

Sgr A* モデルの現状 + α

高橋 労太 @ 理化学研究所

BH天文学：Key Questions

1. 一般相対論は強重力場でどこまで正しいか？

強重力場での重力理論はGRなのか？どこでGRは破綻するのか？/ BH候補天体は本当にBHか？証拠は？/

BH時空はいわゆるKerr計量なのか？ No hair定理は正しいか？ BH bumpinessあるか？高次元の効果？etc.

2. BH形成・進化過程は如何様か？

微視的物理、磁場、輻射などの効果 / BH 形成 (SMBH, IMBH, SN, GRB, etc) / binary BH形成&進化 /

BH成長過程 (merger & accretion) / GW recoilの効果 / EMRI形成 / 理論検証につながる観測的特質は？

3. BH時空中の降着流・噴出流の物理

BH-disk-jetシステムでのエネルギー・運動量の流れの解明 (強重力場での輻射磁気プラズマの物理)

e.g. BH質量・スピン, 質量降着率&磁場の関数としての輻射場はどのようになっているか？

噴出流へのBH時空の影響は？噴出流の正体は？噴出流の有無とBH質量の関係？(Sgr A*とM87の違い)

4. BH宇宙論的分布とホスト銀河への影響

BH質量-バルジ関係の起源 / 質量・スピン分布の宇宙論的進化 / 銀河BHの最大質量は？/ コペルニクス原理 /

GRの効果はどう効くのか？効かないのか？ / etc.

BH時空情報を含む観測データ

*現在までに得られている観測量 (ブラックホール候補天体で)

1. スペクトル
2. 電波偏光 (LP, CP)
3. 時間変動 (スペクトル&偏光)
4. 電波ビジビリティ (Doleman+08, Nature)

→ ほぼ全てが “BH+降着流・降着円盤” というシステム

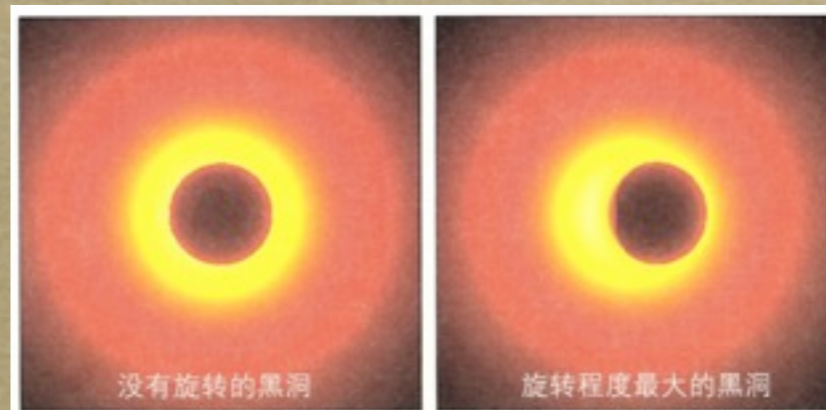
→ 降着円盤モデルの不定性の為、BHスピンなどの値のコンセンサスが得られていない。

(例) 連続スペクトル : viewing angleとBH spinの縮退 (偏光で解ける)

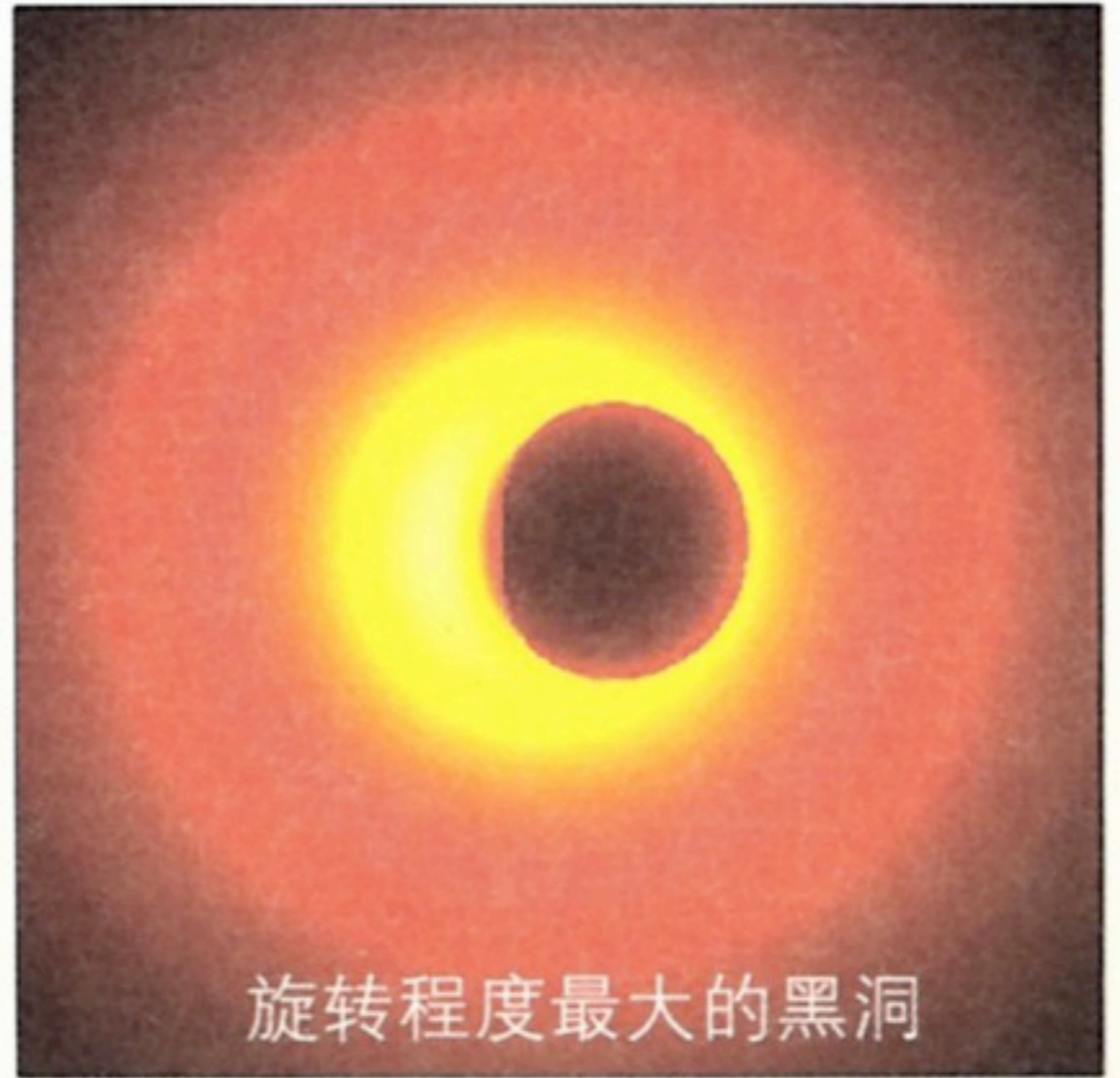
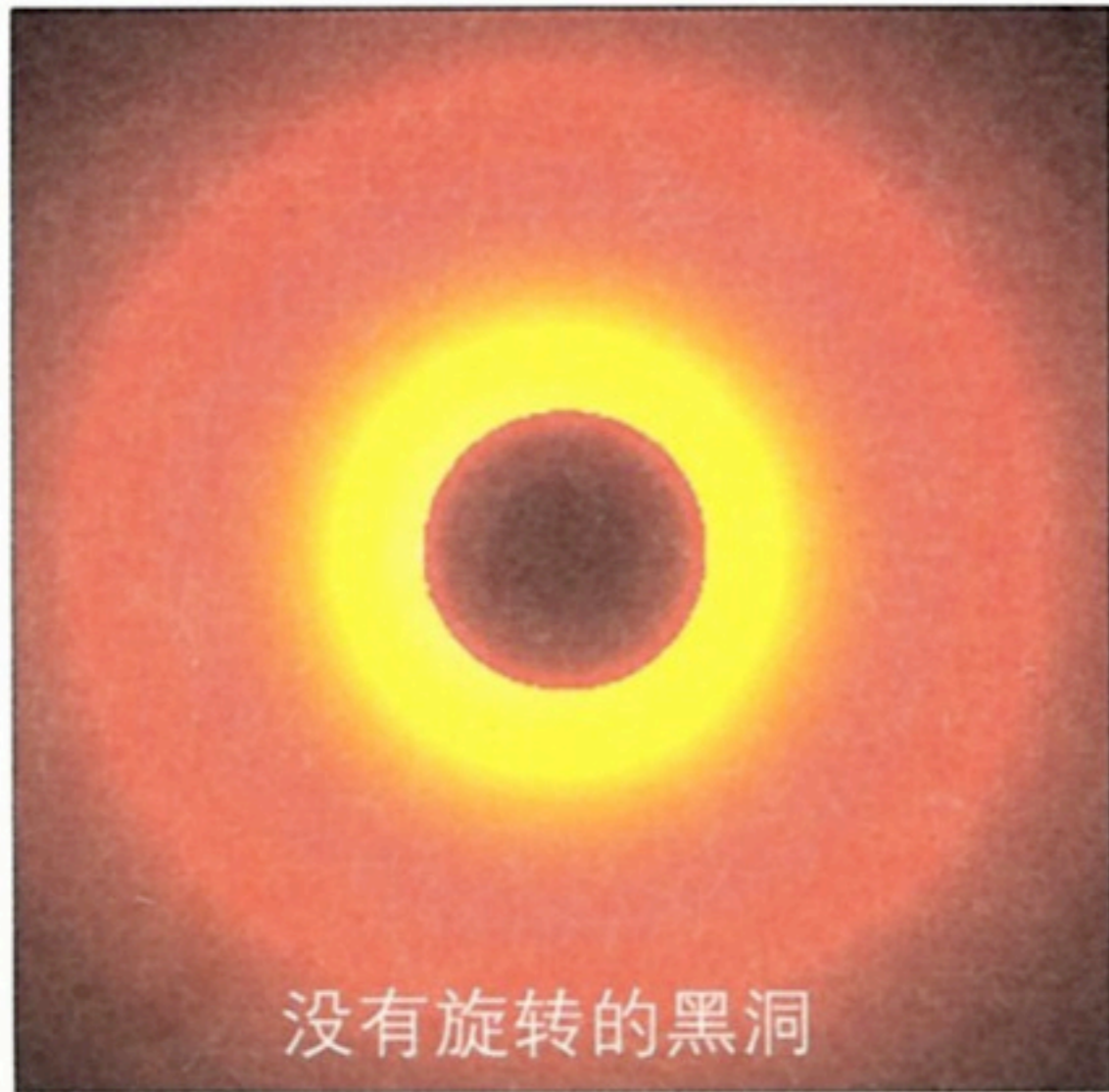
輝線スペクトル : 連続成分の引き方の不定性、鉄輝線源・光源の場所

*まだ、得られていない観測量 (ブラックホール候補天体で)

