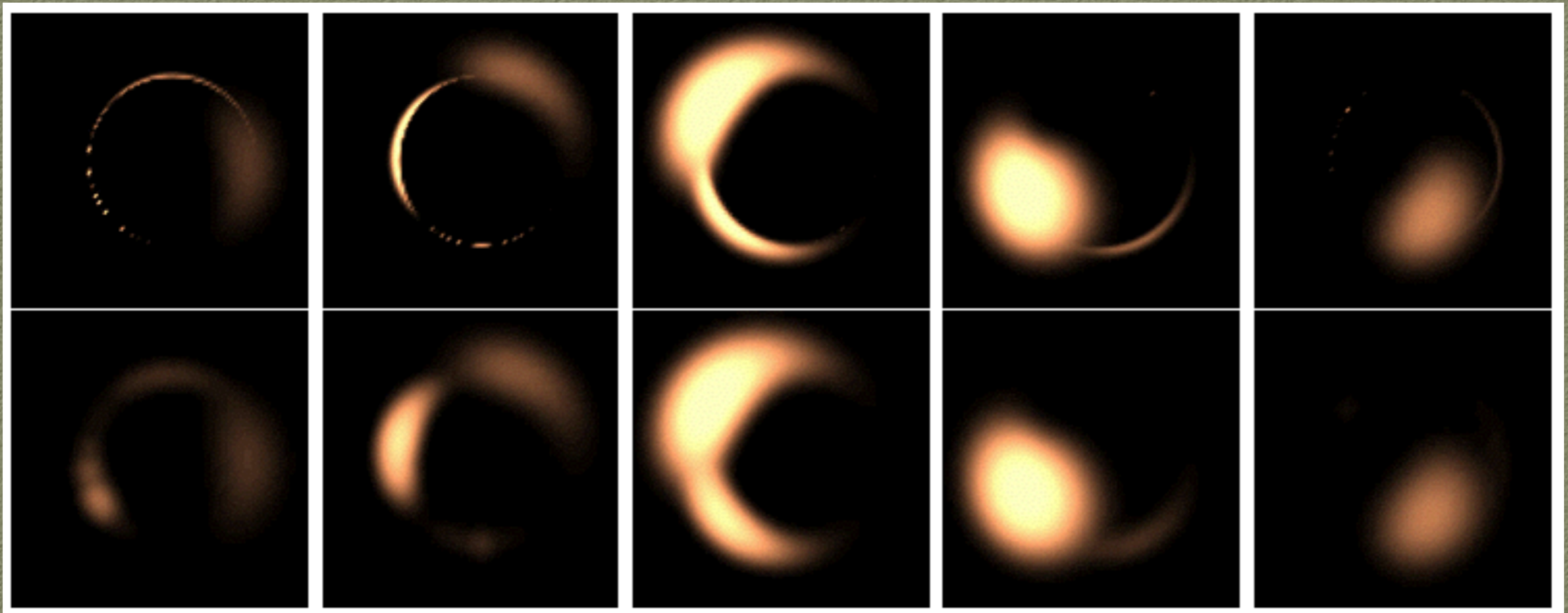


ブラックホールを周回する “ホットスポット”の時間変動

高橋真聡 (愛知教育大学)



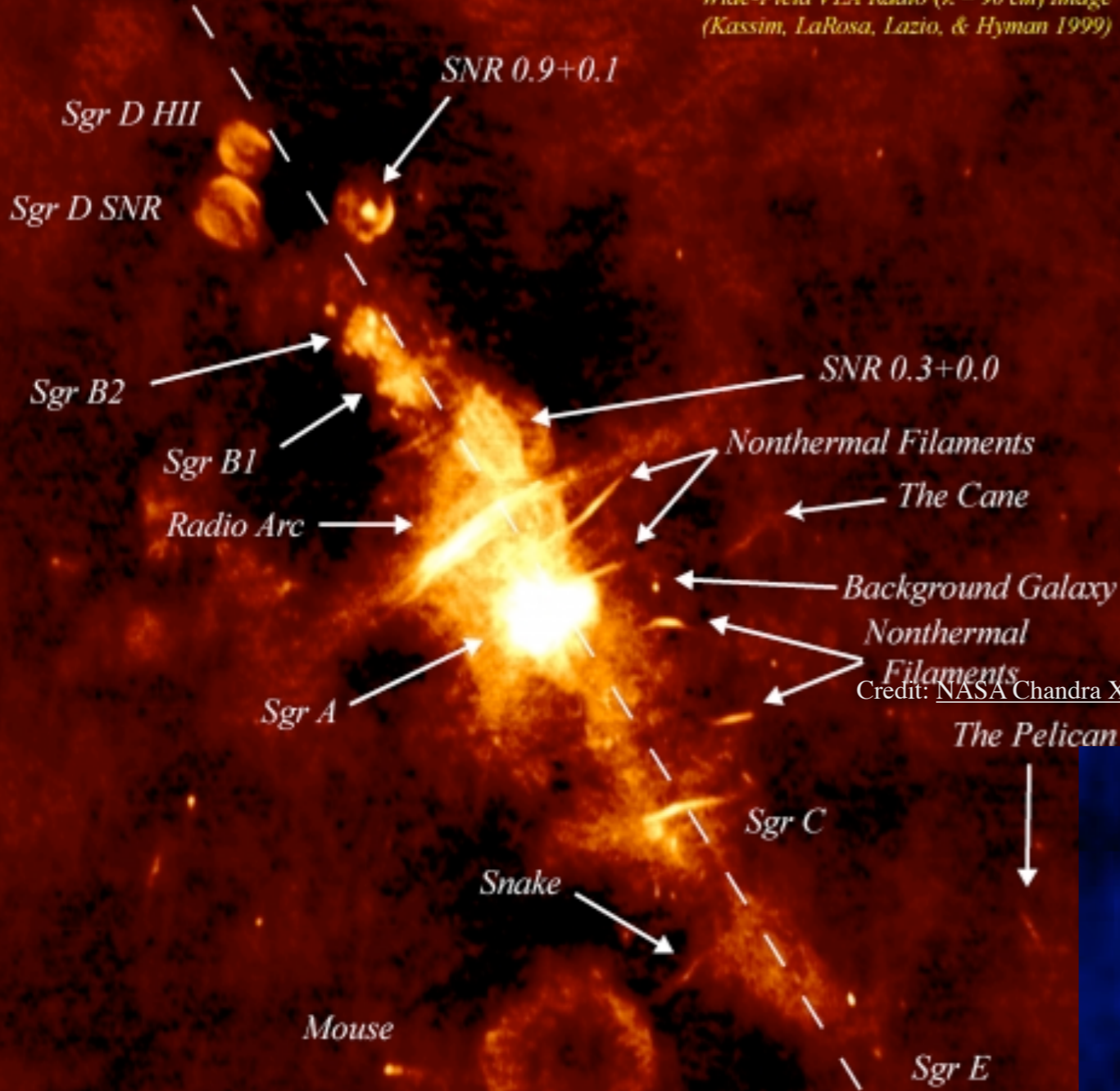
下段は星間電子による散乱の効果を含む

<https://www.cfa.harvard.edu/~loeb/im.pdf>



The Galactic Center

Wide-Field VLA Radio ($\lambda = 90$ cm) Image
(Kassim, LaRosa, Lazio, & Hyman 1999)

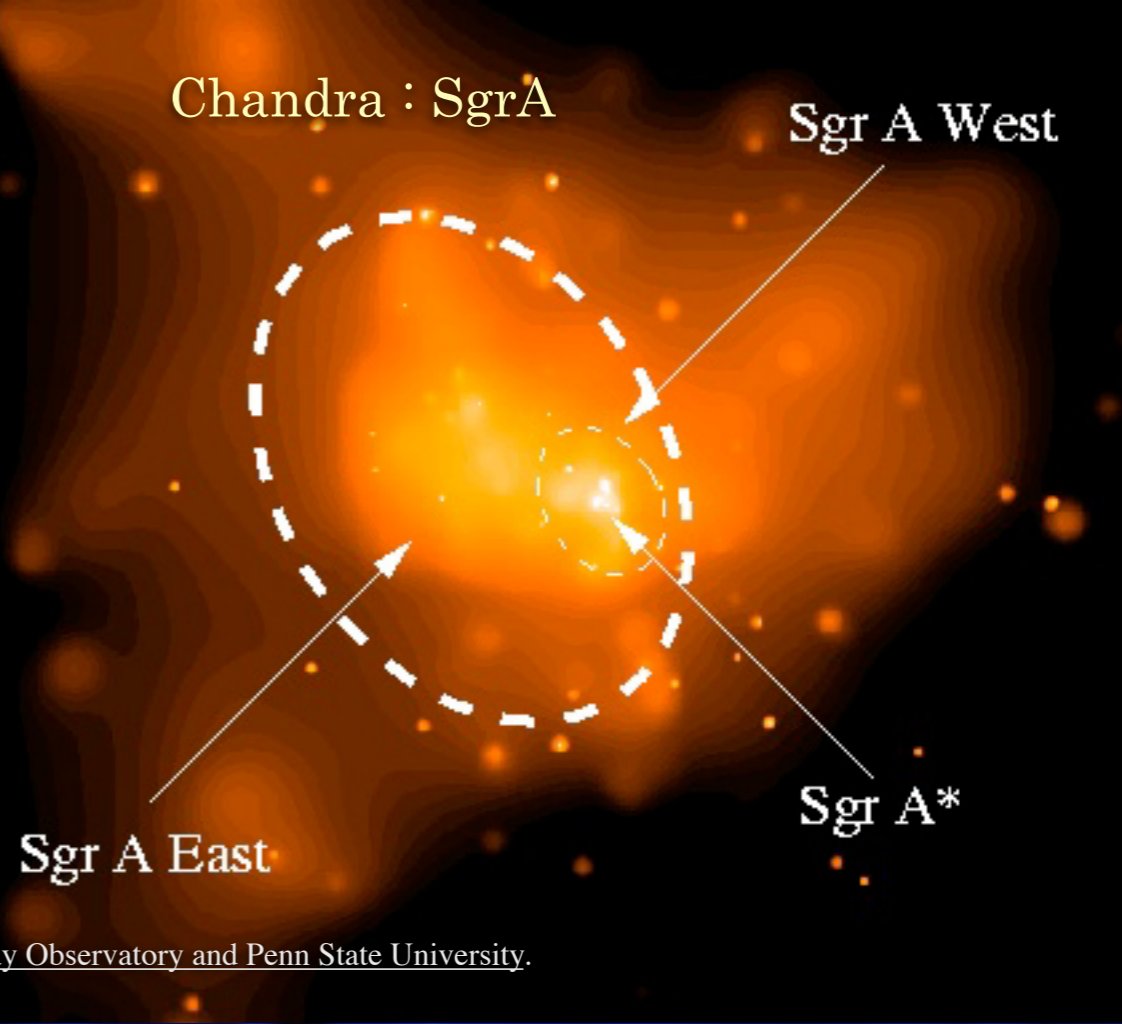


SNR 359.0-0.9

$\sim 0.5^\circ$

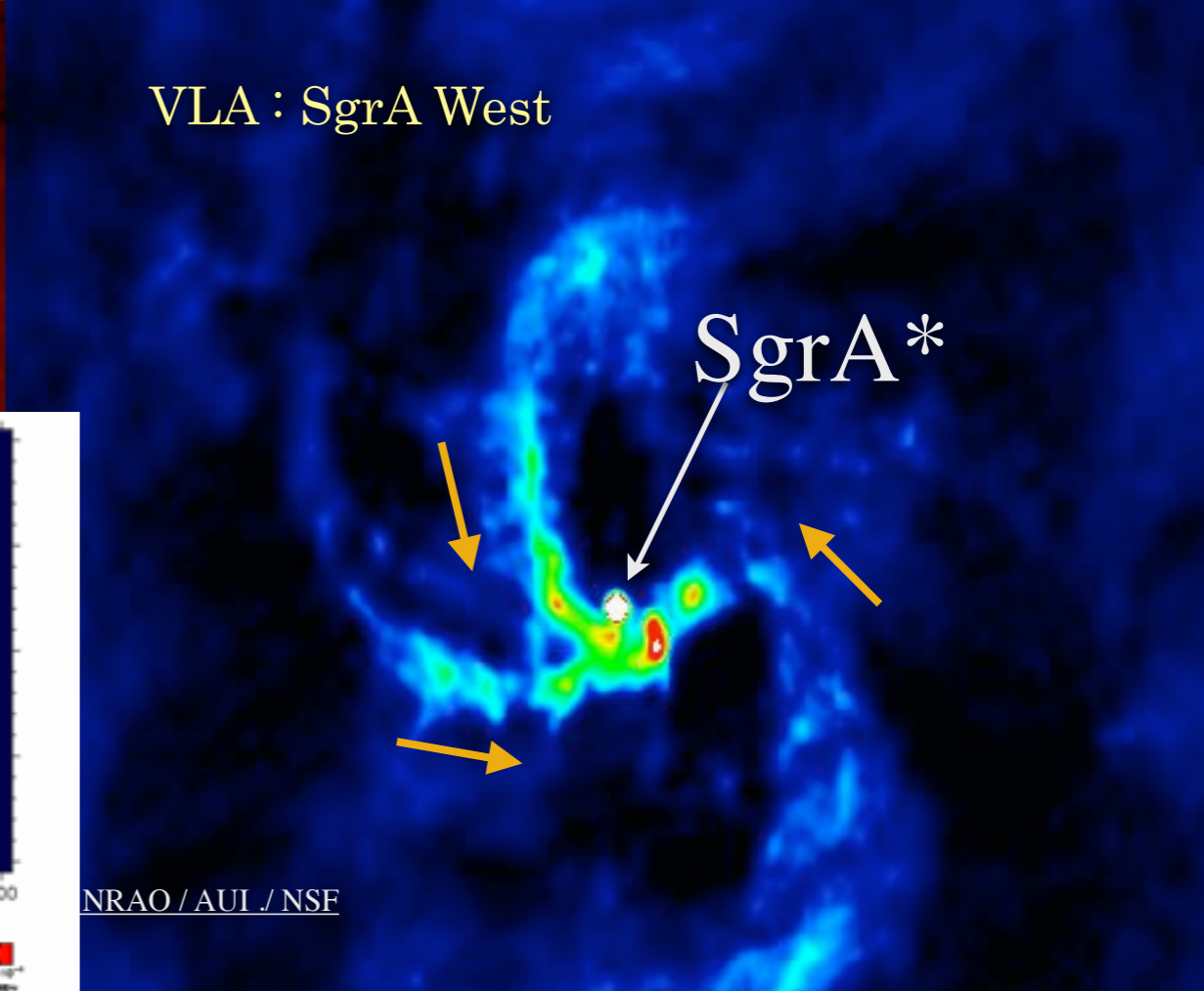
Naval Research Lab, APOD: The Galactic Center in Radio Waves.

~ 240 light years

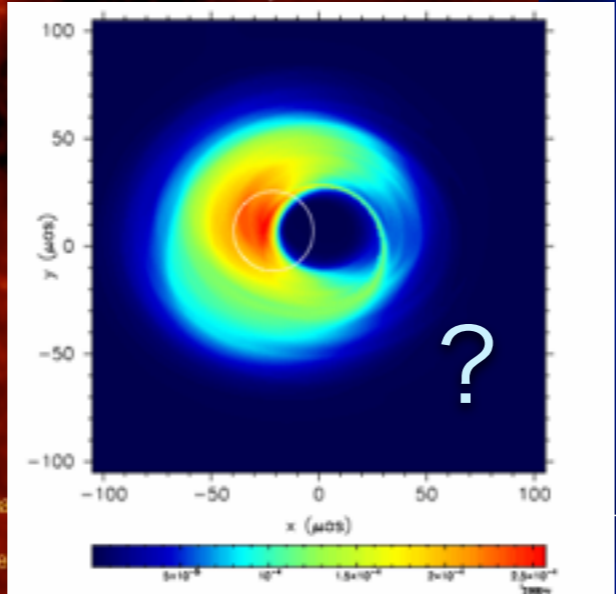


Credit: NASA Chandra X-Ray Observatory and Penn State University.

