

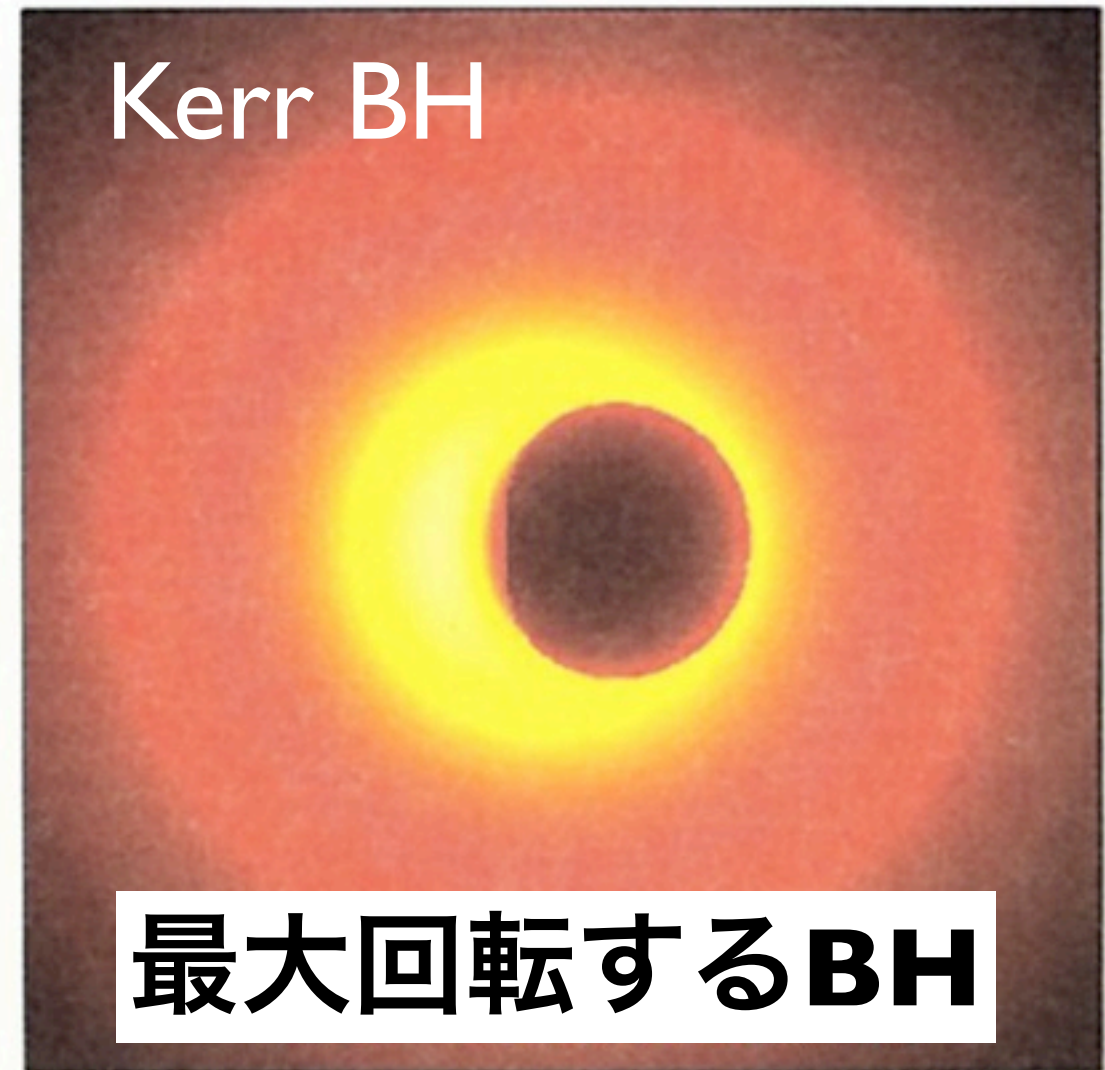
ブラックホールシャドーと 降着円盤の鉄輝線

高橋 太 (理研)

目次

- **ブラックホールシャドールの理論 (12分)**
- **ブラックホールシャドールの観測可能性 (7分)**
- **降着円盤からのX線鉄輝線研究の最前線 (6分)**

