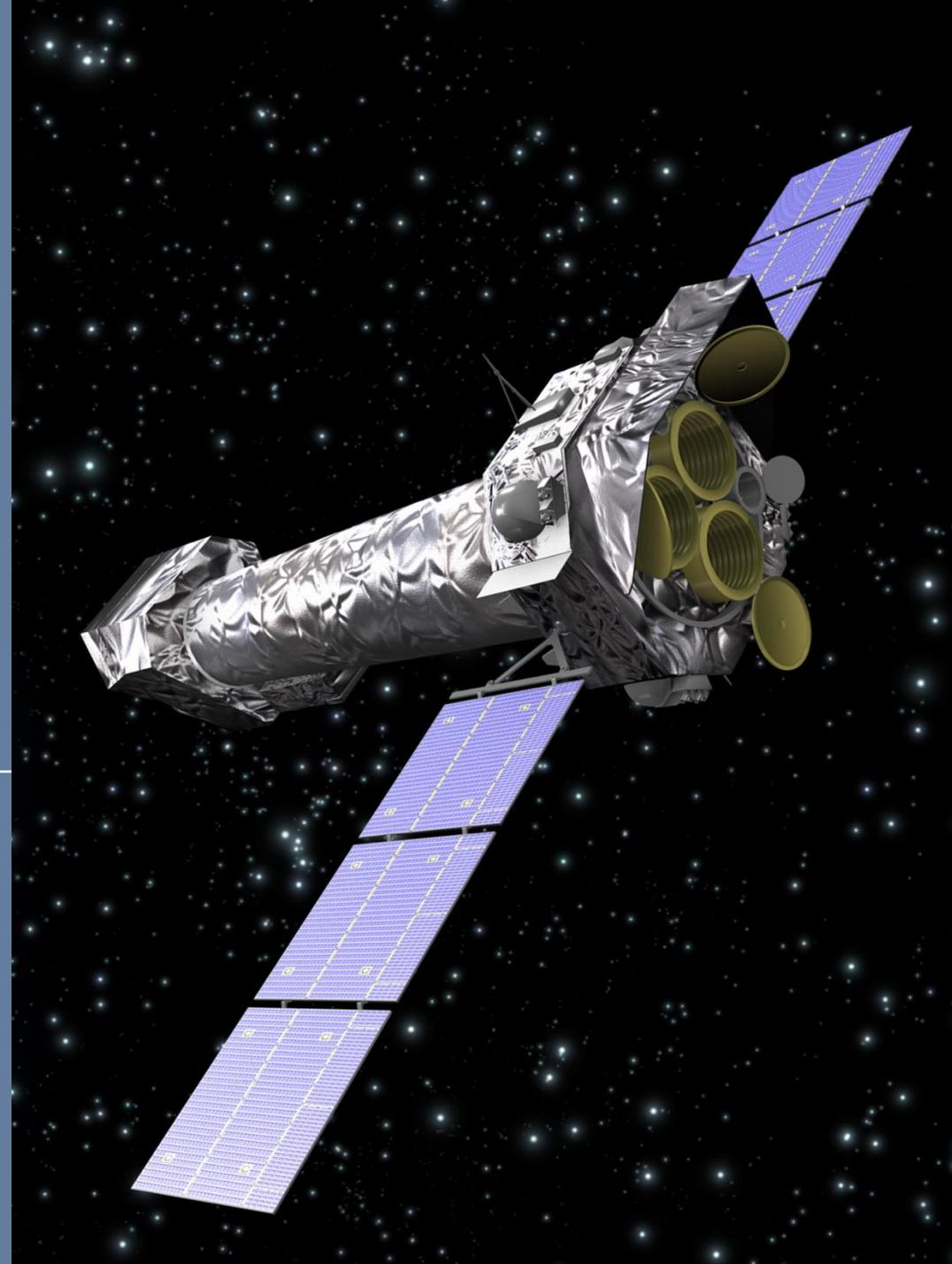


P6最終発表

M31の時間変動天体の解析

解析班：内田敦也

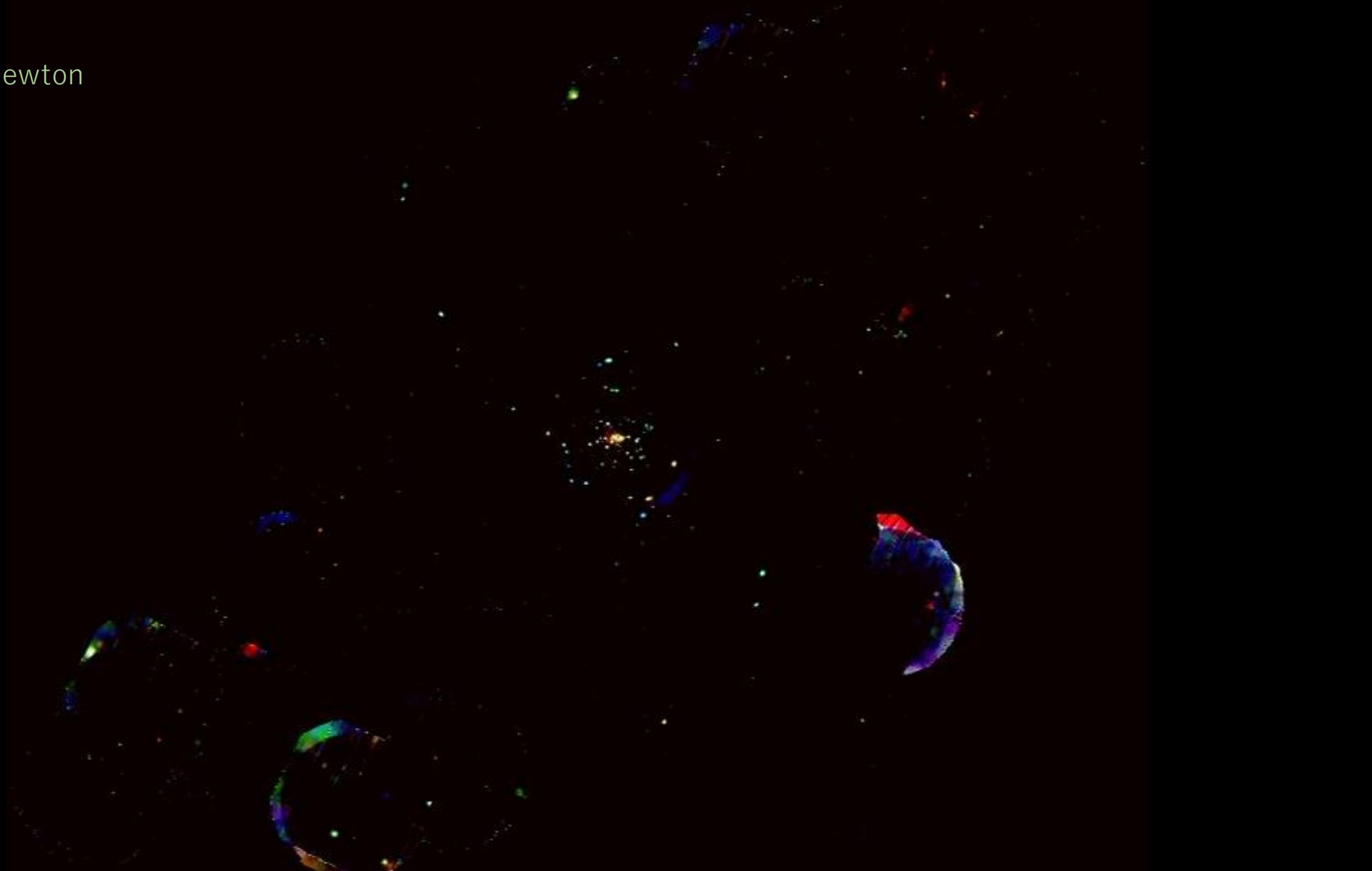
指導教員：内田裕之先生



M31 Optical

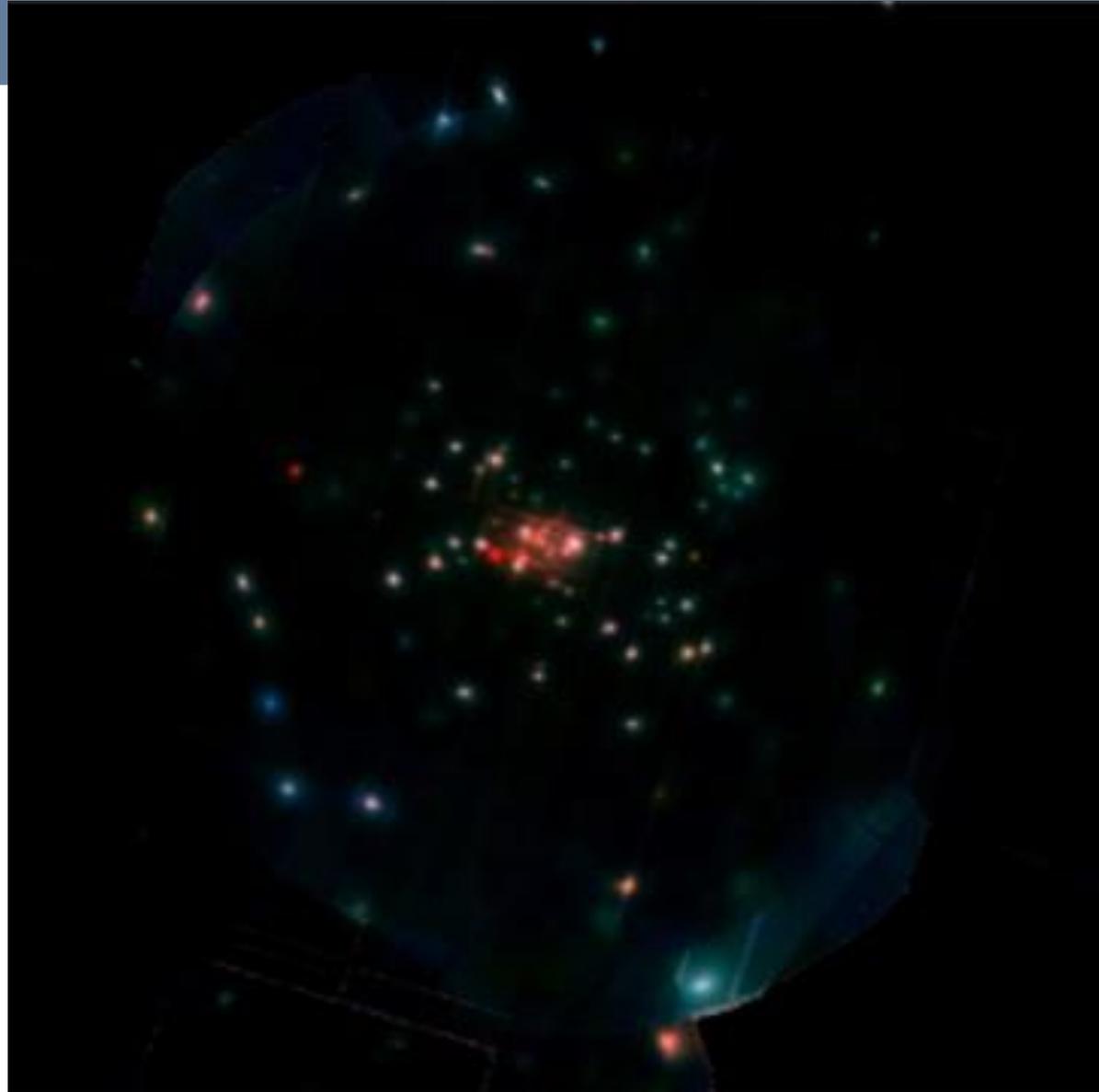
使ったデータ ソフト 天体などは書く
M31全体でのAU002の位置も
他のバンドがないからX線だけでやったことも言う

