

# 銀河系内ブラックホール探査



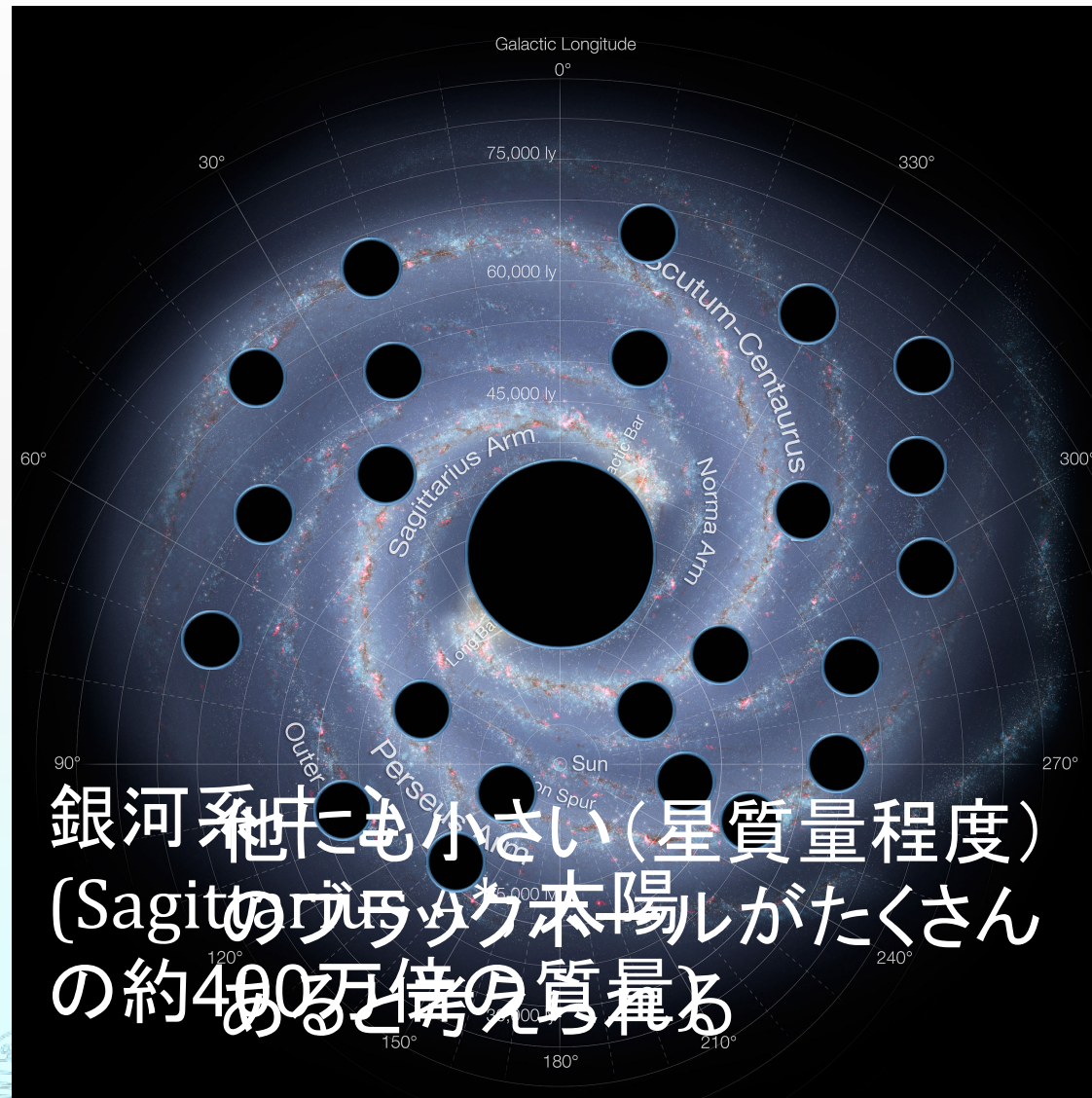
Department of Astronomy,  
Kyoto University

川中 宣太 (京都大学 白眉センター)

共同研究者: 津名大地 (東大), 戸谷友則 (東大),  
山口正輝 (東大), Tomasz Bulik (Univ. of Warsaw),  
Tsvi Piran (Hebrew Univ.)

研究会X @ 広島大学 2018/3/2

# 銀河系にブラックホールはいくつある？



Wikipediaより

# これまで見つかっている星質量ブラックホール

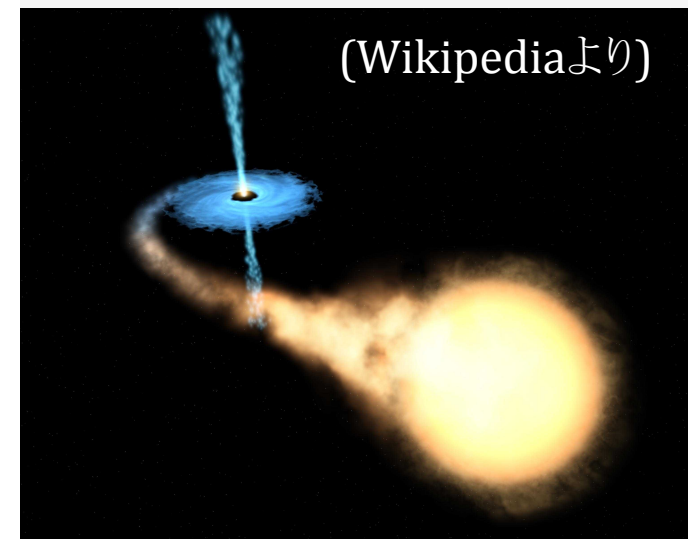
> 30-50 個 (人によって違ったりする)

これらは全てX線連星

伴星からの質量降着によって明るく輝く

Table 1  
Properties of 23 Black Hole Binaries

Source Number	Coordinate Name	Common Name or Prefix <sup>a</sup>	Type <sup>b</sup>	<i>l</i> (deg)	<i>b</i> (deg)	Max. Int. (Crab)	<i>P</i> <sub>orb</sub> (hr)	<i>D</i> (kpc)	References (distance)
1	1354-64	(GS)	LPT	310.0	-2.8	0.12	61.1	>25	1
2	1543-47	(4U)	LPT	330.9	+5.4	15	26.8	7.5 ± 0.5	2
3	1550-564	(XTEJ)	LPT	325.9	-1.8	7.0	37.0	4.4 ± 0.5	3
4	1655-40	(GROJ)	LPT	345.0	+2.5	3.9	62.9	3.2 ± 0.5	4
5	1659-487	GX 339-4	LPT	338.9	-4.3	1.1	42.1	9 ± 3	5
6	1819.3-2525	V4641 Sgr	LPT	6.8	-4.8	13	67.6	9.9 ± 2.4	6
7	1915+105	(GRS)	LPT	45.4	-0.2	3.7	739	9 ± 3	7
8	2023+338	(GS)	LPT	73.1	-2.1	20	155.3	2.39 ± 0.14	8
9	0422+32	(GROJ)	SPT	166.0	-12.0	3	5.1	2 ± 1	9,10
10	0620-003	(A)	SPT	210.0	-6.5	50	7.8	1.06 ± 0.12	11
11	1009-45	(GRS)	SPT	275.9	+9.4	0.8	6.8	3.82 ± 0.27	10
12	1118+480	(XTEJ)	SPT	157.6	+62.3	0.04	4.1	1.7 ± 0.1	12
13	1124-683	Nova Mus 91	SPT	295.3	-7.1	3	10.4	5.89 ± 0.26	10
14	1650-500	(XTEJ)	SPT	336.7	-3.4	0.6	7.7	2.6 ± 0.7	13
15	1705-250	Nova Oph 77	SPT	358.2	+9.1	3.6	12.5	8.6 ± 2.1	14
16	1859+226	(XTEJ)	SPT	54.1	+8.6	1.5	9.2 <sup>c</sup>	8 ± 3	10
17	2000+251	(GS)	SPT	63.4	-3.0	11	8.3	2.7 ± 0.7	14
18	0020+593	IC 10 X-1	PS	...	...	0.00006	34.9	...	...
19	0055-377	NGC 300-1	PS	...	...	0.00004	32.3	...	...
20	0133+305	M33 X-7	PS	...	...	0.00002	82.9	...	...
21	0538-641	LMC X-3	PS	...	...	0.06	40.9	...	...
22	0540-697	LMC X-1	PS	...	...	0.03	93.8	...	...
23	1956+350	Cyg X-1	PS	...	...	2.3	134.4	...	...






これ(銀河系中心と合わせて ~30個)で全部?

