



# 宇宙X線衛星「すざく」で迫る 活動銀河核エンジンの新たな描像 ～2014年9月プレスリリースの内容～

2015年4月14日

理化学研究所 仁科加速器研究センター

野田 博文

2015/4/14 核物理セミナー

# 0. アウトライン

## I. イントロダクション

→ 巨大ブラックホールが支配する活動銀河核エンジンとは

## II. 解析手法(Noda et al. 2013)の説明

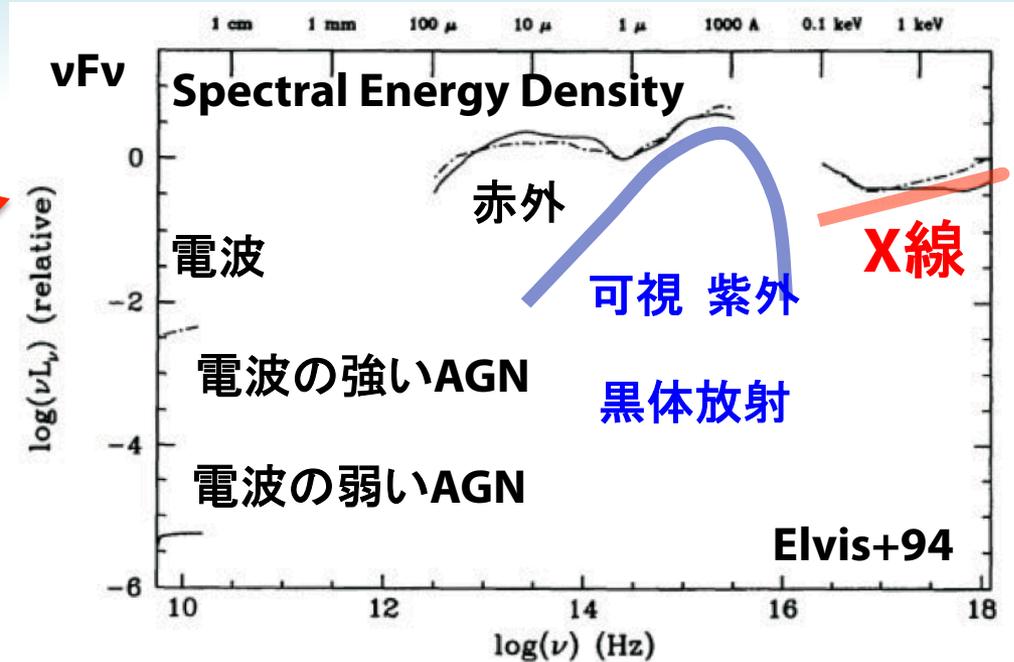
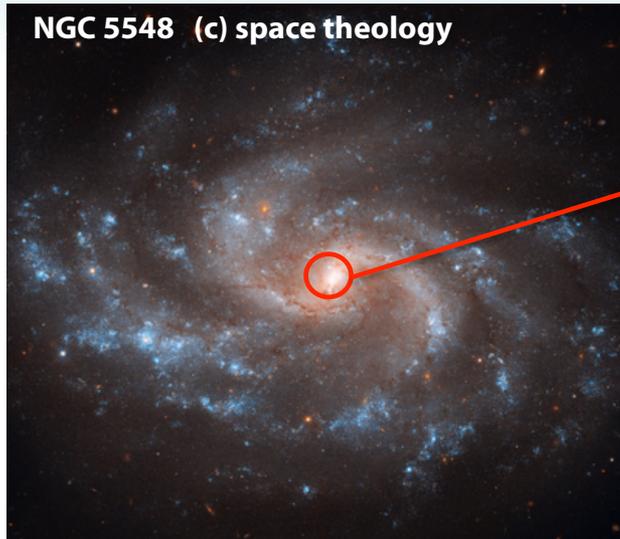
## III. 手法を「すざく」で得られたNGC 3227データに適用した結果 (プレスリリースした結果)

## IV. 次期X線天文衛星 *ASTRO-H* を用いた研究

# I. イントロダクション

巨大ブラックホールが支配する活動銀河核エンジンとは

# 1. 活動銀河核



- ☆ 宇宙に存在する銀河の $\sim 10\%$ は、中心の狭い領域 ( $< 1$  pc) から、銀河に含まれる $\sim$ 千億個の星の総和を凌駕するエネルギー ( $\sim 10^{42-46}$  erg/s) を定常的に放射 → **活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN)** と呼ばれる
- ☆ 明るさは時間変動する。**最も短いタイムスケールは  $\sim 1-100$  AU/c**
- ☆ 広帯域に亘る強大な放射は、**巨大ブラックホール ( $10^6-9$  太陽質量)** に降着するガスの重力エネルギーが効率よく変換されたもの

## 2. 巨大ブラックホール(BH)の重力がもたらす輻射

☆ AGNが放つ光度  $\sim 10^{46}$  erg/s の輻射

→ 輻射圧より重力が強くないといけない

BHに吸い込まれる  
ガスへの輻射圧

BHがガスに  
及ぼす重力

$$(L_E/4\pi r^2 c) \sigma_T = GM_{\text{BH}} m_p / r^2$$
$$L_E = 1.3 \times 10^{38} (M_{\text{BH}}/M_{\odot})$$

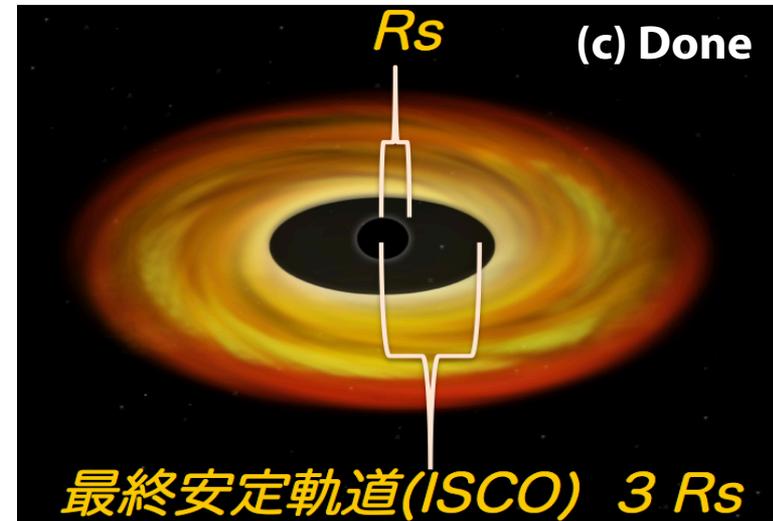
→ 太陽の $10^8$ 倍の質量を持つBHなら可

☆ 降着円盤が安定に回転できる限界の半径 (ISCO) が  $3R_s$  の時、黒体放射で  $L_E$  が生成されるとき温度

$$\pi(3R_s)^2 \sigma T^4 = L_E \rightarrow T = 14 \text{ eV} \times (M_{\text{BH}}/10^8 M_{\odot})^{-1/4}$$

→  $M_{\text{BH}} \sim 10^8 M_{\odot}$  ならば紫外帯域にピークを持つ黒体放射に

AGNの光度とスペクトルは太陽の  $\sim 1$ 億倍の質量を持つ BHがあれば説明可



シュバルツシルト半径  
 $R_s = 2GM_{\text{BH}}/c^2$

# 3. 巨大BH自身のパラメータ

☆ BHには3本の毛 → 質量、角運動量、電荷

最も容易に測れるのは質量

← 周囲の星の運動、ガスが出す輝線の広がり

☆ 巨大BHの近傍で生成される光子 (時空の情報?)

$$E \sim GM_{\text{BH}}m/R_{\text{ISCO}} \sim GM_{\text{BH}}m/(6GM_{\text{BH}}/c^2) \sim mc^2/6$$

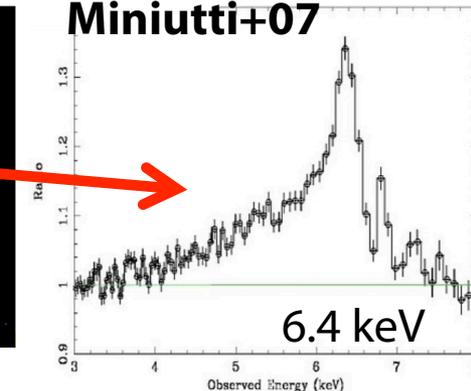
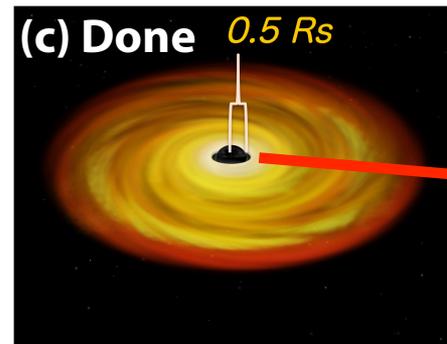
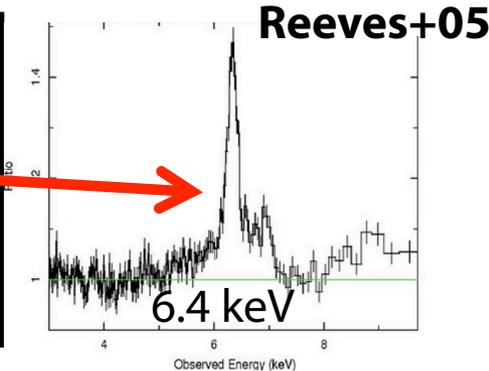
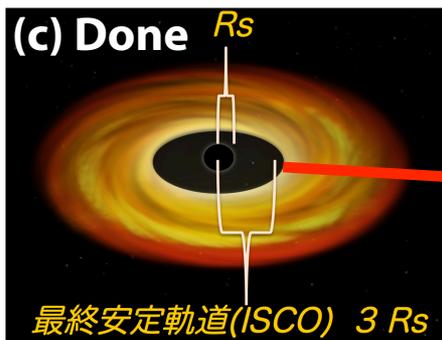
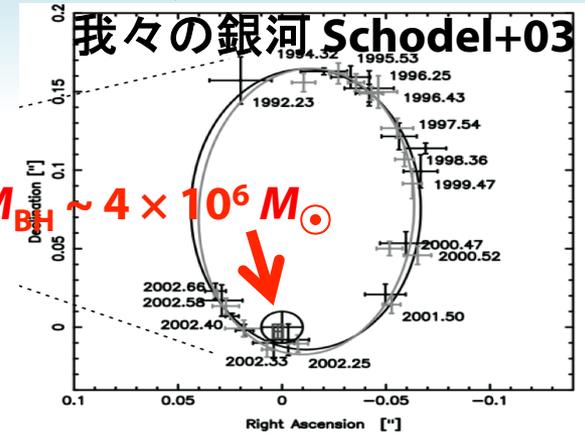
電子 (~85 keV) が陽子 (~150 MeV) に加熱され、電子温度が数百 keV → X線

X線が円盤の鉄を励起して生じる Fe-K $\alpha$  輝線に縦横ドップラーと重力赤方偏移の広がり

→ BHの角運動量によって ISCO が変わり、相対論的効果の効き方に違い

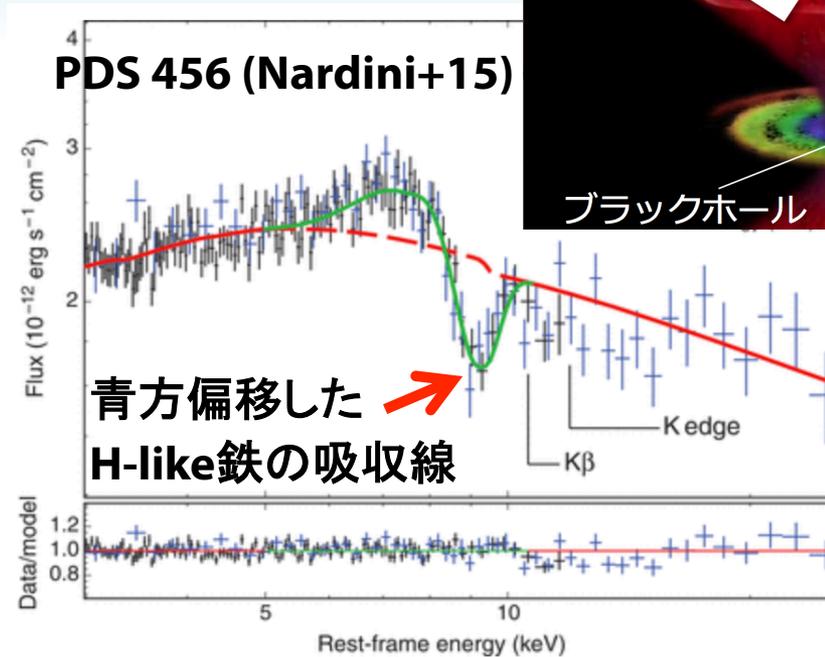
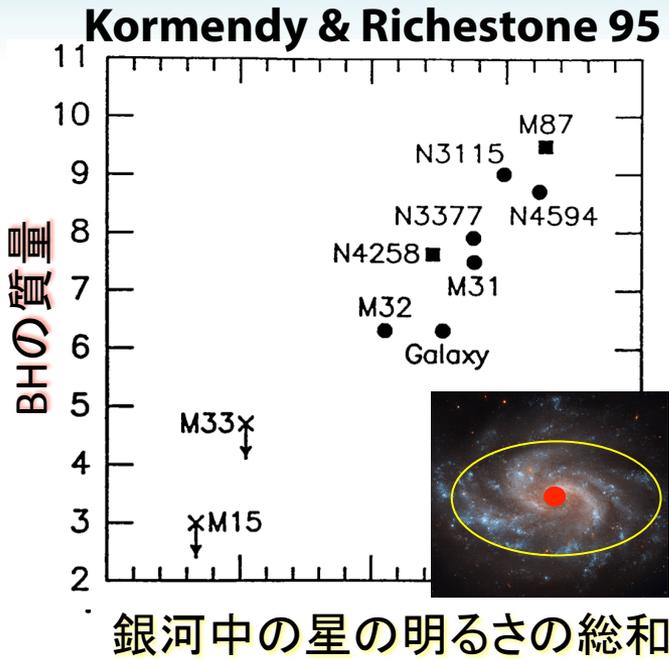
無回転BH →  $R_{\text{ISCO}} = 3 R_s$

最大回転BH →  $R_{\text{ISCO}} = 0.5 R_s$



☆ しかし角運動量の決定は、連続成分の不定性のため、まだまだ道半ば...