M31 Newton

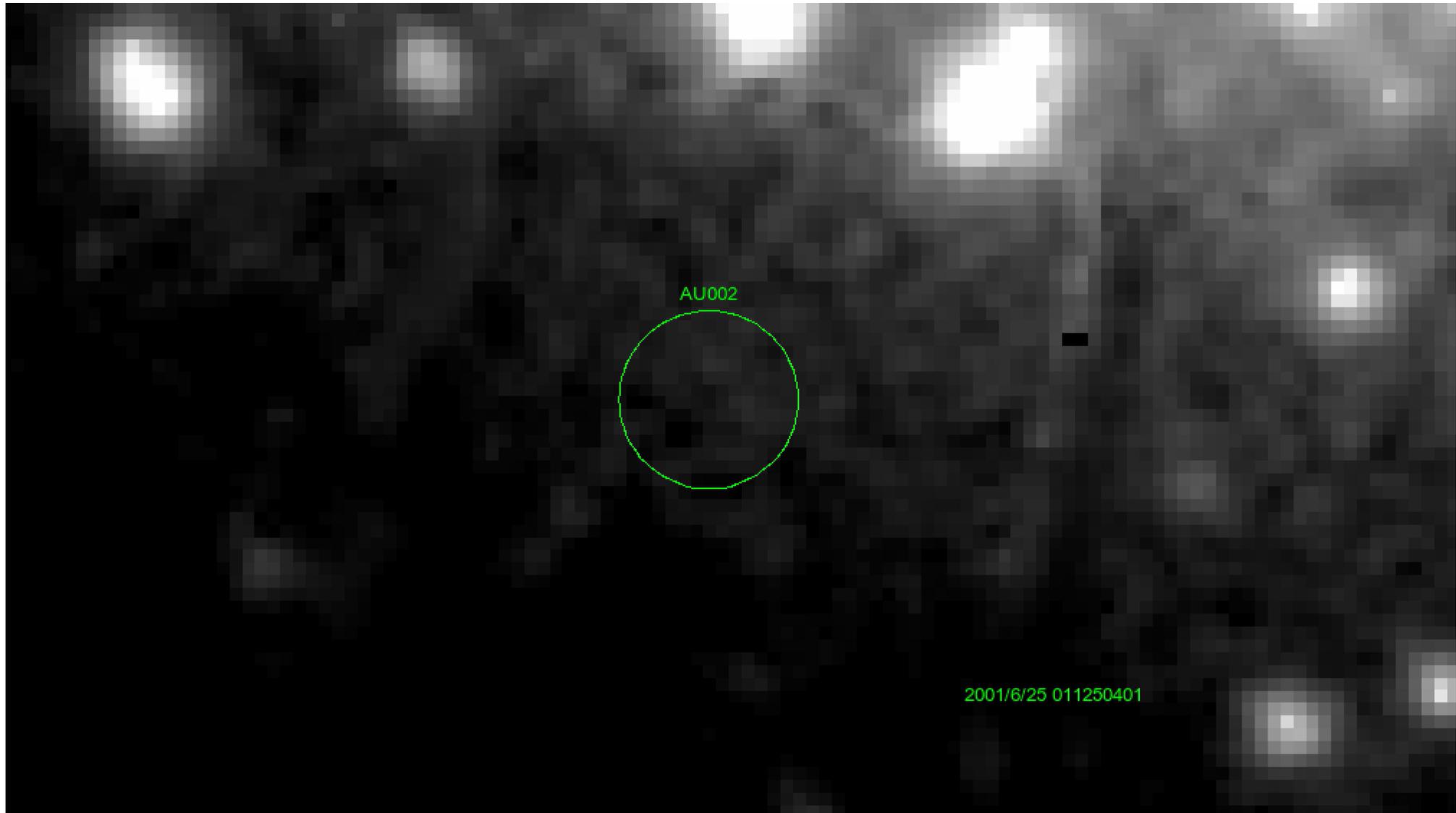


銀河中心周りの動画

赤:0.4-1 keV
緑:2-4keV
青:4-8keV

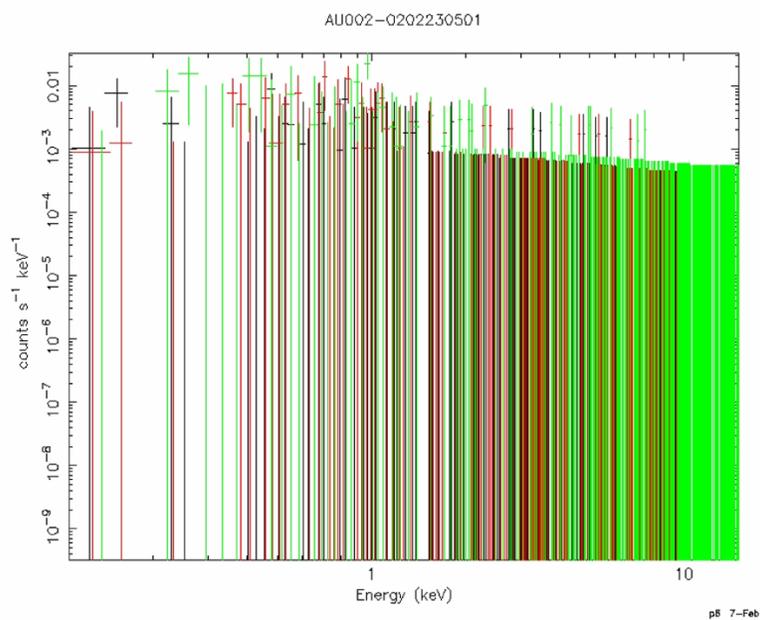


AU002の動画 (X線 0.3-12keV)