5. イメージ (電波・X線)
6. 重力波
7. ニュートリノ

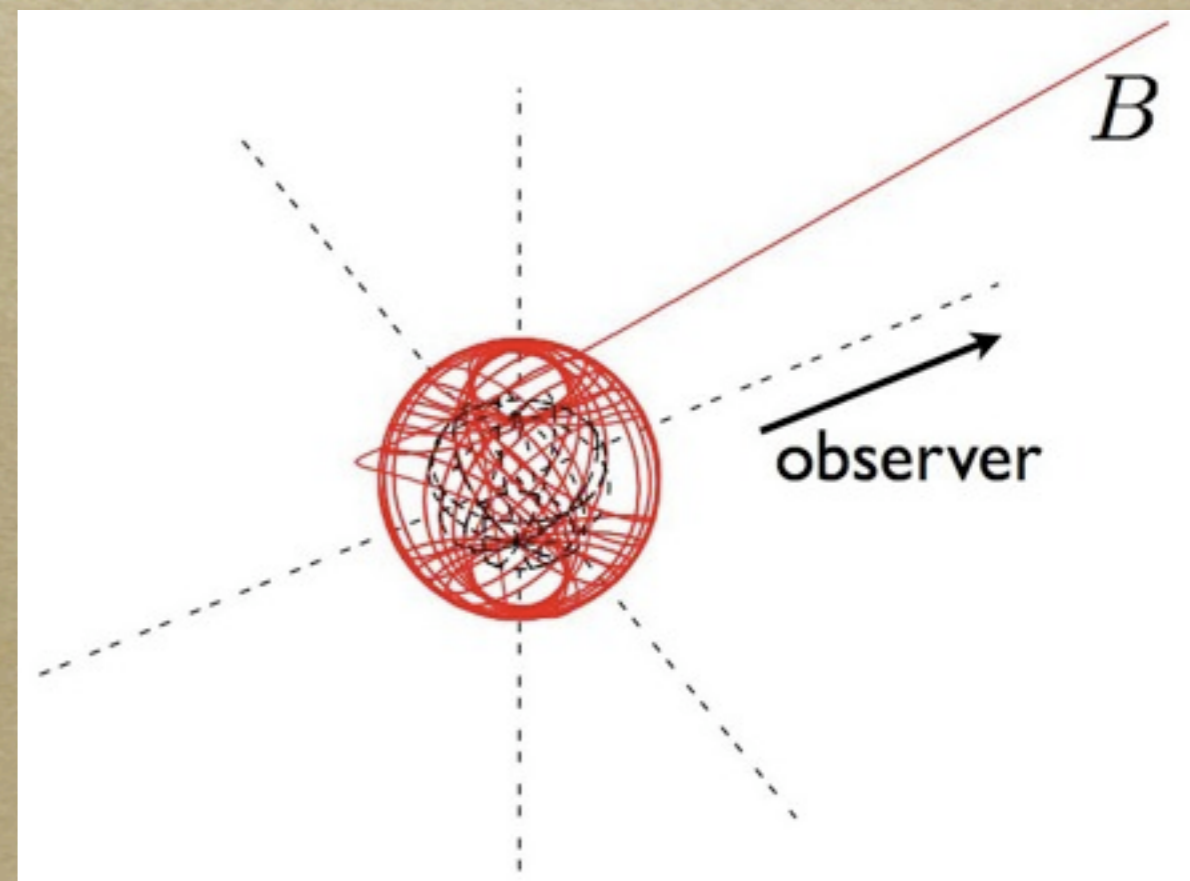
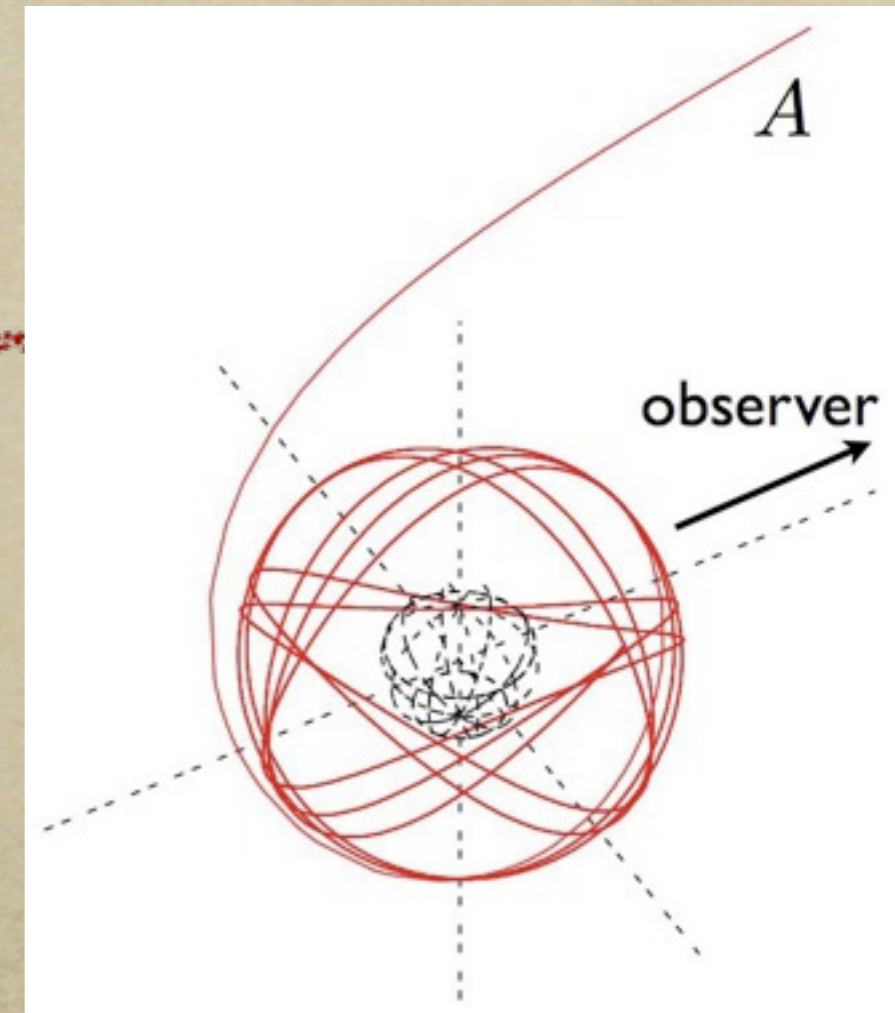
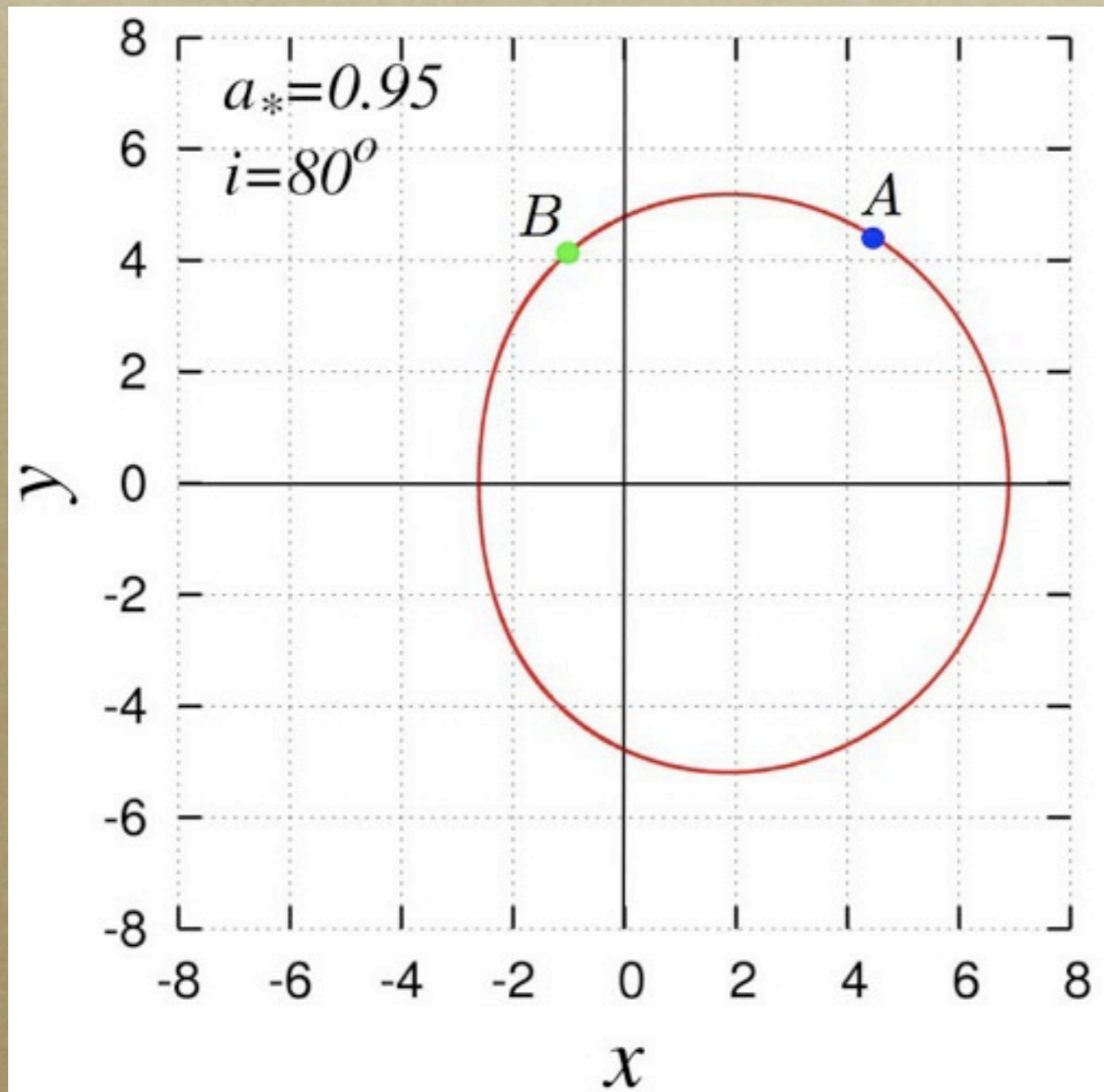


ブラックホールの影

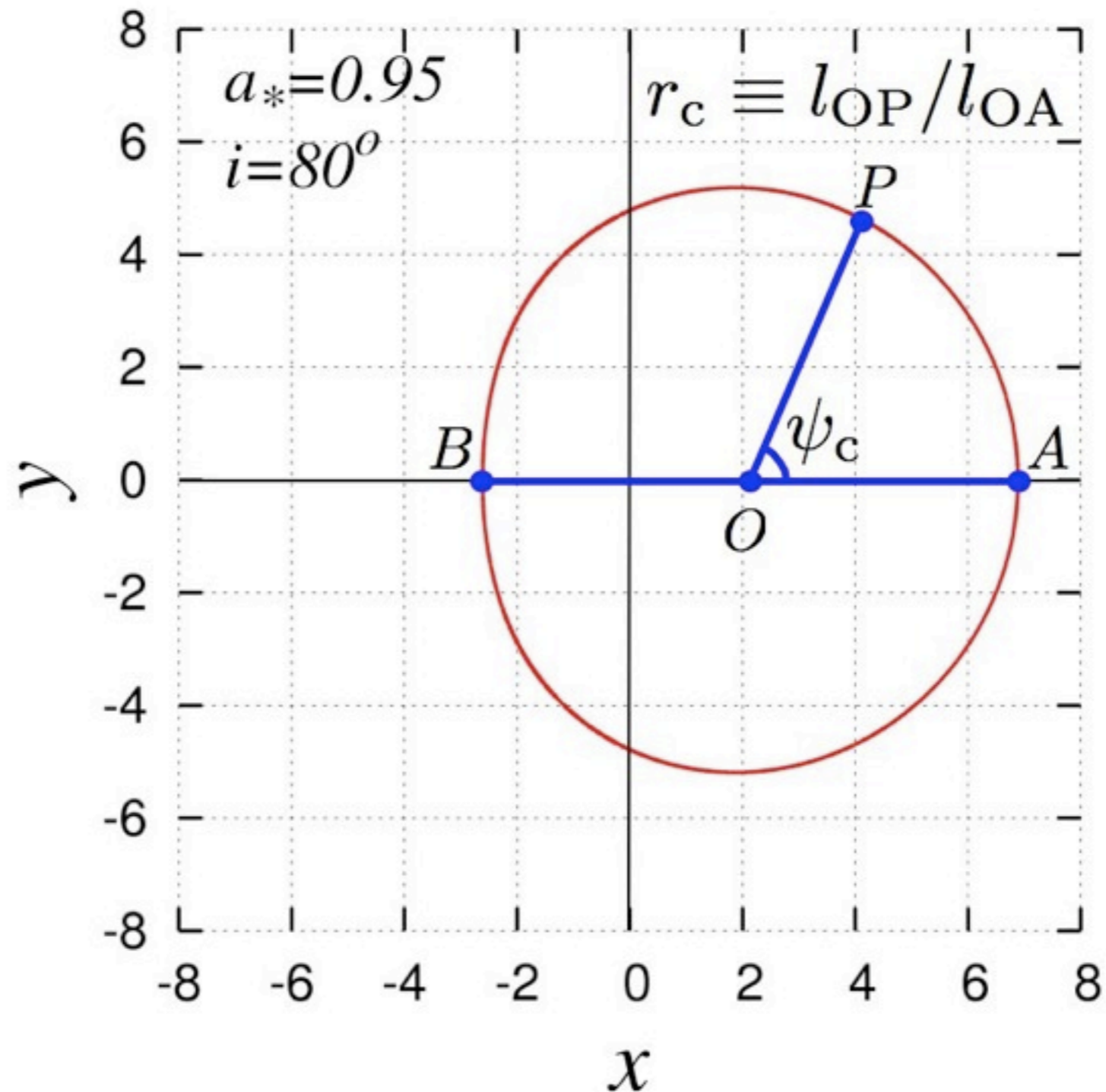


BHの影と最内不安定光子軌道

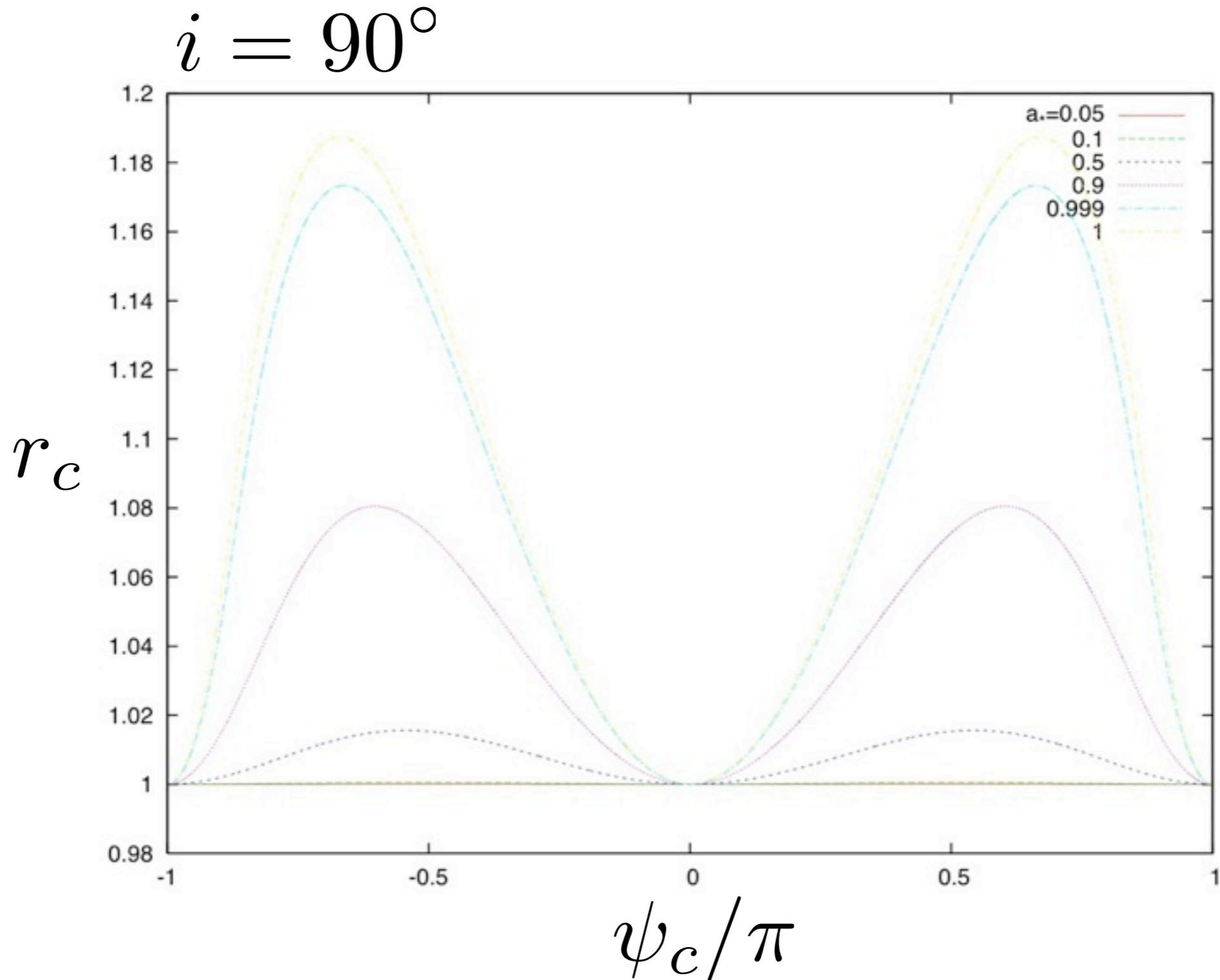
(Innermost Unstable Photon Circular Orbit : IUPCO)



BHスピンの viewing angle

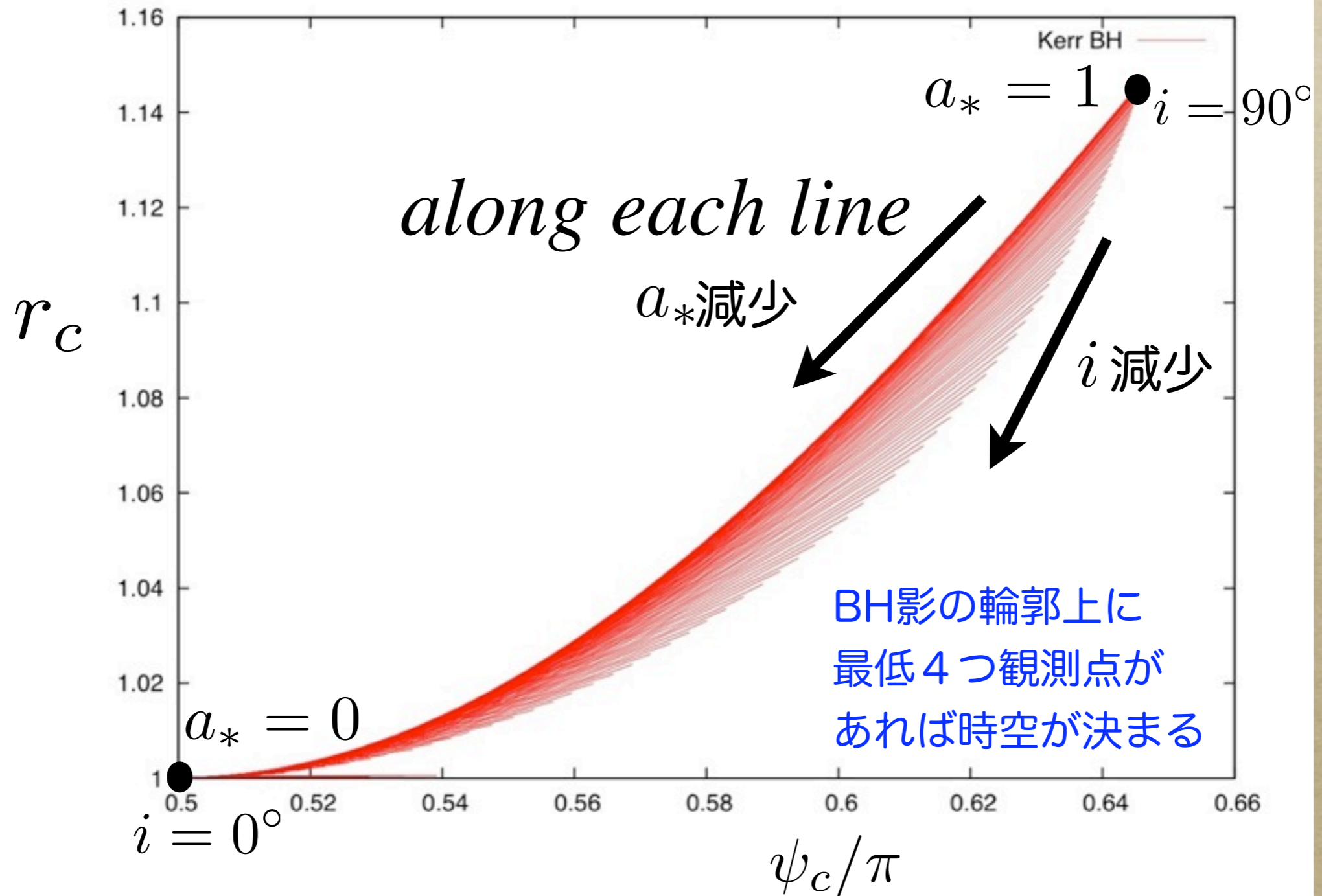


BH影の形状の詳細 (1)