BH shadowの理論：Key Questions



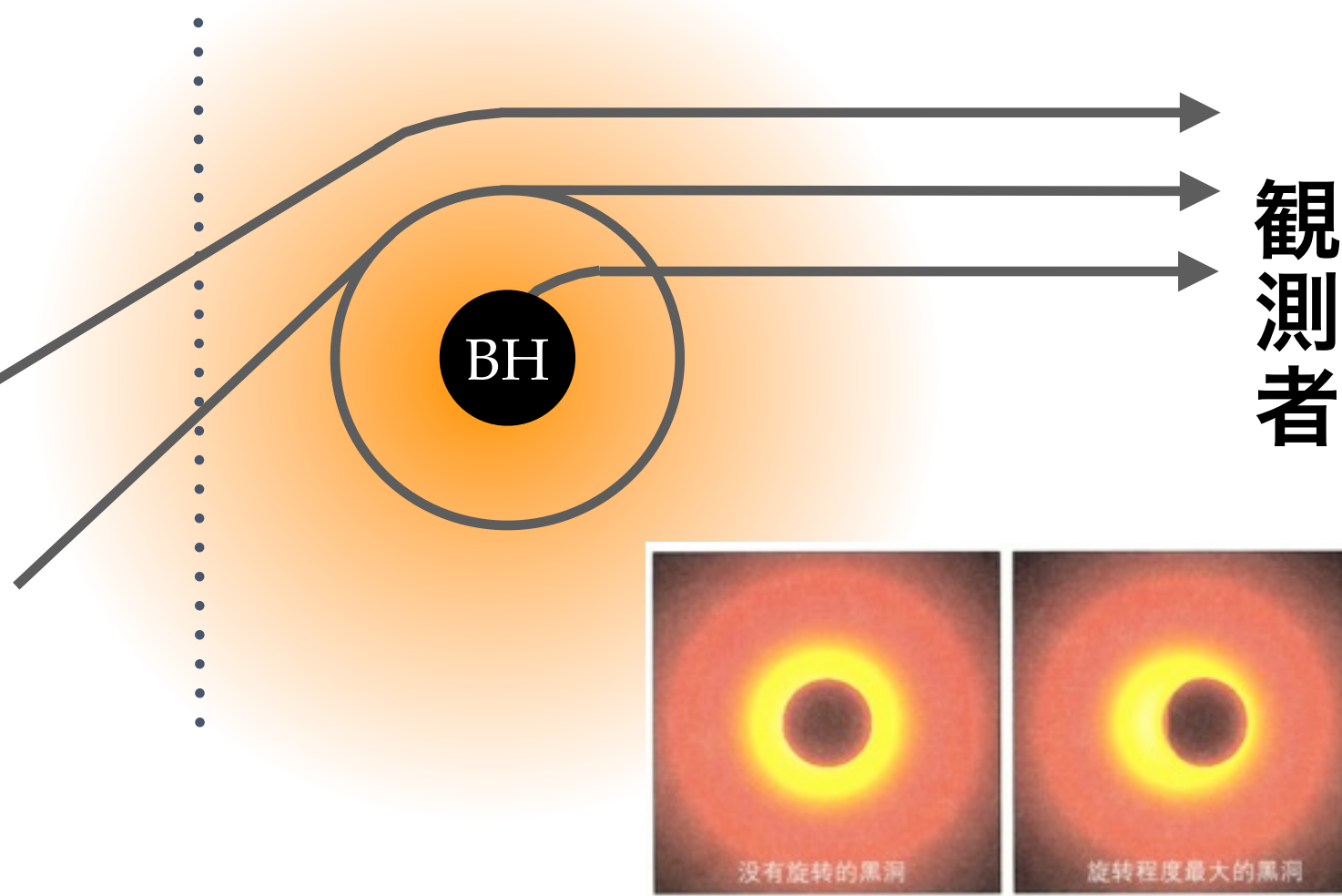
Q1. BHがこの様に見えるのは何故か？

Q2. BHの時空計量は測定できるのか？如何様に？

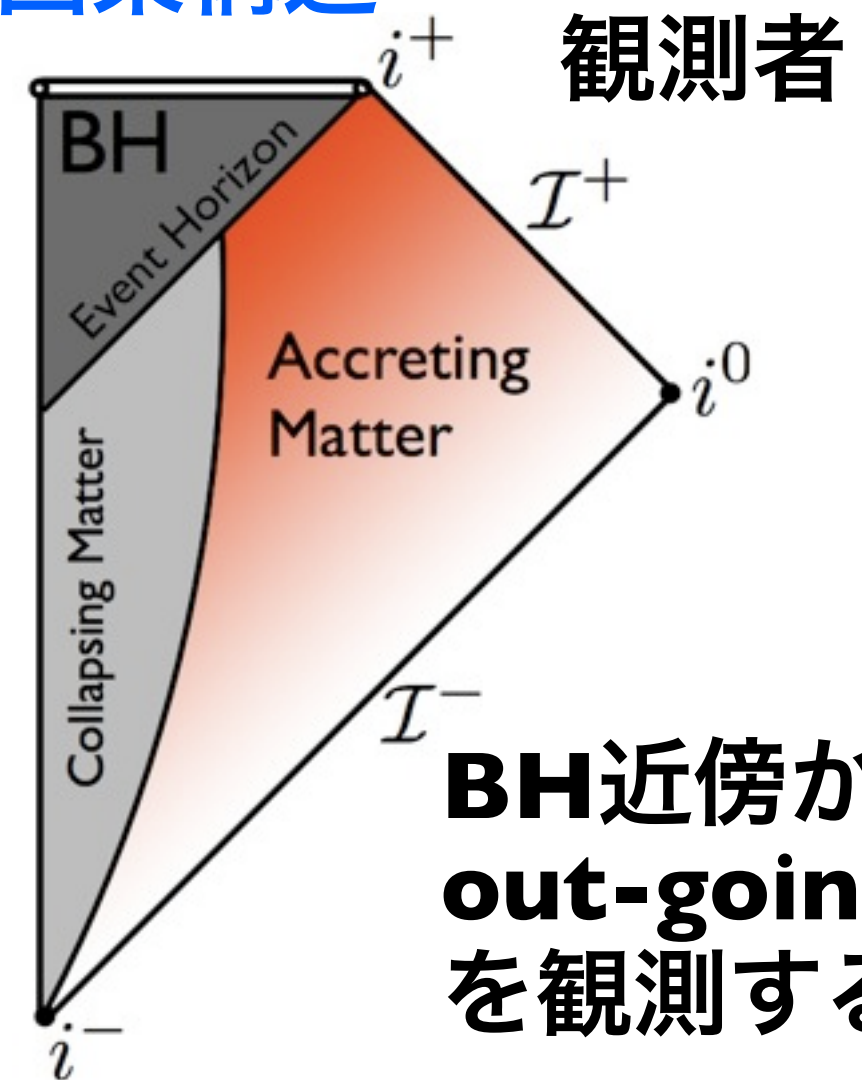
Q3. Kerr BHからのずれの効果は見えるのか？

BH shadow は光の中のシルエット

光学的に薄い降着流



因果構造



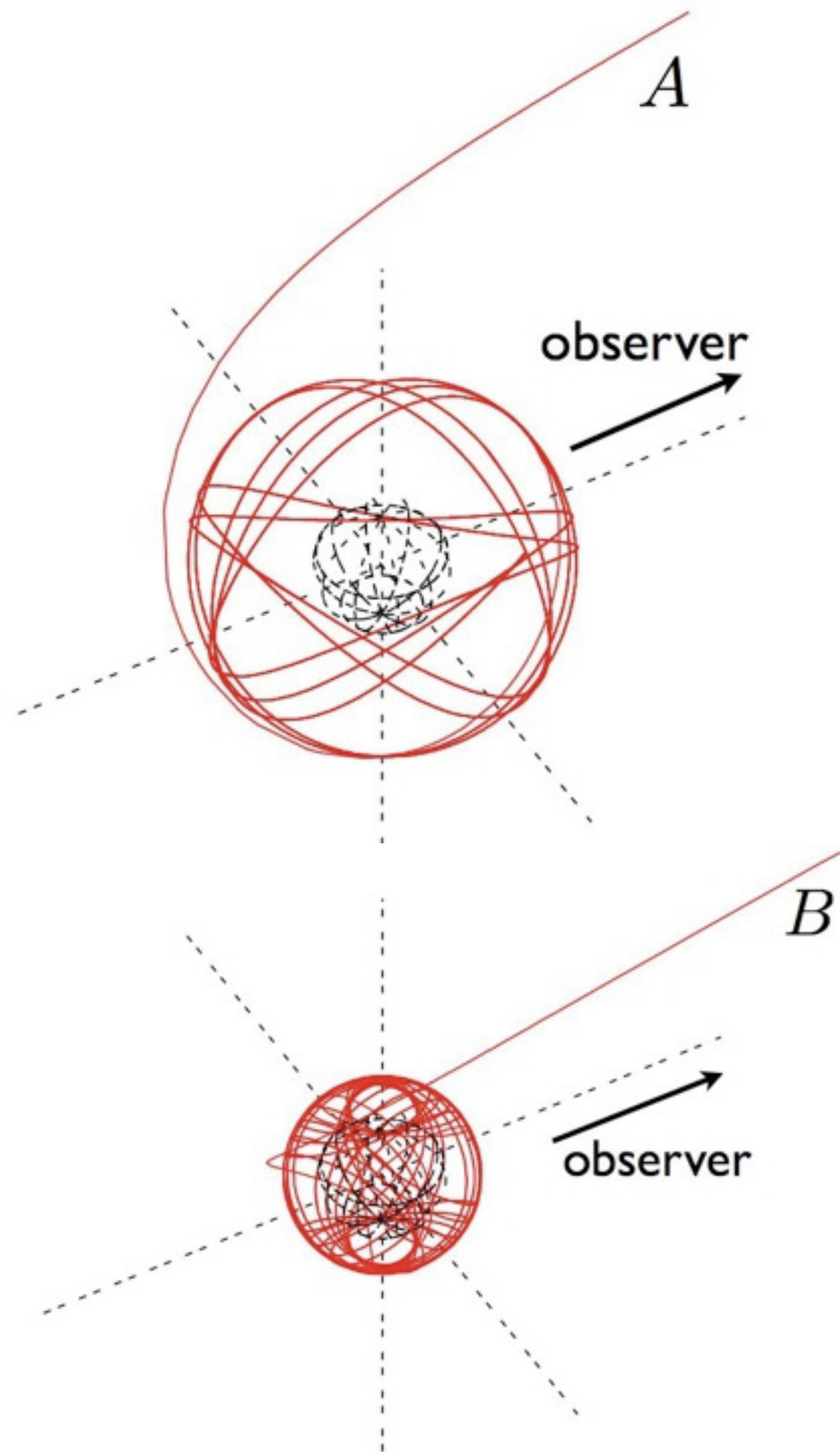
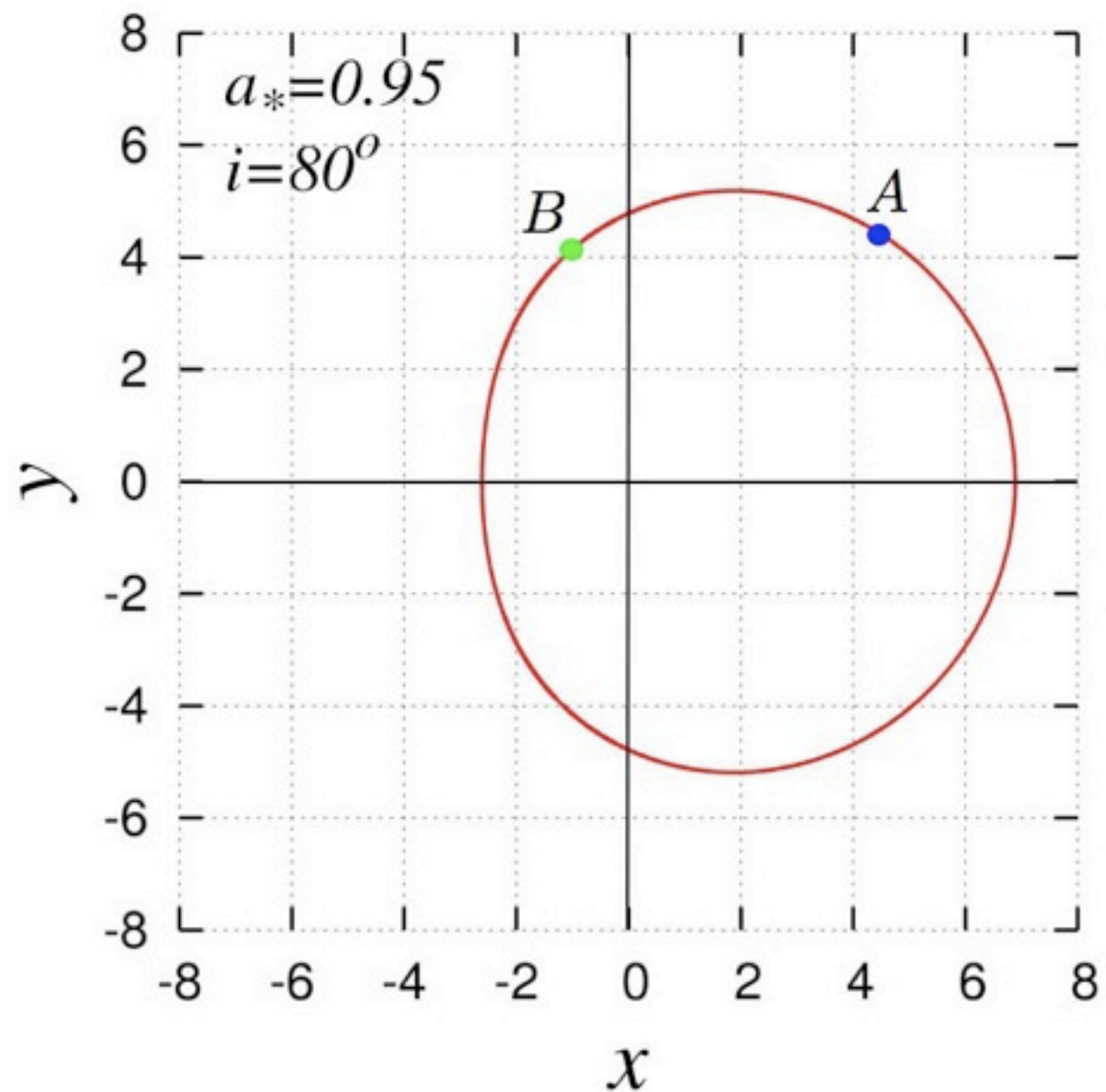
BH近傍から来る
out-going null
を観測する。

- 背景光の手前のBHのシルエットが見える。間接的に見る。
- 中心の低輝度領域をBH shadowと呼ぶ。
- 光学的に薄い波長での観測が必要（一般に暗いイメージ）。

最内不安定光子円軌道 Photon Sphere

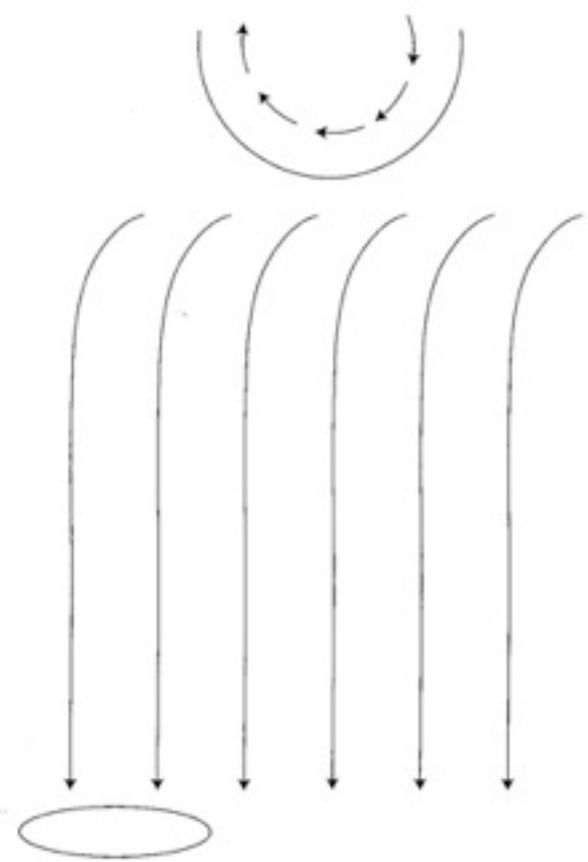
$$\dot{r}^2 \propto R(r)$$

$$R = \frac{dR}{dr} = 0, \quad \frac{d^2R}{dr^2} > 0 \text{ (unstable)}$$

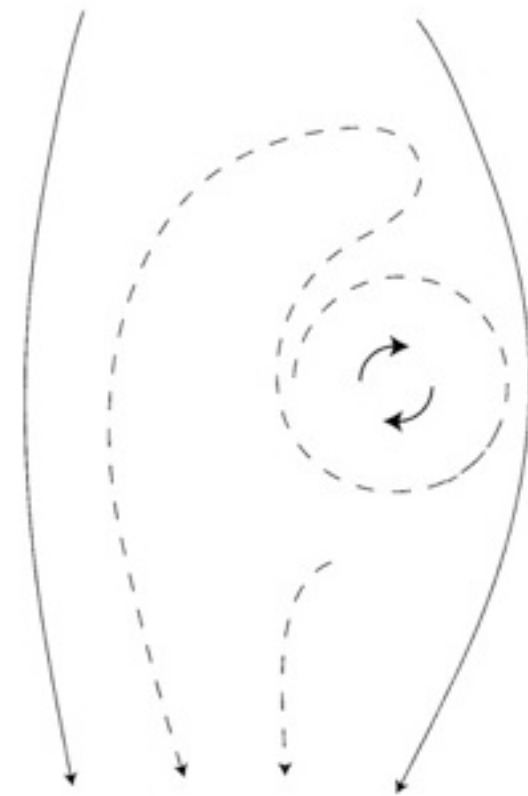


BH shadowと時空のひきずりの効果

1 次の効果

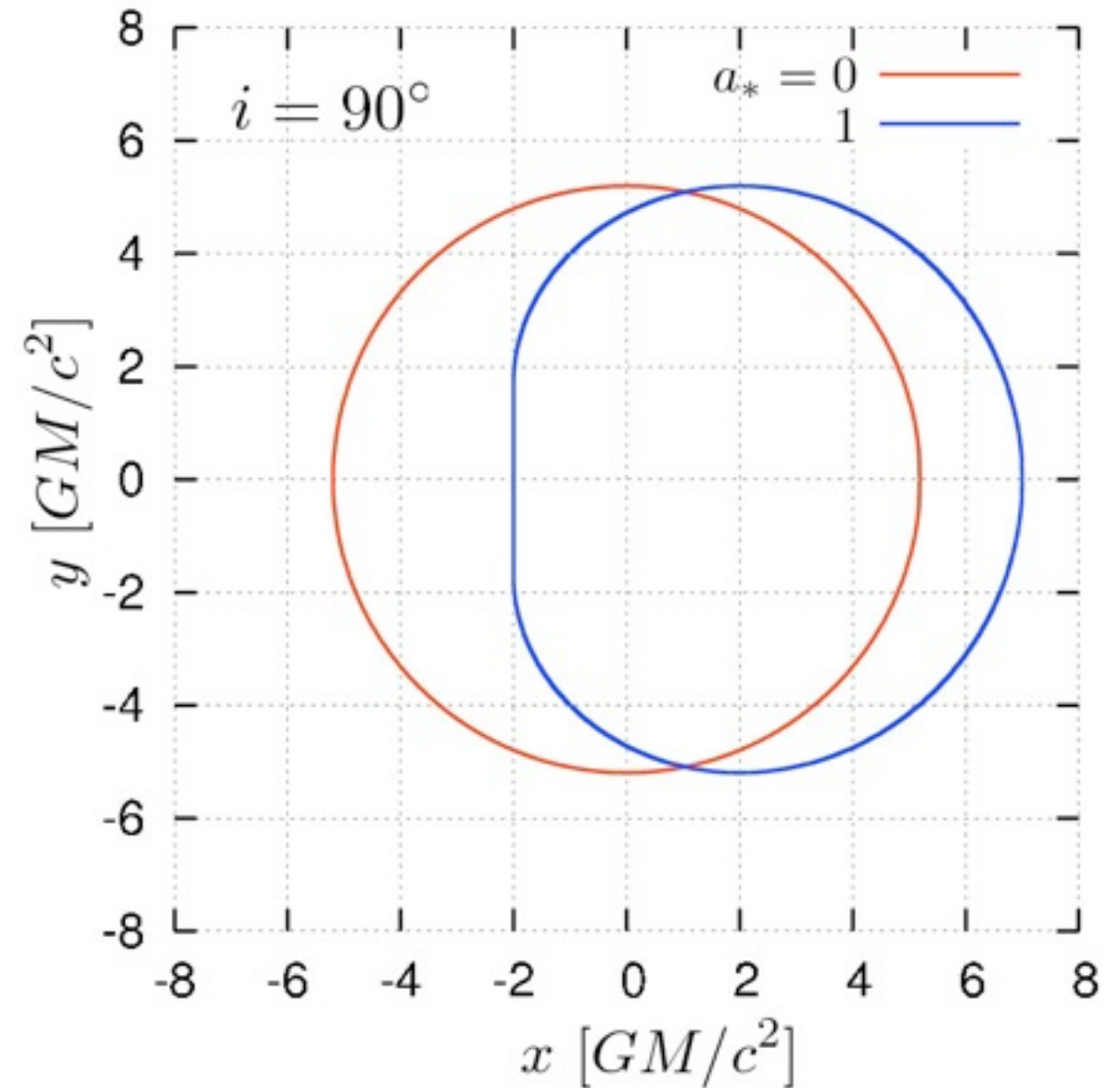


Kerr 時空



Lewis & Scott (2009)