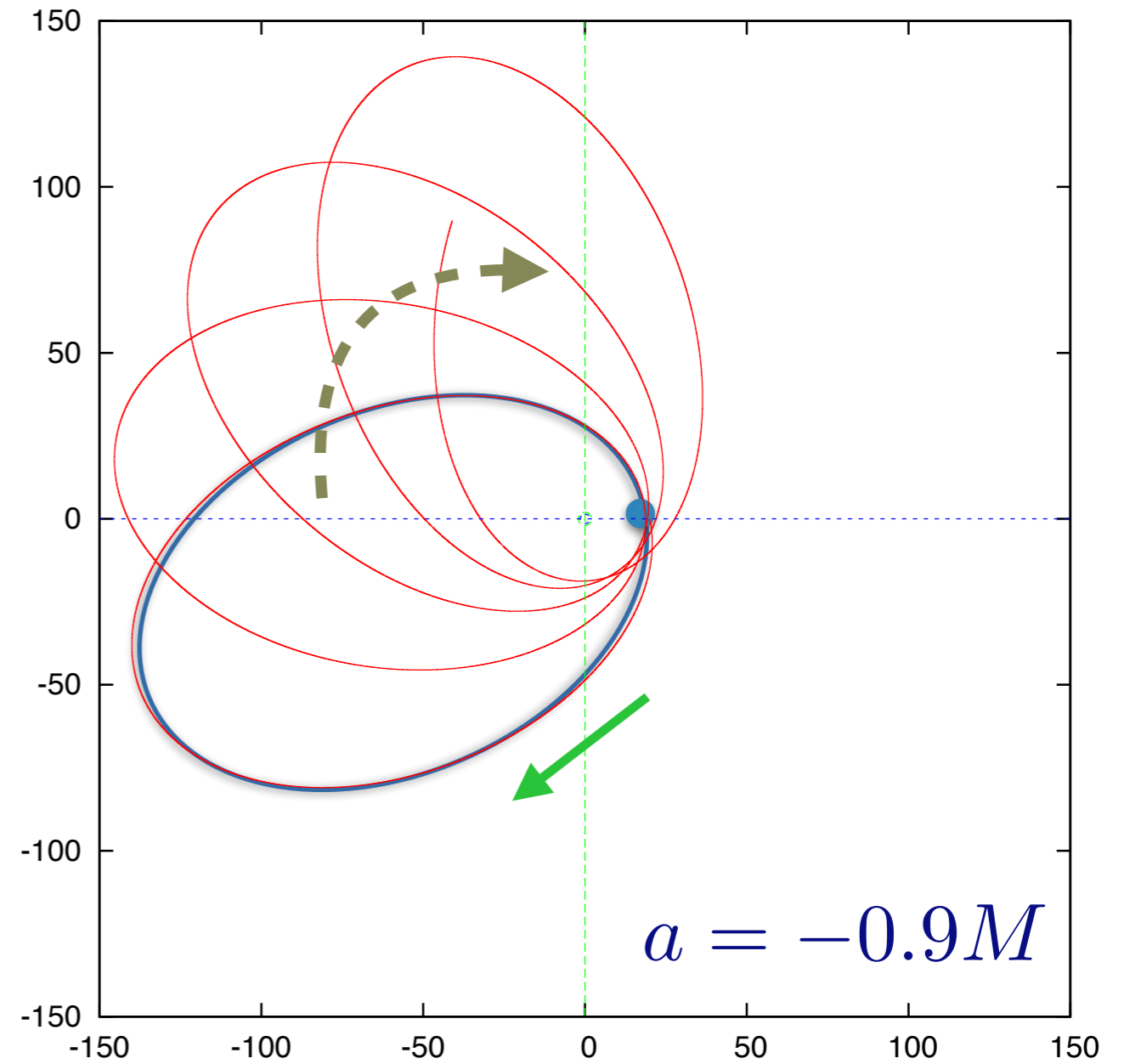
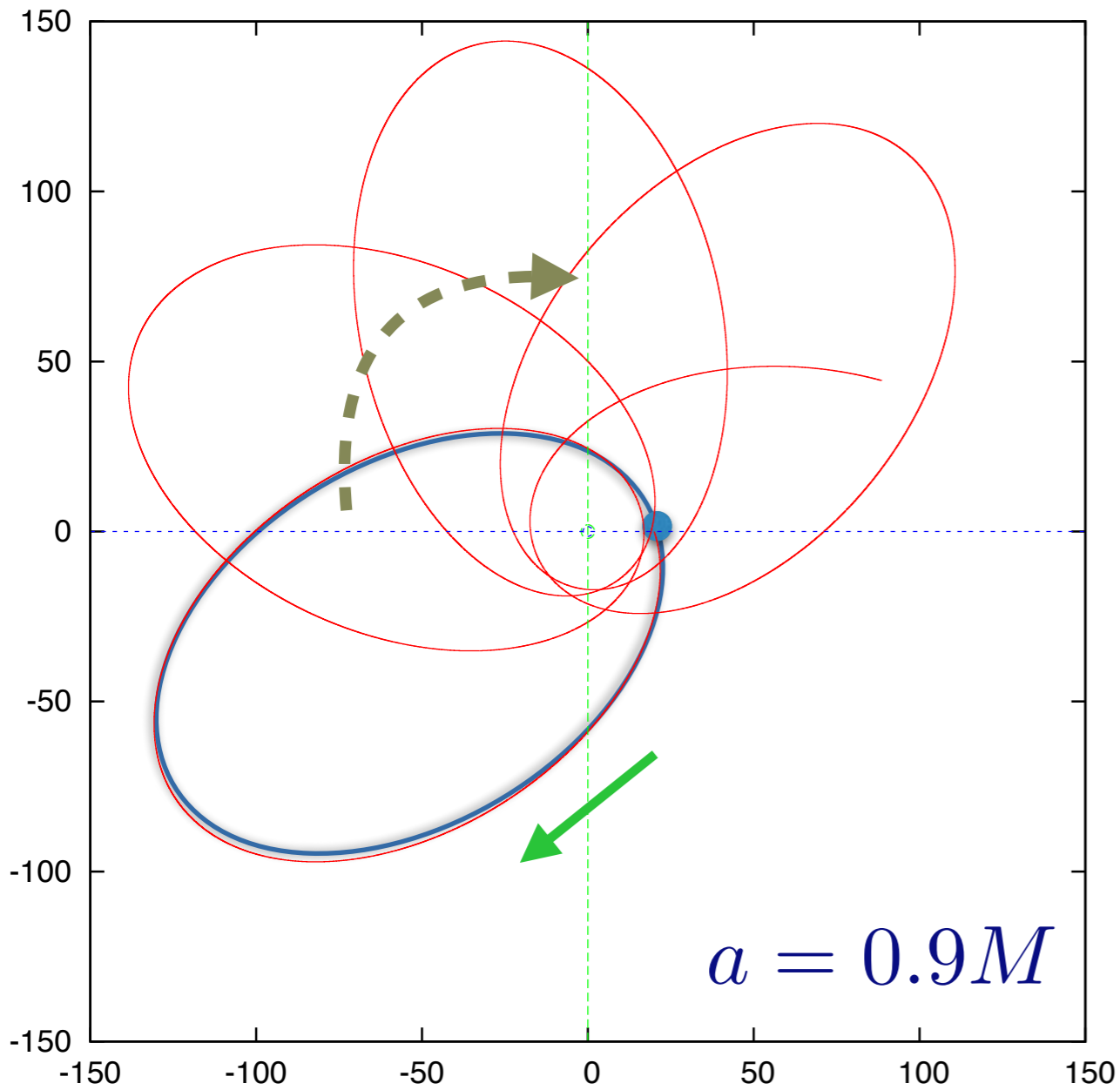
VLA : SgrA West



NRAO / AUI / NSF



近星点移動 (BHごく近傍天体の場合)



一般相対論効果で近星点移動する
他のS天体からの摂動も重要！

$$L = -6.0$$

$$E = 0.994$$

$$r_0 = 20M$$

銀河系中心領域：S2スペクトル観測@すばる望遠鏡

Nishiyama+ 2014May

スリット



スリット幅

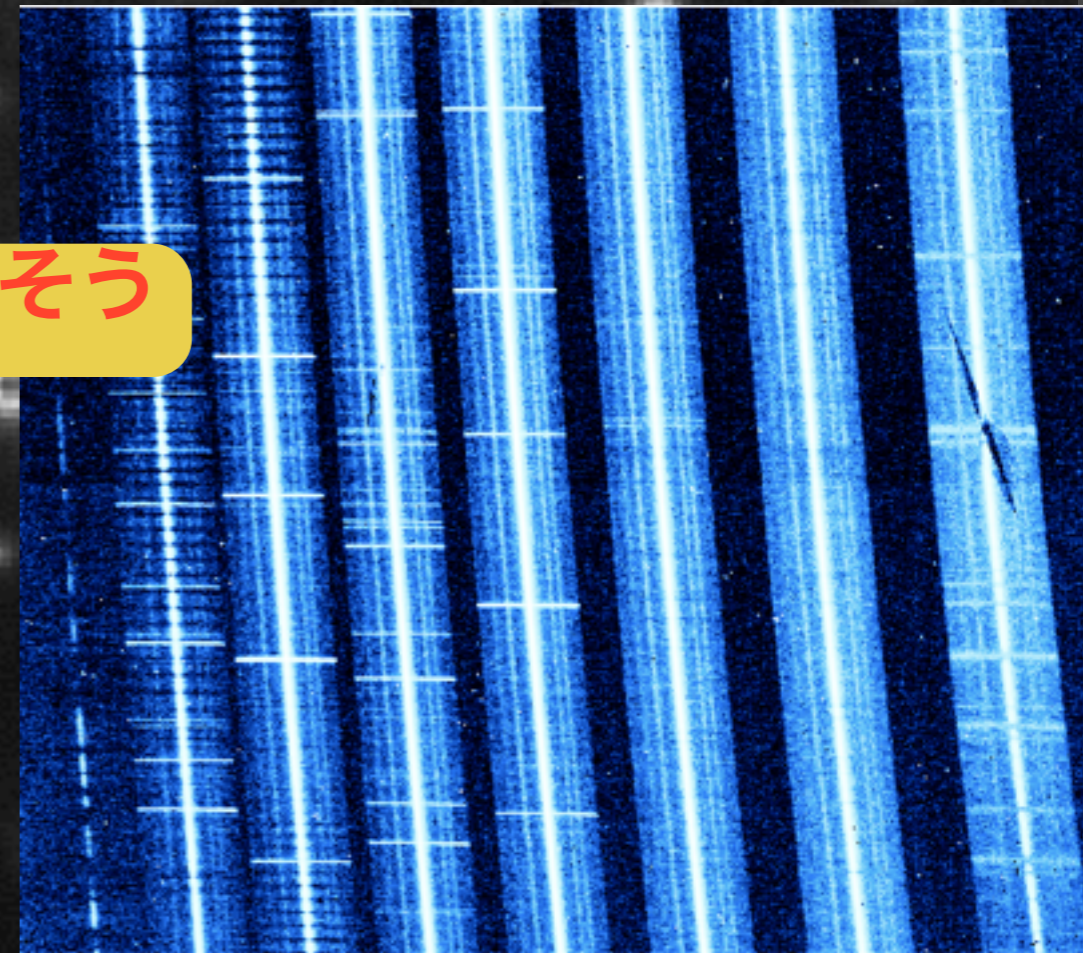


シュバルツシルド時空の効果は拾えそう

Angelil & Saha (2010)

ドップラー効果の測定：
軌道要素を正確に決めたい

16年待たずに、いま



電波望遠鏡をつないで巨大望遠鏡とする

(南半球、アンデス高地)

銀河系中心がよく見える位置

高地は水蒸気量が少ない！

1000km~ 2000km のベースラインが必要

La Silla 2400m
SEST15m鏡 (Closed, but alive)

Peru
Huancayo 3300m
900km

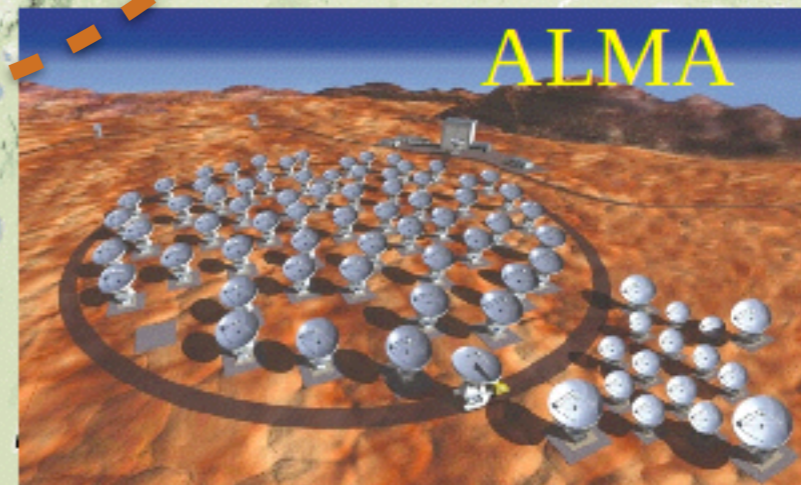
ALMA

Near Bolivia La Paz 5300m
The highest Ski slope in the world
Cosmic Ray Observatory

Cerro Chacaltaya

? **Mirabel station** 4600m

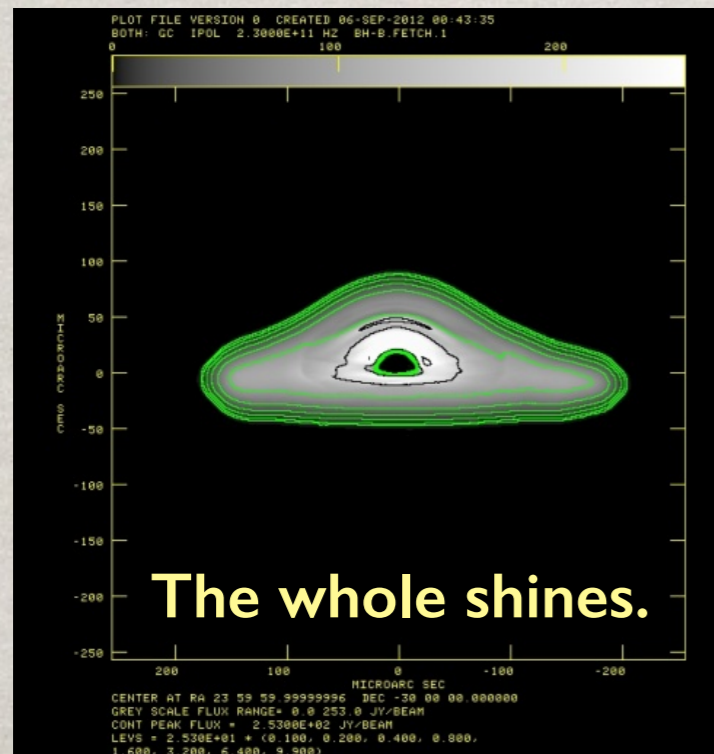
ALMA



実際の電波望遠鏡での観測シミュレーション Miyoshi (2012)