BH影の形状の詳細 (2)

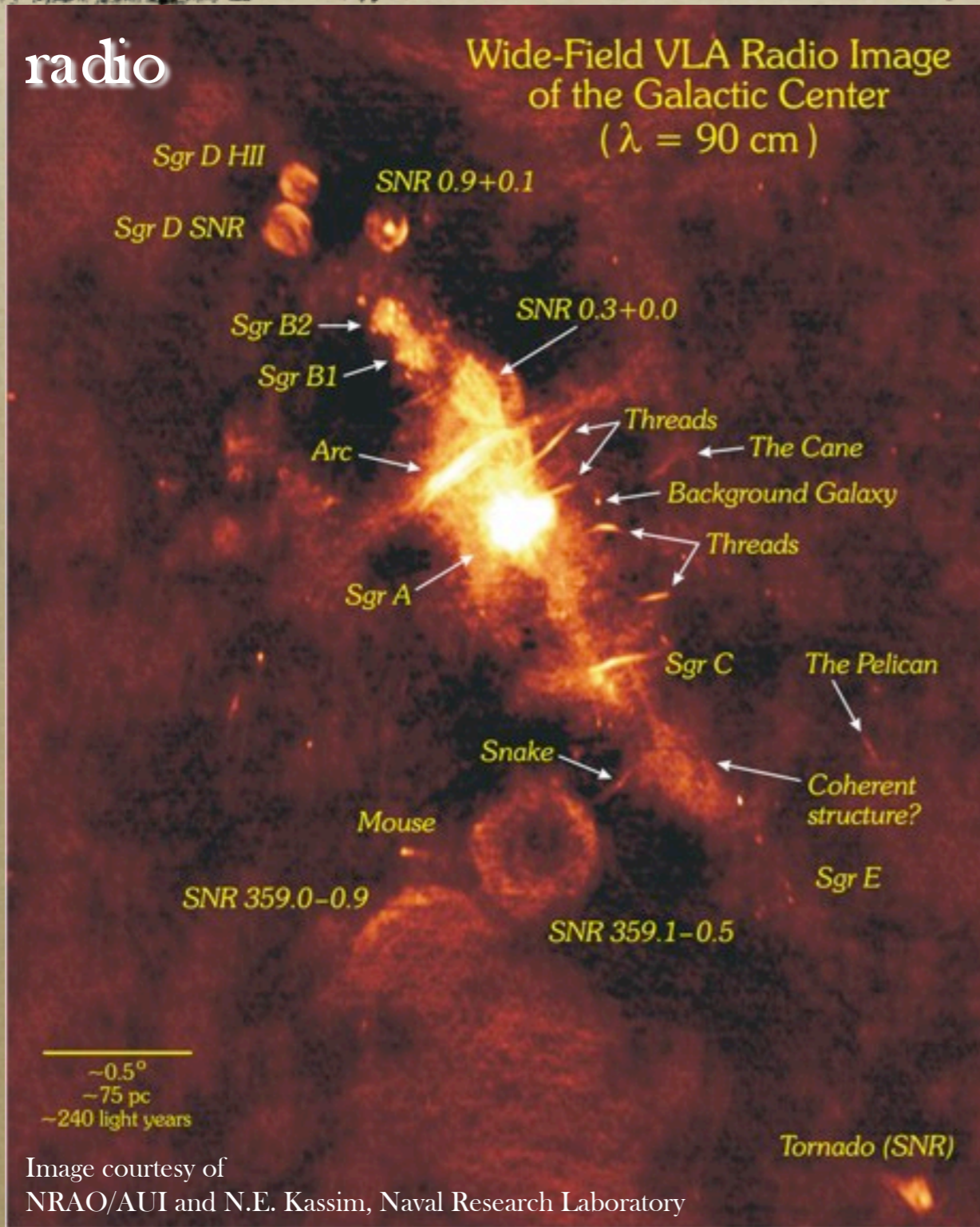
BH影の輪郭の各点に関してこの図が書ける。



観測ターゲット

| Name | Other Name | D [Mpc] | M_{BH} [$10^8 M_{\odot}$] | θ_g [μas] | $S_{15\text{GHz}}$ [mJy] | Remarks |
|----------|--------------------|--------------|---|----------------------------------|-----------------------------|----------------|
| NGC 3031 | M 81 | 3.63 | 0.7 | 0.93 | 164.8 | |
| NGC 3627 | ..... | 6.6 | 0.9 | 0.27 | 2.9 | |
| NGC 3998 | ..... | 21.6 | 5.8 | 0.53 | 85 | S at 5 GHz |
| NGC 4143 | ..... | 17 | 3.7 | 0.44 | 10 | |
| NGC 4261 | ..... | 35.1 | 7.5 | 0.43 | 6230 | S at 8.4 GHz |
| NGC 4278 | ..... | 9.7 | 2.8 | 0.57 | 89.7 | |
| NGC 4374 | M 84 | 18.4 | 16 | 1.74 | 183.7 | |
| NGC 4486 | M 87 おとめ座銀河団中の楕円銀河 | 16.8 | 32 | 3.81 | 2835.7 | |
| NGC 4552 | ..... | 16.8 | 3.7 | 0.43 | 58.6 | |
| NGC 4594 | M 104 | 20 | 2.7 | 0.27 | 86.6 | S at 8.4 GHz |
| NGC 5128 | Cen A | 4.2 | 2.4 | 2.96 | 2500 | S at 8.4 GHz |
| IC 1459 | PKS 2254 – 367 | 27 | 25 | 1.85 | 1000 | S at 8.4 GHz |
| Sgr A* | 我々の住む銀河中心 | 0.008 | 0.04 | 6.50 | 1030 | S at 8.4 GHz |

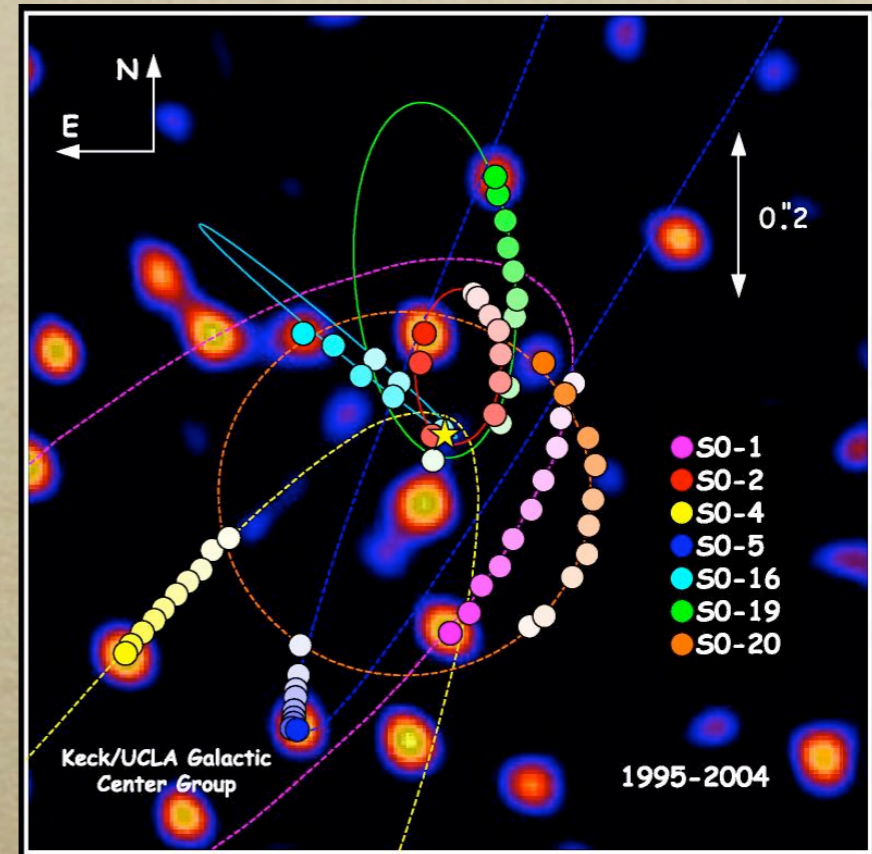
Sgr A* : 我々の銀河中心



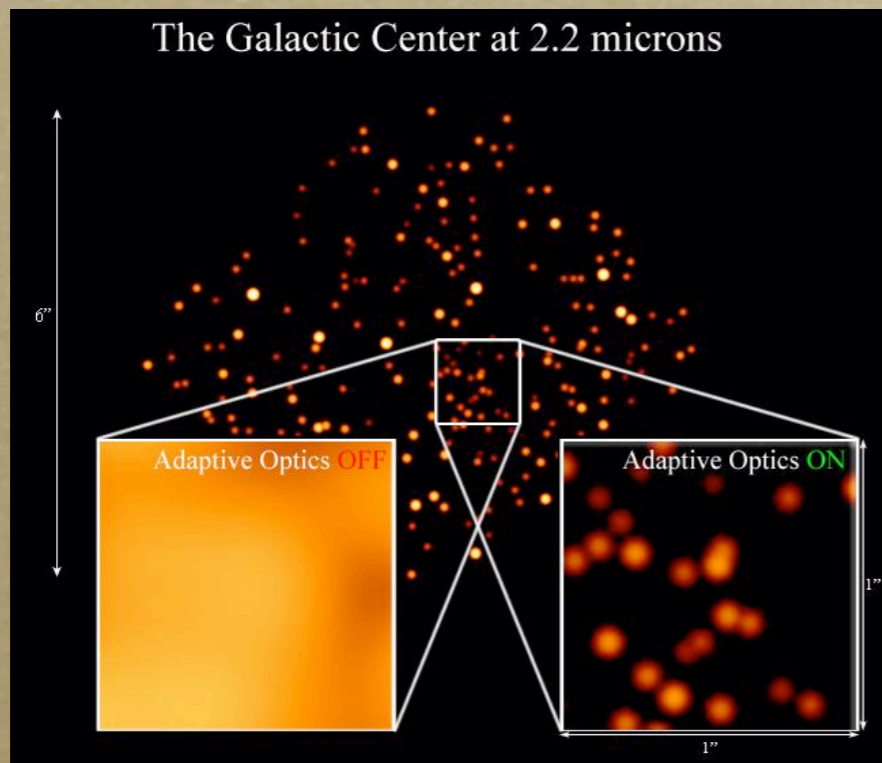
Sgr A* : 力学的質量測定



Stellar Orbits



Adaptive Optics



Recent results : from S0-2's orbit

✓ mass : $4 \times 10^6 M_{\text{solar}}$

✓ distance : 8 kpc

- Since Sgr A* is so close, we can see stars in orbit around it.
- The Keck telescope and the Very Large Telescope(s) have watched these stars for more than 15 years.

Confined to 600 μ region by stellar orbits .