BH スピン依存性

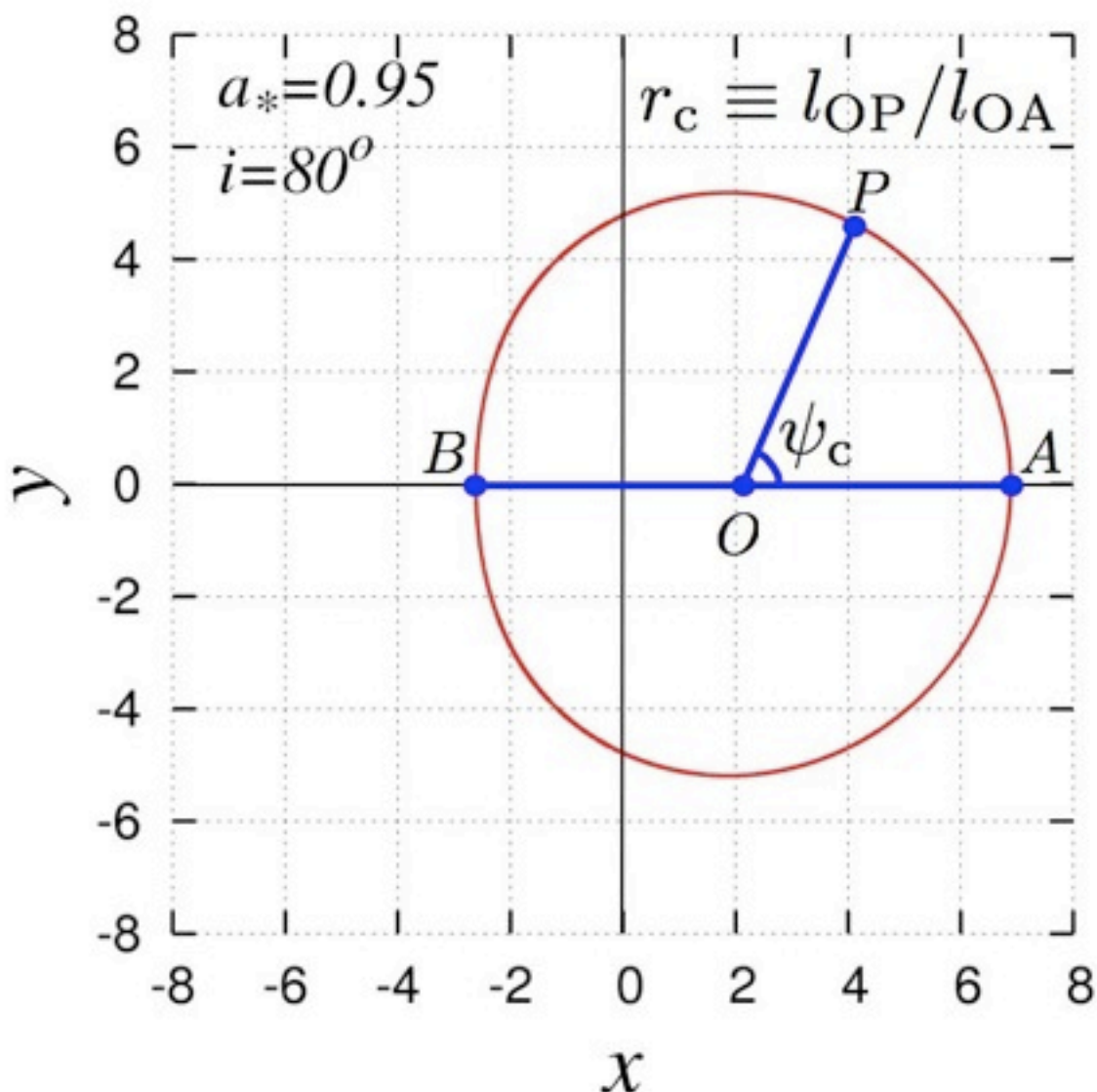


- **BH角運動量と異なる符号の角運動量を持つ光子の方が吸収断面積が大きい。** e.g. Bardeen (1972, 1973), Thorne (1974)
- **BH回転効果により、BH shadowは非対称になる。**

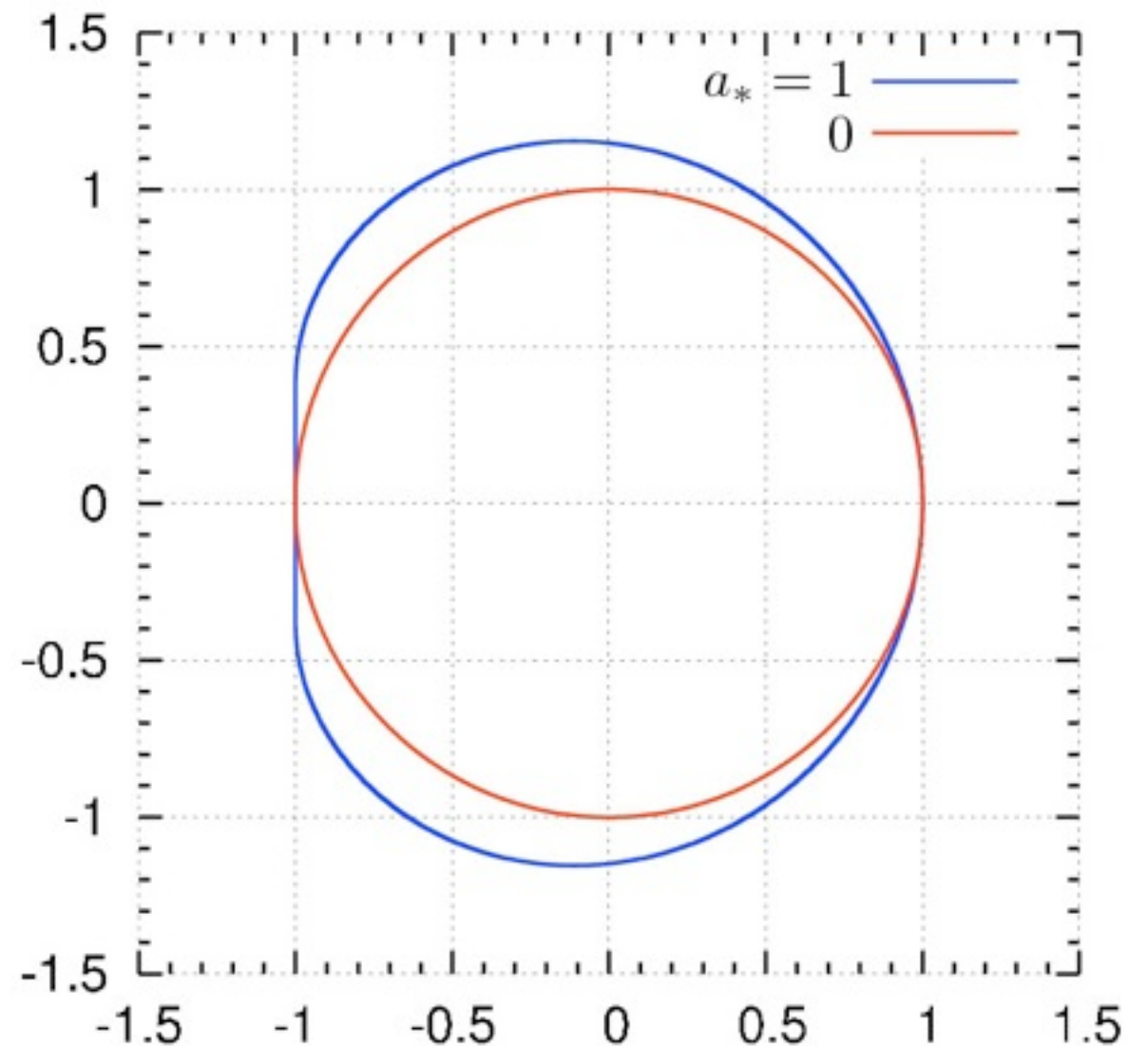
BH shadowの輪郭の定量化

- 質量と距離には測定誤差が存在→使わない。
- 影の大きさから M_{BH}/D に制限を与えられる。
- 定量化の方法は幾つかある。例：Hioki & Maeda (2009)