銀河系の星形成率  $\sim 3.5 M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$

Initial mass function:  $\Psi(\bar{M}_1) d\bar{M}_1 \propto \begin{cases} \bar{M}_1^{-1.3} d\bar{M}_1, & 0.08 M_{\odot} \leq \bar{M}_1 < 0.5 M_{\odot}, \\ \bar{M}_1^{-2.2} d\bar{M}_1, & 0.5 M_{\odot} \leq \bar{M}_1 < 1.0 M_{\odot}, \\ \bar{M}_1^{-\alpha_{\text{IMF}}} d\bar{M}_1, & 1.0 M_{\odot} \leq \bar{M}_1 < 150 M_{\odot}, \end{cases}$

BH を形成する星の minimum ZAMS mass  $\sim 20 M_{\text{sun}}$

  $\int_{20 M_{\text{sun}}}^{150 M_{\text{sun}}} d\bar{M}_1 \Psi(\bar{M}_1) \sim \bar{M}_1 \Psi(\bar{M}_1) \Big|_{\bar{M}_1 \sim 20 M_{\text{sun}}} \sim 0.02 \text{ yr}^{-1}$

∴ 現在のブラックホールの総数はざっと

$$\sim 0.02 \text{ yr}^{-1} \cdot 1.0 \times 10^{10} \text{ yr} \sim 2 \times 10^8 \text{ 個}$$

我々は銀河系ブラックホールの極々一部  
( $< \sim 0.00001\%$ )しか知らない



# 銀河系内ブラックホールの質量関数

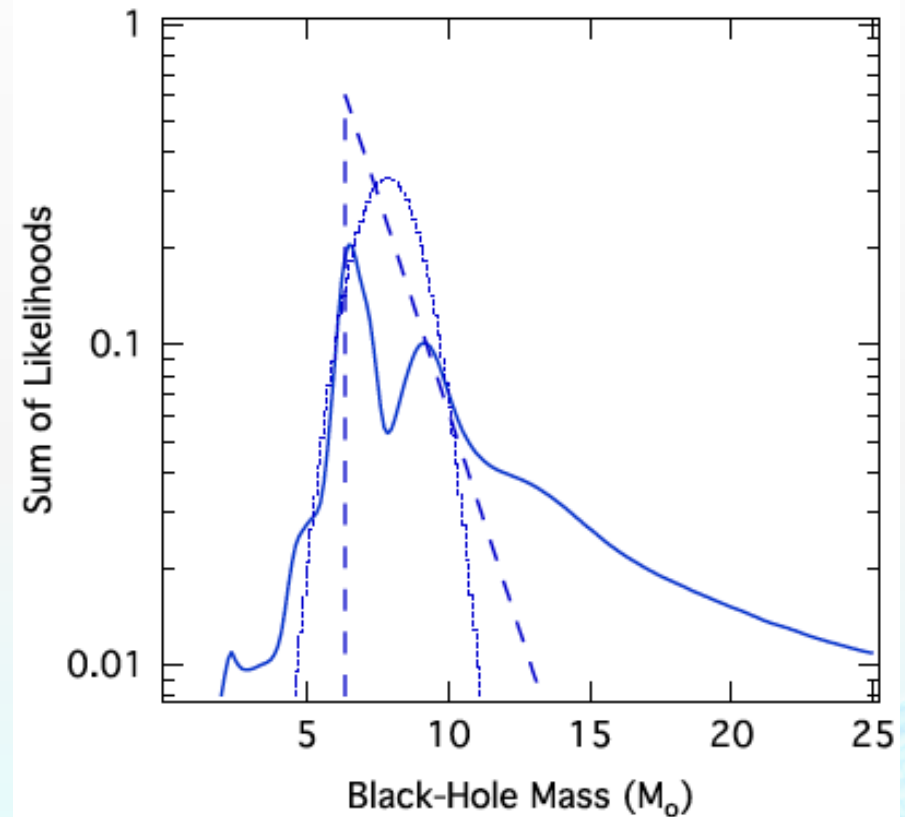
Ozel et al. 2010

X線連星のうち、質量関数が分かっているもの 16 個について BH 質量の likelihood  $P(\text{data}/M_{\bullet})$  を求める

→ BH 質量関数の形を仮定、そのパラメータをベイズの定理から推定

→ Gaussian だとすると平均  $7.8M_{\odot}$ 、分散  $1.2M_{\odot}$

→  $2-5M_{\odot}$  の BH がほとんどないのはなぜか？ 超新星爆発機構に関する示唆？

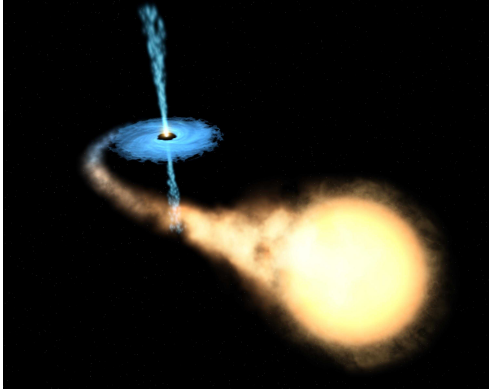


solid:  $P(\text{data}/M_{\bullet})$  の和  
dashed: exponential  
dotted: Gaussian

# 銀河系内ブラックホール探査の意義

- とりあえず銀河系内にどれだけブラックホールがあるか知りたい
- non-biased なブラックホールの質量関数を、より高い統計で求めたい
- ブラックホールの空間分布を知りたい
- ブラックホールの形成過程に関して観測から示唆を得たい

# 系内ブラックホールの見つけ方

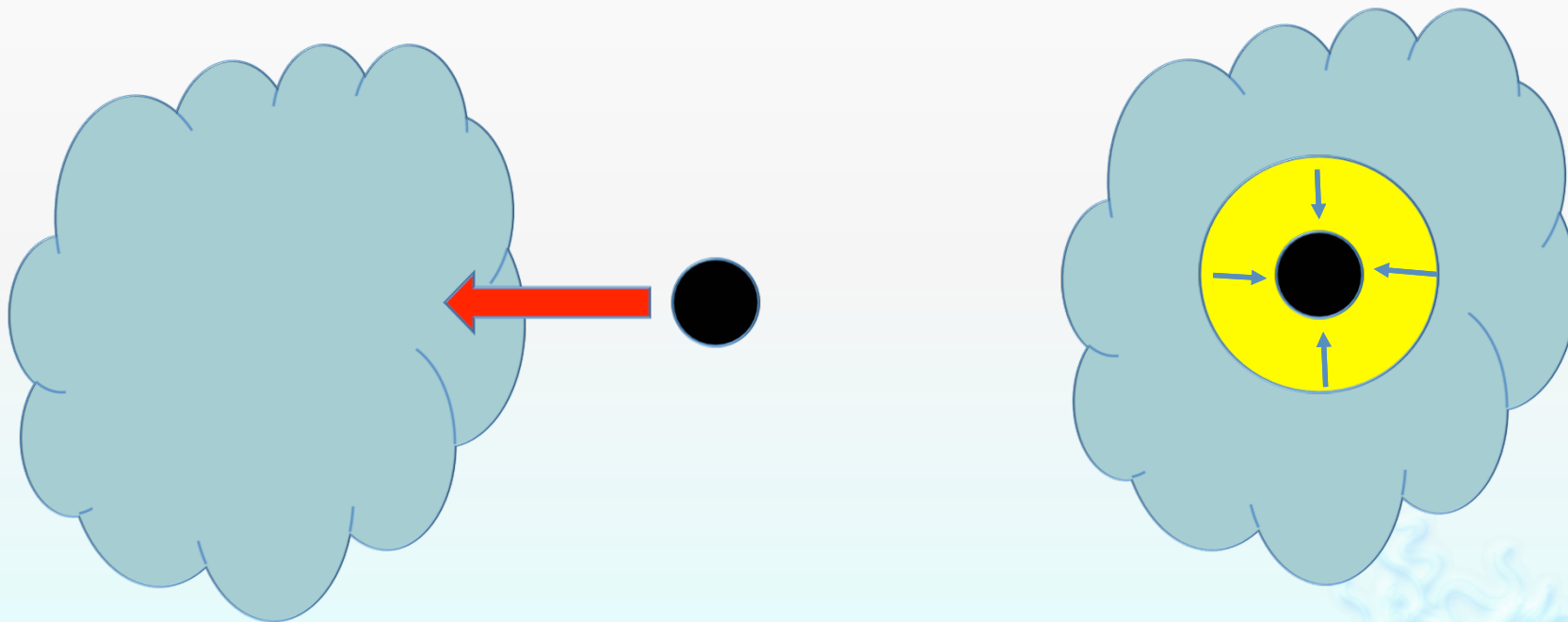
	連星を組んでいる	単独で浮遊している
ガス降着あり		<ul style="list-style-type: none"><li>• Bondi-Hoyle 降着によるX線放射</li><li>• 円盤風と周辺物質の相互作用による放射</li></ul>
ガス降着なし	<ul style="list-style-type: none"><li>• 伴星の動きを測定</li><li>• 連星内重力レンズ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 近傍の分子雲の変形</li></ul>