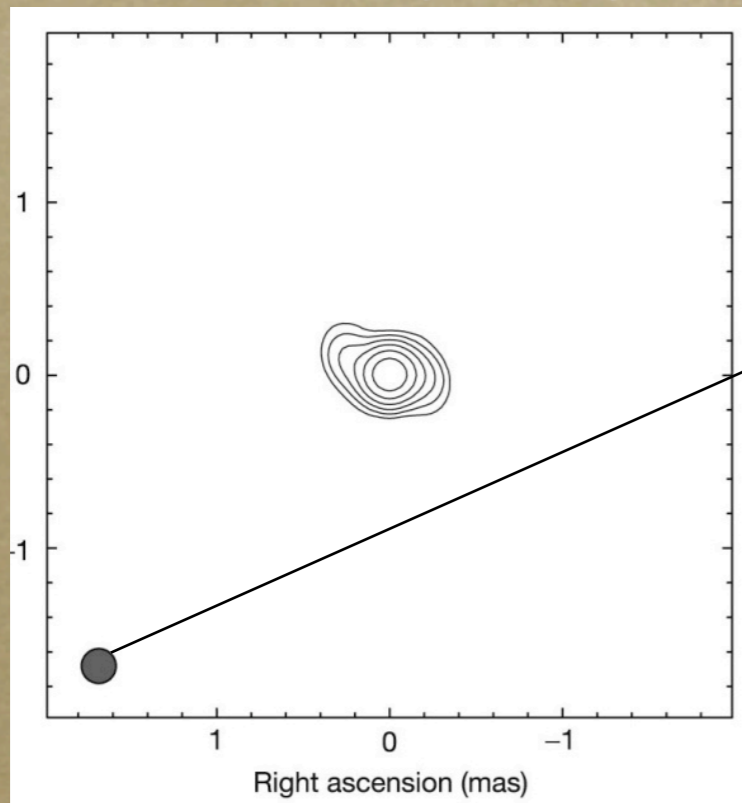
Sgr A* : 中心イメージ

The Very-Long Baseline Array

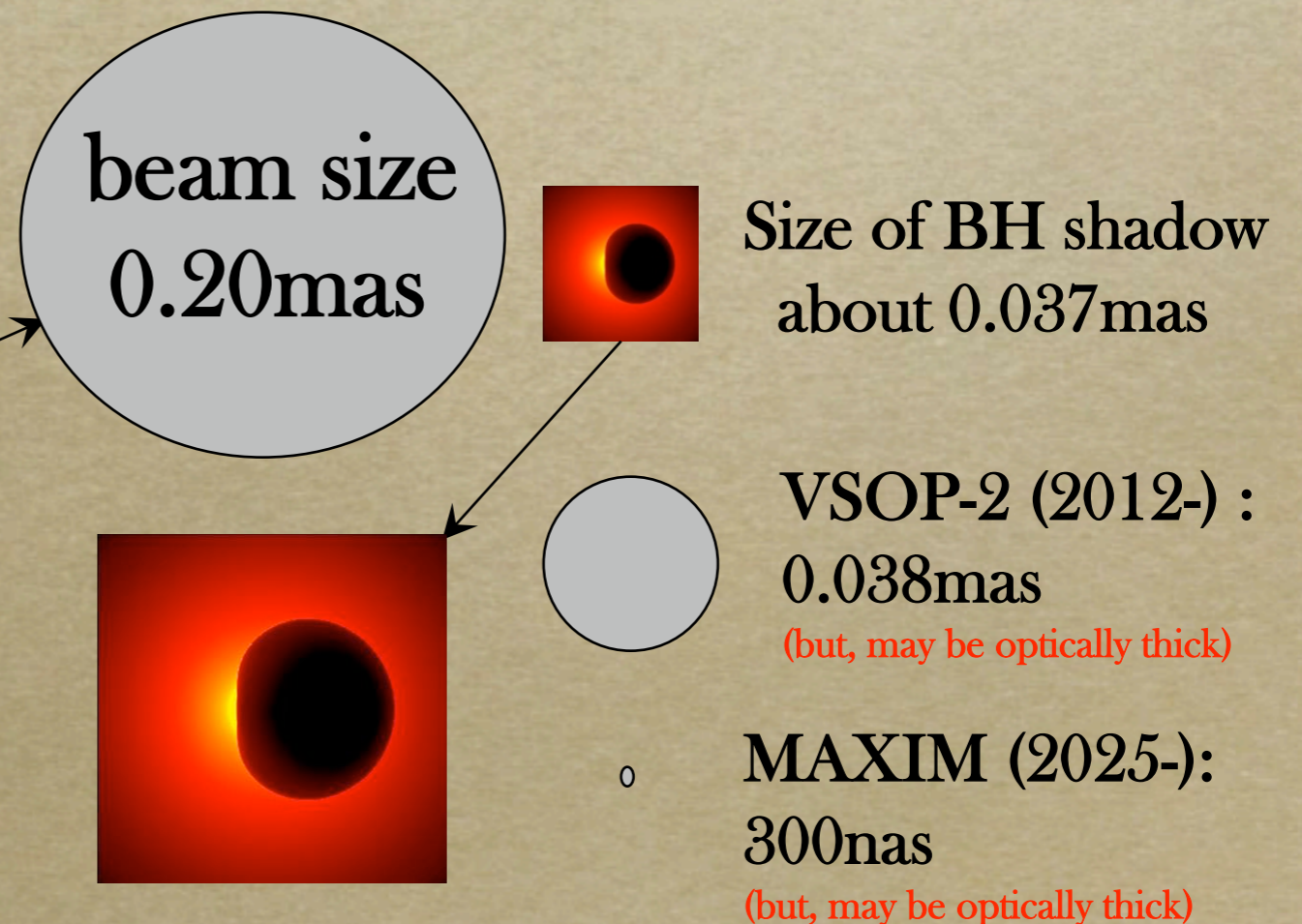


- Closest stellar approach indicates that entire mass lies inside $600r_s$.
- This still allows some exotic alternatives to a BH.
- Radio images obtained by the VLBA show that Sgr A* is no longer than $15r_s$.
- No gravitational lensing phenomena by some exotics alternatives have been detected.

VLBA Observation (3.5mm)



Shen et al., 2005, Nature, 438, 62



Sgr A* : Radio Visibility

♣ Doeleman et al. 2008, Nature, 455, 78

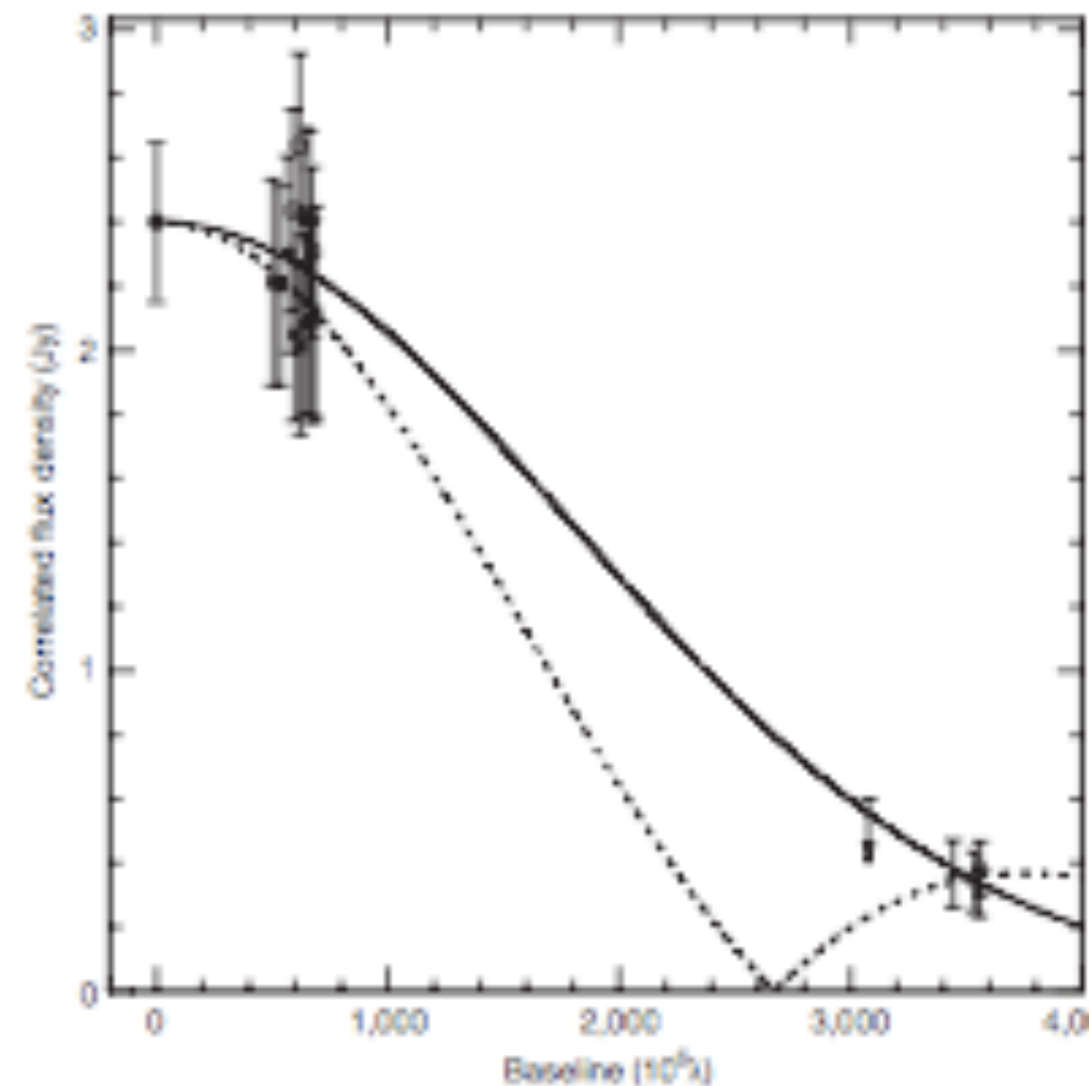
nature

Vol 455 | 4 September 2008 | doi:10.1038/nature07245

LETTERS

Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre

Sheperd S. Doeleman¹, Jonathan Weintroub², Alan E. E. Rogers¹, Richard Plambeck³, Robert Freund⁴, Remo P. J. Tilanus^{5,6}, Per Friberg⁵, Lucy M. Ziurys⁶, James M. Moran², Brian Corey¹, Ken H. Young², Daniel L. Smythe¹, Michael Titus¹, Daniel P. Marrone^{7,8}, Roger J. Cappallo¹, Douglas C.-J. Bock⁹, Geoffrey C. Bower³, Richard Chamberlin¹⁰, Gary R. Davis⁵, Thomas P. Krichbaum¹¹, James Lamb¹², Holly Maness³, Arthur E. Niell¹, Alan Roy¹¹, Peter Strittmatter⁴, Daniel Werthimer¹³, Alan R. Whitney¹ & David Woody¹²

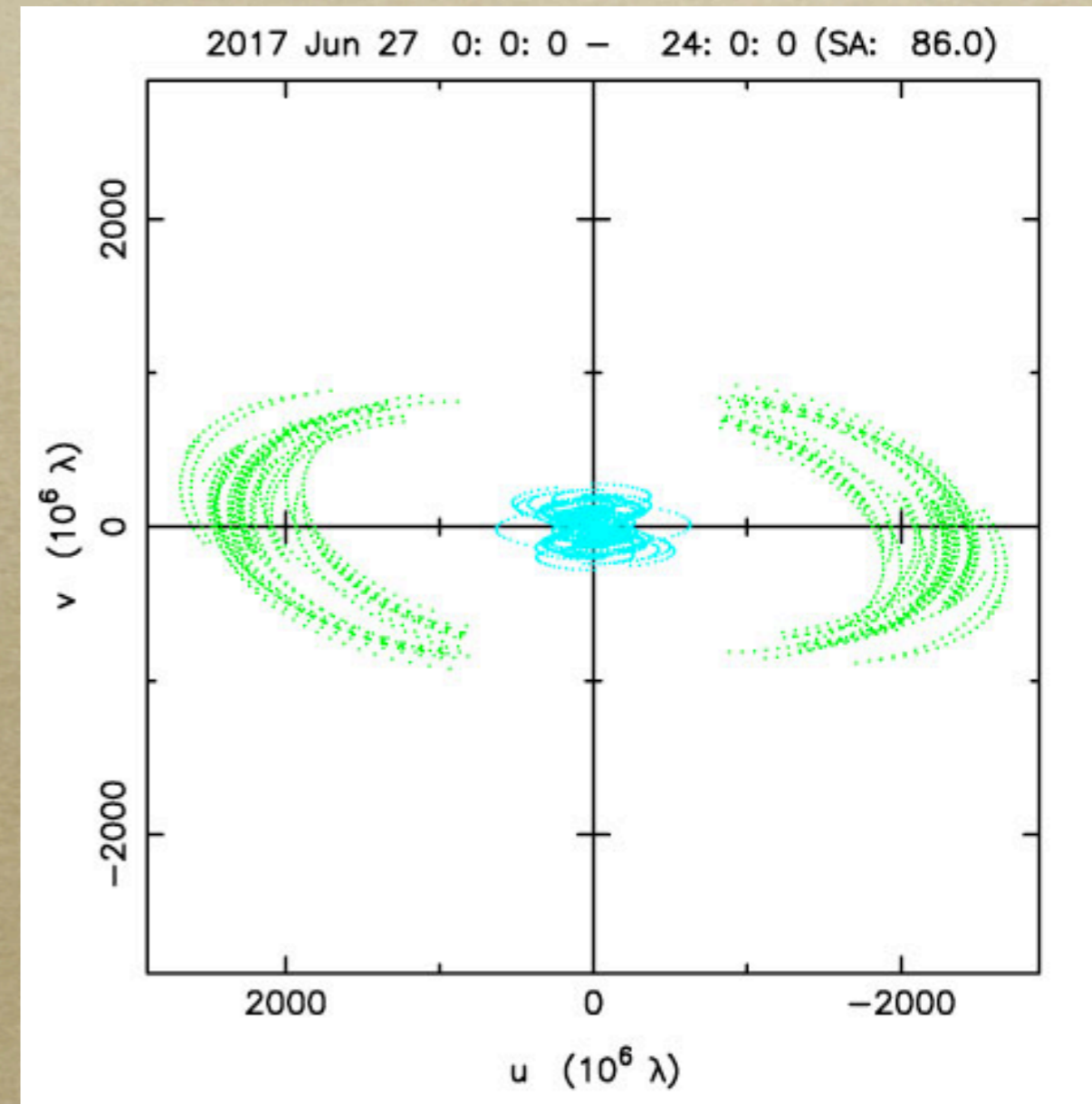


$$\mathcal{I}_\nu(x, y) = \int du \int dv e^{2\pi i(ux+vy)} \mathcal{V}_\nu(u, v) S(u, v)$$

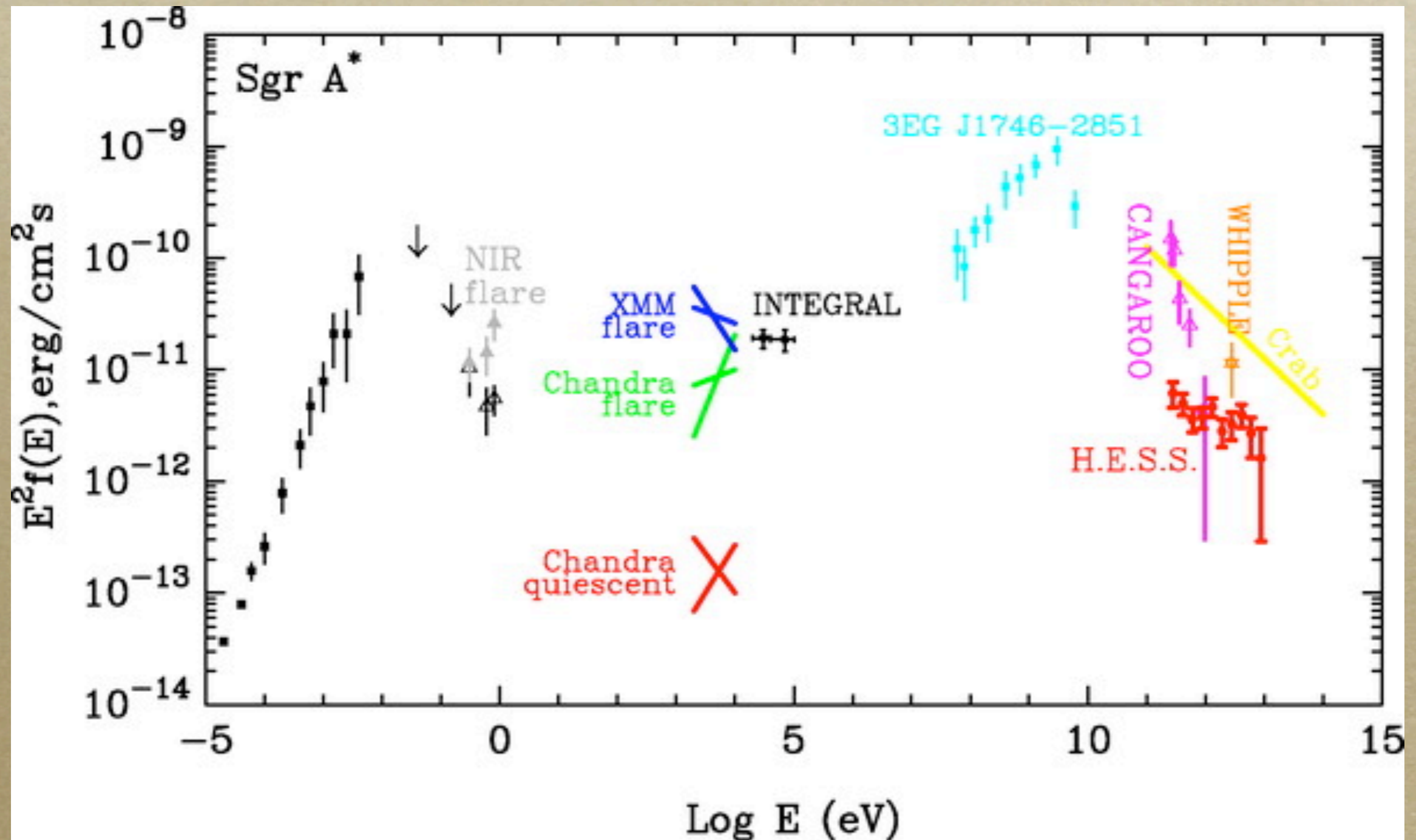
Image *Visibility Sampling*

uv-coverage (例)