定量化パラメータの定義

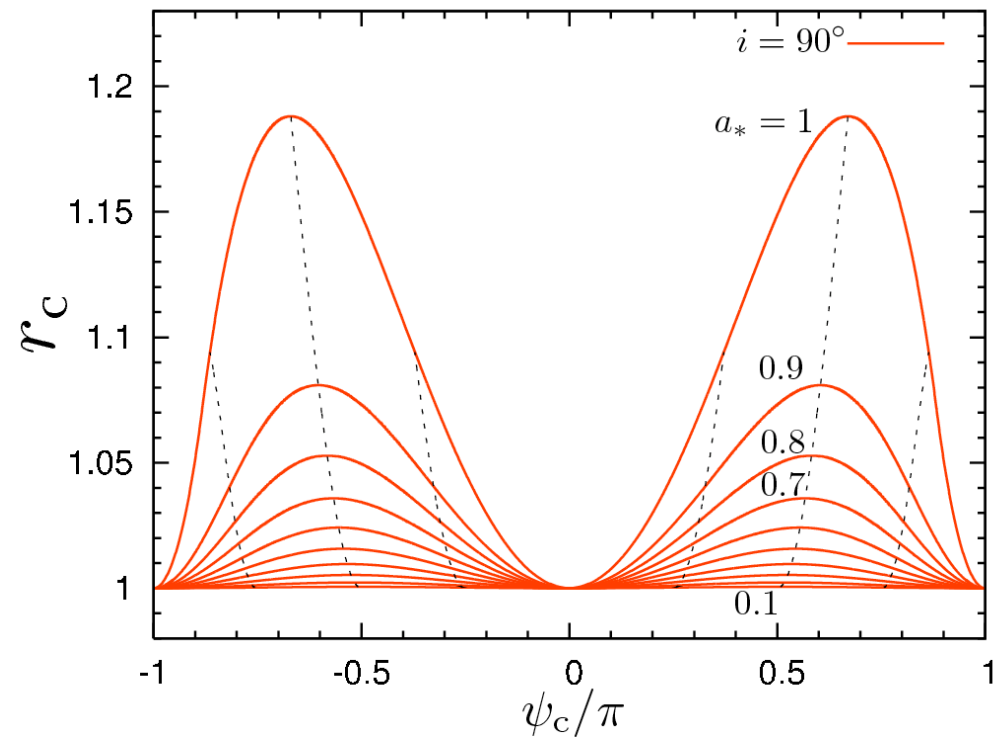


サイズを規格化したBH shadow

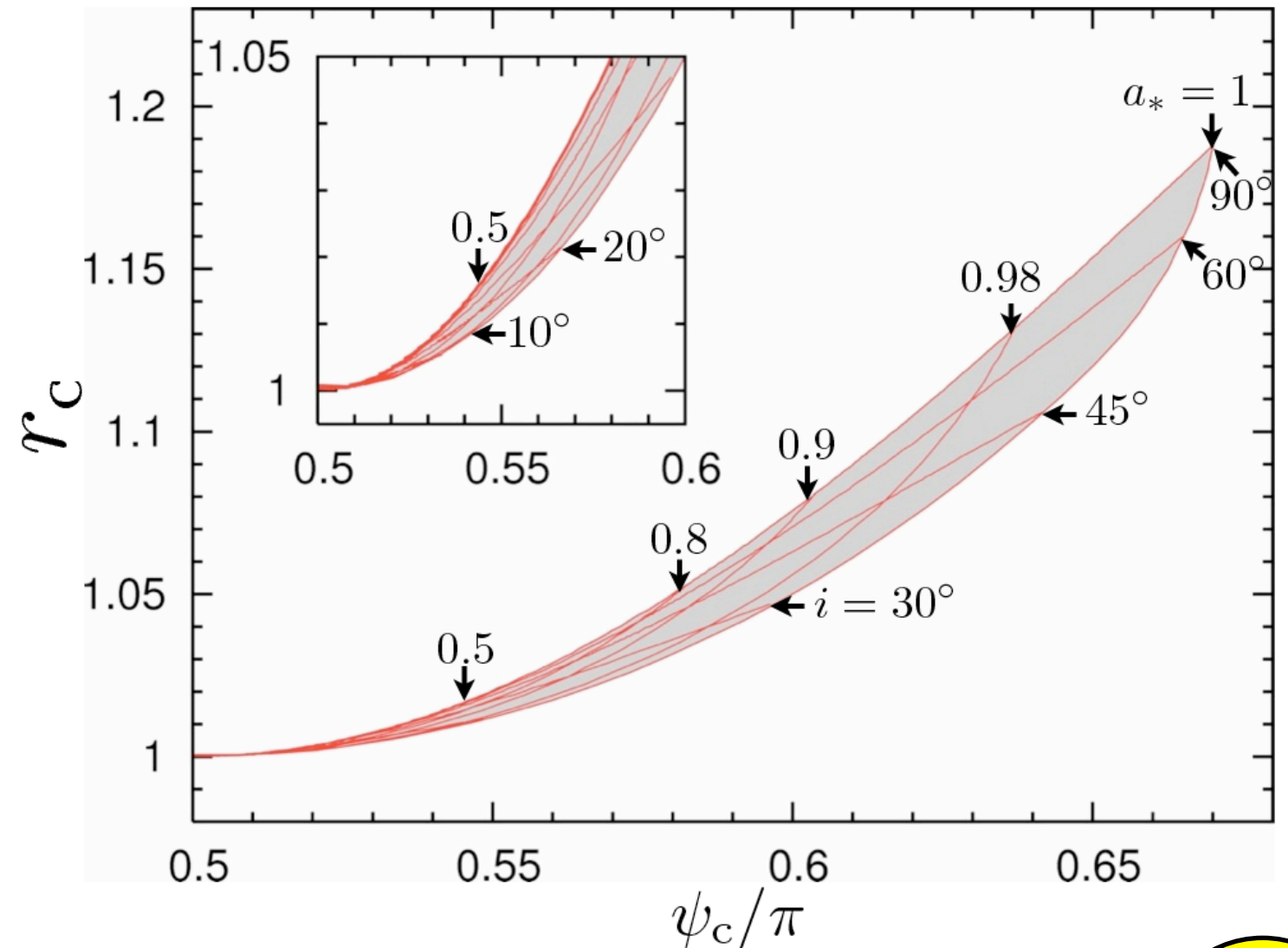


BHスピンとviewing angle

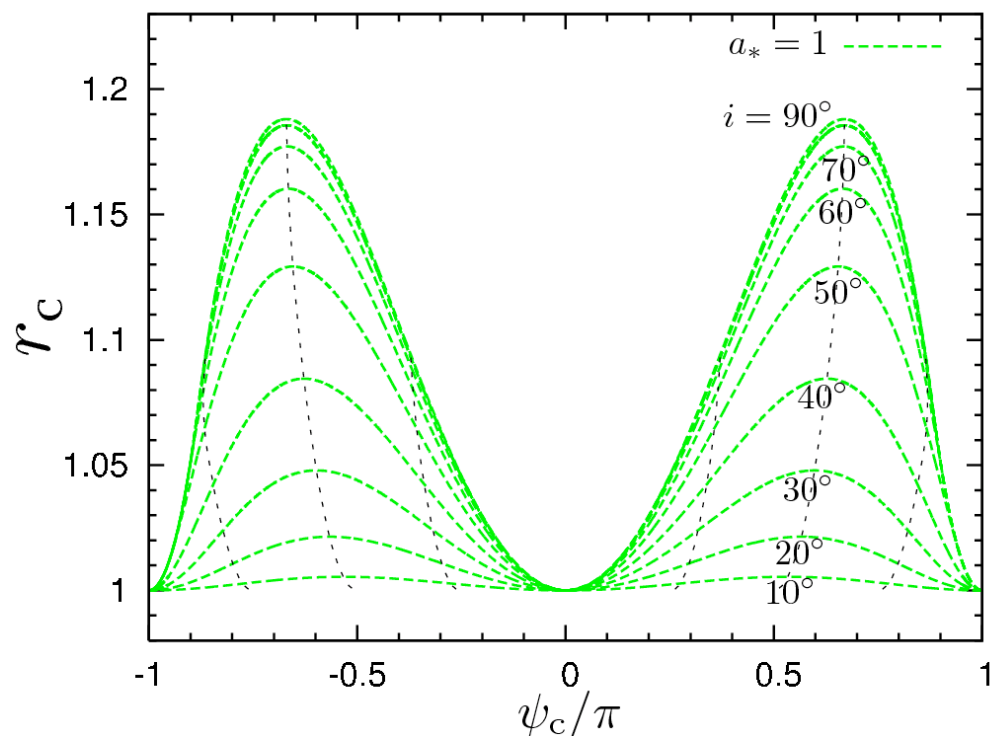
BHスピン依存性



r_c^{\max} の占める領域



viewing angle依存性



- BHスピンとviewing angleは縮退無く決められる。
- 小さいスピンとface-onに近い場合には観測精度的に厳しい。

限界

BH質量と距離の測定精度が良い場合

- 正確には、 M_{BH}/D の測定精度が誤差9.4%以下程度の場合。
- この場合、BH shadowの大きさの絶対値も使える。

- 例えば、**face-on**から観測された場合（右図）
- 形状は円だが、大きさがBHスピンの依存する。

● Sgr A*の現状

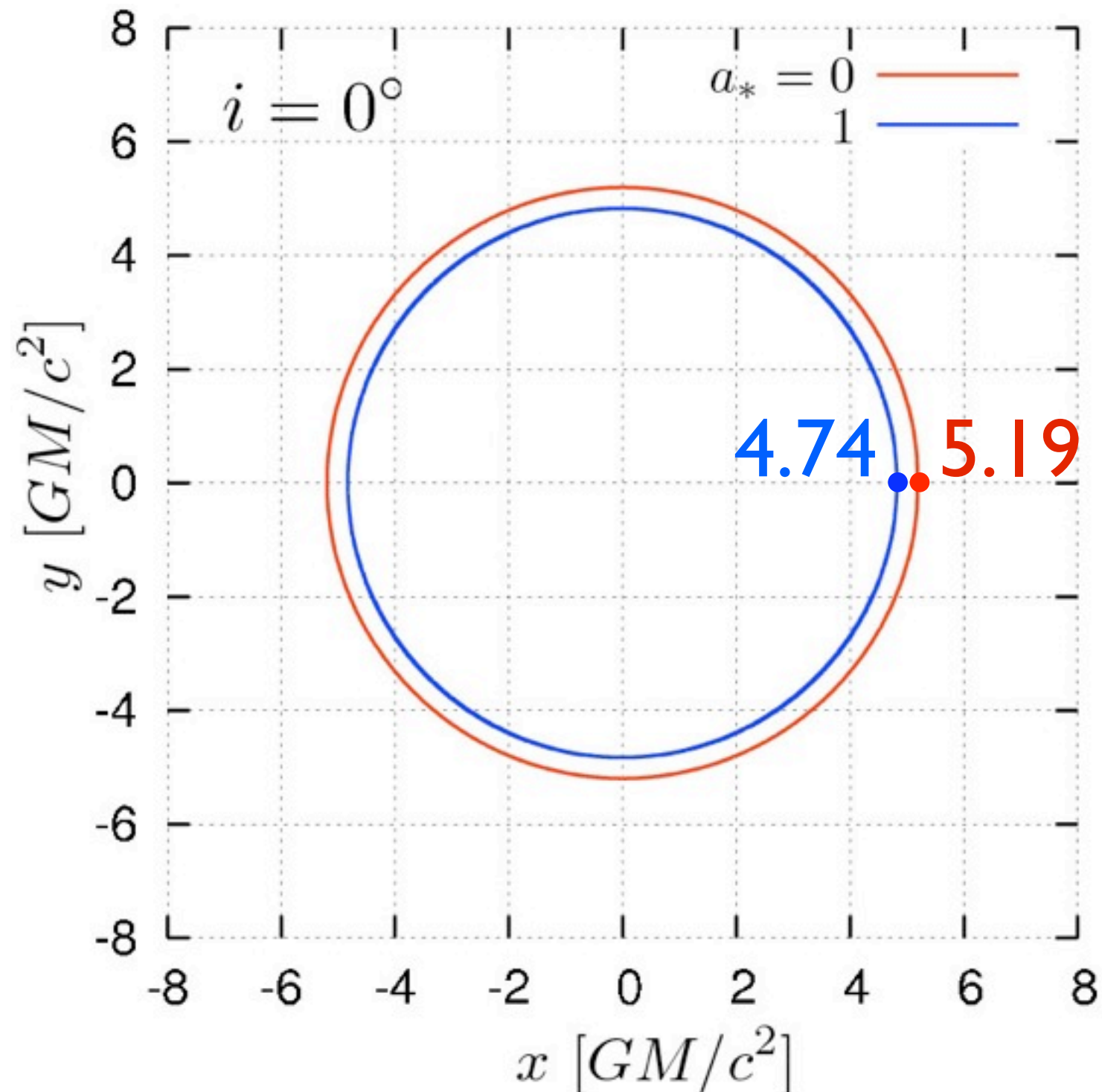
$$M_{\text{BH}} = 4.30 \pm 0.20|_{\text{star}} \pm 0.30|_{\text{sys}} \times 10^6 M_{\odot}$$

by VLT (Gillessen+, 2009, ApJ, 707, L114)

$$M_{\text{BH}} = 4.5 \pm 0.6 \times 10^6 M_{\odot}$$

by Keck 10m telescopes

(Ghez+, 2008, ApJ, 689, 1044)

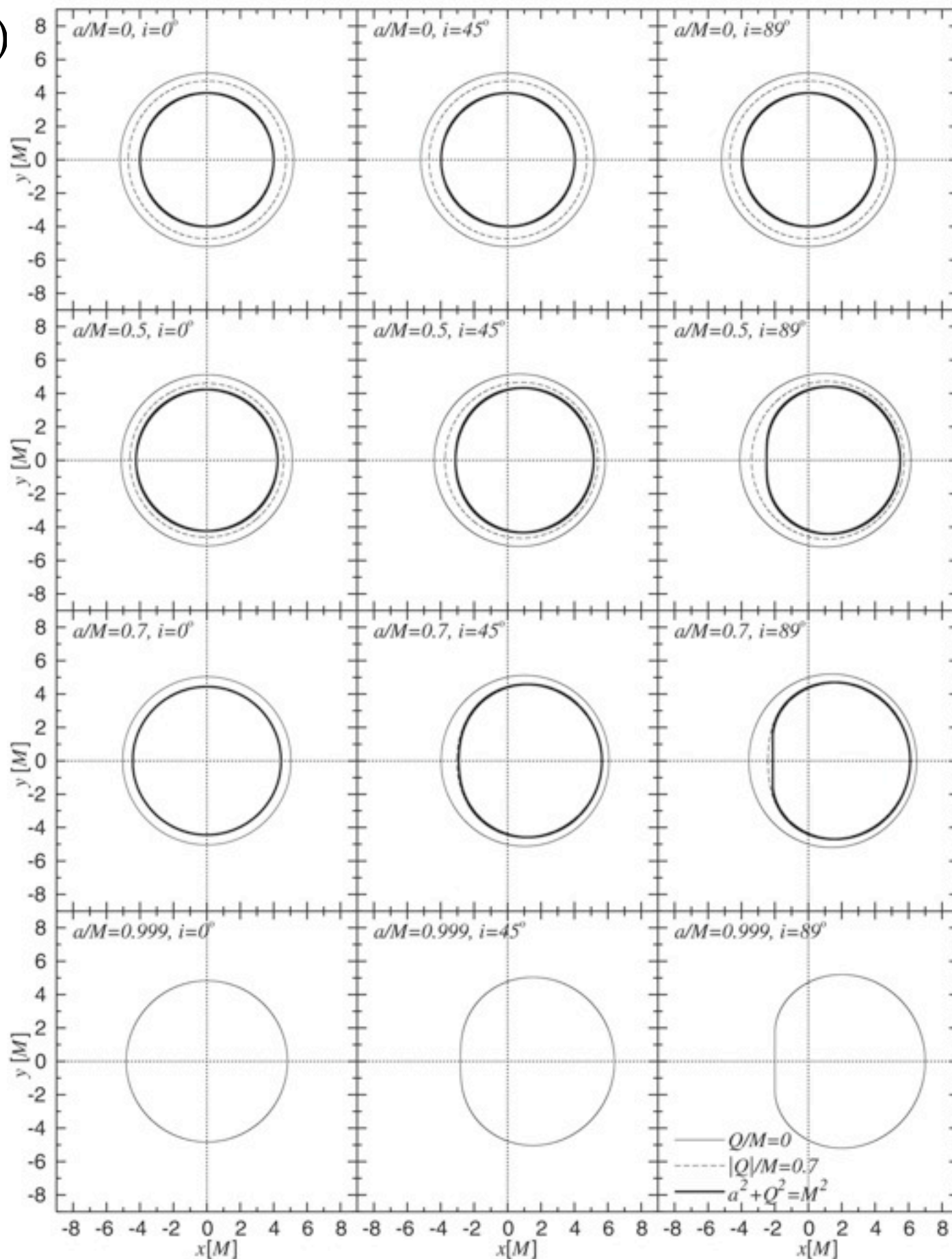


BH電荷

スピン・電荷・viewing angle依存性

RT(2005)

- BH天体の電荷はほぼゼロであると考えられる。
- BH shadowの形状からゼロであることを確認できる。
- 回転と電荷があるとホライズンが小さくなる。
- 全エネルギー
= 質量 + 回転 + 電荷
- スピン・電荷・viewing angleも縮退なく決まる。



Kerr時空からのずれの効果

：重力波研究から学ぶ

考えられるずれの原因

- **Kerr時空からのずれ (GRは正しい)**
- **重力理論のGRからのずれ**

ppE (parametrized-post Einsteinian)

- **様々な重力理論を扱う枠組**
Yunes & Pretorius (2009)
- **要請**
 1. metric theory of gravity
 2. weak-field consistency
 3. strong-field inconsistency
- **連星BH-like天体のGW**
>> ppEパラメーターで記述

重力場のmultipole structure

- 地球や月などで測定される

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

$$a_2 = (1082635 \pm 11) \times 10^{-9}, \text{ etc.}$$

- **Kerr BH : No-hair定理**

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

(M_l, S_l : mass, current multipoles)

- **Kerr BH からのずれの効果はEMRIからのGWに現れる。**

e.g. Glampedakis & Babak (2006); Brink (2008); Gair+(2008); Apostolatos+(2009); Yunes & Pretorius (2009); Viegeland & Hughes (2010)

- **BH shadow計算に適した時空計量は今はない (?) 。**

Kerr時空からのずれの効果

: BH shadowの場合のテスト計算

ヌル測地線 (1次摂動)

Kerr 時空では、 $\psi_1 = \gamma_1 = \omega_1 = 0$

$$ds^2 = -f e^{2\psi_1} (dt - \omega_K e^{\omega_1} d\phi)^2 + e^{-2\psi_1} f^{-1} \Delta \sin^2 \theta d\phi^2 + \rho^2 e^{2\gamma_1} \left(\frac{dr^2}{\Delta} + d\theta^2 \right)$$

$$\rightarrow p_\theta^2 + \frac{1}{\sin^2 \theta} (L - Ea \sin^2 \theta)^2 = -\Delta p_r^2 + \frac{[-(r^2 + a^2)E + aL]^2}{\Delta} - \delta\mathcal{K} \quad (\equiv \mathcal{K})$$

