

ブラックホールの観測と相対論

愛媛大学大学院理工学研究科

栗木久光

久保田あや（芝浦工業大学）

岩澤一司（カタルーニャ高等研究所・バルセロナ大学宇宙科学研究所）

内容

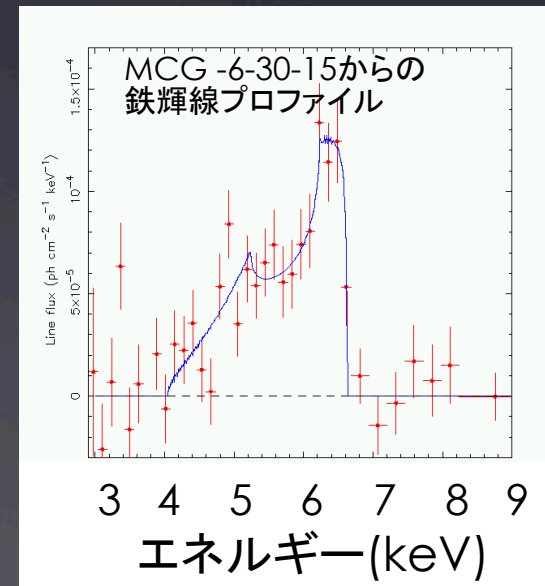
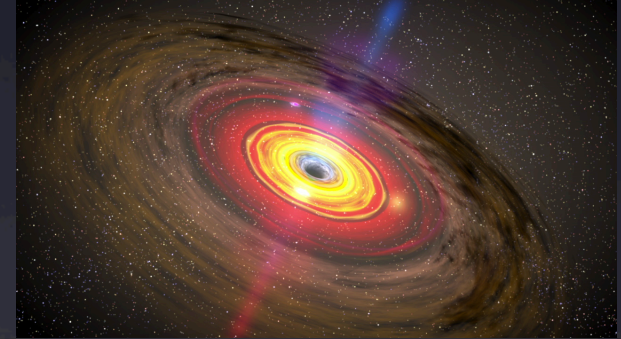
相対論の研究: ブラックホール近傍の観測
降着円盤の観測が1つの方法

1. 降着円盤からの放射
BH連星のX線観測

2. 降着円盤からの反射光／蛍光X線
活動銀河核(AGN)のX線観測

3. 相対論の影響を受けた鉄輝線
サポートする結果
検出に関する課題

4. 今後の観測



Tanaka et al.

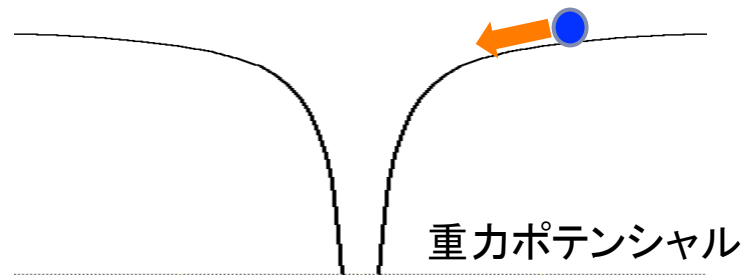
鉄輝線観測が相対論の効果の測定
に有効であることを示した観測例

1. 降着円盤からのX線放射

降着物質の重力エネルギーの解放



自由落下



- $3R_s$ まで自由落下

$$E_p = m_p c^2 / 3R_s \sim 150 \text{ MeV}$$

- 降着円盤

円盤の内縁温度

仮定: 円盤が標準円盤(左図)

光度 = エディントン光度 L_E

$$L_{\text{bol}} = L_E = 1.25 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ erg/s}$$

黒体放射

$$L_{\text{bol}} \sim \pi r_{\text{in}}^2 \sigma T_{\text{in}}^4$$

内縁半径 $r_{\text{in}} = 3R_s$ での温度

$$kT_{\text{in}} \sim 1 \text{ keV} (M/10M_\odot)^{-1/4}$$

L_E : エディントン光度、 R_s : シュバルツシルド半径、 $M_\odot$: 太陽質量

降着円盤

効率の良い放射 (黒体放射)

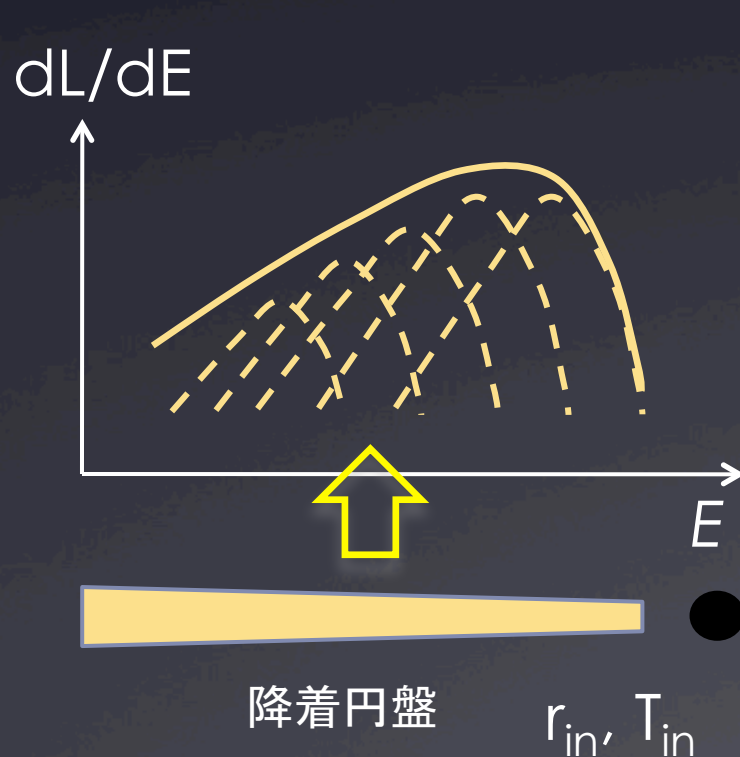


幾何学的に薄い
光学的に厚い
(標準降着円盤)

多温度黒体放射モデル (MCD): 通称 diskbb



dr落下時の力学的エネルギーの変化分を黒体放射で放出 (標準円盤)



$$G \frac{M\dot{m}}{2r^2} dr = 2 \times 2 \pi r dr \sigma T^4$$

$\Rightarrow T \propto r^{-3/4}$ 外で温度が低く、内側で高温
この重ね合わせを観測

$$\begin{aligned} dL/dE &\propto \int 2 \pi r B(E, T) dr \\ &= (8 \pi / 3) r_{in}^2 \int (T/T_{in})^{-11/3} B(E, T) dT/T_{in} \end{aligned}$$

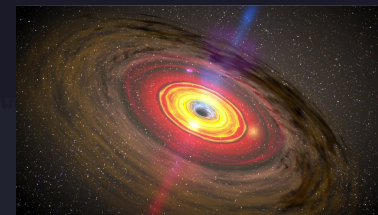
r_{in} : 最内縁半径、 T_{in} : 最内縁温度

Mitsuda et al. (1984)

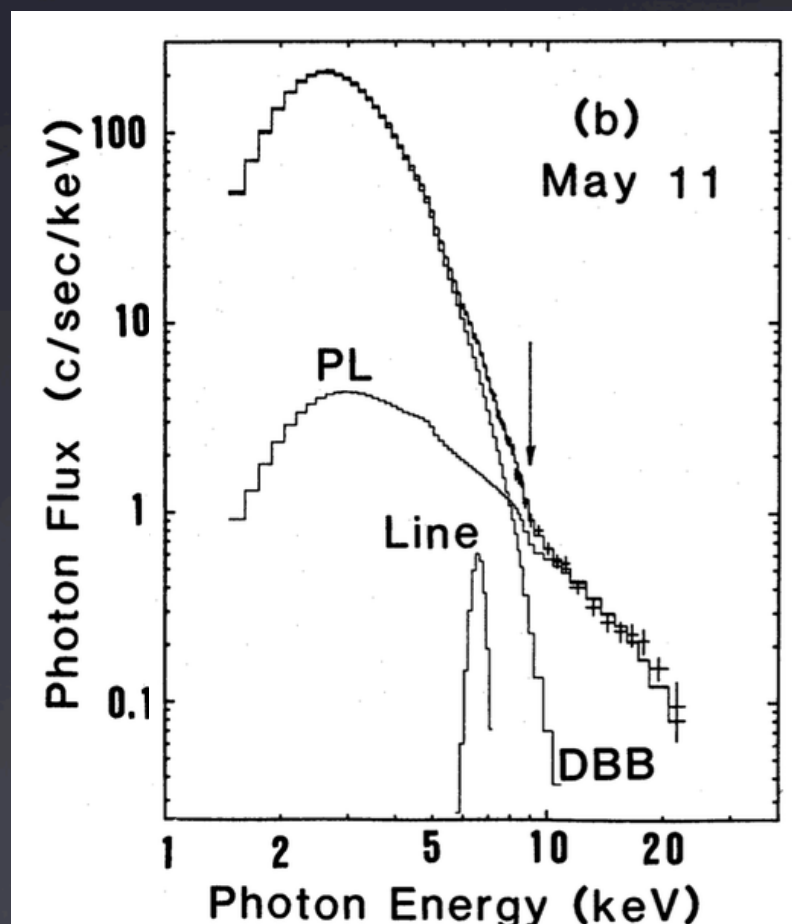
ブラックホール連星からのスペクトルを
MCDとべき型成分で再現

Makishima et al. (1986)

BH連星 (GX 339-4)のX線スペクトル



「てんま」衛星による観測
(Makishima et al. 86)



円盤の最内縁温度と最内縁半径

天体までの距離 13000光年を仮定

$$T_{\text{in}} = 0.774 \pm 0.005 \text{ keV}$$

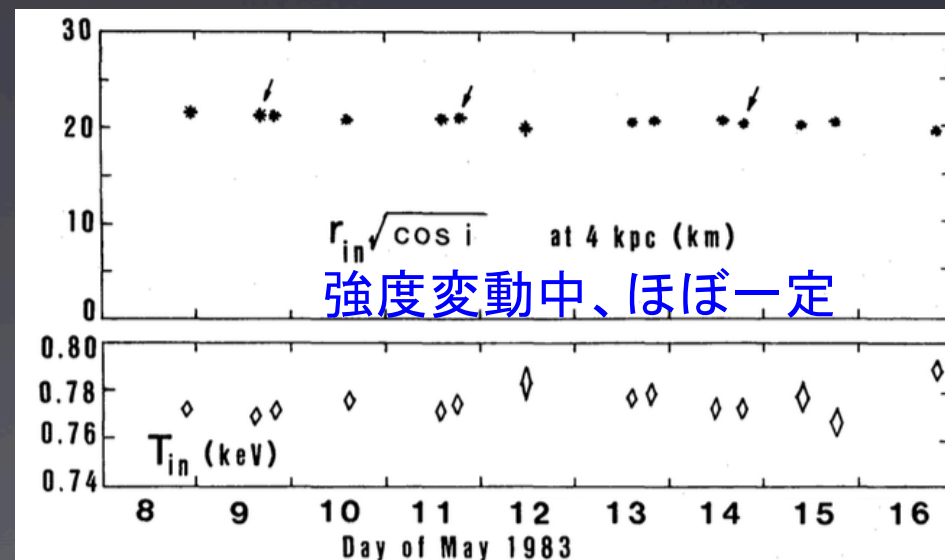
$$r_{\text{in}} (\cos i)^{1/2} = 20.7 \pm 0.4 \text{ km}$$