# 4. 巨大BHと周辺環境の関係



(中心の概念図)  
UVの吸収により光子からガスに十分な運動量が渡る場合

☆ BHの重力の影響は数 pc の範囲。しかし 数十kpc スケールの銀河の特性と相関

→ BHと銀河は何らかの形でお互いに影響か？ BHと銀河の共進化？

☆ BHはものを吸い込むだけでなく、吹き飛ばす役割も担いそう (AGN winds, Jets)

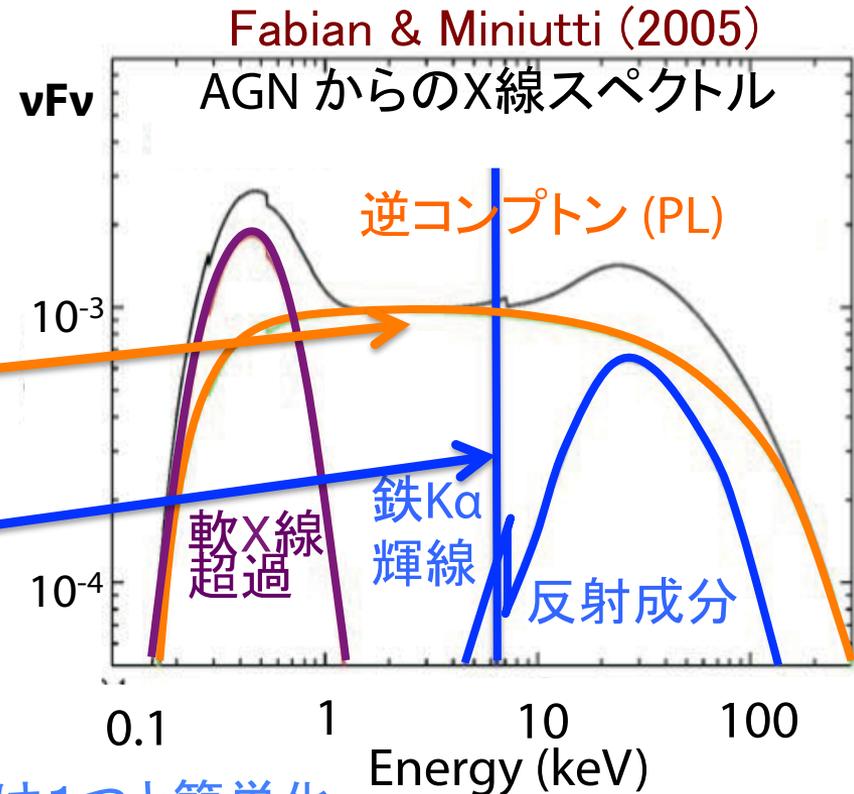
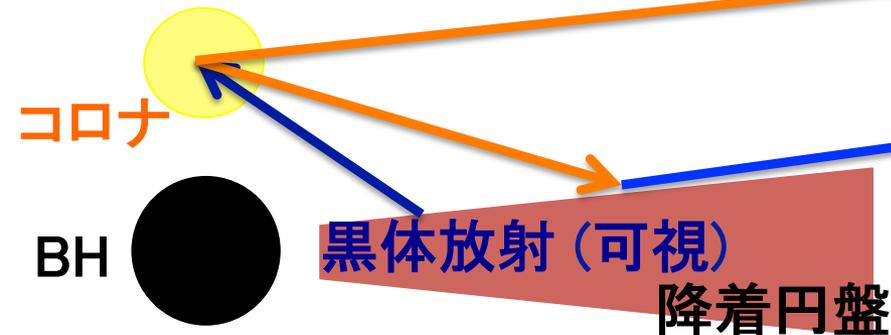
- AGN wind は質量降着を抑え、銀河の星形成も抑制すると期待 (e.g., Tombesi+15) しかし、どちらとの関係もまだ未解明
- jet 形成には質量降着、BHの角運動量、磁場が関係すると思われるが未解明

# 5. 質量降着で形成されるAGNエンジン

数あるトピックの中で、私は、BHへの質量降着を反映して生じるX線連続成分に着目

## ☆ 仮定されている描像

- ・ BHの周囲に降着円盤が形成され、BH近傍には**高温の電子雲 (コロナ)**
- ・ 円盤の黒体で生じた可視光が、**コロナ**で逆コンプトン散乱を受けX線に



## ☆ これまでの多くの研究で、BH近傍にコロナは1つと簡単化

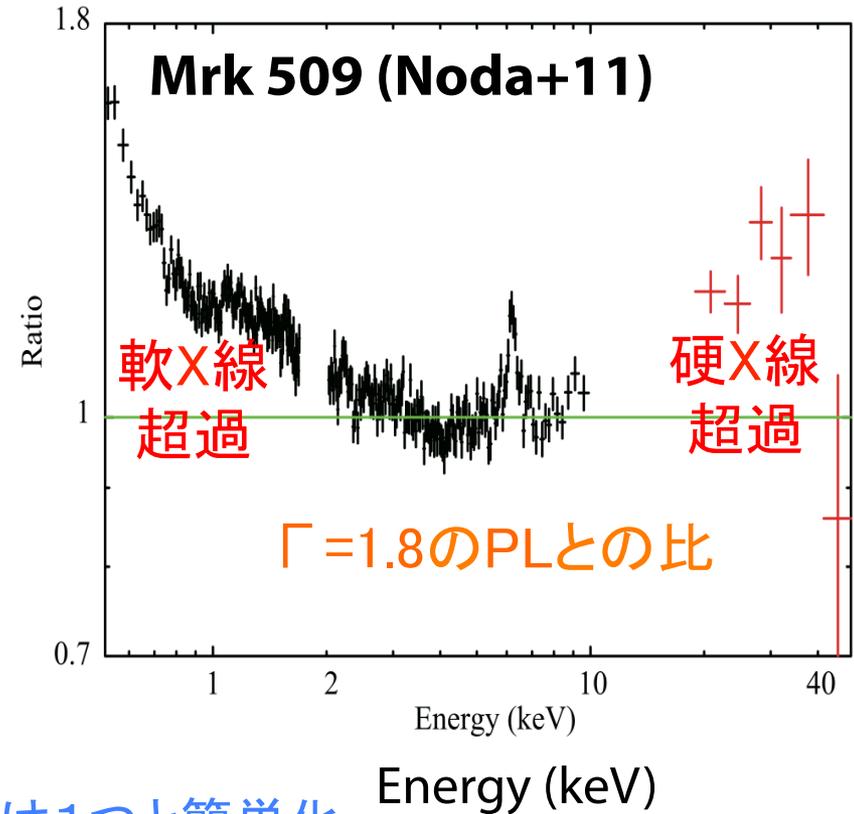
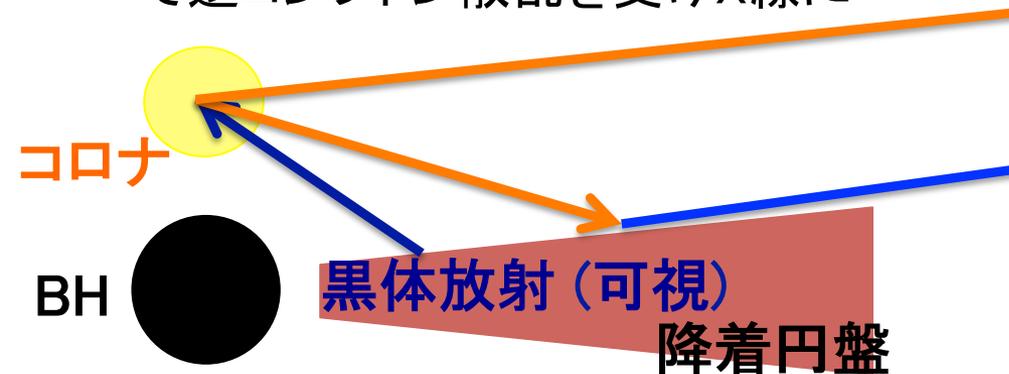
- ・ 一次X線は、**単一のべき関数 (PL) 型**と仮定
- ・ この仮定の上では、一次成分の他に、そこから逸れる構造が大きく残る
- ・ **単一のPL型成分**から逸れるスペクトル構造は、すべて**二次的な成分**と解釈

# 5. 質量降着で形成されるAGNエンジン

数あるトピックの中で、私は、BHへの質量降着を反映して生じるX線連続成分に着目

## ☆ 仮定されている描像

- ・ BHの周囲に降着円盤が形成され、BH近傍には**高温の電子雲 (コロナ)**
- ・ 円盤の黒体で生じた可視光が、**コロナ**で逆コンプトン散乱を受けX線に



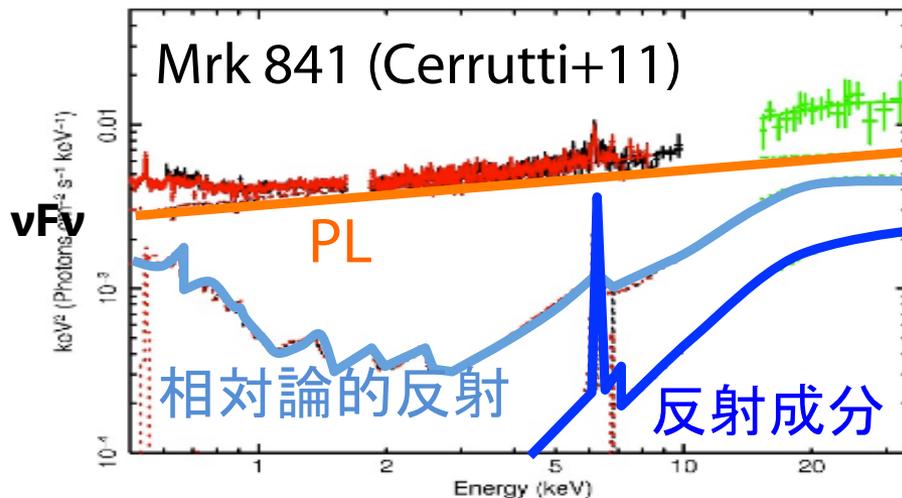
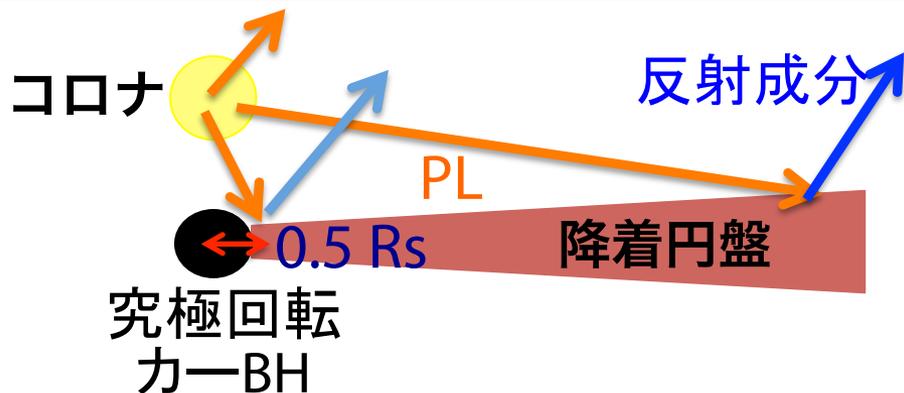
## ☆ これまでの多くの研究で、BH近傍にコロナは1つと単純化

- ・ 一次X線は、**単一のべき関数 (PL) 型**と仮定
- ・ この仮定の上では、一次成分の他に、そこから逸れる構造が大きく残る
- ・ **単一のPL型成分**から逸れるスペクトル構造は、すべて**二次的な成分**と解釈