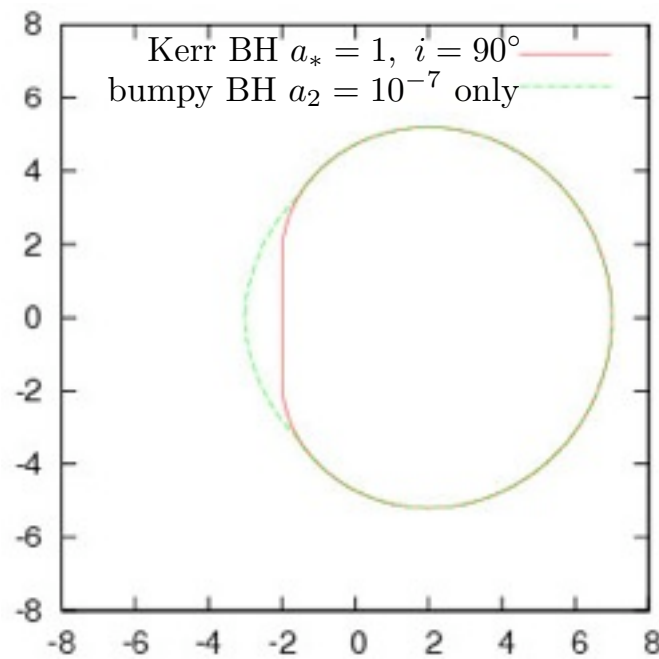
$$\delta\mathcal{K} = -(2\gamma_1 + g_1) \frac{(L - Ea \sin^2 \theta)^2}{\sin^2 \theta} + 2\psi_1 \frac{L^2 - E^2 a^2 \sin^4 \theta}{\sin^2 \theta} - (2\psi_1 + \omega_1) 8M^2 r^2 \left(\frac{1}{f\rho^2} - \frac{1}{\Delta} \right) E^2$$
$$+ (2\gamma_1 + g_1) \frac{[-E(r^2 + a^2) + aL]^2}{\Delta} - 2\psi_1 \frac{a^2 L^2 - E^2 (r^2 + a^2)^2}{\Delta} + (2\psi_1 + \omega_1) 2aEL \frac{2Mr}{\Delta}$$

- 一般に変数分離できない (ある極限ではできる)。

例: Kerr BH + 4重極成分

赤: Kerr BH

緑: Kerr +
4重極

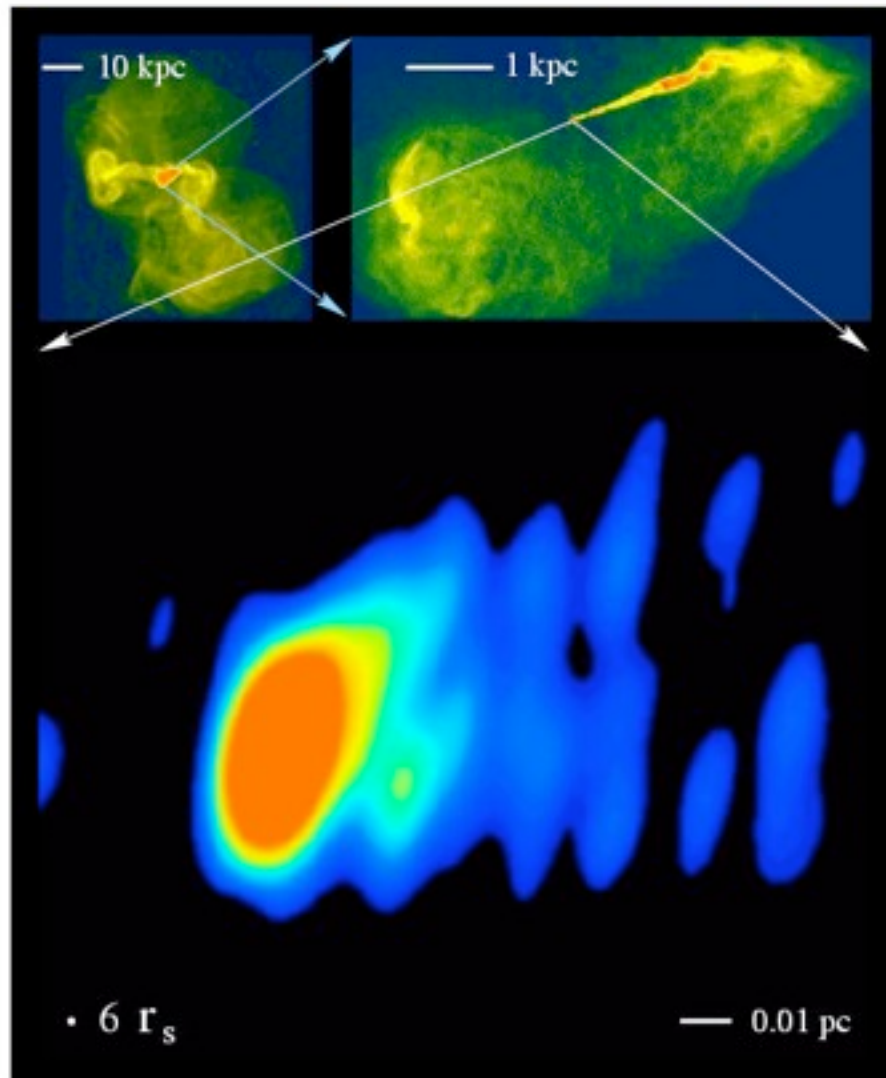


- Kerr時空からのずれの効果は BH shadowの形状に現れうる。
→ 一般に高精度観測が必要。
- GW研究者等との総合的な研究が望まれる。

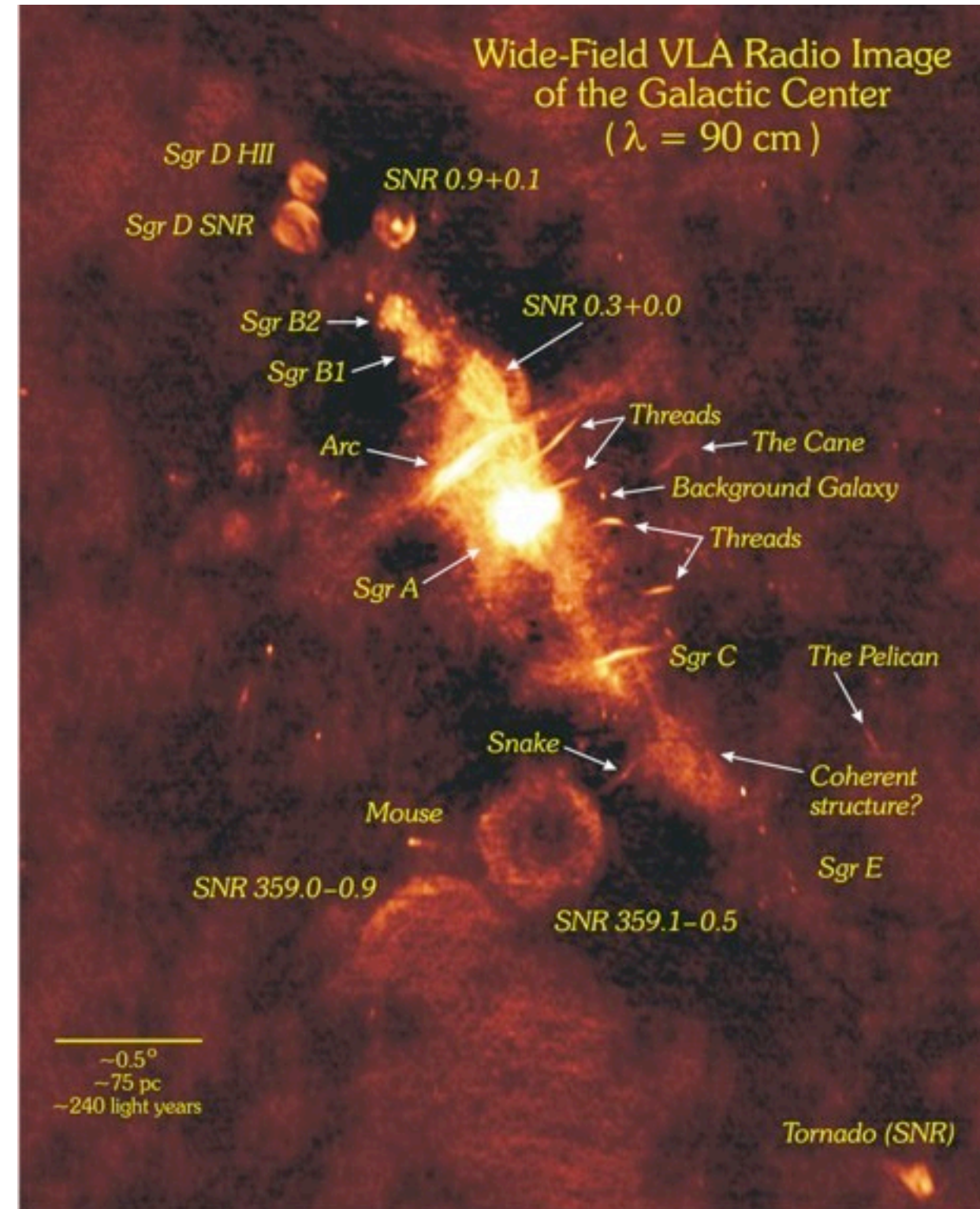
限界

BH shadowの観測可能性：Key Questions

- Q1. 観測ターゲット天体は？
- Q2. 観測波長は？
- Q3. 計画中の干渉計観測でできるサイエンスは？



<http://www.nrao.edu/pr/1999/m87/m87.junoretal.jpg>



http://images.nrao.edu/Galactic_Sources/Galactic_Center/326

観測ターゲット天体

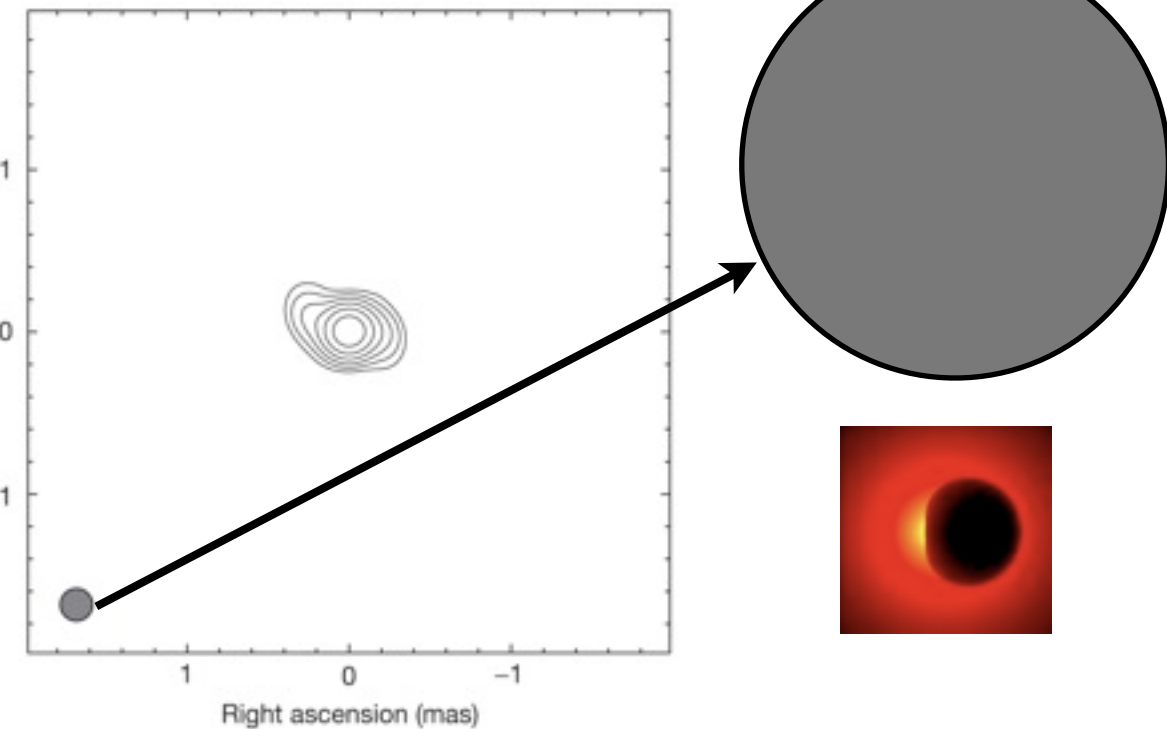
Name	Other Name	D [Mpc]	M_{BH} [$10^8 M_{\odot}$]	θ_g [μas]	$S_{15\text{GHz}}$ [mJy]	Remarks
NGC 3031	M 81	3.63	0.7	0.93	164.8	
NGC 3627	.....	6.6	0.9	0.27	2.9	
NGC 3998	.....	21.6	5.8	0.53	85	S at 5 GHz
NGC 4143	.....	17	3.7	0.44	10	
NGC 4261	.....	35.1	7.5	0.43	6230	S at 8.4 GHz
NGC 4278	.....	9.7	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

VSOP-2 Science Working Group, April 2007, “VSOP-2 Science Goals”
<http://www.vsop.isas.ac.jp/vsop2e/>

現在までの観測

イメージ@86GHz(=3.5mm)