# 単独BH (isolated BH)へのガス降着

(1) 銀河系内を浮遊する  
BHがガス密度の高い領域  
( $< \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ )に突っ込む

(2) BHの重力圏に捉えら  
れたガスが降着 (Bondi-  
Hoyle 降着) し、X線で輝く



Q: このようなブラックホールはいくつ見つかりと  
期待できるか？ 見えると何が分かるか？

# accreting isolated BH の研究

- 理論研究はものすごく沢山ある (Shvartsman 1971; Grindlay 1978; Carr 1979; McDowell 1985; Campana & Pardi 1993; Popov & Prokhorov 1998; Fujita et al. 1998; Armitage & Natarajan 1999; Grindlay et al. 2001; Agol & Kamionkowski 2002; Maccarone 2005; Mii & Totani 2005; Sartore & Treves 2010; Motch & Pakull 2012; Barkov et al. 2012; Fender et al. 2013; Ioka et al. 2017; Inoue & Kusenko 2017; Matsumoto et al. 2018)
- 一方、X線で検出しようという試みはあった (ROSAT All Sky Survey)が、未だに発見はされていない
- モデルの不定性が大きい (BH の質量関数と空間分布、星間ガス分布、固有速度、ガス降着の効率)  
→ これらの現実的なモデルを用いて、将来観測での検出数予測・現時点でのモデルの制限(特にキック速度、降着効率)をしてみよう！

# FORCE (FOcusing Relativistic universe and Cosmic Evolution)

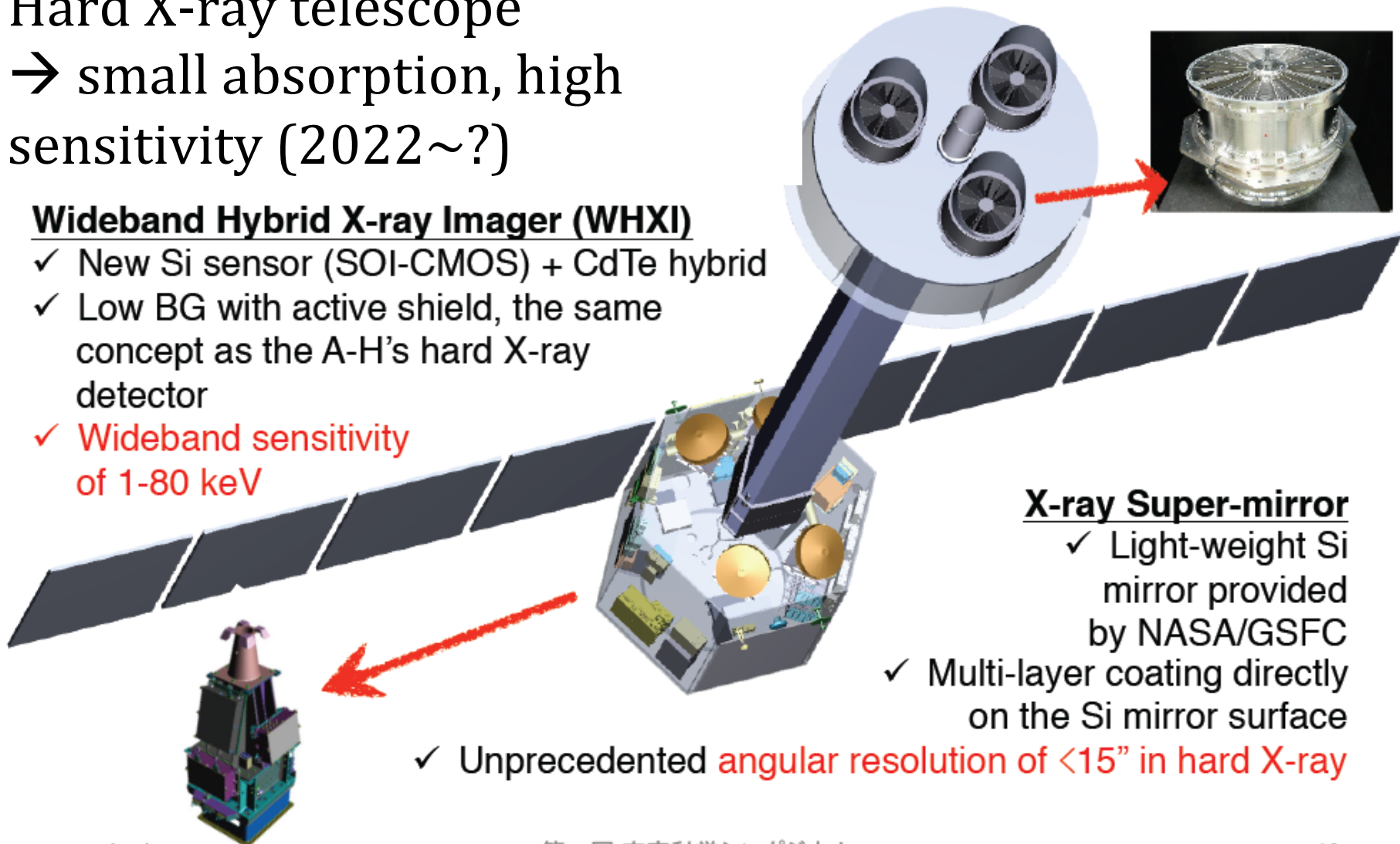
Hard X-ray telescope  
→ small absorption, high  
sensitivity (2022~?)

## Wideband Hybrid X-ray Imager (WHXI)

- ✓ New Si sensor (SOI-CMOS) + CdTe hybrid
- ✓ Low BG with active shield, the same concept as the A-H's hard X-ray detector
- ✓ Wideband sensitivity of 1-80 keV

## X-ray Super-mirror

- ✓ Light-weight Si mirror provided by NASA/GSFC
- ✓ Multi-layer coating directly on the Si mirror surface
- ✓ Unprecedented angular resolution of  $<15''$  in hard X-ray





# 計算方法

1. 銀河系内の分子雲の空間分布を仮定する
2. 単独 BH を時間的・空間的にランダムに配置し、ランダムな初速度(キック)を与える
3. 銀河系の重力ポテンシャル中での BH の軌道を計算し、それぞれの現在の位置と速度を求める
4. 現在分子雲に突入している BH をカウントし、その降着率を見積もる



# BHの降着率と光度

質量  $M$  の BH が速度  $v$  で密度  $\rho$ , 音速  $c_s$  の領域にあるとき、

$$\dot{M} = \lambda \cdot 4\pi \frac{(GM)^2 \rho}{(v^2 + c_s^2)^{3/2}} \quad \text{Bondi \& Hoyle (1944)}$$

$\lambda$ : 降着したガスのうちBH まで落ちる割合

放射効率  $\eta = L / \dot{M}c^2$  は accretion regime によって異なる

$$\eta = \begin{cases} \dot{M} / \dot{M}_{\text{Edd}} & (\text{when } \dot{M} < 0.1\dot{M}_{\text{Edd}}) \\ 0.1 & (\text{when } \dot{M} > 0.1\dot{M}_{\text{Edd}}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \leftarrow \text{RIAF} \\ \leftarrow \text{standard disk} \end{array}$$

$$L = 2L_{\text{Edd}} \left[ 1 + \ln \left( \frac{\dot{M} / \dot{M}_{\text{Edd}}}{2} \right) \right] \quad \leftarrow \text{slim disk (Watarai et al. 2006)}$$