予想される画像

Original models

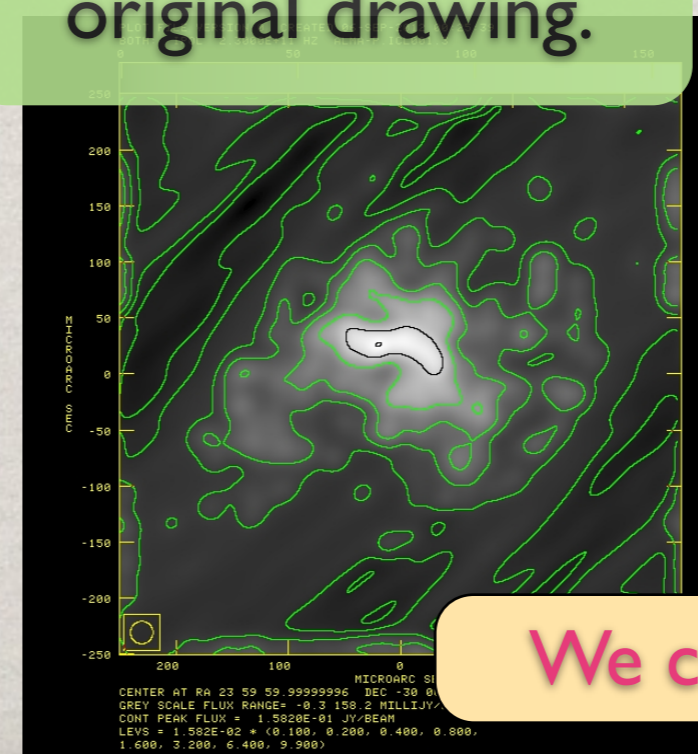
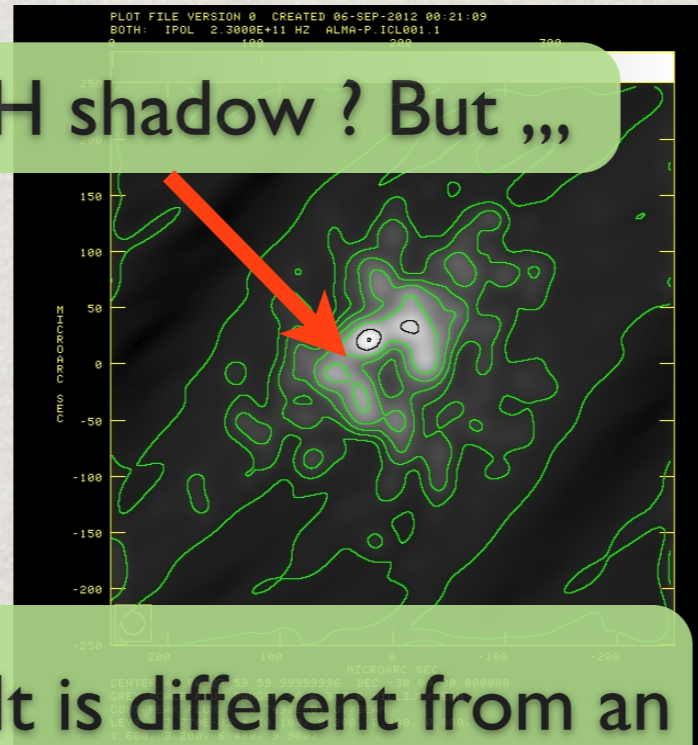


計画中の電波望遠鏡群ではこう見える！

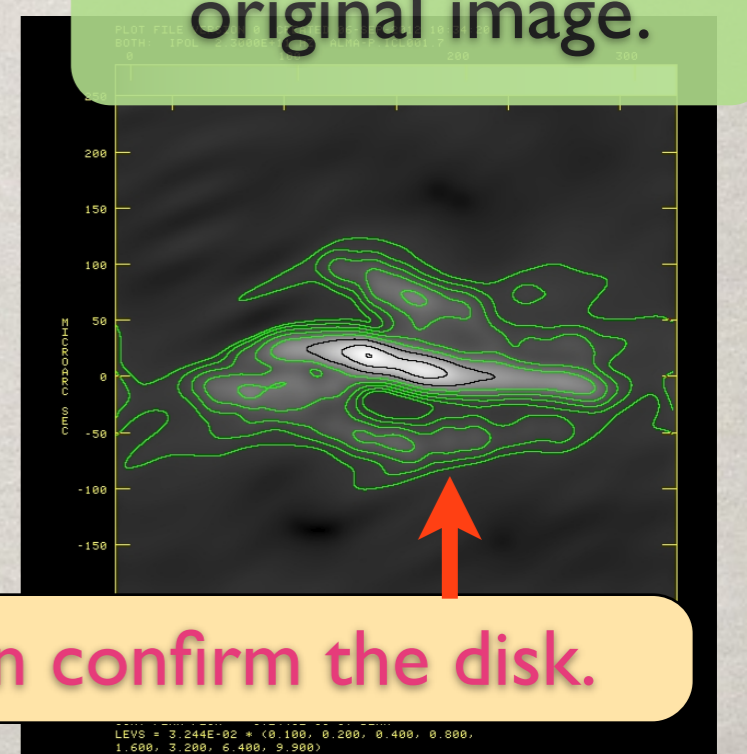
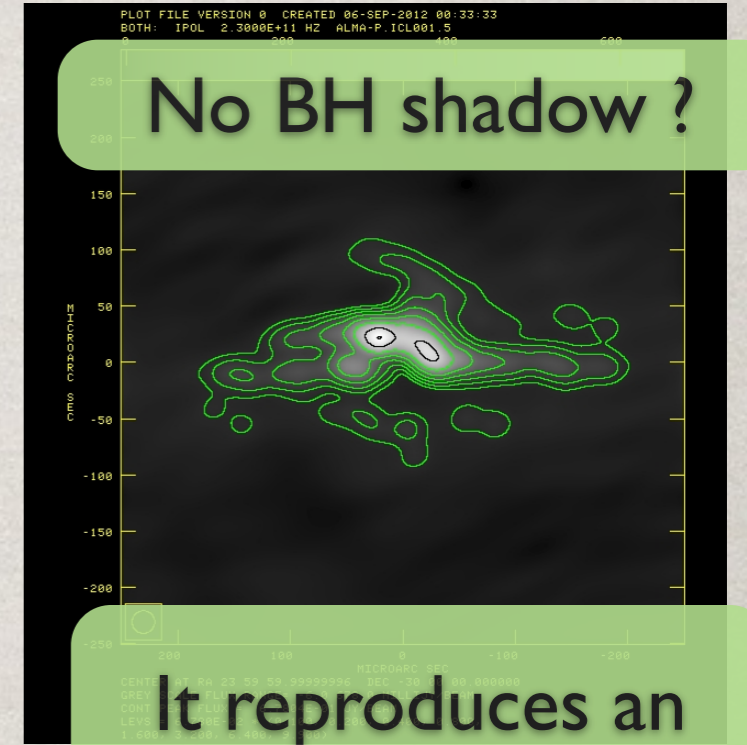
EHT + pALMA

+ Charaban submm

BH shadow ? But ,,,



No BH shadow ?



ブラックホール探査いろいろ

- 1。銀河系中心 S2 天体の軌道
- 2。もっと内側は？：「BH影」撮像観測
- 3。時間変動からBH時空情報を！

「ブラックホール影」観測に先立ち・・・

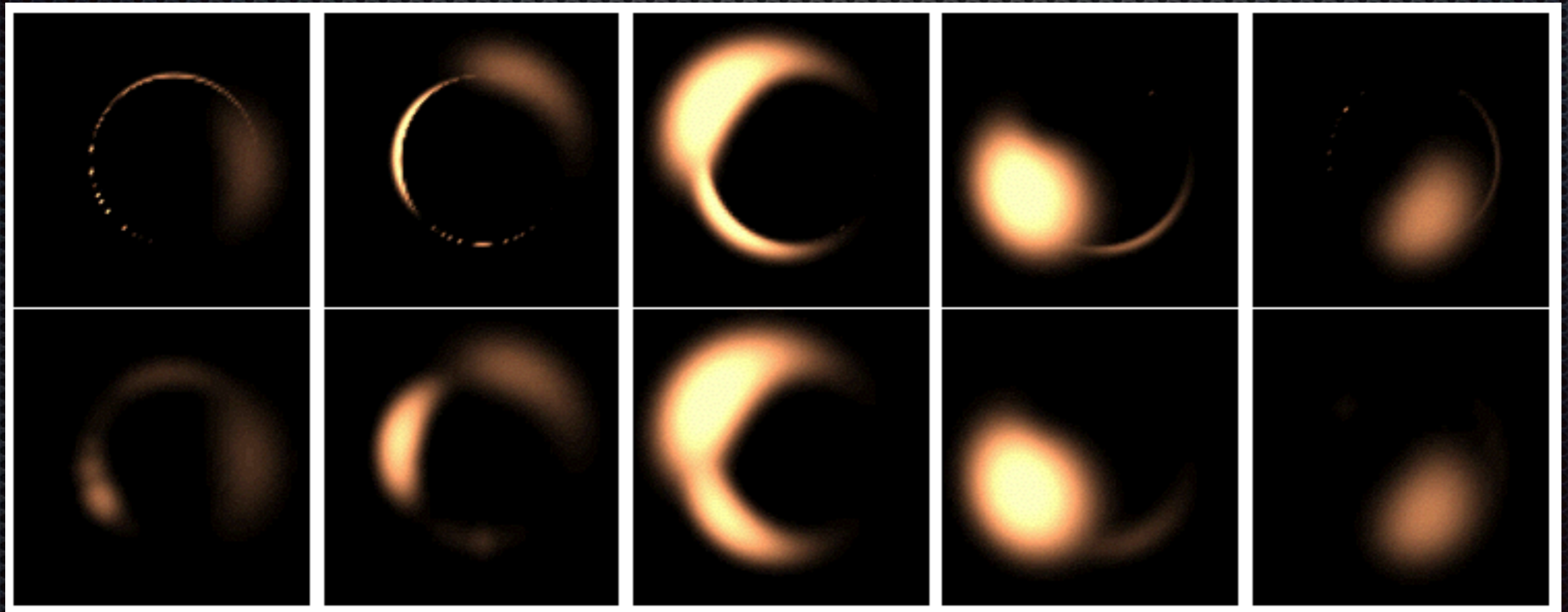
Hot spot の時間変動

ブラックホール近傍からのシグナル

Bright spot! orbiting a rotating Black Hole

BH検証へ ← サイズ + 時間変動 が観測可能

BH shadow images (theoretical)



<https://www.cfa.harvard.edu/~loeb/im.pdf>

下段は星間電子による散乱の効果を含む

Hot spot の時間変動

時間変動のタイムスケール
から空間的スケールを推定

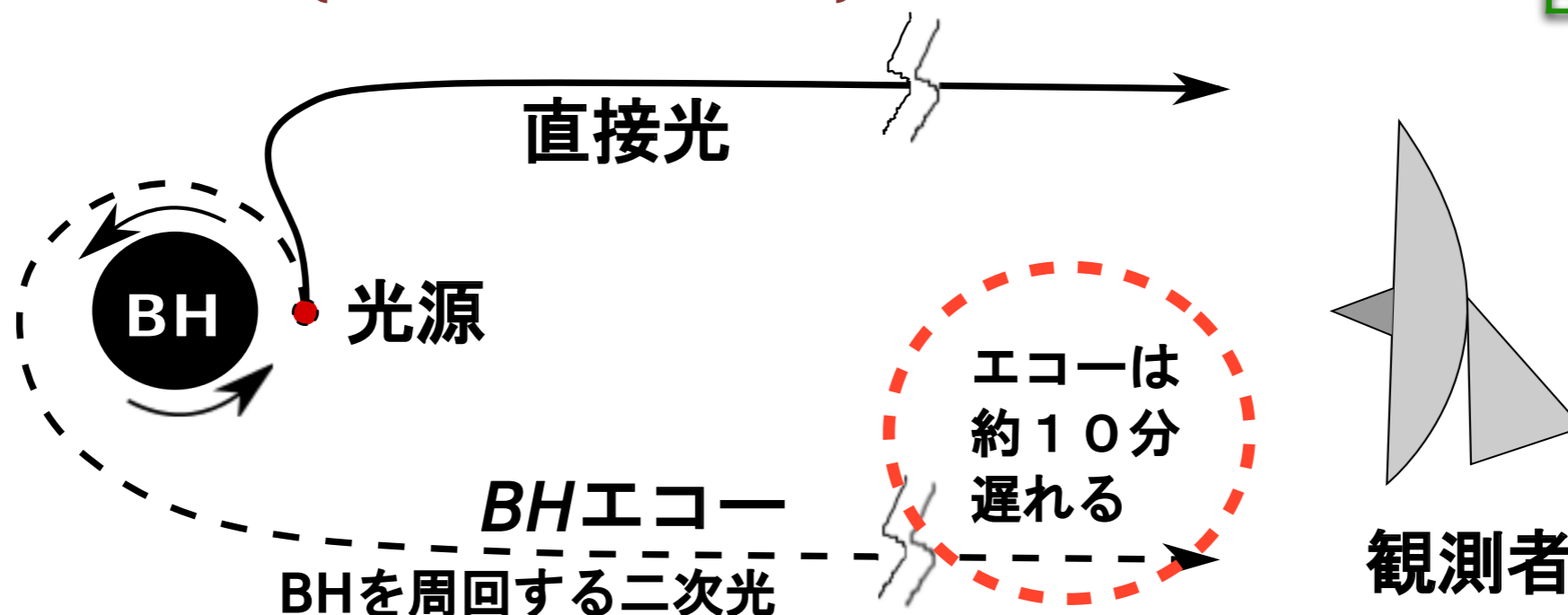
ブラックホール周辺の円盤は時間変動している

ガス円盤の非軸対称性のため？

ホットスポットの存在（フレアー、衝撃波、など）？

BH - ring ならBHエコーも観測される！
(Fukumura+2008)

