

ブラックホール

～X線天文学の立場から～

嶺 重 慎 (京都大学)

みなさん、ブラックホールって知ってますね？

「何でも吸い込むこわい穴」と思っているでしょう。

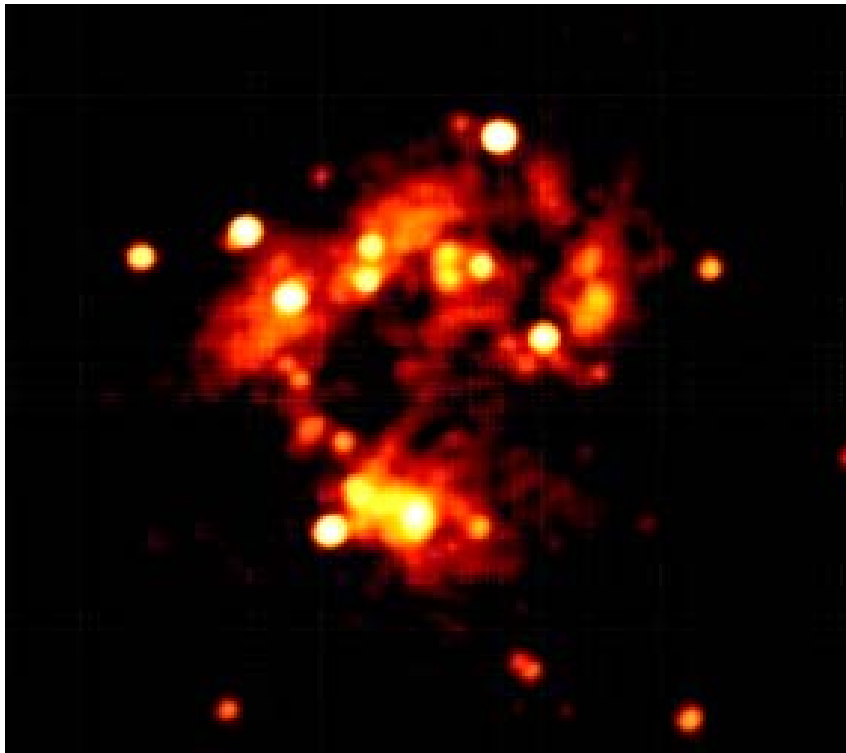
それはまちがいではないのですが、それだけではありません。

じつは、ブラックホールは、「**宇宙最強のエンジン**」でもあるのです… きっかけはX線天文観測でした。

1 : ブラックホールの見え方

ブラックホール近傍は特別な世界

高温(一千万度以上)ガスが充満 → X線を放射



近くの銀河のX線画像、
光っているのはほとんど
ブラックホール

典型的な明るさ

~太陽*の10万倍

(アンテナ銀河 Fabbiano et al. 04)

(注*: 太陽は1秒間で日本の年間発電量の一億倍のエネルギーを放射)

X線でみた宇宙：目で見るとは違う世界

可視光でみた宇宙

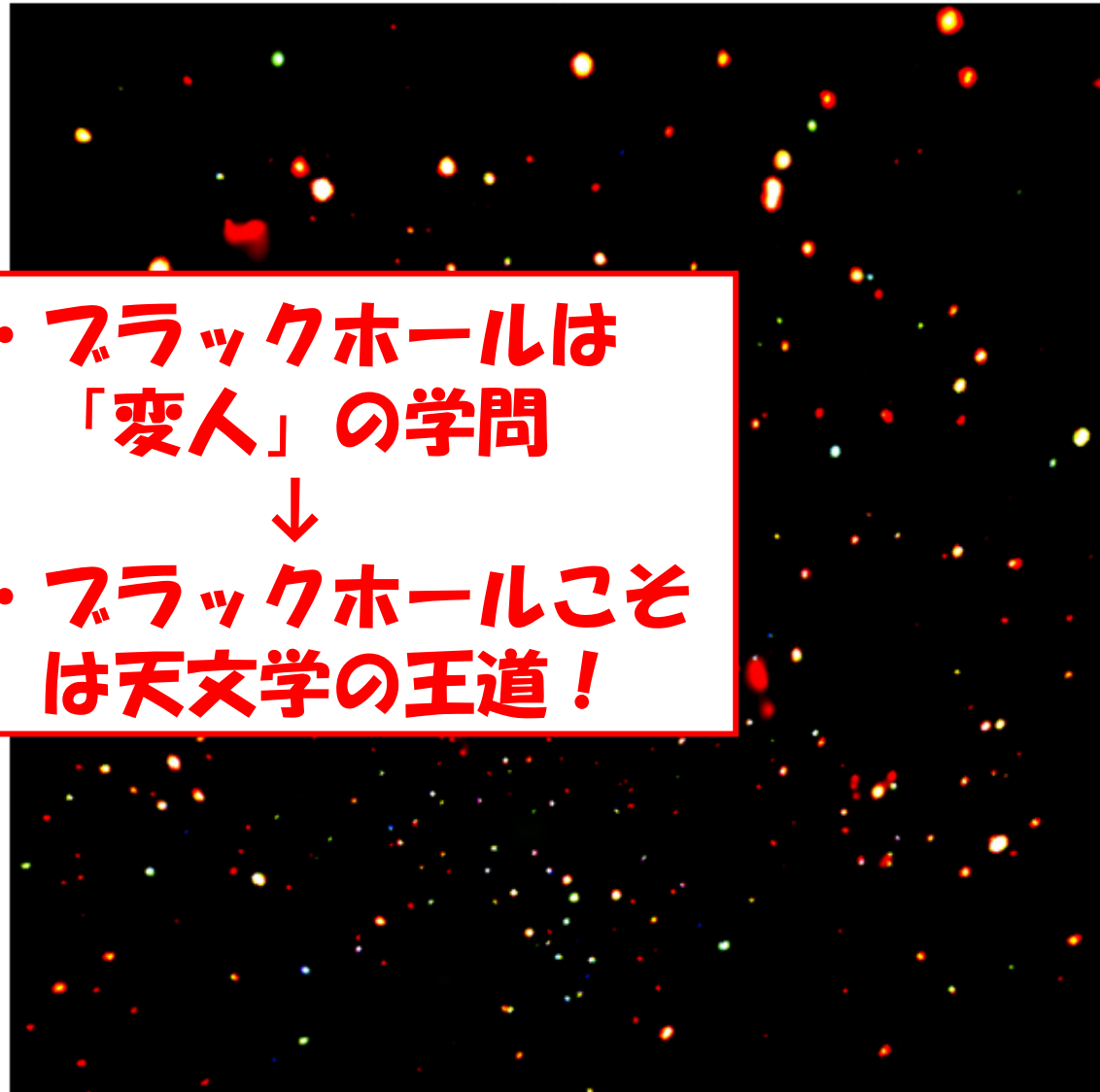
星や銀河



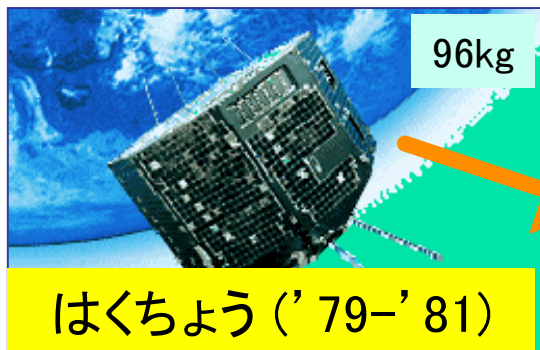
X線でみた宇宙

ブラックホールなど

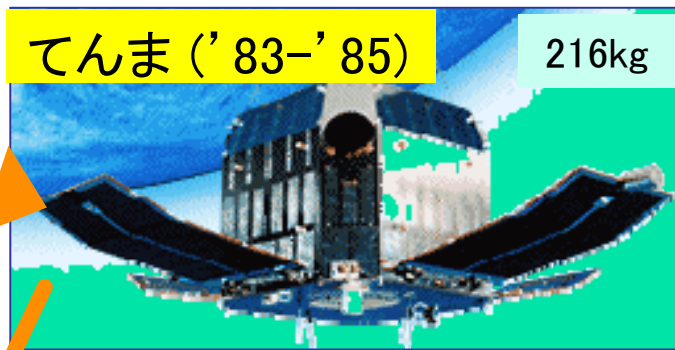
- ・ブラックホールは「変人」の学問
- ↓
- ・ブラックホールこそは天文学の王道！



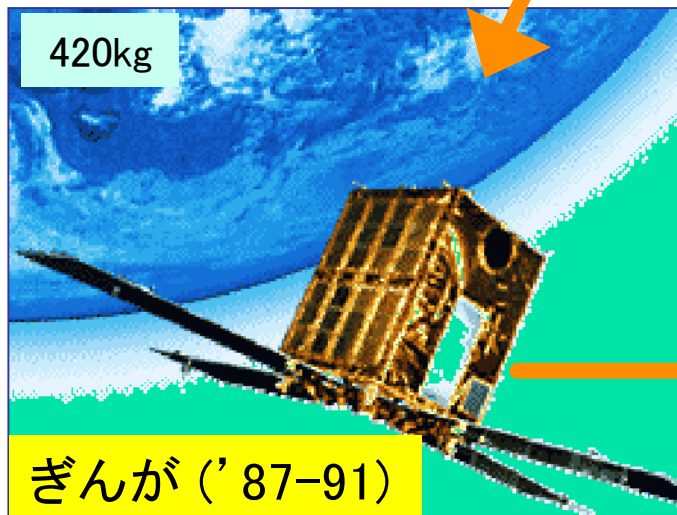
日本のX線天文衛星



日本初のX線観測衛星
「はくちょう座X-1」が名前の由来



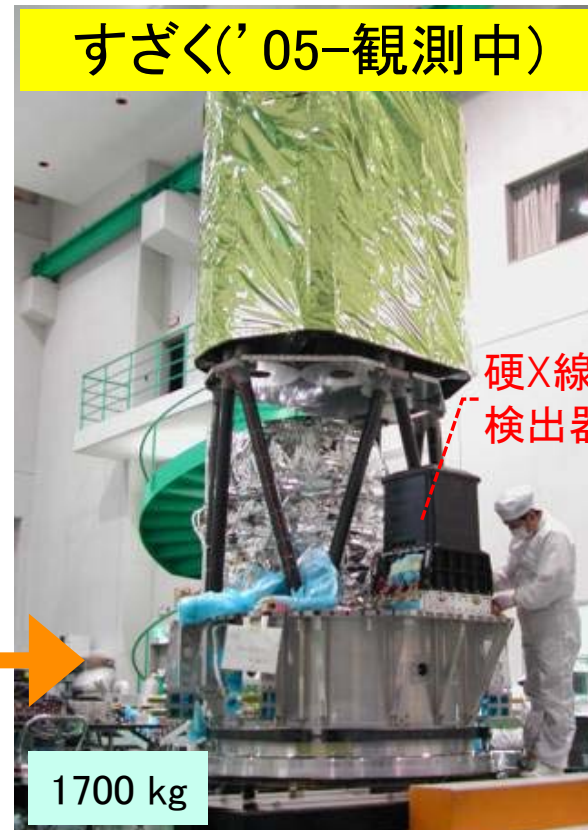
ブラックホールの極近傍までのびているガス円盤を発見(牧島他'86)



