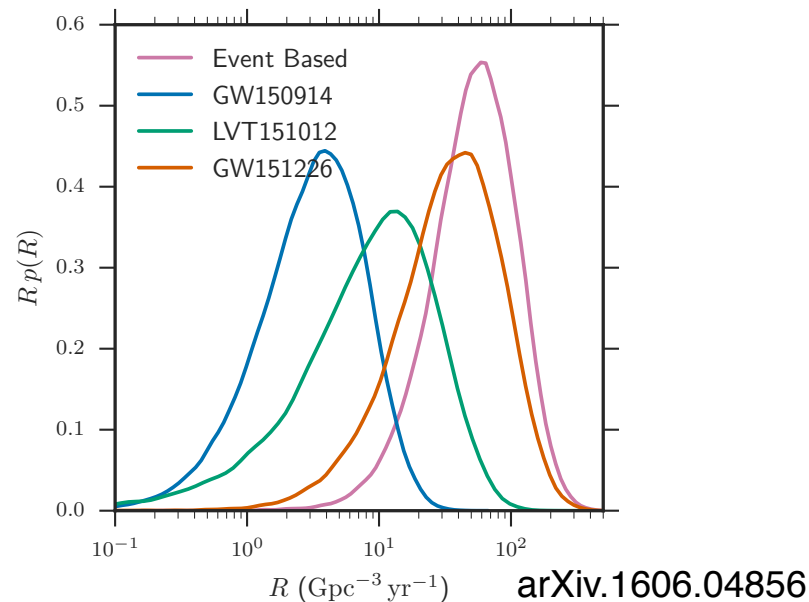
- 1 銀河のBH个数:

$$N_{\text{BH}} \sim R / n_{\text{galaxy}} \times t_{\text{Hubble}} \sim 10^{4-5} / \text{galaxy}$$

=> 銀河系内で合体後のBHは観測されるのか？

- 星間物質の降着 (Bondi降着)

$$\begin{aligned} \dot{M} &= 4\pi R_B^2 m_p n v && \text{Bondi 1952} \\ &\sim 1.3 \times 10^{15} \text{ g s}^{-1} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{60 M_{\odot}} \right)^2 \left( \frac{v}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-3} \left( \frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right) \\ &\sim 10^{-5} \dot{M}_{\text{Edd}} \end{aligned}$$



# Disk Formation

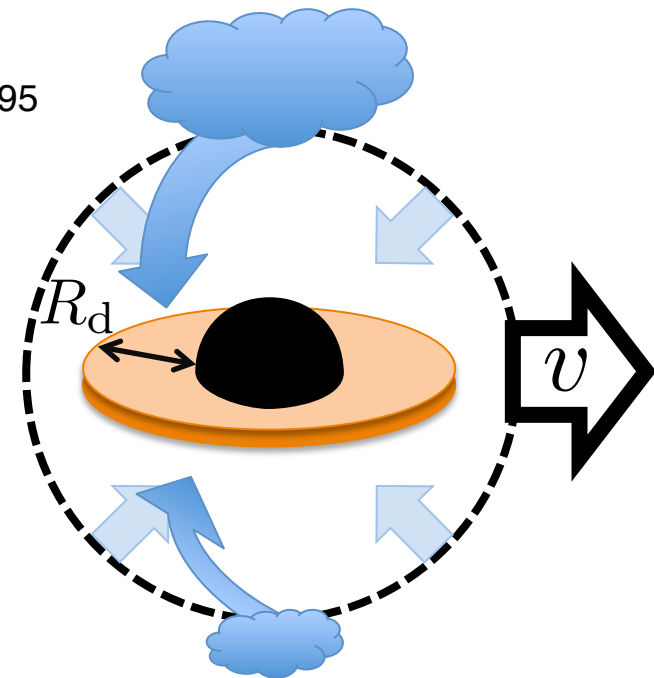
Agol & Kamionkowski 2002

- ISM密度ゆらぎ=>角運動量=>disk形成

$$\delta l \simeq \frac{\delta \rho}{\rho} R_B v \quad \frac{\delta \rho}{\rho} \sim \left( \frac{R}{10^{18} \text{cm}} \right)^{1/3}$$