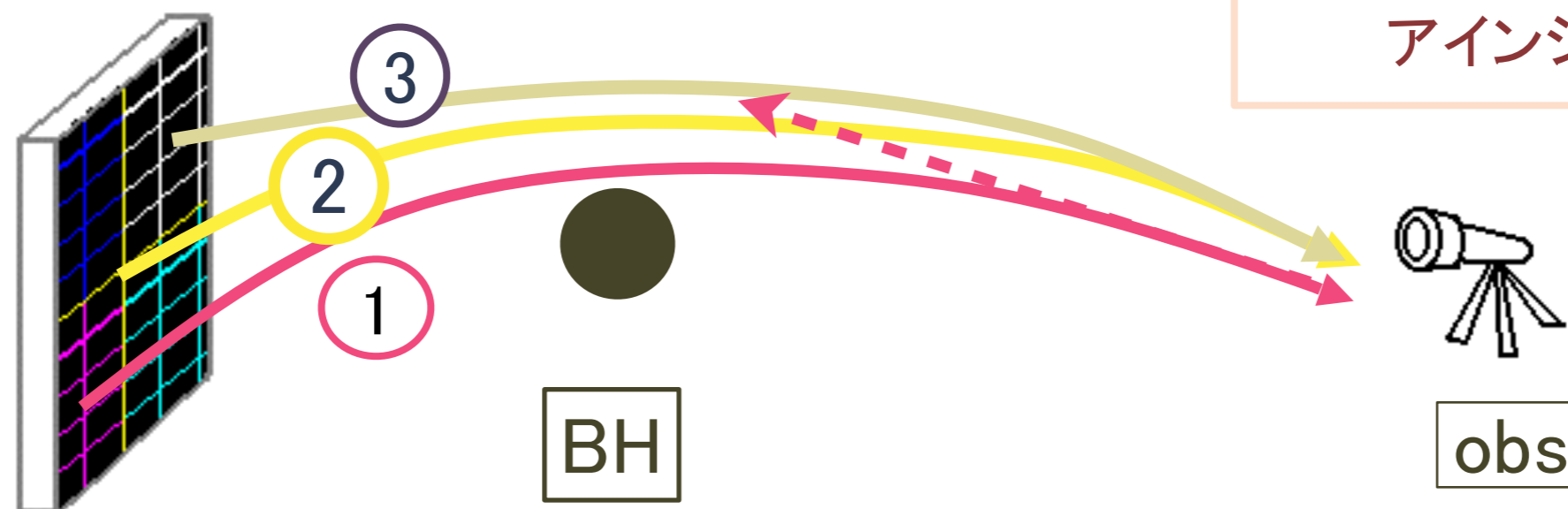
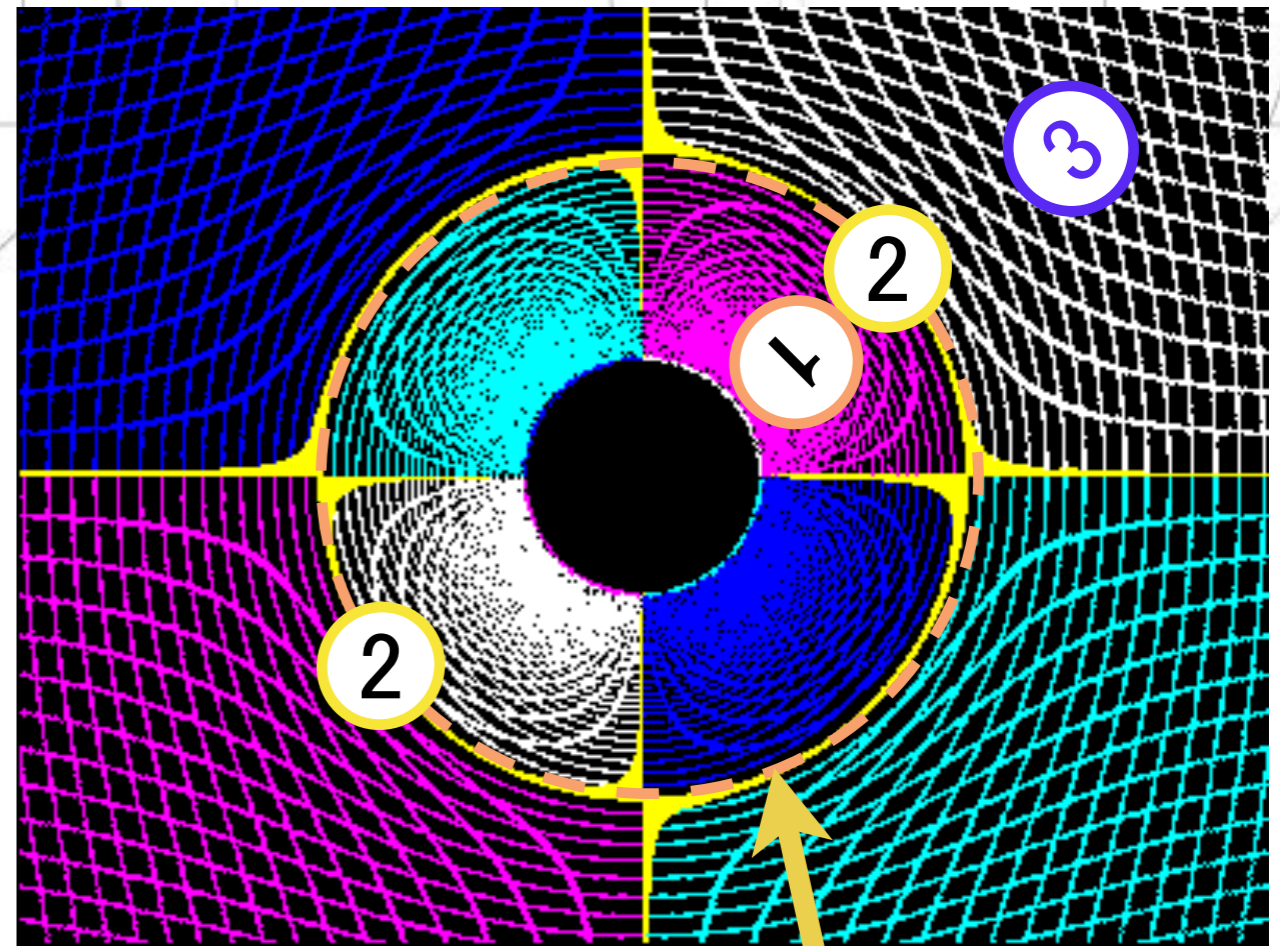
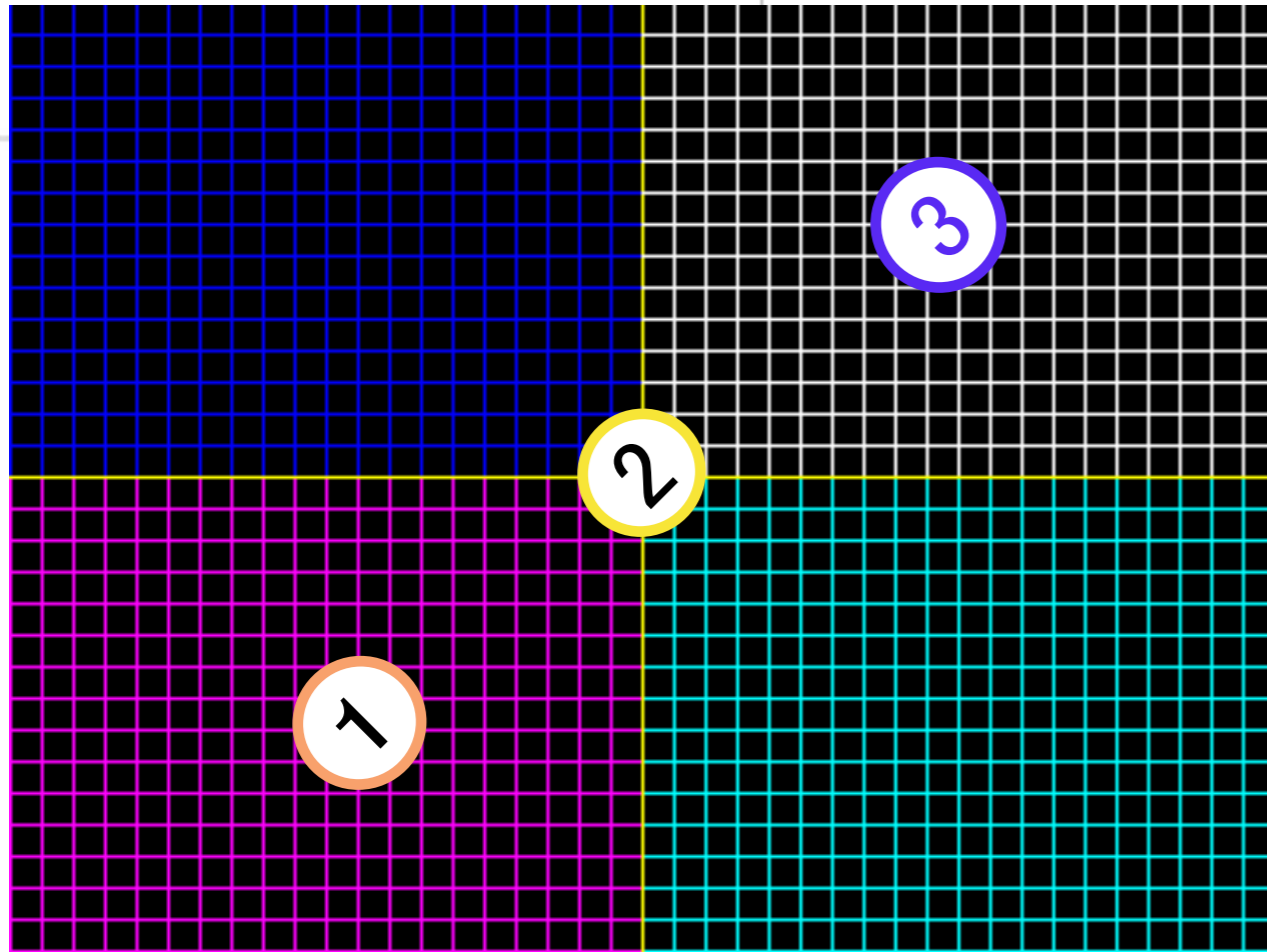
BH 質量
BH スピン



一人時間差干渉観測で測定可能（斉田さん2014）

重力レンズ効果

熊沢(2006)



アインシュタインリング

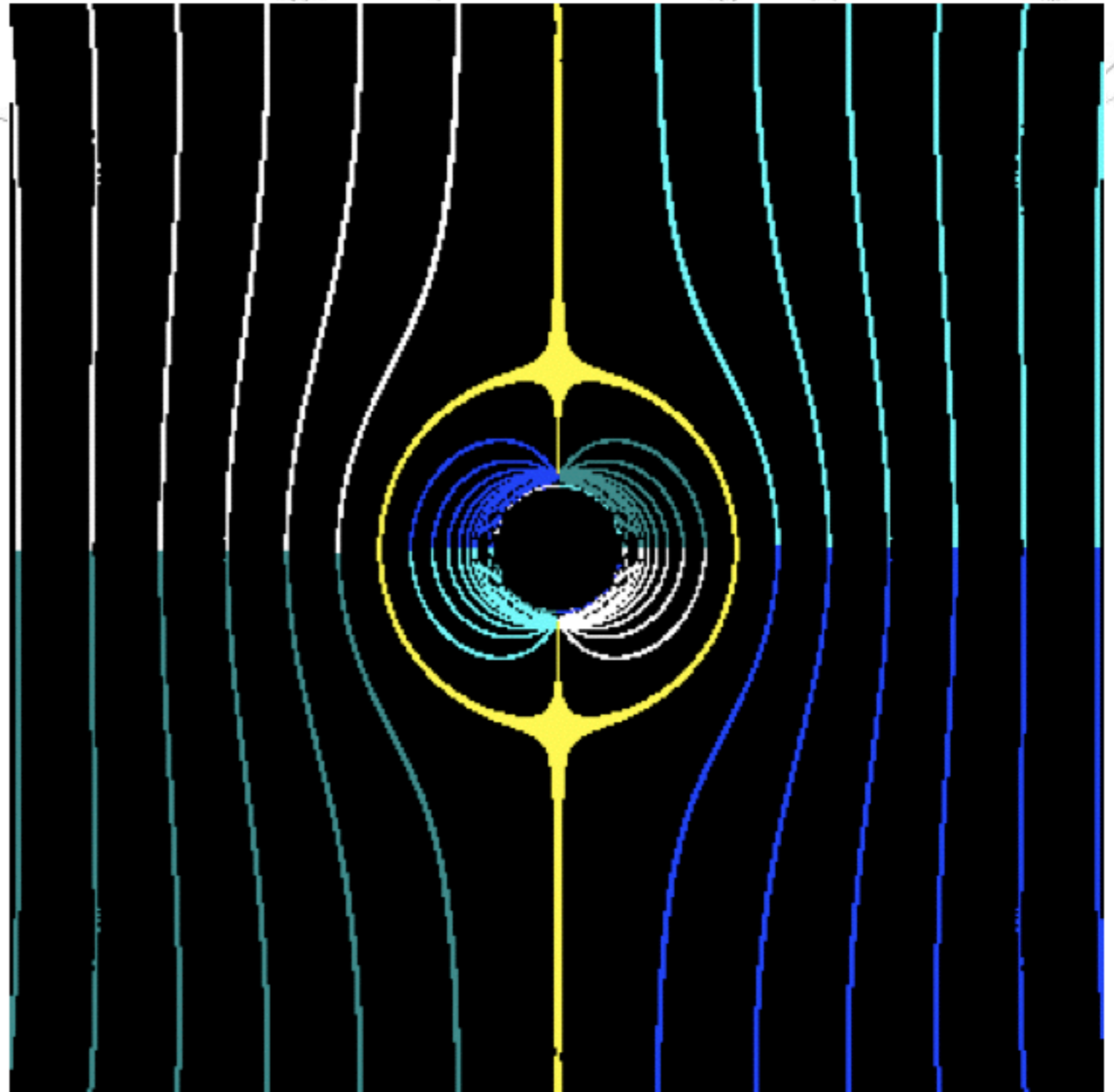


obs

BH

重力レンズ効果 (2)

経線のみの場合
(一様磁場など)



+
+
+
+

BH-ring の見え方

光の測地線を解く

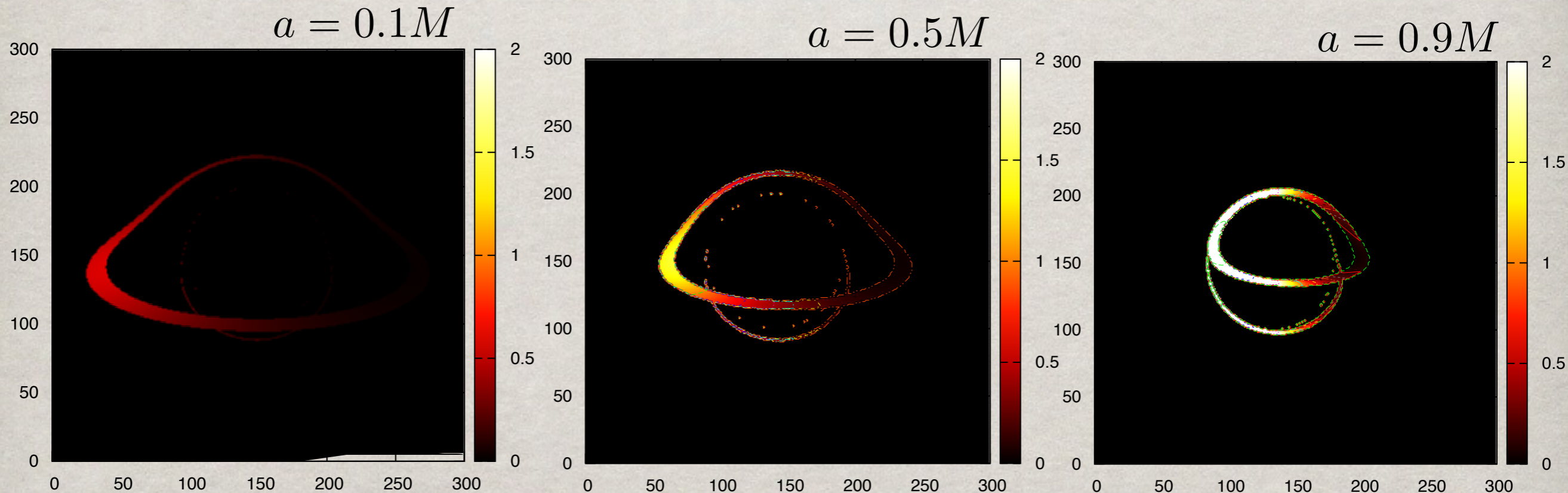
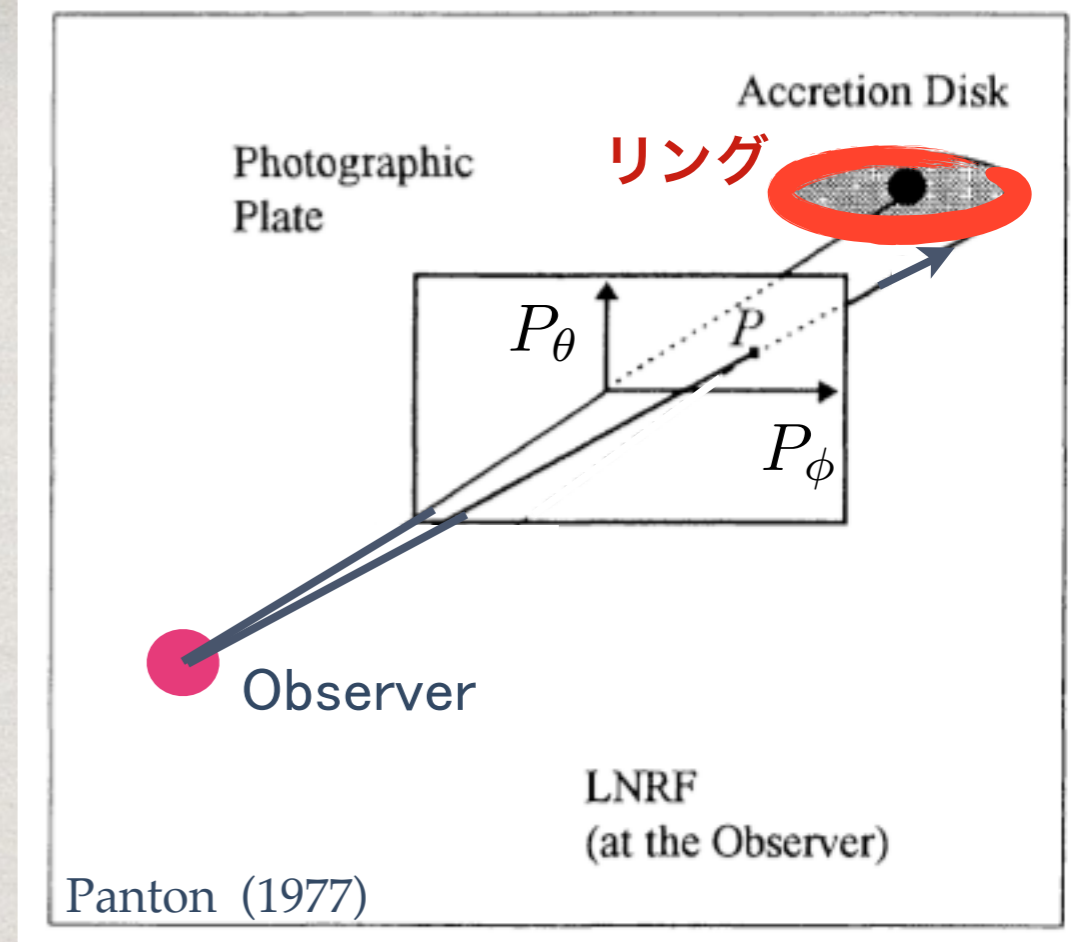
P_θ これらのパラメータ
 P_ϕ について走査する