- ❖ フーリエ空間上の離散的サンプリング
- ❖ 衛星の軌道と天体の相対位置などにより決まる
- ❖ (例) Astro-G
(地上局+衛星)
- ❖ 衛星の周期 [例: 90分]
観測の時間分解能に制限
- ❖ ISCOのケプラー回転周期
Sgr A* ~ 十数分
M87 ~ 数日

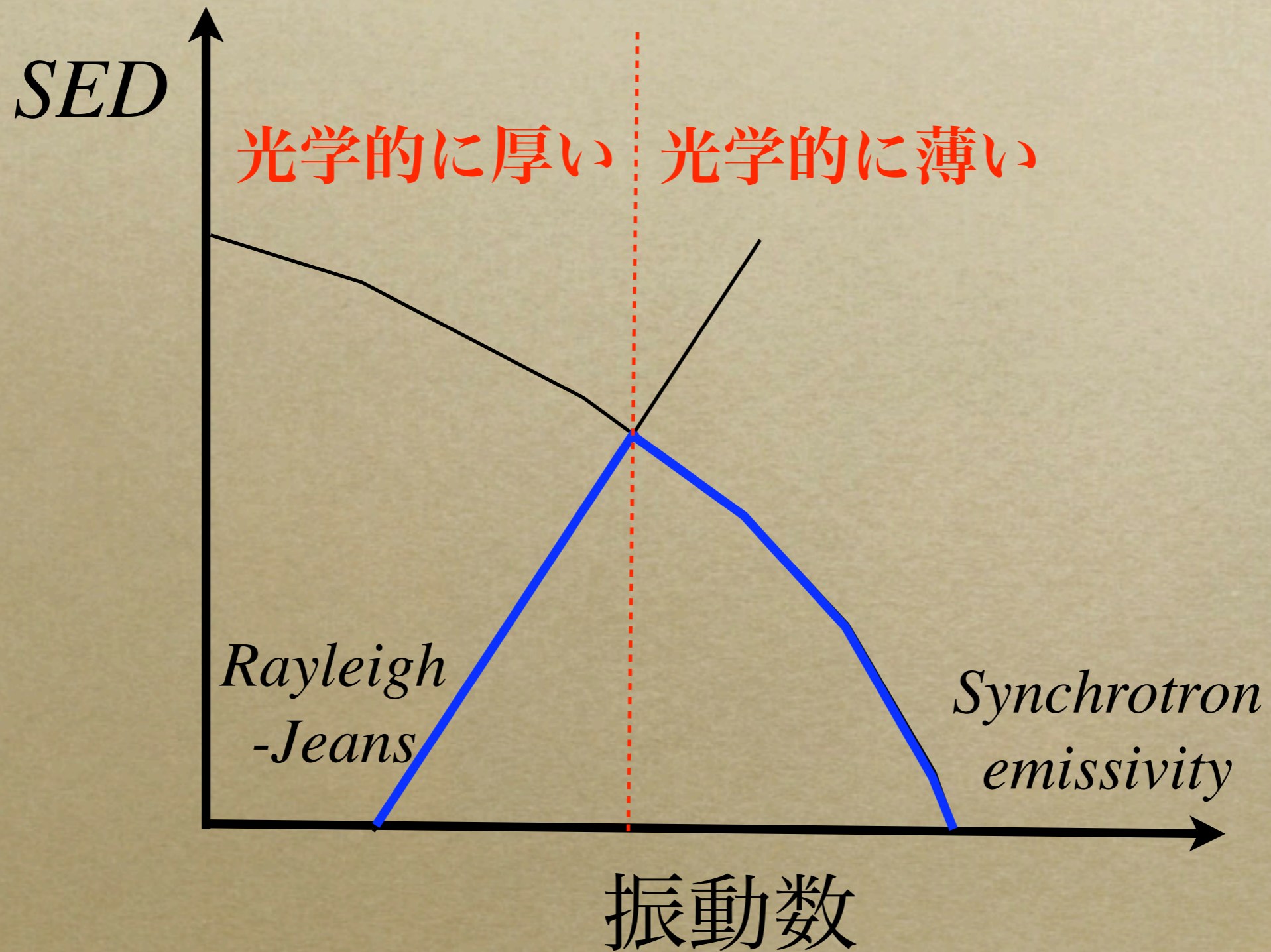


Sgr A* : Energy Spectrum

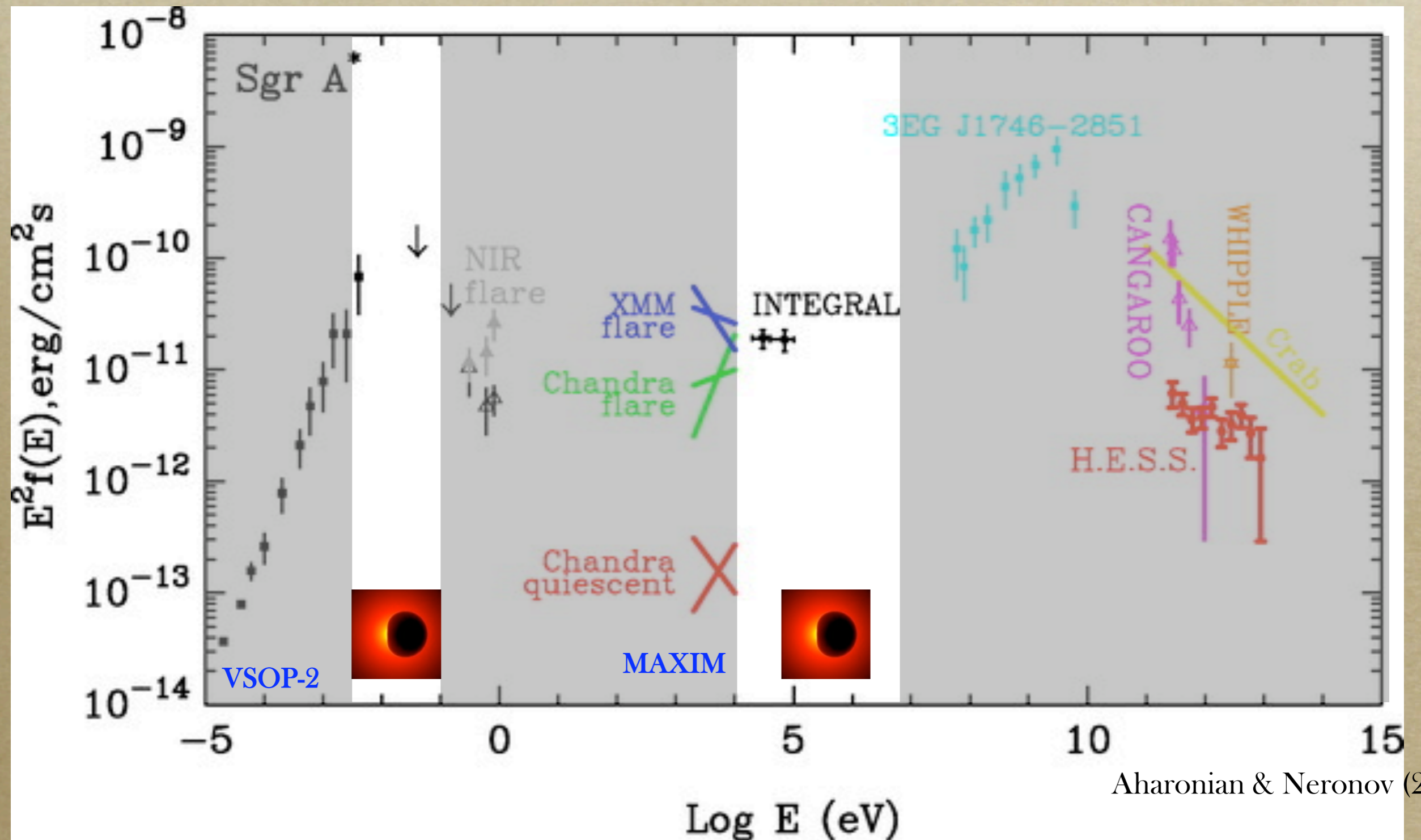


Aharonian & Neronov (2005)

