

多波長で探る銀河系中心ブラックホール

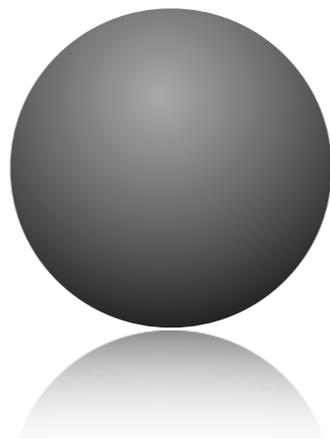
加藤成晃

(国立天文台ひのでプロジェクト研究員)

- ブラックホール大気＝降着円盤の研究
- 放射特性からモデル大気を同定
- ブラックホールの姿を捉える
- ブラックホールの特性を測定

* 質量

* スピン



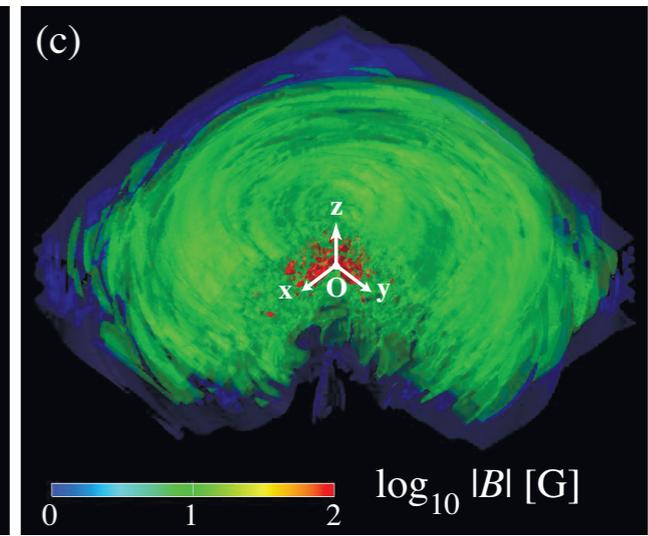
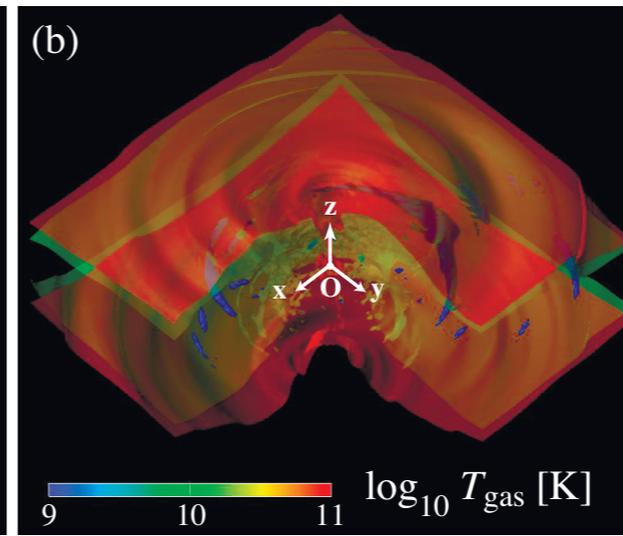
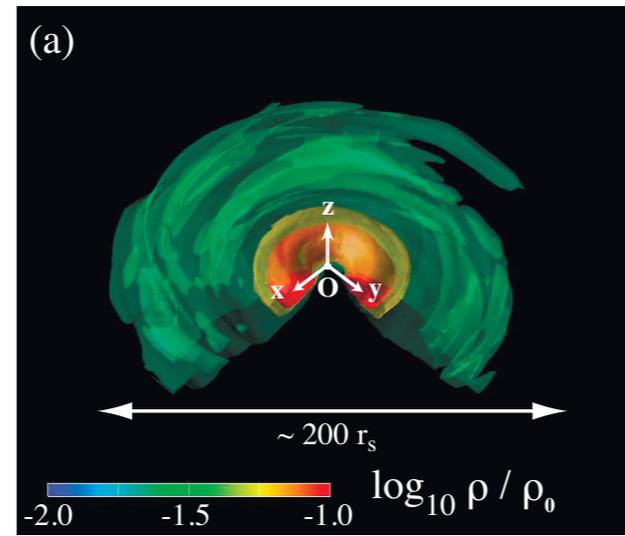
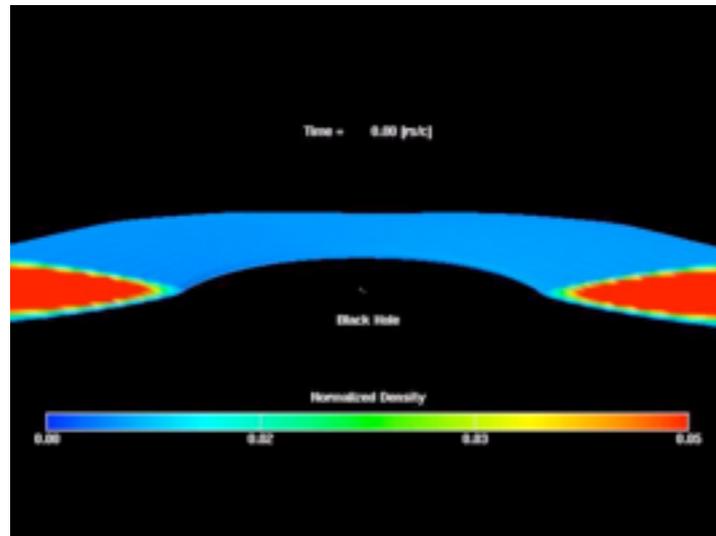
「時間変動」

- 太陽大気の**時間変動**
 - * フレア／プロミネンス
 - * **磁気流体波動**
- BH大気の**時間変動**
 - * 降着円盤フレア
 - * **円盤振動**

SDOが捉えたプロミネンス形成 (2月末)

BH大気のMHDモデル

YK, Umemura, Ohsuga (2009)



$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \mathbf{n} \cdot \nabla I_\nu = \chi_\nu (S_\nu - I_\nu) \longrightarrow \mathbf{n} \cdot \nabla I_\nu = \chi_\nu (S_\nu - I_\nu)$$

$I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{n}; t)$: specific intensity

$\chi_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{n}; t) = \kappa_\nu + \sigma_\nu$: extinction coefficient

$$S_\nu = \frac{\epsilon_\nu}{4\pi\chi_\nu} + \alpha_\nu \oint \phi(\mathbf{n}; \mathbf{n}') I_\nu(\mathbf{n}') d\Omega'$$

$\epsilon_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{n}; t)$: emissivity

$\alpha_\nu = \frac{\sigma_\nu}{\chi_\nu}$: scattering albedo $\phi(\mathbf{n}; \mathbf{n}')$: phase function