リングに到達したら
位置と入射角を格納



重力赤方偏移、
ドップラー効果、
フラックスを計算



Equatorial ring around Kerr BH $\theta = 0.4\pi$

例) 降着円盤からのフラックス

The Observed Flux F_{obs} (for disk image of a thin disk ; Page & Thorne 1974)

The time-averaged flux of radiant energy, $F(r)$, (energy per unit proper time τ per unit proper area A) flowing out of upper face of disk, as measured by an observer on the upper face who orbits with the time-averaged motion of the disk's matter

$$F(r) = \frac{\dot{M}}{4\pi r} f, \quad (1.93)$$

where \dot{M} is the time-averaged rest-mass accretion rate. We define that $a_* \equiv a/M$, $x \equiv (r/M)^{1/2}$, $x_0 \equiv (r_{\text{ms}}/M)^{1/2}$. The function f is given by

$$f = \frac{3}{2M} \frac{1}{x^2(x^3 - 3x + 2a_*)} [x - x_0 - (3/2)a_* \ln(x/x_0) - K(x; x_1, x_2, x_3; a_*, x_0) - K(x; x_2, x_3, x_1; a_*, x_0) - K(x; x_3, x_2, x_1; a_*, x_0)] \quad (1.94)$$

where

$$K(x; x_1, x_2, x_3; a_*, x_0) \equiv \frac{3(x_1 - a_*)^2}{x_1(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} \ln \left(\frac{x - x_1}{x_0 - x_1} \right). \quad (1.95)$$

上記において $x_0 \equiv (r_{\text{ms}}/M)^{1/2}$ で marginally stable orbit に対応し、

$$x_0 = \left[3 + Z_2 - \text{sgn}(a_*) [(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)]^{1/2} \right]^{1/2}, \quad (1.96)$$

$$Z_1 \equiv 1 + (1 - a_*^2)^{1/3} \left[(1 + a_*)^{1/3} + (1 - a_*)^{1/3} \right]^{1/3}, \quad Z_2 \equiv (3a_*^2 + Z_1^2)^{1/2}. \quad (1.97)$$

また、 x_1, x_2, x_3 は、 $r^3 - 3Mr \pm 2a\sqrt{Mr} = 0$ の解で、

観測されるフラックス

$$F_{\text{obs}} = g^4 F_{\text{emi}}$$

The Observed Flux F_{obs} (for Line profiles)

From the relativistic invariance of I_ν/ν^3 ($= I_\mu/E^3$), i.e., $I_\nu^{\text{obs}}/\nu_{\text{obs}}^3 = I_\nu^{\text{em}}/\nu_{\text{em}}^3$, the observed flux distribution F_ν is given by ¹¹

$$dF_\nu^{\text{obs}}(E_{\text{obs}}) = I_\nu^{\text{obs}}(E_{\text{obs}}) d\Theta = (E_{\text{obs}}/E_{\text{em}})^3 I_\nu^{\text{em}}(E_{\text{em}}) d\Theta, \quad (1.87)$$

where $d\Theta$ is the solid angle subtended by the disk in the observer's sky. Here, we define the redshift factor (GR version of Doppler factor) as

$$g \equiv \frac{\nu_{\text{obs}}}{\nu_{\text{em}}} = \frac{E_{\text{obs}}}{E_{\text{em}}} = \frac{(p_\alpha u^\alpha)_{\text{obs}}}{(p_\alpha u^\alpha)_{\text{em}}} = \frac{(p_t u^t)_{\text{obs}}}{[p_t u^t (1 + \Omega p_\phi/p_t)]_{\text{em}}} = \tilde{\alpha}_Z^{-1/2} [1 + \Omega (p_\phi/p_t)]_{\text{em}}^{-1}, \quad (1.88)$$

where $\Omega \equiv u^\phi/u^t$ is the angular velocity of the emitting particle and

$$u_{\text{em}}^t = (g_{tt} + 2g_{t\phi}\Omega + g_{\phi\phi}\Omega^2)^{-1/2} \equiv \tilde{\alpha}_Z^{-1/2} \quad (1.89)$$

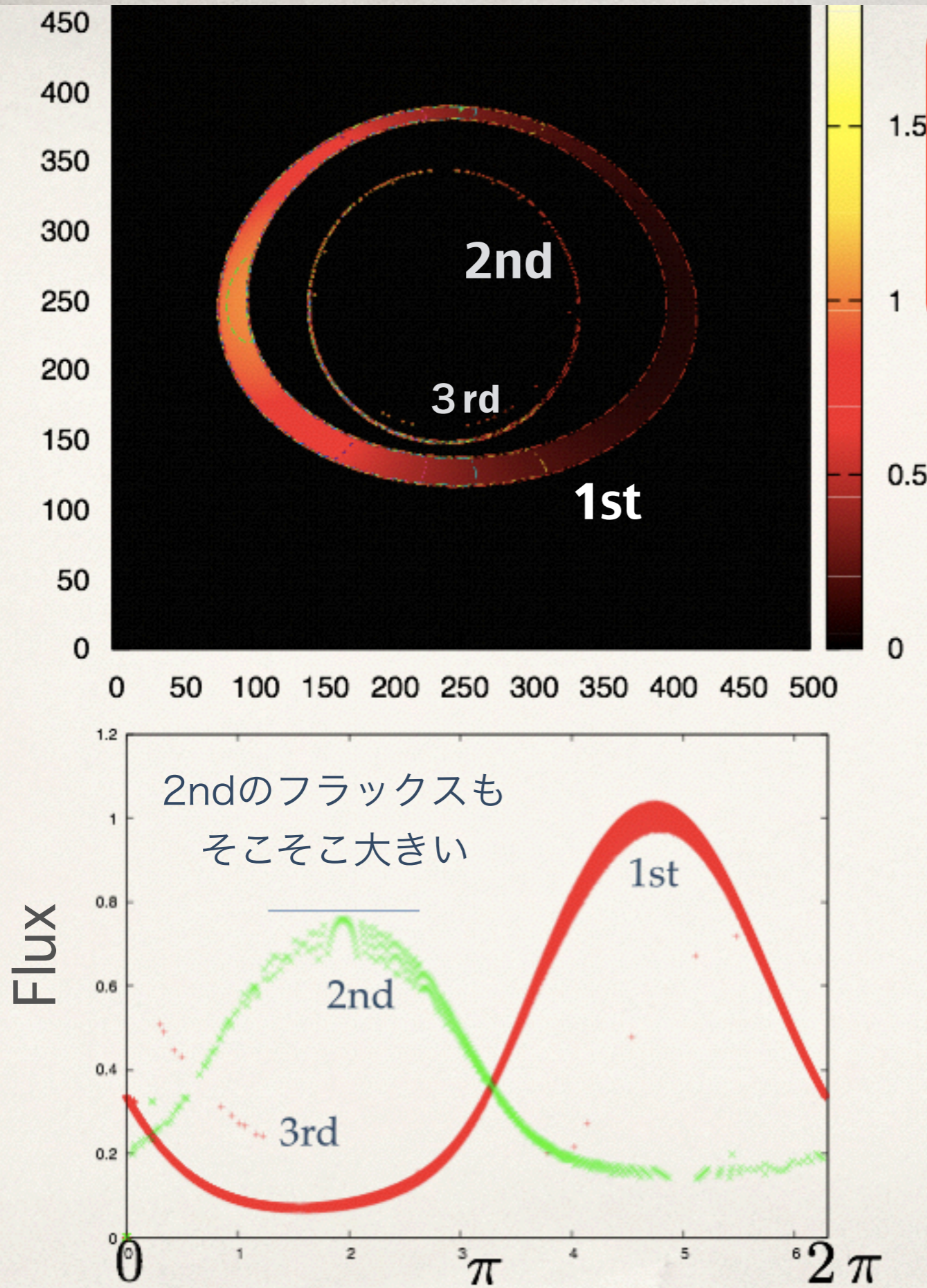
is the gravitational redshift factor for the rotating emitting matter. Note that $u_{\text{obs}}^t = 1$ and $p_t^{\text{em}} = p_t^{\text{obs}}$. The value of constant p_ϕ/p_t ($\equiv -\lambda$) is determined by the angle between the rotational direction of the emitter and the direction of the photon trajectory at the disk surface (Luminet 1979) ¹².

Page-Thorne thin Disk model (1974)

F_{emi} のピーク域
で輝くリングを設定

$$\theta = 0.25 \pi$$
$$a = 0.5 m$$

- * 1次光と2次光のフラックスは、同程度になりうる
- * 2次光のイメージは小さいので、光度は小さくなる
- * 光度/光度比の時間変化から、BH & Disk の情報を！



Toy model :

降着円盤内端近傍での多発 **ホットスポット**
フレアー

時間平均すると「リング状」に分布



1st **2nd**
ダイレクト光と周回光は**“干渉”**すると仮定する

<一人時間差干渉観測 (齊田)>

(行路の時間差 & 強度比を考慮)