Synchrotron Spectrum

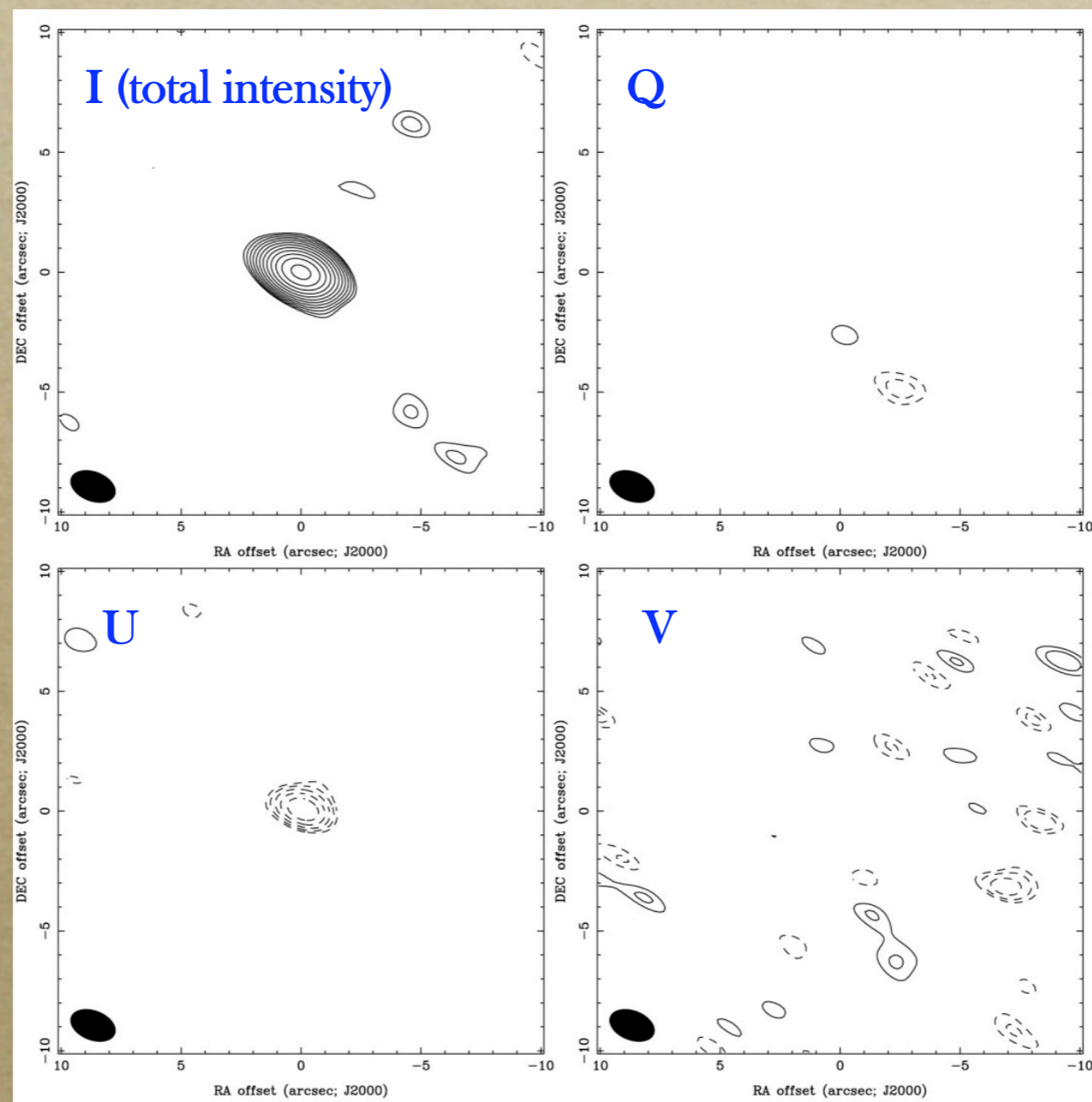


Sgr A* : Optically Thin Window

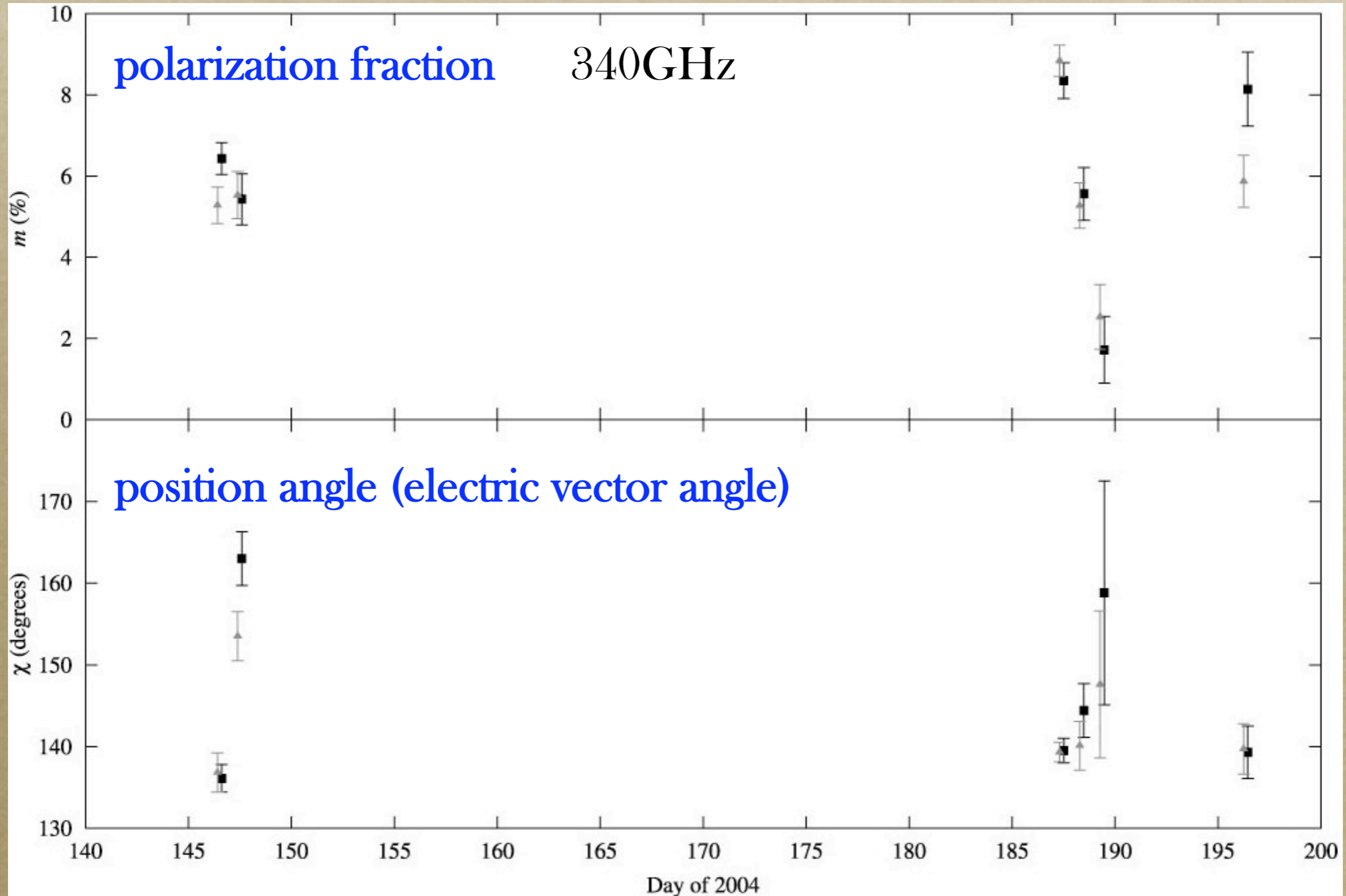


Sgr A* : Polarization Map

Marrone+06

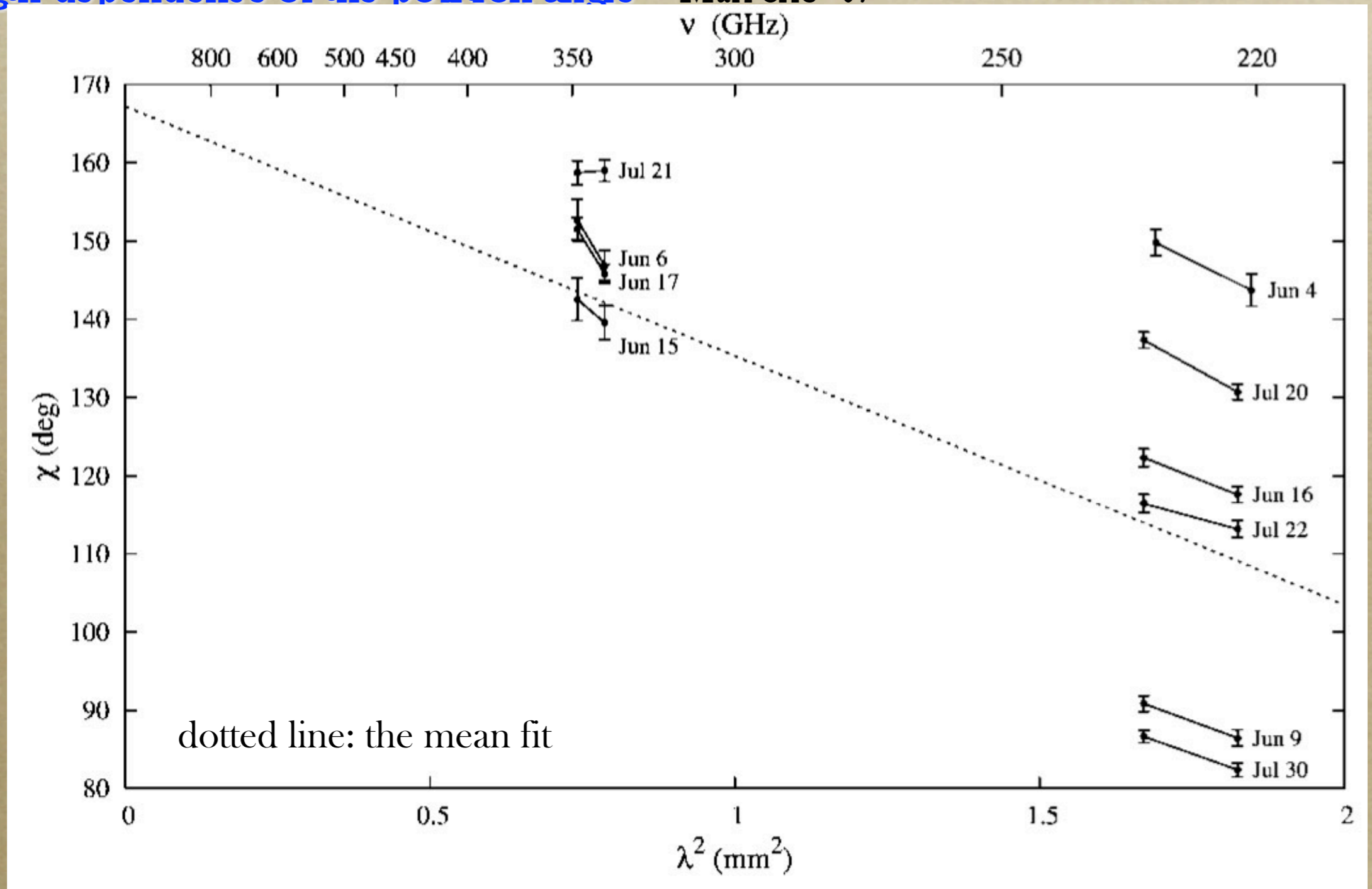


Sgr A* : Polarization Variability



Sgr A* : Polarization 波長依存性

Wavelength dependence of the position angle Marrone+07



降着円盤モデル

❖ 質量降着率



| | | |
|---|-------|--------------------|
| ニュートリノ優勢降着流 NDAF (neutrino-dominated accretion flow) | ..... | ガンマ線バースト中心 |
| 超臨界降着円盤 / スリム円盤 Slim Disk / Supercritical Accretion Disk | ..... | ブラックホール連星 活動銀河核 |
| 標準降着円盤 Standard Disk / Sakura-Snyaev Disk | ..... | ブラックホール連星 活動銀河核 |
| 移流優勢降着流 ADAF (advection-dominated accretion flow) | ..... | 低輝度活動銀河核 |
| 輻射非優勢降着流 RLAF (radiatively inefficient accretion flow) | ..... | 我々の銀河中心 |

RIAFモデル

“輻射が効率的でない降着流”

RIAF (Radiatively Inefficient Accretion Flow)

低密度である (ガスがあまりない)

- ⇒ あまり放射が出ない
- ⇒ 重力エネルギーの散逸で得られたエネルギーはガスに溜る
- ⇒ 高温になる (円盤は厚く膨らむ)
- ⇒ 粘性が大きくなる
- ⇒ 角運動量をたくさん失い、降着速度が大きくなる
- ⇒ 低密度になる

RIAF中の2温度構造

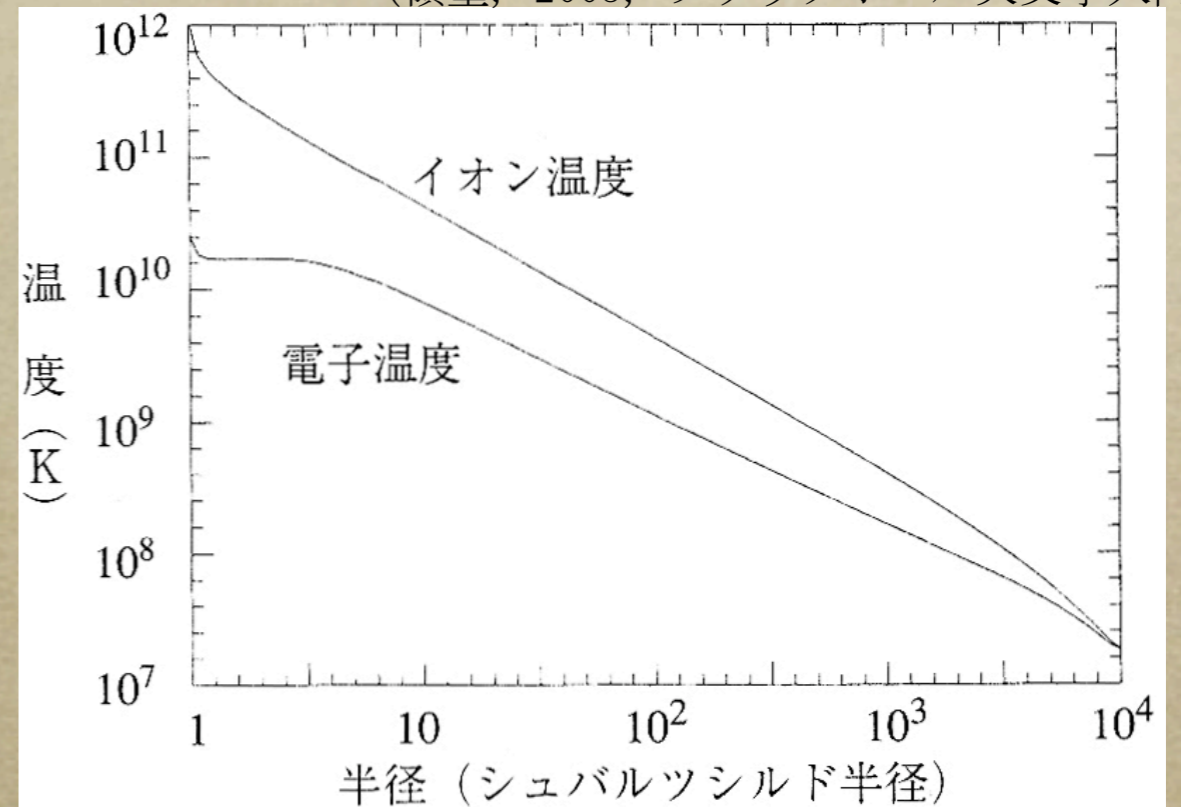
温度構造

- 2温度構造をしている
(と思われている)

- エネルギーの流れ
重力エネルギー

- 陽子を粘性加熱 (陽子質量 \gg 電子質量)
- 陽子から電子へエネルギーを渡す (ここが非効率)
[2体反応(クーロン相互作用、プラズマ効果)]
- 陽子：高温降着流
電子：一部を放射、陽子よりも低温で降着

(嶺重, 2005, ブラックホール天文学入門)



Sgr A* モデルとBHスピン

❖ 偏光データまでフィットしているのは定常解のみ

* Broderick et al (2009,ApJ) : $a/M=0+0.6(1\sigma)+0.9(2\sigma)$

α 粘性RIAF, Kepler回転, 電子加熱率はパラメータ

* Yuan et al.(2009,ApJ) : $a/M=0.5, 0.998$

α 粘性RIAF, 遷音速解, sub-Kepler回転, 電子加熱率はパラメータ

* Huang, Takahashi & Shen (2009,ApJ) : $a/M<0.5$

MRI粘性RIAF, 遷音速解, sub-Kepler回転

乱流による電子加熱 (Blandford&Eicher87)

❖ MHDシミュレーション・データを用いたもの

* Moscibrodzka, Gammie et al (2009,ApJ) : $a/M\sim 0.9$

MHD計算, 電子加熱率は $T_i/T_e=10$ (非等方圧力MRIモデルとconsistent)

* Dexter, Agol & Fragile (2009,ApJ) : $a/M=0.9$ のデータでフィット

MHD計算, 電子加熱率は $(T_e+T_i)/T_e=10$

BHからのエネルギー (1)

♣ ブラックホールからのエネルギーの引き抜き

$$\frac{\kappa}{8\pi} \frac{dA}{dt} = \int_{\mathcal{H}} T_{ab} \ell^a \ell^b dA, \quad \ell^a \rightarrow k^a + \Omega_H f^a \quad (r \rightarrow r_{\mathcal{H}})$$

$$\frac{dM}{dt} = \int_{\mathcal{H}} T_{ab} \ell^a k^b dA, \quad \frac{dJ}{dt} = - \int_{\mathcal{H}} T_{ab} \ell^a f^b dA$$

$$\boxed{\frac{dM}{dt} = \frac{\kappa}{8\pi} \frac{dA}{dt} + \Omega_H \frac{dJ}{dt}}$$

* $dM/dt < 0$ となりうる $\gg \gg$ BHからエネルギー引き抜き
(e.g.) superradiance, Blandford-Znajek process

M : mass, J : angular momentum, A : BH surface area

κ : surface gravity, Ω_H : angular velocity at \mathcal{H}

ℓ^a : null vector, k^a, l^a : Killing vectors

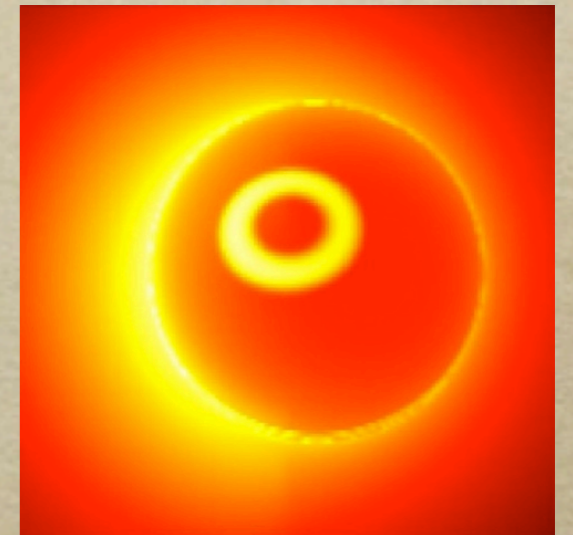
BHからのエネルギー (2)

❖ negative energy shock

M.Takahashi & R.Takahashi (2010, submitted)

* shock下流が負のエネルギーの解

>>> BHからのエネルギーの引き抜き



❖ 磁気圏の構造 (いわゆるGS方程式の解)

❖ 観測データと比較できるレベルに理論を発展させるべき

* 観測されている降着流の場合にどうなるか？

* どの程度起こりえるか？一般的か？

* BH近傍の他のエネルギーとの比較。

Einstein-Boltzmann-Maxwell システムを数値的に解く計算技術の開発がSgr A*データ解釈に必要

❖ Einstein 方程式 [時空] $G_{ab} = 8\pi T_{ab}$

>>> 数値解法はほぼ完成 (BSSN)

❖ Boltzmann 方程式 [粒子] $\frac{\partial f}{\partial x^a} \frac{dx^a}{d\tau} + \frac{\partial f}{\partial p^a} \frac{dp^a}{d\tau} = \left(\frac{df}{d\tau} \right)_{\text{coll}}$

測地線方程式 $\frac{dx^a}{d\tau} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_a}, \quad \frac{dp_a}{d\tau} = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x^a}$

光子・ニュートリノ・電子・陽電子 etc

>>> 今後のメイン課題 (特に光子と電子)

❖ Maxwell方程式 [磁場] $\nabla_a F^{ab} = 4\pi J^b, \quad \nabla_{(a} F_{bc)} = 0$

>>> 散逸の取り扱いが今後の課題

ボルツマン方程式と観測量

- ❖ 適当なclosure relationを仮定して解く >>> GR効果
- ❖ 光子分布関数のBoltzmann方程式を直接解く
(非等方性の効果、GRでは一般に重要)
>>> スペクトル、イメージ
- ❖ 偏光輻射場のBoltzmann方程式を解く
>>> 偏光スペクトル
- ❖ 電子Boltzmann方程式を解く
>>> 観測量における非熱的電子の効果
(2温度プラズマ, コロナ, etc)
- ❖ 分散関係を導入して光子Boltzmann方程式を解く
>>> 分散プラズマの効果

光子 Boltzmann 方程式を解く試み

❖ 現状：輻射テンソルの時間発展を解く試み

輻射テンソル

$$R^{ab} = \int dP f p^a p^b$$

$$E = R^{00}, F^i = R^{0i} \text{ or } P^{ij} = R^{ij}$$

これを解くときには、closure relationが必要。

❖ GR輻射MHDシミュレーション

(1) Farris et al. (2008, PRD, 78, 024023)

$$R^{ab} = \tilde{E} u^a u^b + \tilde{F}^a u^b + \tilde{F}^b u^a + \tilde{P}^{ab}$$