根来(当時阪大院生)が、「重ね合わせショット解析」を考案。
ブラックホールに特有なX線の変動現象を見いだした(根来他'94)。
~ 60 keV まで観測可能



X線で撮像と分光に成功。
ブラックホールの近傍から、鉄の蛍光輝線を精度よく測定。
~ 10 keV まで観測可能



すざく('05-観測中)

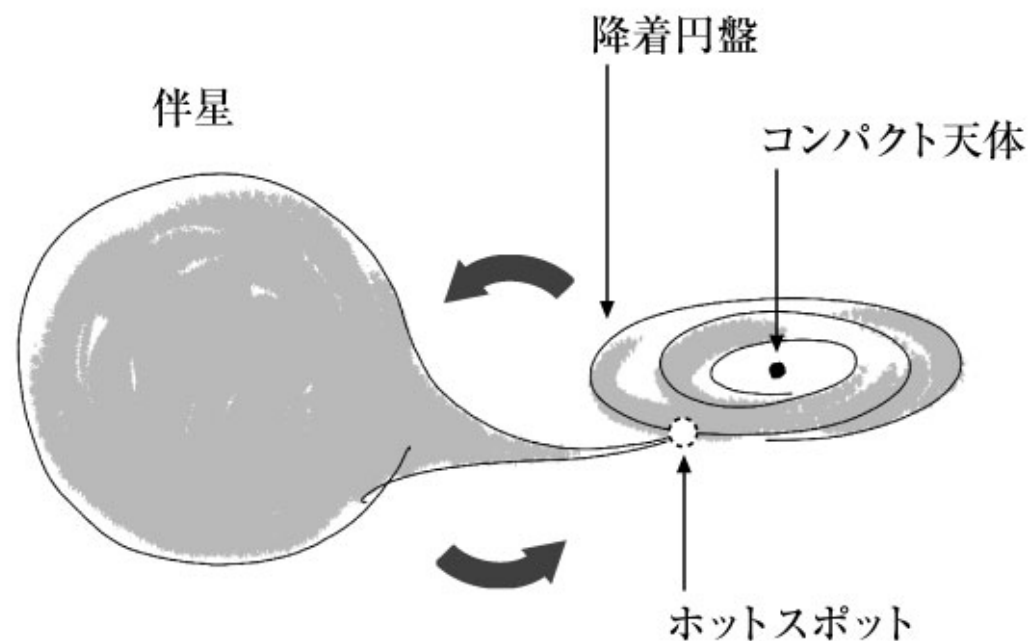
CCDカメラ (0.3-10keV)
硬X線検出器(10-600keV)

~ 2015年以降、

ASTRO-H衛星	2400 kg
GEMS衛星	260 kg

連星系ブラックホール

- **ふつうの星とブラックホールからなる連星系**
- **お互いのまわりをくるくる回る**
周期~1日程度
間隔~太陽半径の数倍



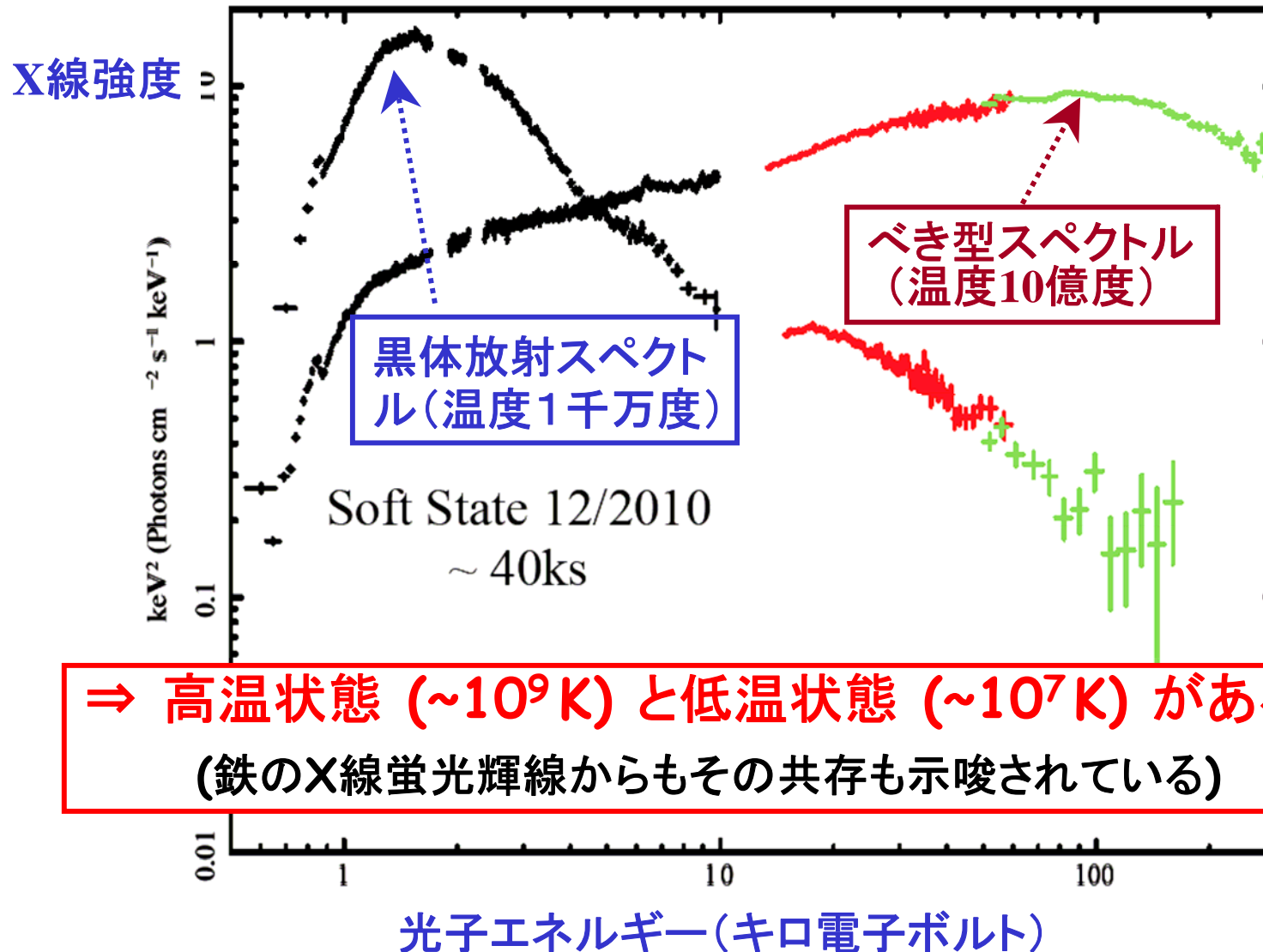
© 落合隆郎

(地球半径~6400km, 太陽半径~109×地球半径)

- **現在、数十個発見 (← 日本の「ぎんが」衛星が続々発見)**

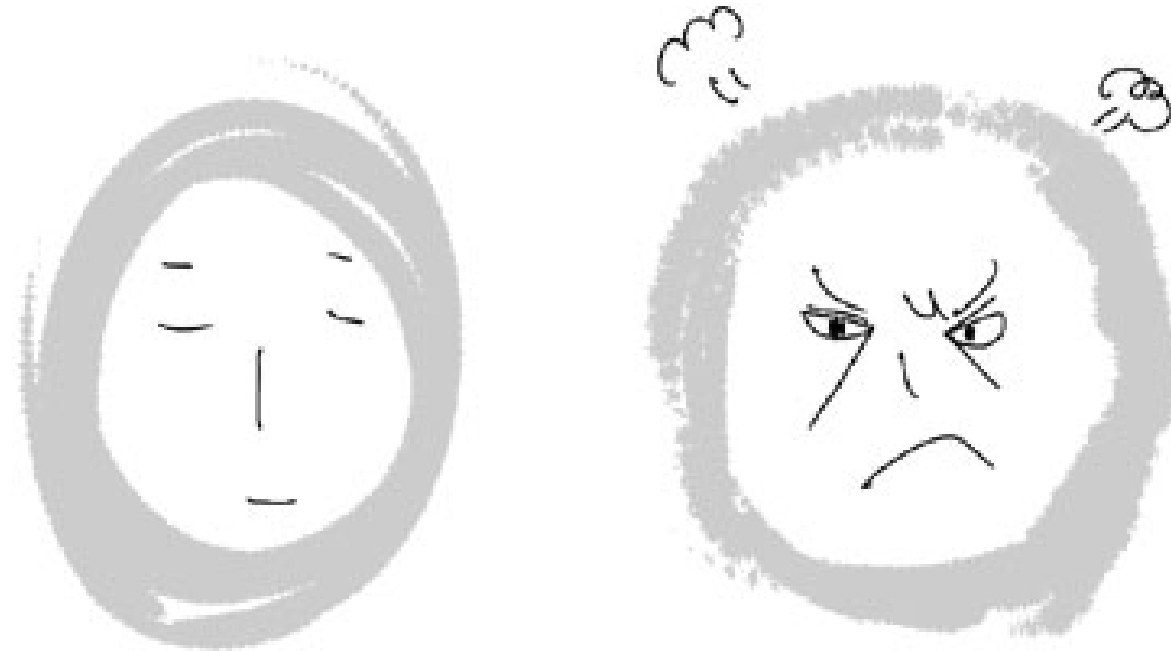
ブラックホール連星：二つのスペクトル状態

(S. Yamada)



⇒ 高温状態 ($\sim 10^9$ K) と低温状態 ($\sim 10^7$ K) がある
(鉄のX線蛍光輝線からもその共存も示唆されている)