Armstrong et al. 1995

$$R_d \simeq \frac{\delta l^2}{GM_{\text{BH}}} \sim 3 \times 10^{14} \text{cm}$$
$$\left( \frac{M_{\text{BH}}}{60 M_{\odot}} \right)^{5/3} \left( \frac{v}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-10/3}$$



- 降着円盤は  $\dot{M} \ll \dot{M}_{\text{Edd}}$  ゆえ  
光学的に薄い移流優勢降着流

(**A**dvection **D**ominated **A**ccretion **F**low)となる



# ADAF

Narayan & Yi 1994, 1995a,b

- 粘性加熱 = 移流 + 放射
- 自己相似解: Narayan & Yi 1994

$$v = -c_1 \alpha v_{\text{ff}}$$

$$\Omega = c_2 \frac{v_{\text{ff}}}{R}$$

$$c_s^2 = c_3 v_{\text{ff}}^2$$

$c_1, c_2, c_3$  : 定数

$\alpha$  : 粘性パラメータ Shakura & Sunyaev 1973

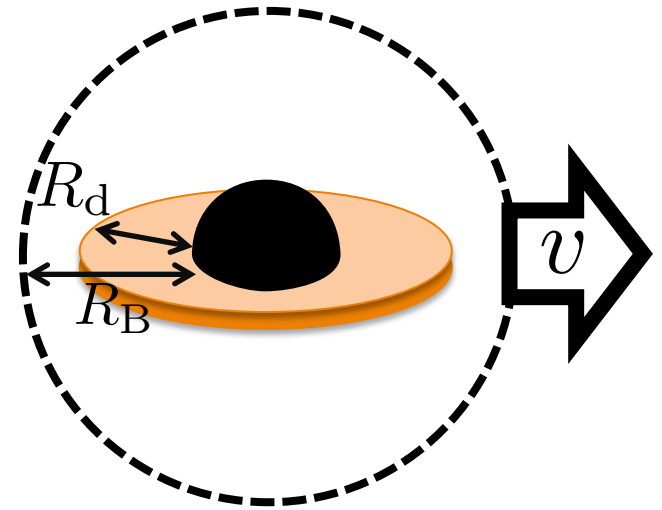
- 電子温度: イオンと異なりうる Shapiro et al. 1976  
Narayan & Yi 1995b

$$\text{イオン: } q_{\text{vis}} = q_{\text{ad}} + q_{\text{ie}} \quad q_{\text{ad}} = f q_{\text{vis}} (f \simeq 1)$$

$$\text{電子: } q_{\text{ie}} = q_{\text{rad}} \quad q_{\text{rad}} = q_{\text{bre}} + q_{\text{syn}}$$

制動放射 シンクロトロン

$$\Rightarrow (1 - f) q_{\text{vis}} = q_{\text{ie}} = q_{\text{bre}} + q_{\text{syn}}$$



# ADAFの温度構造 $(1-f)q_{\text{vis}} = q_{\text{ie}} = q_{\text{bre}} + q_{\text{syn}}$

クーロン 加熱

Spitzer 1962, Stepney 1983

$$q_{\text{ie}} \sim \frac{m_e}{m_p} n_e n_i \sigma_T c \ln \Lambda \frac{k_B T_i - k_B T_e}{v_e^{3/2}}$$

$$P(r) = nk_B(T_i + T_e) \Rightarrow T_i \propto R^{-1}$$

$$\propto R^{-4} T_e^{-3/2}$$

制動放射 冷却

Rybicki & Lightman 1979, Svensson 1982

$$q_{\text{bre}} \sim n_e n_i \sigma_T \alpha_f m_e c^3 \left( \frac{k_B T_e}{m_e c^2} \right)^{1/2} \propto R^{-3} T_e^{1/2}$$