Eddington近似

(2) J.-P. De Villiers, 2008, astro-ph/0802.0848

(#) Moscibrodzka, Gammie et al. (2009, ApJ)

Closure Relation

- ♣ Eddington近似：等方輻射場

$$P^{11} = P^{22} = P^{33} = \frac{E}{3}$$

- ♣ M1 relation : dipole効果

Eddington tensor, GRで使えるか不明

(Dubroca&Feugeas 1999; Ripoll et al. 2001; Gonzalez et al. 2007)

- ♣ C.-K. Chan (arXiv:astro-ph/0911.5351)

$$f = \frac{g_s}{h^2} w(\xi) \left(a + \xi a_{\beta_1} n^{\beta_1} + \xi^2 a_{\beta_1 \beta_2} n^{\beta_1} n^{\beta_2} + \dots \right), \quad \xi = h\nu/\theta$$

- ♣ 他にもいろいろ研究ある (Fukue 2006, 2008abなど)

電子Boltzmann方程式を解く試み

❖ SR Boltzmann

* Mimica, Aloy et al. (2009, ApJ, 696, 1142)

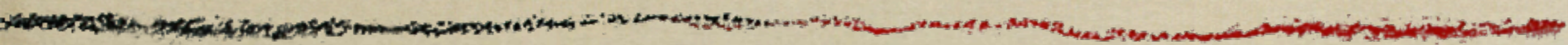
ジェットのスペクトルの時間発展

電子に対するLindquist 方程式を解く。

* 他、定常状態を解くものは幾つかある。

まとめ：Sgr A* とBHスピン

- ❖ 現状の理論モデルは、共通のBHスピンの値を導いていない。
- ❖ 偏光データは、定常解のモデルでしかフィットされていない。
GRMHD計算によるフィッティングは今後。
- ❖ 電子温度が方程式の解として、consistentに解かれていないので、
現状の観測データからBHスピンを決めるのは難しい。
数値的に解く技術がまだ構築されていない。
- ❖ RIAFの電子温度を(Kerr時空中で)理論的に求めることは大変難しい。
- ❖ であるので、BHスピンの決定はBH shadowのイメージから求める
方がいいのかも知れない。



将来の観測データと科学的目標

- ❖ 科学的目標：Kerr時空／No hair定理のテスト
 - * Kerr時空である場合には色々な重力理論が生き残る
 - * 結果として重力理論の選別に使われる
(高次元の効果、CS重力項、etc.)
 - * BHの観測には限界がある >>> 他の高密度天体か？
- ❖ 精密な時空計量の測定が期待される観測データ
 - ① binary からの重力波 (EMRIなど)
 - ② BHのイメージ (BH shadow) [電波／X線干渉計]他、微視的物理、プラズマ物理などの効果が複雑に入っていない観測データ

BH類似天体と観測データの比較

❖ 表面のある天体でいわゆるBHと似ているもの

* Gravastar

* boson star

* BHに表面を仮定したもの

表面があると降着流が落ちたときにBHと異なる

❖ 表面がない天体でいわゆるBHと似ているもの

* super-spinar (Kerr naked singularity)

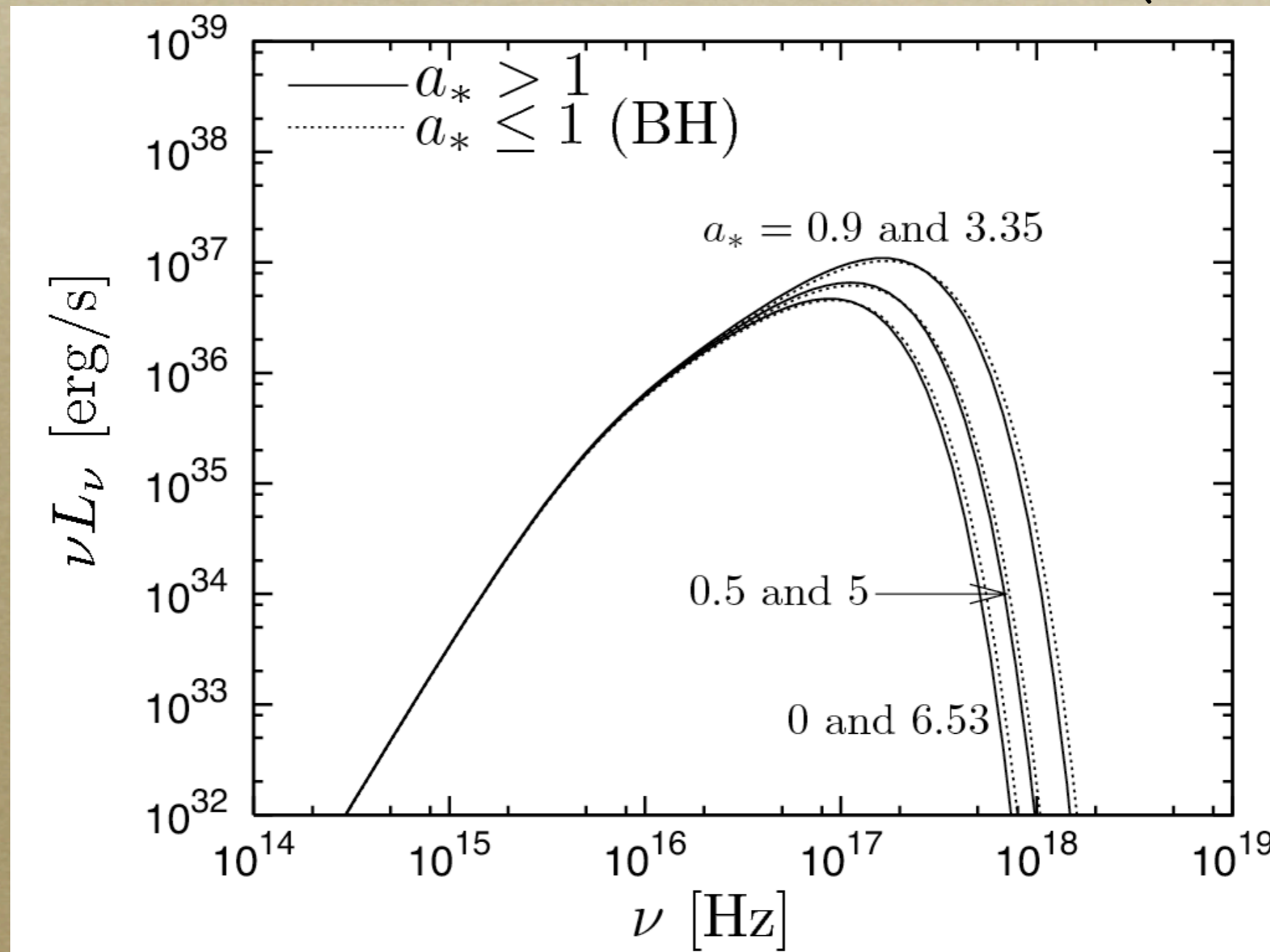
* 高次元BH (brane world BHなど)

* 弦理論の低エネルギー極限のBH (Chern-Simon BH)

(例) BHと区別できないもの

❖ super-spinar周りの降着円盤からのX線スペクトル

RT & Harada (2010, CQG)



parametrized-post Einsteinian

Yunes & Pretorius (2009, PRD, 80, 122003)

❖ 様々な重力理論を扱うframework

❖ 要請

(i) Metric theory of gravity

(ii) Weak-field consistency

(iii) Strong-field inconsistency

❖ 例： binary BH-like compact object からのGW

$$\tilde{h}(f) = \begin{cases} \tilde{h}_I^{(GR)}(f) \cdot (1 + \alpha u^a) e^{i\beta u^b} & f < f_{IM} \\ \gamma u^c e^{i(\delta + \epsilon u)} & f_{IM} < f < f_{MRD} \\ \zeta \frac{\tau}{1 + 4\pi^2 \tau^2 \kappa (f - f_{RI})^d} & f > f_{MRD} \end{cases}$$

* ppEパラメータを用いて波形を記述。

重力場のmultipole structure (1)

❖ ニュートニアンの場合 (例)

* 地球の場合

$$U(r, \theta) = \frac{GM}{R} \left[\frac{R}{r} - \sum_{n=2}^{\infty} a_n \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} P_n(\cos \theta) \right]$$

$$a_2 = (1082635 \pm 11) \times 10^{-9}, \quad a_3 = (-2531 \pm 7) \times 10^{-9}, \quad a_4 = (-1600 \pm 12) \times 10^{-9}, \quad \dots$$

地球はナシ型の変形

* 他にも

月の場合：宇宙研の衛星(2機で測定)

木星の場合：背景の天体への重力レンズ効果など

重力場のmultipole structure (2)

♣ Kerr ブラックホールの場合：No hair定理

$$M_l + iS_l = M (ia_*)^l \quad \text{Hansen (1974)}$$

M_l : l 次のmass multipole S_l : l 次のcurrent multipole

* BHは四重極や更に高次の多重極を持たない。

♣ 軸対称時空の場合

* FHP algorithm (Fodor, Hoenselaers & Perjes 1989)により計算。

* 中心天体がいわゆるKerr BHでない場合に用いられる。

BH spacetime with multipoles

❖ 厳密解：Manko & Novikov 計量 (Manko & Novikov 1992)

$$ds^2 = -f(dt - \omega d\phi)^2 + f^{-1}e^{2\gamma}(dR^2 + dz^2) + f^{-1}R^2 d\phi^2$$

$$f = e^{2\psi} A/B, \quad \omega = 2kC/A - 4k\alpha/(1 - \alpha^2), \quad \text{etc.}$$

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \frac{P_n}{d^{n+1}} \quad \text{etc.}$$

高次のmultipoleまで厳密に計算できる。ホライズン無し。

❖ 近似解：bumpy BH (Vigeland & Hughes 2010)

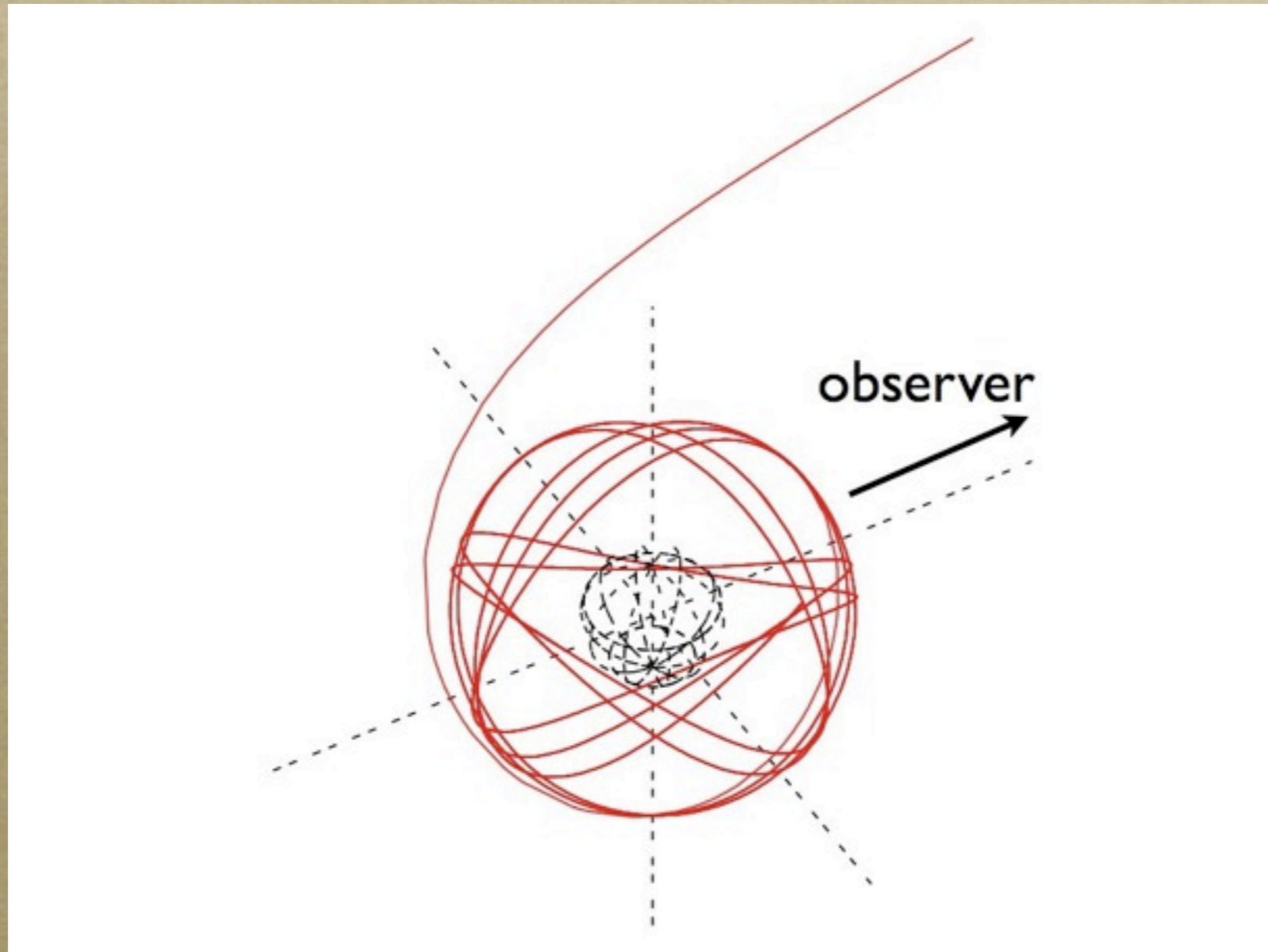
* bumpy Schwarzschild metric から Newman-Janis 変換を用いて、
bumpy Kerr metric を作る。厳密解より簡単な方法。計量も簡単に書ける。

❖ 近似解：quasi-Kerr (Glampedakis & Babak 2006)

* slowly rotating Kerr 限定

BH imagingでの可能性(1) RT (2010, in prep)

- ♣ innermost unstable photon orbitに対応する光子軌道がBH shadowの輪郭を作る



BH imagingでの可能性(2) RT (2010, in prep)

- ❖ innermost unstable photon orbitに対応する光子軌道がBH shadowの輪郭を作る
- ❖ forward problem :
あるmetric仮定 \Rightarrow BH shadowの輪郭 (観測量)
- ❖ inverse problem :
BH shadowの輪郭 \Rightarrow 時空のmultipole structure
* Kerr時空からのずれが小さい場合にはできる
- ❖ 問題は観測可能性。実現可能な干渉計技術があるか？
(例) LISAで観測できるが、X線干渉計では無理な場合。