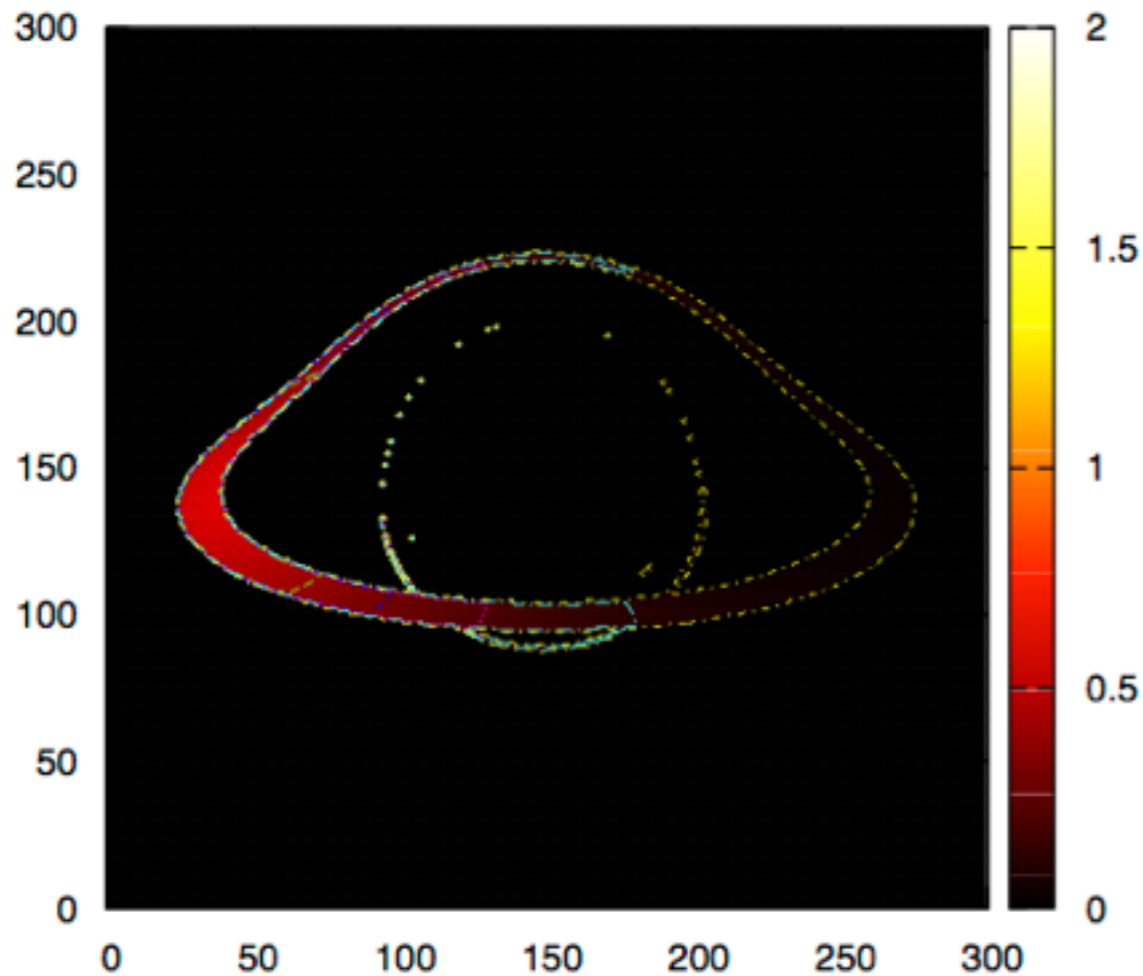
BH時空の情報が得られる

質量、スピン、回転軸方向

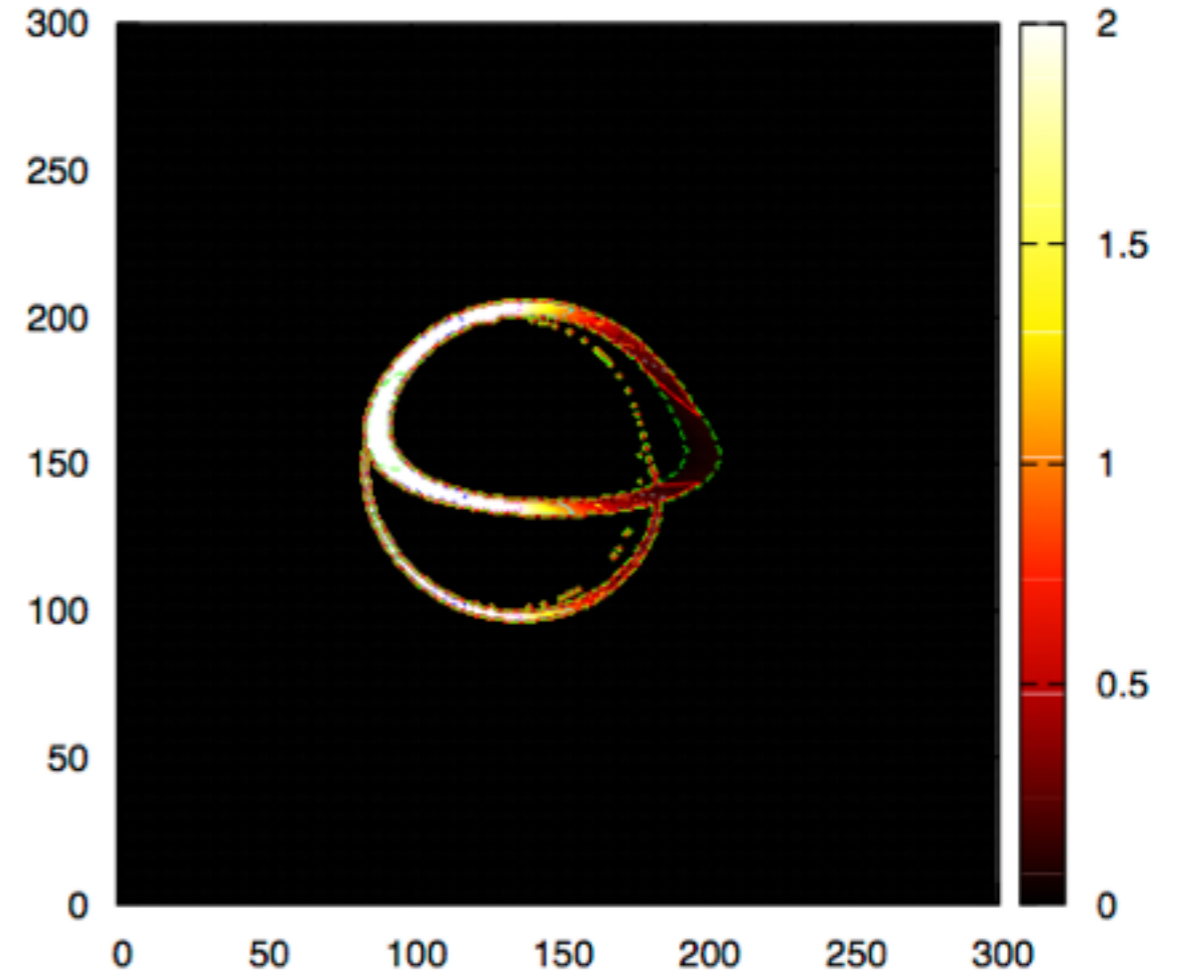
フラックス分布：

$$\theta = 0.4\pi$$

スピン小 $a = 0.1 m$



スピン大 $a = 0.9 m$



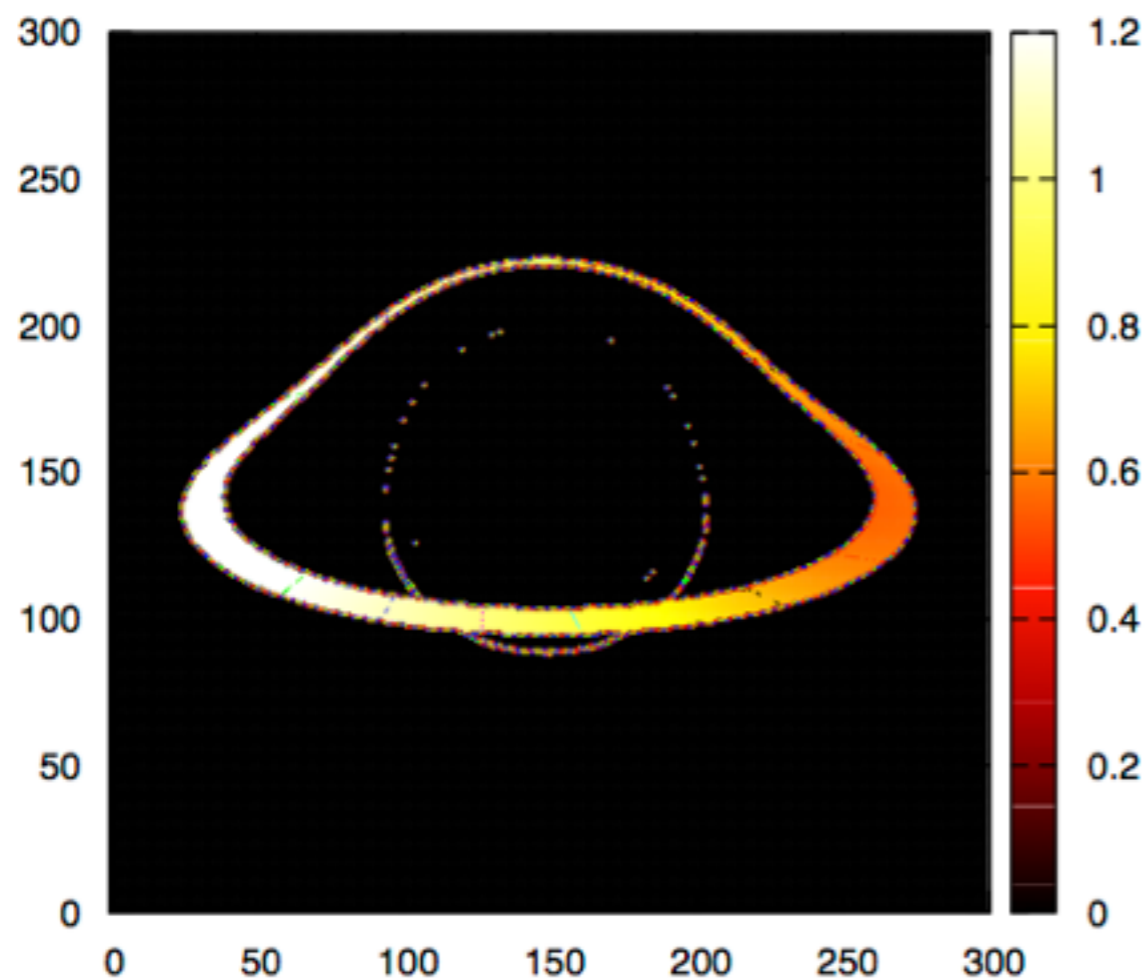
より内側を周回できる
高速回転になる

リングの高速回転による強いビーミング効果（立体角の変化）
+ 強重力場による**重力レンズ効果**（一般相対論効果）

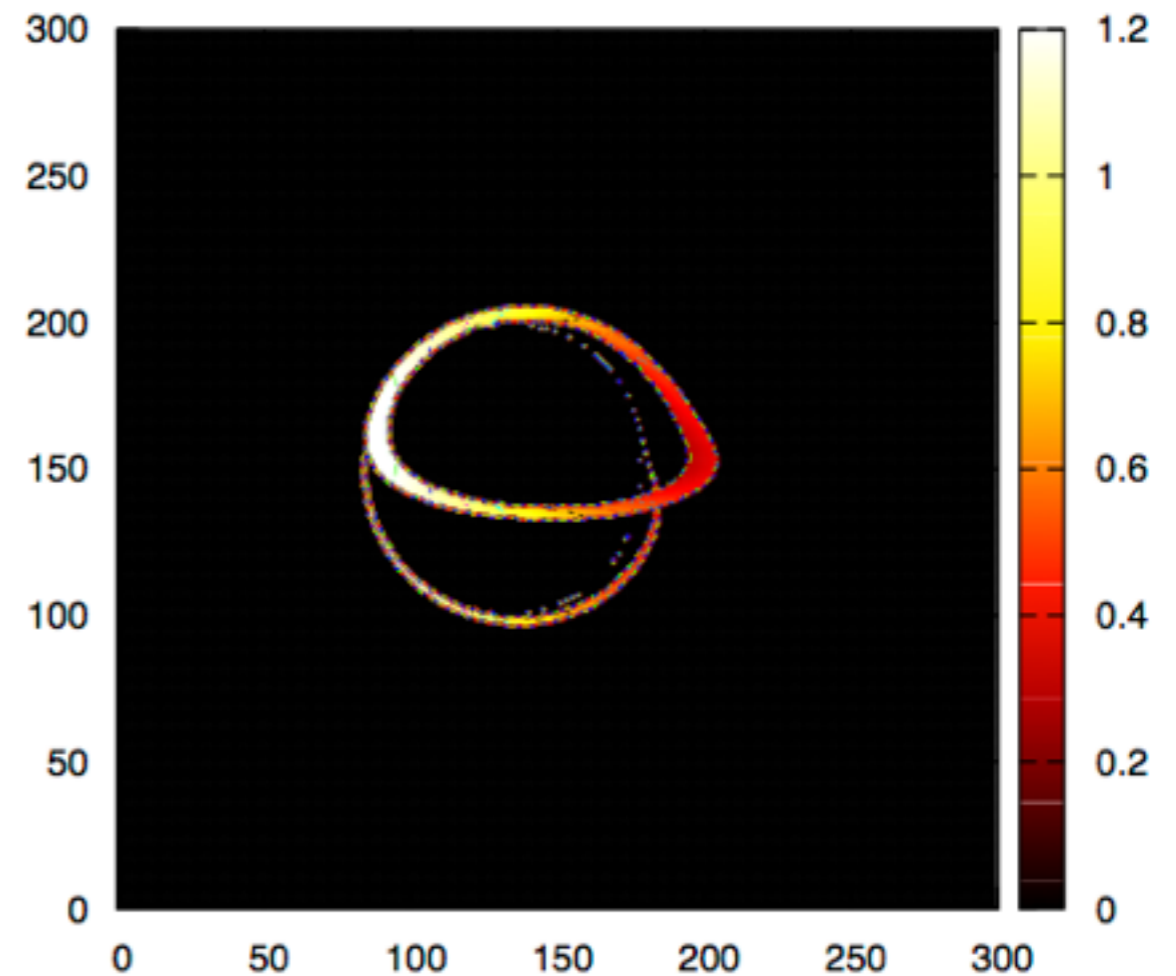
振動数の変化：

$$\theta = 0.4\pi$$

スピン小 $a = 0.1m$



スピン大 $a = 0.9m$



リングの回転によるドップラー効果

+ 横ドップラー効果 (特殊相対論効果)

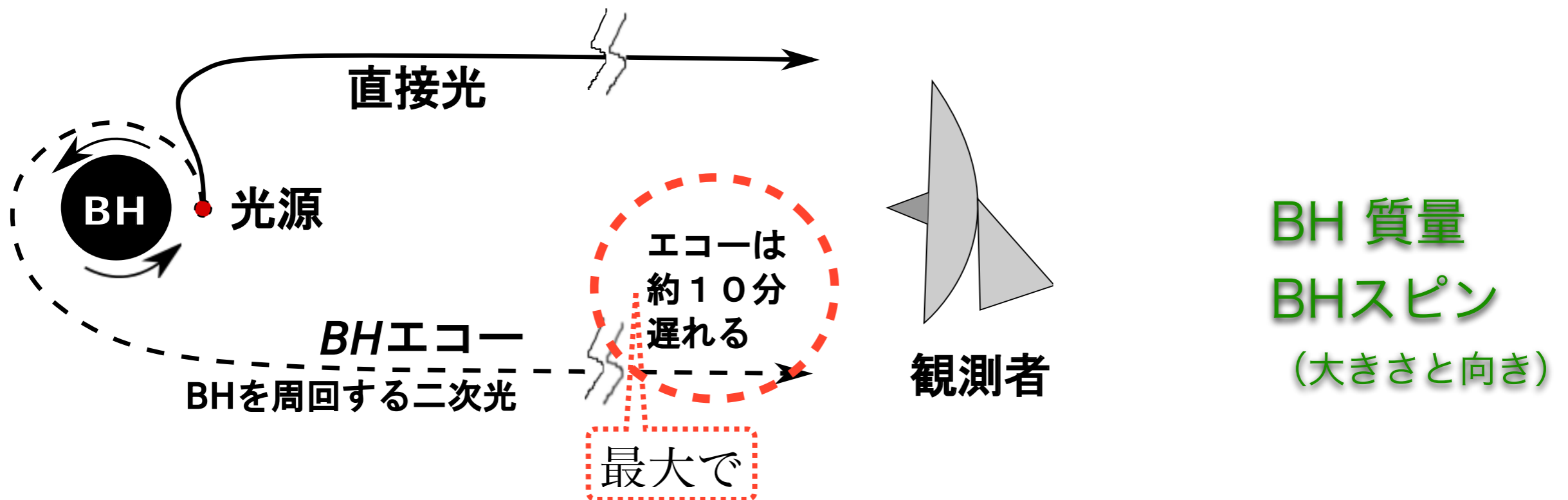
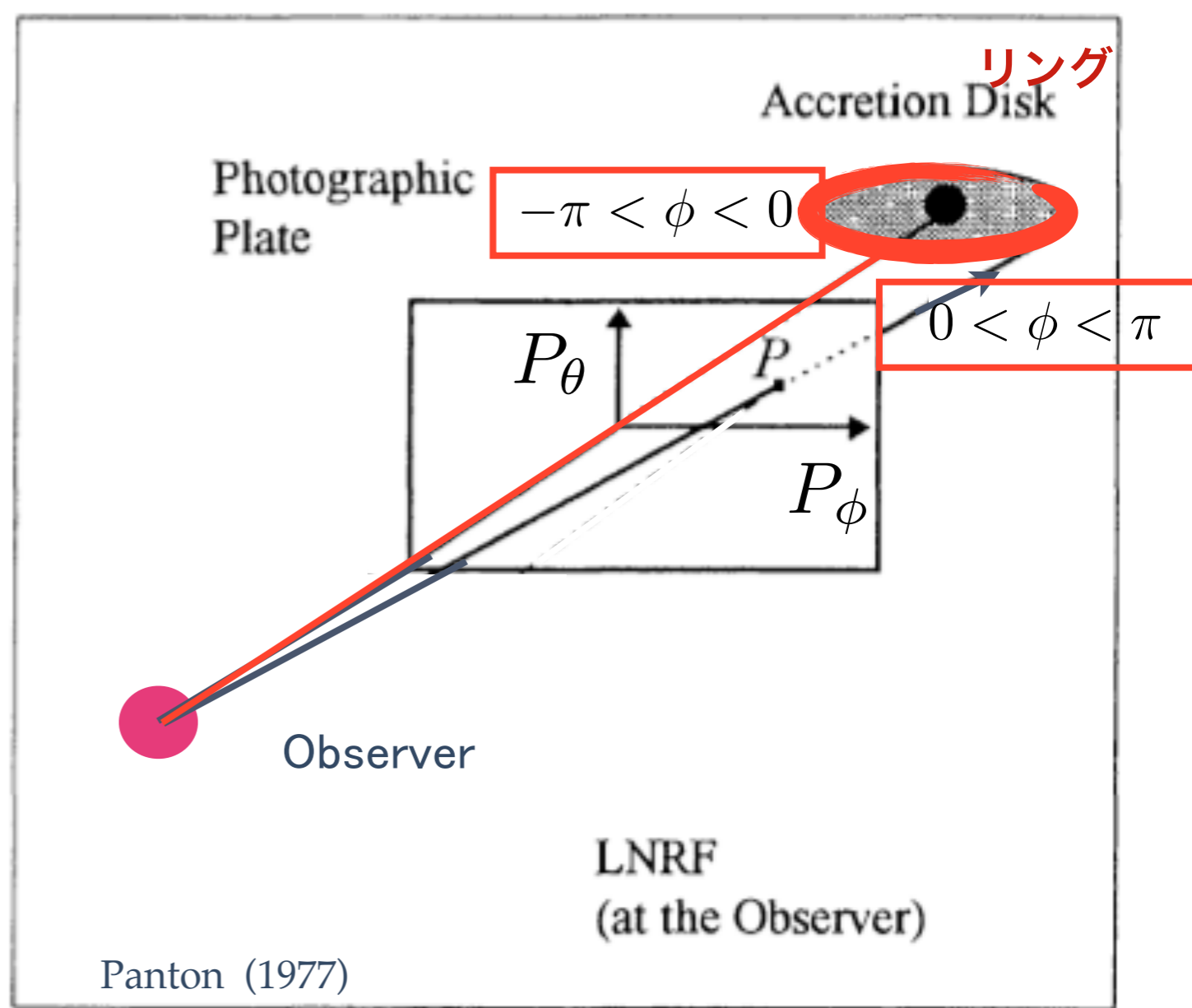
+ 強重力場による重力赤方偏移 (一般相対論効果)