ブラックホールの降着モード

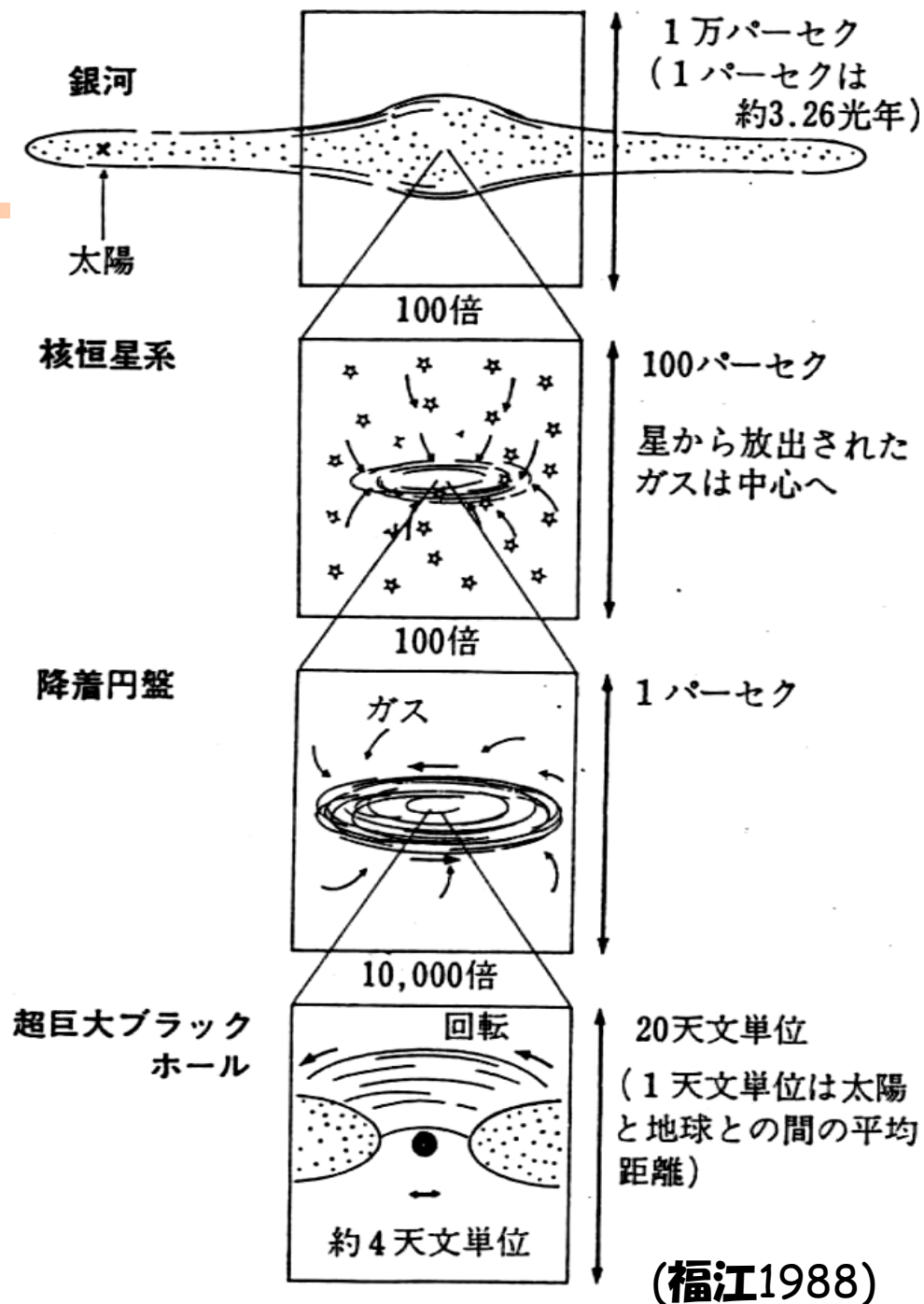


ブラックホール天体は二つの顔をもつ。

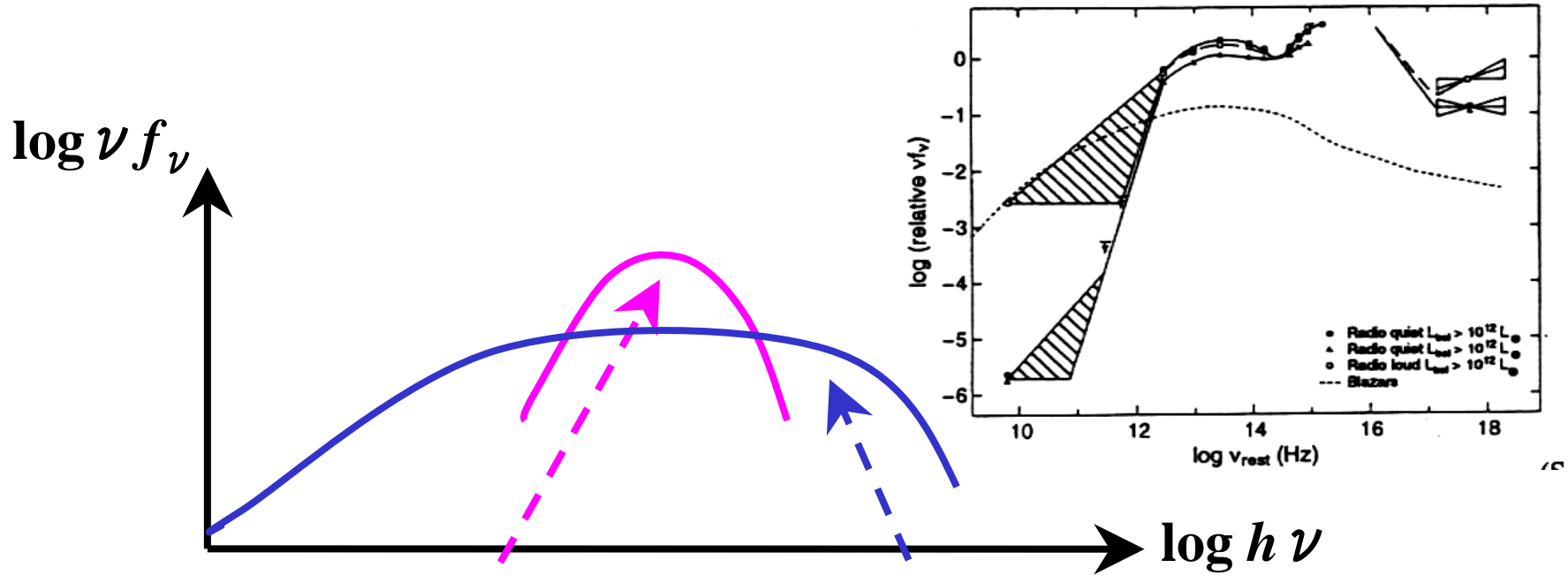
- ・沈着冷静な顔（ソフトステート：左）
- ・興奮した顔（ハードステート：右）

銀河中心 ブラックホール

- (活動)銀河の中心には
巨大ブラックホールが
あるらしい
- ブラックホールのまわりを
ガス円盤がとり囲む
- ブラックホールは光らない
が、**ガス円盤は明るく光る**



AGN: 二つのスペクトル成分



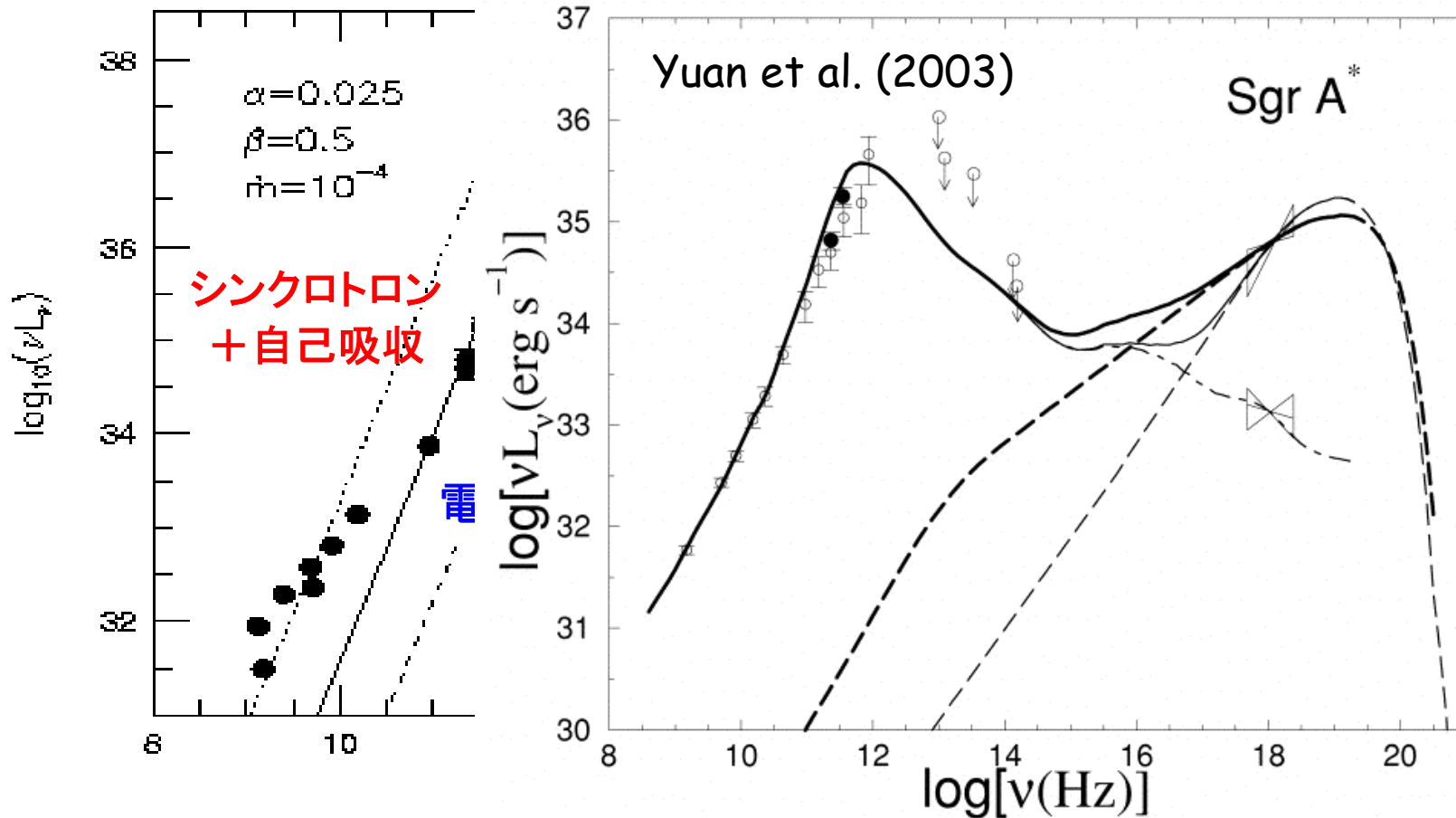
ビッグブルーバンプ (UV)
 黒体放射スペクトル
 $T_{\text{eff}} \sim 10^5 \text{ K}$ (10 eV)

広帯域スペクトル (電波 $\sim \gamma$)
 べき $f_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ ($\alpha \sim 0.7$) + 折れ
 曲がり $T_{\text{elec}} \sim 10^9 \text{ K}$ + 自己吸収

⇒ 高温成分 ($\sim 10^9 \text{ K}$) と低温成分 ($\sim 10^5 \text{ K}$) の共存
 (鉄のX線蛍光輝線からもその共存が示唆されている)

Sgr A* → 高温成分のみ

Narayan et al. (1995); Manmoto et al. (1997)



理論計算(線)と観測点(●)