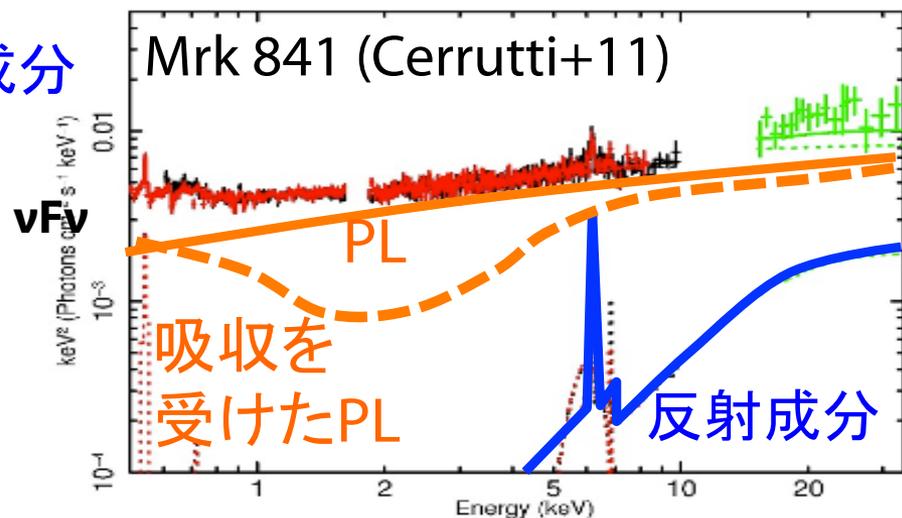
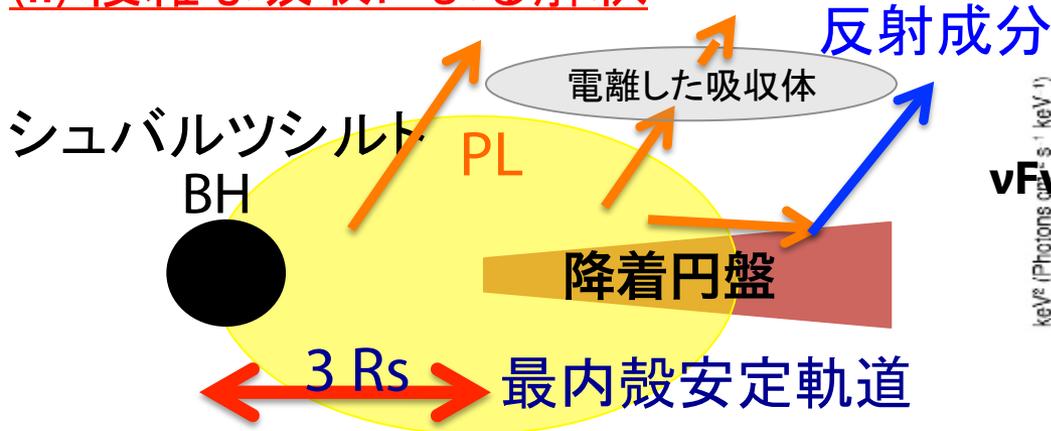
# 6. X線連続スペクトルにおける解釈の問題点

単一コロナの仮定のもと、AGNエンジンの様々な種類のモデルが考案された

## (I) 極端に強い相対論効果による解釈



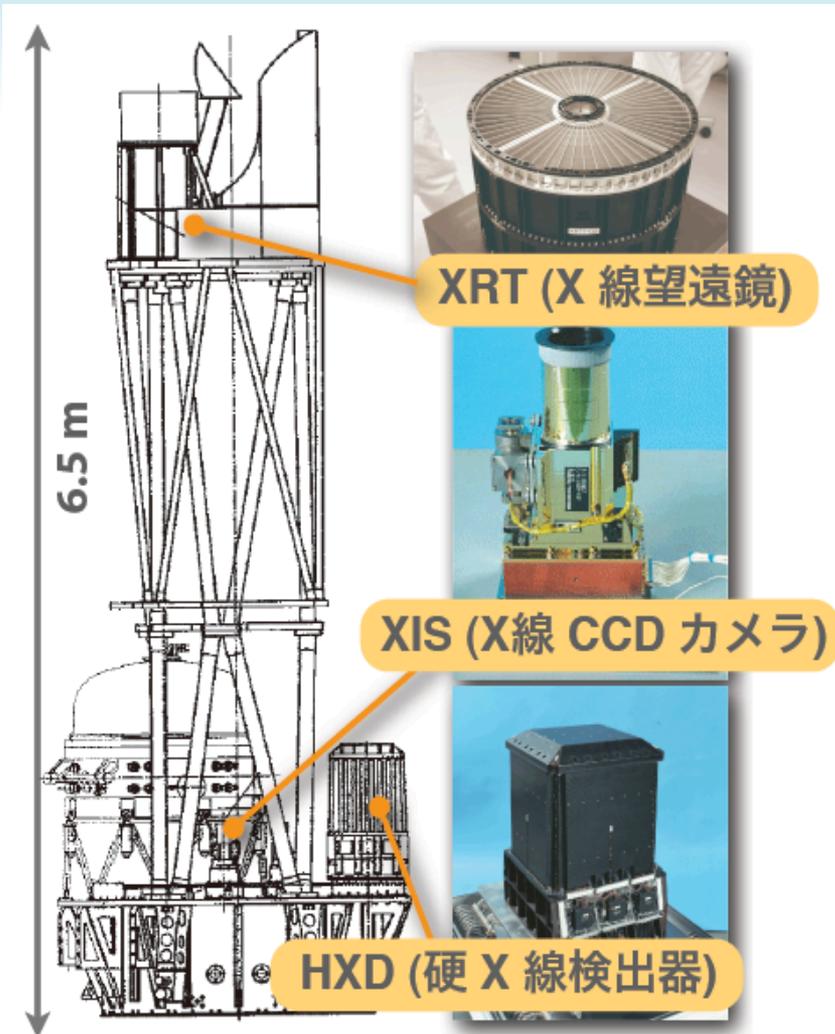
## (II) 複雑な吸収による解釈



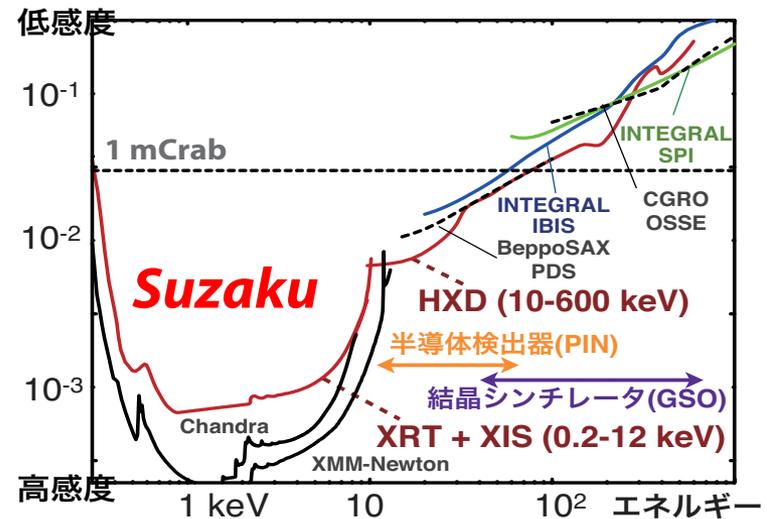
異なる解釈で同ースペクトルを説明 → AGNエンジンの描像は未解明

## II. X線の時間変動を利用した スペクトル成分の分解手法

# 7. X線の広い帯域を同時にカバーする「すざく」



- ☆ 日本で5番目のX線天文衛星
- ☆ 2005年に打上げられ、高度 550 km を周回
- ☆ 0.5–600 keV の広帯域同時観測
  - XIS: 0.5–12 keV
  - HXD: 10–600 keV
- ☆ 硬X線帯域に高い感度

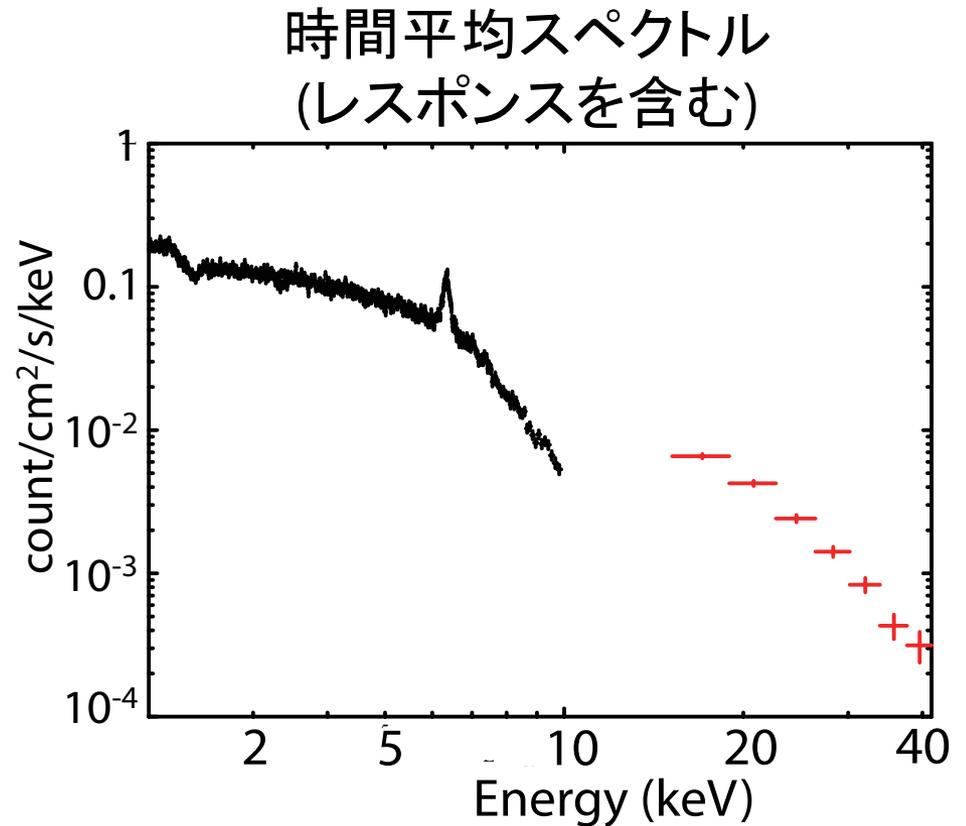
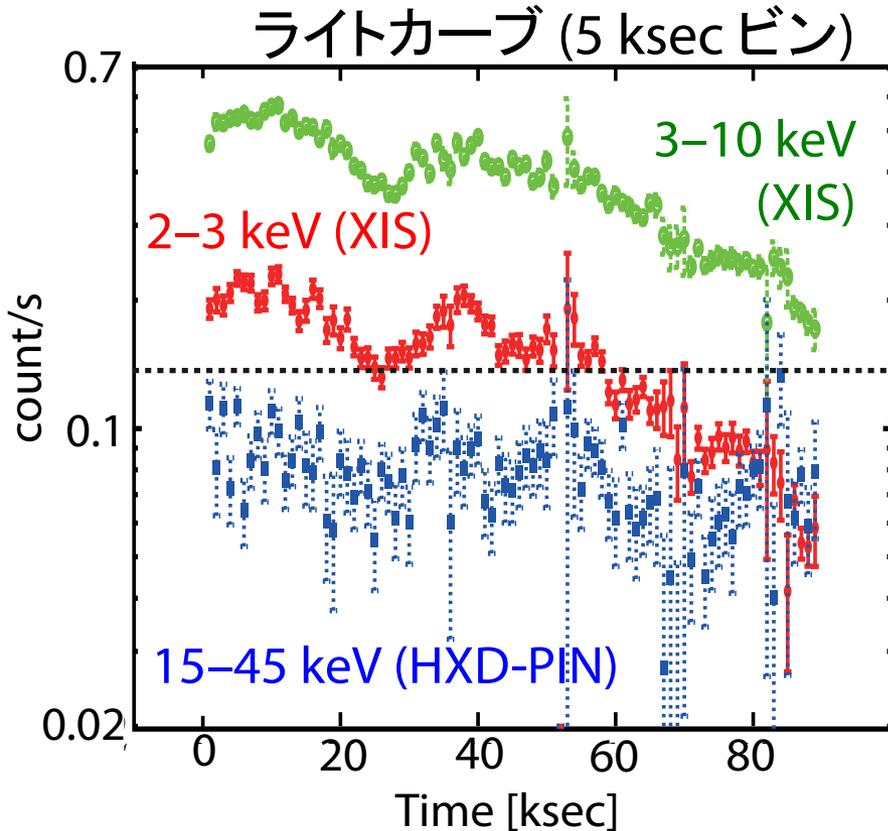


「すざく」による、広いX線帯域を同時に観測して得られる時間変動の情報を用いて、X線スペクトルをモデルに依らずに分解

# 8. 時間変動が激しく明るいNGC 3516

☆ 時間変動の激しいAGNを選ぶべき→ I型セイファート NGC 3516

「すざく」観測 2009/10/28~11/2 (全観測時間 544 ksec)