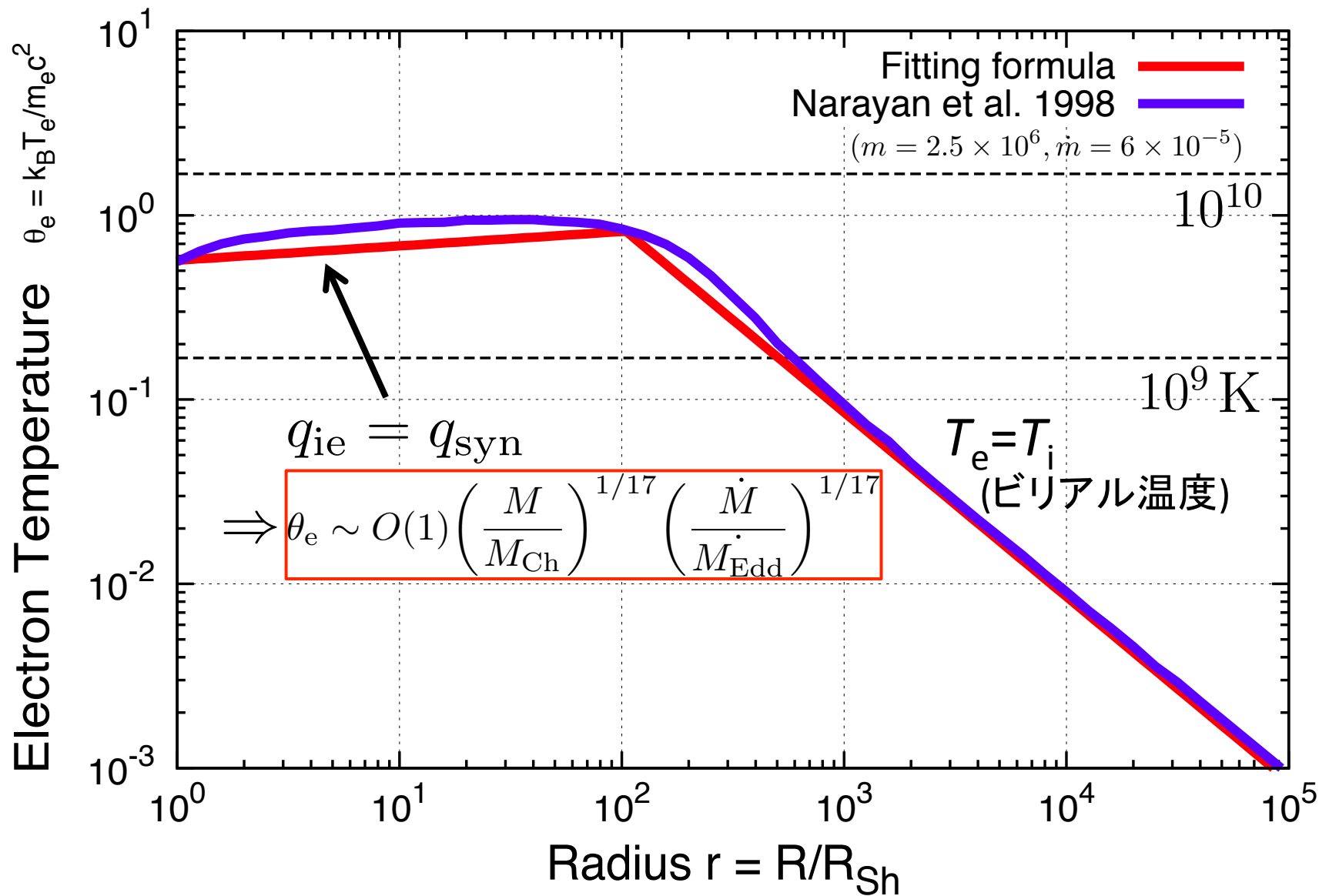
シンクロトロン放射 冷却

Rybicki & Lightman 1979, Mahadevan et al. 1996

$$q_{\text{syn}} \sim \pi \frac{2\nu_a^2}{c^2} k_B T_e \frac{\nu_a}{R} \quad : \text{自己吸収} \quad \nu_a = x\nu_c = x\gamma^2 \frac{eB}{m_e c} \propto T_e^2$$