フリーパラメータ

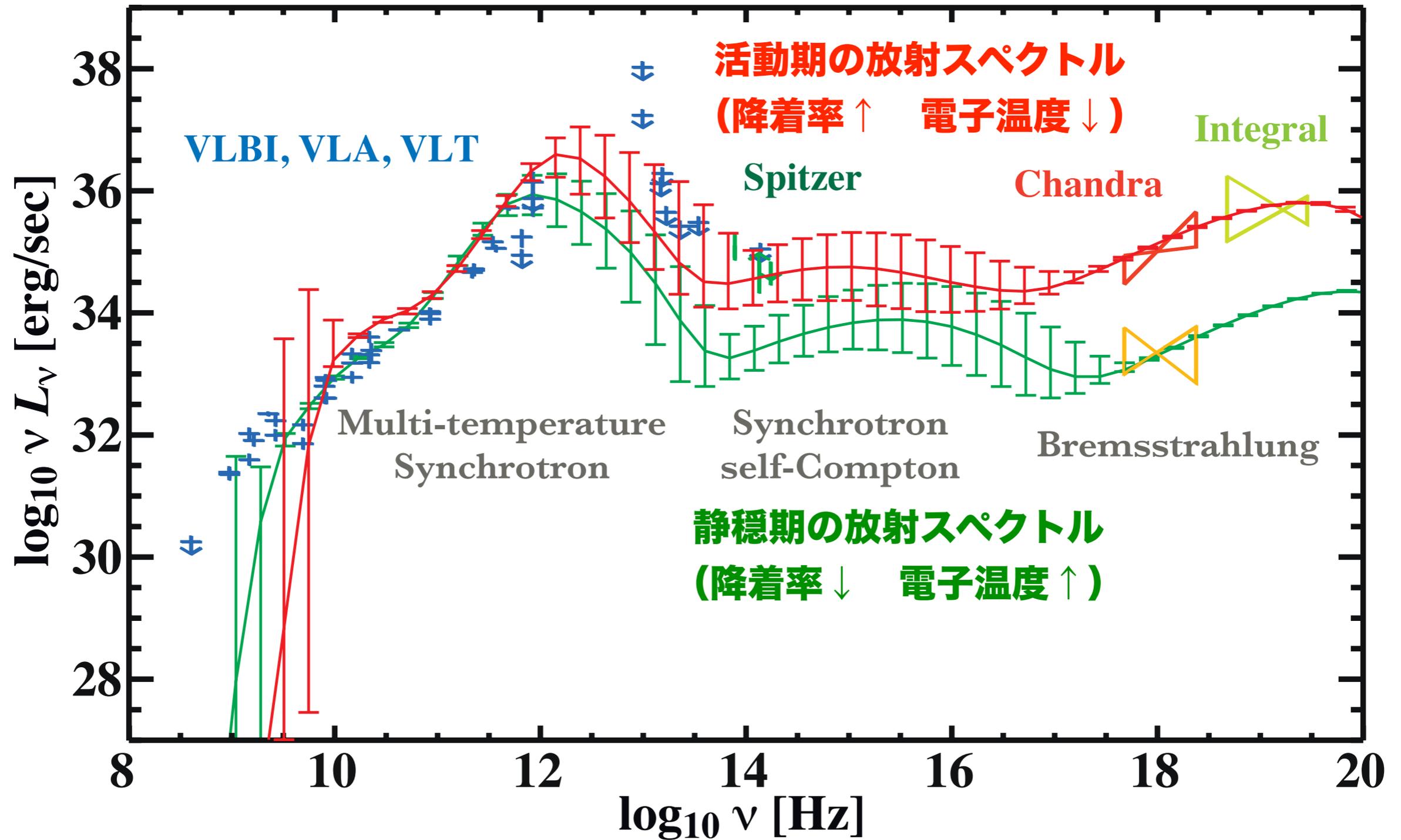
質量降着率
(密度・BH質量)

電子温度／陽子温度

Monte-Carlo 3-D Full Radiative Transfer
→ Spectra & Imaging (& Polarization)

銀河系中心の放射スペクトル

YK, Umemura, Ohsuga (2009)



銀河系中心の放射分布(フレア期)

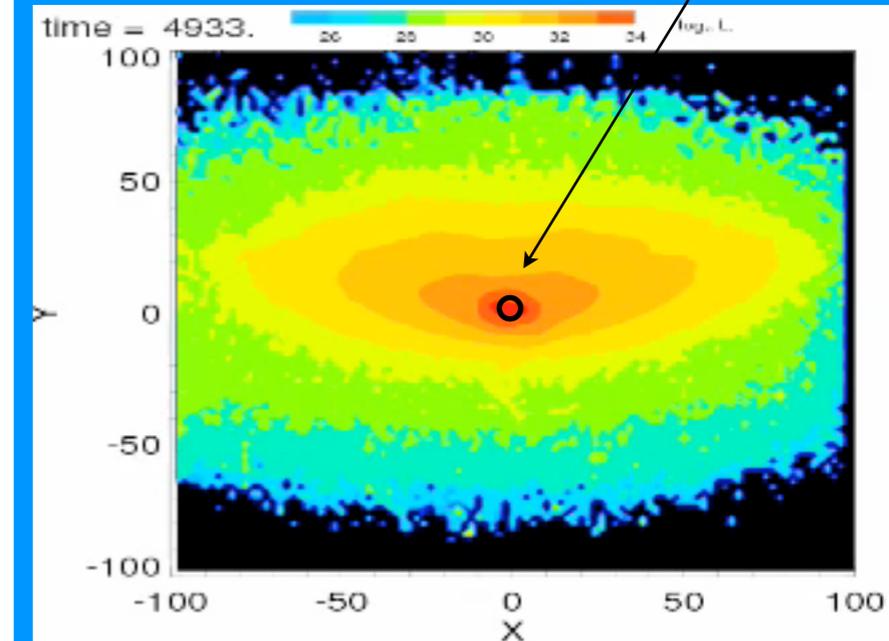
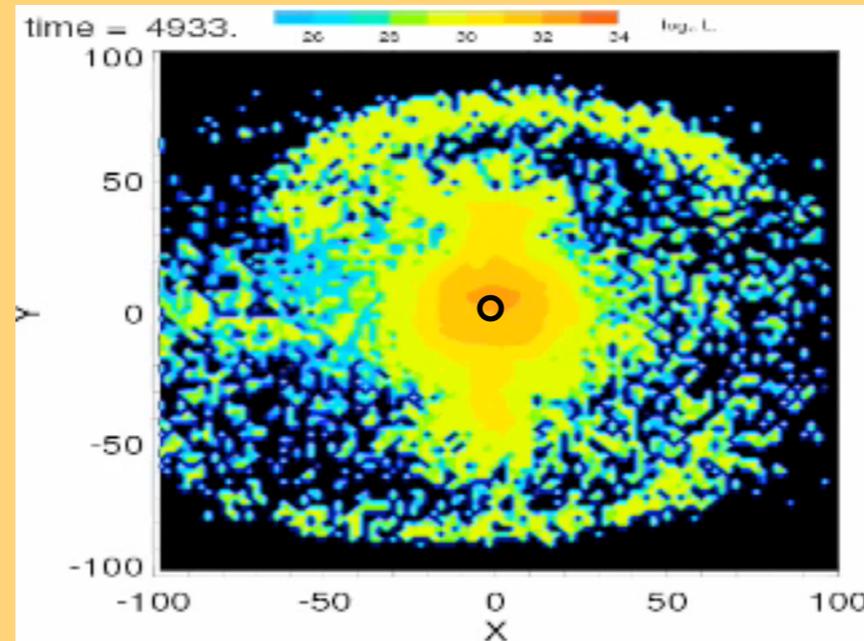
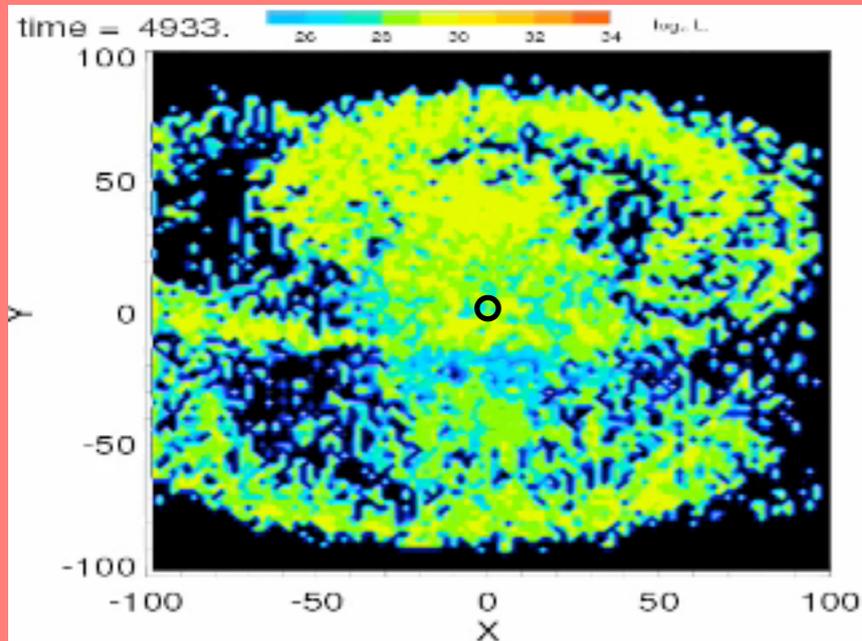
YK, Umemura, Ohsuga (2009)