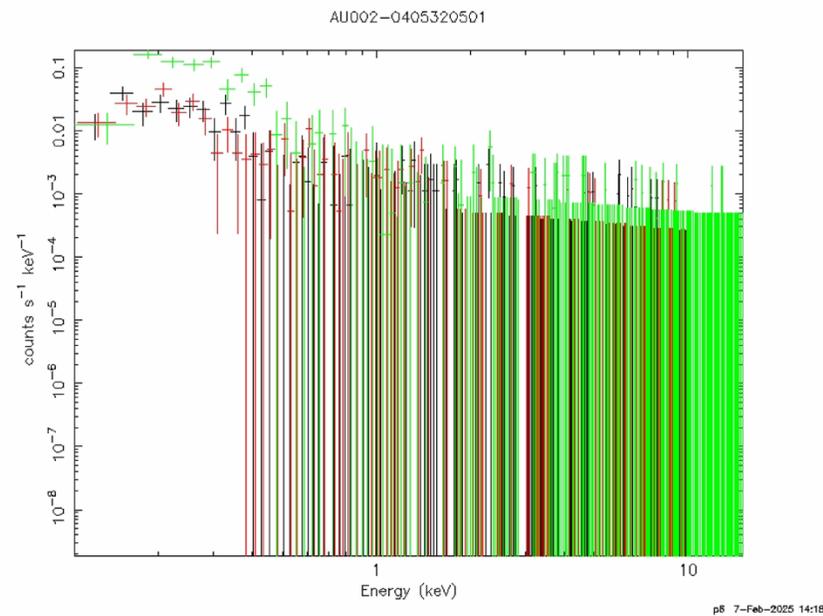


生のスペクトル

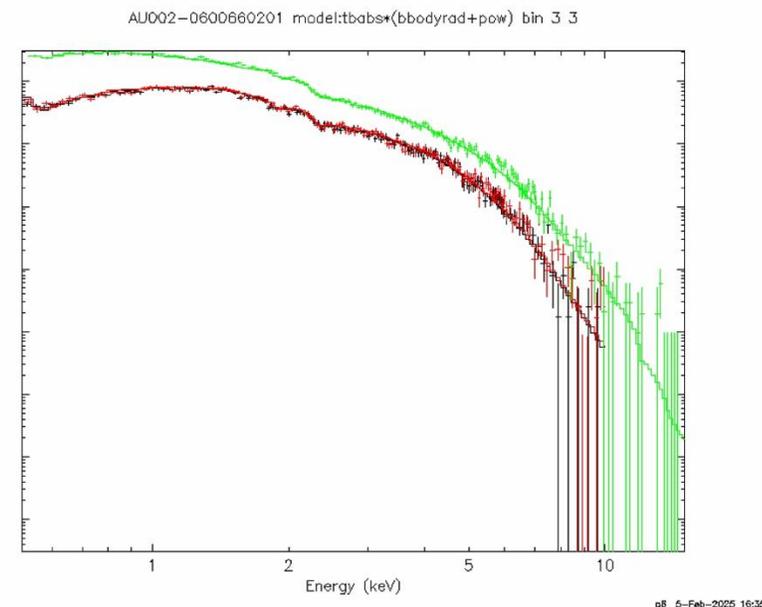
真っ暗な観測



一回目に弱く光った観測



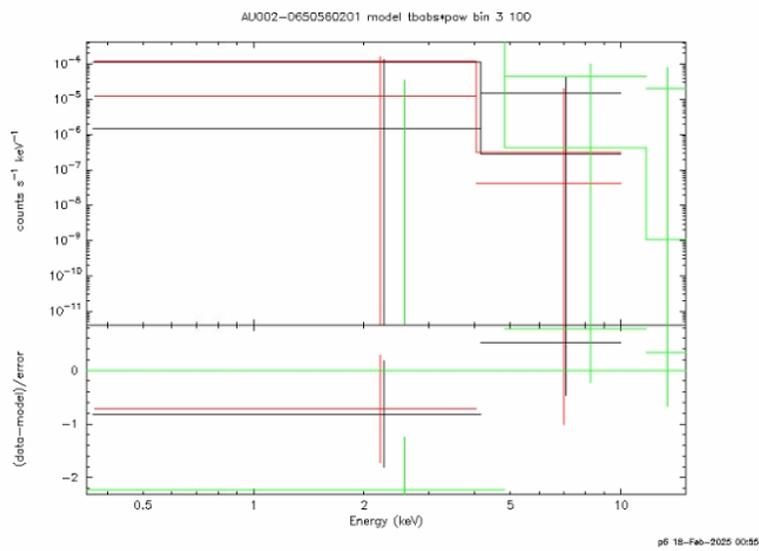
二回目に強く光った観測



— mos1 — mos2 — pn

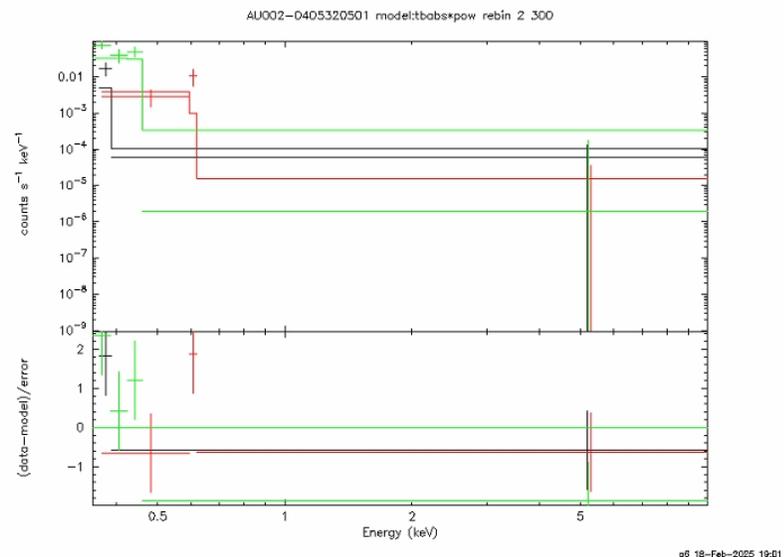
フィッティングしたスペクトル

真っ暗な観測



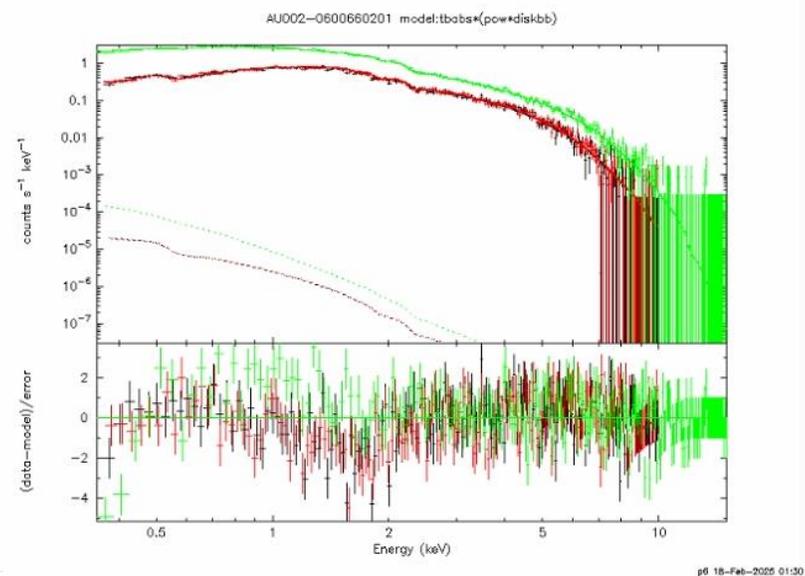
tbabs*pow

一回目に弱く光った観測



tbabs*pow

二回目に強く光った観測



tbabs*(pow+diskbb)

フィッティングからエネルギーfluxを計算できる

※0.35~keV以下は切り捨て

※tbabs(wilm et al. 2000)を使用

ライトカーブの作成に使う式

三通りの距離

1 kpc (銀河系内)
0.7 Mpc (近傍銀河)
1 Gpc (遠方銀河)

ボロメトリック補正係数

$$BCs = L_{\text{band}} / L_{\text{bol}}$$

今回は2-10keVに対して
XRB : 2 SMBH : 27.54を使う

参照 [2204.01749](#)
[1705.10804](#)

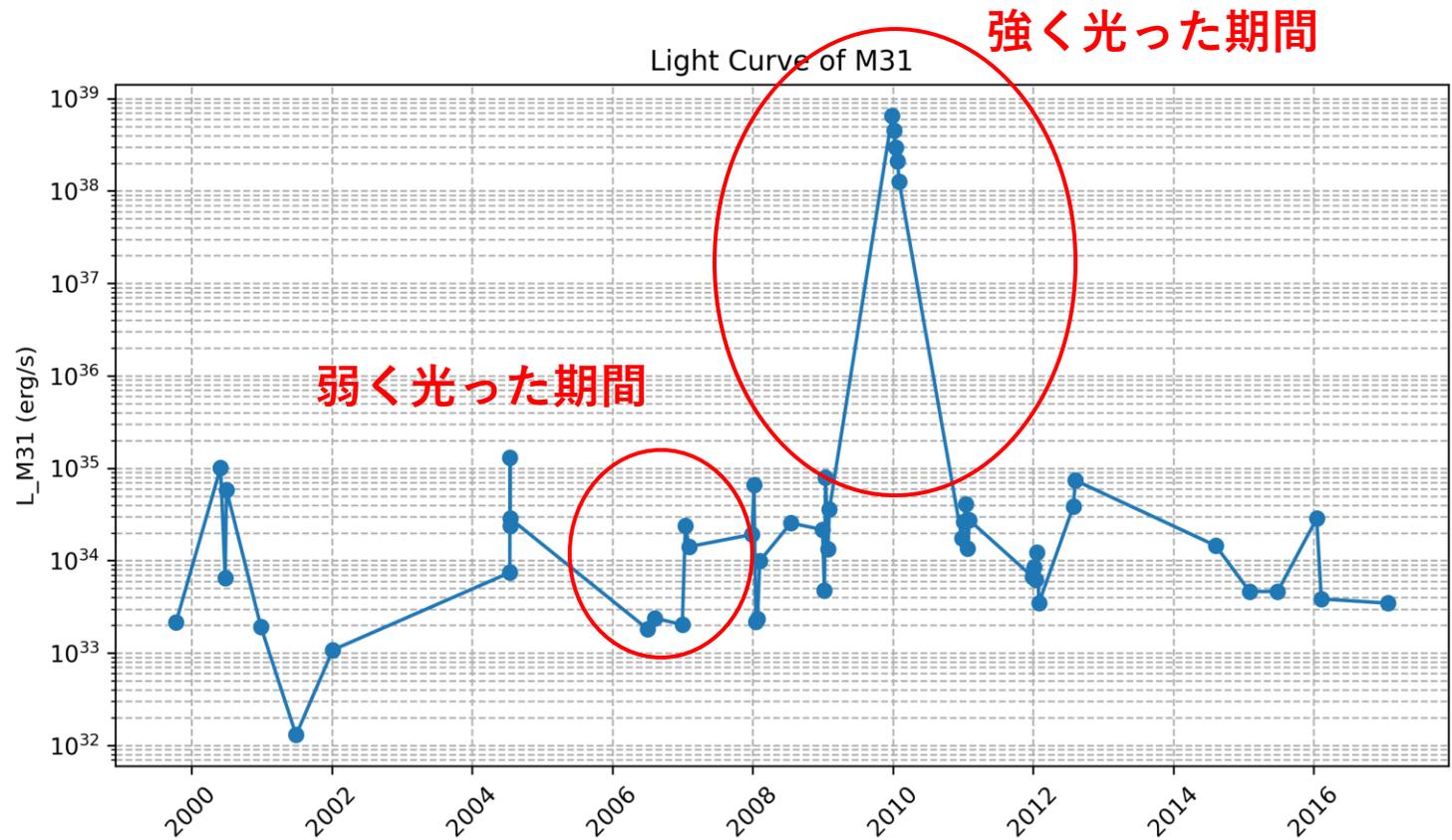
球で等方放射を仮定したときのフラックス

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

F:エネルギーフラックス(erg/cm²/s)
L:ボロメトリック光度(erg/s)
d:天体までの距離(pc)

これらを使いボロメトリック光度
を求めライトカーブを作成

ライトカーブ(M31)