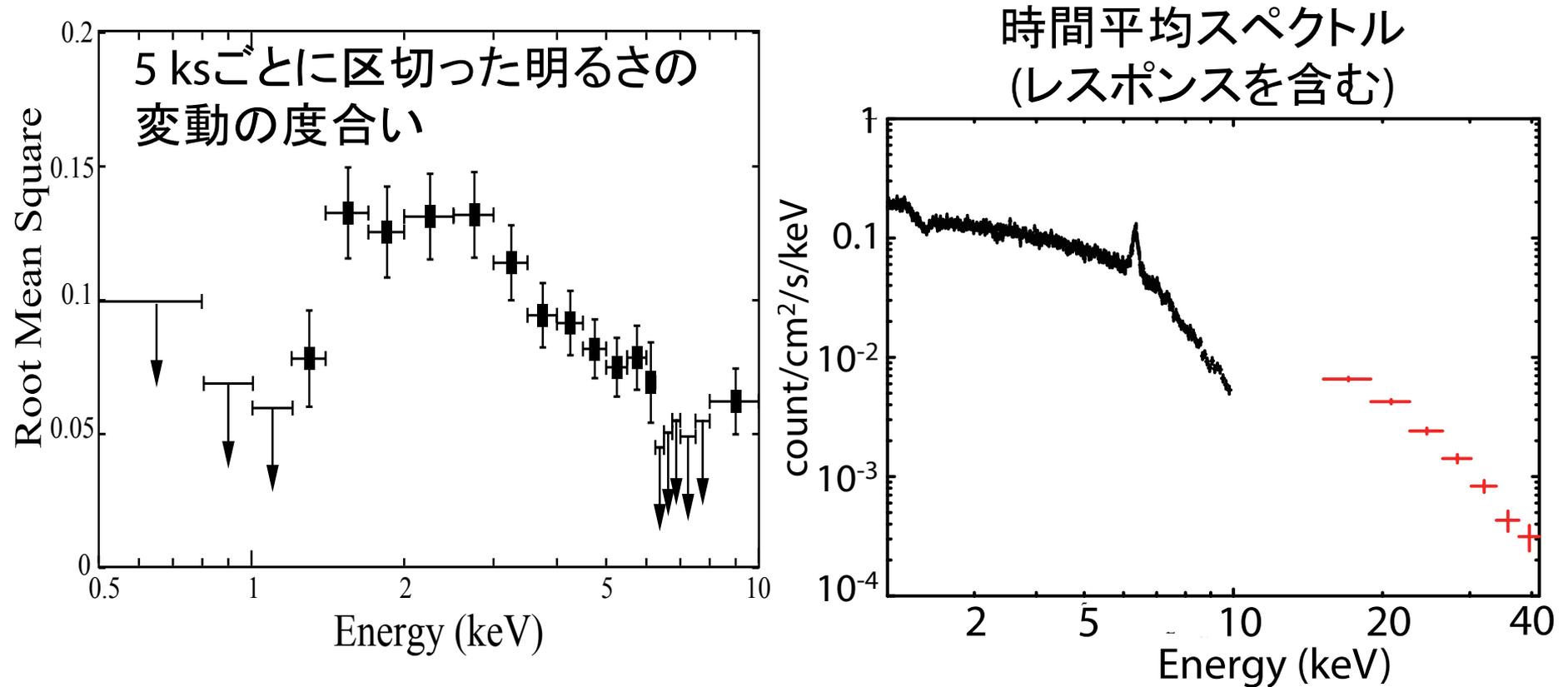


☆ I型AGN一般に変動性が最も高い~2-3 keVバンド(e.g., Markowitz+03)の時間変動を基準に、より高いエネルギーバンドを調べる

# 8. 時間変動が激しく明るいNGC 3516

☆ 時間変動の激しいAGNを選ぶべき→ I型セイファート NGC 3516

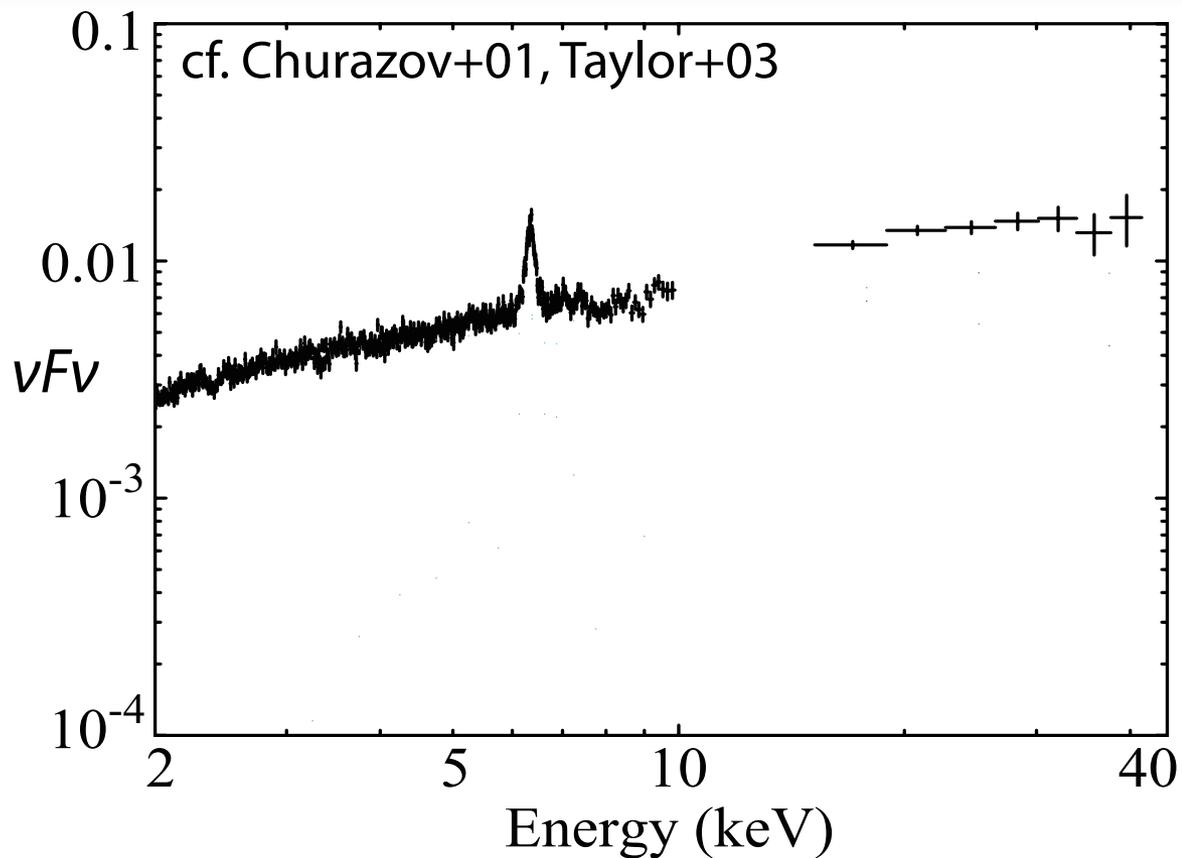
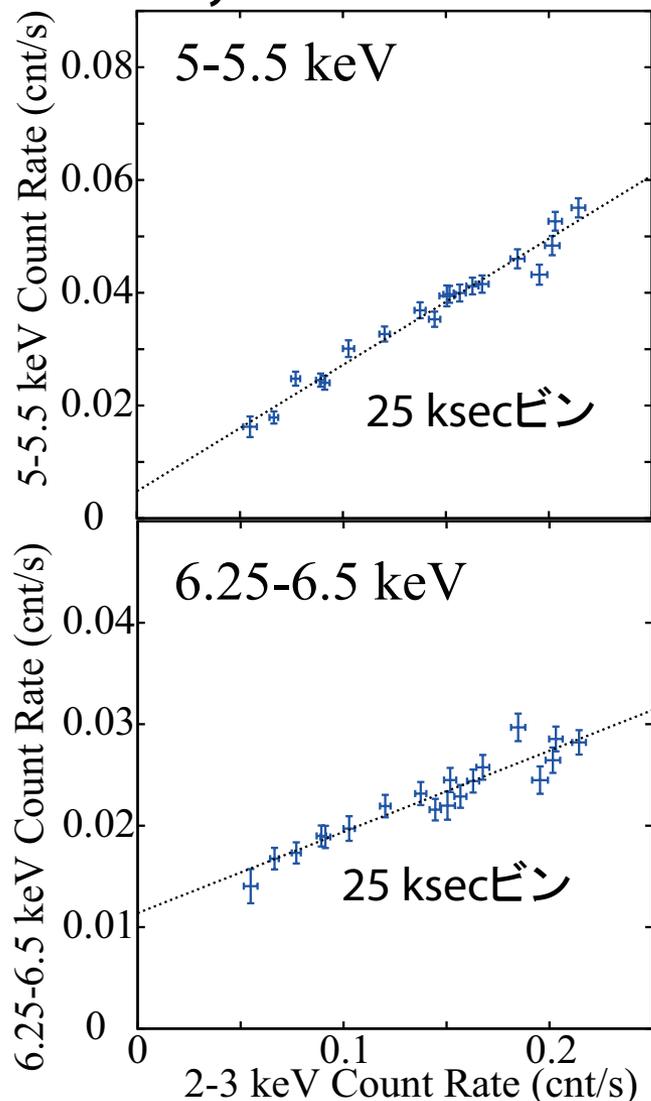
「すざく」観測 2009/10/28~11/2 (全観測時間 544 ksec)



# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

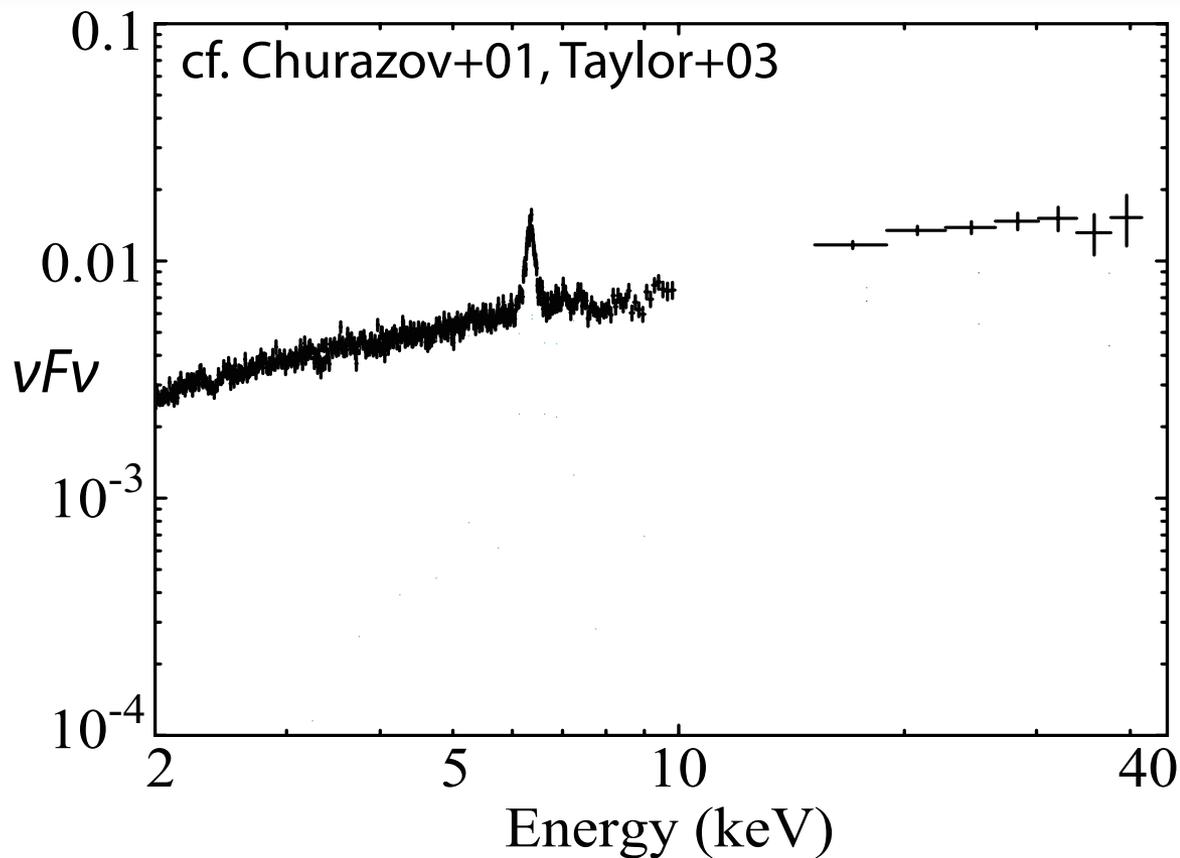
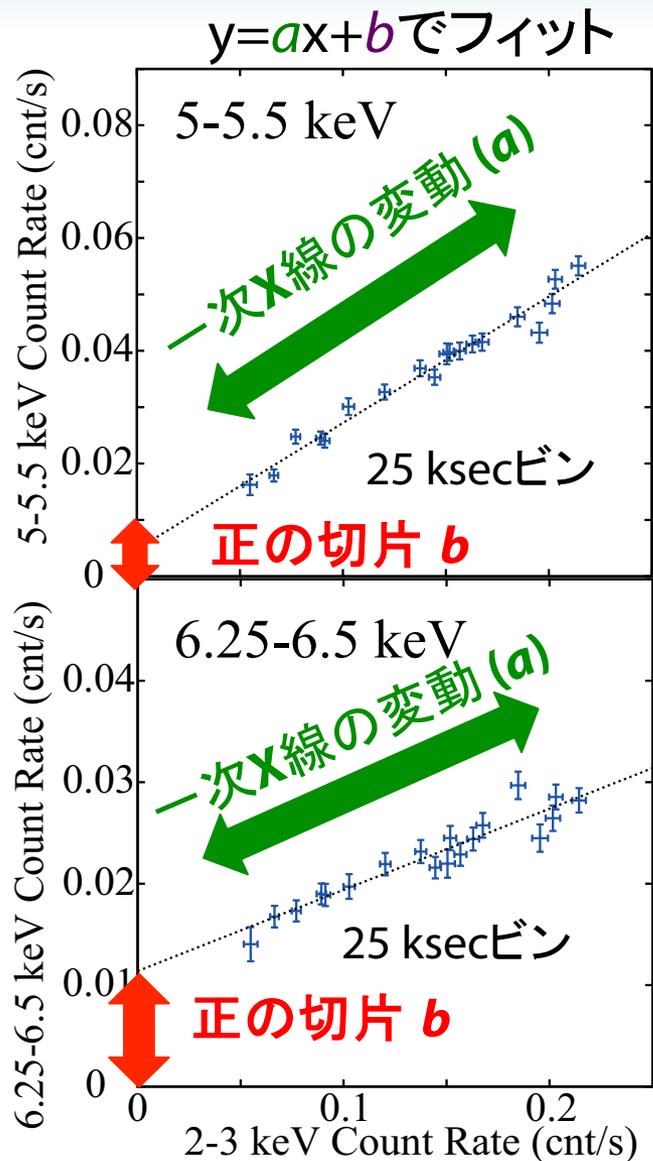
☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成