なぜX線？ ～二つの成分の起源～

重力
エネルギー

光(電磁波)がよく出るか否か(放射効率の大きさ)によって見え方が異なる。



No

流体

高温降着流(さっと落ちてあまり光らない流れ)

→ 高温で暗い流れ → 広波長域で放射

$T \sim 10^9 - 10^8 \text{ K}$ → 硬X線・ガンマ線

Yes

放射

標準円盤(じわじわ落ちてよく光る円盤)

→ 低温で明るい円盤 → 黒体放射 ($\tau > 1$)

$T \sim 10^7 \text{ K} (M_{\text{BH}}/M_{\text{sun}})^{-1/4}$ → UV～軟X線

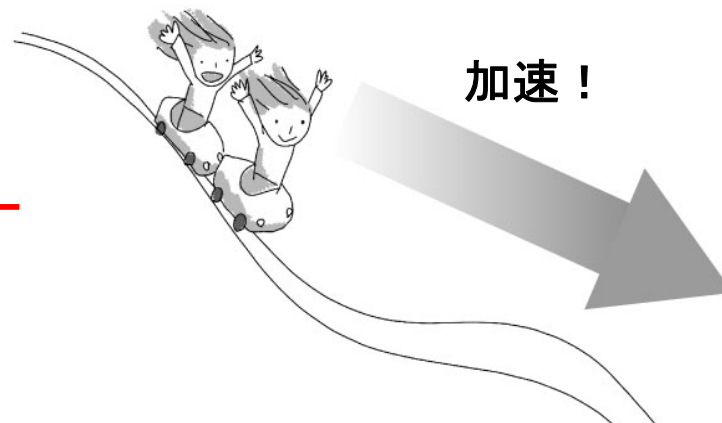
標準円盤モデル: 概要

■ 基本

$$F(r) = \frac{9}{8} v \Sigma \Omega^2 = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{\text{in}}}{r}} \right)$$

放射エネルギー ← 熱エネルギー ← 重力エネルギー

黒体放射 粘性加熱



© 落合隆郎

■ モデルの予言

■ 温度分布

$$T_{\text{eff}} \approx 10^{7.0} \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10M_{\text{sun}}} \right)^{-1/4} \left(\frac{\dot{M}}{L_{\text{E}}/c^2} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{3r_{\text{g}}} \right) \text{ K} \rightarrow T_{\text{eff}} \propto r^{-3/4}$$

■ 多温度黒体放射スペクトル

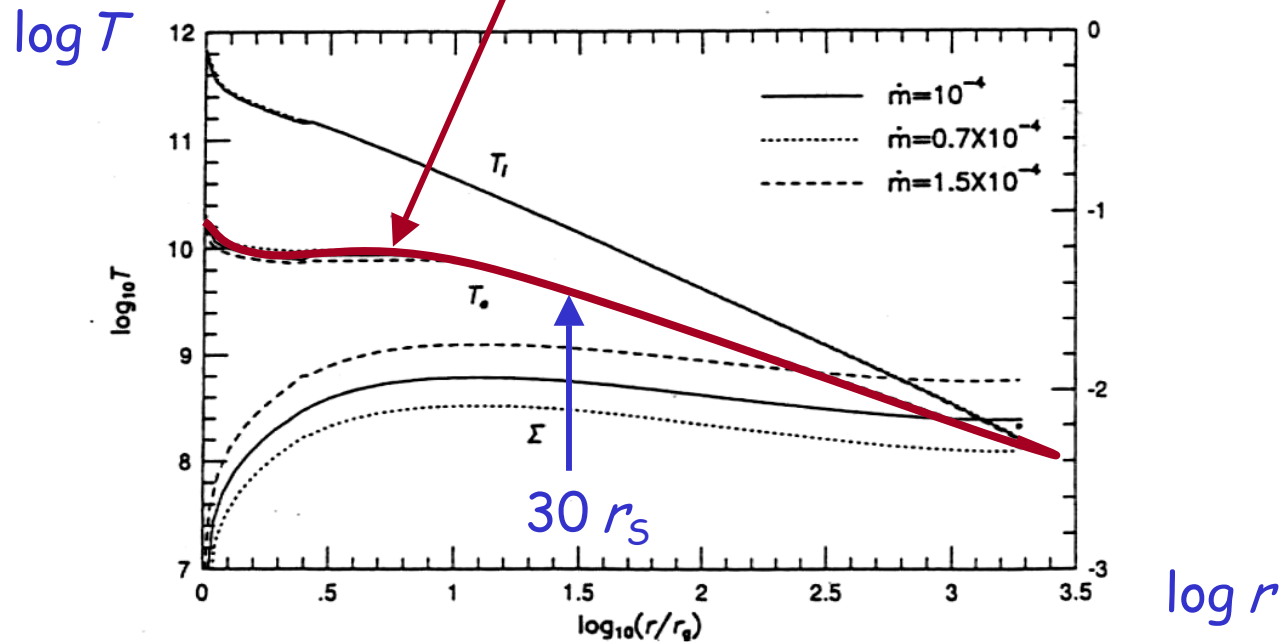
■ 円盤内縁半径 r_{ms} ($= 6GM/c^2$ for non-rotating BH) $\rightarrow L_{\text{disk}} \propto T^4$

■ エネルギー変換効率 = 0.06-0.42 (L_{disk} によらない)

高温降着流：温度分布

- ADAF (RIAF) model

ラフに、 $T \propto r^{-1}$ 、しかし T_{elec} は $\sim 10^{10}K$ ($\sim m_e c^2/k$) で頭打ちに



Manmoto et al. (1996)

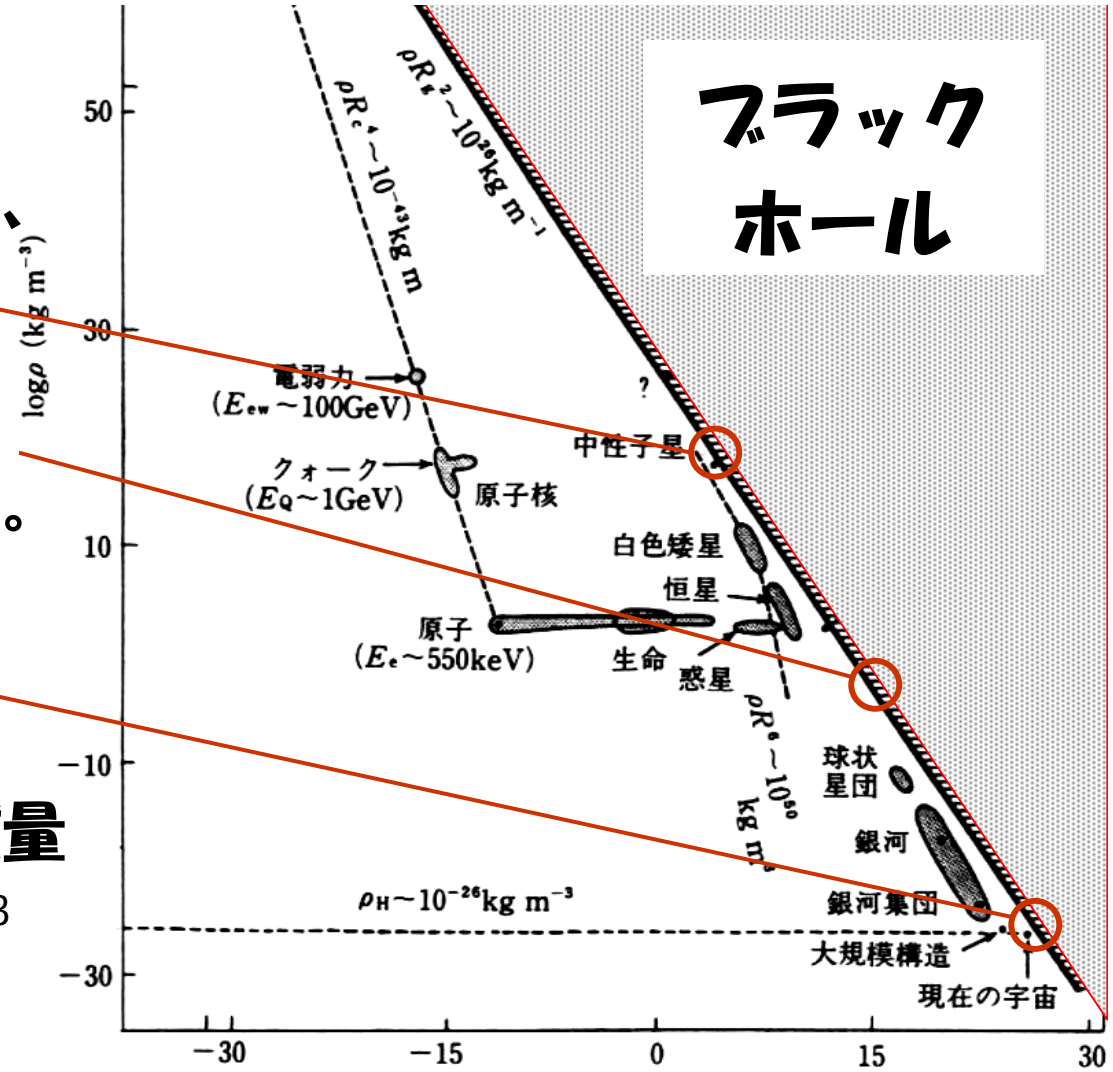
- 円盤コロナモデル

同じような温度分布: $T \propto r^{-1}$

しかし、コンプトン冷却のため、やや低め(ファクター3-10)の温度

2. ブラックホールって高密度？

- 連星系ブラックホールは、確かに高密度。
- しかし、大質量ブラックホールは高密度ではない。
- 見方によっては、宇宙もブラックホール！？
- ブラックホール半径 \propto 質量
 \Rightarrow 密度 \propto 質量 / (半径)³
 \propto (質量)⁻²

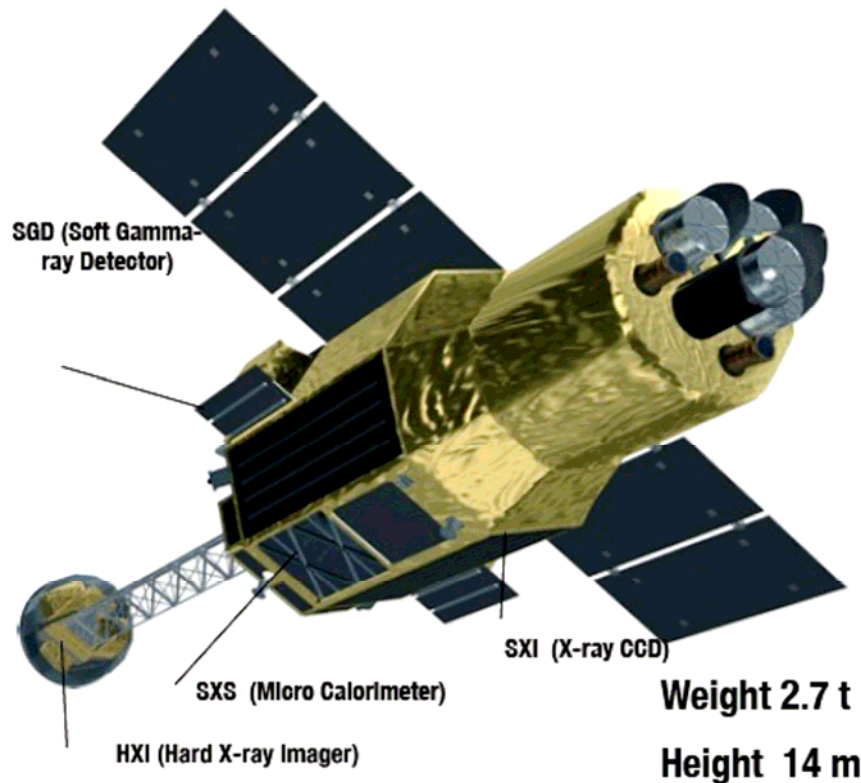


(池内了「観測的宇宙論」) logR (m)

3. 近未来の観測: ASTRO-H衛星



ASTRO-H is an international X-ray observatory, which is the 6th in the series of the X-ray observatories from Japan. More than 160 scientists from Japan/US/Europe/Canada.