# 計算における仮定

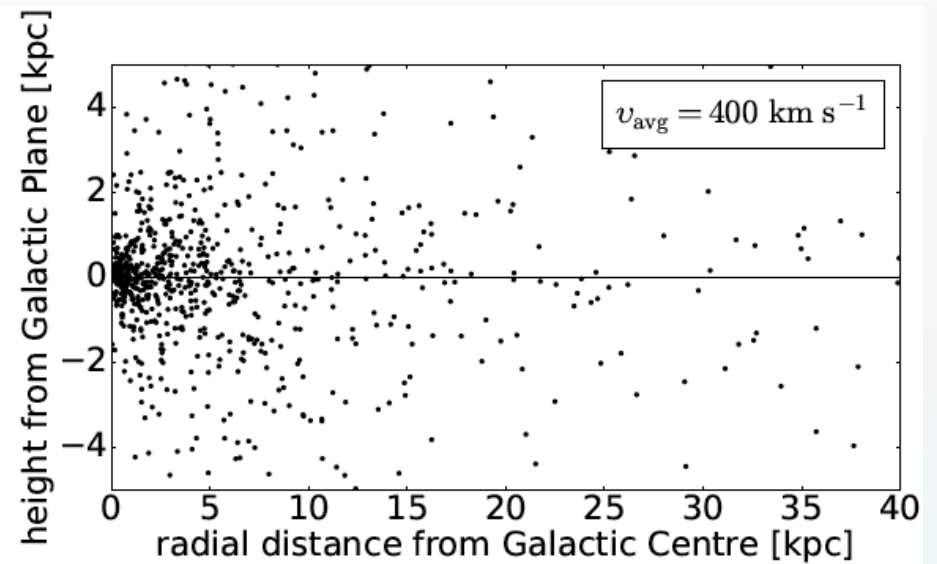
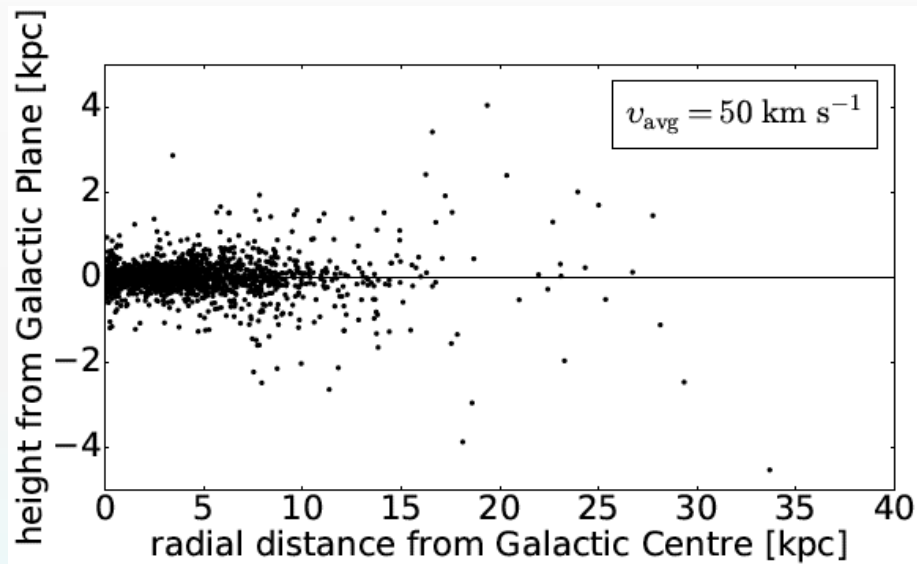
- 単独 BH の総数:  $10^8$  個
- ガスの空間分布: Nakanishi & Sofue (2017) etc.
- BH の誕生位置: bulge:disk = 15:85 (~ 星質量の比)
- BH birth rate: bulge (10-8 Gyr 前) と disk (10 Gyr 前 - 現在) でそれぞれ一定
- BH キック速度: 等方Maxwell分布,  $v_{\text{avg}} = 50 - 400 \text{ km s}^{-1}$
- BH 質量分布: 平均  $7.8M_{\odot}$ , 分散  $1.2M_{\odot}$  の正規分布 (Ozel et al. 2010)
- 重力ポテンシャル: Irrgang et al. (2013) “model 2”
- $\lambda = 0.1 - 0.001$

Phase	$n_1[\text{cm}^{-3}]$	$n_2[\text{cm}^{-3}]$	$\beta$	$\xi_0^{\text{BR}}$	$H_d$	$c_s[\text{km s}^{-1}]$	$\Sigma_0[M_{\odot} \text{ pc}^{-2}]$	$\xi(r = 8.3 \text{ kpc})$
Molecular clouds	$10^2$	$10^5$	2.8	0.001	75 pc	$3.7(n/100 \text{ cm}^{-3})^{-0.35}$	2.3	0.0004
Cold HI	$10^1$	$10^2$	3.8	0.02	150 pc	10	3.1	0.026
Warm HI	0.3		–	0.35	500 pc	10	3.5	0.46
Warm HII	0.15		–	0.20	1 kpc	10	2.0	0.16
Hot HII	0.002		–	0.43	3 kpc	150	0.17	0.37



# 結果：単独BHの空間分布

Tsuna, NK & Totani (1801.04667)

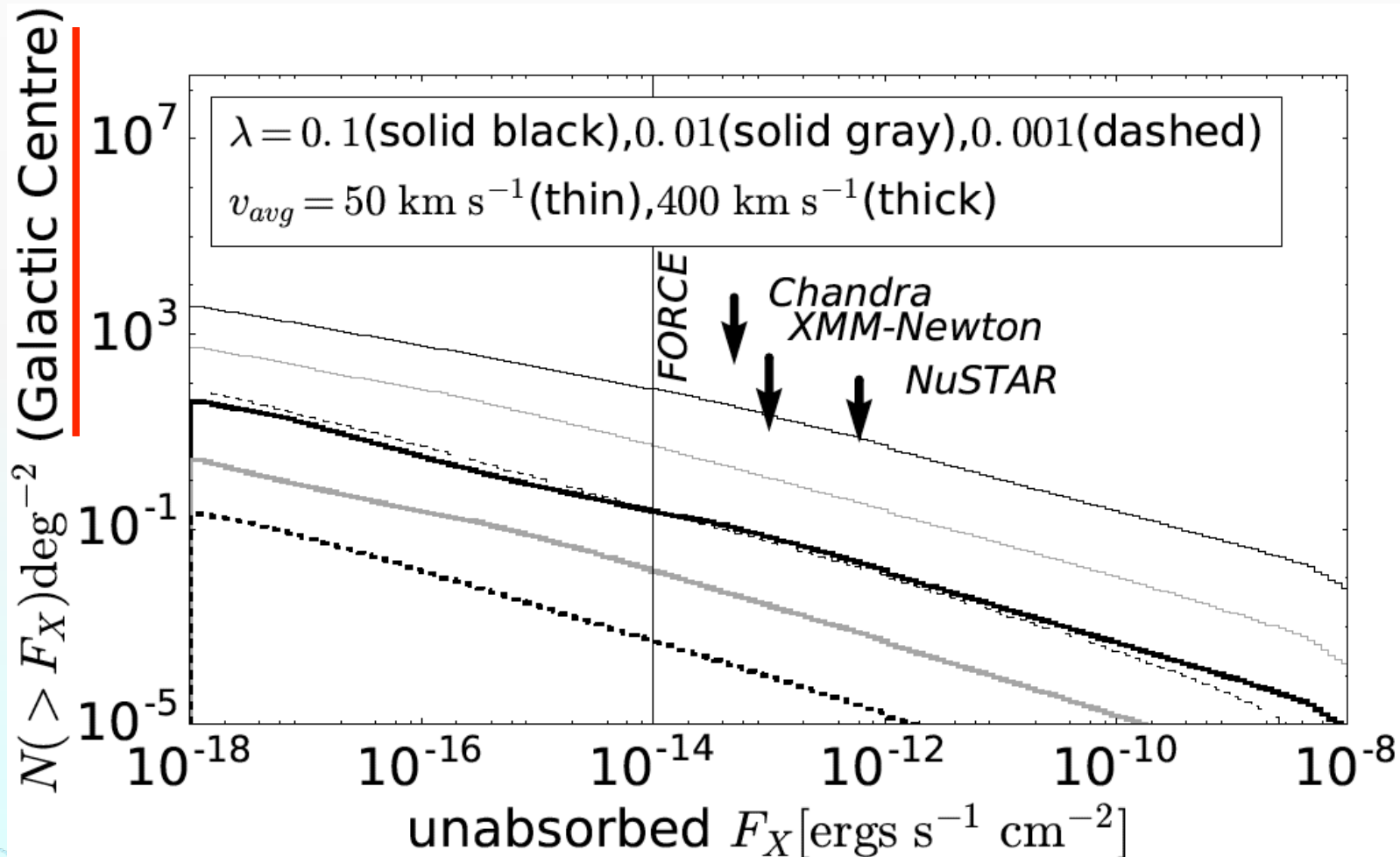


# Cumulative histogram: $N_{\text{BH}} (>F_X)$

Tsuna, NK & Totani (1801.04667)