$$\propto R^{-19/4} T_e^7$$

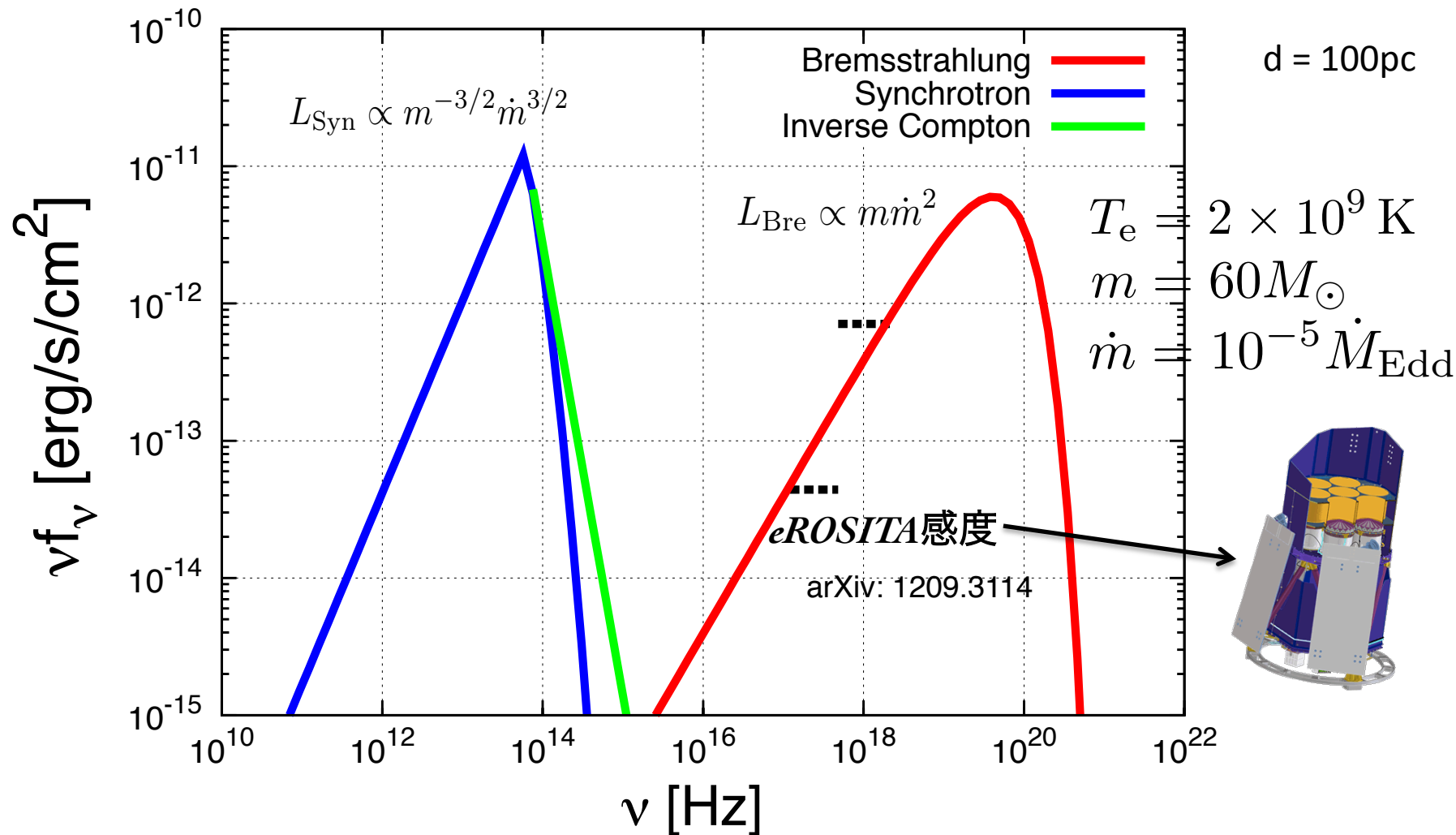
# ADAFの温度構造



# ADAF spectrum

Narayan & Yi 1995, Mahadevan 1997

- 各放射のスペクトラムを計算...



# Luminosity Function

$$\dot{M} \propto M_{\text{BH}}^2 v^{-3} n$$

$$L_{\text{x}} \propto M_{\text{BH}}^{-1} \dot{M}^2$$

$$\frac{dN}{dL_{\text{x}}} = N_{\text{BH}} \int dm_1 \frac{dp(m_1)}{dm_1} \int dm_2 \frac{dp(m_2|m_1)}{dm_2} \int dv \frac{df(v)}{dv} \int dn \frac{d\xi(n)}{dn} h(m_1, m_2, v) \delta[L_{\text{x}}(n, m_1, m_2, v) - L_{\text{x}}]$$

- BH mass  $m_1$ : 5 – 50  $M_{\text{sun}}$ , Salpeter like

- 固有速度  $v$ :