$y=ax+b$ でフィット



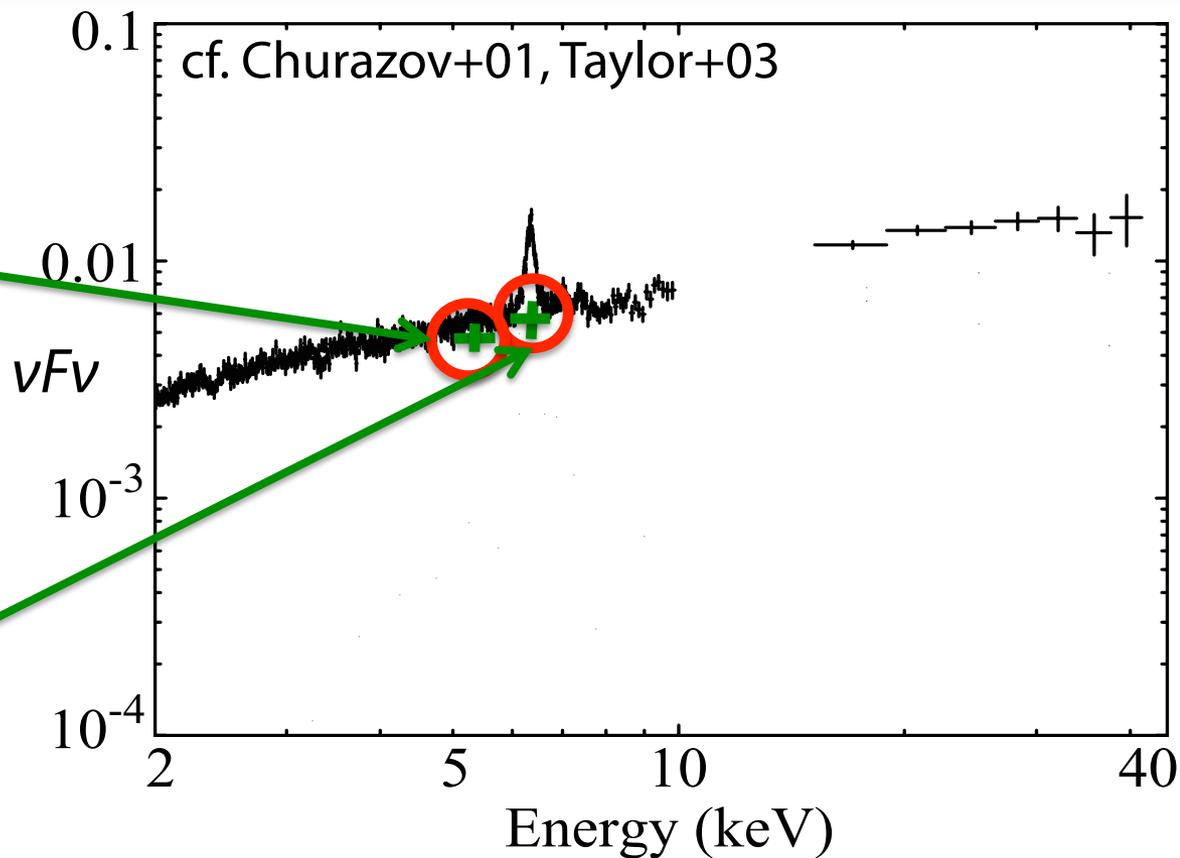
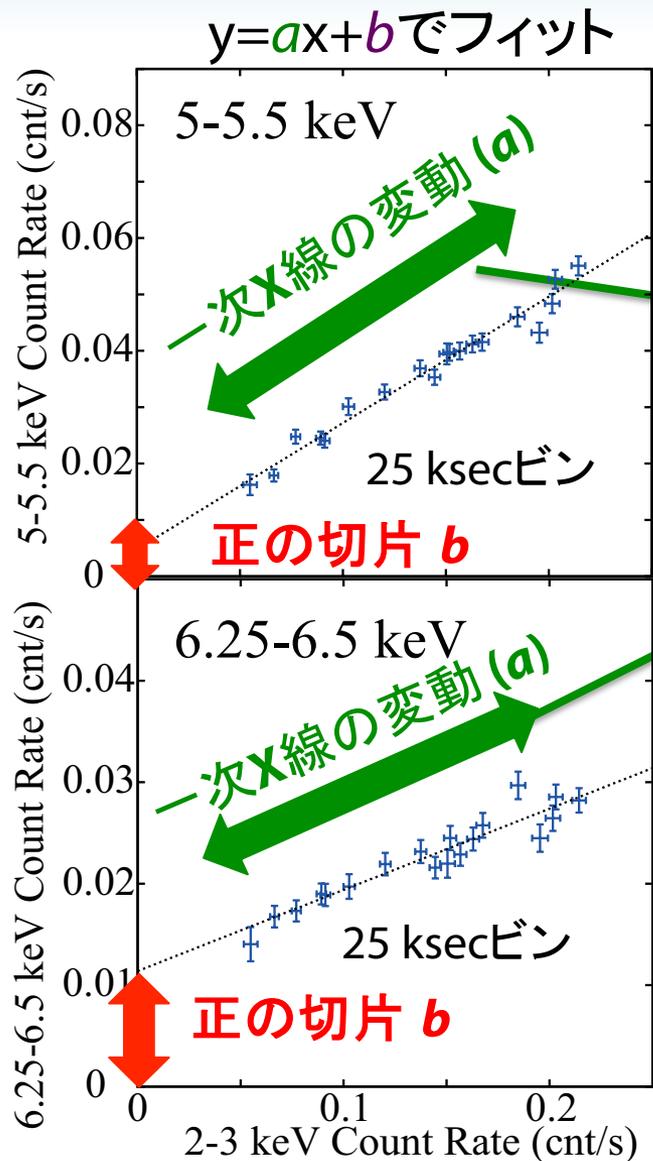
# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

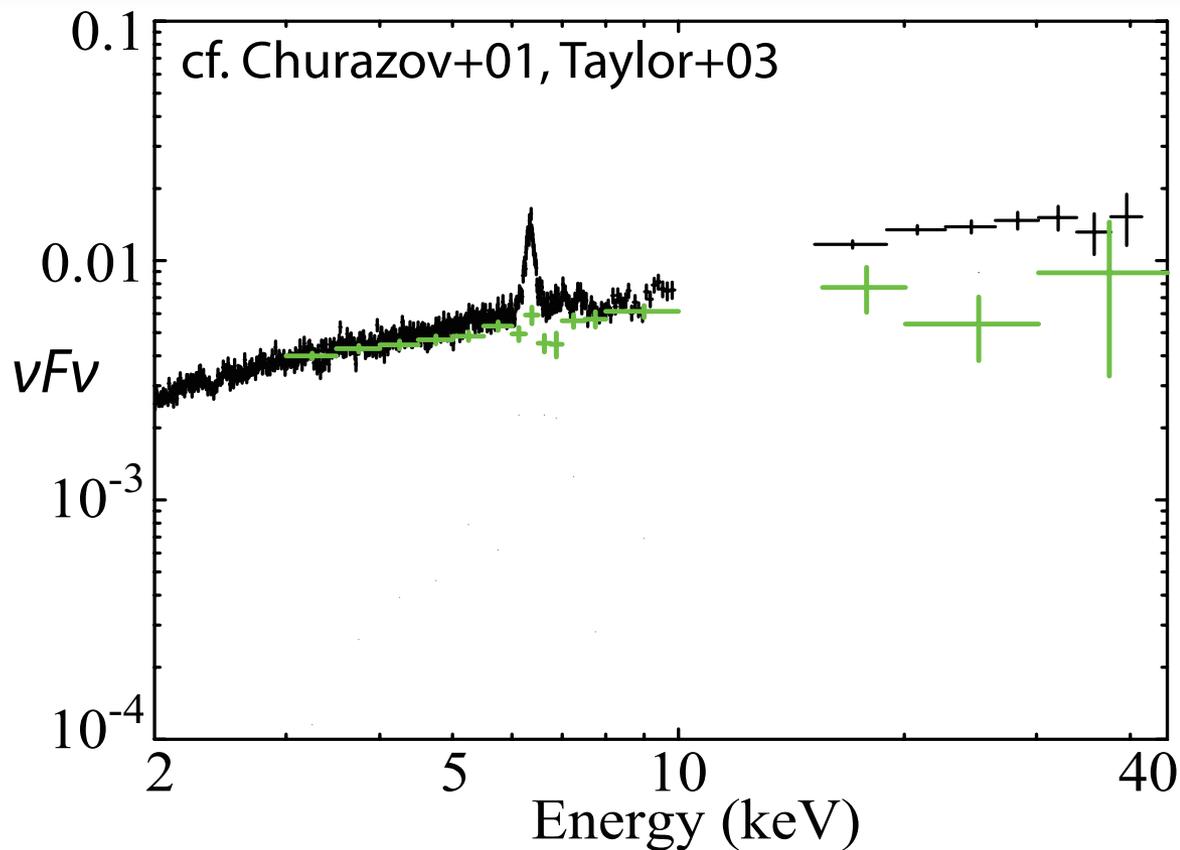
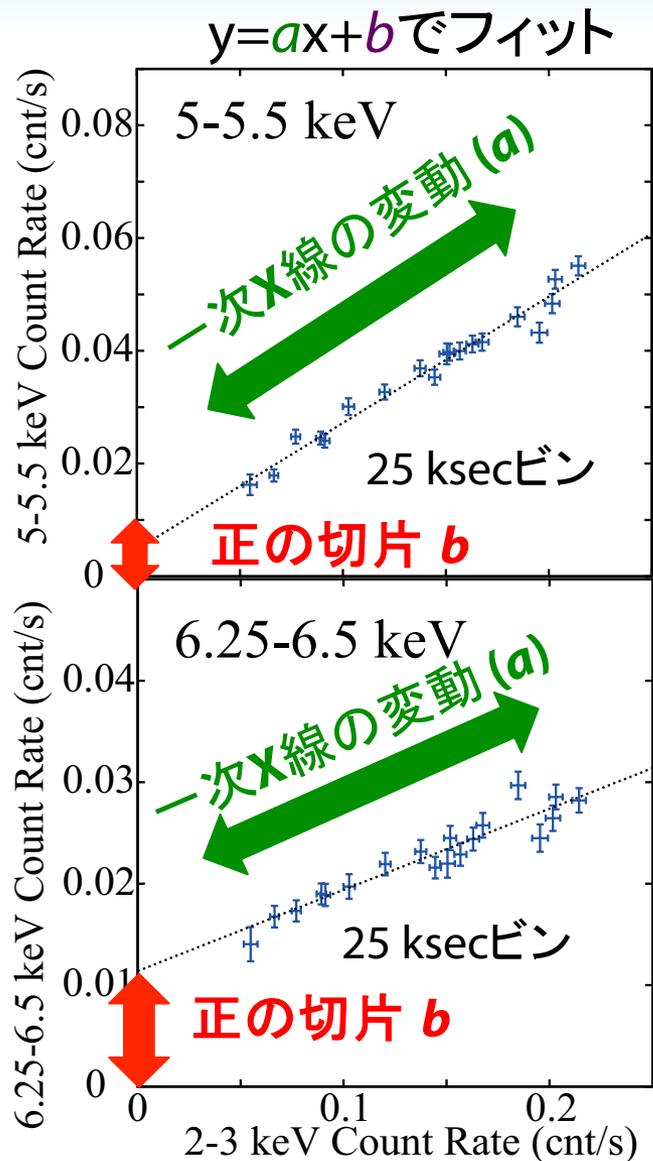
☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