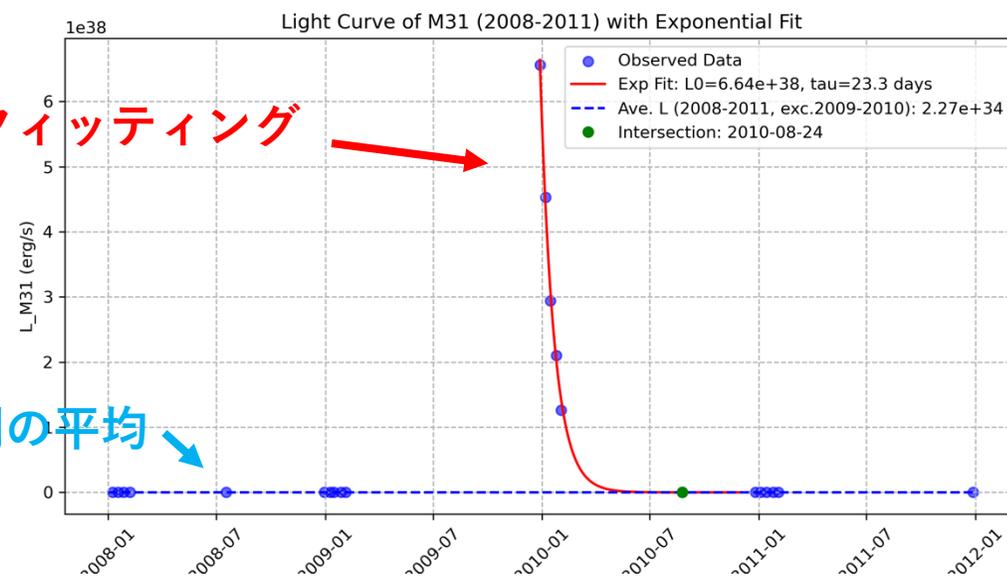
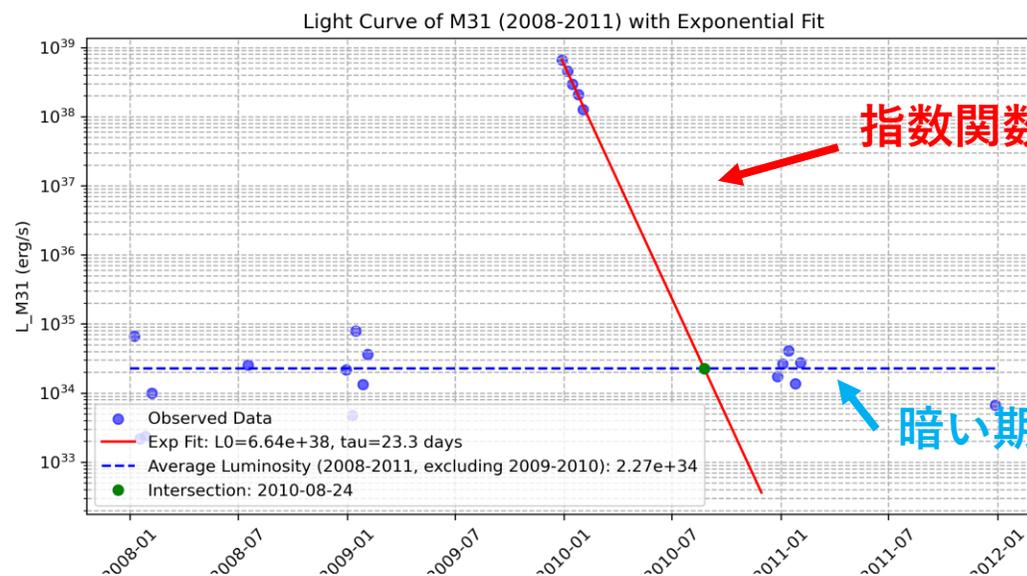
強く光った期間の光度は約1万倍！！

弱く光った期間は主要な寄与が0.35keV以下なのでほぼ消えてしまっている

左のグラフはM31の距離とBCs=2で計算した物
縦軸：ボロメトリック光度(erg/s)
横軸：普通の年月日

ライトカーブフィッティング

強く光った期間(2009-2010)に注目する



2, 3カ月~1年で減光する

→それより明らかに短いものは候補から削除

GRB、ブラックホール合体による相対論的ジェット、Type1/2 X線バースト、磁気フレア など

可能性のある候補は

恒星フレア、新星、soft X-ray transient、TDE、AGN → 質量の推定からさらに候補を絞る

質量の推定に使う式

球で等方放射を仮定したときのフラックス

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

F:エネルギーフラックス(erg/cm²/s)

L:ボロメトリック光度(erg/s)

d:天体までの距離(pc)

エディントン光度

$$L_{\text{Edd}} \approx 1.26 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg/s}$$

M:光源天体の質量

M_o:太陽質量

L_{edd}:エディントン光度(erg/s)

ボロメトリック補正係数

$$\text{BCS} = L_{\text{band}} / L_{\text{bol}}$$

今回は2-10keVに対して

XRB: 2 SMBH: 27.54を使う

参照 [2204.01749](#)

[1705.10804](#)

エディントン比

$$\lambda = \frac{L_{\text{bol}}}{L_{\text{edd}}}$$

各天体の典型的な値(天体の種類と距離と質量の判断基準)

	アウトバースト時の最大光度(erg/s) <small>既知の値</small>	距離のスケール d (pc) <small>光度から推定</small>	天体の質量 M (Mo) <small>既知の値</small>
恒星(フレア)	$10^{32}-10^{34}$	kpc	1~100
BH X線連星	$10^{37}-10^{39}$	kpc, Mpc	<20
NS X線連星	$10^{37}-10^{39}$	kpc, Mpc	1~3
白色矮星 X線連星	$10^{37}-10^{38}$	kpc, Mpc	<1.4
超大質量BH (AGN含む)	$>10^{44}$	Gpc	$>10^5$

※アウトバースト時の最大光度と天体の質量は先行研究からの既知の値
 距離スケールは作成したライトカーブとアウトバースト時の最大光度の桁が合うように制限を付けた距離
 距離スケールをごとに算出した質量と上の表の質量を比較して候補を決める。

質量の推定

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

$$L_{\text{Edd}} \approx 1.26 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ erg/s}$$

強く光った年の光度≡エディントン光度と仮定して計算した場合に
距離スケールとボロメトリック補正係数の各組み合わせから算出される質量

距離	恒星質量を仮定(BCs=2)	SMBHを仮定(BCs=27.54)
kpc	$1.77 \times 10^{-5} M_{\odot}$	$2.44 \times 10^{-4} M_{\odot}$
M31(0.7Mpc)	$1.04 \times 10 M_{\odot}$	$1.43 \times 10^2 M_{\odot}$
Gpc	$1.77 \times 10^7 M_{\odot}$	$2.44 \times 10^8 M_{\odot}$

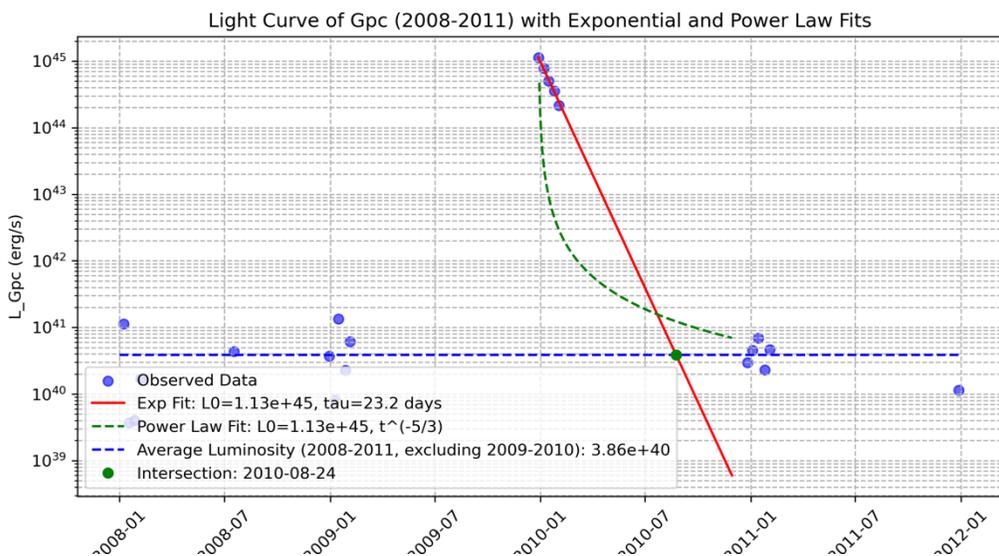
※すべてflux 8.90×10^{25} (erg/pc²/s) を使って計算した
■ は天体の種類と距離として合わないもの

候補はM31のBH-X線連星と遠方銀河のSMBH！！

SMBHの棄却

Gpcで計算したライトカーブ(6(距離の二乗)+1(BCsの分)桁増える)を考えると SMBHによる潮汐破壊イベント(TDE)、活動銀河核(AGN)などの可能性もあるが、、、

TDE



潮汐破壊の場合、べき乗則 ($L \propto t^{-5/3}$) に乗る

AGN

(クエーサー, ブレーザー, セイファート銀河を含む)

```
=====
Model TBabs<1>(powerlaw<2> + bbodyrad<3> + diskbb<4>) Source No.: 1 Active/On
Model Model Component Parameter Unit Value
par comp
Data group: 1
1 1 TBabs nH 10^22 0.203927 +/- 2.06796E-02
2 2 powerlaw PhoIndex 3.33437 +/- 0.230023
3 2 powerlaw norm 1.78130E-03 +/- 1.45022E-04
4 3 bbodyrad kT keV 0.891723 +/- 0.571491
5 3 bbodyrad norm 0.714317 +/- 24.4265
6 4 diskbb Tin keV 0.906654 +/- 11.1278
7 4 diskbb norm 0.747581 +/- 24.4413
=====
```

フィッティングした星間吸収モデル(tbabs(wilms 2000))によると水素カラム密度 $nH \sim 10^{21}$
AGNならば 10^{22} 以上あるはず

AU002は ブラックホールX線連星 と結論付ける

soft X-ray transients(SXTs) の特徴 ※BHの場合

数年~数十年スケールで準周期的に明るくなる

静穏期(quietness) : 数年~十数年の期間、 $L_{bol} \sim 10^{33} \sim 10^{34} \text{ erg/s}$ 、観測できないこともしばしば