Size of BH shadow

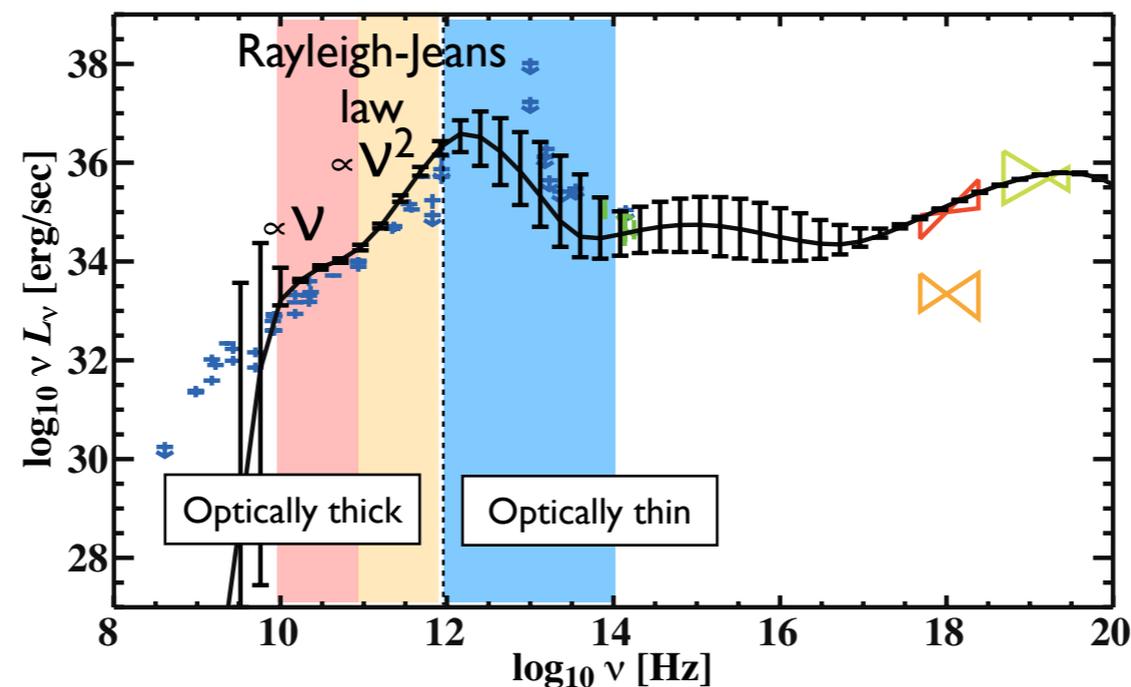
10 - 100 GHz

0.1 - 1 THz

1 - 100 THz

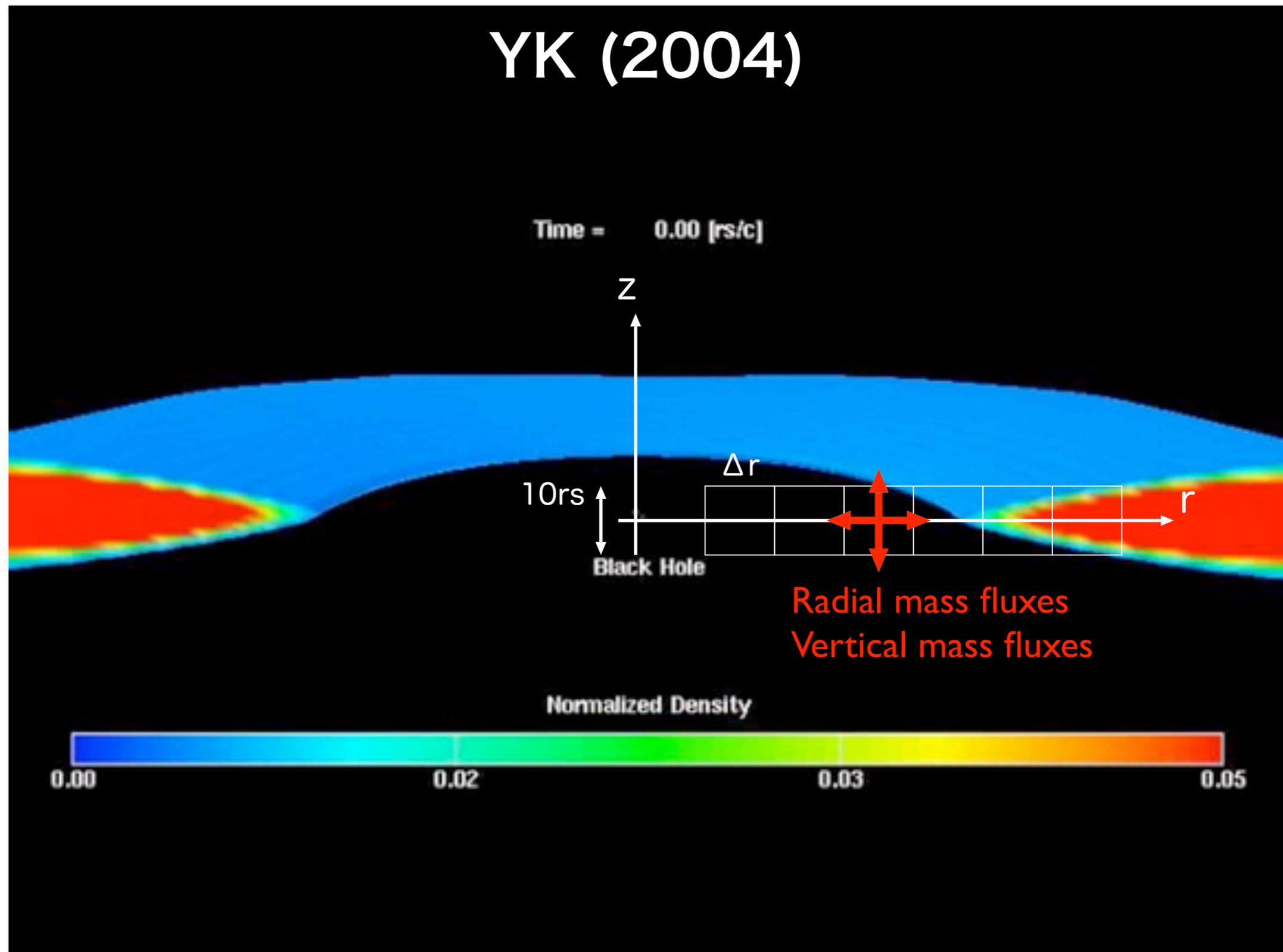


広がった放射領域