Shen+ 2005, Nature, 438, 62

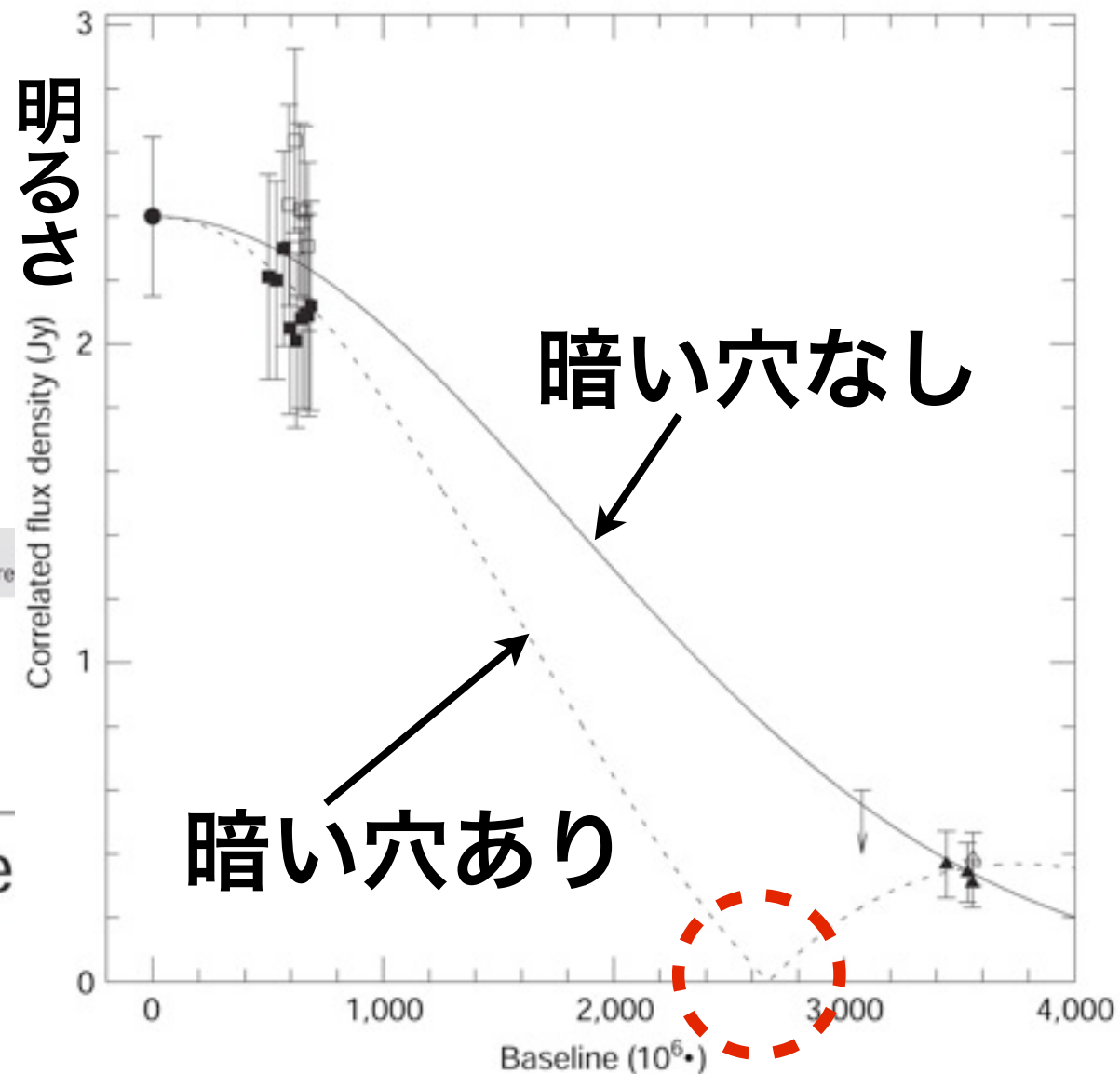


電波ビジビリティ@230GHz (=1.3mm)

Doeleman+ 2008, Nature, 455, 78

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

イメージ (underlined in red) 観測データ (underlined in blue)



Miyoshi+(2004) **ヌル点**
= **BH shadow**の証拠

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

LETTERS

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

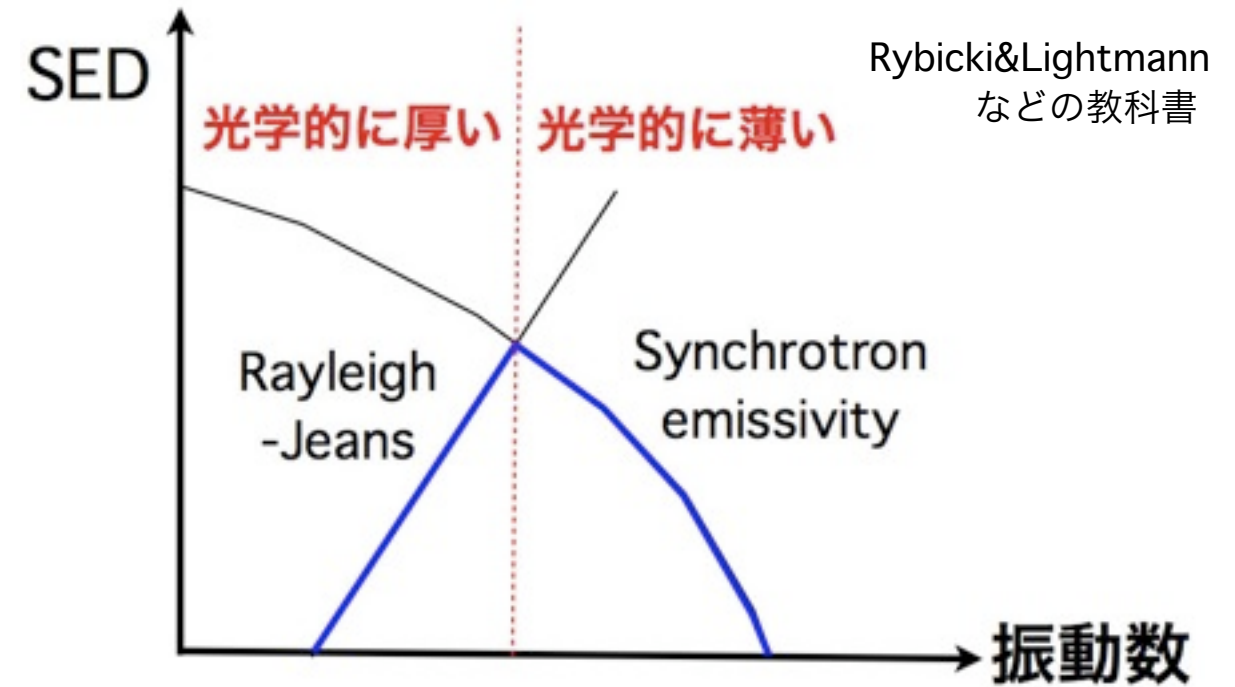
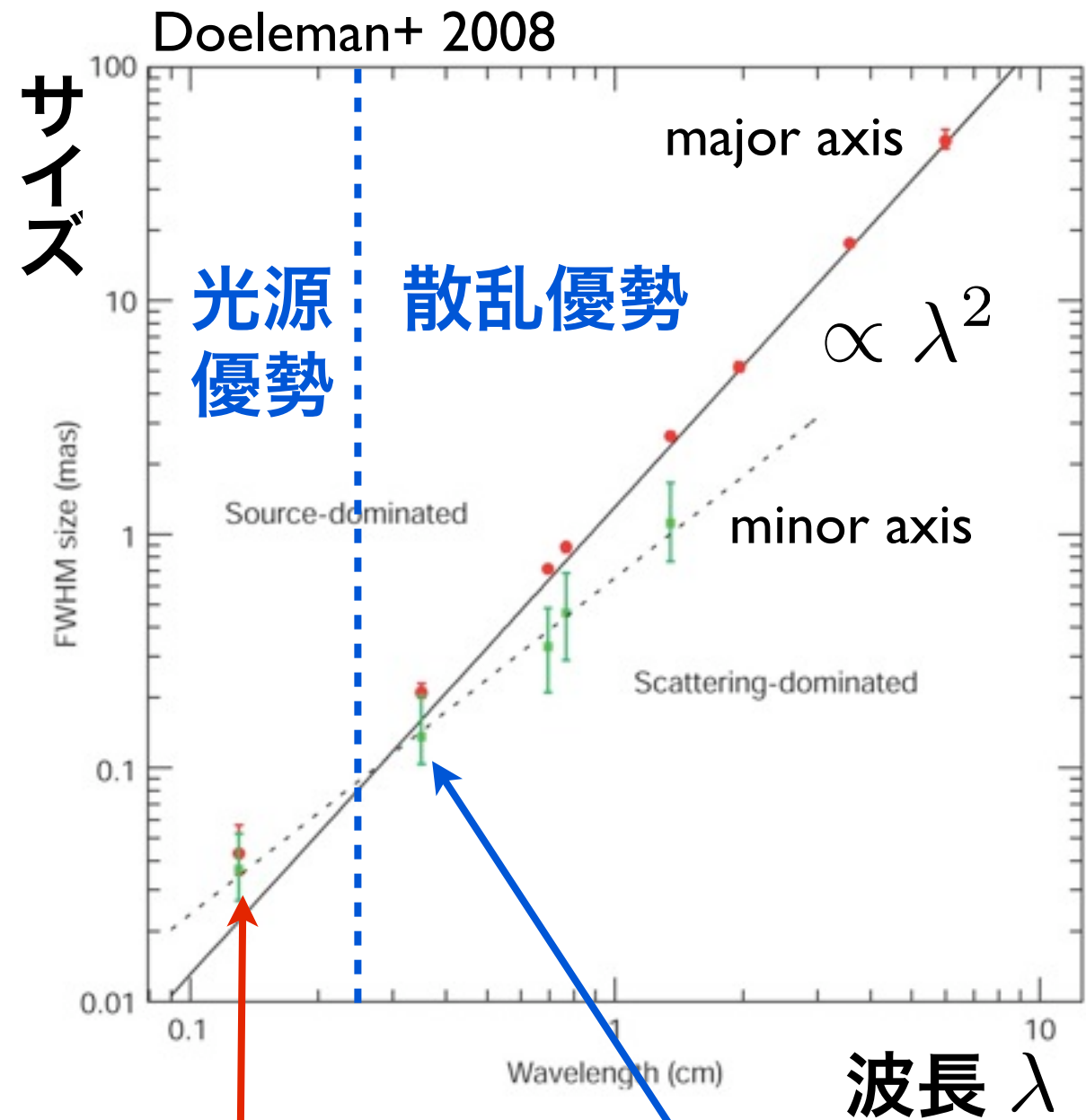
Sheperd S. Doeleman¹, Jonathan Weintroub², Alan E. E. Rogers¹, Richard Plambeck³, Robert Freund⁴, Remo P. J. Tilanus^{5,6}, Per Friberg⁵, Lucy M. Ziurys⁴, James M. Moran², Brian Corey¹, Ken H. Young², Daniel L. Smythe¹, Michael Titus¹, Daniel P. Marrone^{7,8}, Roger J. Cappallo¹, Douglas C.-J. Bock⁹, 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