☆ 傾き  $a$  から変動成分スペクトルを抽出

# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

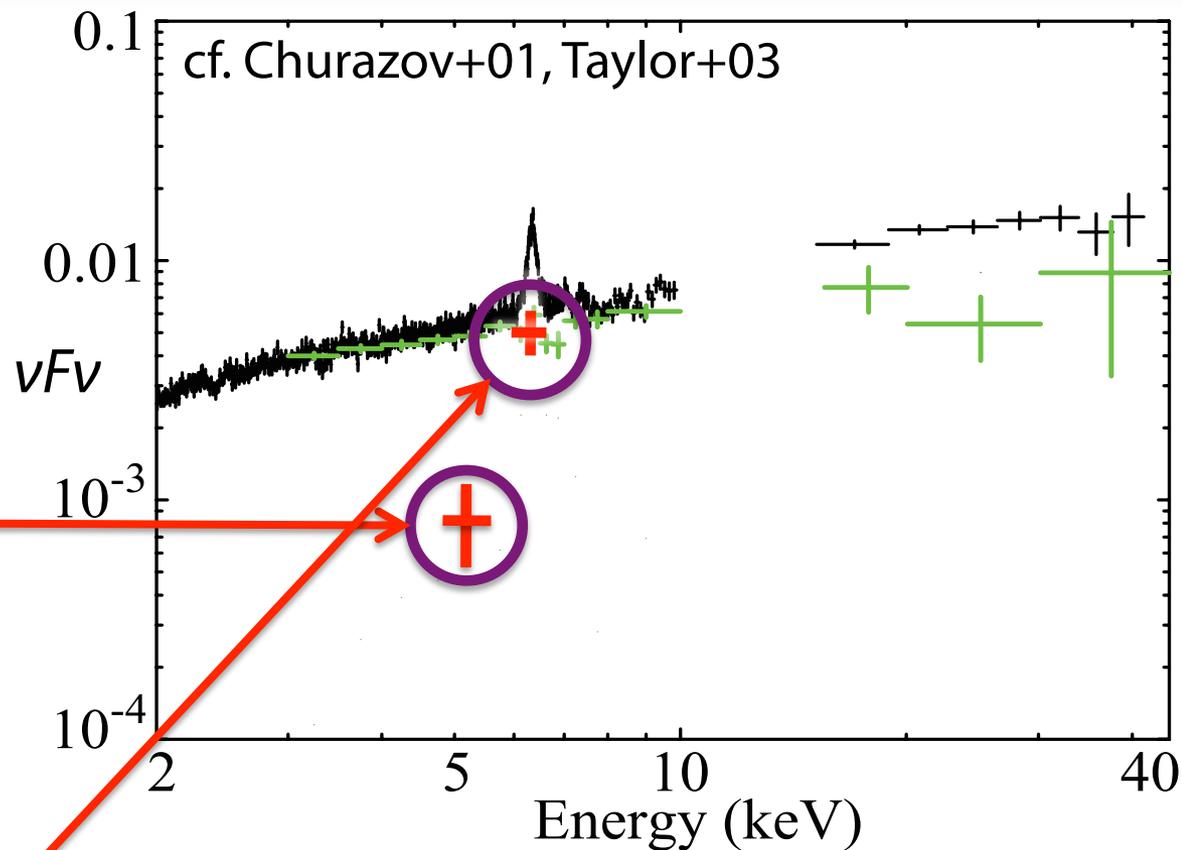
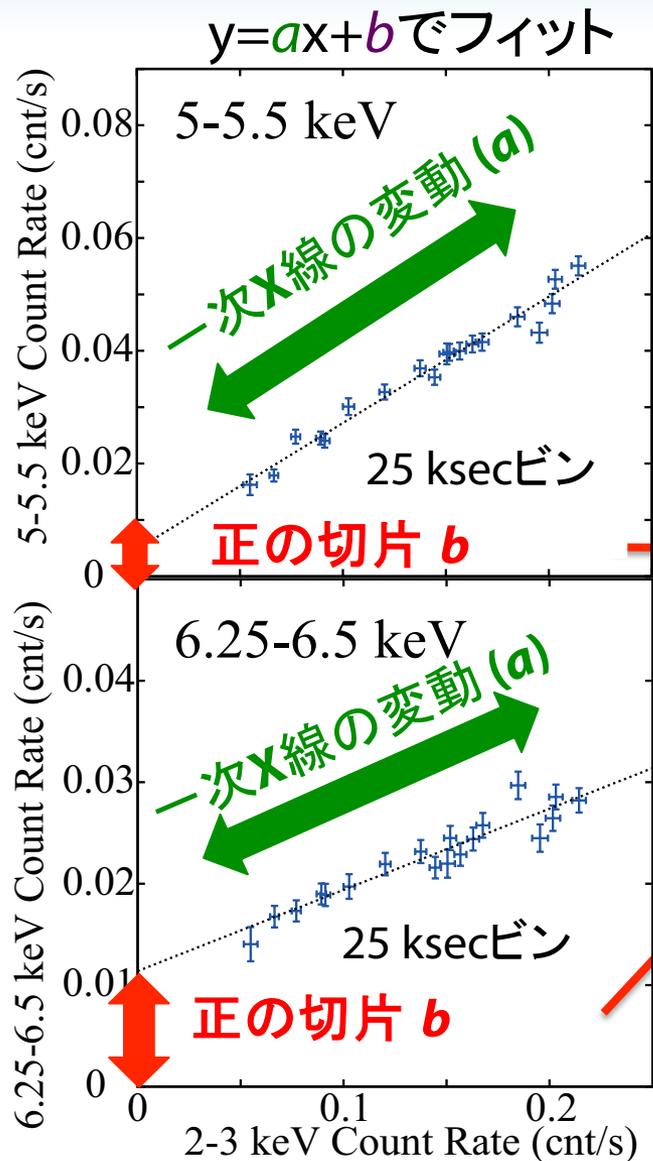
☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



☆ 傾き  $a$  から変動成分スペクトルを抽出

# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

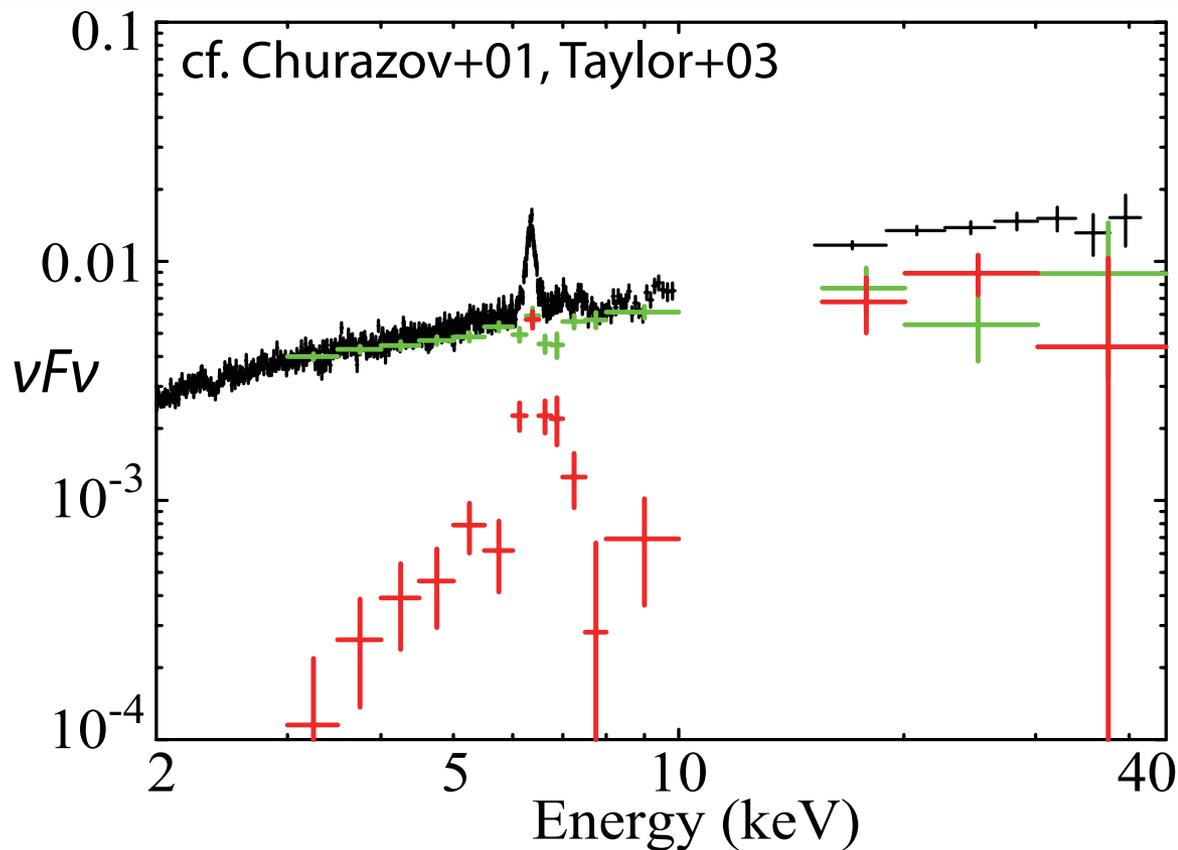
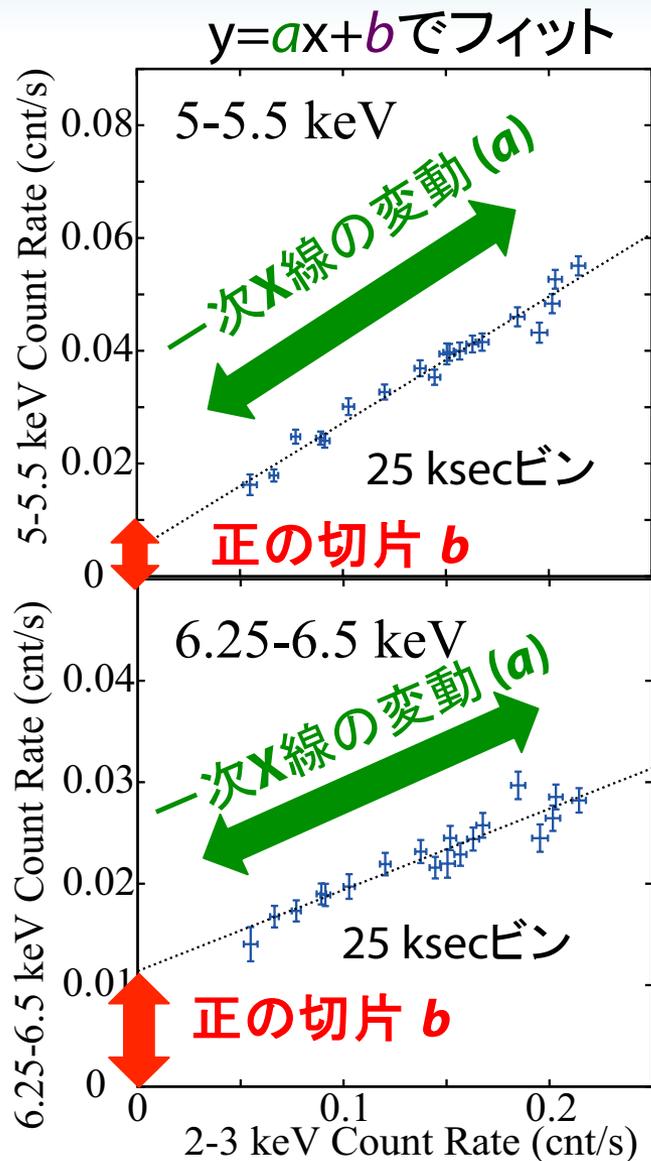
☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