White & van Paradijs 1996

\*合体前：銀河系内のX線連星： $\sigma_v \sim 40$  km/s, Maxwell

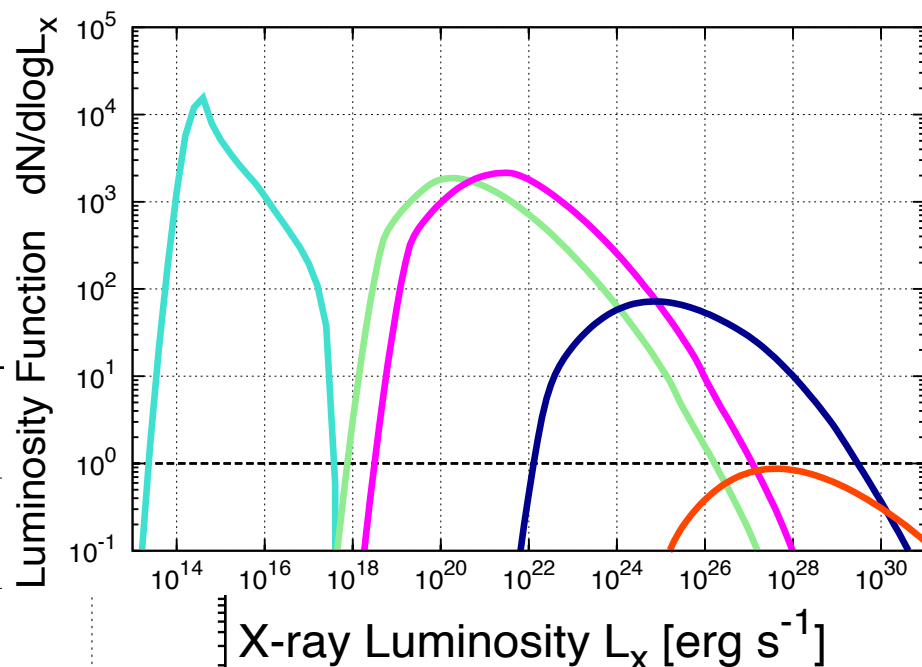
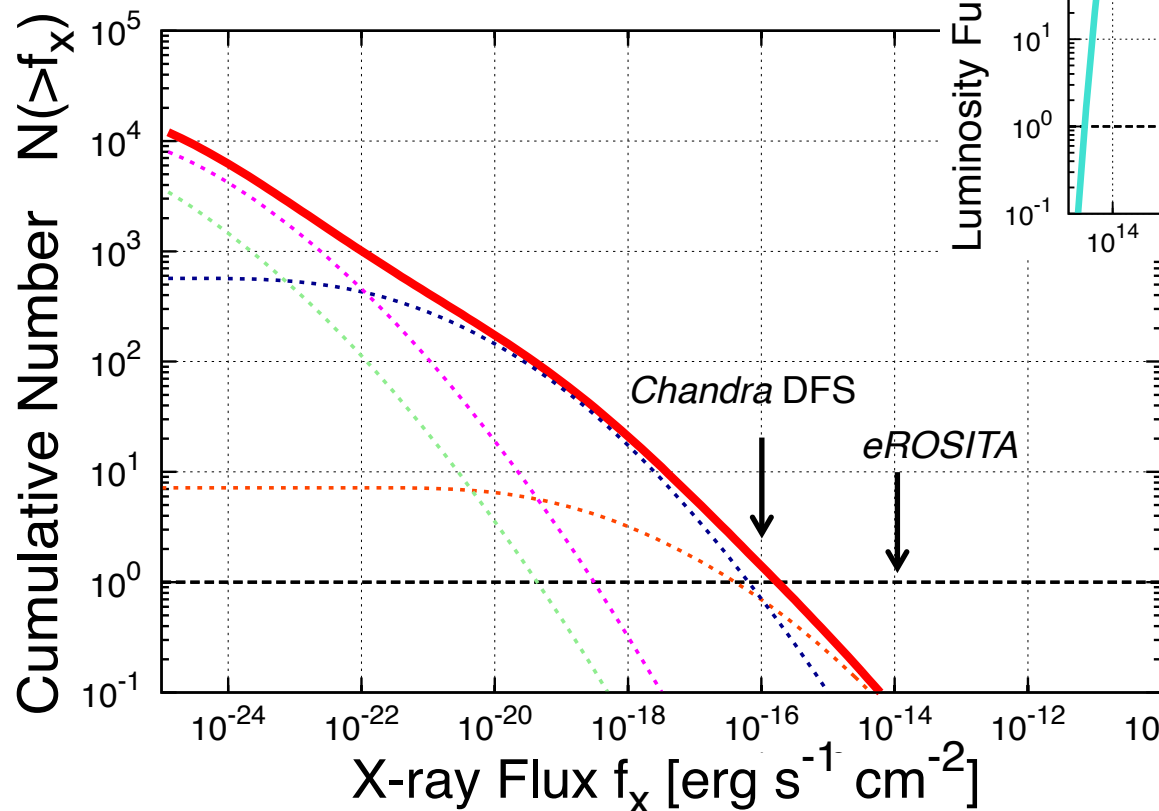
\*合体後：合体に伴うkick  $v_{\text{kick}} < 200$  km/s Gonzalez et al. 2007