活動期(outburst) : 数カ月~数年、 $L_{bol} \geq 10^{37} \text{ erg/s}$ 、X線や電波で特に明るい
今回の観測と矛盾しない

outburstには主に二つの放射

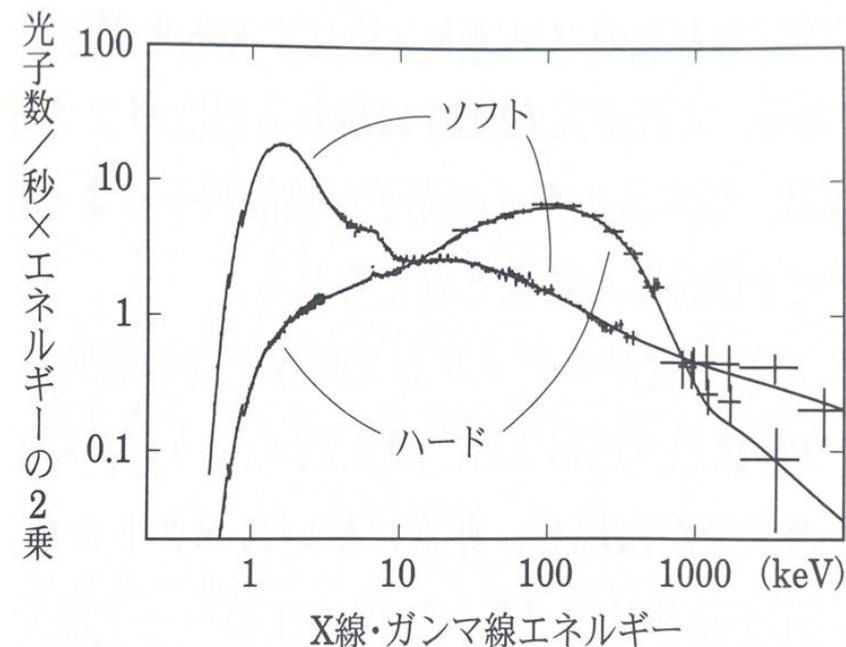
コロナからの非熱的放射(ハード成分)

逆コンプトン散乱によるべき関数(powerlaw)

降着円盤からの黒体放射(ソフト成分)

多温度黒体放射(diskbb)

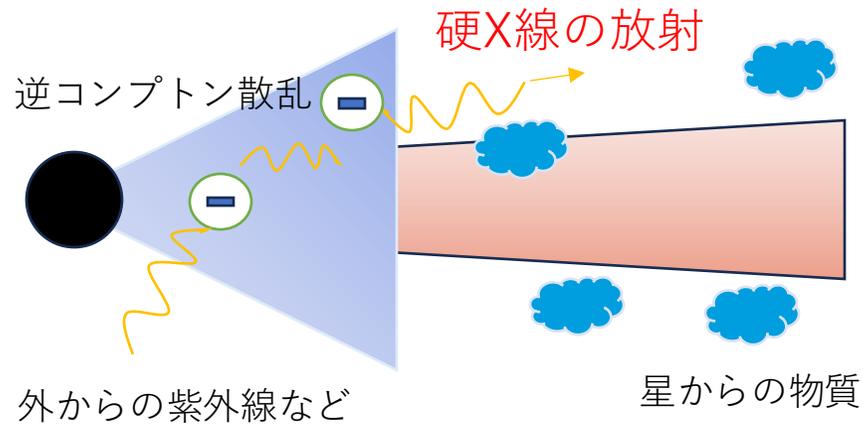
Cyg X-1のスペクトル (シリーズ現代の天文学8より引用)



outburstの仕組み

逆コンプトン散乱によるコロナからの硬X線放射が主
幾何的に厚く、光学的に薄い降着円盤

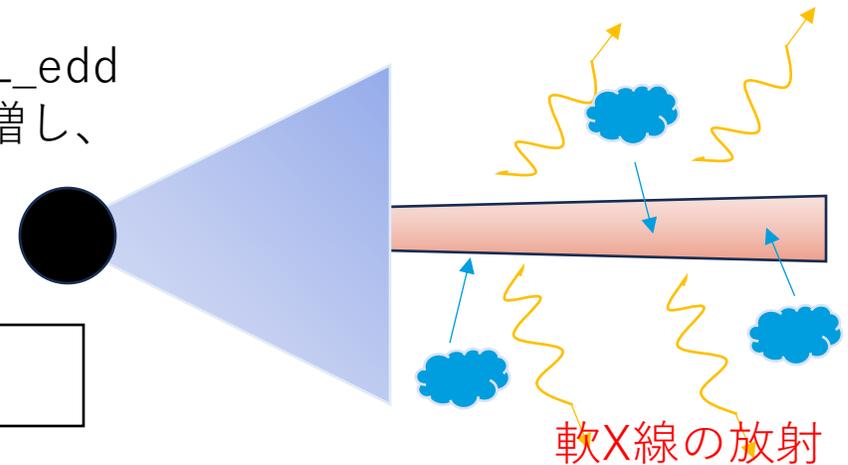
異なる温度層の円盤による多温度黒体放射が主
幾何的に薄く、光学的に厚い降着円盤



コロナからの放射が数% L_{edd} になるとdisk不安定性が増し、降着率が増加



Intermediate state



Hard state

outburst開始



数年~十数年周期

Soft state

outburst終了



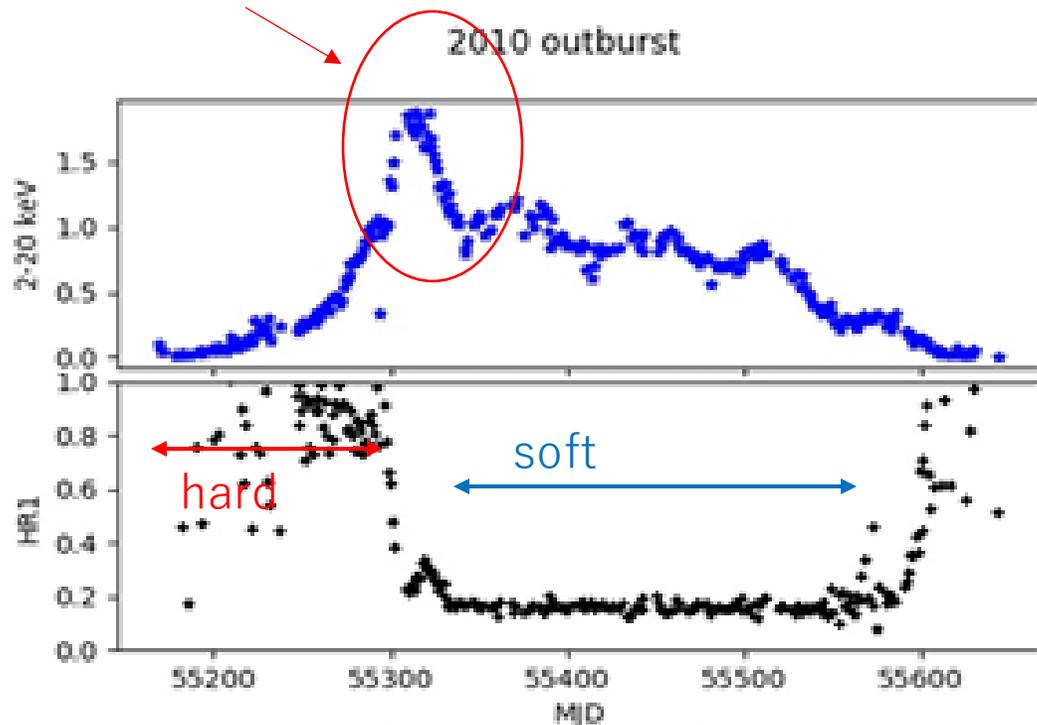
放射して降着円盤が冷える静穏期に入り、次のoutburstに向けてエネルギーを蓄え始めて始める (quiescence)

(検出器の閾値的に見えないことが多い)