渦状腕構造



円盤状の放射領域
活発な時間変動

BH大気の共振振動



BH大気を伝搬する波動

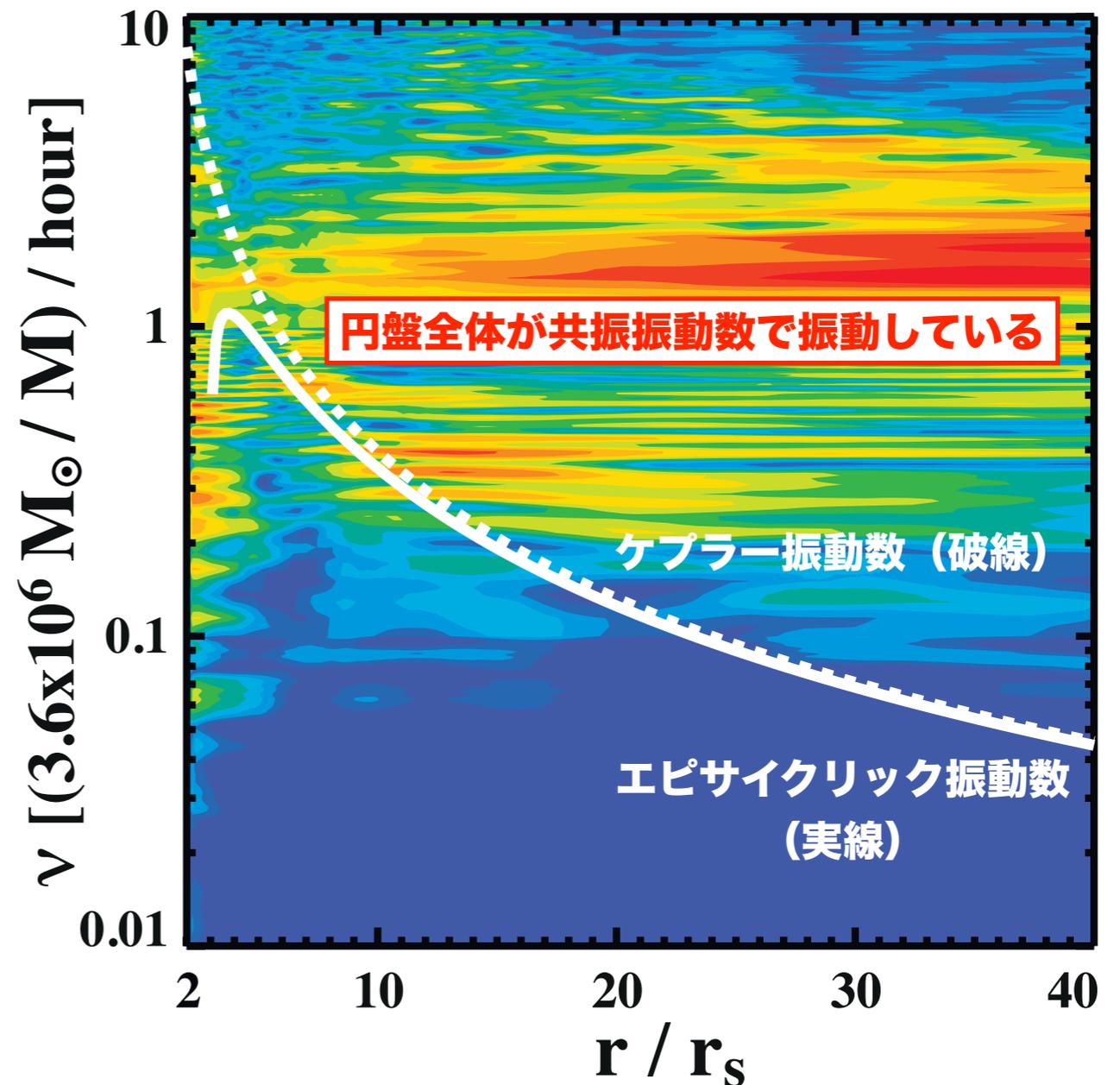
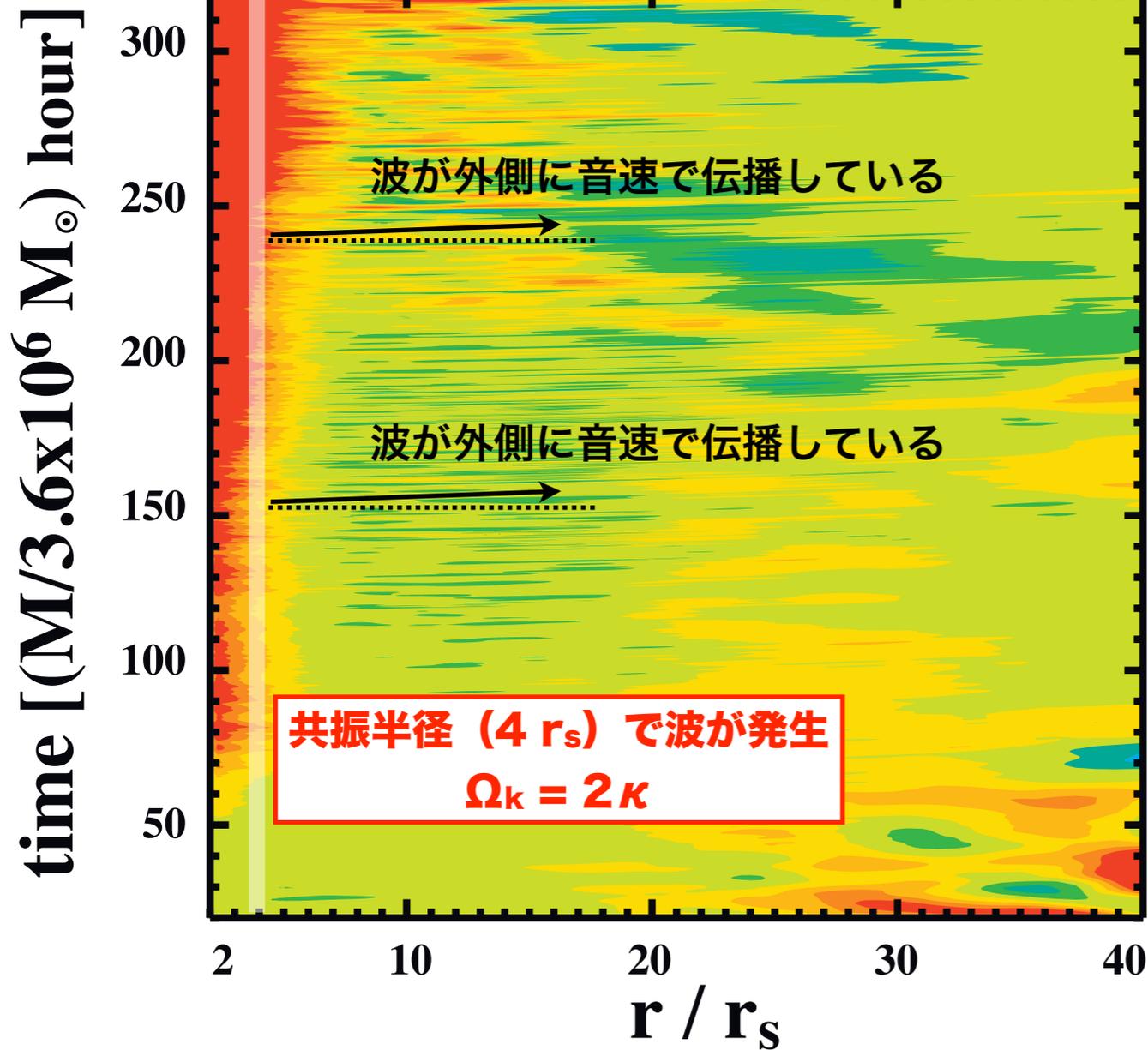
YK (2004)