Sgr A*で光学的に薄いと予想される波長

サイズー波長関係

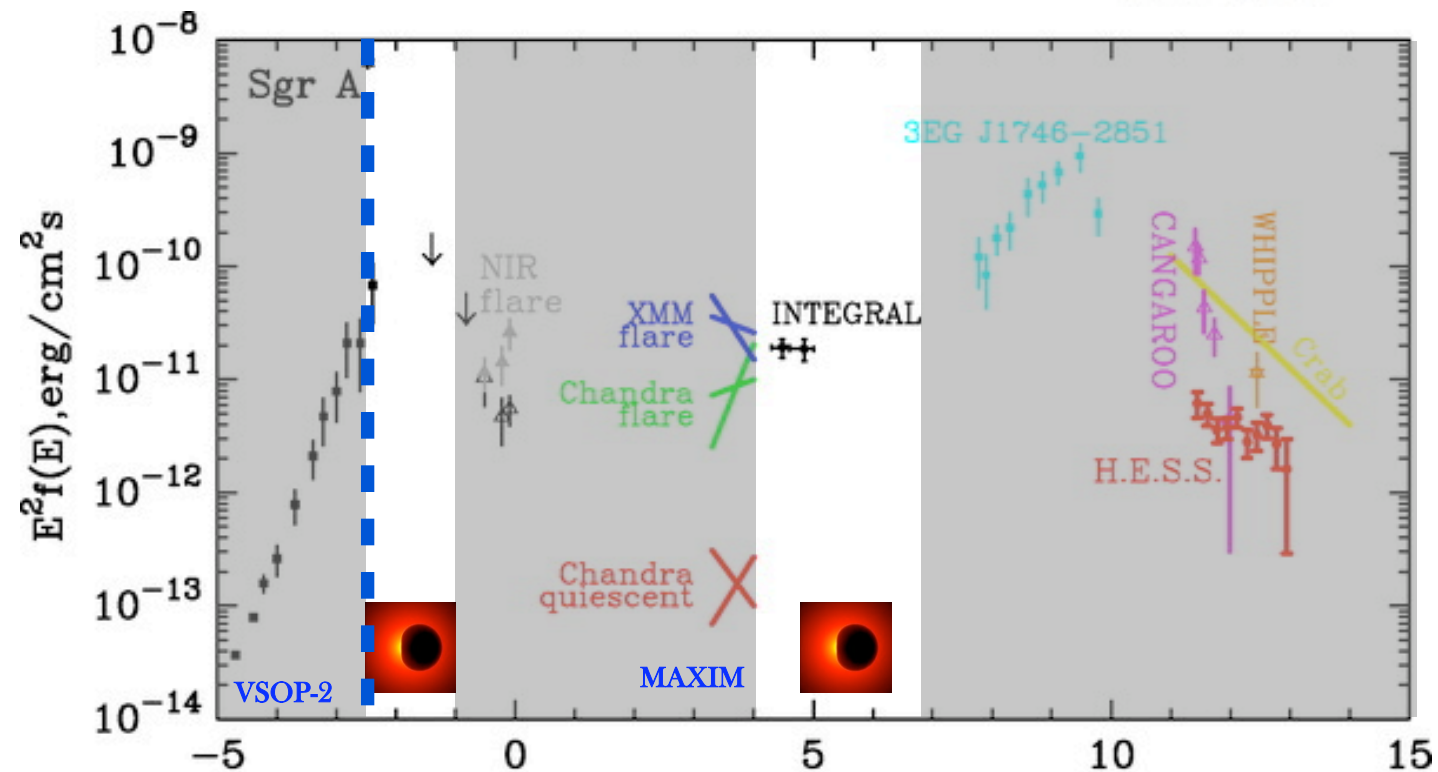
エネルギー・スペクトル

● Synchrotron Peak



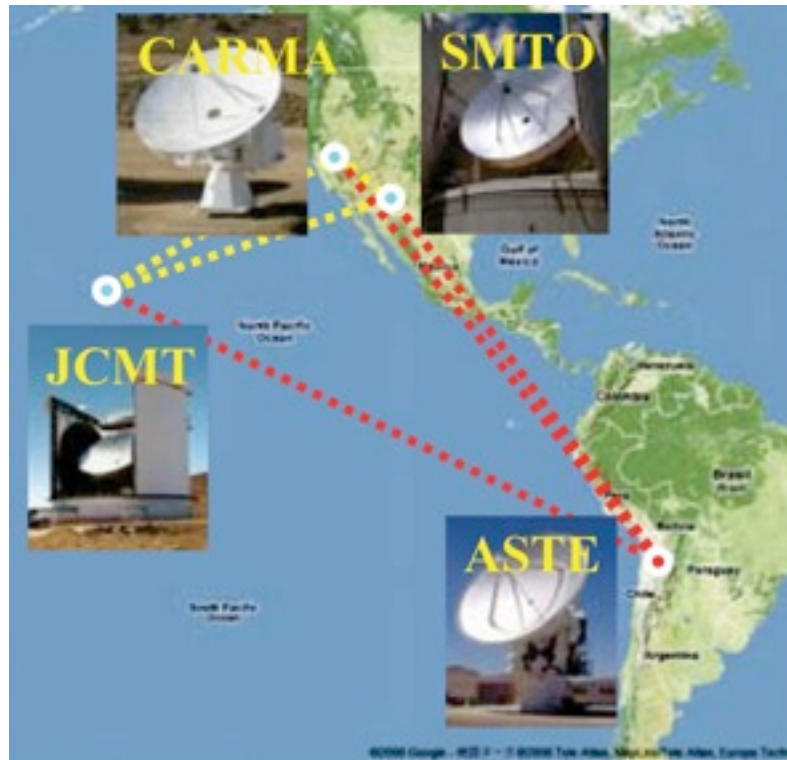
電波ビジビリティ
by Doeleman+2008

イメージ
by Shen+2005



将来の観測計画

Doeleman等 + ASTE



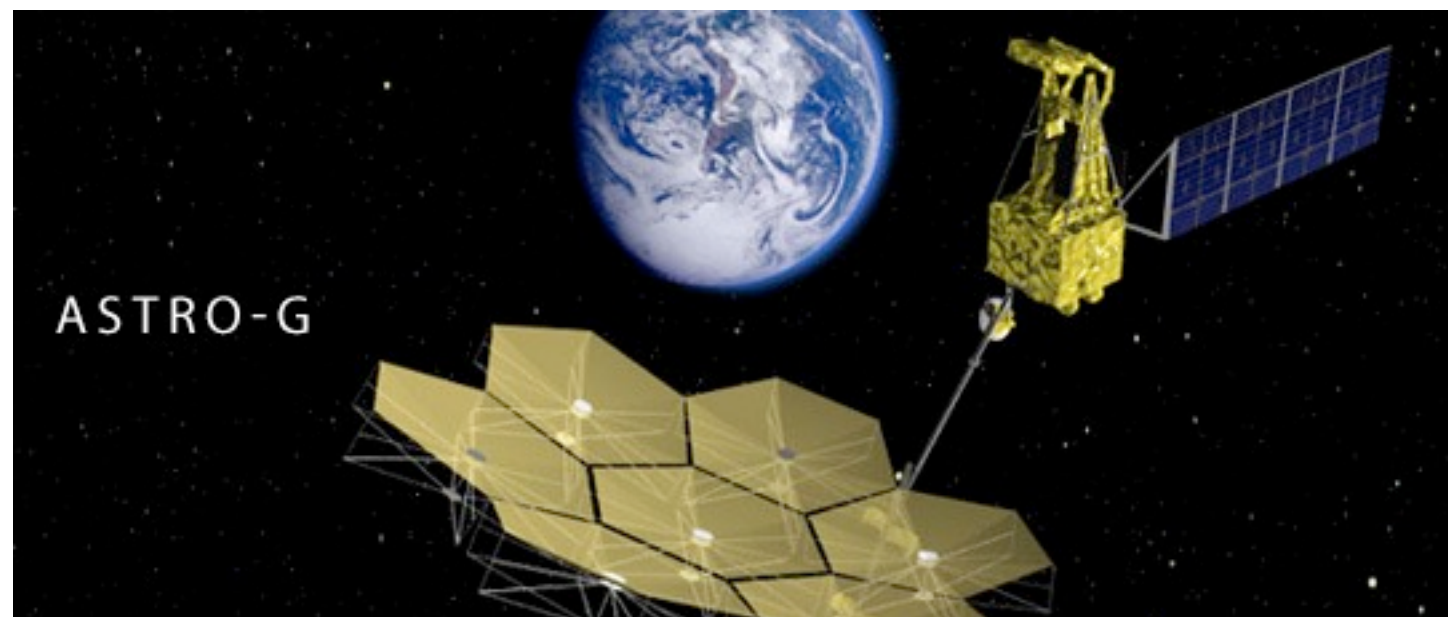
本間希樹さん(NAO)のプレゼンより

Horizon Telescope計画



三好真さん(NAO)のプレゼンより

Astro-G/VSOP-2計画



詳しくは、
三好さんのトークで。

<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/astro-g/index.shtml>

将来の干渉計観測とサイエンス



現在：Sgr A*の電波ビジビリティを得た。

Doeleman+
(2008)

* BHホライズンサイズの光源の検出

step 1. ビジビリティのヌル点の検出

* BHの影（低輝度コンパクト領域）の検出

step 2. “暗い影”のイメージの検出

* BHの“黒い穴”の写真が撮られる

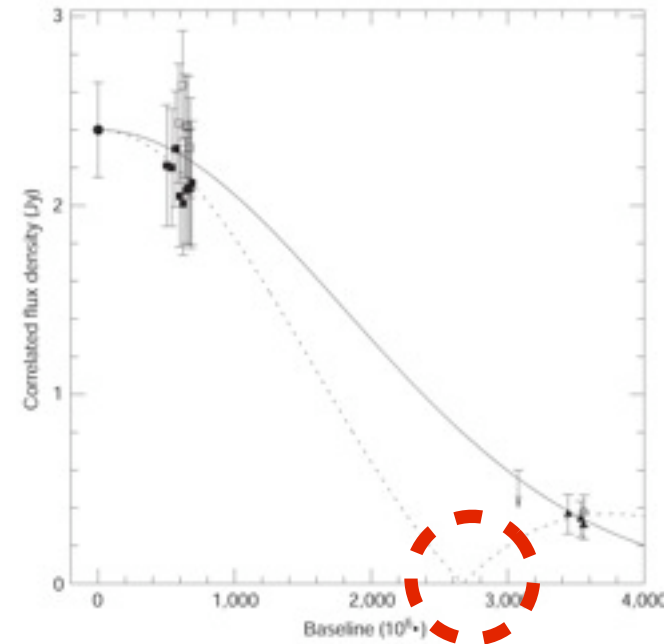
step 3. “影の形状の円形からのずれ”の検出

* BHの回転の証拠（BHスピンとviewing angleに制限）

step 4. “影の形状”の精密測定

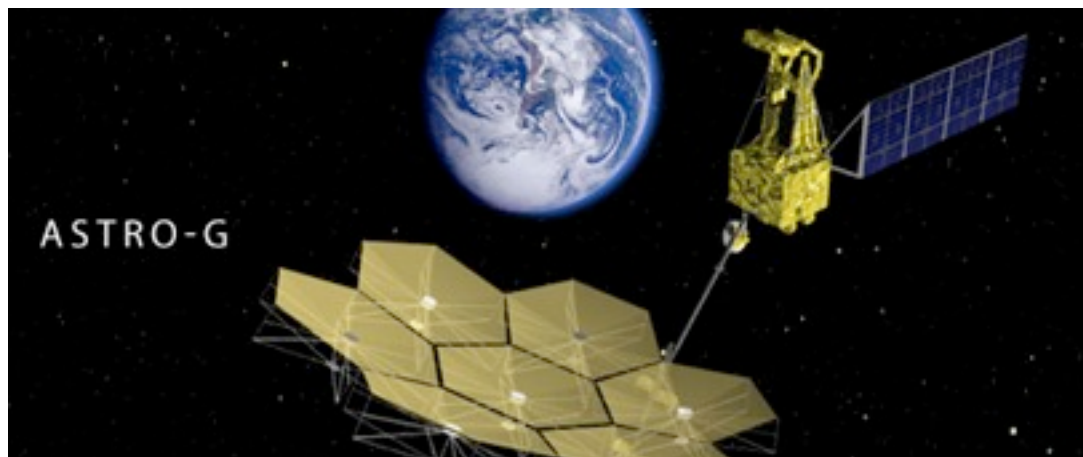
* BHスピンとviewing angleの決定（ゼロ電荷も確認）

* Kerr時空からのずれの有無を確認（No-hair定理の検証）



ヌル点

BH Shadow Daofu !