$$r_g = GM/c^2 = 8.56 \text{ km } (M/5.8M_{\odot})$$

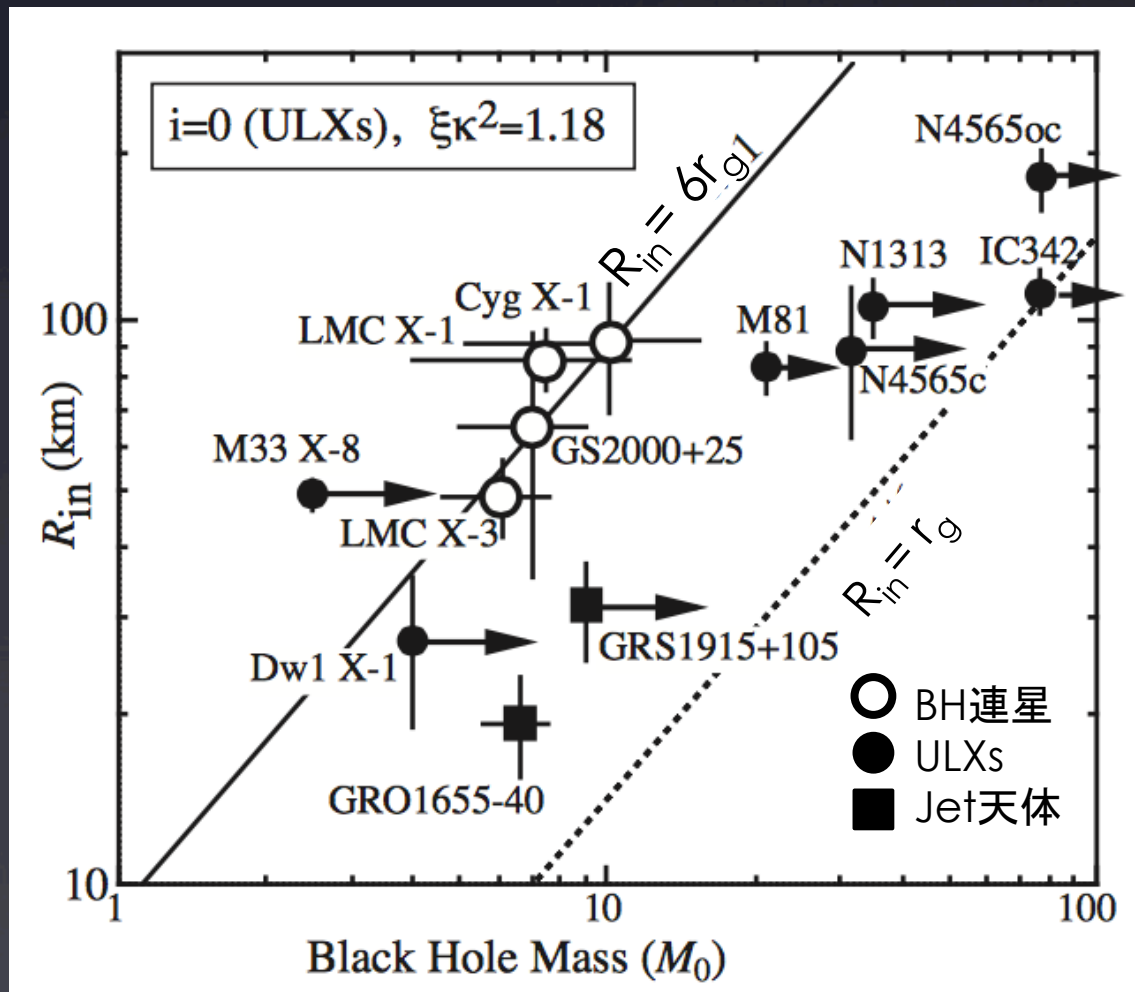
$M_x = 5.8 \pm 0.5 M_{\odot}$ (Hynes et al. 2003)

$$r_{\text{in}} \sim 3 r_g (\cos i / \cos 48^{\circ})^{-1/2}$$

$i = 48 \pm 1^{\circ}$ (Garcia et al. 2013)



内縁半径とブラックホール質量



Makishima et al. 2000

サンプル BH候補天体

BH連星

ULXs ($L_x > 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$)

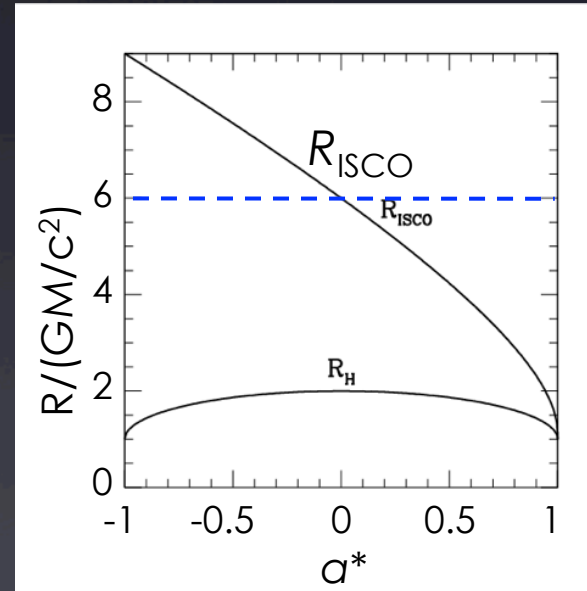
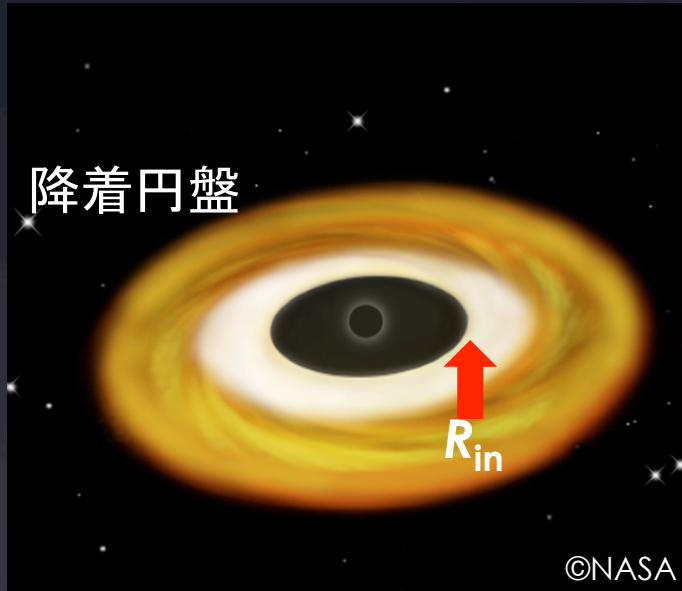
Jet天体

内縁半径 R_{in}

$$r_g < R_{in} < 6r_g$$

円盤内縁半径とISCO

(innermost stable circular orbit)



Novikov & Thorne 1973

BHの極近傍では、相対論的效果により安定な円軌道をとれない。

最小安定円軌道 = ISCO

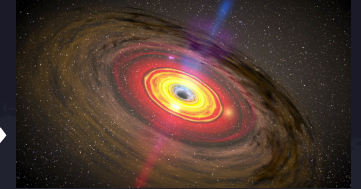
R_{ISCO} はBHのスピンパラメータ a^* に依存
 $a^* = J/(Mr_g c)$ J : BHの角運動量 ($J=0$ 無回転)

$R_{\text{in}} \geq R_{\text{ISCO}} \rightarrow \text{BHのスピンの制限}$

$6 R_g > R_{\text{in}} \Rightarrow a^* > 0$ Kerr BH

より正確に R_{in} を求めるには、相対論的效果を入れたモデルが必要

相対論効果を入れたモデル



非相対論モデル(diskbb, Mitsuda et al. 1984) → 相対論モデル(kerrbb, Li et al. 2005)

Kerrbb 相対論的效果を考慮
主なパラメータ: スピン a^* , 質量降着率
他のパラメータ: $M, i, D, T_{\text{col}}/T_{\text{eff}} (=1.7)$

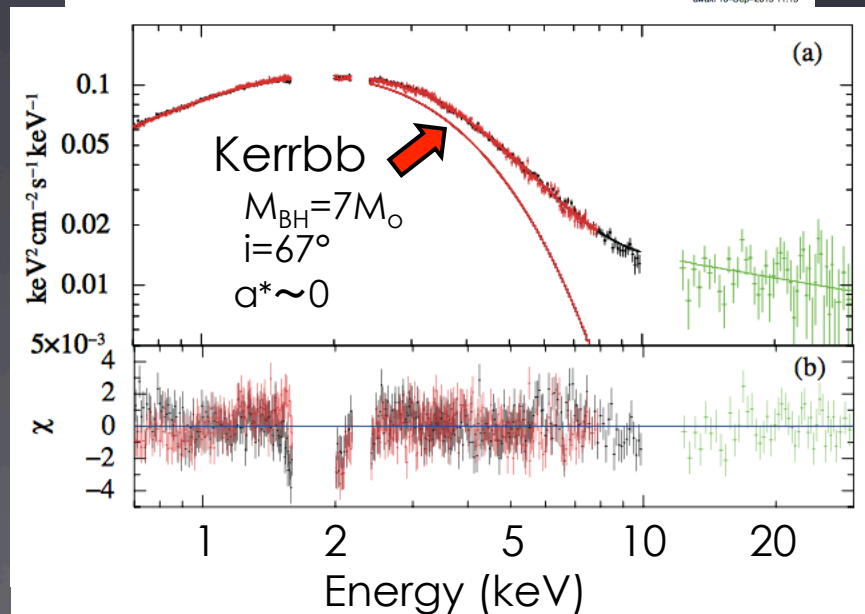
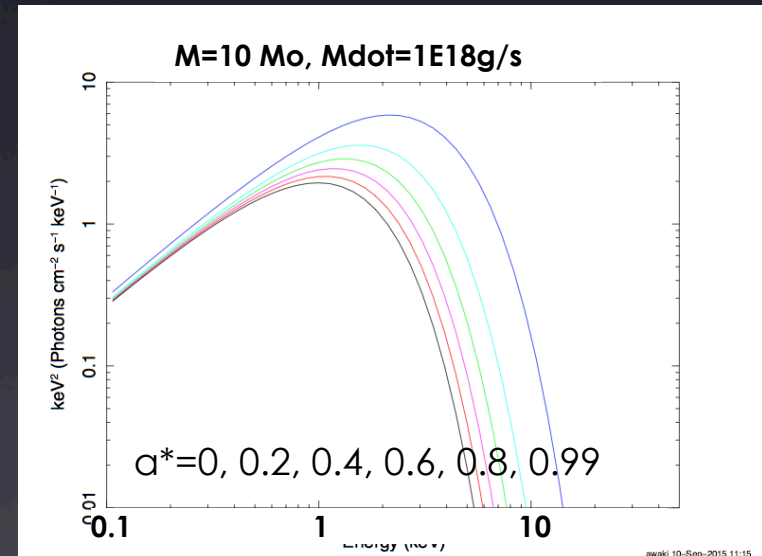
適用例: LMC X-3

(Kubota et al. 2010)

円盤成分 + 硬X線成分でスペクトルを再現

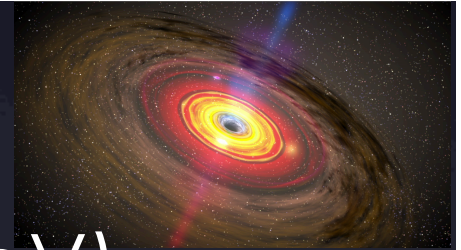
✓ diskbb よりも 相対論的效果を考慮したkerrbb
モデルの方がX線スペクトルをよく再現(右図)

✓ スピンパラメータ等に制限
ただし、このモデルはmoderateなspin
parameterに対する感度は低い



1. 降着円盤からの放射

BH連星のX線観測 ($kT_{\text{in}} \sim 1 \text{ keV}$)