SXTsの先行研究との比較（時間解析）

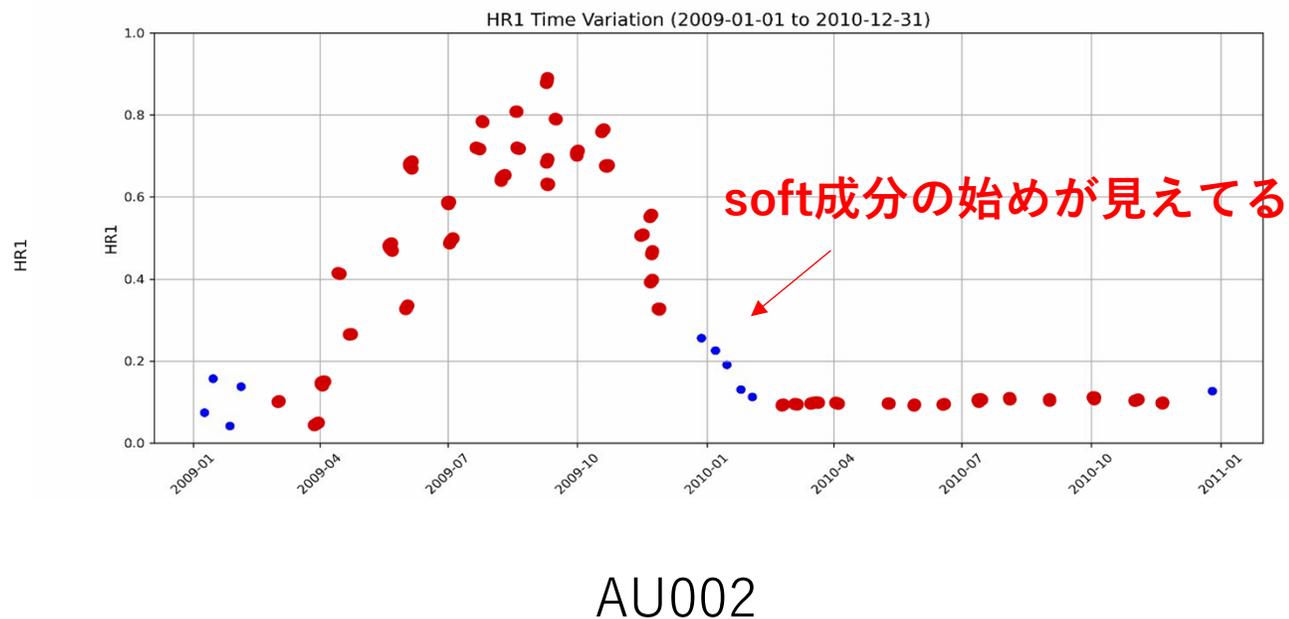
hardness ratio(HR)・・・ソフト成分に対するハード成分の割合

光度のピークは
hard~intermediateにかけて



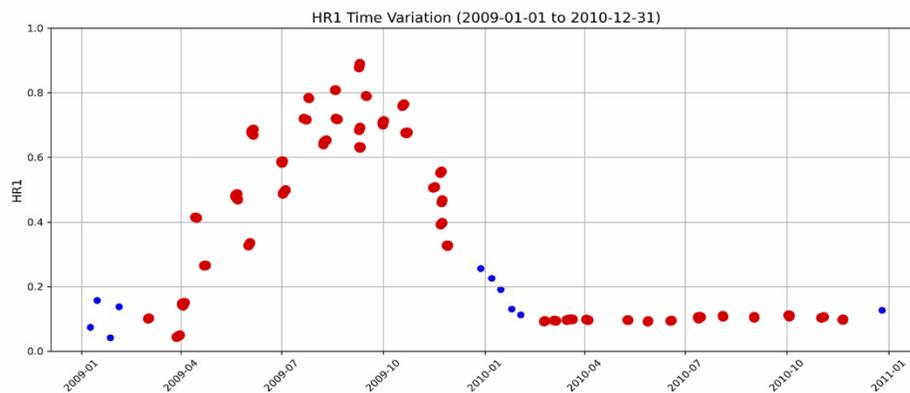
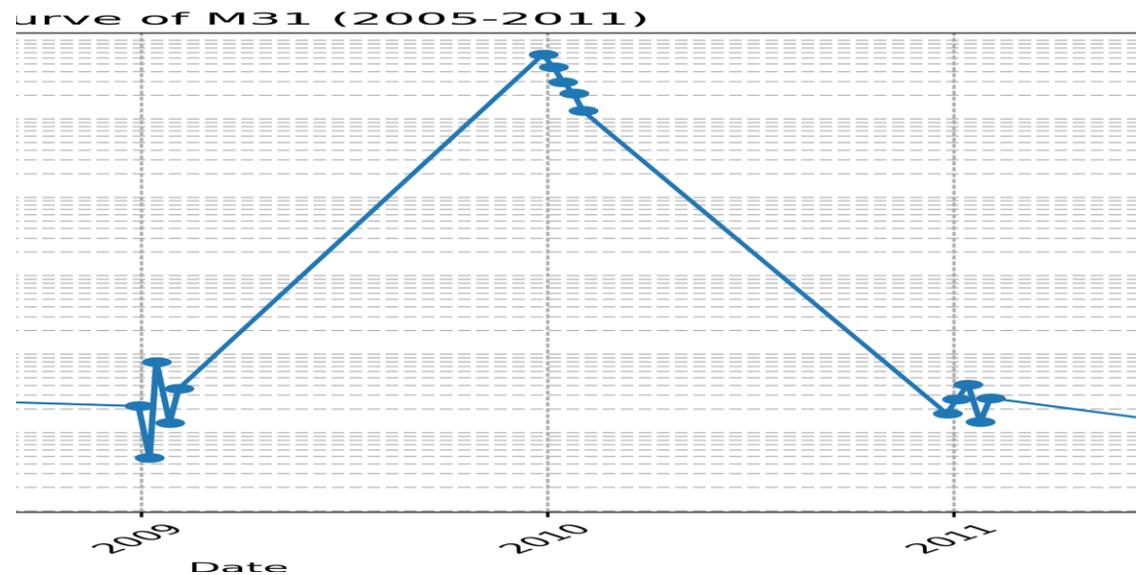
GX339-4 (q patternが多いらしい)
(Sanyukta Agarwal and J. S. Yadav, 2022)

photon flux(4-10keV)/photon flux(2-4keV)で計算



AU002のライトカーブとHR

AU002で横軸を合わせてライトカーブとHRを並べてみた



同じようにintermediate
らへんにピークが来てる

諸物理量の計算 見せないかも？

フィッティングパラメータ

```
=====
Model TBabs<1>(powerlaw<2> + diskbb<3>) Source No.: 1 Active/On
Model Model Component Parameter Unit Value
par comp
Data group: 1
 1 1 TBabs nH 10^22 1.60501E-02 +/- 1.19211E-02
 2 2 powerlaw PhoIndex 4.35671 +/- 1223.54
 3 2 powerlaw norm 1.08641E-08 +/- 1.86046E-04
 4 3 diskbb Tin keV 1.06945 +/- 6.56104E-03
 5 3 diskbb norm 0.633091 +/- 2.25640E-02
=====
```

円盤は数百億度とかになるけど、
内側は電子が逆コンプトン散乱で
エネルギーを失うので比較的冷たい

$T_{in} = 1.06945 \pm 0.00065 \text{ keV} = 1.24 \times 10^7 \text{ K}$ (~1000万度) (Cyg X-1は0.5-1.5keV)

また、 $L_{disk} \sim L(0.35-4\text{keV})$ として(以下は、inclination=30°と仮定したとき?)

$4\pi R_{in}^2 \sigma T_{in}^4 = L_{disk}$ に代入すると

$$R_{in} = 75.9 \text{ (km)}$$

さらに、 $R_{in} = 3R_s$ (シュバルツシルトBH) とすると

$$R_s = 25.3 \text{ (km)}$$

$R_s = 2.9 M/M_{\odot}$ に代入すると

$$M = 8.73 M_{\odot} \quad \leftarrow \text{エディントン光度を仮定したとき}$$

と大きくは変わらない

求めた質量から考えると

$$L_{\text{edd}} = 1.09 \times 10^{39} \text{ (erg/s)}$$

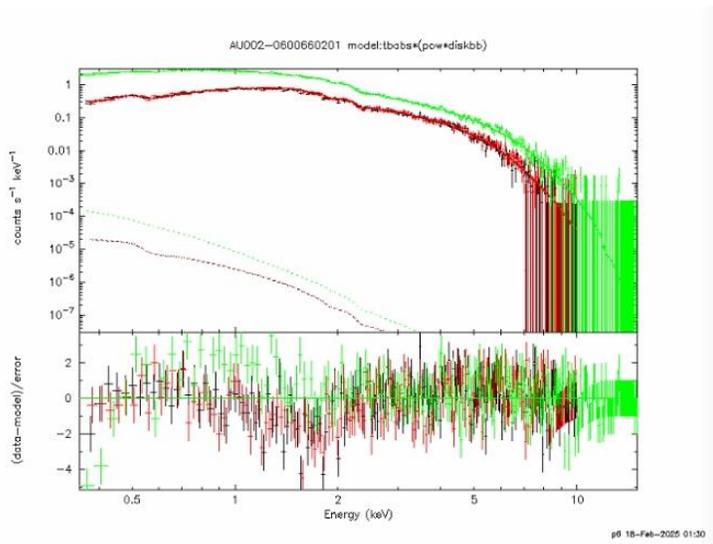
になり、エディントン比は $\lambda \sim 1.19$ となる。

少し大きいけどほぼエディントン限界という仮定は悪くなかった

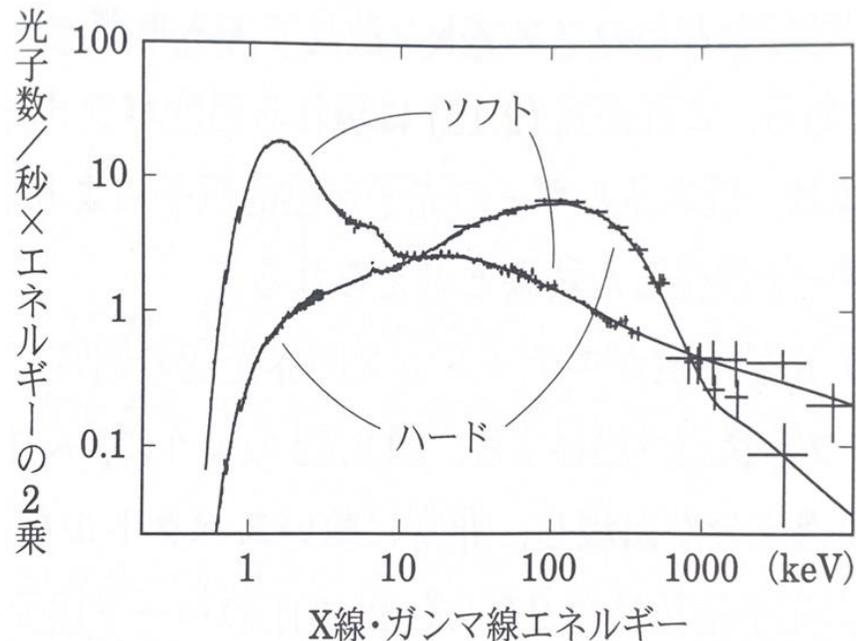
※ L_{soft} やBCsの決め方で多少変わる

スペクトルの再確認

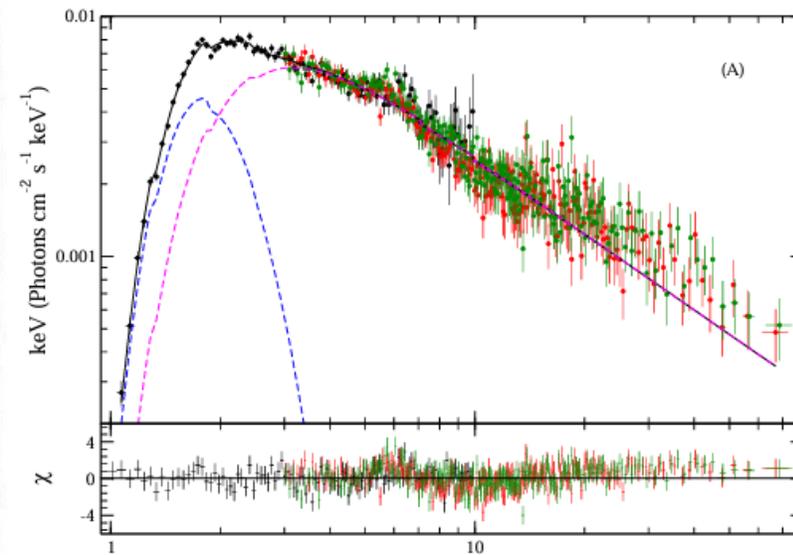
AU002



Cyg X-1



XTE J1856+053



(Debjit Chatterjee Arghajit Jana and Hsiang-Kuang Chang, 2024)