- Launch vehicle: JAXA H-IIA rocket
- Orbit Altitude: 550km
- Orbit Inclination: ~31 degrees
- Launch : 2015

International Cooperations

<p>NASA</p> <ul style="list-style-type: none"> Micro Calorimeter Array/ADR Two soft X-ray Telescopes Eight Science Advisors Pipeline Analysis
<p>SRON & U. of Geneva</p> <ul style="list-style-type: none"> Filter Wheel/MXS for SXS <p>CEA/DSM/IRFU</p> <ul style="list-style-type: none"> Contribution to BGO Shield/ASIC test <p>ESA</p> <ul style="list-style-type: none"> Three Science Advisors Contribution to mission instruments (SXS/HXI/SGD/HXT) User support in Europe
<p>CSA</p> <ul style="list-style-type: none"> Metrology System



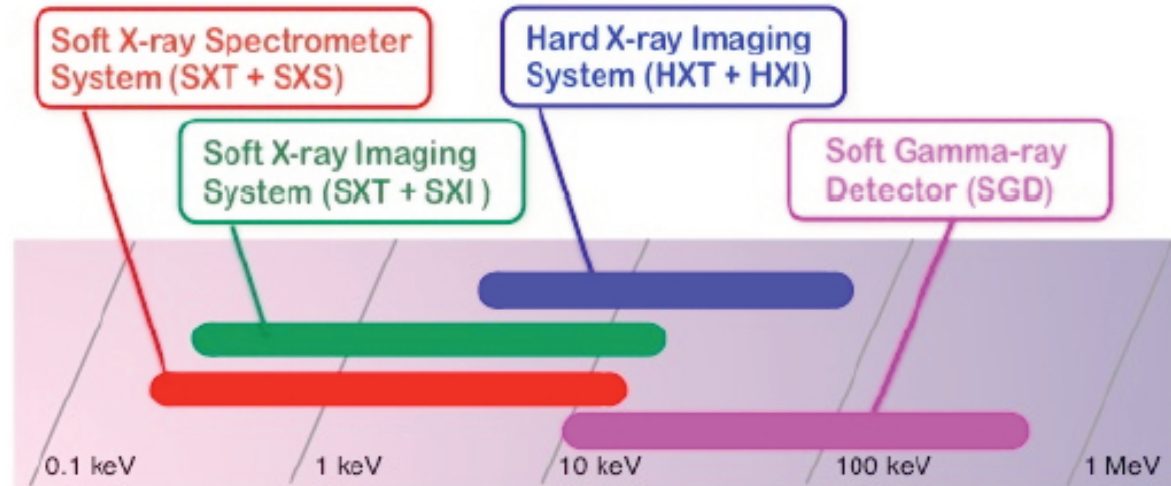
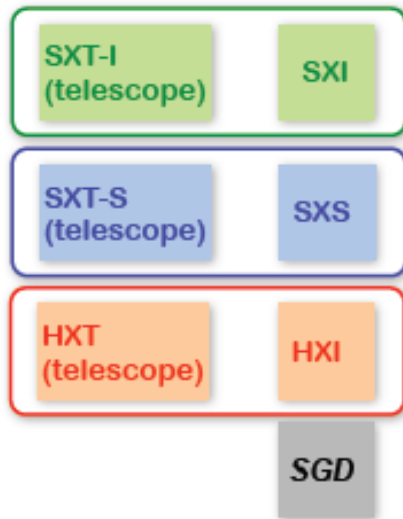
58 institutions (Japan 33)

266 scientists & leading engineer © Takahashi 2014

2. ASTRO-H

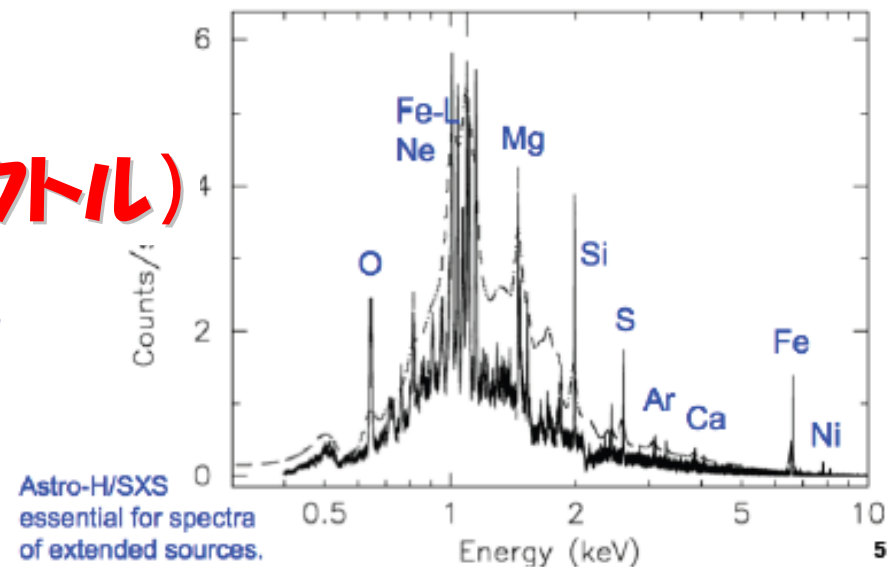


1. ワイドバンド(広い光子エネルギー領域: 0.3-600keV)



2. 超精密分光(細かいスペクトル)