Hard X

銀河中心領域のみ

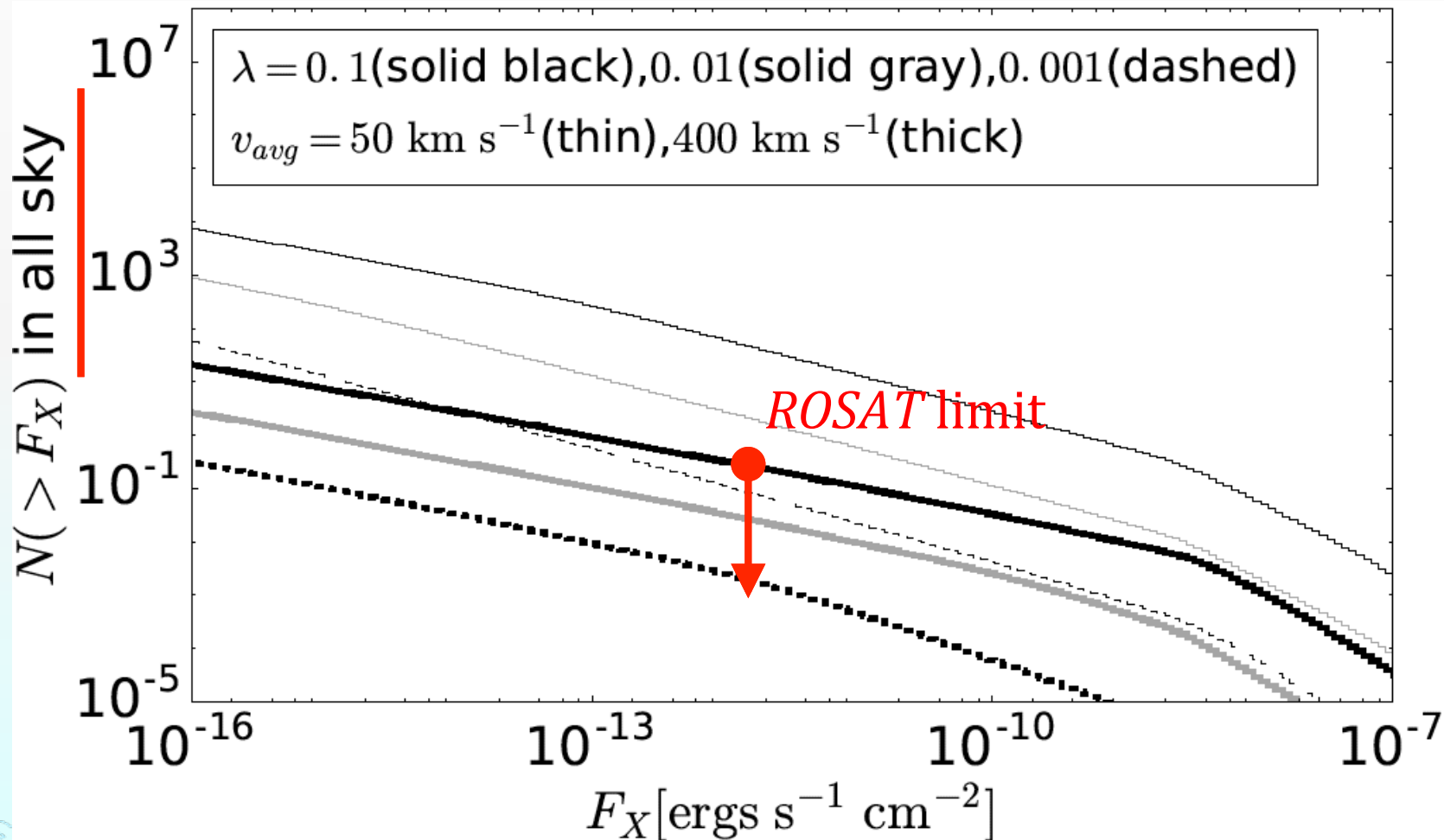


# Cumulative histogram: $N_{\text{BH}} (>F_X)$

Tsuna, NK & Totani (1801.04667)