X線鉄輝線とBH時空：Key Questions

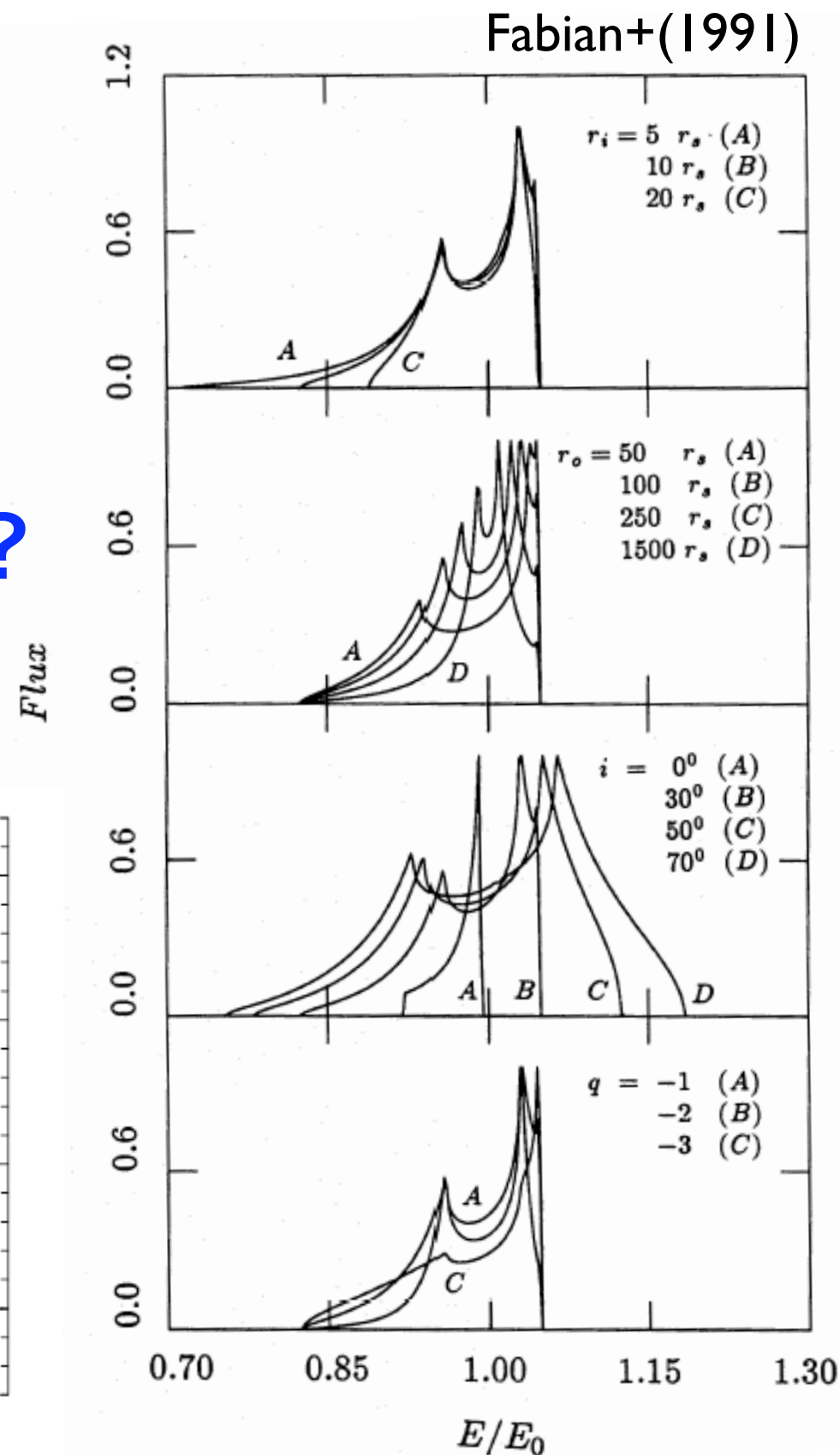
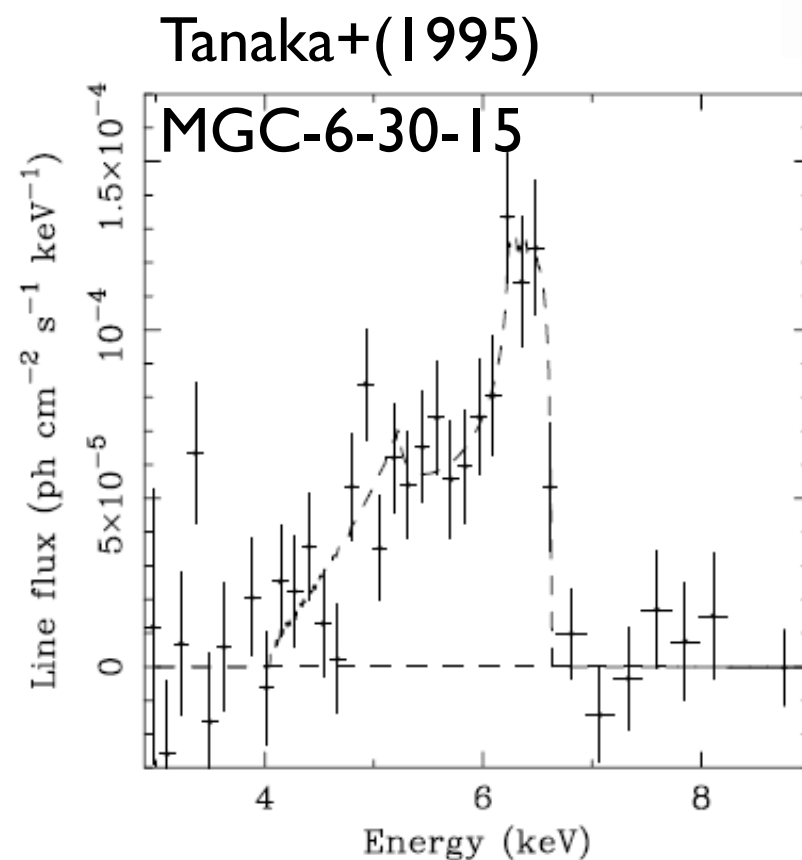
Q1. BH時空計量は測定できるのか？

Q2. 現時点で未解決の問題は何か？

Q3. 今後、必要な研究は何か？

Q4. 将来の観測装置でわかることは？

詳しくは、
根来さんのトークで。



連続成分の不定性はアキレス腱か？

恒星質量ブラックホールの回転を測る

牧島 一夫^{1,2}・山田 真也¹

¹ 東京大学理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

² 理化学研究所宇宙放射線研究室 〒352-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

e-mail: maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

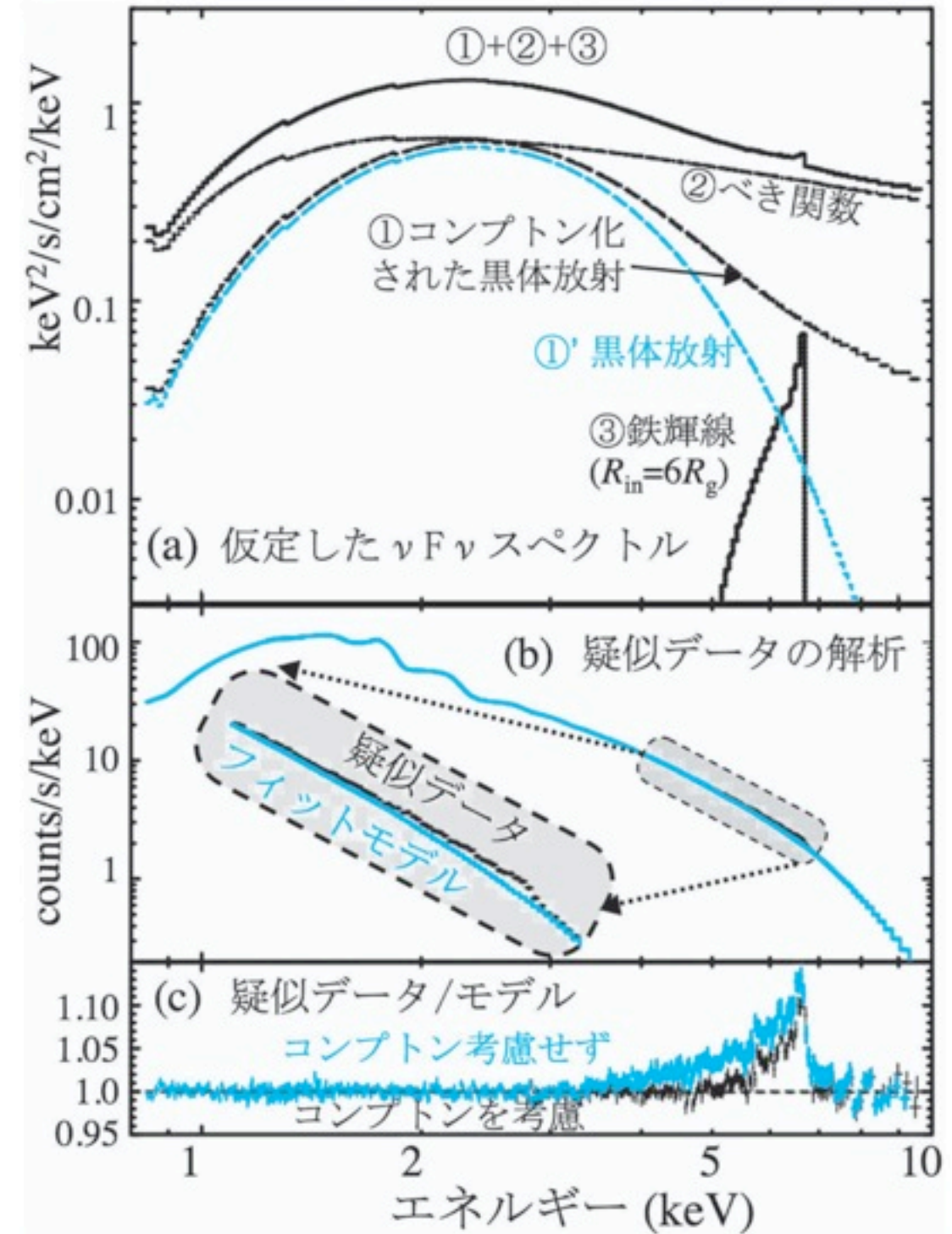
牧島&山田 (天文月報2010年3月号)

降着円盤からの X 線を利用して、質量降着する恒星質量ブラックホールの角運動量（回転）を測定する試みが展開されている。その方法の一つは、降着円盤の内縁半径を推定し、それをブラックホールに最も近い安定円軌道の半径とみなす方法である。それとは独立に、X 線スペクトル中に現れる広がった鉄輝線のプロファイル測定し、それが相対論的效果で広がっていると考えると、時空構造を導く方法も盛んに用いられつつある。しかし現時点で、これらの方法の答えは必ずしも一致せず、議論が続いている。慎重なデータ解析や、新しい観測装置による進展に期待したい。

- 鉄輝線プロファイルは、観測スペクトルから連続成分を引くことで得られる。
- 連続成分が変わると推定される BH スピンの値が変わる。

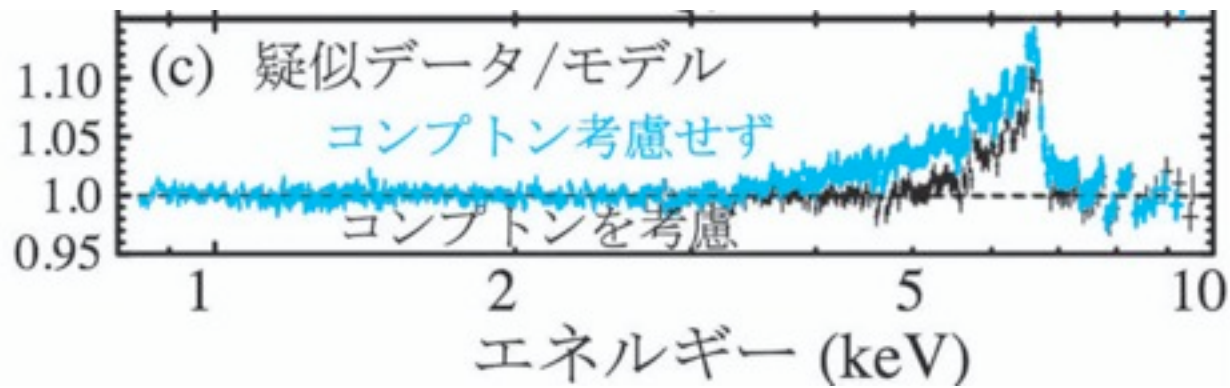
cf. Yamada, Makishima+, 2009, ApJ, 707, L109

- この問題が解けないと BH スピンを測定できない。

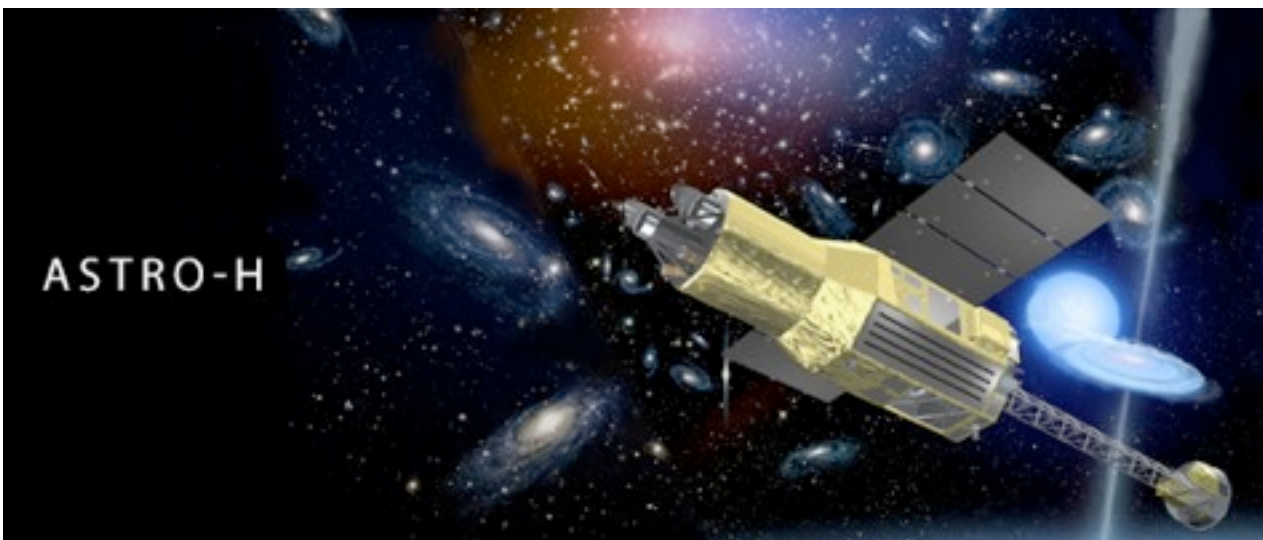


連続成分問題を解くには・・・

観測的アプローチ



- 時間変動スペクトルから鉄輝線と連続成分の差を見つける（存在すれば）。
→ **Astro-H**に期待



<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/astro-h/index.shtml>

<http://astro-h.isas.jaxa.jp/>

理論的アプローチ

- 真面目に解くことは超難問。
- 様々な不定性・・・
光子源、コロナ分布、
電離度、円盤最内縁の位置、
などにKerr時空の効果が
どう関連しているのか？
- Kerr時空中で、最低限
電子Boltzmann方程式＋
Maxwell方程式＋電離度進化
を解く必要がある。
→ 宝の山も沢山ある (たぶん)
- 計算機パワーと相談しながら
解いて行くことになる。

まとめ

- **BH shadow**から時空計量は決められる。
- **Kerr**時空からのずれもあれば検出できるかも。
(理論計算は完成していない)
- 干渉計の観測計画は複数ある。
- **Sgr A***では電波ビジビリティのヌル点の検出が次の宝。
→ **BH shadow**の初検出
- **M87**では**Astro-G**とサブミリ干渉計に期待。
- 鉄輝線からの**BH**スピン測定方法は確立していない。
- 特に、連続成分問題を解決したい。
→ **Astro-H**観測などの新しいデータと理論研究に期待



ご清聴ありがとうございます
ございました。