ダブルピーク & 広がった
鉄輝線など

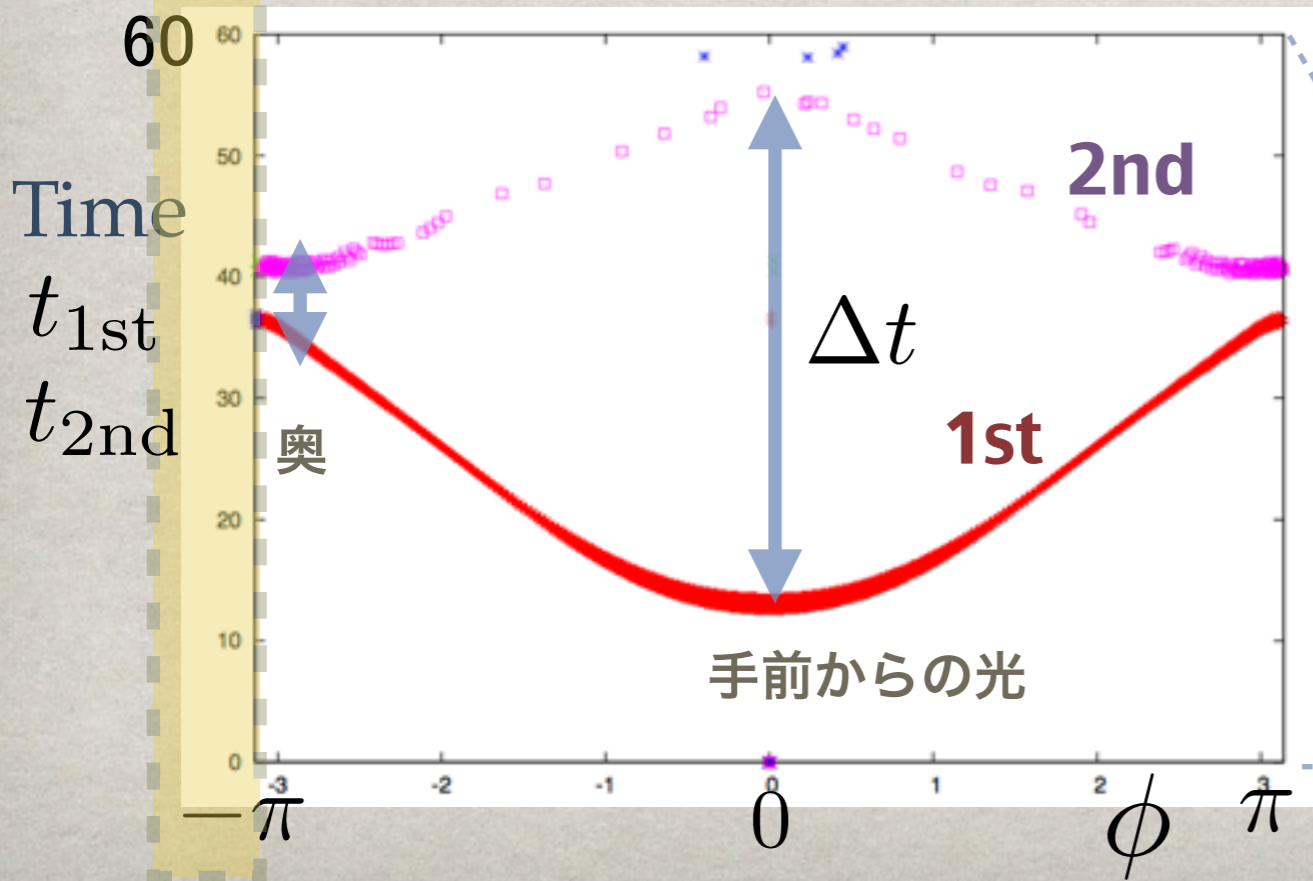
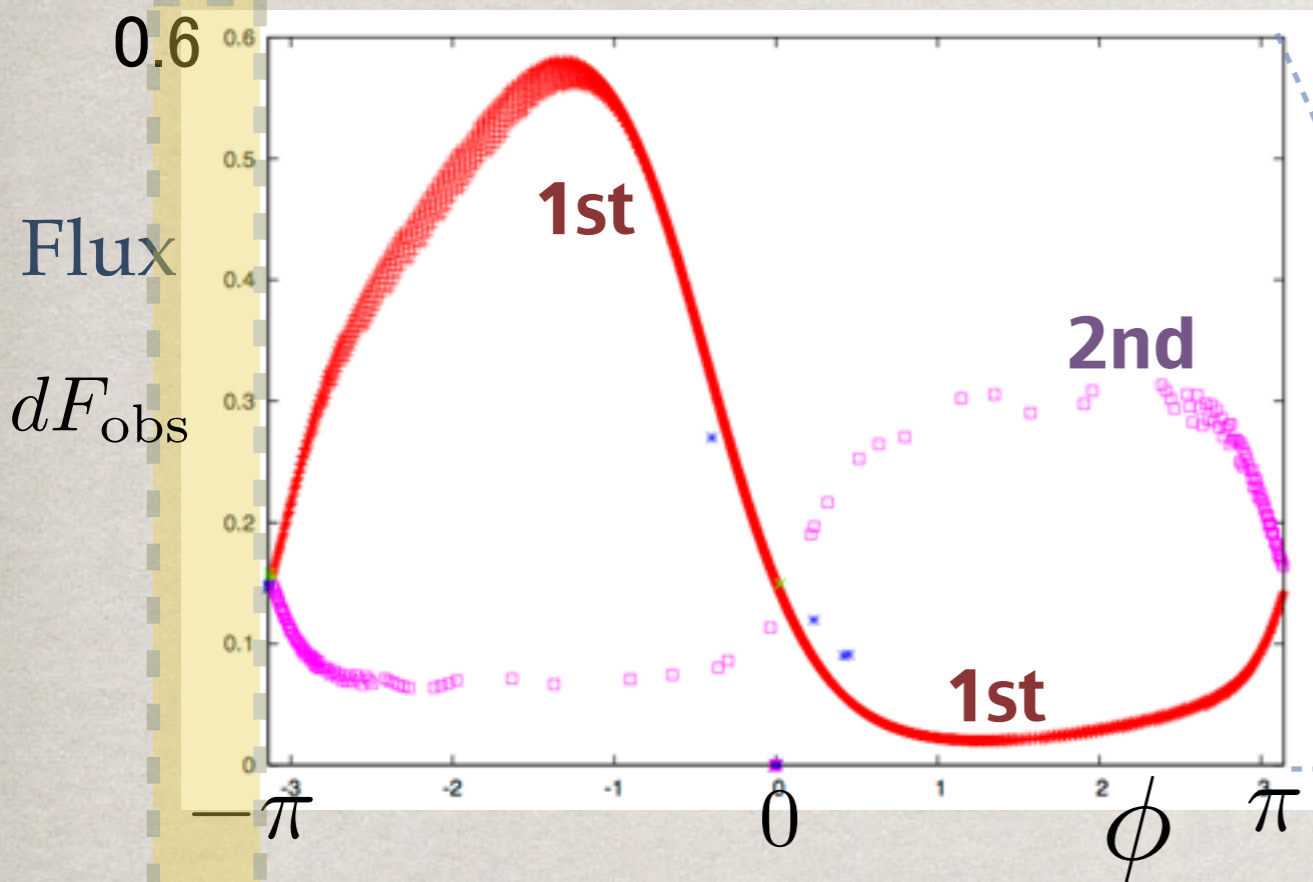
1st 2nd 直接光とエコーの比較

BH - ring なら
BHエコーも観測される！
(Fukumura+2008)

一人時間差**干渉**観測で
判別可能 (齊田2014)

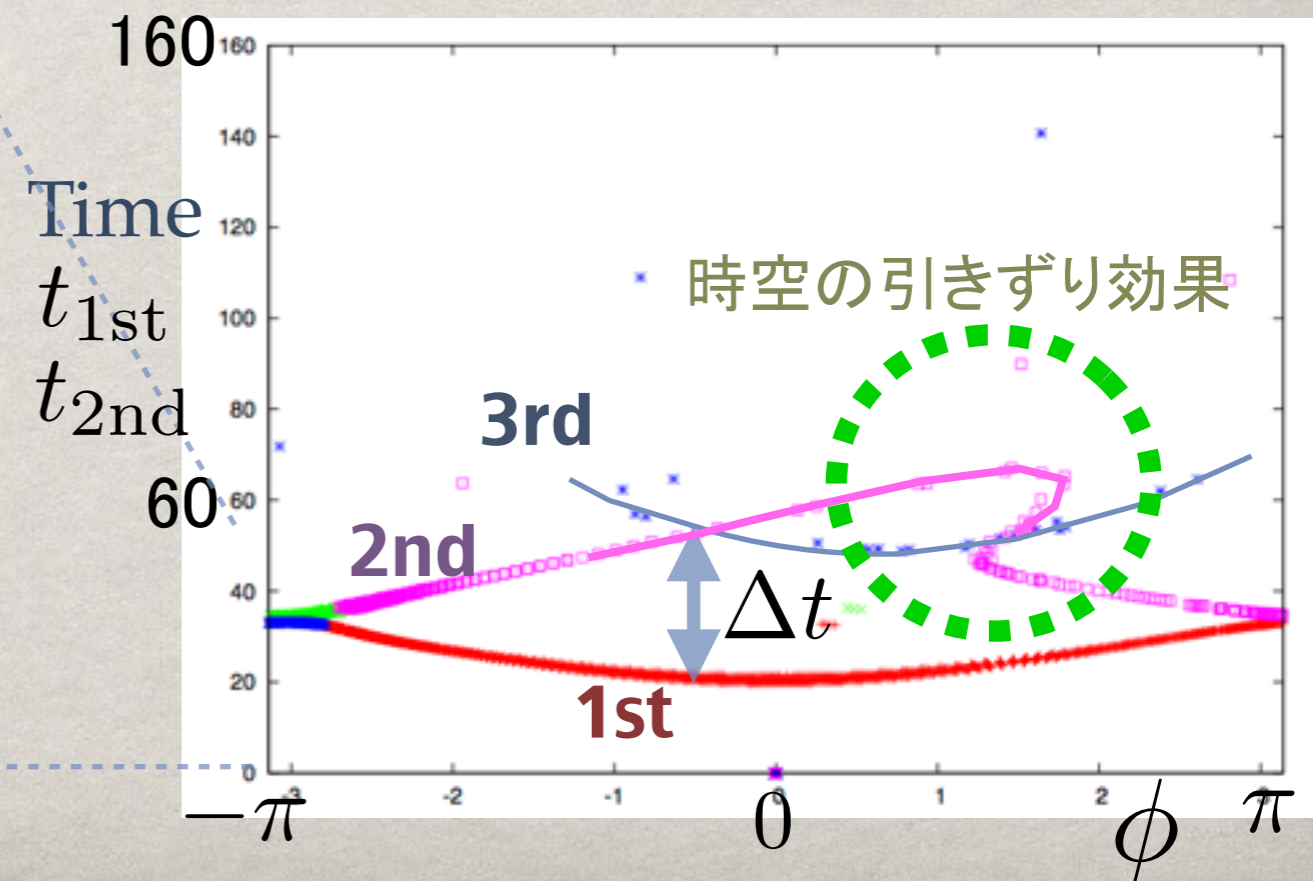
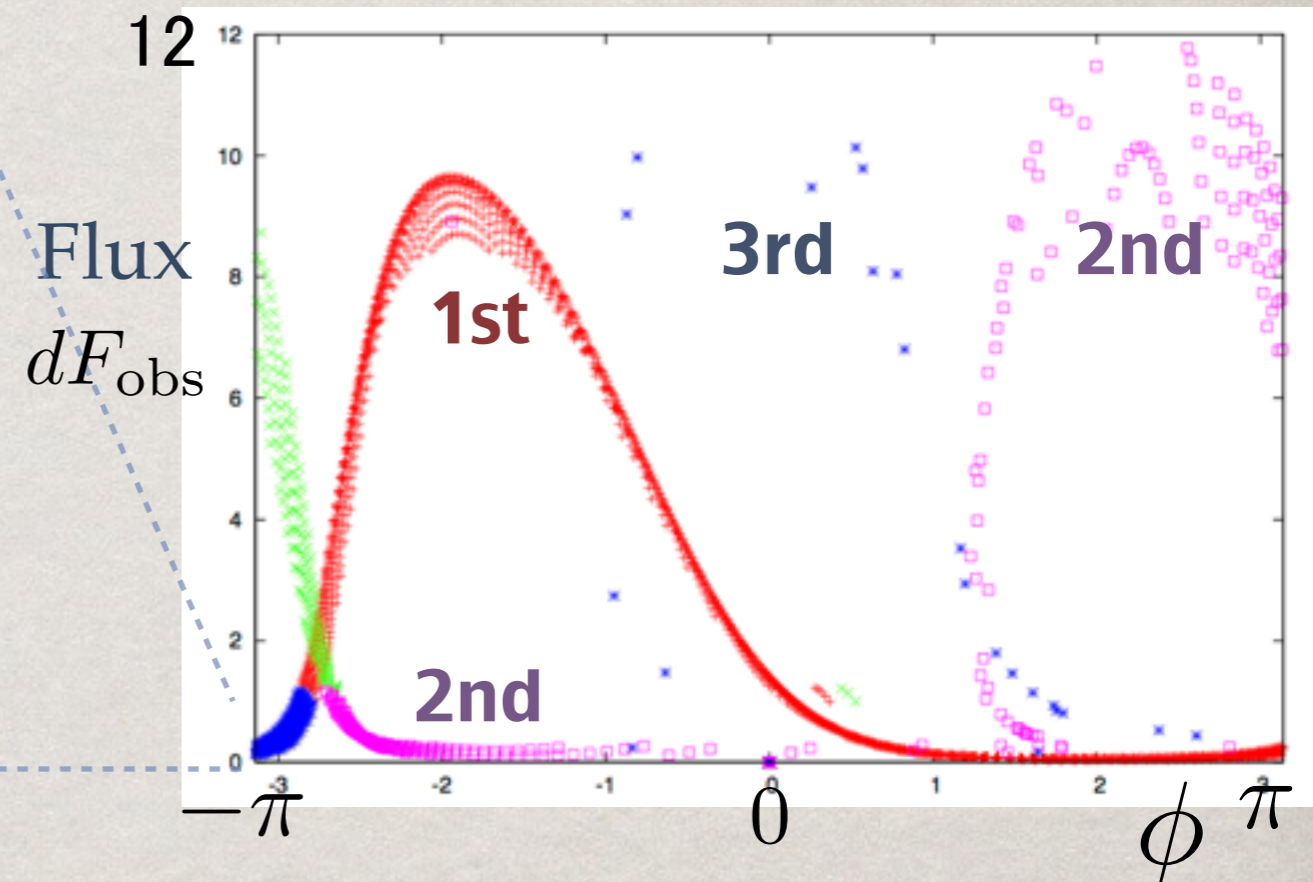