Soft X

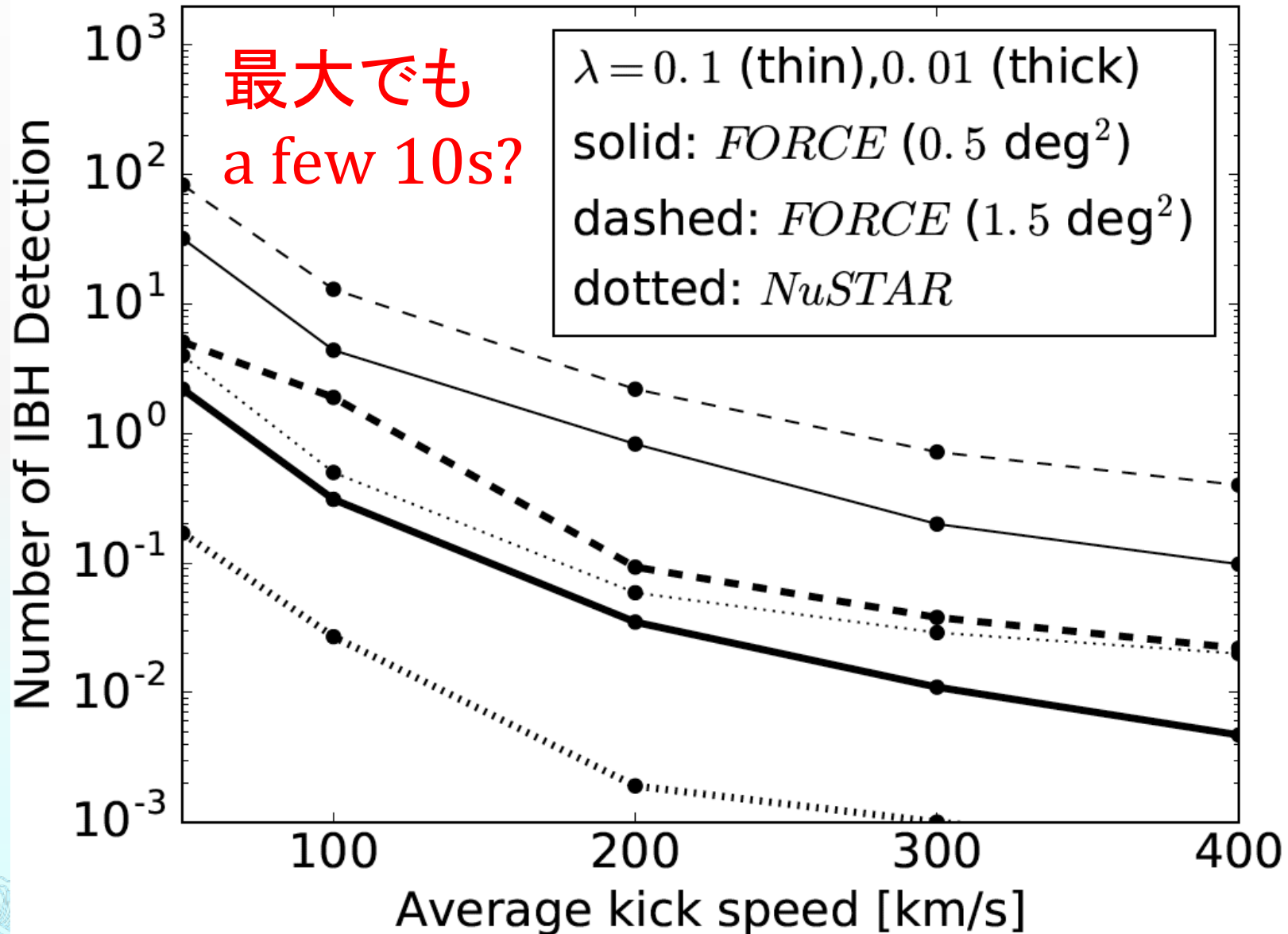
分子雲・星間空間での吸収を考慮



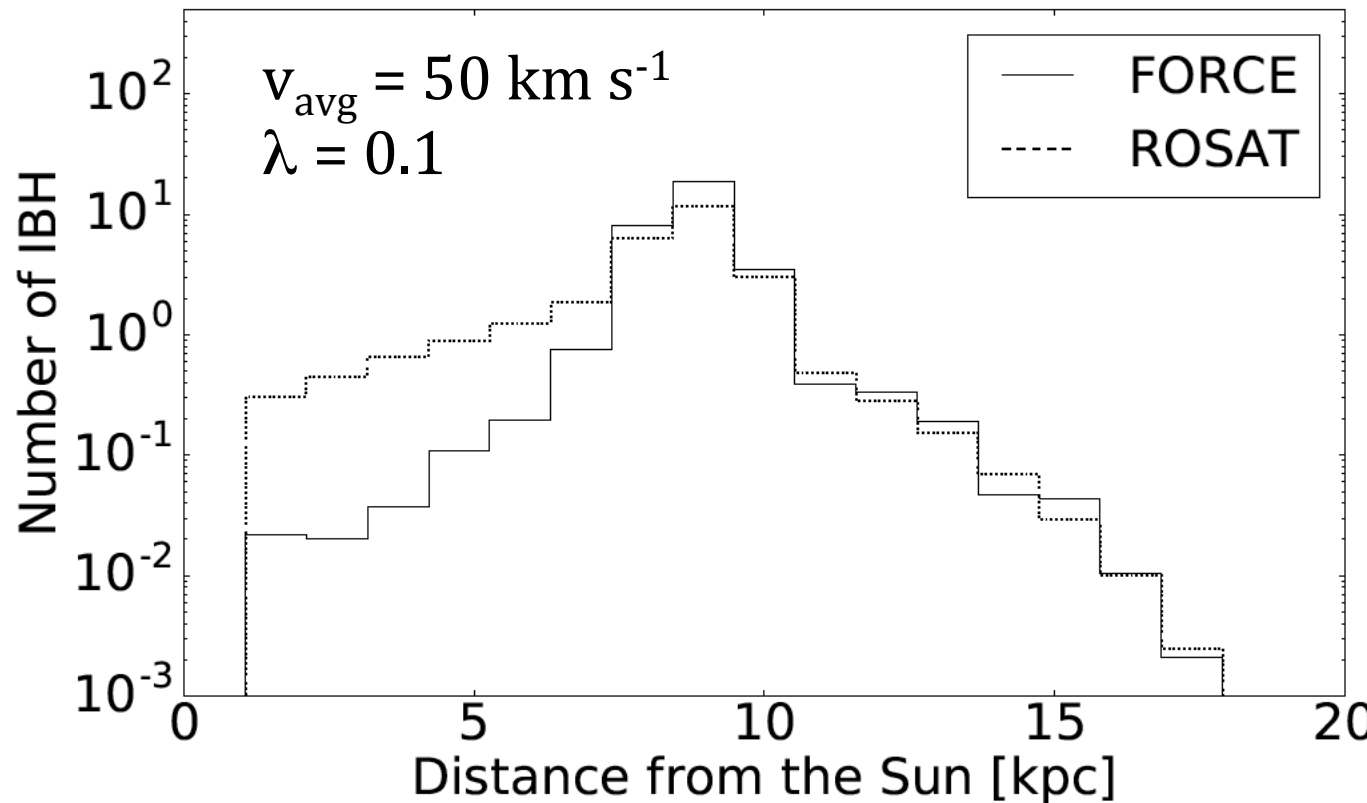


# 検出可能な単独BHの数

Tsuna, NK & Totani (1801.04667)



# 検出可能な BH の位置



銀河中心付近  
( $\sim 8 \text{ kpc}$ )で最も  
多く検出

( $\because$  BH と MC  
の分布が集中)

吸収の大きな  
領域なので

hard X-ray で  
の観測が重要

( FORCE の survey area は銀河中心領域  $0.5 \text{ deg}^2$  を仮定)

## Outflow も光る？ (雑な議論)

$$\begin{aligned} L_{\text{wind}} &\simeq \frac{1}{2} \int v_{\text{esc}}^2 d\dot{M} \\ &= \frac{1}{4} \frac{\dot{M}_{\text{Bondi}} c^2}{r_{\text{out}}/r_S} \ln \left( \frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{in}}} \right) \\ &\simeq \underline{10^{30} \text{ erg s}^{-1}} \left( \frac{M}{10M_{\odot}} \right) \left( \frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{v^2 + c_s^2}{(10 \text{ km s}^{-1})^2} \right)^{-3/2} \left( \frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{Bondi}}} \right)^{-1} \end{aligned}$$

$$F \sim 1.4 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad @ 8 \text{ kpc}$$

磁場強度


$$\begin{aligned} B &\simeq \left( \frac{8\pi L_{\text{wind}}}{4\pi R_{\text{sh}}^2 v_{\text{esc}}} \right)^{1/2} \\ &\simeq 5.9 \mu\text{G} \left( \frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{1/2} \left( \frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

$$R_{\text{acc}} \simeq \frac{\xi \varepsilon c}{e B v_{\text{esc}}} \simeq 1.7 \times 10^{16} \text{ cm} \left( \frac{\xi}{10} \right) \left( \frac{\varepsilon}{\text{TeV}} \right) \left( \frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \left( \frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{-1/2}$$

これと termination shock のサイズ

$$R_{\text{sh}} \simeq 2.4 \times 10^{15} \text{ cm} \left( \frac{M}{10 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{v^2 + c_s^2}{(10 \text{ km s}^{-1})^2} \right)^{-3/4} \left( \frac{T}{10 \text{ K}} \right)^{-1/2} \left( \frac{r_{\text{out}}}{r_{\text{Bondi}}} \right)^{-1/2}$$

を比較

  $\varepsilon_{\text{max}} \sim 140 \text{ GeV } M_1^{1/2} n_3^{1/2}$

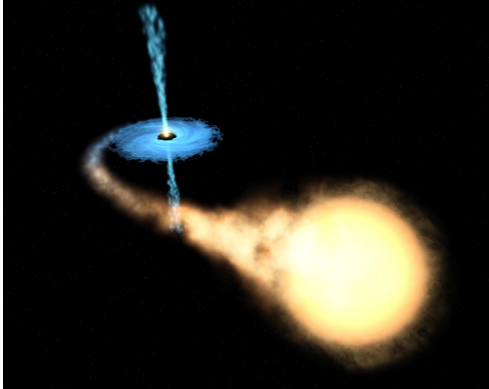
電子のシンクロトロンを考えるとサブミリ波で明るい？

$$F \sim 1.4 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ @ 8 kpc}$$

→  $\sim 10 \mu\text{Jy}$  に対応。ALMA で  $10^4 \text{ sec}$  観測すれば？

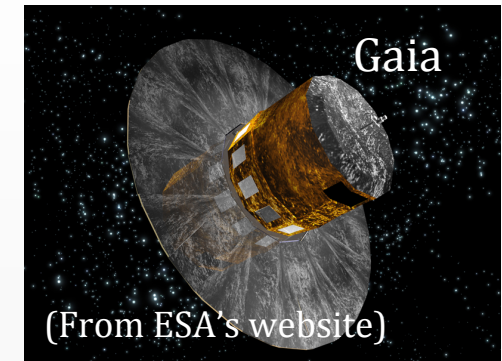


# 系内ブラックホールの見つけ方

	連星を組んでいる	単独で浮遊している
ガス降着あり		<ul style="list-style-type: none"><li>• Bondi-Hoyle 降着によるX線放射</li><li>• 円盤風と周辺物質の相互作用による放射</li></ul>
ガス降着なし	<ul style="list-style-type: none"><li>• 伴星の動きを測定</li><li>• 連星内重力レンズ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 近傍の分子雲の変形</li></ul>

# Astrometric observations

- 伴星の天球面上の位置を精密に追うことにより、BHを検出(質量を測定)  
e.g.: Gaia ( $10^8$  個の恒星をモニター、50日~数年の周期運動検出)



条件1. BHと主系列星/巨星の連星である



連星の年齢は主星の寿命より長く、  
伴星の寿命より短い

条件2. 伴星からBHへの質量輸送はない



伴星の半径は Roche lobe 半径より小さい

条件3. 観測者は連星の軌道運動を追える



軌道周期は十分短い (e.g.  $< \sim 2$  years for Gaia)

# Gaia で検出可能な BH の個数

$$N = \frac{2f_{\text{bin}}}{1 + f_{\text{bin}}} \int_{M_{\text{min,BH}}}^{100M_{\odot}} d\bar{M}_1 \Psi(\bar{M}_1) \int_{q_{\text{min}}}^1 dq \Gamma_0 \Phi(q) \\ \times (t_{\text{L},2} - t_{\text{L},1}) \int_{\max(\bar{A}_{\text{RL}}, \bar{A}_{\text{min}}, \bar{A}_{\text{det}})}^{\min(\bar{A}_{\text{period}}, \bar{A}_{\text{max}})} d\bar{A} \frac{1}{\bar{A}} \\ \times \int_0^{2\pi} dl \int_0^{\pi/2} \cos b db \int_0^{D_{\text{max}}} D^2 dD \rho_d(D, b, l, \bar{M}_1),$$

- $f_{\text{bin}}$ : binary fraction
- $\Psi(M)$ : 初期質量関数 (Salpeter)
- $\Phi(q) = 1, \propto q^{-1}, \propto q$ : 質量比分布
- $\Gamma(A) = \Gamma_0 A^{-1}$ : 軌道長半径分布
- $\rho_d(D, b, l, M)$ : 星の数密度分布
- 星の進化計算は単純化 (no mass loss)
- common envelope phase, 質量輸送を考慮