動径方向の質量流束

動径方向の質量流束のパワースペクトル

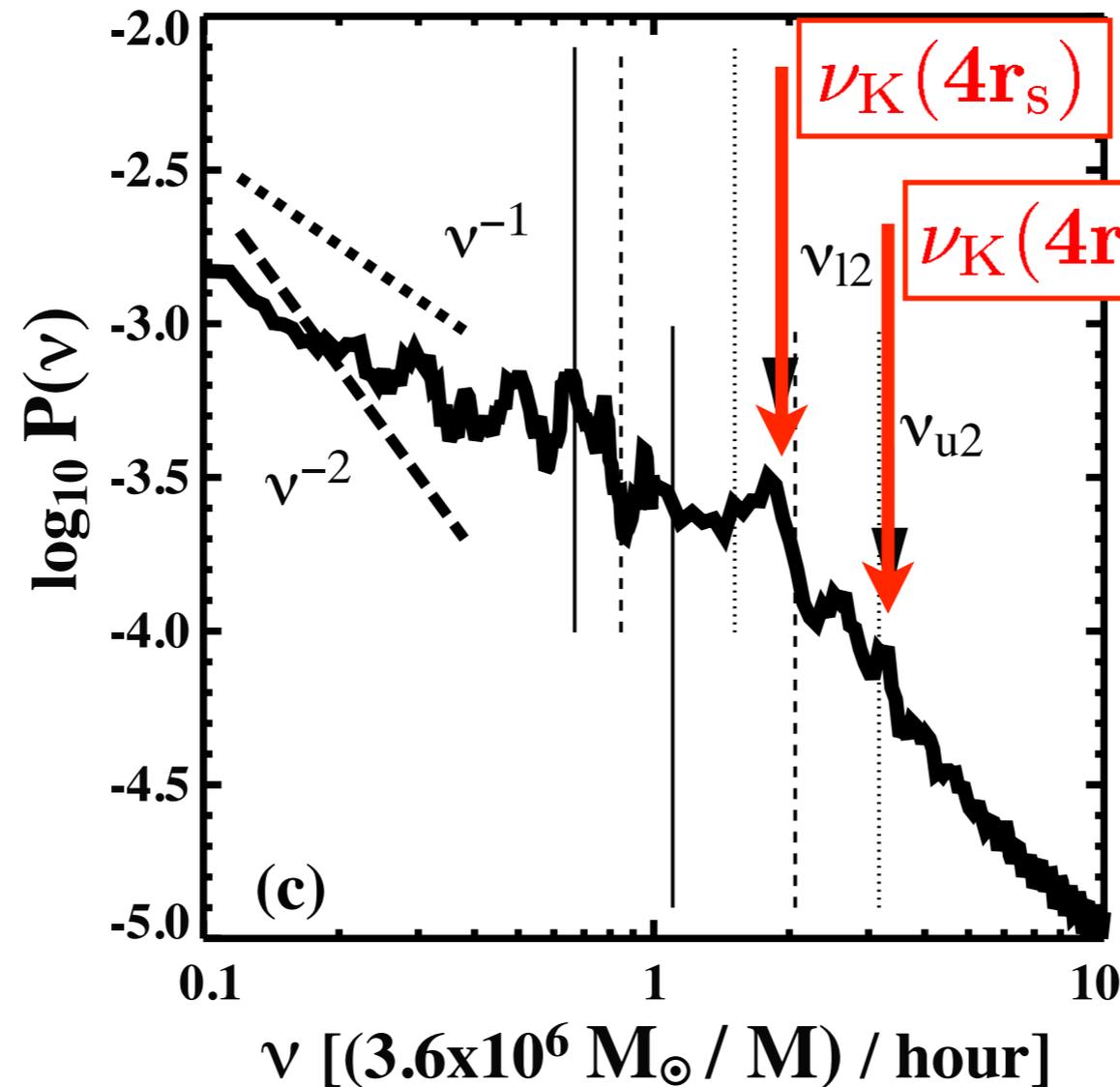
$\dot{m}_r(r, t)$  -0.001 -0.0005 0.0 0.0005 0.001

$\log_{10} \nu P(r, \nu)$  -4.4 -4.2 -4.0 -3.8 -3.6 -3.4



BH大気変動のパワースペクトル

YK (2004)