- 星間物質密度  $n$ : Ioka et al. in prep

Phase	$n_1$ [cm <sup>-3</sup> ]	$n_2$ [cm <sup>-3</sup> ]	$\beta$	$\xi_0$ :体積占有率
Molecular clouds	10 <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	2.8	10 <sup>-3</sup>
Cold H <sub>I</sub>	10	10 <sup>2</sup>	3.8	0.04
Warm H <sub>I</sub>	0.3	—	—	0.35
Warm H <sub>II</sub>	0.15	—	—	0.2
Hot H <sub>II</sub>	0.002	—	—	0.4

# Luminosity Function

BHの個数が少ない  
=>観測も期待:薄



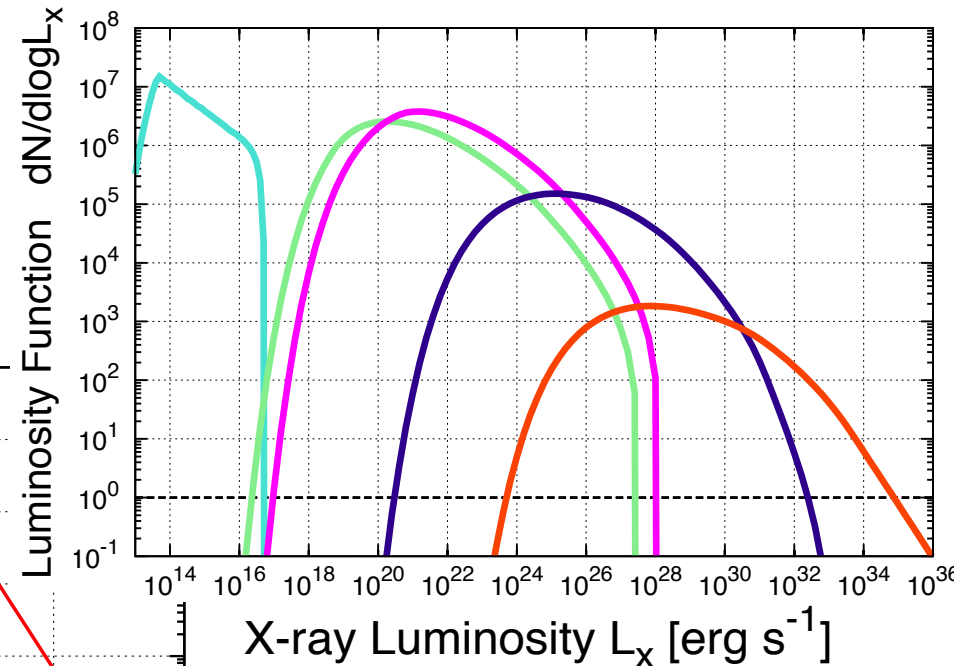
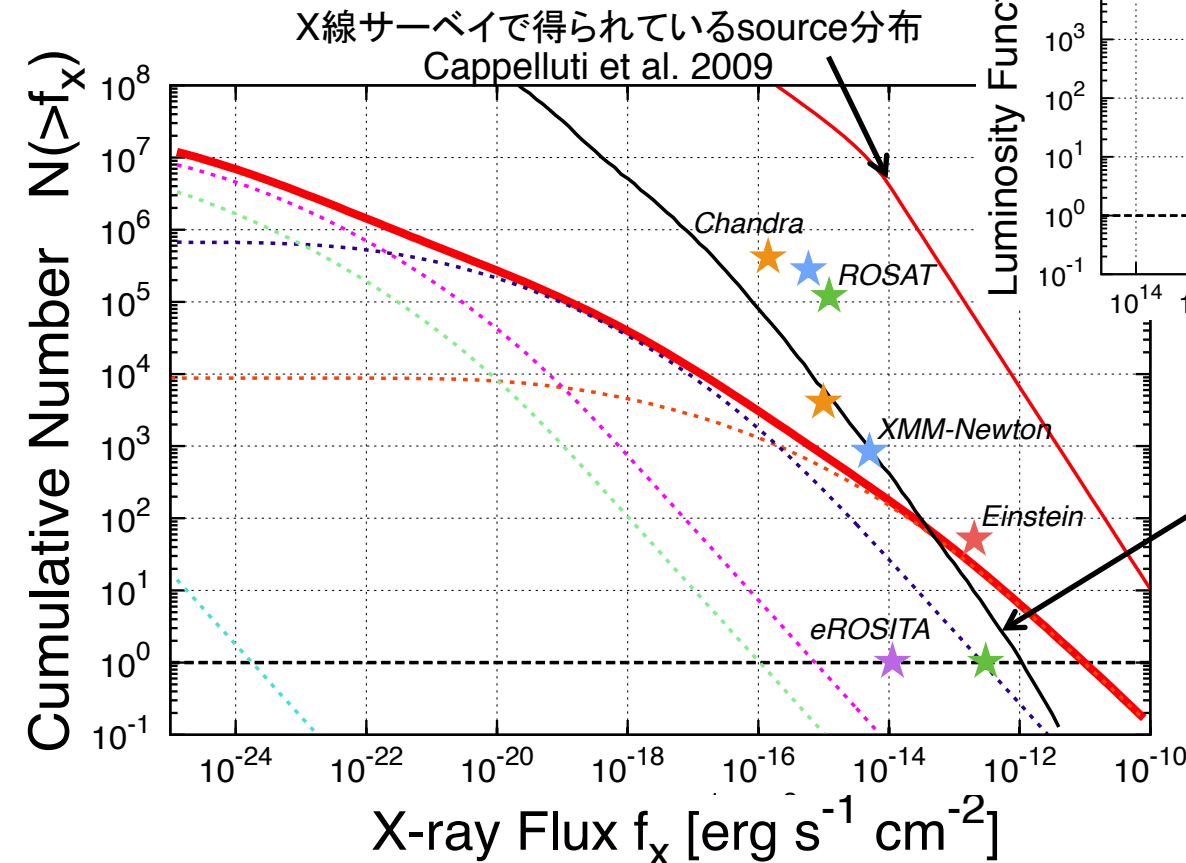
そもそも  
GW天体の性質自体は使っていない  
(※ BHスピンなどは考慮していない  
Ioka et al. in prep.)

=>銀河系内の  
single BH全体で考える