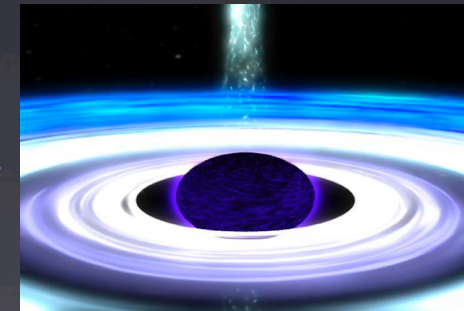
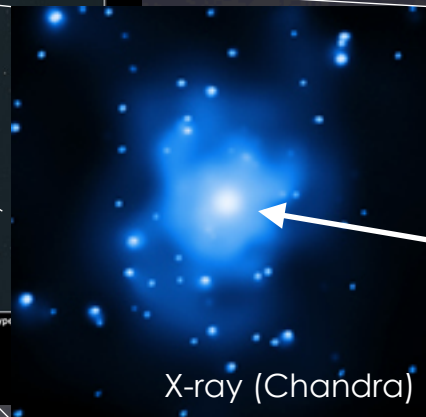
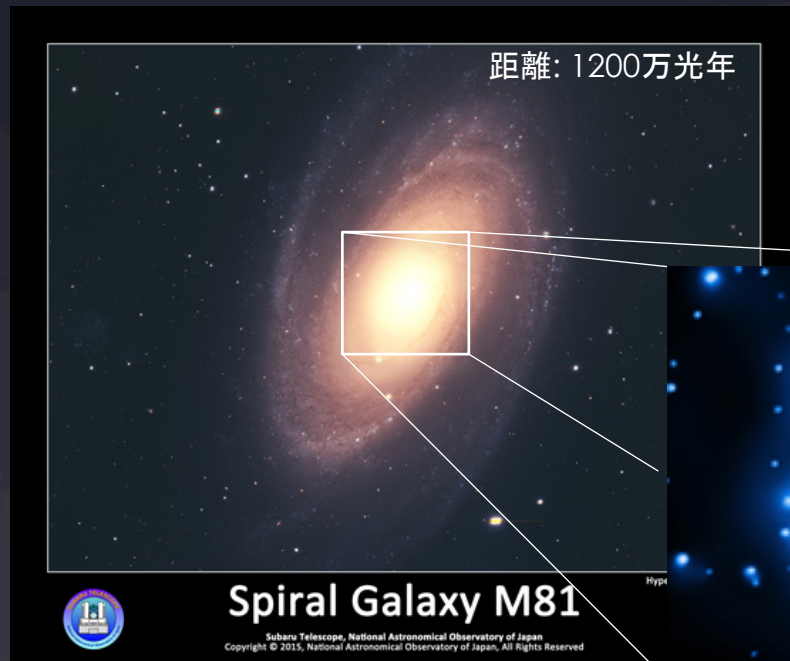


- ✓ 降着円盤の放射モデル (diskbb)
円盤に内縁半径が存在—ISCO?
数 R_g に相当
- ✓ 相対論効果を取り込んだ降着円盤放射モデル
 $R_{\text{内縁半径}} = R_{\text{ISCO}}$ と仮定しBHスピンを測定可能
- ✓ データは相対論的効果を考慮に入れたモデルを要求

2. 降着円盤からの反射光／蛍光X線

活動銀河核 (AGN) のX線観測

2. 降着円盤からの反射光／蛍光X線 活動銀河核 (AGN) のX線観測



・ 活動銀河核とは

銀河の中心に存在するコンパクトな放射領域

電波からX線、ガンマ線と広帯域で放射。母銀河よりも明るい天体もある。

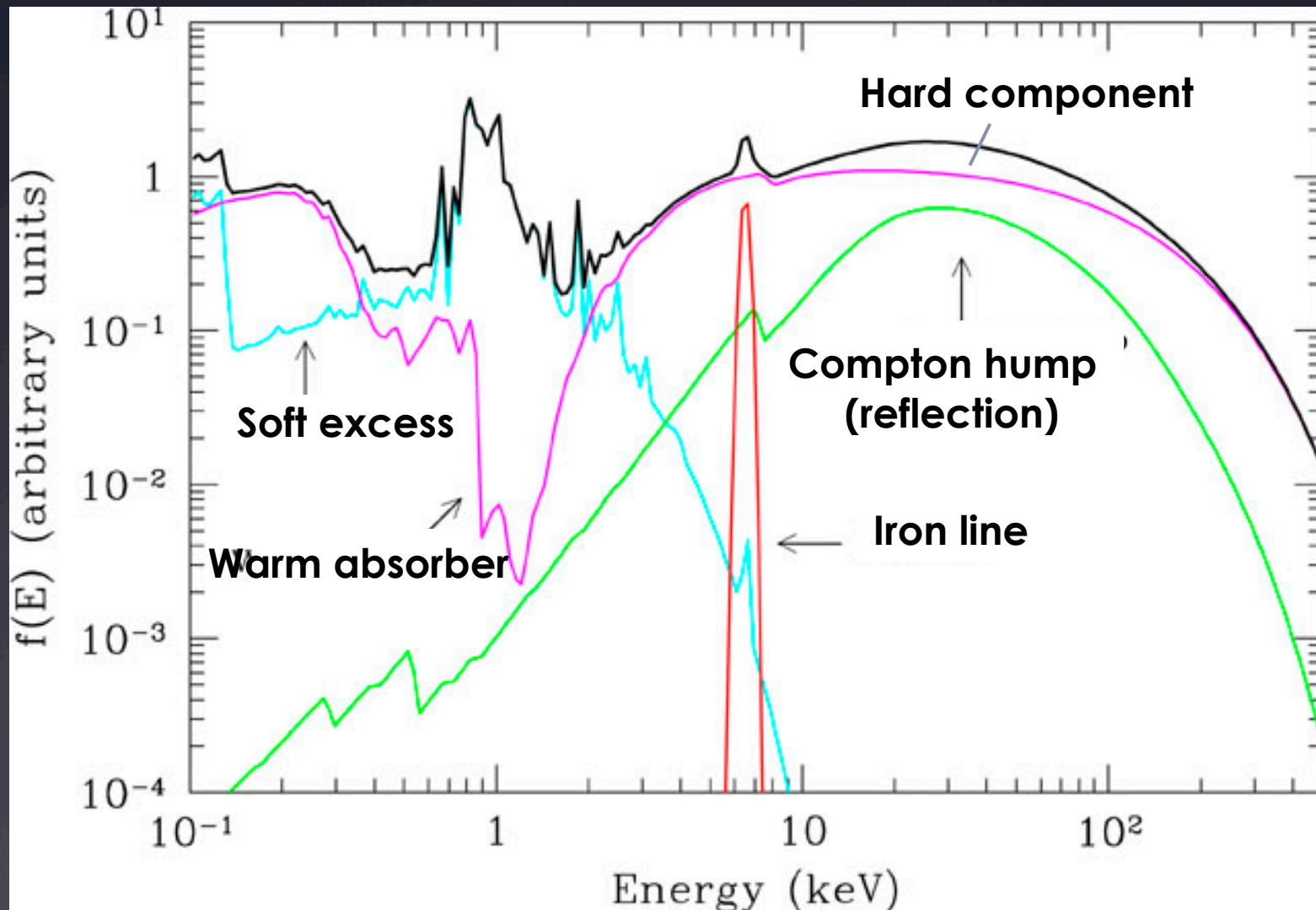
巨大ブラックホール($10^6 \sim 10^{10} M_{\odot}$)が存在

その誕生と進化は不明。BHスピンの重要 (Spin evolution)
(Sesana et al. 2014)

活動銀河核のX線スペクトル

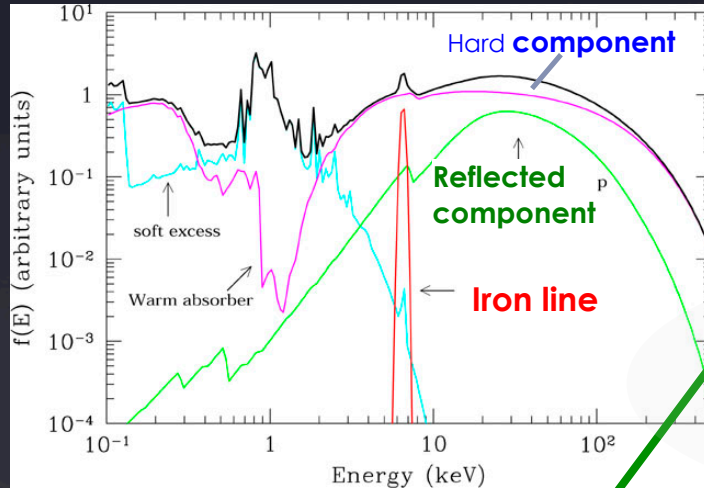
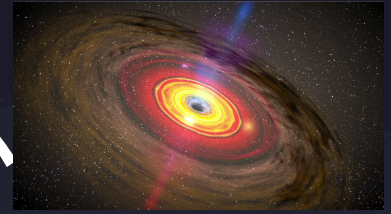


AGNスペクトル：複数の成分で説明可能



Risaliti and Elvis 2004

中心領域の放射メカニズム

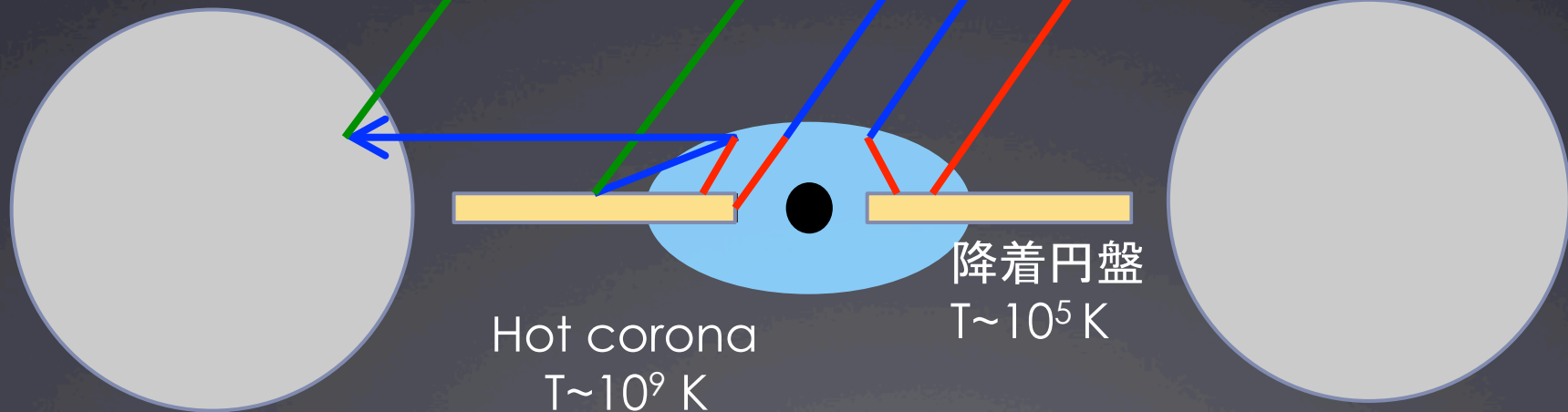


Compton hump + Iron line
(reflected component)