☆ 傾き  $a$  から変動成分スペクトルを抽出

# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

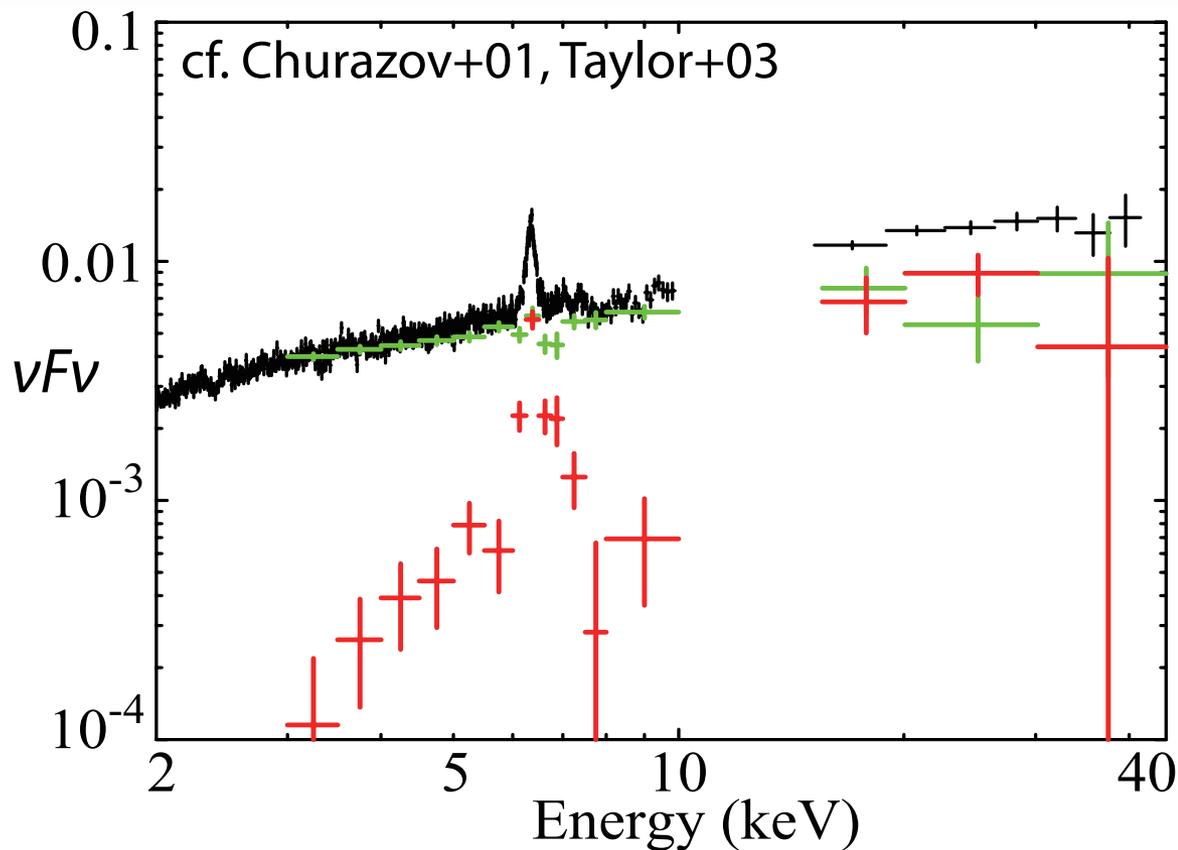
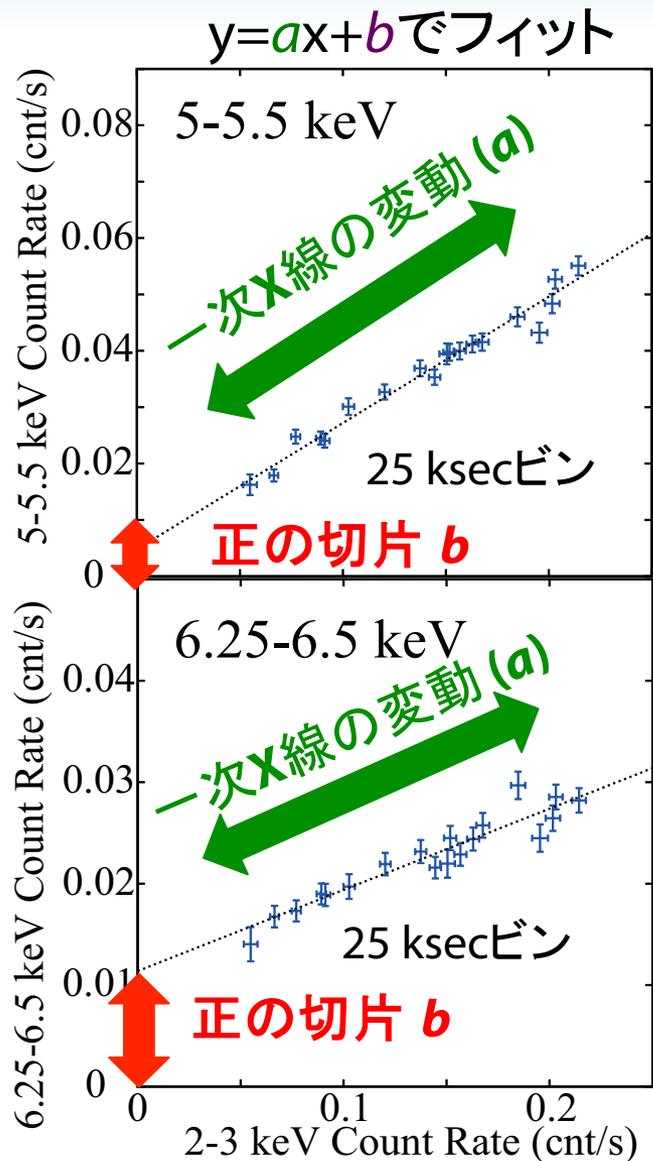
☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



- ☆ 傾き  $a$  から変動成分スペクトルを抽出
- ☆ 切片  $b$  から変動しない成分のスペクトルを抽出

# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



- ☆ 傾き  $a$  から変動成分スペクトルを抽出
- ☆ 切片  $b$  から変動しない成分のスペクトルを抽出

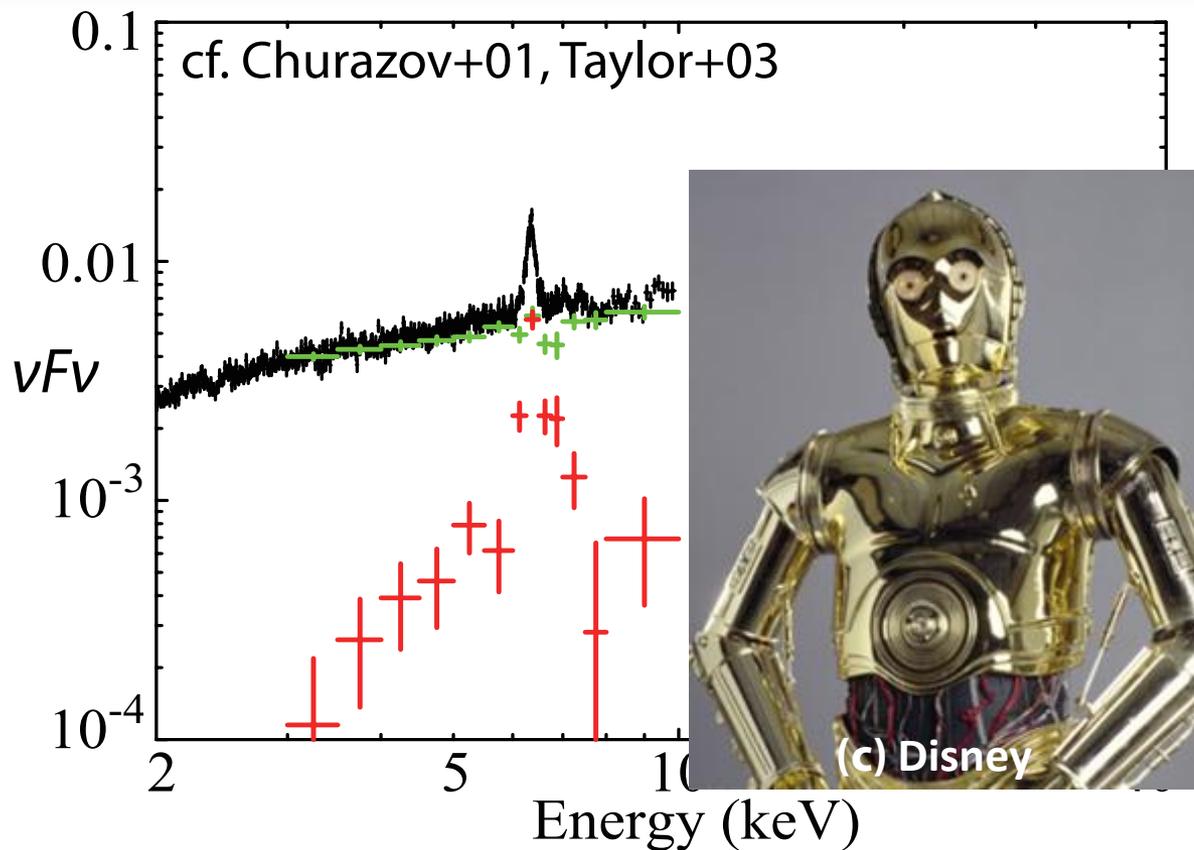
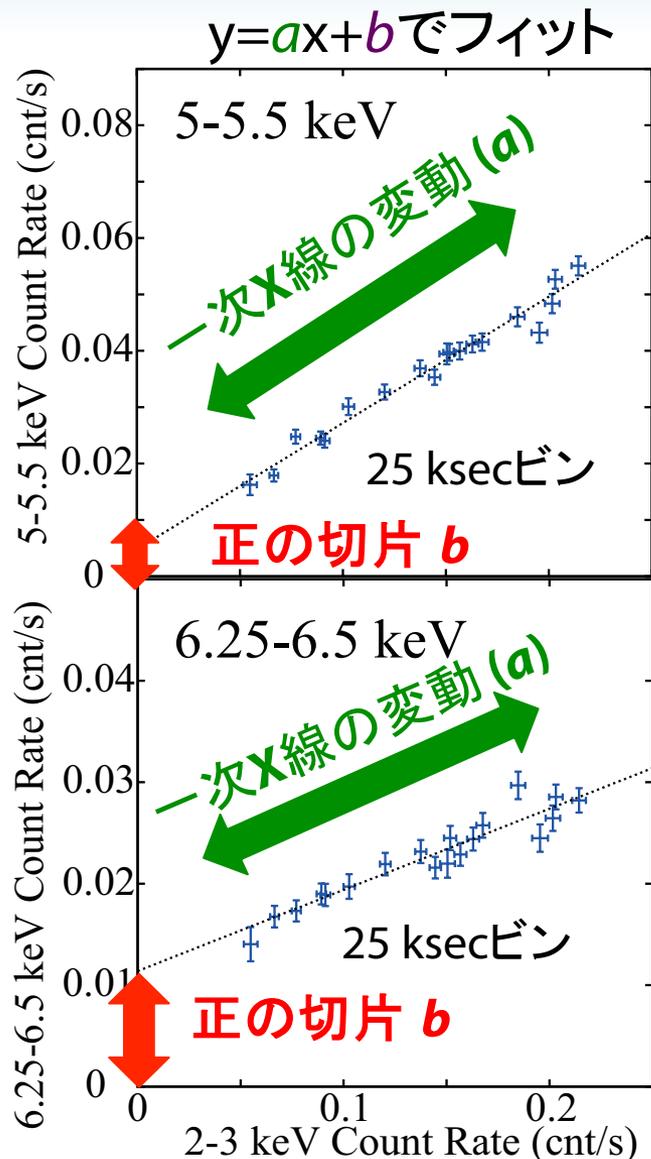
→ ここから **Count-Count Correlation**