BHスピン小
 $a = 0.1 m$



BHスピン大
 $a = 0.9 m$

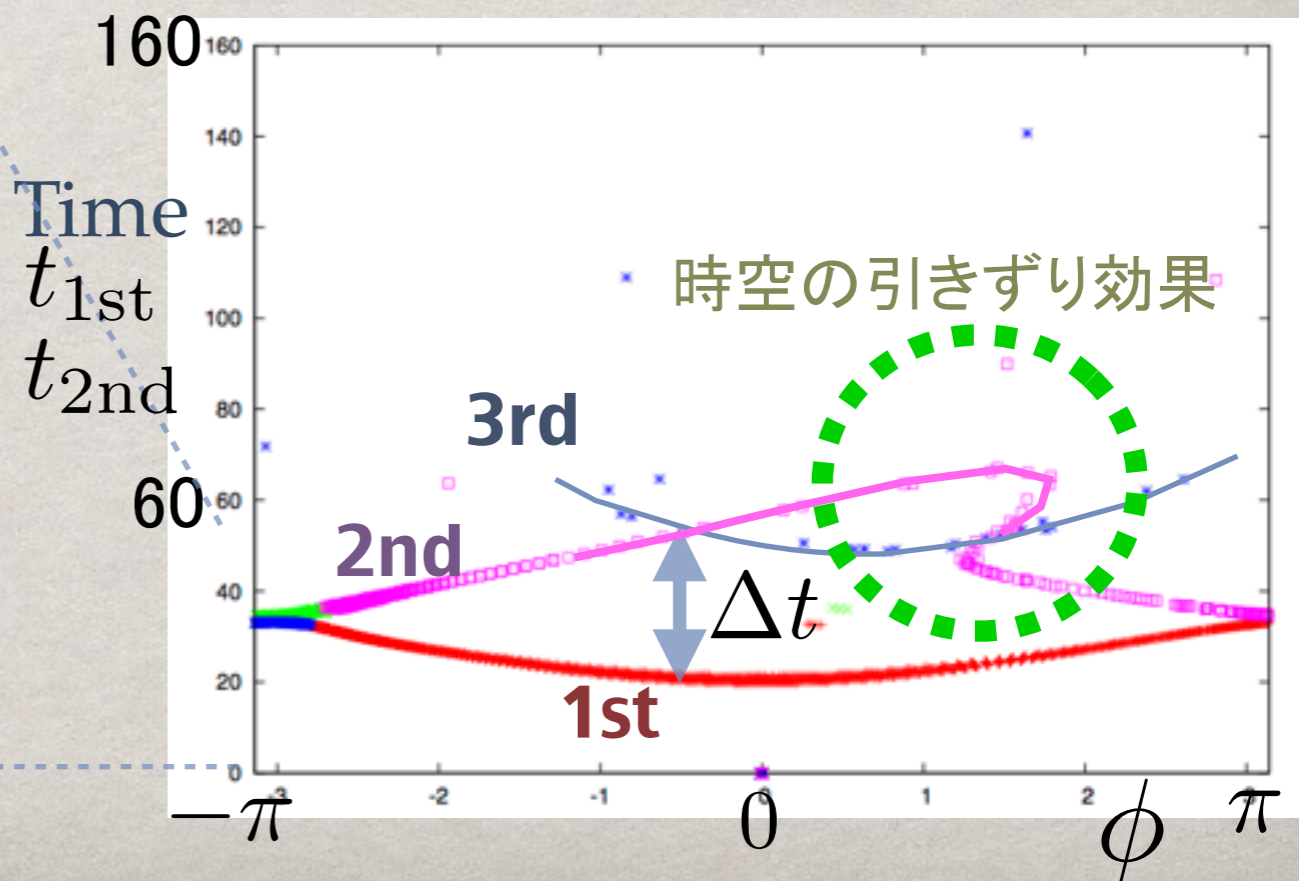
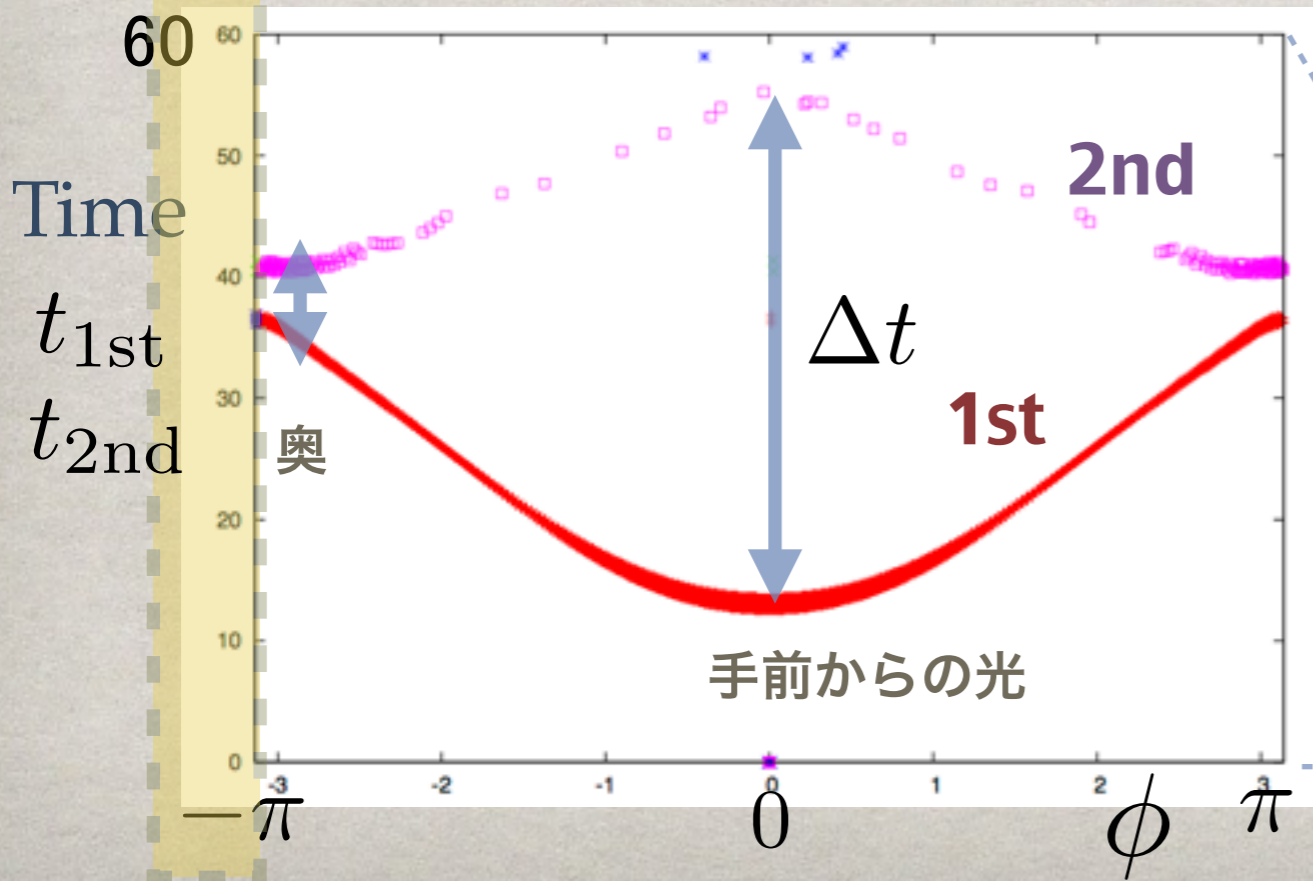
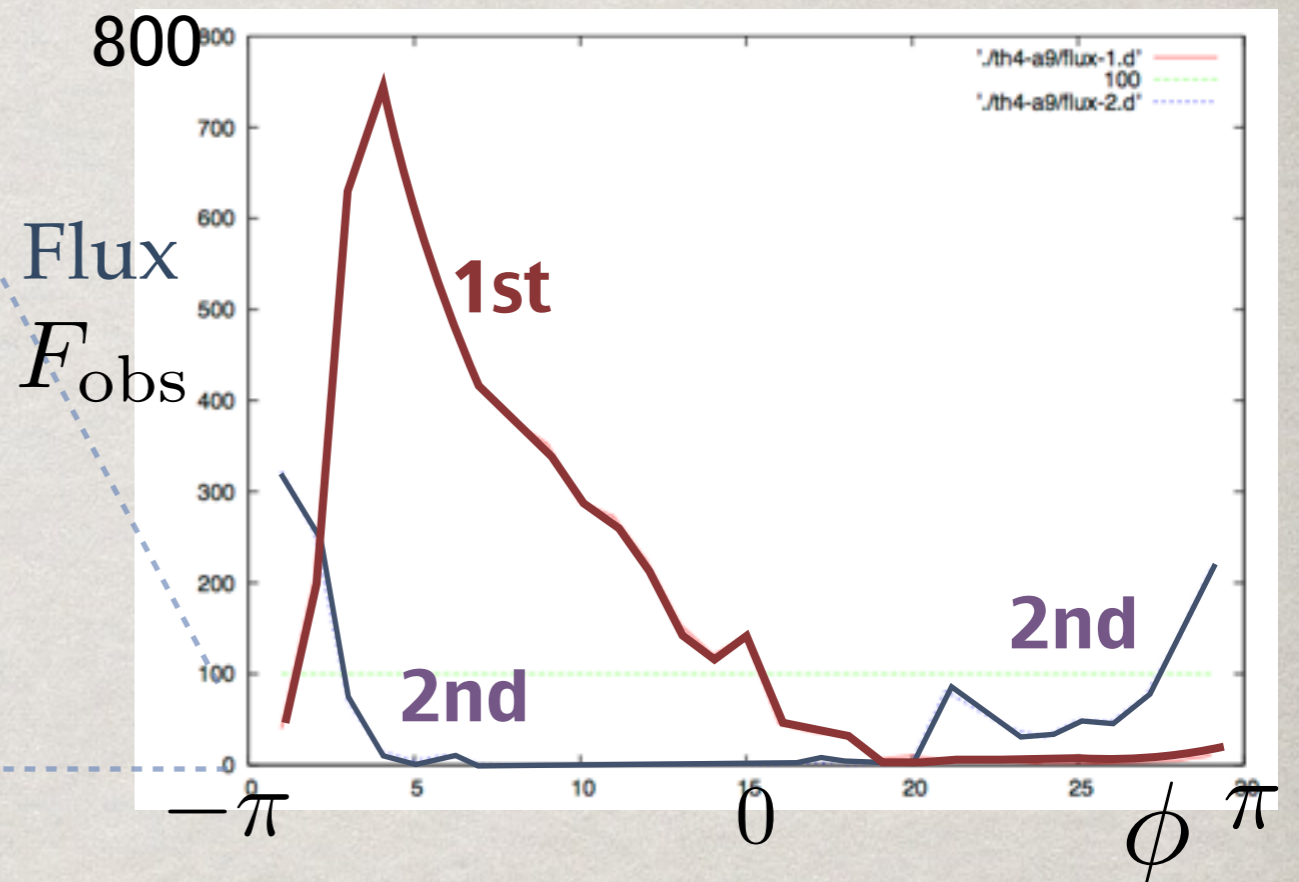
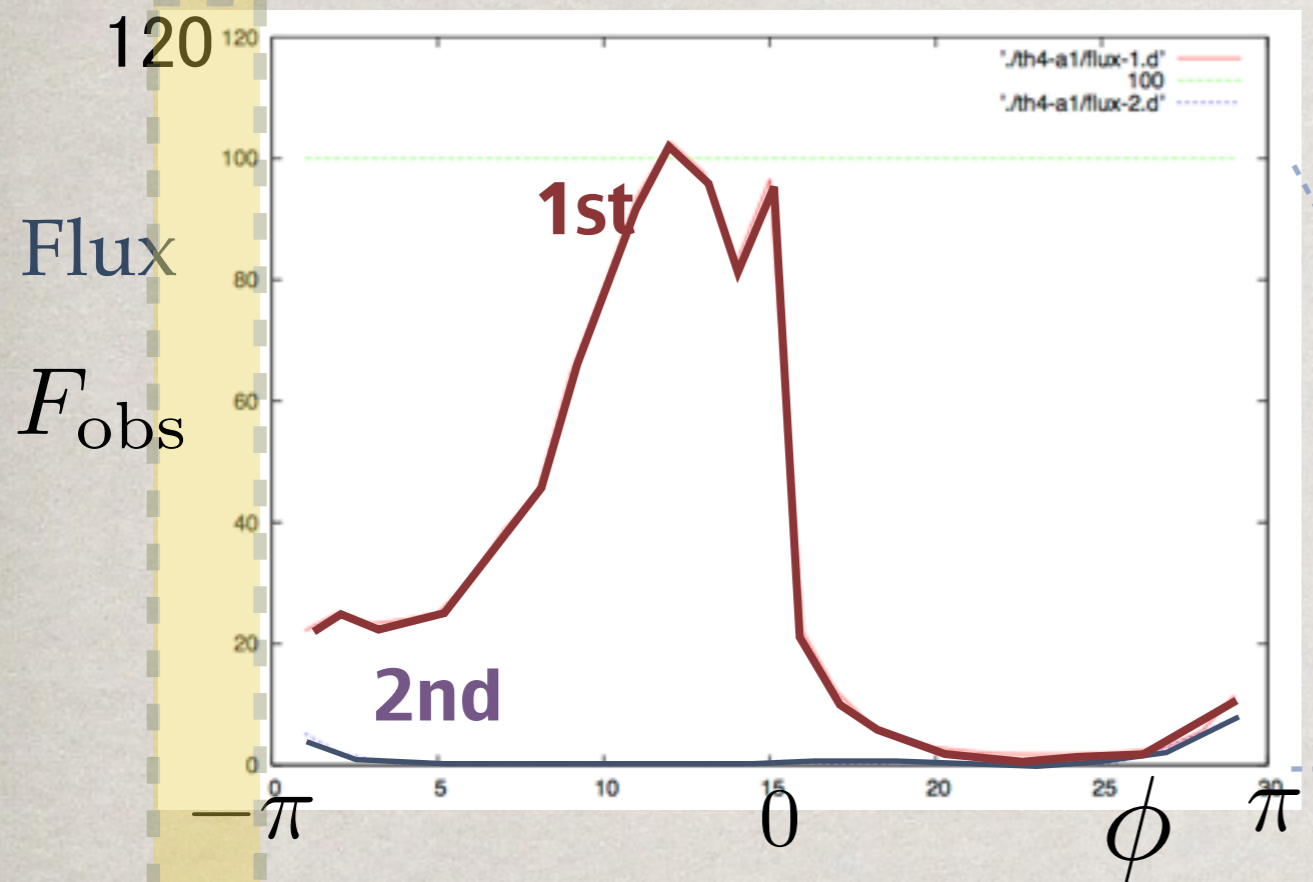
$\theta = 0.4 \pi$



BHスピン小
 $a = 0.1 m$

BHスピン大
 $a = 0.9 m$

$\theta = 0.4 \pi$



観測実施の前に理論研究で押さえておくべき効果

手っ取り早くできる試みとして・・・

Toy models

- ❖ 振動数毎にフラックス計算 → **輝線スペクトル**計算 (鉄輝線)
- ❖ 回転円盤上にホットスポットがある場合 → **時間変動**
- ❖ 異なるガス円盤モデル → 輝度分布のテンプレート ⇔ **観測像**
- ❖ **吸収散乱**：光学的厚み考慮の計算 → 曇って見えない可能性も？
- ❖ **偏光・偏波**のモデルは準備中 (偏光ベクトルに関する保存量を適用)
- ❖ **磁気圏モデル**も重ねてみる → 磁場を介した相対論効果の検出

END

次回のBH地平面勉強会：

12月頃？ 早稲田大学（青木さん）？

関連研究会

11月15日－16日：

銀河系中心と天文教育@戸隠

3月2日～5日：

BH磁気圏研究会@広島大学

山口大学の皆様

ありがとうございました