ケプラー振動数
+
エピサイクリック振動数

共振振動に由来する光度変動を見つければ
ブラックホールの質量とスピンの測定ができる

スピンの測定方法

新たなスピン測定方法

降着円盤の共振現象を用いる

❖ ブラックホールの性質（時空構造）



固有振動数

ケプラー振動数： Ω_k

エピサイクリック振動数： κ

❖ ガスの性質（降着円盤構造）



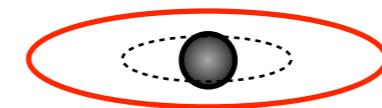
降着円盤の共振

ケプラー振動数： Ω_k

エピサイクリック振動数： κ

❖ 光の性質（放射強度の時間変動）

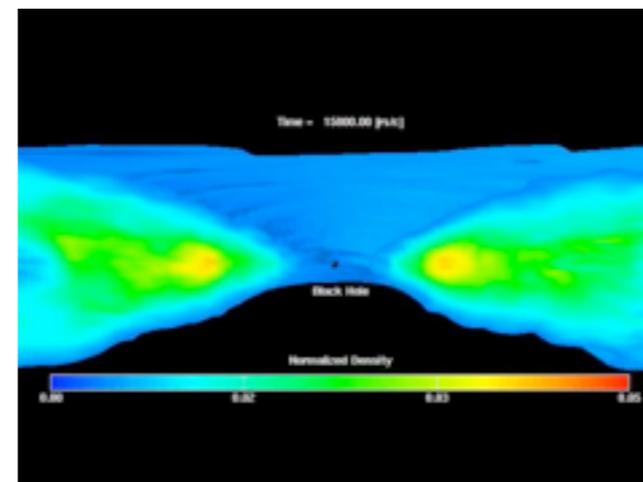
光度変動の周期 = 降着円盤の共振周期



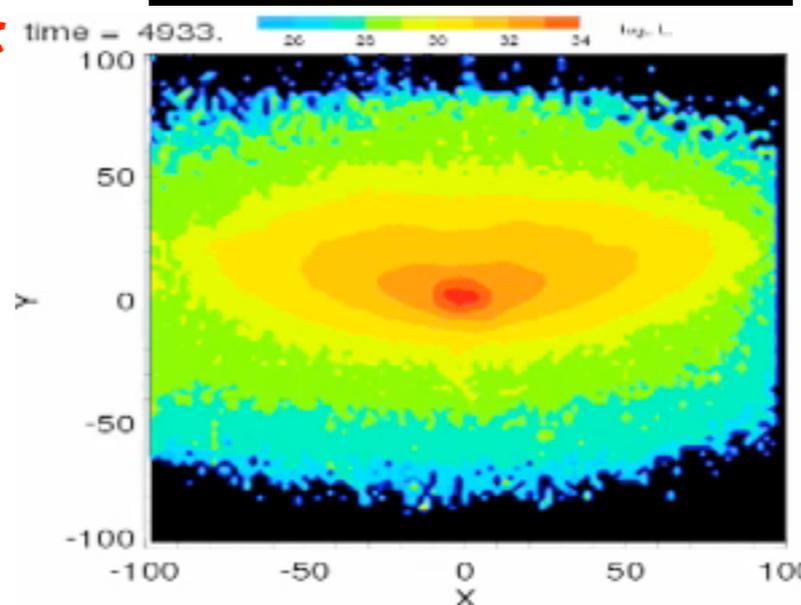
最終安定軌道半径

共振半径：固有振動数が整数比

$$\Omega_k = 2\kappa \text{ at } R = 4 r_s$$



降着円盤の
シミュレーション映像
「降着円盤が振動する様子」



放射強度が時間変動

不確定要素：光度変動の周期 \Leftrightarrow 降着円盤の共振周期

スピンの測定

ブラックホールからの光度変動の周期

恒星質量ブラックホール

振動数比

3 : 2

$$= 450 : 300 = 276 : 184 \approx 168 : 113$$

銀河系の中心にある

巨大ブラックホール「いて座A*」

16.8 : 22.2 : 33

1 : 2

2 : 3

3 : 4 : 6

振動数比

$$1/3 : 1/4 : 1/6 = 4 : 3 : 2$$

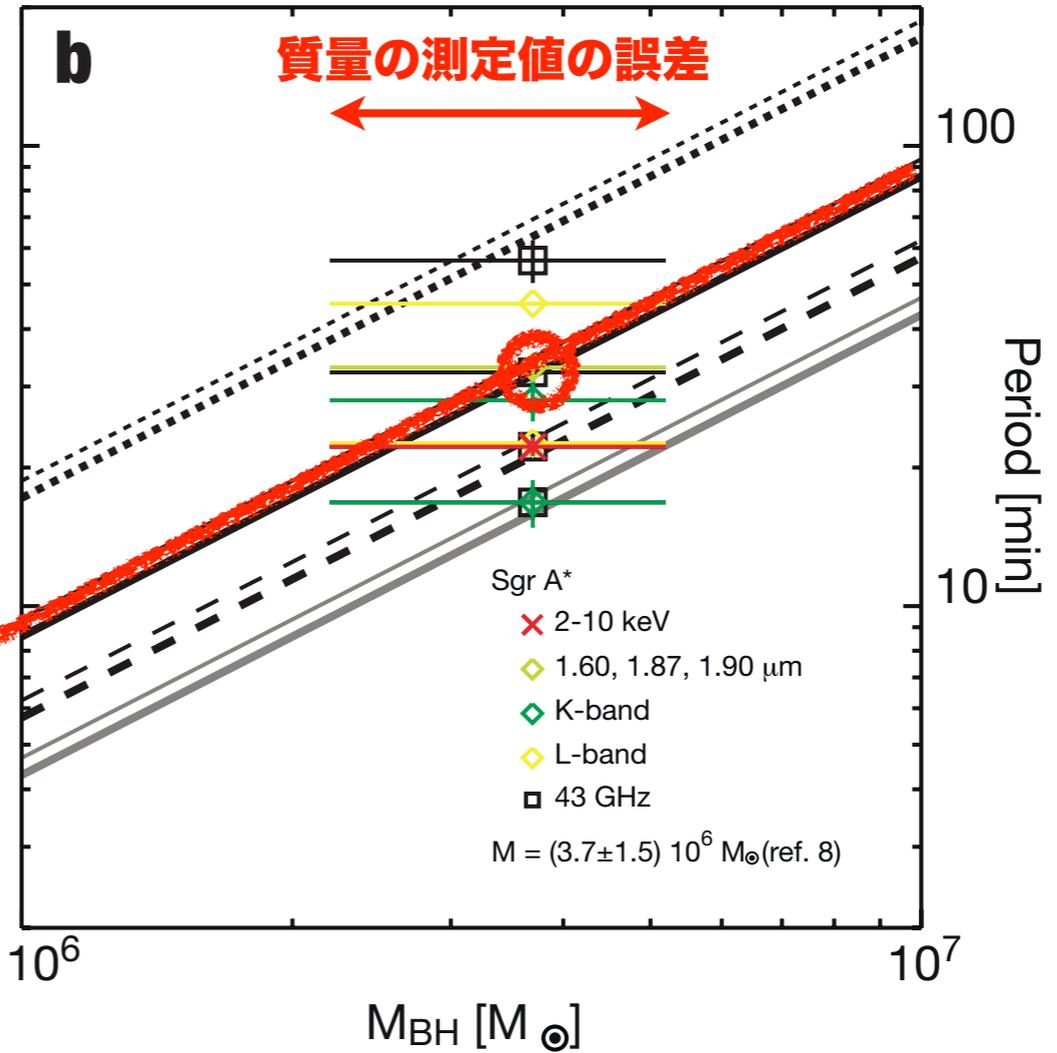
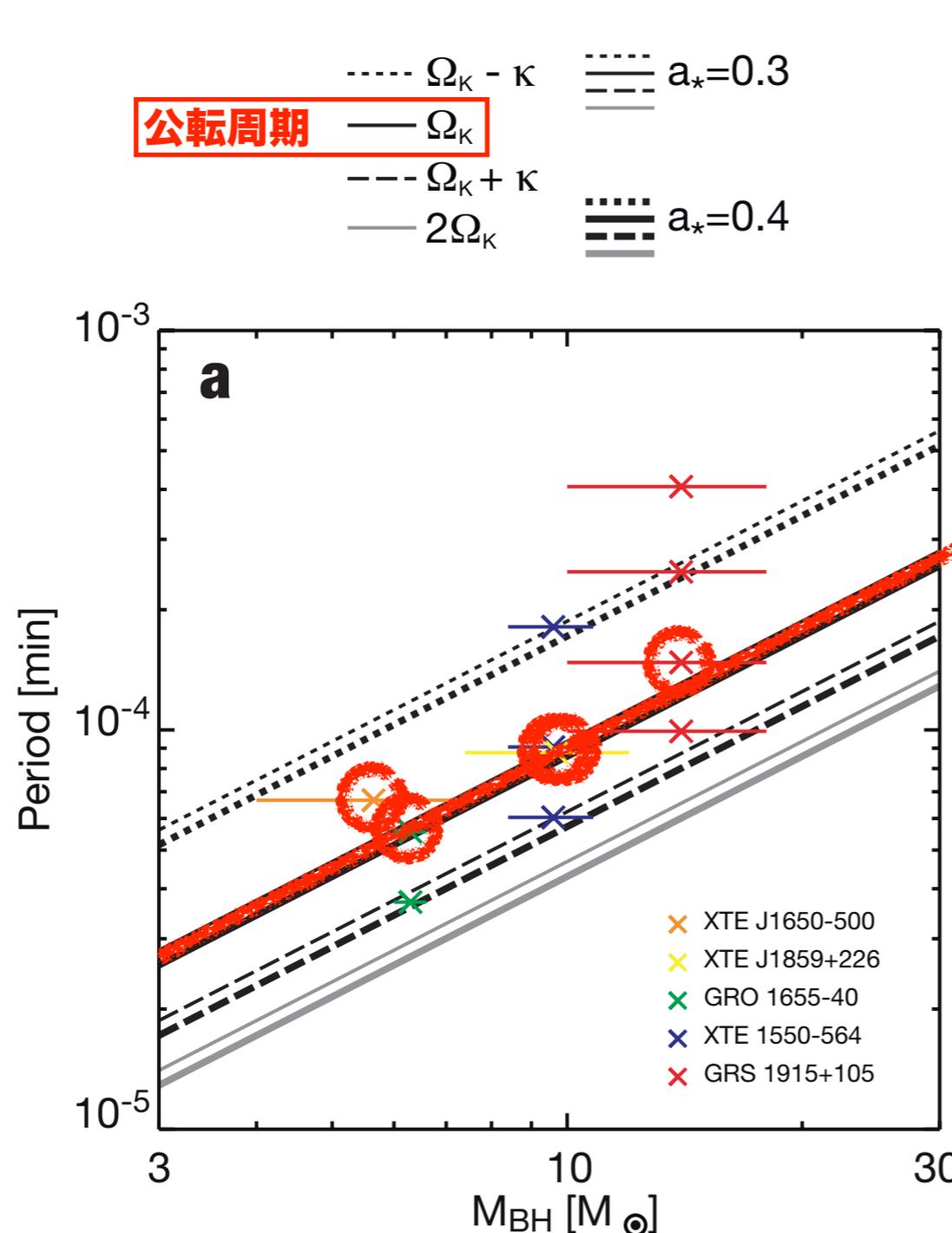
天体名	X線光度変動の振動数 (Hz)	質量 (太陽質量)
XTE J1859+226	190	7.6 - 12.0
GRO 1655-40	300, 450	6.0 - 6.6
XTE 1550-564	(92), 184, 276	8.4 - 10.8
GRS 1915+105	(41), (67), 113, 168	10.0 - 18.0
XTE J1650-500	250	4.0 - 7.3