# Galactic Isolated BHs $N_{\text{BH}} \sim 10^8$

Shapiro & Teukolsky 1983

分子雲内のBHが寄与：大  
X-ray survey での観測可能性  
ROSATで既に紛れ込んでいる？  
eROSITAで～100個ほど検出できる可能性



※先行研究との比較

Agol & Kamionkowski 2002

1. 質量の最大値

$$M_{\text{max}} = 13 M_{\text{sun}} \leftrightarrow 50 M_{\text{sun}}$$

2. 放射効率

$$\epsilon_x = L_x / \dot{M} c^2 = 10^{-5}$$

↔ ADAFモデルにもとづき評価

# Conclusion

- 単独BHは星間物質をBondi降着&円盤形成  
今回
- BH周囲のADAFからの放射,光度函数を計算  
=>1. GWイベント関連のBHは観測期待：薄  
2. 系内に存在しうるBHで考える  
今後のサーベイで観測可能？  
特に、分子雲からのX線源を探せ！

今後やるべき課題

分子雲からのX線は減光されずに届くのか？

大きい降着率の明るいBHのdisk構造はどうなっているか？



# ADAFの温度構造 $(1-f)q_{\text{vis}} = q_{\text{ie}} = q_{\text{bre}} + q_{\text{syn}}$