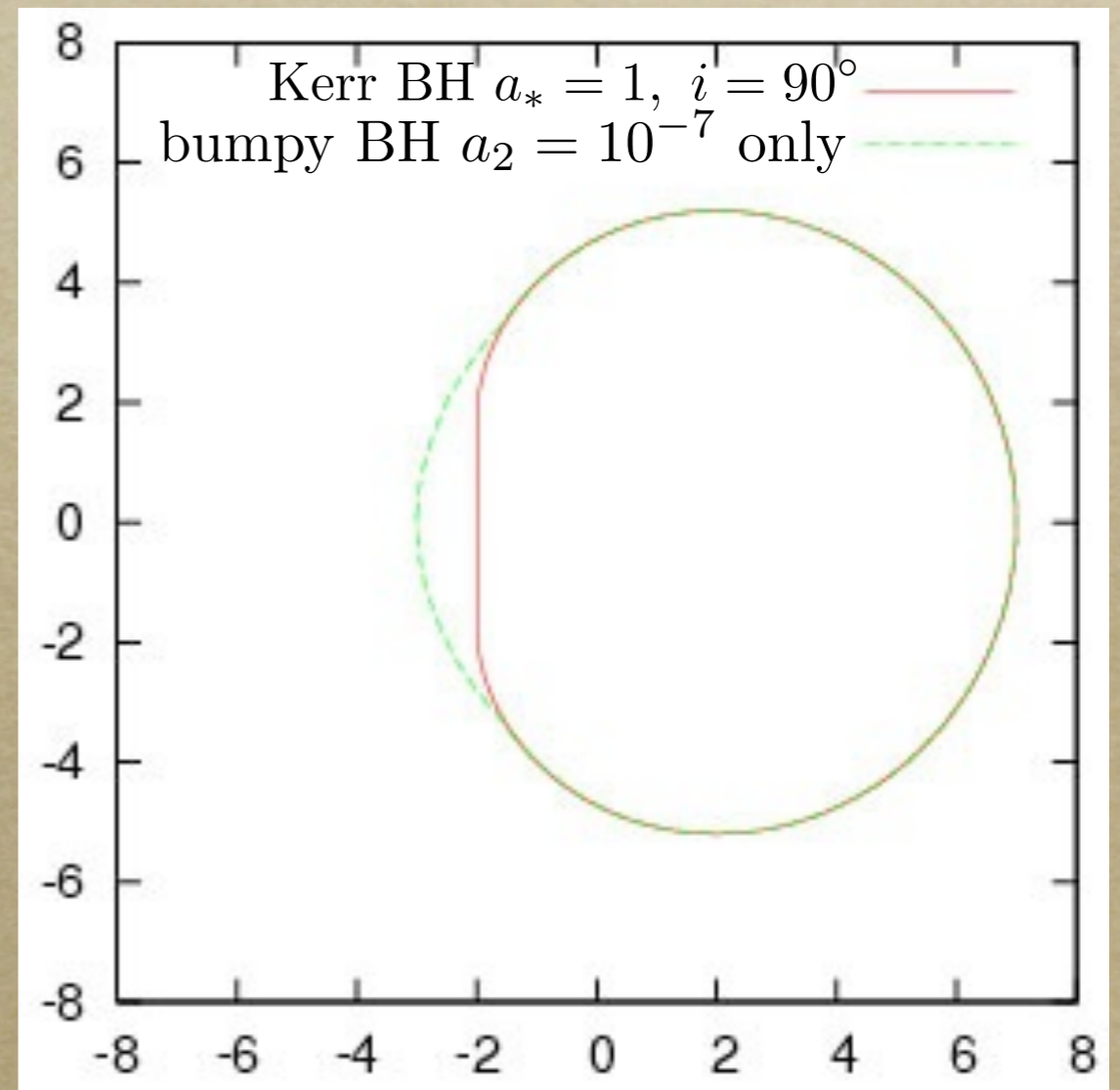
modified BH shadow (1)

RT (2010, in prep)

♣ forward problem

(例) quadrupole成分だけKerrからずれているBH

$r=10^6M$ から観測したもの

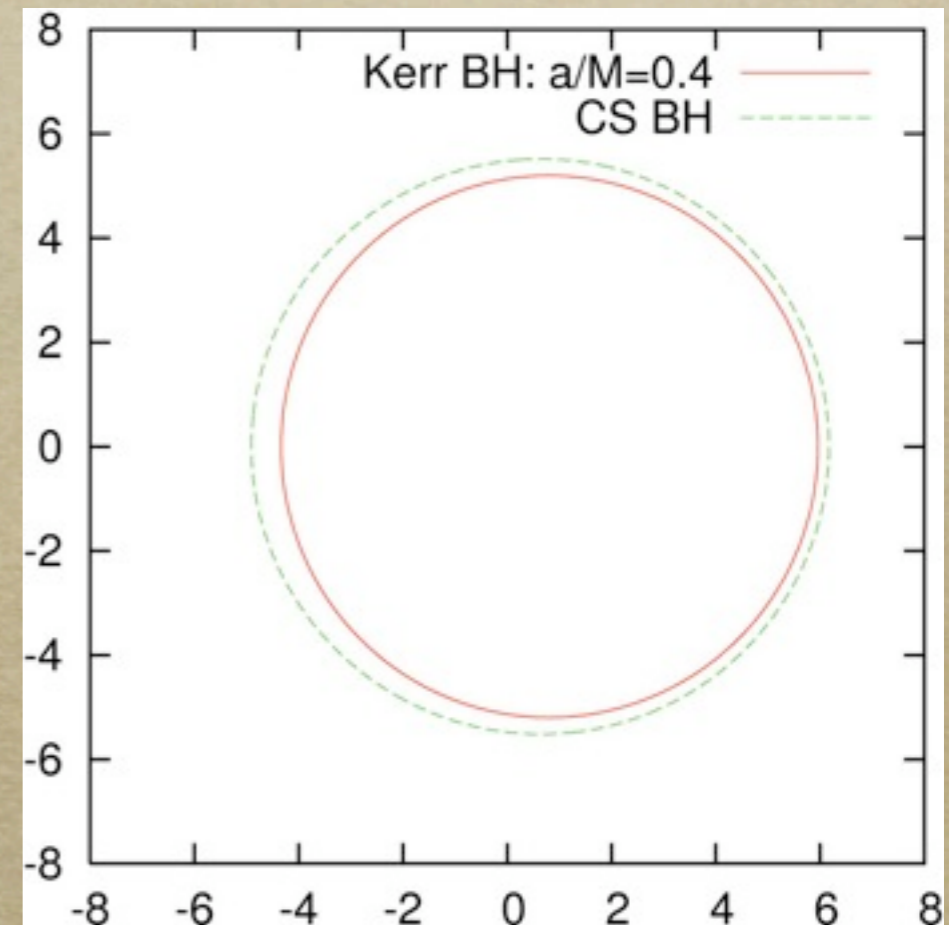


>>> 将来の電波干渉計で観測可能。

modified BH shadow (2)

♣ forward problem

(例) slowly rotating BH in CS gravity



* 解析的にBH shadow書ける。

* パラメータによってはX線干渉計でも無理。

* EMRIからのGWでは可能。

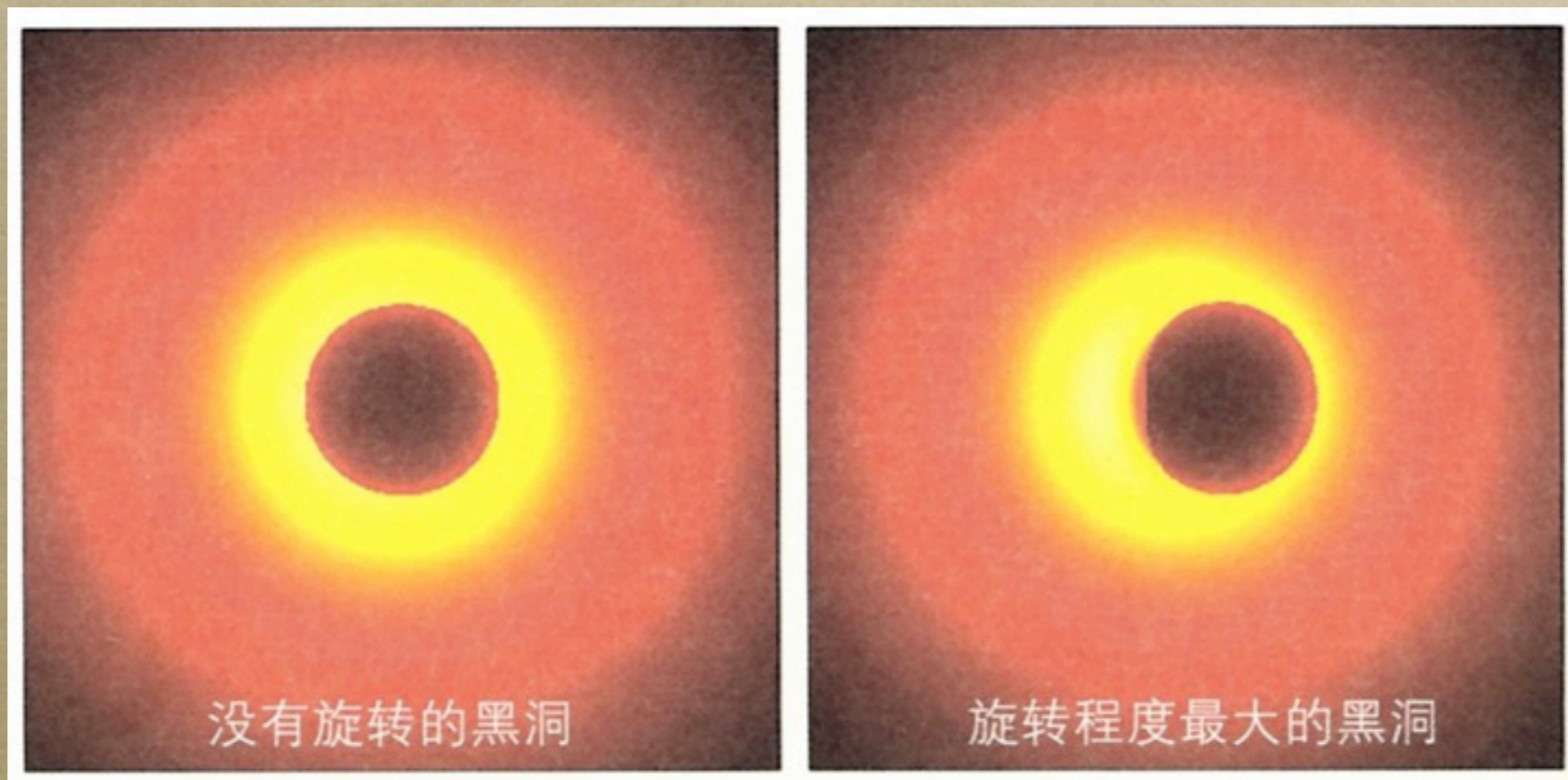
modified BH shadow (3)

RT (2010, in prep)

♣ 観測量：Kerr時空の場合

仮定：サイズの絶対値を用いない

(質量と距離の不定性が一般には存在する為)



>>> BH spin, viewing angleを縮退なしに決定可能

modified BH shadow (4)

RT (2010, in prep)

♣ inverse problem (cf. Wikipedia)

* 一般には、
$$d = G(m)$$

d : data, m : model parameter, G : forward operator

* データとモデルパラメータが線形に依存する場合は、

$$d = Gm$$

d : data, m : model parameter, G : observation matrix

♣ 今の場合、

BH shadow (観測量) \Rightarrow multipoles & viewing angle
という逆問題を解きたい。

modified BH shadow (5)

❖ inverse problem

RT (2010, in prep)

* 一般には、

$$x_m = G_m(i, M_1, S_1, \dots, M_n, S_n)$$

x_i : data (BHS contour), M_i, S_i : multipoles

* Kerr時空からのずれが小さい場合

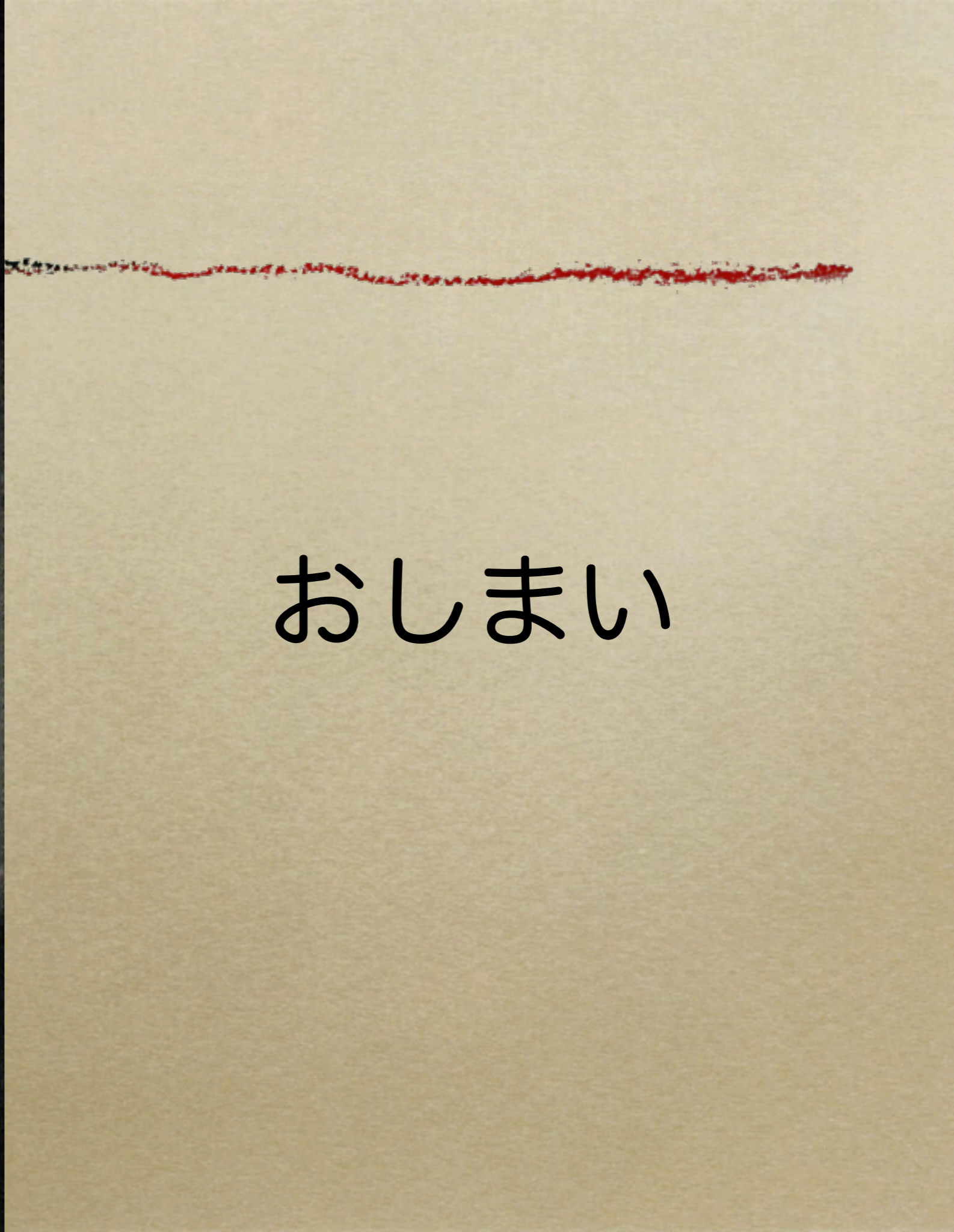
$$\delta X_i = X_i - X_i^{\text{Kerr}} (X = x_i, M_i, S_i)$$

$$(\delta x_1, \dots, \delta x_{2n+1})^T = G(i, \delta M_1, \delta S_1, \dots, \delta M_n, \delta S_n)^T$$

❖ Kerr時空からのずれが大きい場合にもできるか？

* forward problemは簡単なので観測量と比較可能

* そもそもずれが大きいと色々な観測と矛盾する(?)



おしまい