観測日 (世界時間)	観測波長	光度変動の周期(分)
2003.06.15 - 16	赤外線 : K-band	16.8±2, 17.1
2004.09	赤外線 : 1.60, 1.87, 1.90 (μm)	33±2
2002.10, 2004.08	X線 : 2 - 10 (keV)	22.2
2007.04.04	赤外線 : L-band	22.6
2007.07.22	赤外線 : L-band	45.4
2004.03.08 09:30 - 16.30	電波 : 43 (GHz)	16.8±1.4, 22.2±1.4, 32.2±1.5, 56.35±6
???	電波	18, 26

共振円盤振動の特徴 : 整数比の振動数、異なる波長で周期が同じ

光度変動と共鳴円盤振動の周期の関係

YK, Miyoshi, Takahashi, Negoro, Matsumoto (2010) MNRAS Letter



銀河系中心ブラックホール「いて座A*」

$$\Omega_K \equiv \frac{d\phi}{dt} = \pm \sqrt{\frac{M}{r^3}} \left[1 \pm a \sqrt{\frac{M}{r^3}} \right]^{-1}$$

恒星質量ブラックホール

共鳴円盤振動法によるスピンの測定結果

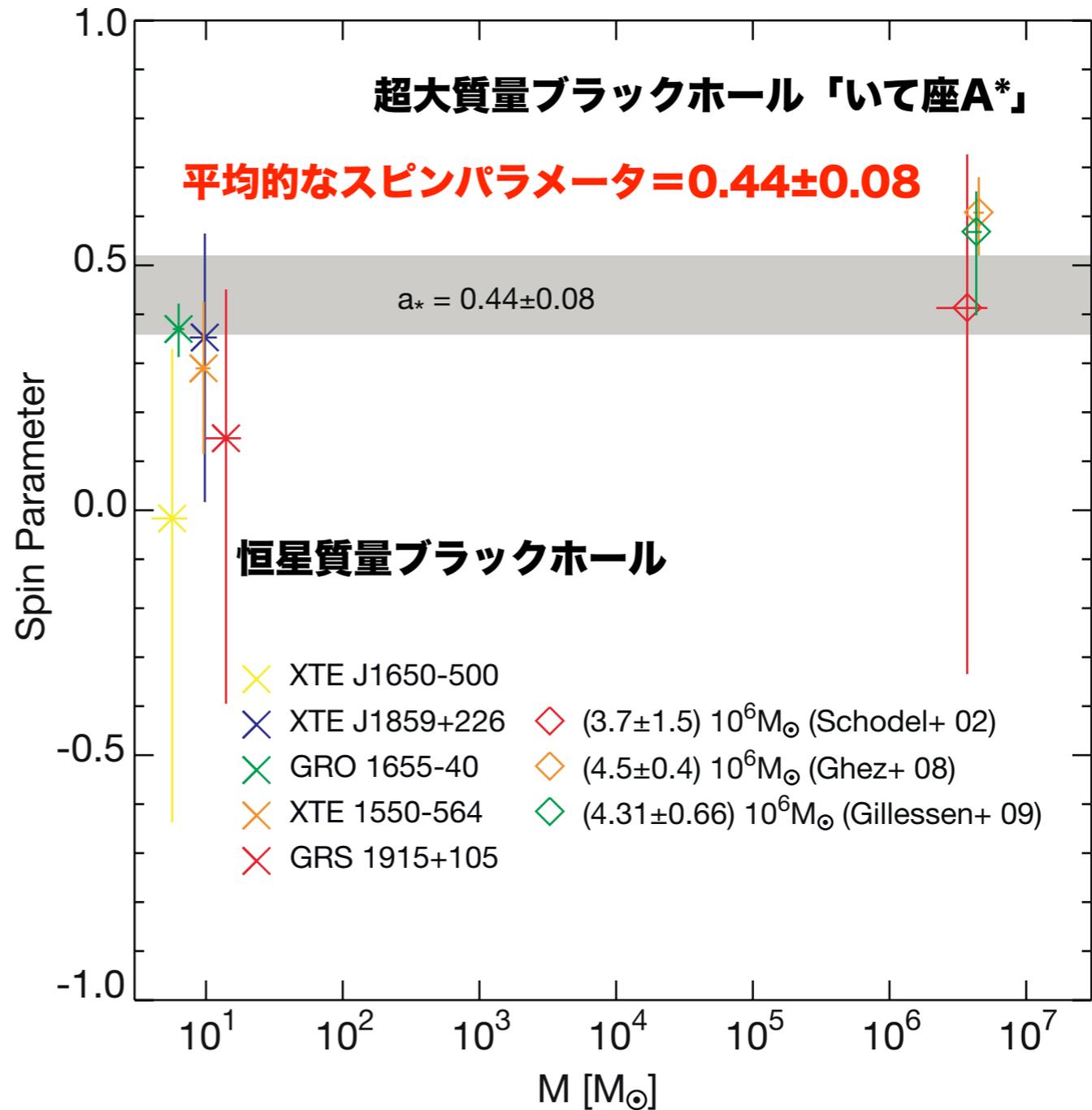
YK, Miyoshi, Takahashi, Negoro, Matsumoto (2010) MNRAS Letter

光度変動の振動数： ν

ブラックホールの質量： M

$$a_* = c^3 \left[\frac{1}{2\pi\nu GM} - \left(\frac{R}{GM} \right)^{3/2} \right]$$

$$\nu = \Omega_K(R) = 2\kappa(R)$$



銀河系中心ブラックホールのスピン測定結果

- 共鳴円盤振動のケプラー周期に対応する光度変動周期を同定
- 質量の測定誤差の範囲で、ブラックホールのスピンパラメータを測定した
- ユニークなスピンパラメータが存在する
 - スピンパラメータ： $a_* = 0.44 \pm 0.08$
 - 銀河系中心ブラックホールの質量： $M = (4.2 \pm 0.4) \times 10^6 M_\odot$

**放射源から多波長の時間変動を計測し
銀河系中心ブラックホールのスピンを検証**

ブラックホールの進化モデル

- 質量降着
- 角運動量輸送
 - ➔ 質量降着による角運動量の流入
 - ➔ BZ効果による角運動量の流出

$$\frac{d \ln M_{\text{BH}}}{dt} = \dot{M} e_{\text{in}} - \frac{\mathcal{P}}{M_{\text{BH}} c^2}$$

$$\frac{d J_{\text{BH}}}{dt} = \dot{M} l_{\text{in}} - \frac{\mathcal{P}}{\Omega_{\text{F}}}$$