Warm absorber

Hard component

円盤成分
低温のため、X線領域
では観測困難



Hot corona
 $T \sim 10^9 \text{ K}$

降着円盤
 $T \sim 10^5 \text{ K}$

トラス状に分布した物質

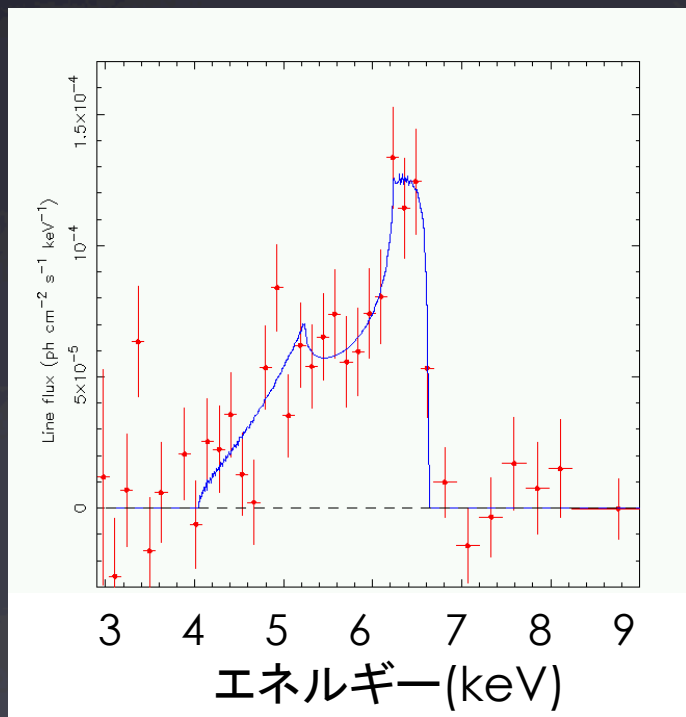
鉄輝線プロフィール

ブラックホールが作る時空の歪みを捉えた？

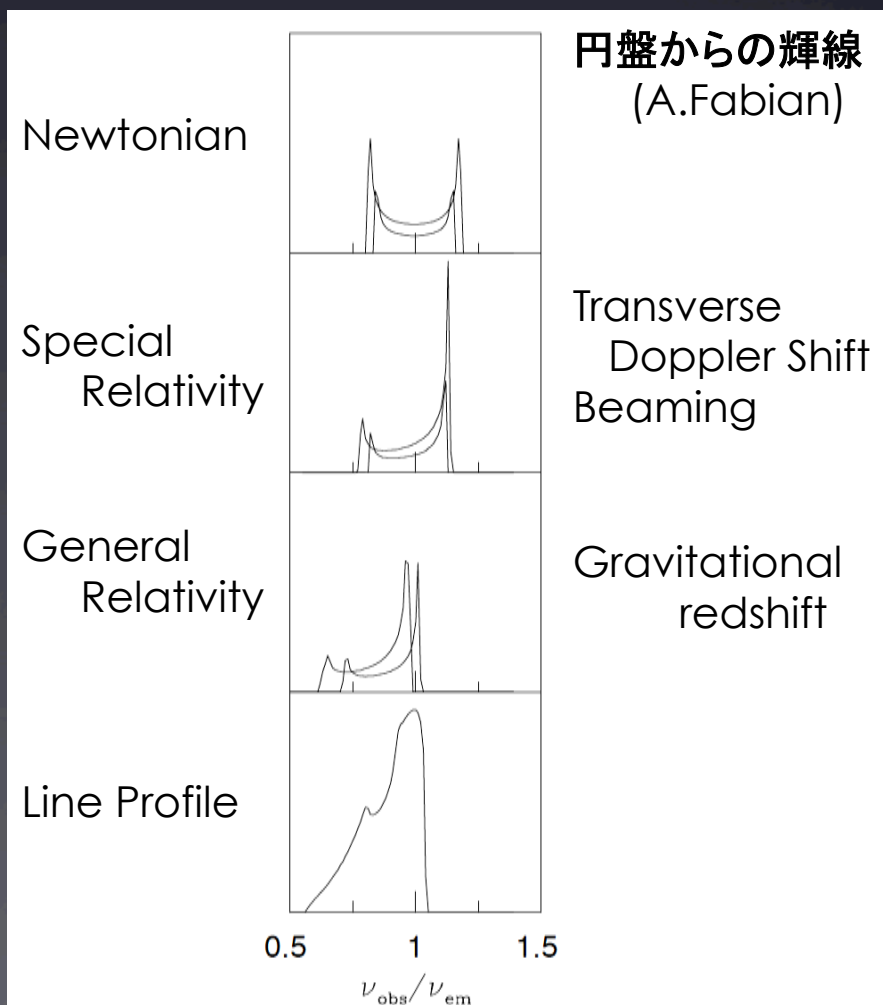
＊「あすか」衛星によるMCG -6-30-15の観測 (Tanaka et al. 1995)



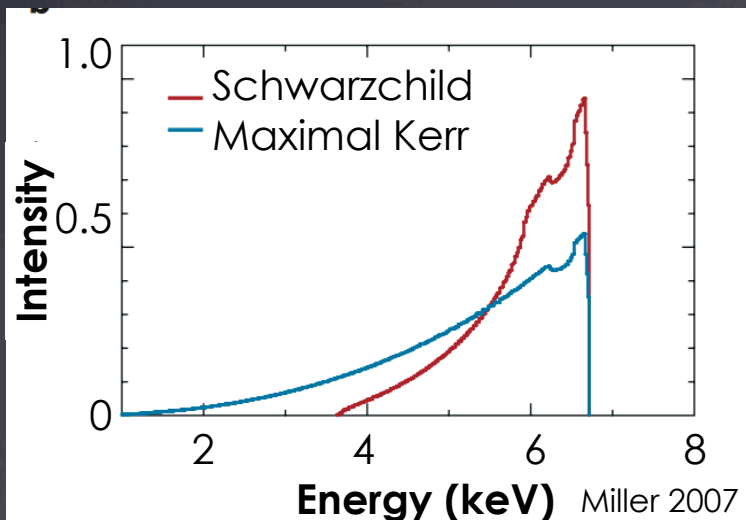
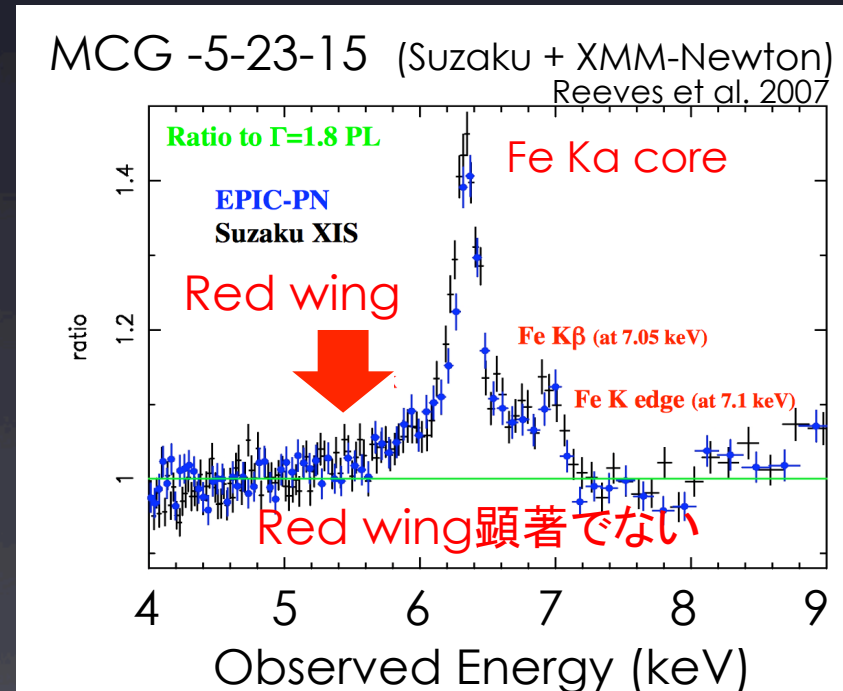
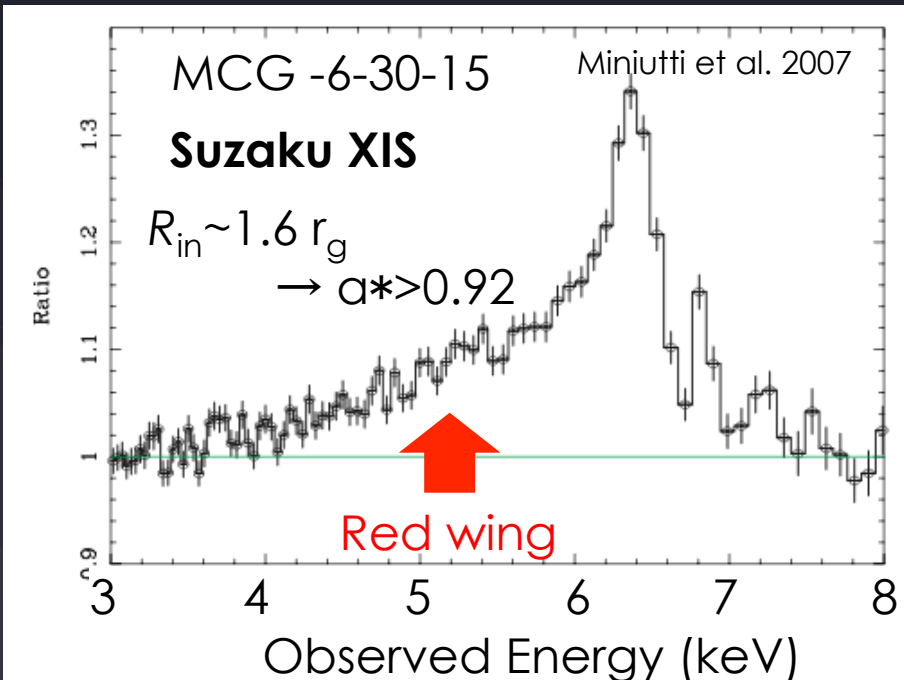
連続成分として吸収を受けた
べき関数を仮定し、差し引く



青線：相対論の効果を入れて
輝線形状を再現



鉄輝線プロファイルの観測例



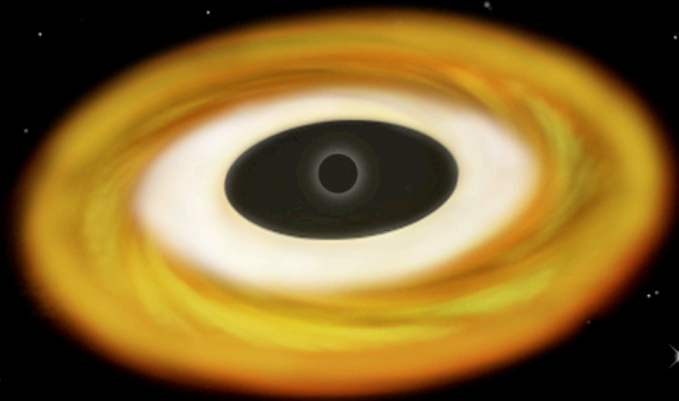
Red wing: 重力赤方偏移の影響
 $\Rightarrow R_{in} \Rightarrow$ BH spinを推定

Fe Ka core + disk lineで形状を再現

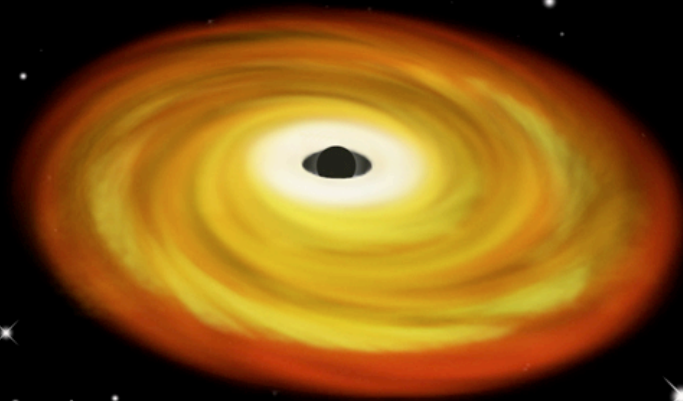
MCG -6-30-15: $R_{in} = 1.6 r_g$ ($\alpha^* > 0.92$)