## BH identification by Gaia (← New!)

Dark companion の質量  $> 3M_{\odot}$

$$\Leftrightarrow M_{\text{BH}} - \sigma_{\text{MBH}} > 3M_{\odot}$$

エラー  $\sigma_{\text{MBH}}$  は他の物理量のエラーから以下の  
ように伝播して決まる

$$\left(\frac{\sigma_{\text{MB}}}{M_{\text{BH}}}\right)^2 = \left(\frac{3}{2} - \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\text{BH}} + M_2}\right)^{-2} \\ \times \left[ \left(\frac{M_2}{M_{\text{BH}} + M_2}\right)^2 \frac{\sigma_{M_2}^2}{M_2^2} + \frac{\sigma_P^2}{P_{\text{orb}}^2} + \frac{9}{4} \left(\frac{\sigma_a^2}{a_*^2} + \frac{\sigma_D^2}{D^2}\right) \right]$$

以下のとき、 $M > 5M_{\odot}$  の BH が検出可能

$$\frac{\sigma_{M2}}{M_2} < 0.1, \quad \frac{\sigma_P}{P_{\text{orb}}} < 0.1, \quad \frac{\sigma_a}{a_*} < 0.1, \quad \text{and} \quad \frac{\sigma_D}{D} < 0.1.$$

Gaia でこの精度が実現できるために軌道長半径  $A$ , 距離  $D$  が満たすべき条件:

$$A(P_{\text{orb}} = 50 \text{ days}) < A < A(P_{\text{orb}} = 3 \text{ years})$$

$$A > 10 \frac{M_{\text{BH}} + M_2}{M_{\text{BH}}} \sigma_{\pi}(m_V) D$$

$$\left(-1.631 + 680.8 \cdot z(m_V) + 32.73 \cdot z^2(m_V)\right)^{1/2} < \frac{10^2}{D_{\text{kpc}}},$$

これらを先ほどの公式の積分の上限・下限に用いる  
星間吸収も考慮



# Results: detectable number of BHs

Yamaguchi, NK, Bulik & Piran (1710.09839)

Models	Total number
<u>fiducial</u>	<u>3100</u>
lin01	1400
lin05	4600
curved	2900
K03	1200
al01	300
al20	3900
q-1	5700
q+1	1200

~ 3000 個

先行研究から大幅に減少  
(Mashian & Loeb 2017;  
~ $3 \times 10^5$  BHs)

∴ Gaia での検出可能性を  
誤差の伝播・星間吸収を考  
慮に入れて議論した

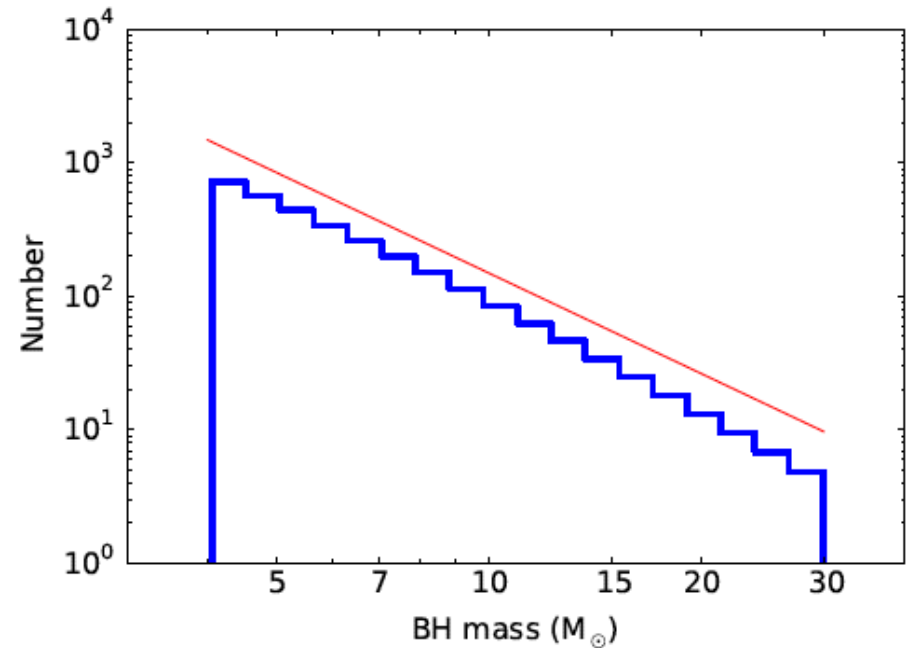
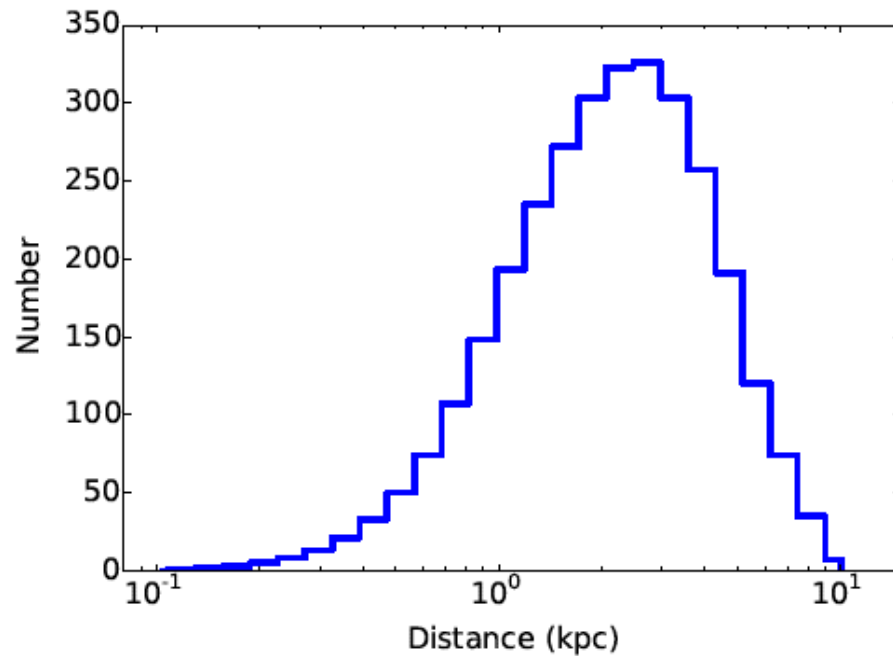
# Results: distance & mass distributions

Yamaguchi, NK, Bulik & Piran (1710.09839)