Moderski & Sikora 1996; Camenzind 2007

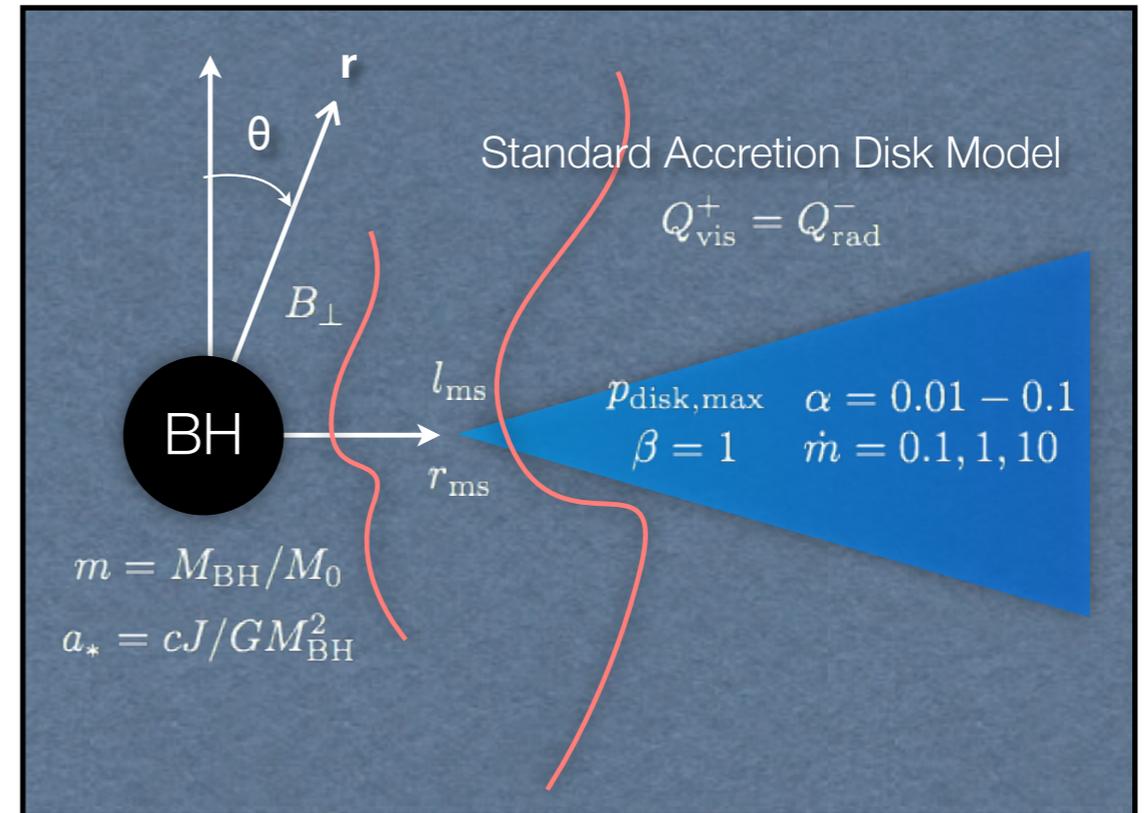
$$\mathcal{P} \simeq \frac{1}{8} \frac{B_{\perp}^2 \tilde{r}_{\text{BH}}^4}{c} \Omega_{\text{F}} (\Omega_{\text{BH}} - \Omega_{\text{F}}) \quad B_{\perp}^2 = 8\pi p_{\text{disk,max}} / \beta$$

$$\eta_{\text{BZ}} \equiv \frac{\mathcal{P}}{\dot{M}_{\text{Edd}} c^2} \quad \tau_{\text{Edd}} \equiv \frac{M}{\dot{M}_{\text{Edd}}}$$

$$e_{\text{in}} = e_{\text{ms}} \quad l_{\text{in}} = l_{\text{ms}}$$

$$\tilde{r}_{\text{BH}} = c^2 r_{\text{BH}} / G M_{\text{BH}} = 1 + (1 - a_*^2)^{1/2} \quad k = \Omega_{\text{F}} / \Omega_{\text{BH}}$$

ブラックホールと降着円盤の概略図



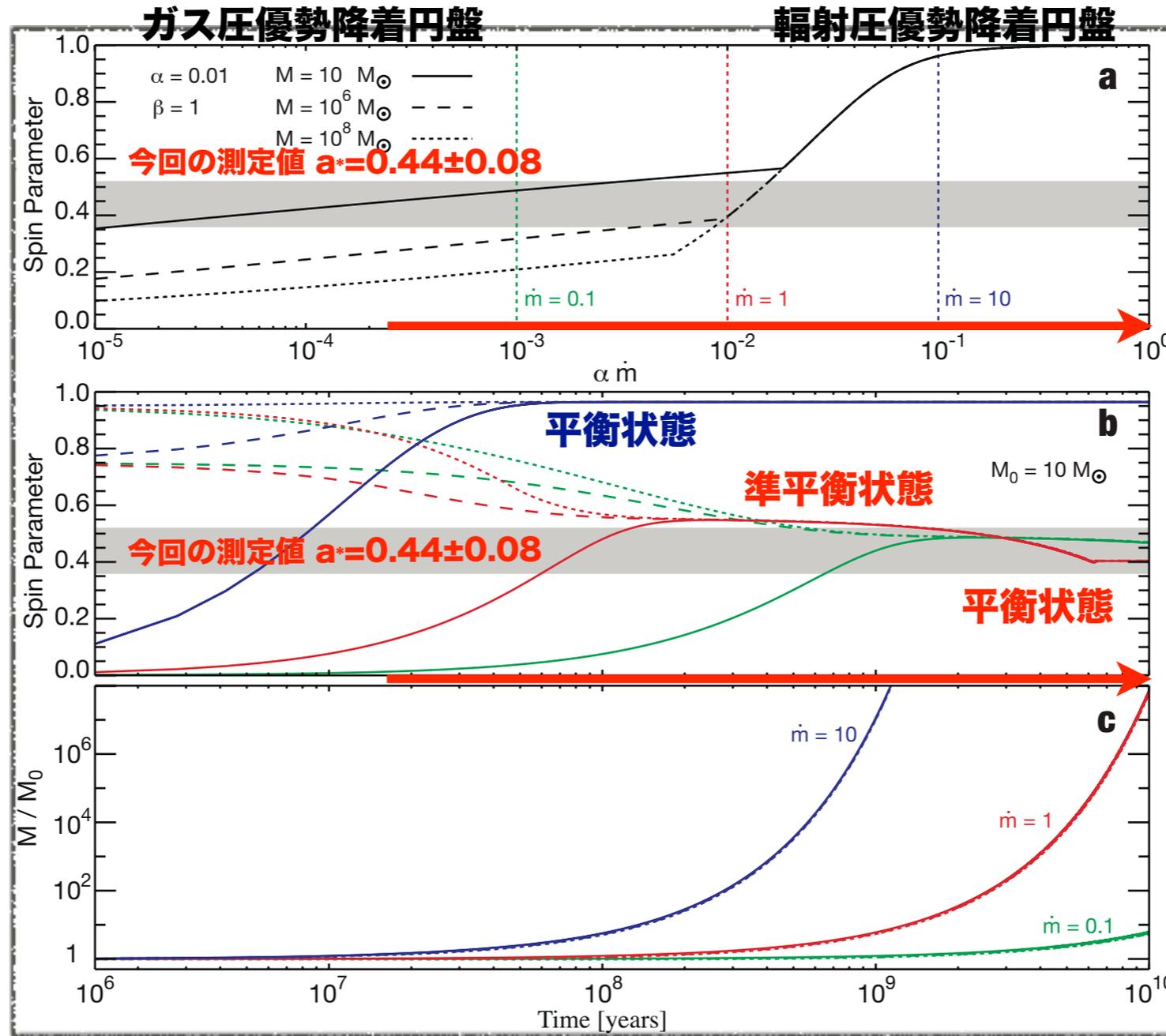
ブラックホール進化の方程式

$$\frac{d \ln m}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{Edd}}} (e_{\text{ms}} - \eta_{\text{BZ}})$$

$$\frac{da_*}{dt} = \frac{1}{\tau_{\text{Edd}}} \left[(l_{\text{ms}} - 2a_* e_{\text{ms}}) - 2\eta_{\text{BZ}} \left(\frac{\tilde{r}_{\text{BH}}}{ka_*} - a_* \right) \right]$$

ブラックホールのスピンの平衡値と進化

YK, Miyoshi, Takahashi, Negoro, Matsumoto (2010) MNRAS Letter



スピンの平衡値

角運動量の増加分 = 損失分

ガスが吸い
込まれる量

BHスピンの時間進化

経過時間

BH質量の時間進化

スピニングが小さい理由

ブラックホールの自転エネルギーが
抜き取られていた

恒星質量ブラックホール

超大質量ブラックホール

$$a^* = 0.44 \pm 0.08$$

BH大気の時間変動の物理

- ❖ 共鳴円盤振動法でブラックホールのスピンパラメータを測定した
- ❖ ブラックホールの質量とスピンの相関図を作成
- ❖ ブラックホールの質量に依らないユニークなスピンパラメータが存在する $a_* = 0.44 \pm 0.08$
- ❖ 大質量ブラックホールのスピンの小さいのは、自転エネルギーが抜き取られたからである