MCG -5-23-16: $R_{in} = 26 r_g$

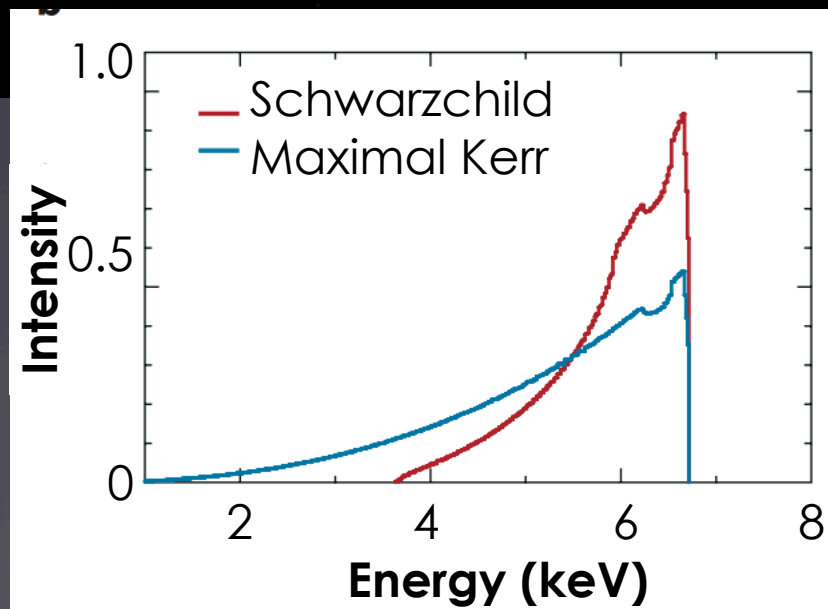
相對論的効果



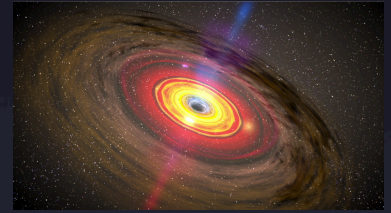
NON-SPINNING BLACK HOLE



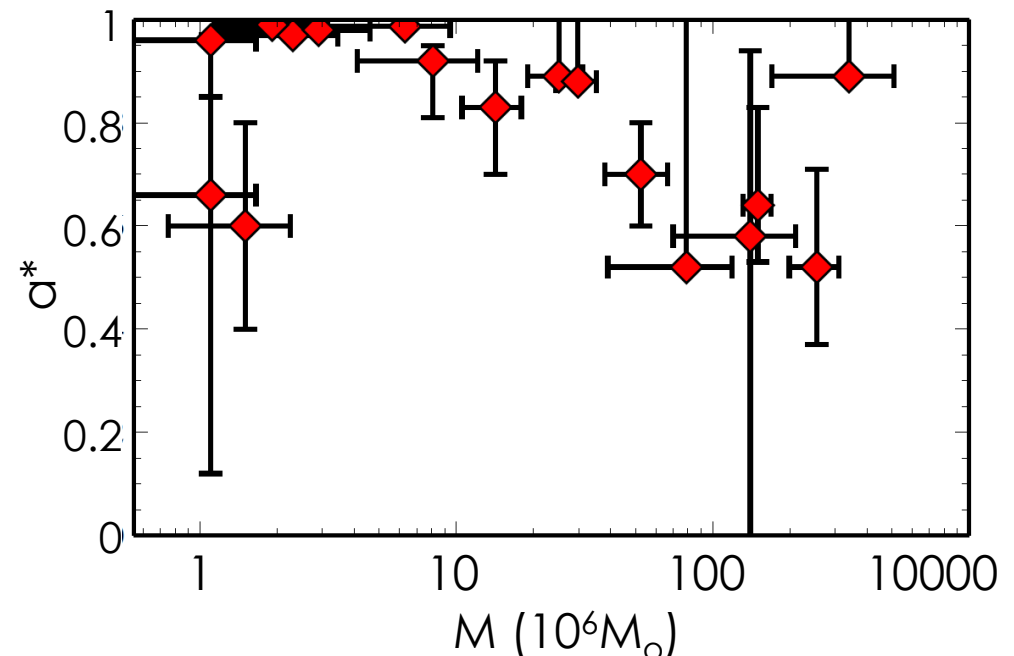
SPINNING BLACK HOLE



BHスピンの観測



Object	Mass ($\times 10^6 M_\odot$)	Spin	Mass/Spin References
Mrk335	14.2 ± 3.7	$0.83^{+0.09}_{-0.13}$	Pe04/Wa13
IRAS 00521-7054	—	> 0.84	—/Ta12
Tons180	~ 8.1	$0.92^{+0.03}_{-0.11}$	ZW05/Wa13
Fairall 9	255 ± 56	$0.52^{+0.19}_{-0.15}$	Pe04/Lo12
Mrk359	~ 1.1	$0.66^{+0.30}_{-0.54}$	ZW05/Wa13
Mrk1018	~ 140	$0.58^{+0.36}_{-0.74}$	Be11/Wa13
1H0419-577	~ 340	> 0.89	ZW05/Wa13
Ark120	150 ± 19	$0.64^{+0.19}_{-0.11}$	Pe04/Wa13
Swift J0501.9-3239	—	> 0.99	—/Wa13
1H0707-495	~ 2.3	> 0.97	ZW05/Zo10
Mrk79	52.4 ± 14.4	0.7 ± 0.1	Pe04/Ga11
Mrk110	25.1 ± 6.1	> 0.89	Pe04/Wa13
NGC3783	29.8 ± 5.4	$> 0.88^*$	Pe04/Br11
NGC4051	1.91 ± 0.78	> 0.99	Pe04/Pa12
RBS1124	—	> 0.97	—/Wa13
IRAS13224-3809	~ 6.3	> 0.987	Go12/Fa13
MCG-6-30-15	$2.9^{+1.8}_{-1.6}$	$a > 0.98$	Mc05/BR06
Mrk841	~ 79	> 0.52	ZW05/Wa13
Swift J2127.4+5654	~ 1.5	0.6 ± 0.2	Ma08/Mi09
Ark564	~ 1.1	$0.96^{+0.01}_{-0.11}$	ZW05/Wa13



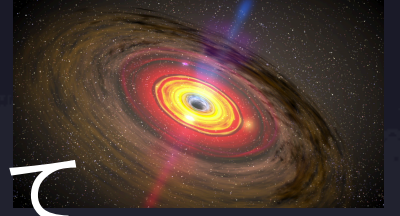
Reynolds 2013

大質量ほど、スピンの大きいとは限らない。

⇒ Mergerや、様々な角運動量をもったものが降着して成長？

注意: selection effect (red wingが明るいものの方が有意に検出される)

データ解析の手法 (連続成分の扱い)



相対論の影響を強く受けた鉄輝線について

大きなred wingを持つ、鉄輝線が本当に検出されているのか？

- * サポートする結果

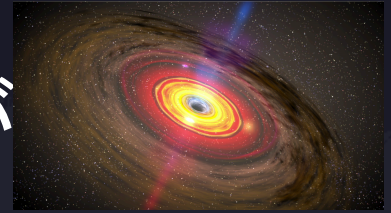
- * (相対論的効果の見える環境は整っている)

- * 相対論的効果検出の課題

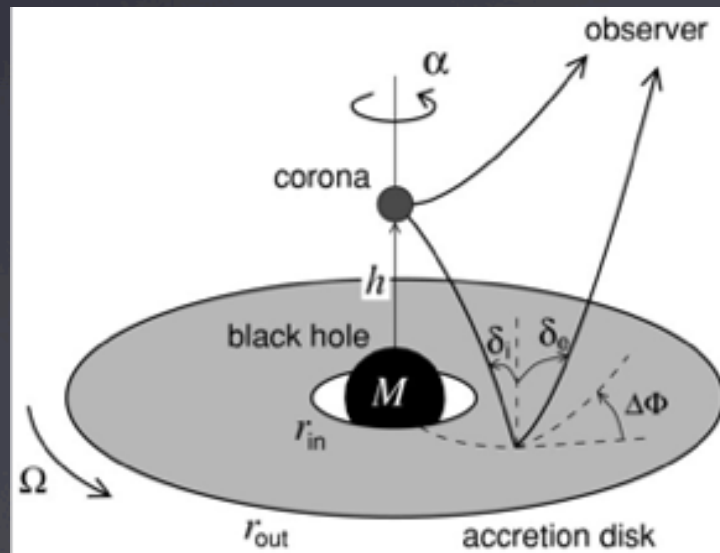
- * 連続成分

- * 時間変動

相対論の影響を受けた鉄輝線が 検出されるには



- ✓ ISCOまで円盤が伸びている必要がある。
AGNの降着円盤の温度 $\sim$ 数10eV (測定不十分)
BH連星からの推定で、ISCO近くまでいっている。
- ✓ 効率よく、円盤内縁を照らす必要がある。

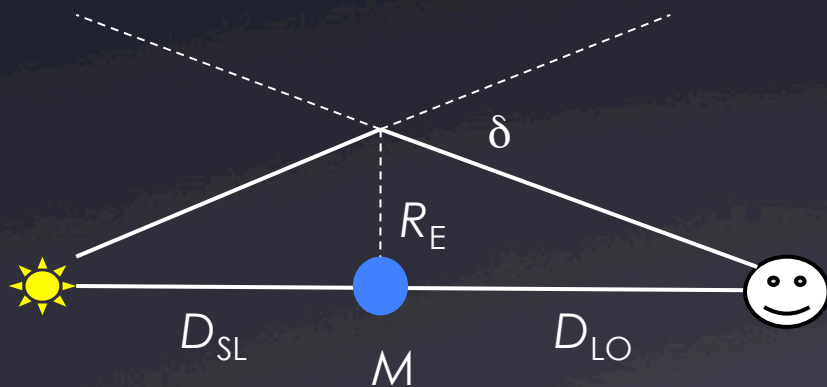


Hot coronaのサイズ $<$ 数 R_g が好ましい。
 h も低いほうが良い

Hot coronaの大きさ



マイクロレンズによる増光しているという天体の光度曲線を解析することでハードX線の放射領域に制限



相対論の効果で、光が曲がって届く

$$\delta = 4GM / (R_E c^2)$$

$$\text{一方、} R_E = \delta D_{SL} D_{SO} / D_{LO}$$

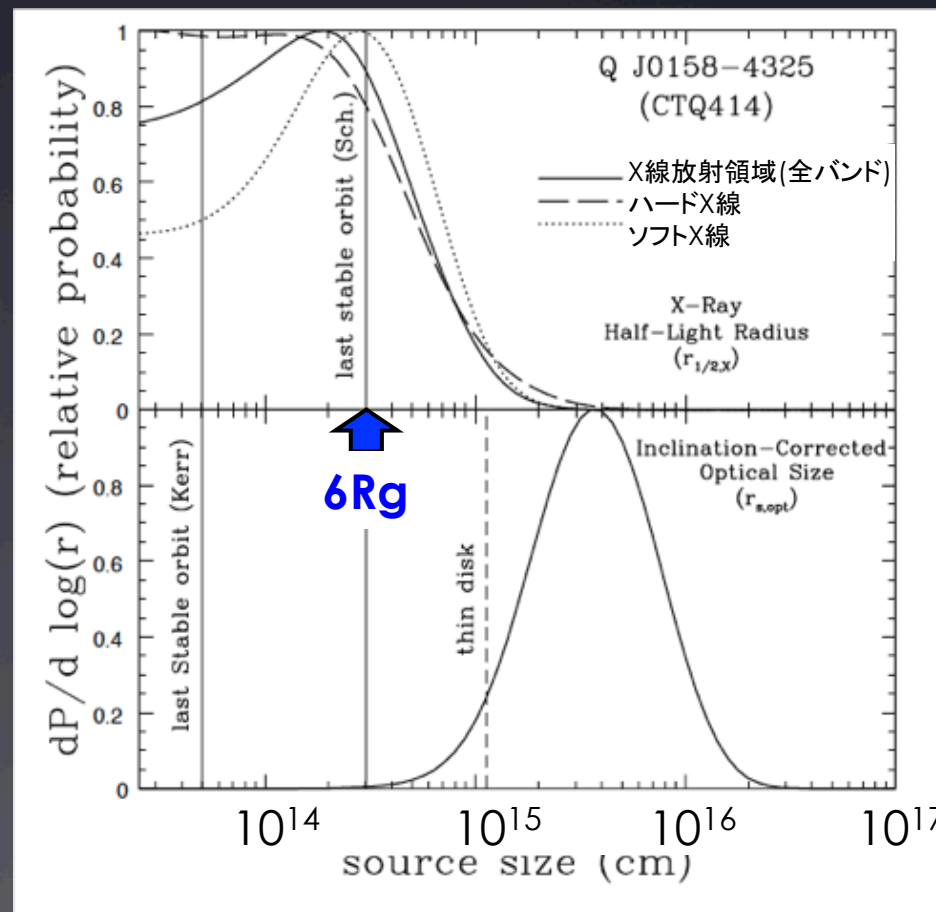
$$R_E = 2.5 \times 10^{16} (M / 0.3 M_\odot)^{1/2} \text{ cm}$$