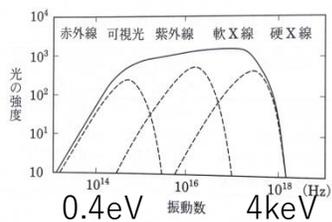
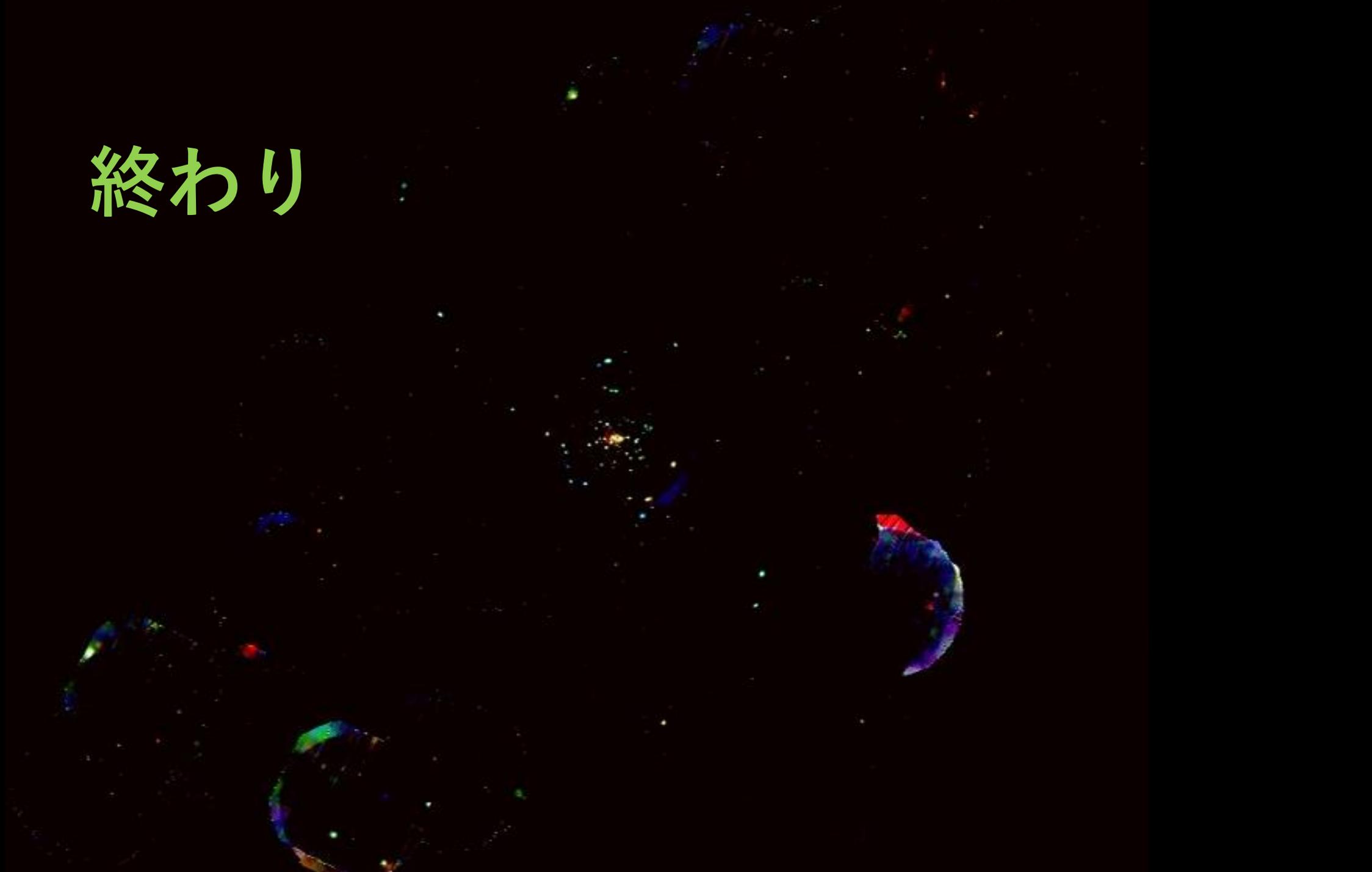


図 2.4 標準円盤の典型的スペクトル。破線は、円盤外縁部(左)、中間部(中)、内縁部(右)、それぞれの部分からの寄与を表す。放射は低周波数(低エネルギー)側で ν^2 、中間周波数で $\nu^{1/3}$ 、高周波数側で $\exp(-h\nu/kT_{\max})$ に比例する。ここで T_{\max} は円盤の最高温度を表す。