5 eV (FWHM) @ 6 keV



ブラックホール解の一意性

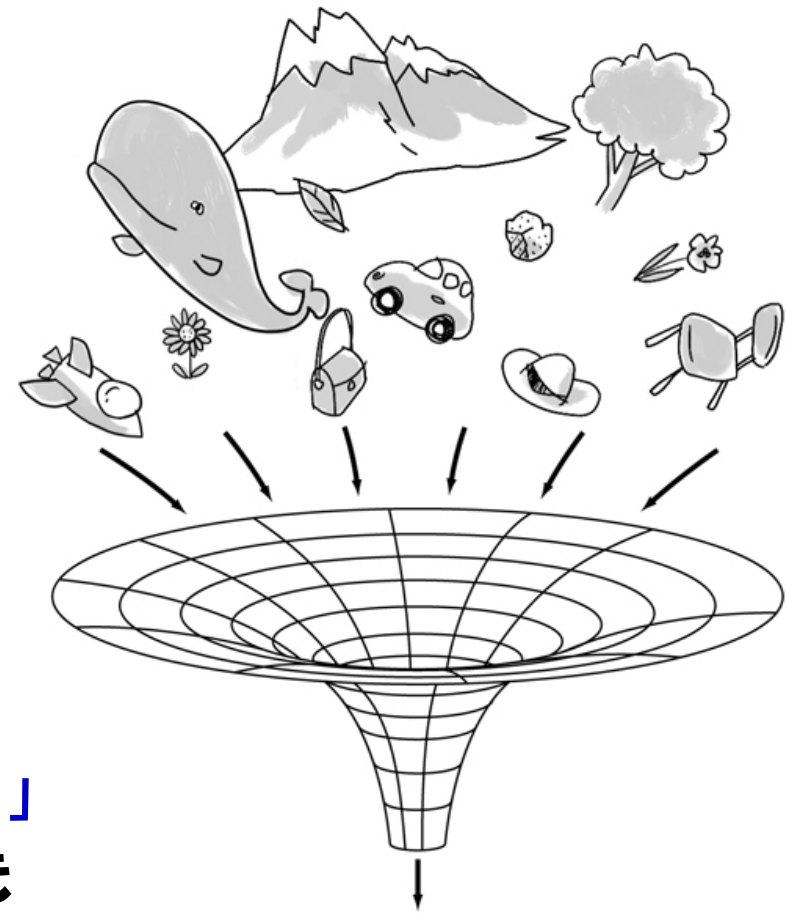
■ カー解の一意性

- (1) 時空が無遠慮で平坦
- (2) 時空が定常
- (3) 地平面の外に特異点がない
- (4) 電荷はない

いずれも満たす解はカー解のみ

- ## ■ ブラックホールに「毛が3本」
- ブラックホールの個性は、**質量**、**回転**、**電荷**のみ

- ## ■ 回転ブラックホールは面白い
- もしかして回転エネルギーを引き出せるかもしれない・・・

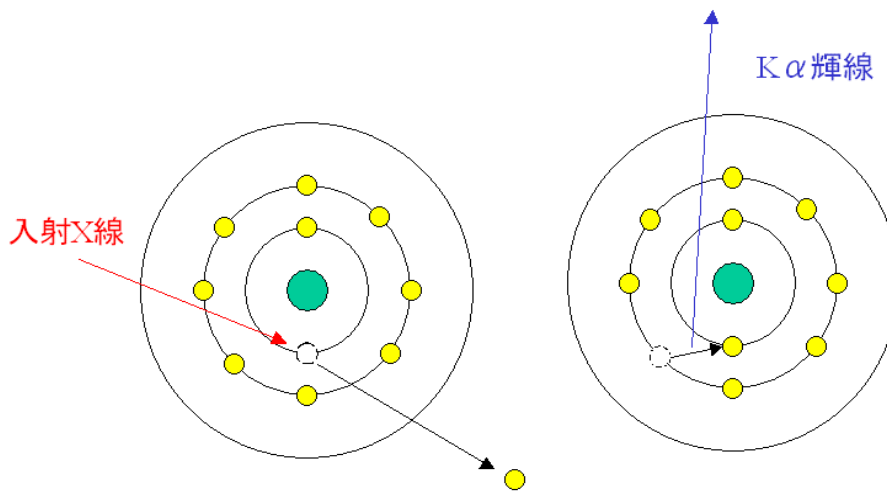


質量・回転・電荷 © 落合隆郎

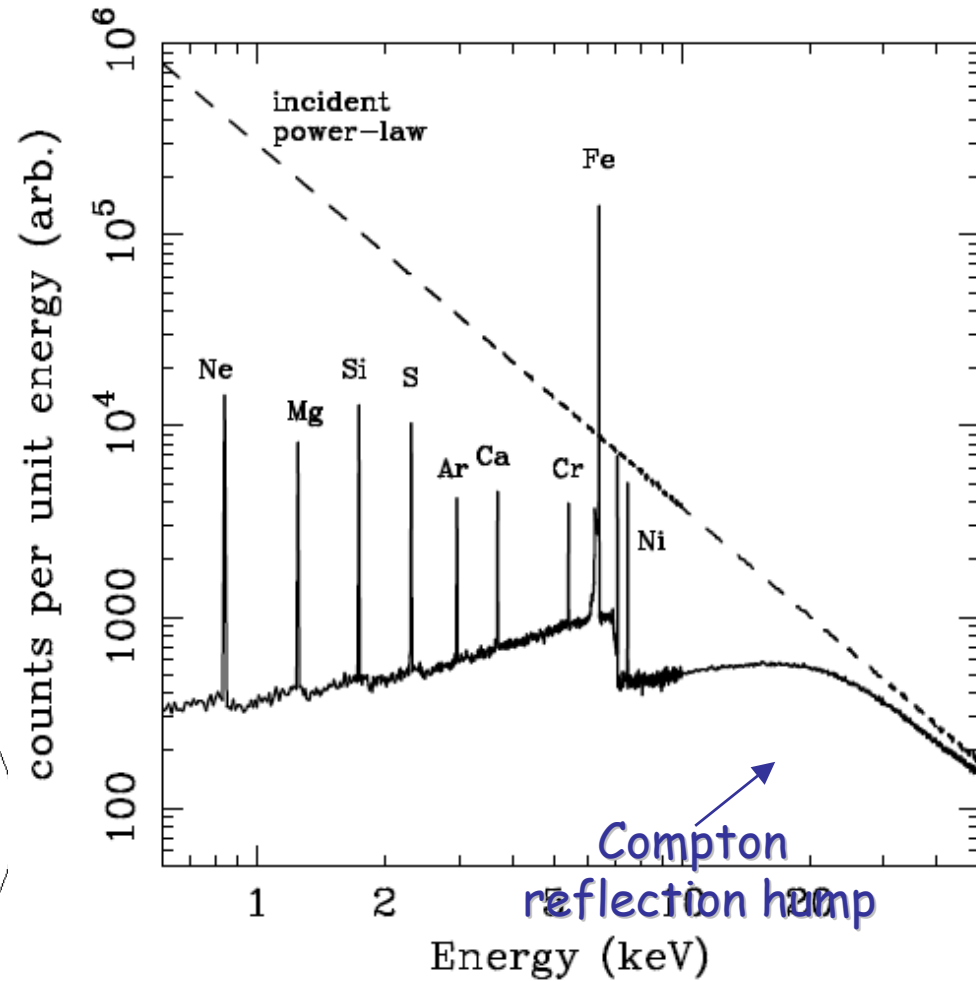
冷たいプラズマによる反射

べき型スペクトルのX線を
冷たい(~百万度以下)の
プラズマに入射

- 反射成分
- + 各元素の特性X線



© Kawanaka

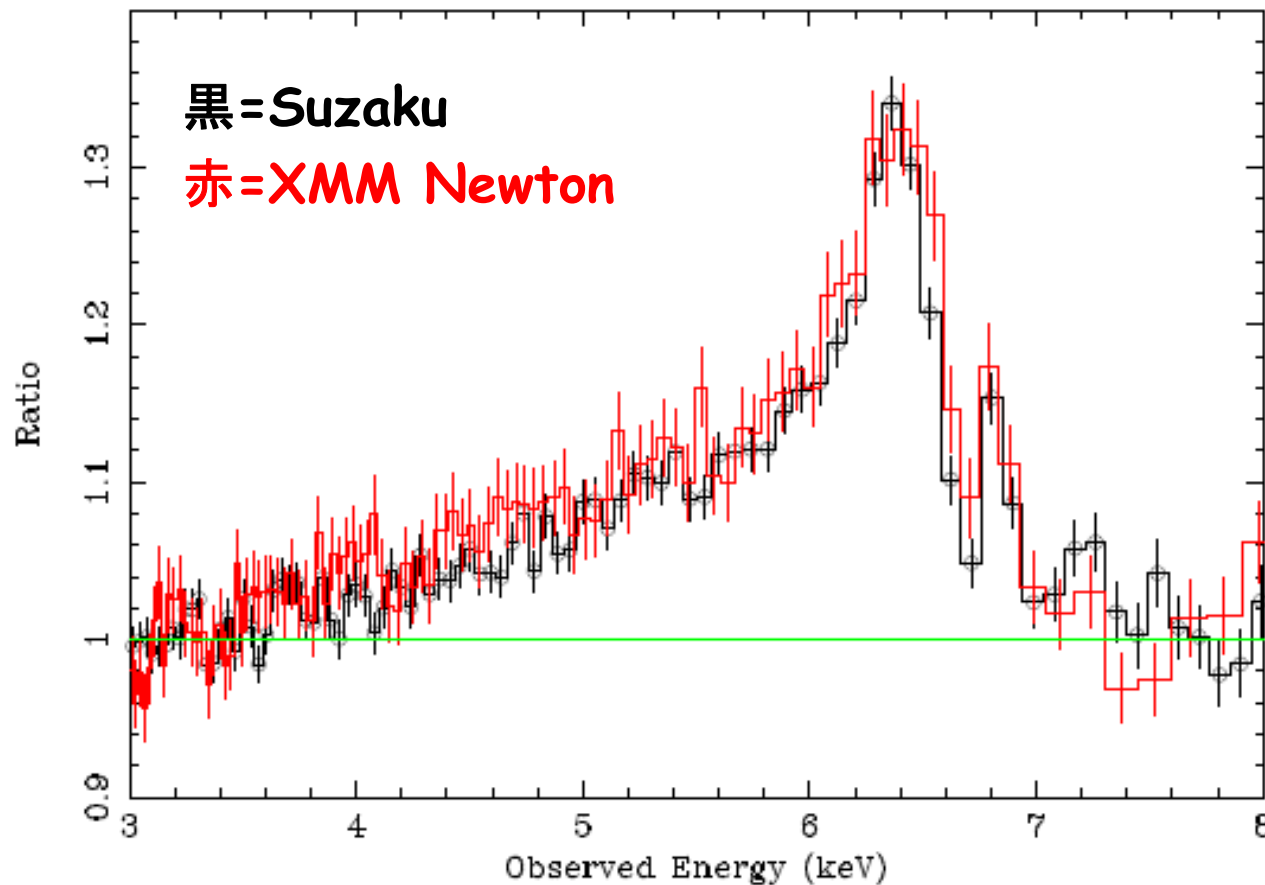


(Reynolds 1996)

MCG6-30-15の場合

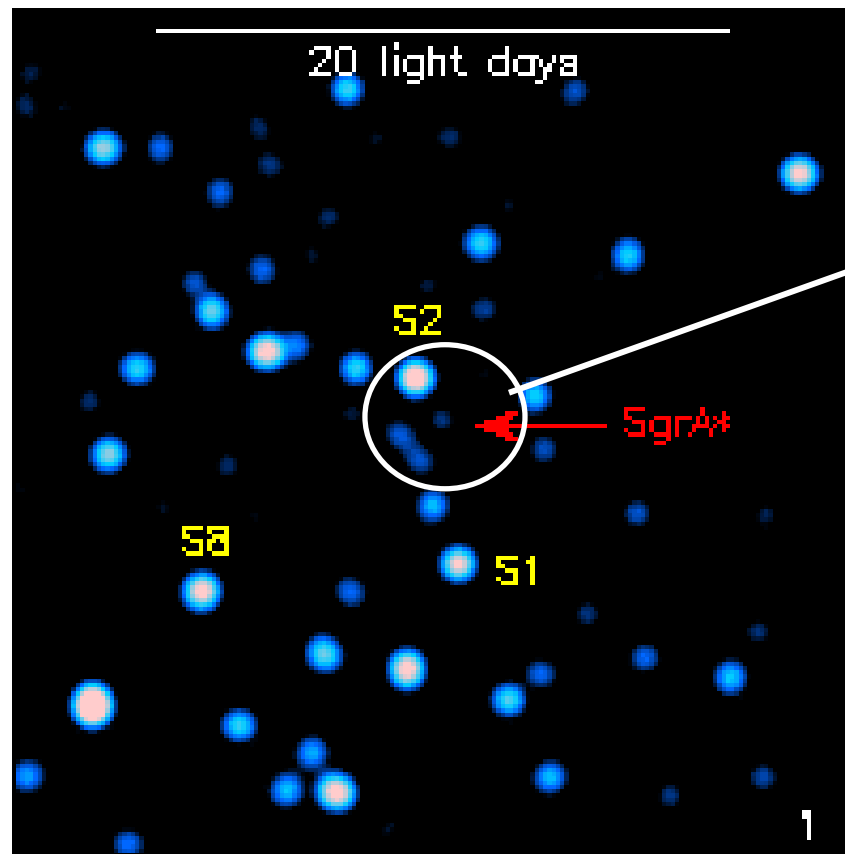
(Reeves+ 2006, Miniutti+ 2007)

広がった鉄輝線 → Kerr holeでないと説明できない(?)