背景天体の放射領域 r

$r \ll R_E$: 増光

$r > R_E$: ほとんど増光しない

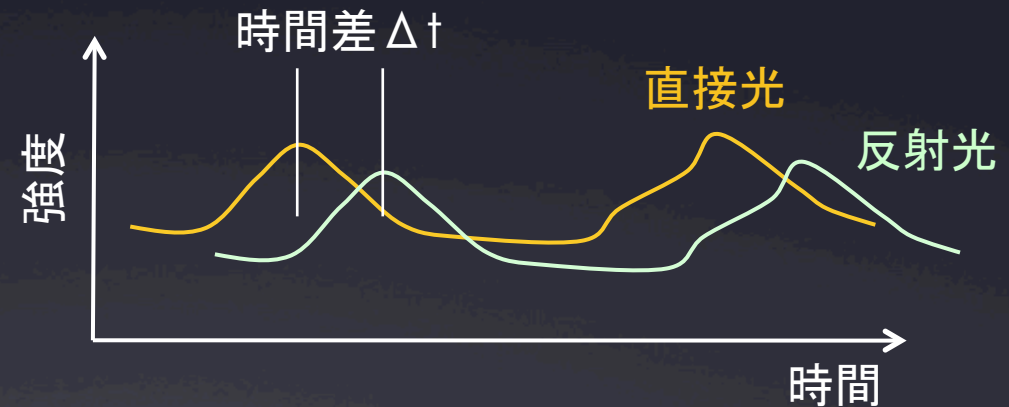
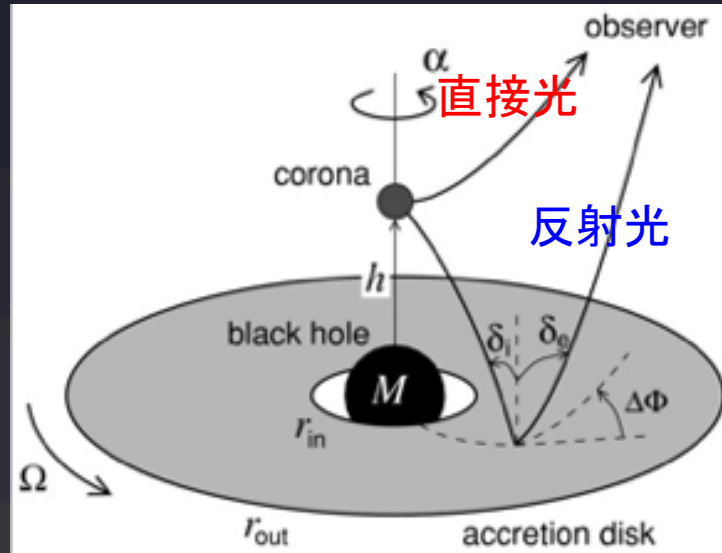
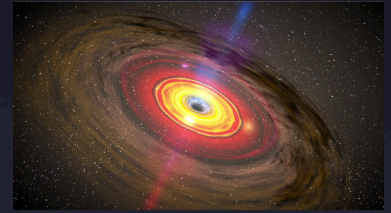
Lens天体(星)は、運動($\sim 700 \text{ km/s}$)しており、
この運動と背景天体の強度変動から放射領域を探索。



Morgan et al. 2012

他にも
HE0435, HE1104, Q2237で同様の結果

Reverberation



$$R = c \Delta t$$

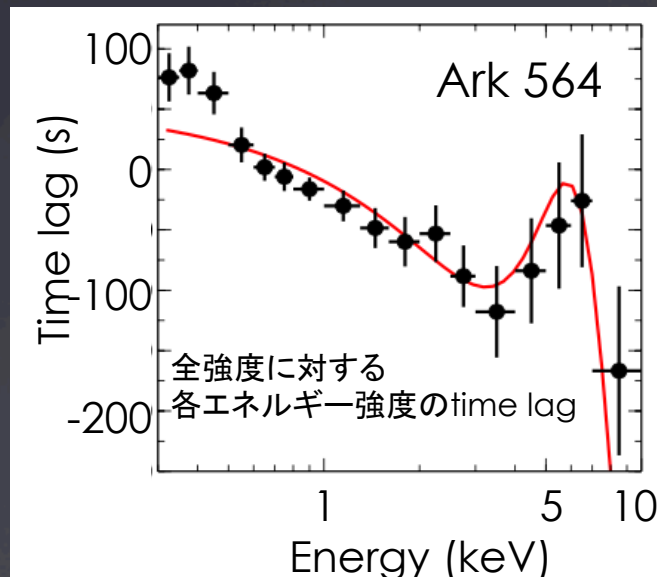
R = 直接光放射領域から反射体までの距離

Time lagスペクトルの作成
(エネルギー毎にtime lagを書く)

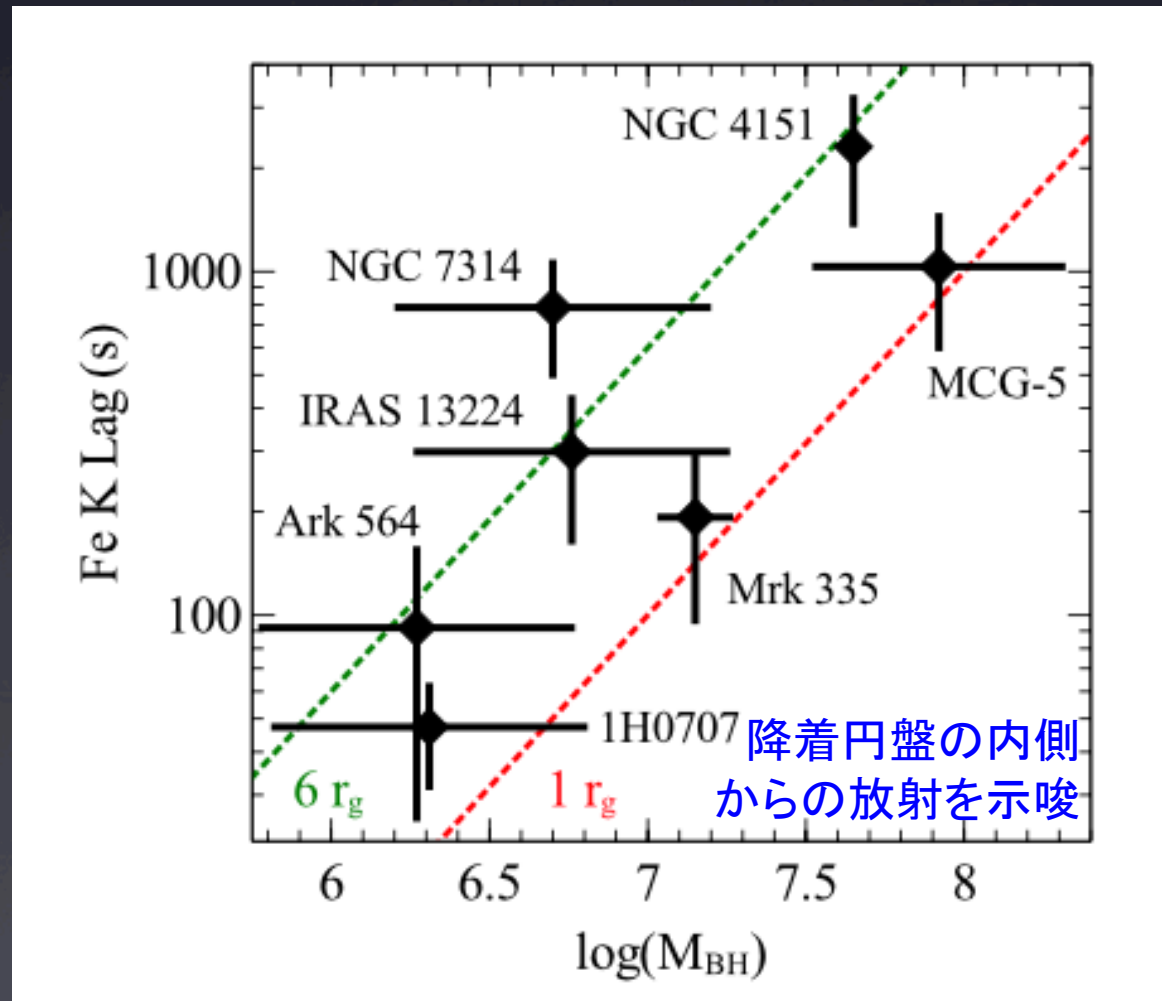
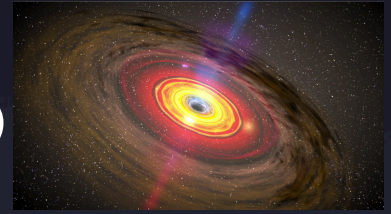
直接成分が支配的なエネルギー帯: 3~4 keV

soft 成分+鉄輝線のエネルギー帯で
3~4 keV帯に対して約75秒のtime lag

他、1H 0707-495, IRAS 13224-3801, Mrk335, PG1244+026



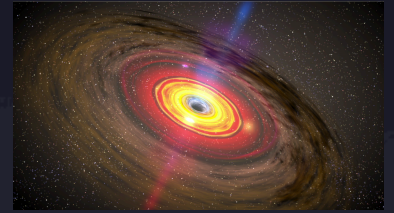
ブラックホール質量と鉄輝線帯強度の time lagの関係



Kara et al. 2013

鉄輝線の主要な成分は、時間変動しない狭輝線なので、本当なのか検証が必要

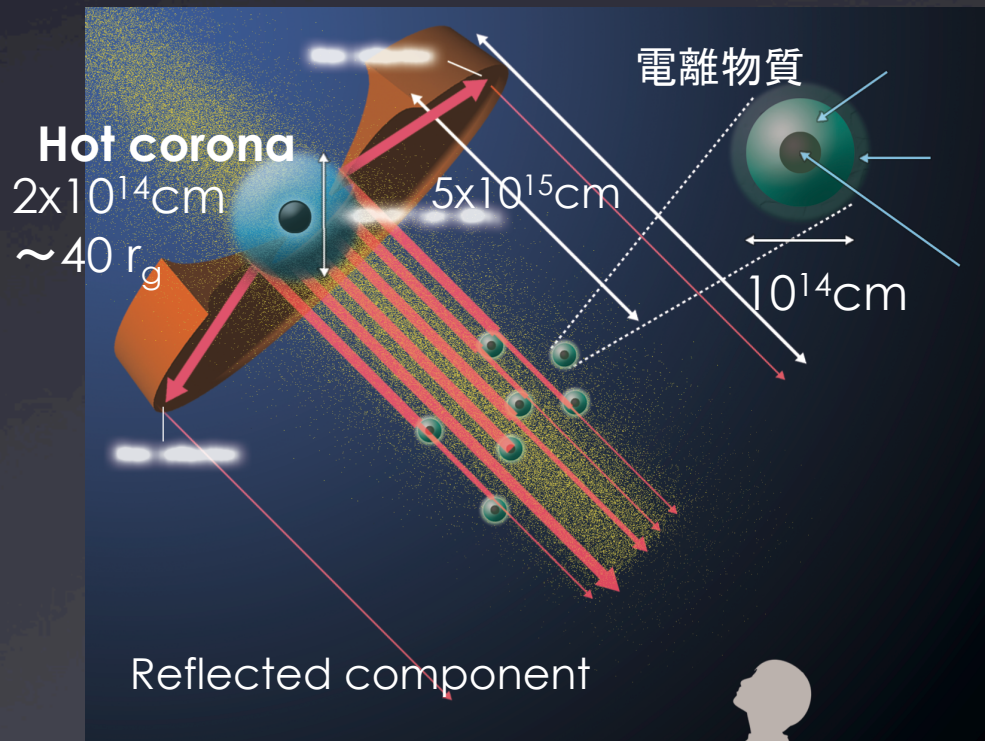
鉄輝線観測に対する課題



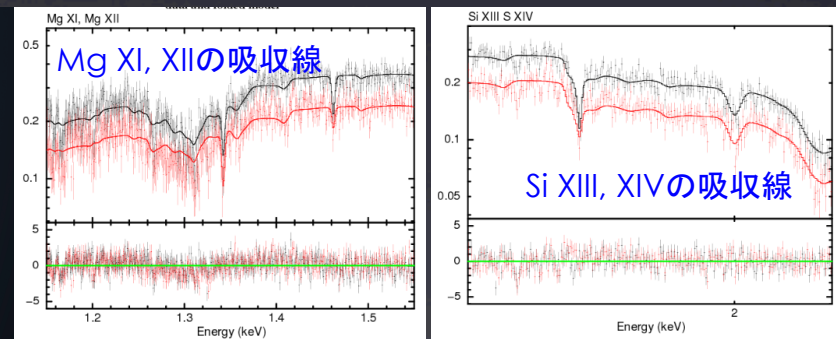
1. 連続成分の不定性

相対論的効果: **連続成分の数%** — 連続成分が少し変わると鉄輝線形状が変化
電離物質による吸収の効果を入れると鉄輝線の **red wing** は **不要** (Miyakawa et al. 2012)