soft stateが見えてるはず、、、？
右ふたつは他のSXTsだがAU002だけエネルギーが低い
標準円盤の典型スペクトルに似てる？

終わり



バックアップスライド

エディントン光度

エディントン限界・・・ガスが中心天体に降着できる限界

放射圧

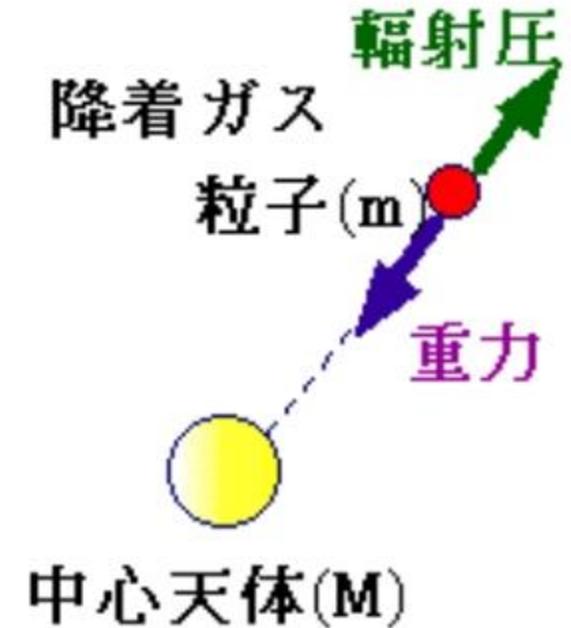
$$P_R = \frac{\sigma_B T^4}{c}$$

シュテファン・ボルツマンの法則

$$L = 4\pi r^2 \cdot \sigma_B T^4$$

ガスはほとんど水素として

$$m = m_p + m_e \approx m_p$$



$$F_{rad} = \sigma P_R = \frac{\sigma L}{4\pi r^2 c}$$

力の釣り合い

=

$$\frac{GM_{BH}m_p}{r^2}$$



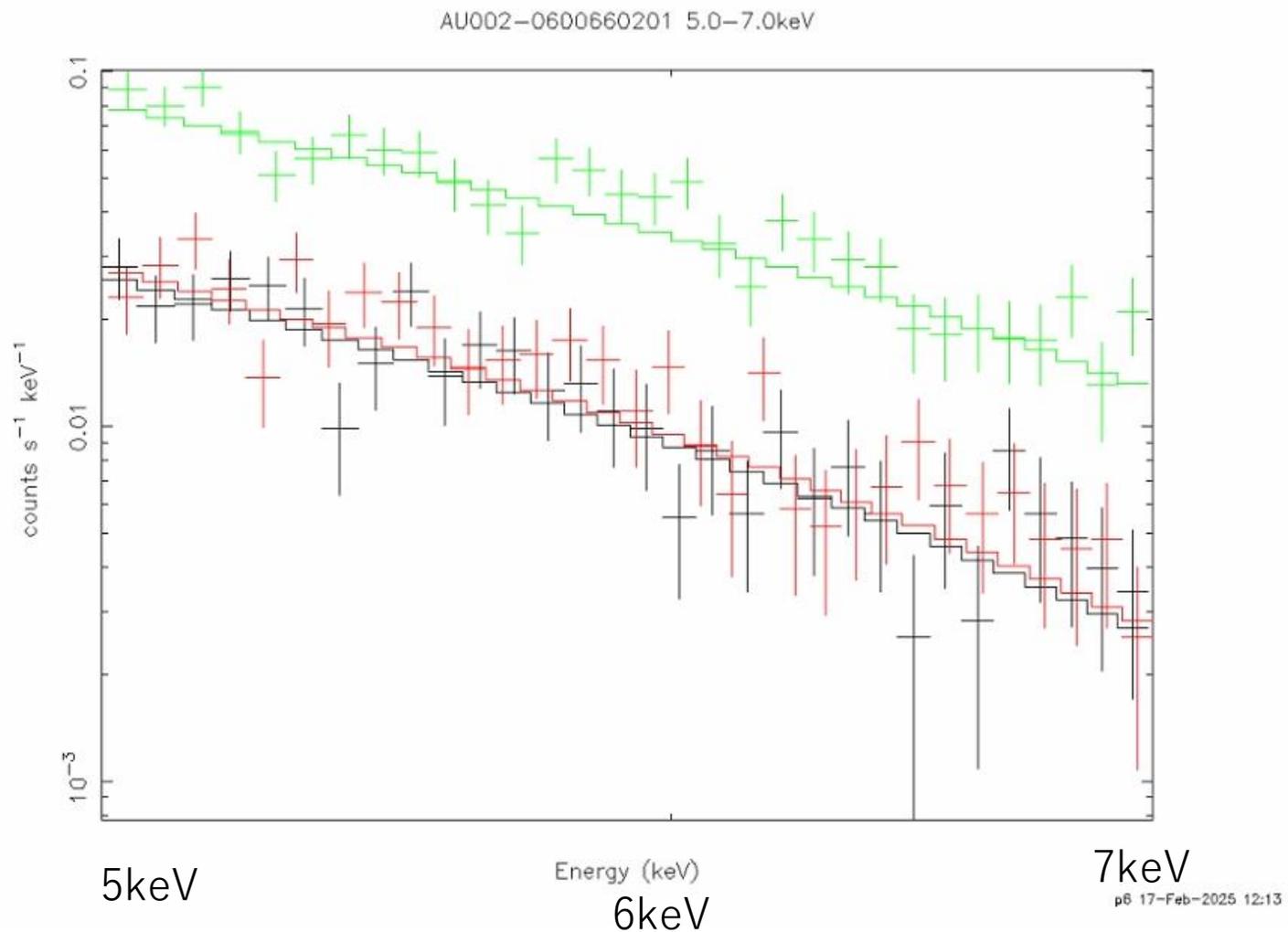
エディントン光度

$$L_E = 4\pi c G M_{BH} \frac{m_p}{\sigma}$$

引用元：卒業研究

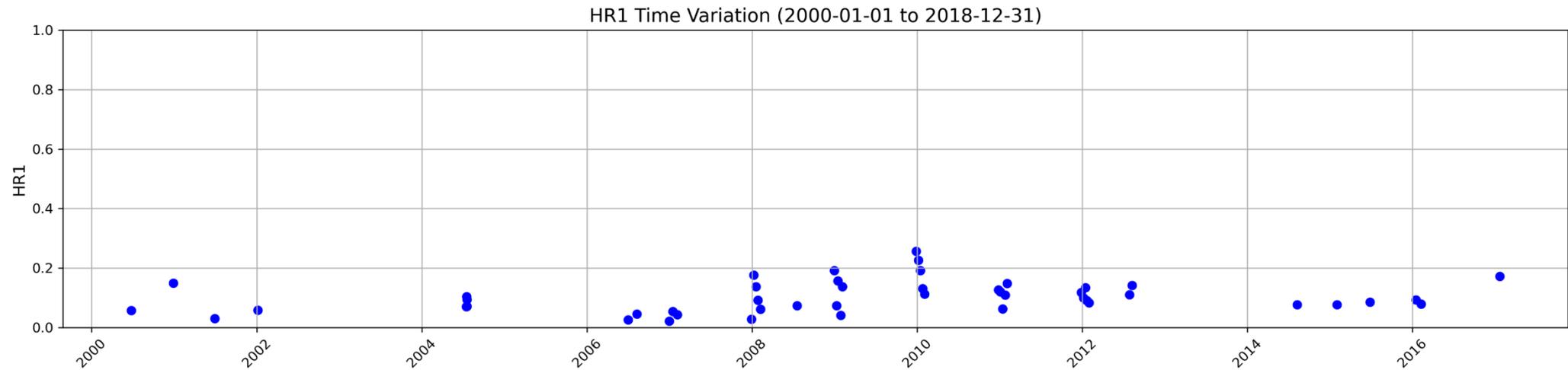
Fe K α 線見えない

一番明るかった観測を5-7keVで拡大してみた



全期間HR(hardness ration)

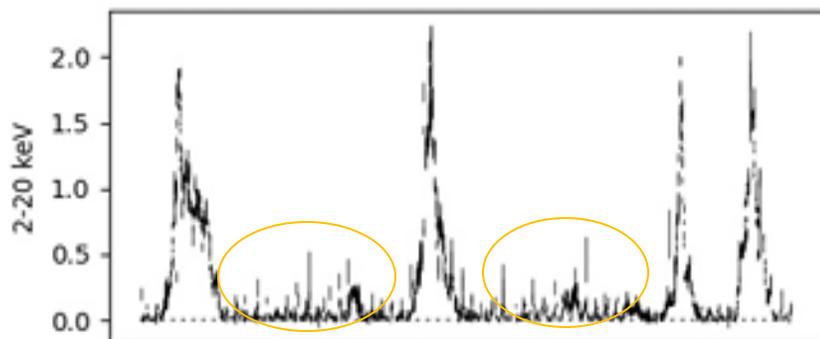
解析した全観測のHRを時間ごとにプロットしたものの観測時期が周期的なのでなんか似た形をしたものが並んでるように見えるが、一周期分しかない



一回目の弱い増光

動画は増光してから暗くなってからこの可能性はある
1,大きいピークの間にある小さなピークが見えてる可能性

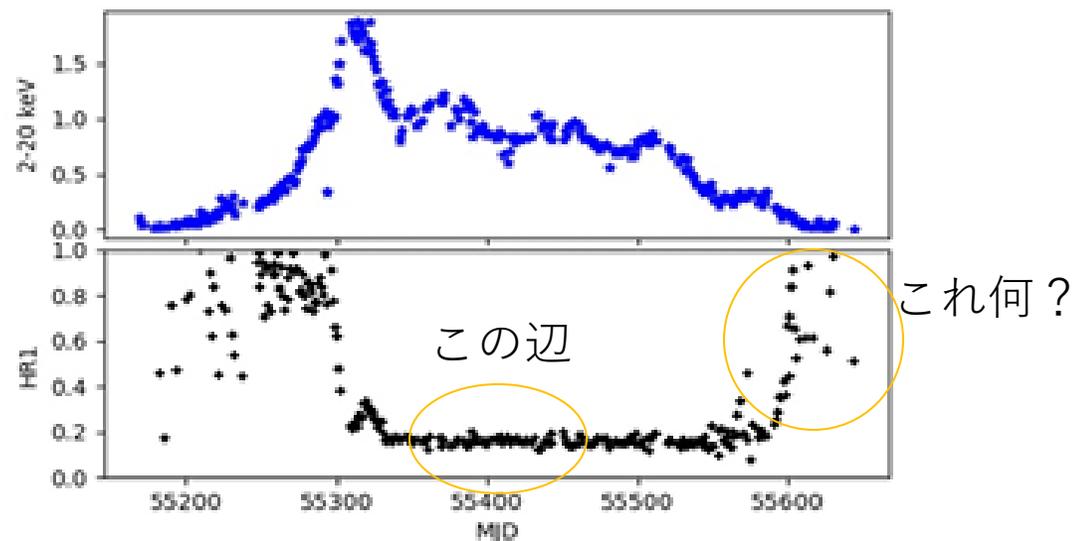
GX339-4 MAXI lightcurve



3,全く別の天体が見えてる可能性

2,前回のoutburstの尻尾が見えてる可能性

2010 outburst



inclinationを求める

($\theta = 30^\circ$ と仮定) (現代の天文学者の
1975~76年を参照)

$$T_{in} = 1.24 \times 10^7 \text{ (K)}$$

$$L_{disk} \approx L_{0.35-4\mu\text{m}} = 4\pi d^2 \cdot 1.38 \times 10^{-11} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$$

$$= 9.72 \times 10^{38} \text{ erg/s}$$

と使う

$$4\pi R_{in}^2 \sqrt{v_B} T_{in}^4 = L_{disk} \quad \text{--- } 10^{-7} \text{ W}$$

から

$$R_{in} = \left(\frac{9.72 \times 10^{38} \times 10^{-7} \text{ W}}{4\pi \cdot 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{erg/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4}{\text{K}^4} \cdot (1.24 \times 10^7 \text{ K})^4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= (5.77 \times 10^9 \text{ m}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$= 75.9 \text{ km}$$

$$R_{in} = 3R_S \text{ 程度}$$

$$R_S \sim 25.3 \text{ km}$$

$$\therefore R_S = 2.9 \left(\frac{M}{M_\odot} \right) \text{ km 程度}$$

$$\underline{M_{BH} = 8.73 M_\odot} \quad \#$$

推定の半分くらい

$$\text{75km 程度の } L_{disk} = 8.73 \times 1.26 \times 10^{38} = 1.09 \times 10^{39} \text{ erg/s}$$

実際の 2009年12月28日の \checkmark R_{in}
 エネルギー比 $= \frac{2 \times 6.56 \times 10^{38}}{1.1 \times 10^{39}} = 1.19$
 \uparrow \times

L_{soft} の範囲の "小さい" 部分

R_{in} が "もう少し" 小さいと、
論文の "根拠" 算出で、

か-BH のも...

\rightarrow 与えたい値、 $\lambda=1$

また、(XTE J1548+05) の論文を参照する

$$R_{in}(\text{km}) = \sqrt{\frac{\text{Norm diskbb}}{\cos \theta}} \times d_{10} \quad \text{--- } \text{diskbb の } d_{10}$$

75km 程度

$$\text{Norm diskbb} = 0.033091$$

$$d_{10} = \frac{206503 \text{ pc}}{10 \text{ kpc}} \text{ km} = 2.36 \times 10^{15} \text{ km}$$

つまり、

$$R_{in}(\text{km}) \approx 1.18 R_{in}(\text{km})$$

と推定

$$\text{から } \cos \theta = \left(\frac{d(10\text{kpc})}{R_{in}/\text{km}} \right)^2 \text{ Norm diskbb} \gg 1 \quad ???$$

つまり diskbb というモデルに当てはまる

時間なくてできなかったもの

エネルギーや銀河内の位置、時間変動している天体の数を数えて銀河内の天体の統計をとる

参考文献のリンク 2025/02/19時点 ※全部上げきれてないかも

恒星フレア:[フレア | 天文学辞典](#)

ガンマ線バースト:[Gamma-Ray Burst](#)

NSの磁気バースト:[2501.07049](#)

Type1/2 X線バースト:[X線バースター - Wikipedia](#)

潮汐破壊事象(TDE):[2404.09381](#) [1211.6109](#) [Hayashi.pdf](#)

AGNの水素カラム密度:[Hydrogen Column Density Variability in a Sample of Local Compton-thin AGN II](#)

BH XRB:[2501.04917](#) [2407.18549](#) [Soft X-ray transient - Wikipedia](#)

SXTs:シリーズ現代の天文学 8 二章 [2407.18549](#) [2209.07166](#)

[ブラックホールを取り巻くコロナの分布、X線偏光で明らかに - アstroアーツ](#)

[ディスクインスタビリティ：円盤の不安定性 - 読む宇宙解説ちゃんねる](#)