4. ブラックホール光のちらつき

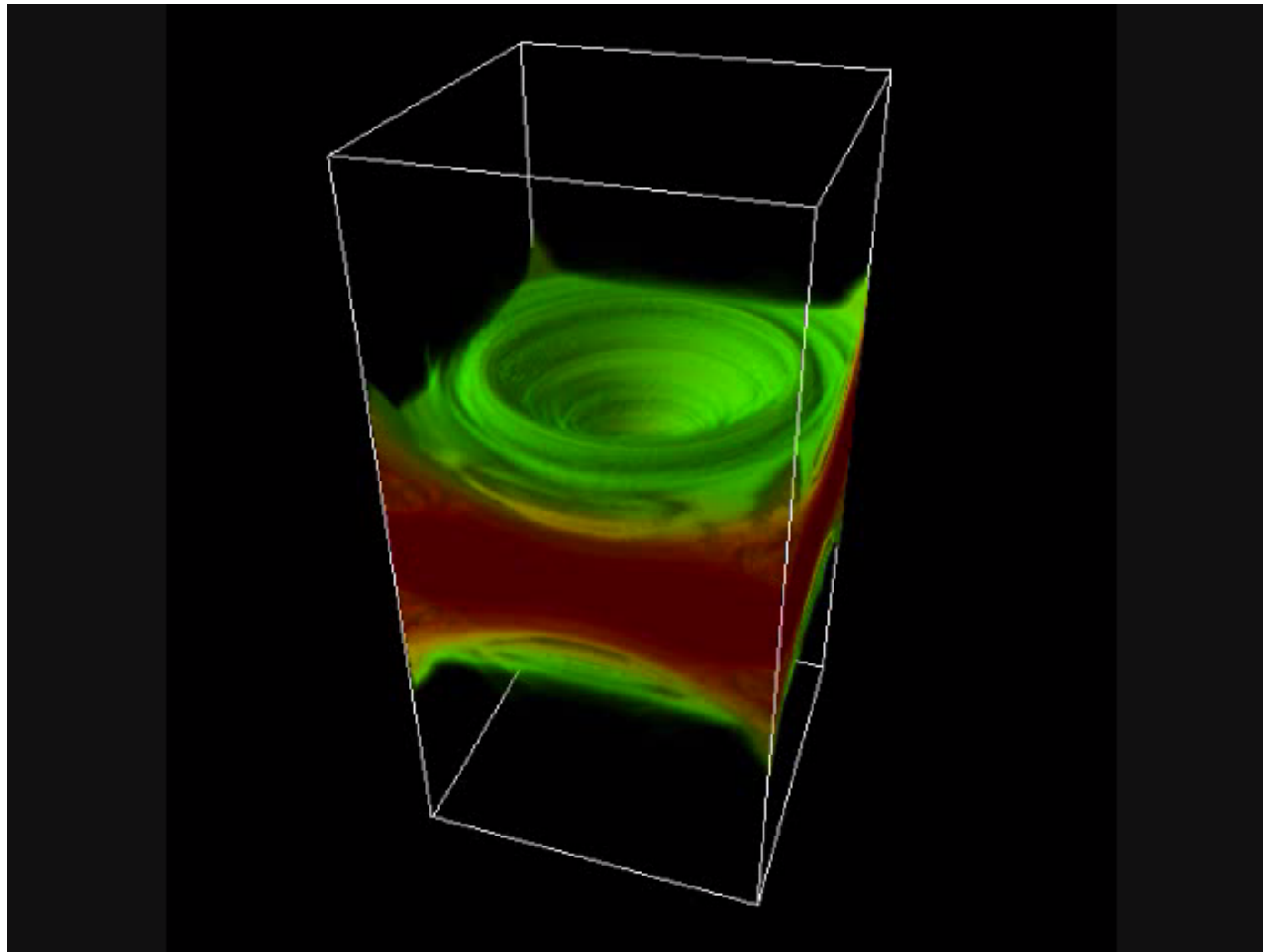
- 天の川銀河中心の赤外線観測
どこにブラックホール(Sgr A*)があるでしょう？



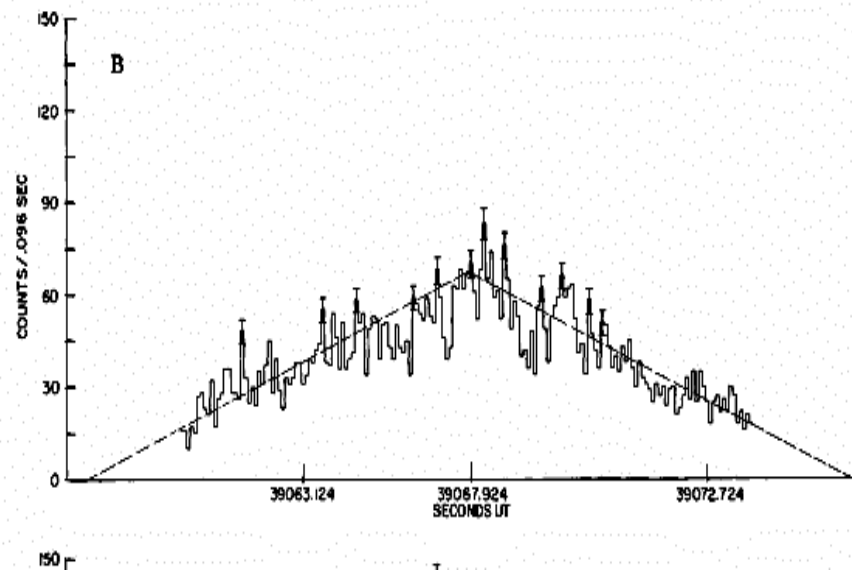
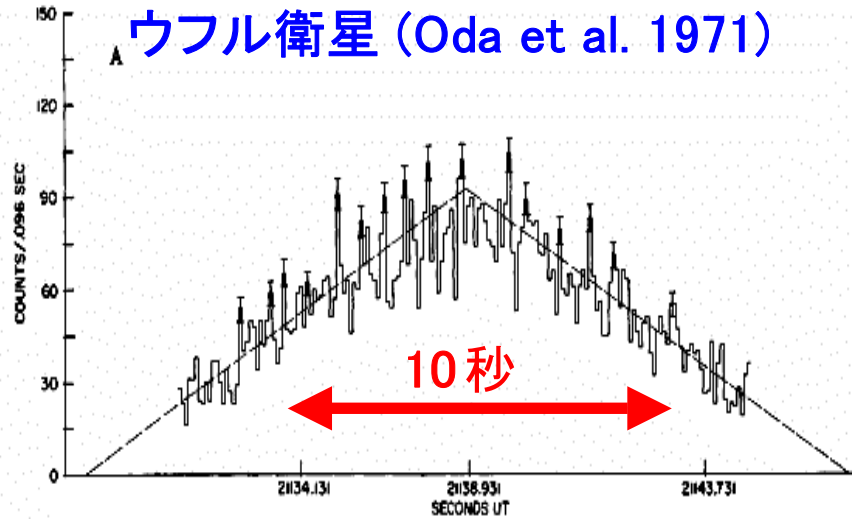
明るくなったり
暗くなったり
しているのが
ブラックホール。