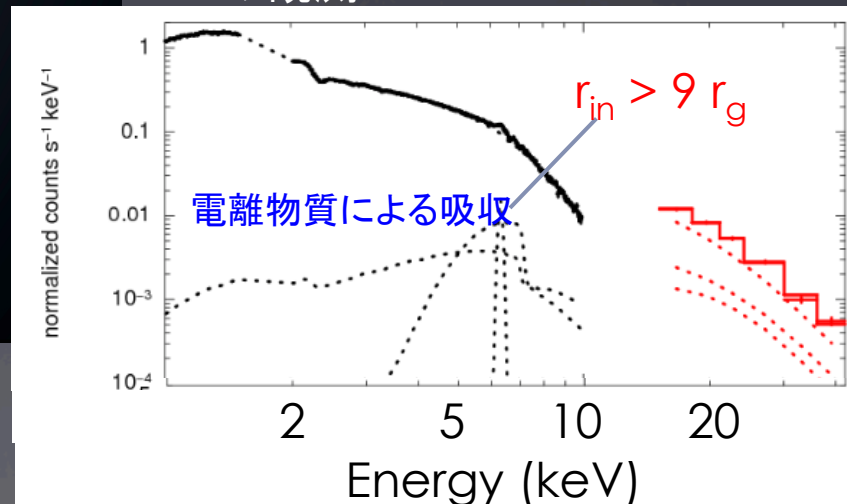
MCG -6-30-15の観測



Chandra HETGSの観測



Suzakuの観測

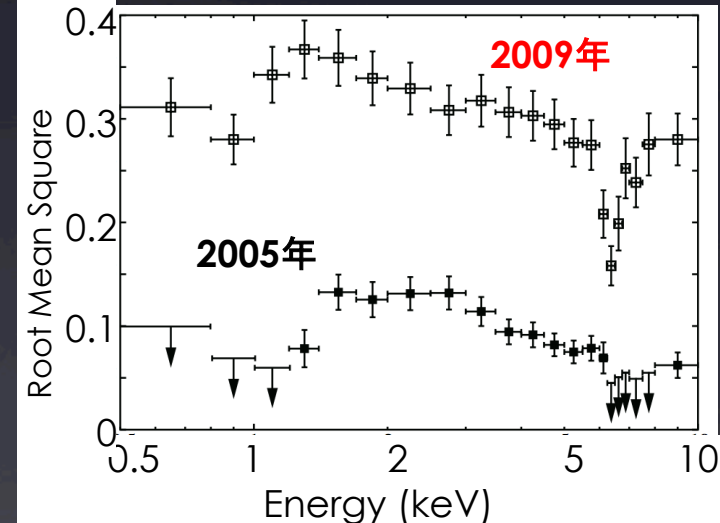
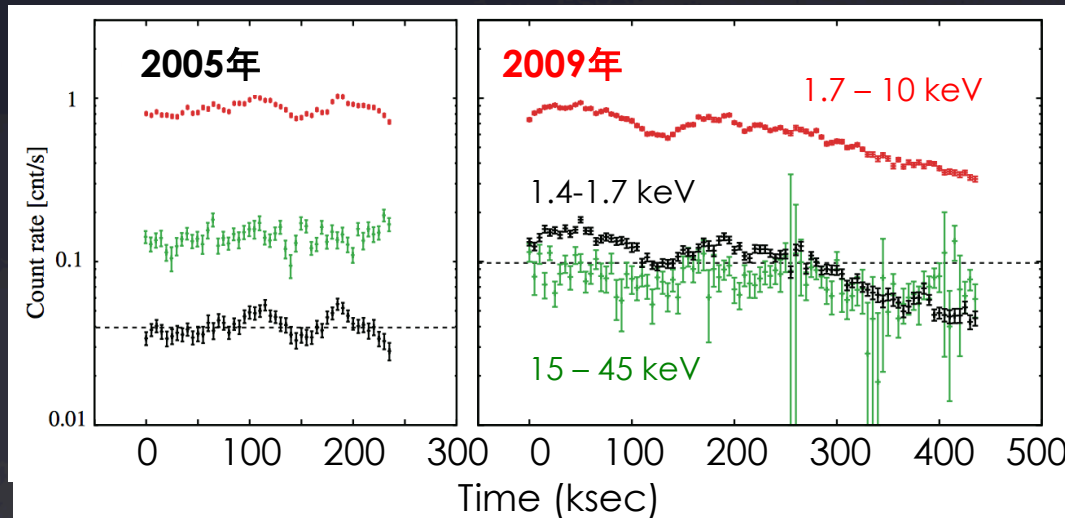


2. 時間変動解析

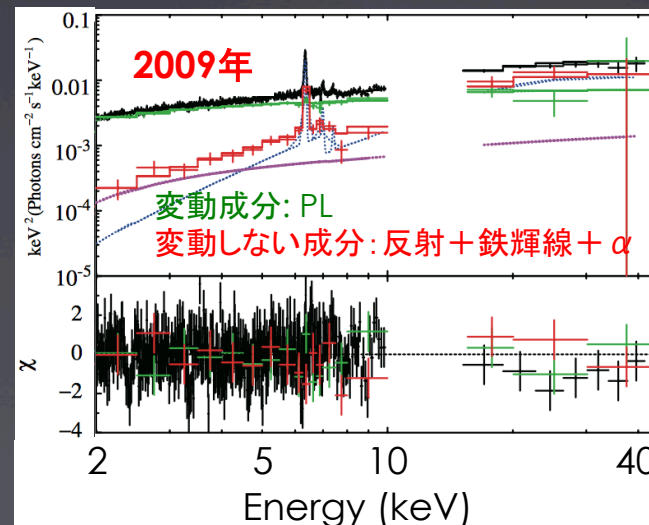
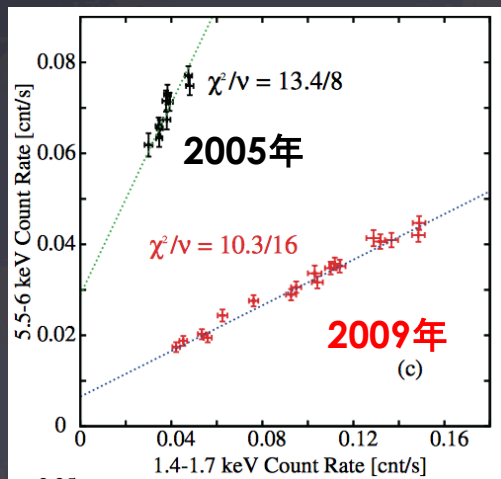


NGC 3516 (Noda et al. 2013)

エネルギーバンド毎に光度曲線を作成し、 σ_{rms} を計算



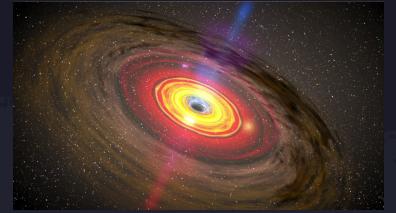
1.4-1.7keVに対する各バンドでの
計数率をプロット



Fittingでもred wingは要求され
ない。(+ α がtailを再現)