BH 質量  $\propto$  ZAMS 質量を仮定

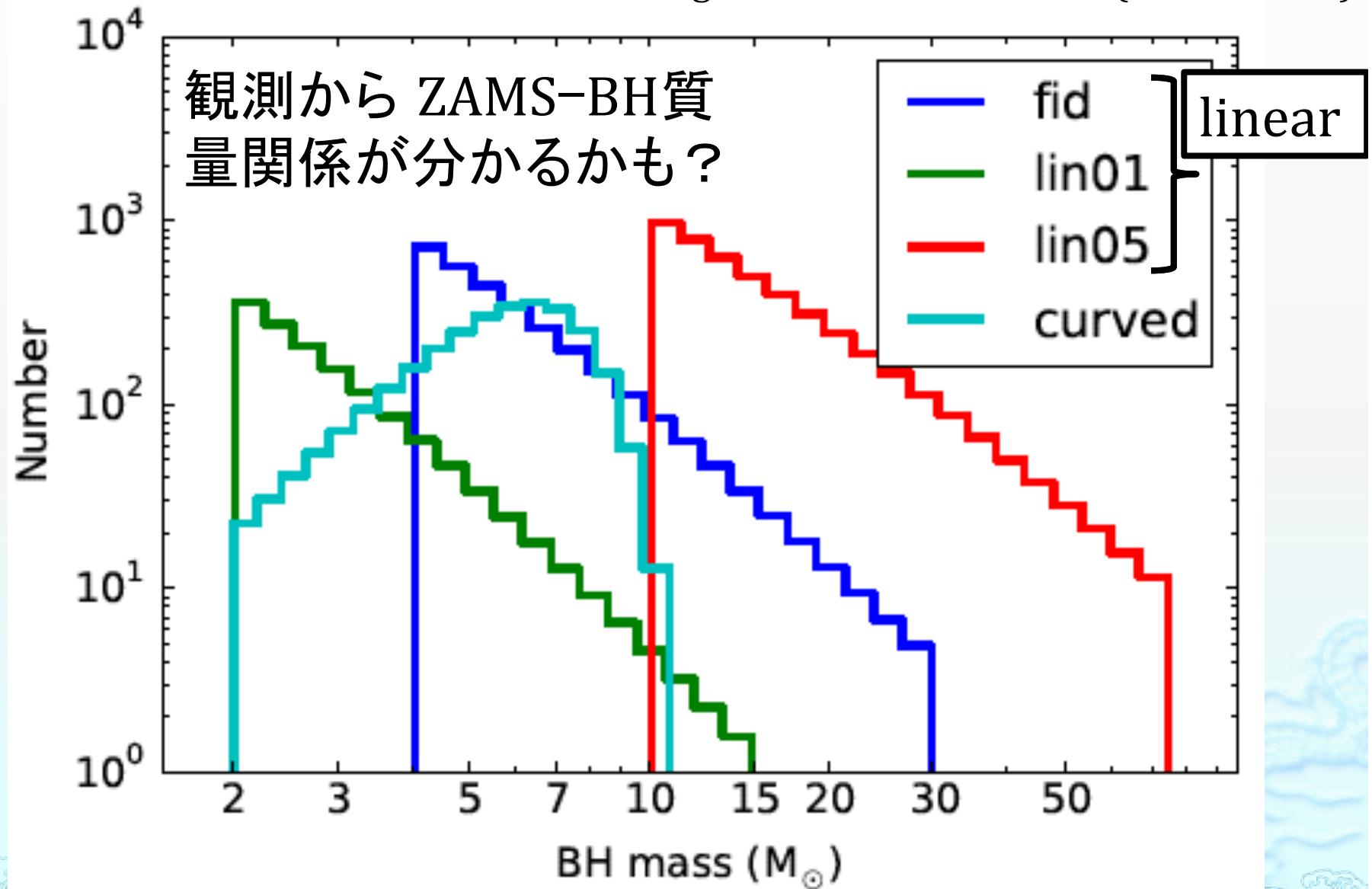
→ 検出可能な BH の質量分布は power-law

その殆どは  $\sim 5$  kpc 以内に分布 (:: 星間吸収)



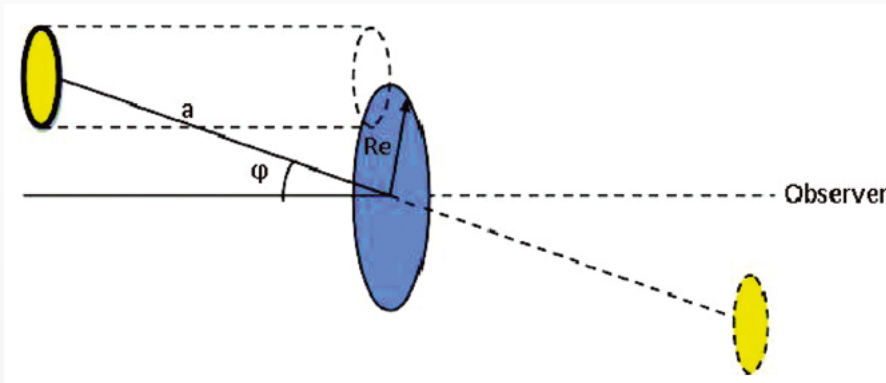
# different ZAMS mass - BH mass relations

Yamaguchi, NK, Bulik & Piran (1710.09839)



# 連星内重力レンズ

Rahvar et al. 2011



main sequence – compact object の連星での self-lensing による周期的増光  
 → 多数の星のモニタリング (~  $10^8$ 個) を十分な cadence (< ~15 min) で行えば年間数十個見つかる計算

Accuracy $\sigma$ (per cent)	Sampling rate $\Delta t$ (min)	Detectability $f_{\text{all}}$	Event rate $\gamma$ ( $\text{yr}^{-1}$ )	Period $\hat{P}$ (yr)
5	15	$1.45 \times 10^{-7}$	$3.71 \times 10^{-7}$	0.39
2	120	$6.50 \times 10^{-8}$	$2.08 \times 10^{-8}$	3.12
0.3	15	$9.97 \times 10^{-7}$	$3.28 \times 10^{-6}$	0.30

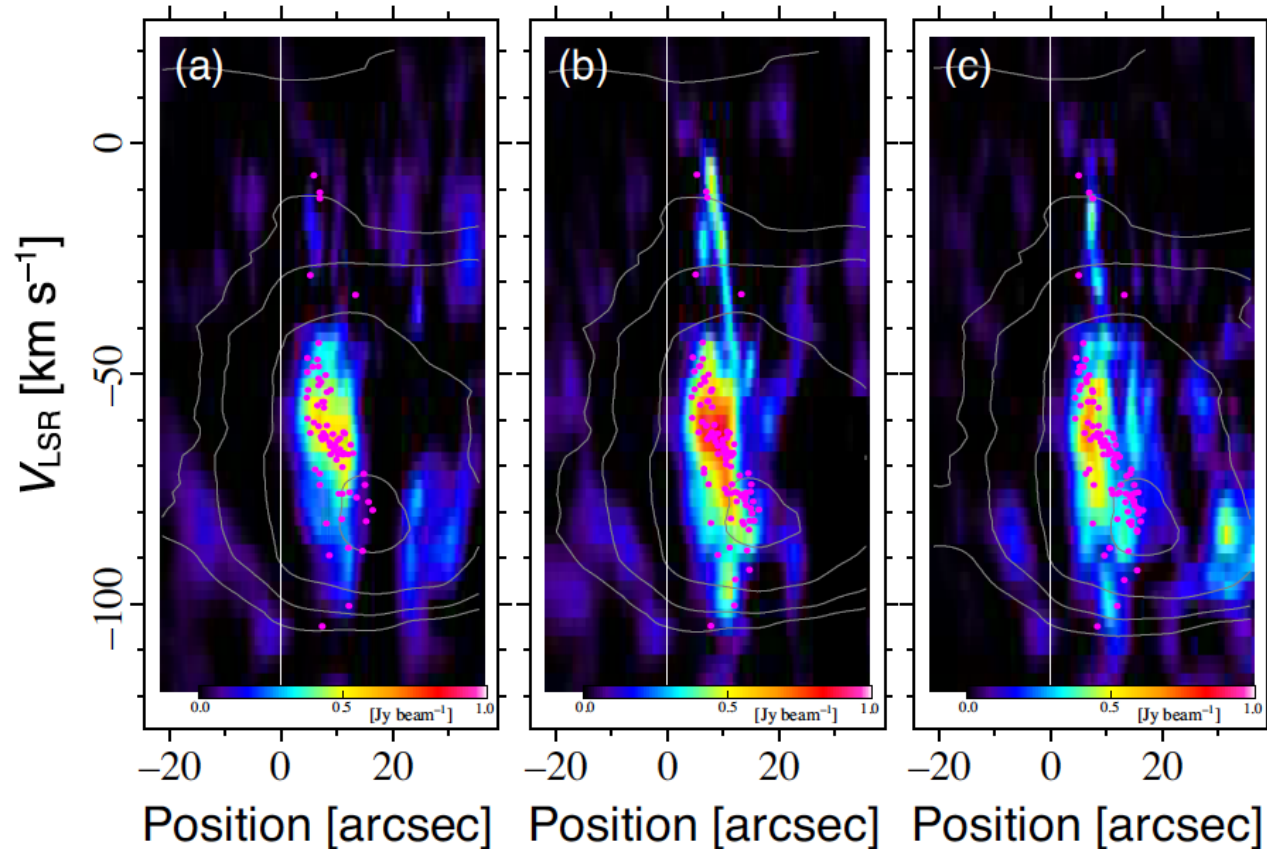
# 系内ブラックホールの見つけ方

	連星を組んでいる	単独で浮遊している
ガス降着あり		<ul style="list-style-type: none"><li>• Bondi-Hoyle 降着によるX線放射</li><li>• 円盤風と周辺物質の相互作用による放射</li></ul>
ガス降着なし	<ul style="list-style-type: none"><li>• 伴星の動きを測定</li><li>• 連星内重力レンズ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 近傍の分子雲の変形</li></ul>



# BH 近傍を通過する分子雲の変形

Oka et al. 2017; Tsuboi et al. 2017



銀河系中心領域に  
速度分散の大きな  
( $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ )ガスク  
ランプを発見  
→ 中間質量 BH ( $\sim 10^5 M_{\odot}$ )が存在？

Oka et al. 2017, Nature Astronomy

## まとめ

- 我々は銀河系内ブラックホールのごくごく一部（伴星を持ち質量降着しているような種族）しか知らない
- もっとたくさん見つけられないか？ 多様な種族が見つかる何が嬉しいか？  
→ 星形成史、質量関数、連星進化過程・ブラックホール形成過程への示唆...
- 質量降着する単独 BH のX線・電波観測、BH 連星の位置天文観測、重力レンズにより、系内 BH の検出数が1-2桁増える可能性がある
- 他に何か良い方法ありませんかね??