注: 赤外線や電波・
X線は銀河系中心
を見通せる。

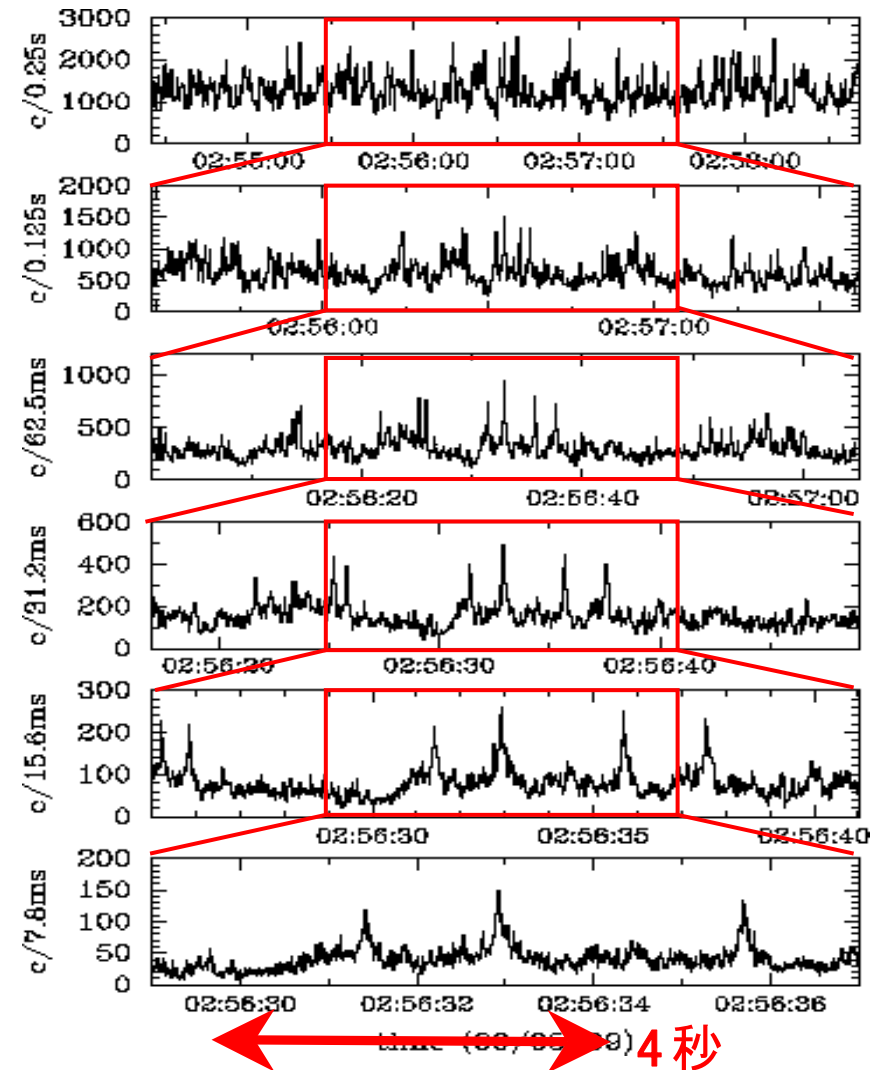
飛び出すガスのシミュレーション 中心にブラックホール



激しいX線変動：X線天文黎明期から観測

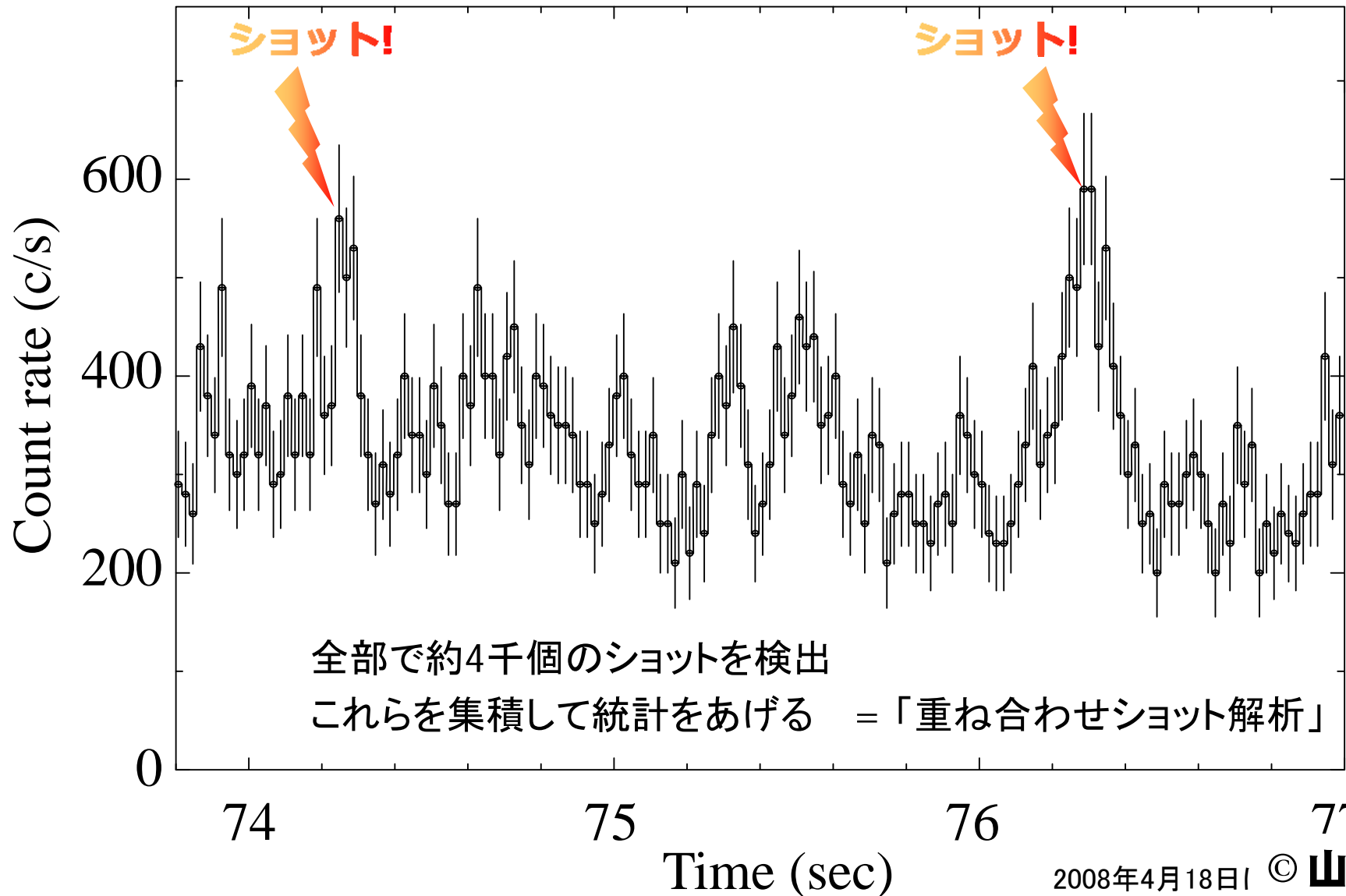


ぎんが衛星 (Negoro 1995)

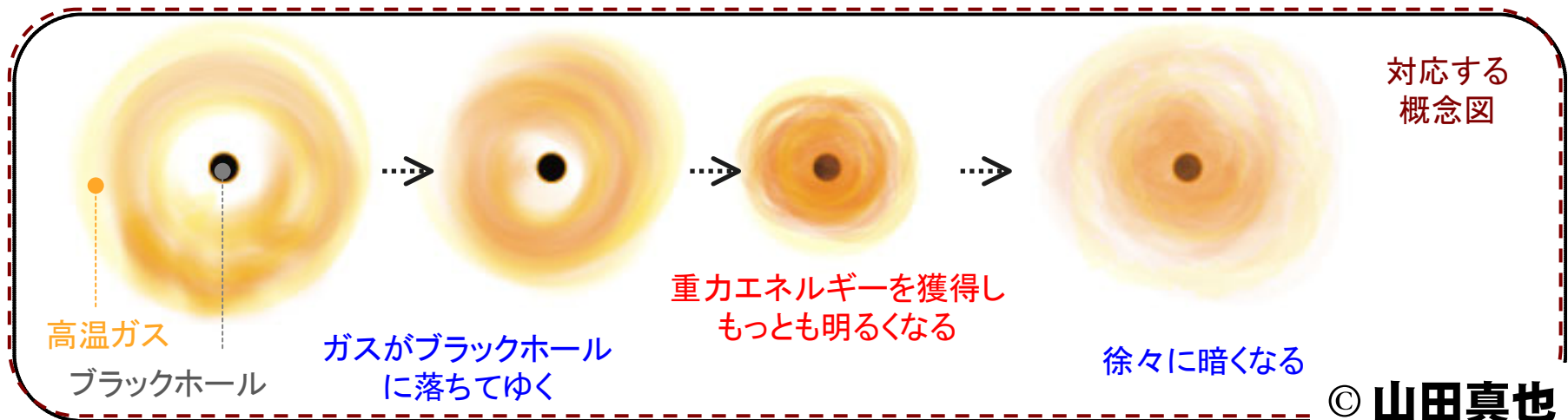
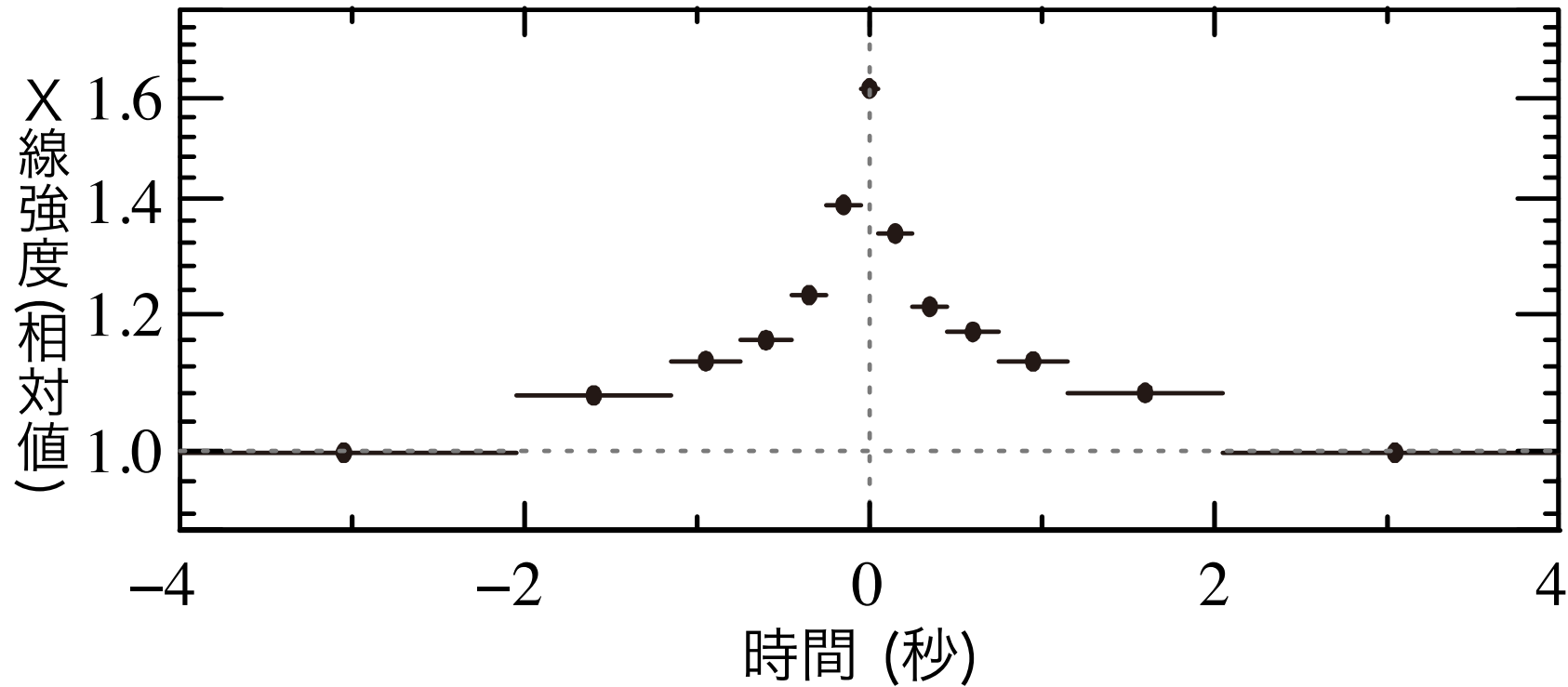


「すざく」による「はくちょう座X-1」の観測

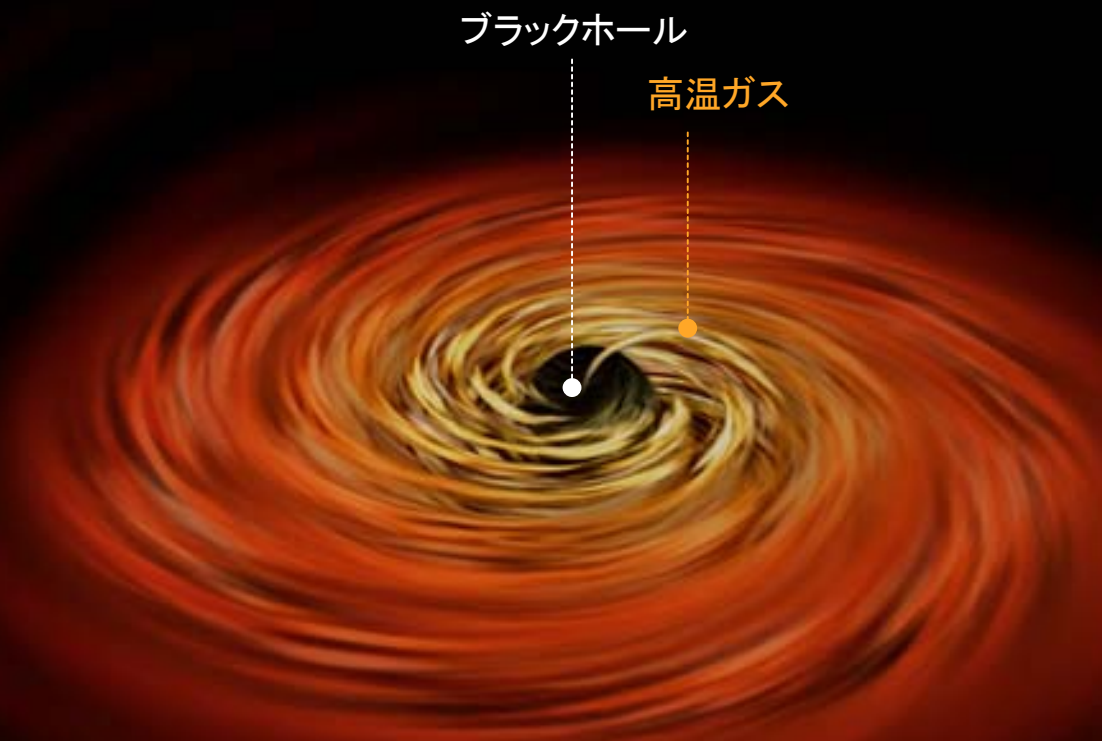
X線強度の時間変化 (約4万秒の観測のうち、3秒間だけを拡大表示)



重ね合わされたショットの強度変化



ブラックホールに落ち込む最後の1/100秒で急激にガスが加熱
「表面のある天体」ではガスが冷却されるので説明できない



ブラックホールの直接証明に一步前進

Adi Sato

まとめ

「ブラックホール天文学」の時代

ブラックホールは長間、吸い込むだけの「いやな人」だった。
しかし、最近、ブラックホールの大事なはたらきがみえてきた。

ブラックホール = 宇宙の陰の主演

ブラックホールと日常？

- ・天文事象は、結構、茶の間の話題に？
- ・宇宙観は、人間の生き方にも影響を与える？
- ・学者という奇妙な人たちの存在は「癒し」に？