Fe K α : Narrow lineで再現
時間変動と輝線幅から
> 5000 R_g から放射されている。

鉄輝線観測の現状



- * 降着円盤はISCOまで入っており、円盤を照らすハードX線源がコンパクト。

- * 相対論的効果が見えても良い。

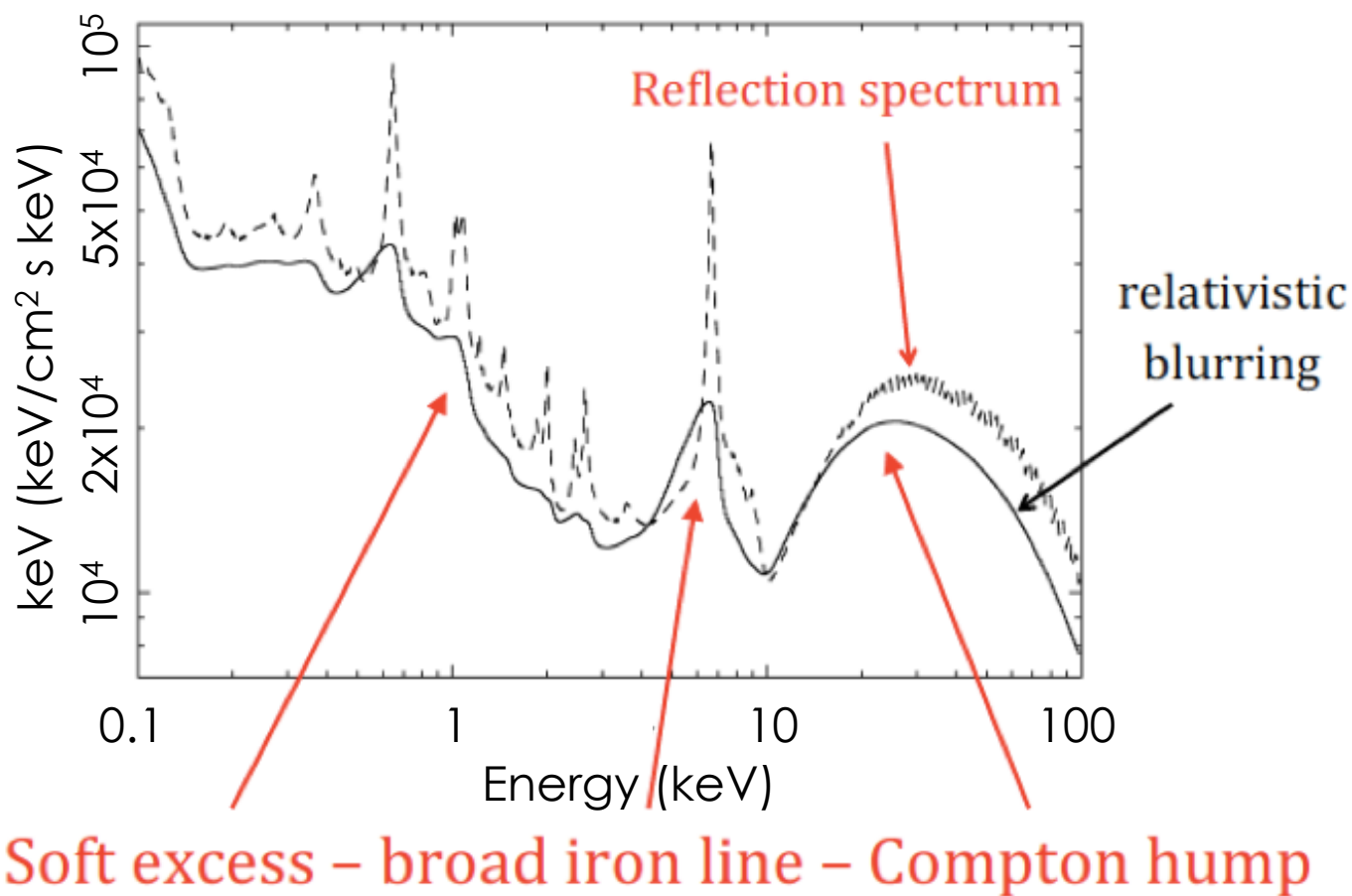
しかし、検出されたという強い証拠がない。

- *

相対論効果に関する研究を進めるには、
質の良い新しい観測結果が必要

→ ASTRO-H, Athena, 偏光観測へ

反射スペクトルから探るGR効果

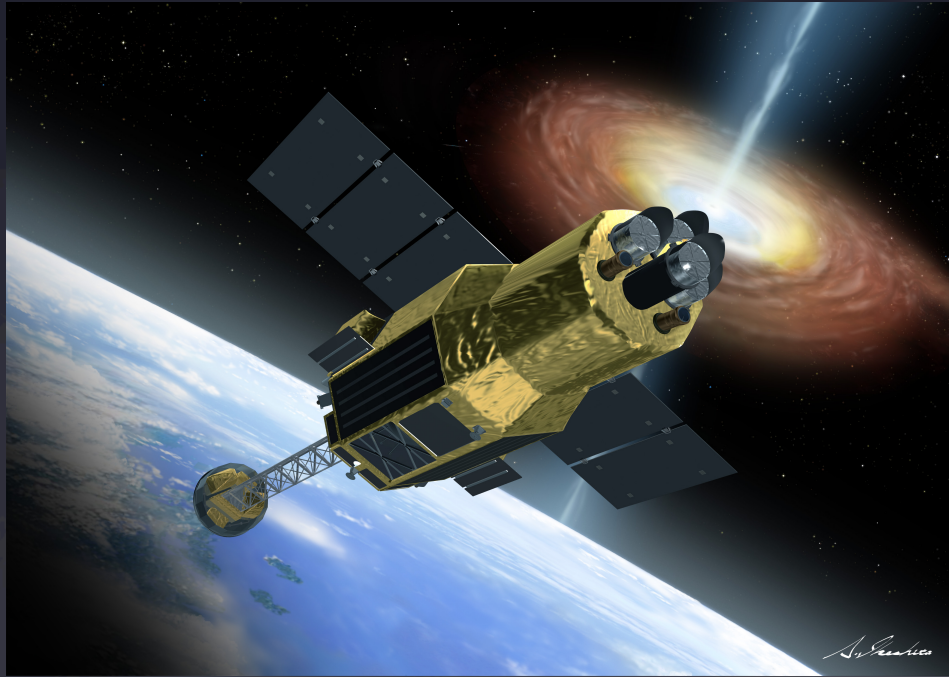
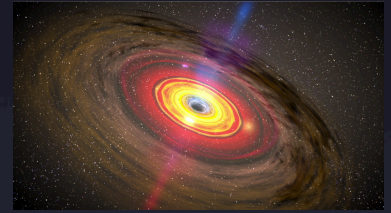


X線スペクトルから反射成分を精度よく分離
輝線や吸収端プロファイルの精密観測



X線広帯域観測
精密分光観測

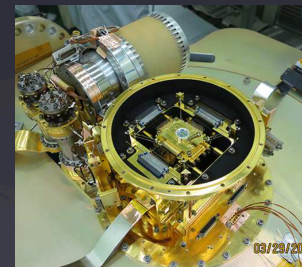
ASTRO-Hへ



2015年度打ち上げ予定

観測装置の主な特徴

1. High Resolution Spectroscopy



SXT+SXS

$E/\Delta E > 1000$

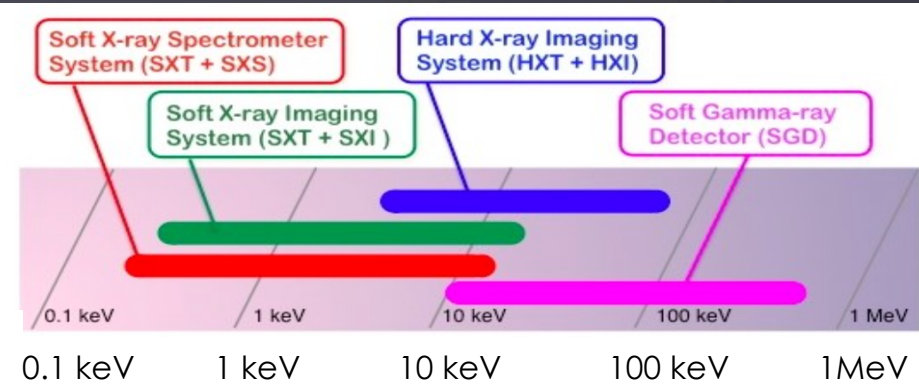
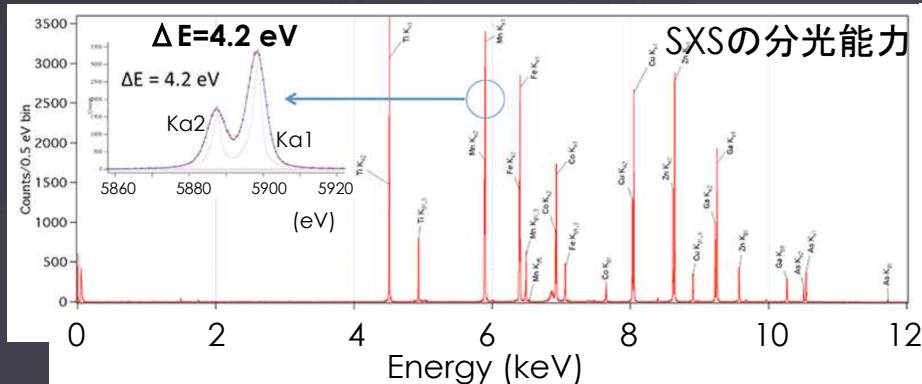
有効面積はHEGの約10倍
@ Mn K α (5.9 keV)

2. Wide band spectroscopy

BH天体は時間変動するので、同時観測が必須。

SXT+SXI + HXT+HXI: 0.5~80 keVで撮像分光観測

SGD : 40~ 600 keVでの分光観測

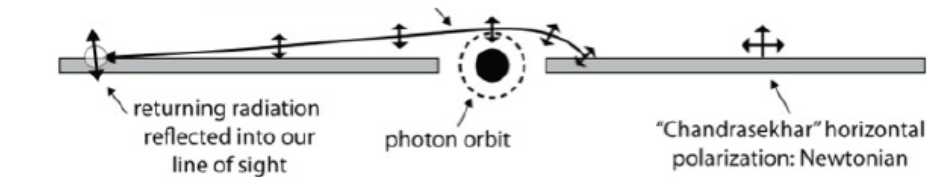


Takahashi et al. 2012

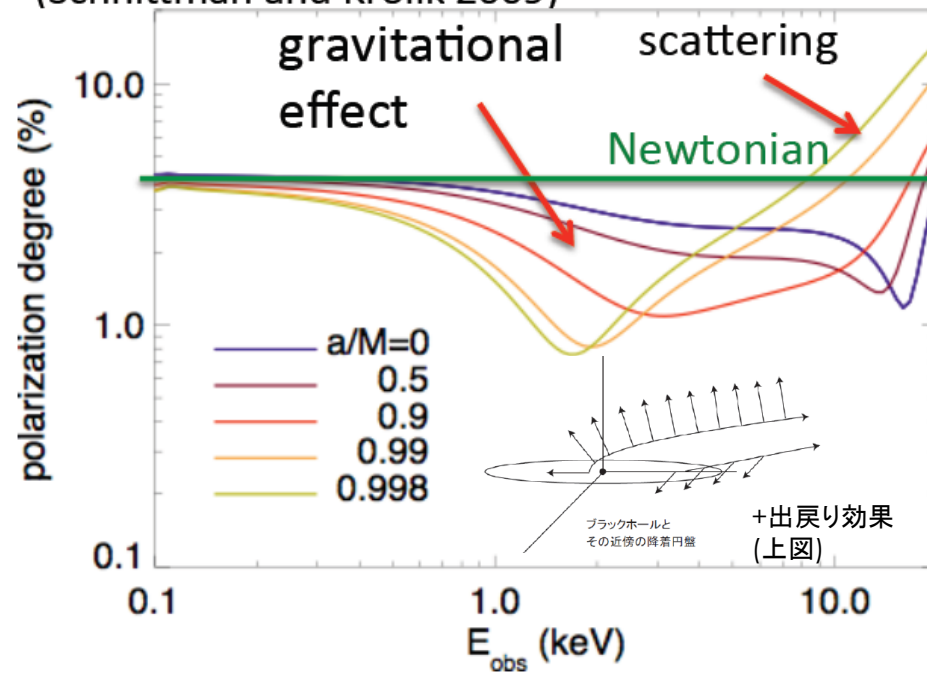
偏光観測



ブラックホールの時空構造とスピン



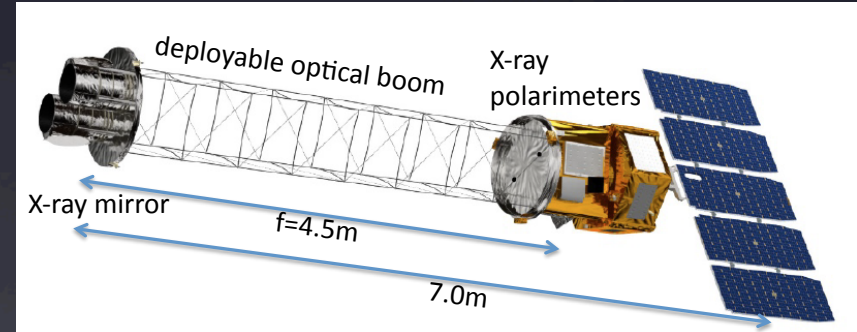
(Schnittman and Krolik 2009)



玉川、当真 2014資料より抜粋

PRAXyS

(Polarimeter for Relativistic Astrophysical X-ray Sources)



偏光望遠鏡

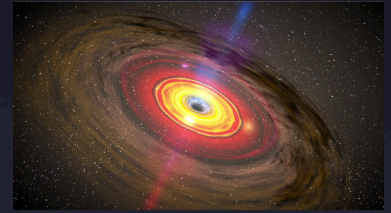
- Suzaku type 望遠鏡2台を搭載
- 0.1 rpm で光軸周りに回転
- 4.2Ms、2mCrab 最小偏光検出能力 1%
(2-10keVでOSO-8 の100倍の感度)
- SWG 9ヶ月で23天体を観測+15ヶ月のGO

日米協力

- 理研と名大は Co-I institute
偏光計(理研)、望遠鏡(名大)
- 検出器校正、シミュレーション

2015年7月末 SMEX Phase-Aに採択
2020年打上(予定)

まとめ



- * ブラックホールからの放射をX線で観測
 - * 降着円盤からの放射を検出 ($M_{\text{BH}} \sim 10 M_{\odot}$)
 - * 円盤の放射モデル (diskbb) の適用
 - * 円盤に内縁半径が存在 (数 R_g に相当する場合も) ISCO?
 - * 相対論効果を入れた円盤放射モデル(例: kerrbb)で観測スペクトルを再現可能
 - * BHスピンを測定。
- * 鉄輝線を使った測定 (AGNに存在する巨大BH)
 - * 連続成分としてべき関数と仮定すると、鉄輝線プロファイルに red wing を検出。
 - * 相対論的效果で説明可能

課題: 鉄輝線の解釈に対する課題

低エネルギーwingは連続成分のわずか数%なので、連続成分の決め方に大きく依存

鉄輝線の時間変動の特徴も説明できるか?

新しいモデル、解析方法による観測データの解釈が進められている。

質の良い新しい観測結果が必要:

ASTRO-H, Athena, 偏光観測等の計画—相対論の研究に貢献