**with Positive Offset**

法と呼ぶ

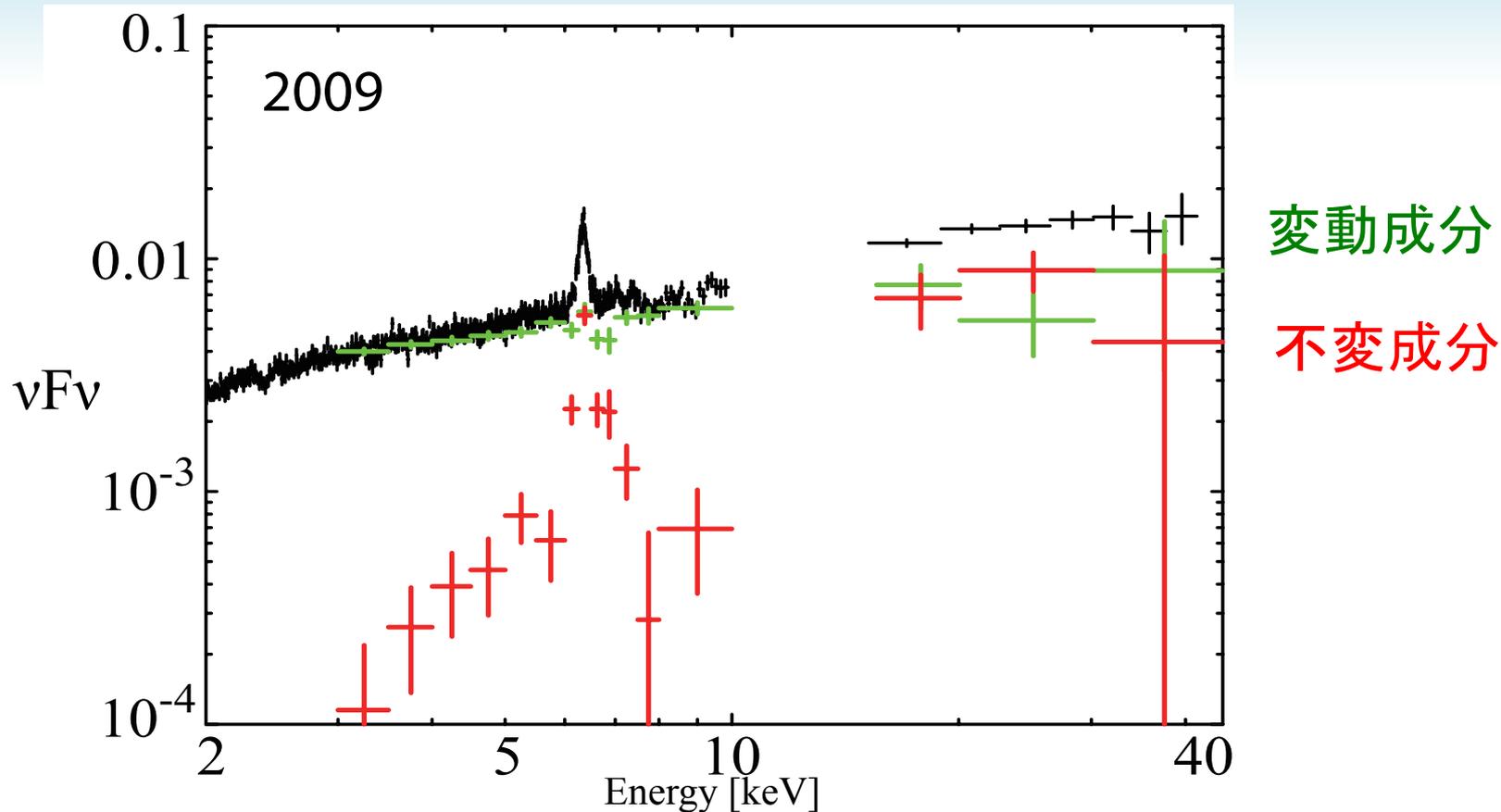
# 9. スペクトルのモデルによらない成分分解

☆ 3-45 keVバンドを16個の細かいバンドに分け、Count-Count Plot (CCP)を作成



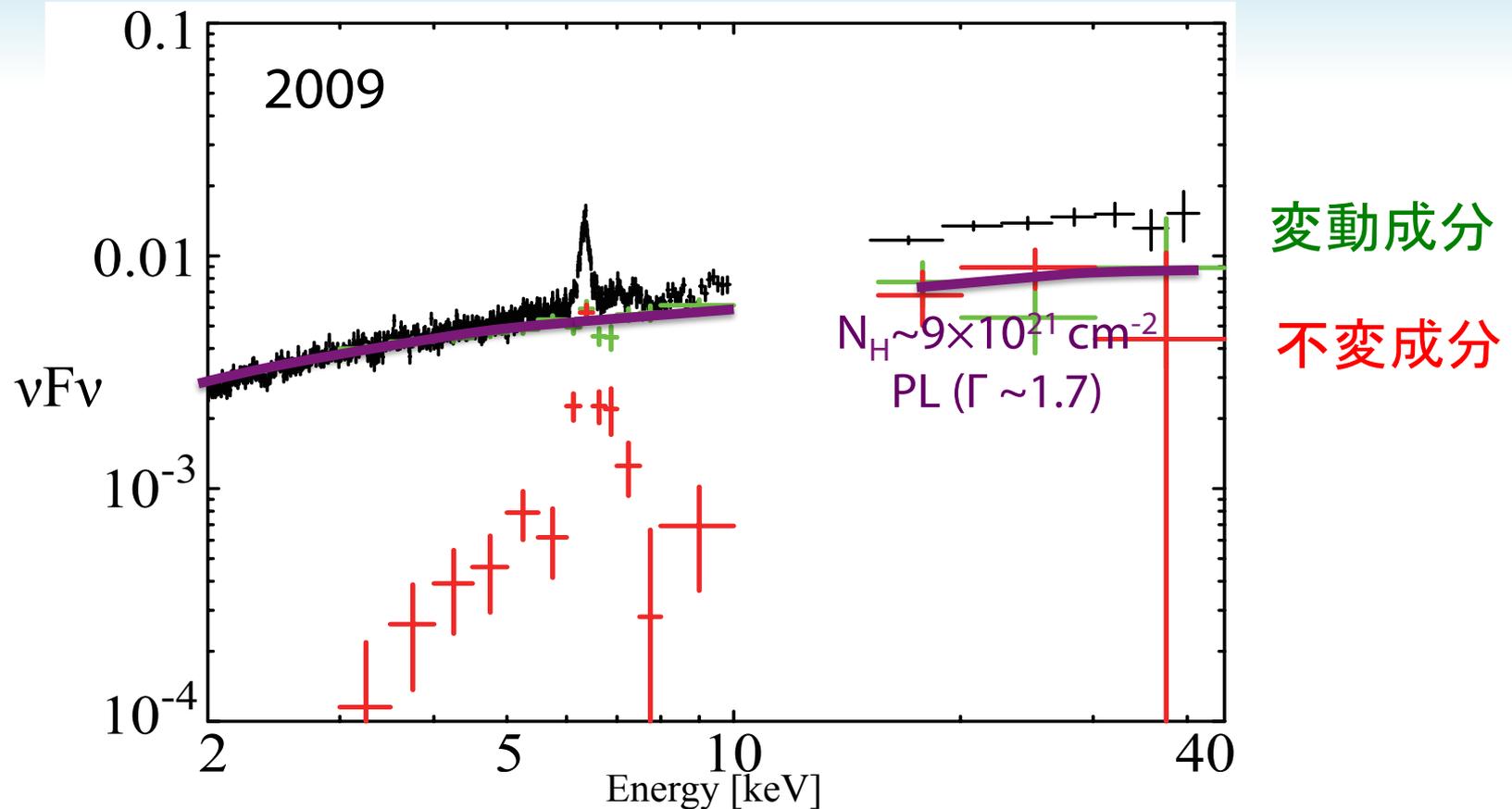
- ☆ 傾き  $a$  から変動成分スペクトルを抽出
- ☆ 切片  $b$  から変動しない成分のスペクトルを抽出
- ここから **Count-Count Correlation with Positive Offset (C3PO)** 法と呼ぶ

# 10. 変動成分と不変成分のスペクトル解釈



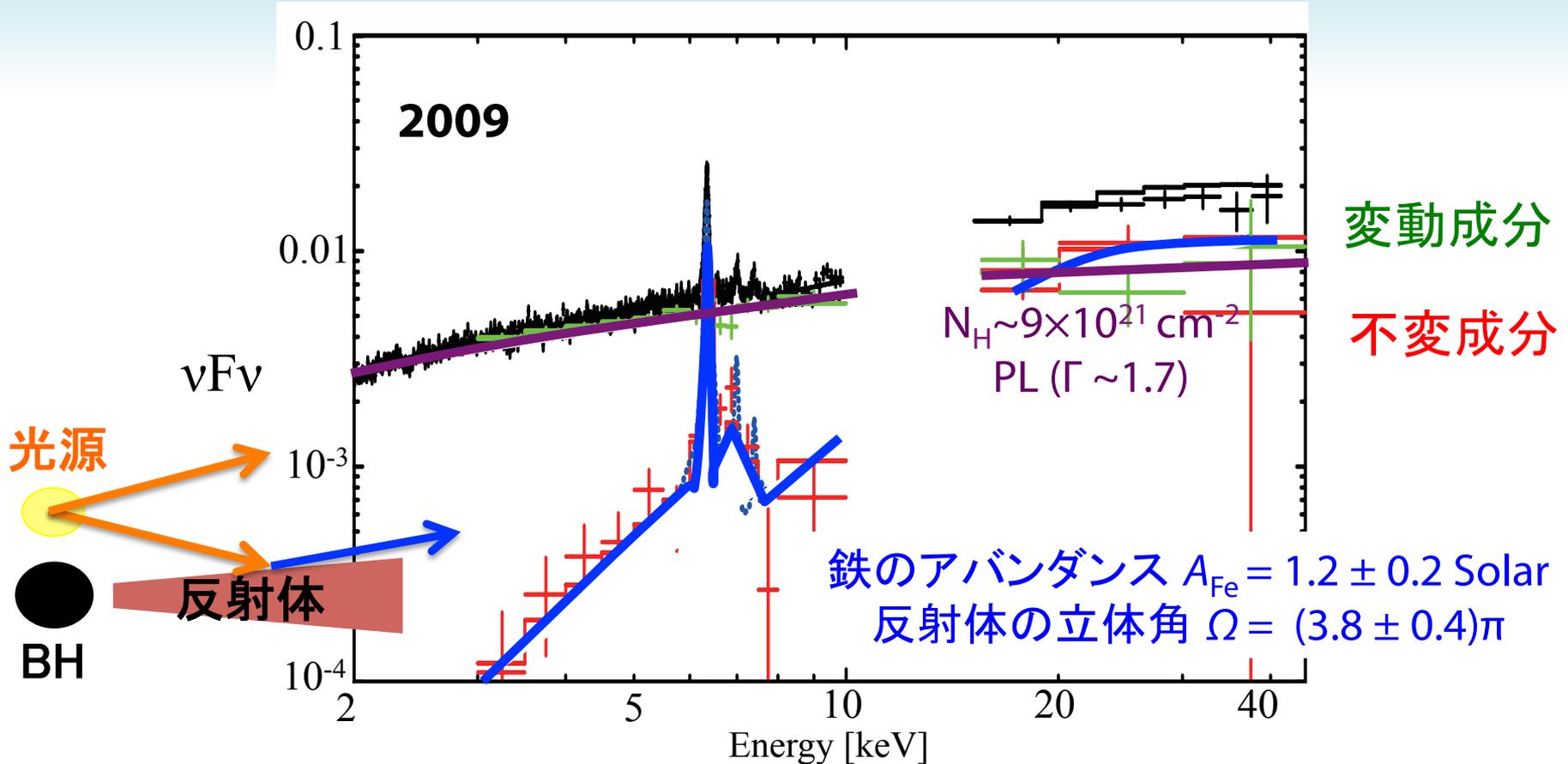
1. 変動成分は弱く吸収を受けたハードな単一PLで再現 → 硬い一次X線成分

# 10. 変動成分と不変成分のスペクトル解釈



1. 変動成分は弱く吸収を受けたハードな単一PLで再現 → 硬い一次X線成分
2. 不変成分は、顕著なFe-K $\alpha$ 輝線とFe-Kエッジが、遠方で生じた中性反射に似る

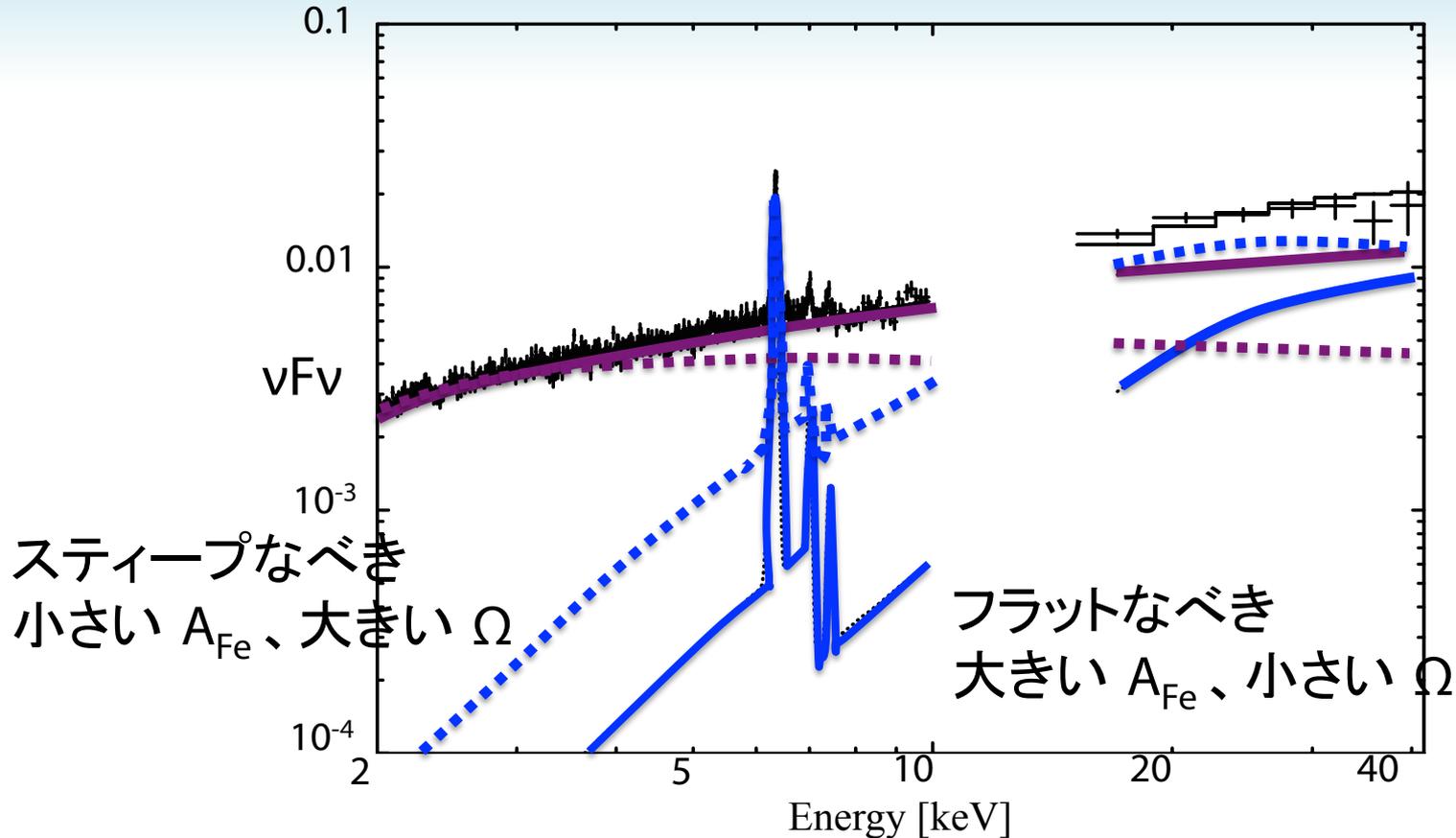
# 10. 変動成分と不変成分のスペクトル解釈



1. 変動成分は弱く吸収を受けたハードな単一PLで再現 → 硬い一次X線成分
2. 不変成分は、顕著なFe-K $\alpha$ 輝線とFe-Kエッジが、遠方で生じた中性反射に似る
3. 中性反射モデルは不変成分をよく再現 → 中性の反射成分
4. 硬い一次X線成分と中性の反射成分で、時間平均スペクトルをよく再現

X線信号を、時間変動とスペクトルの両面から成分に分解することに成功！

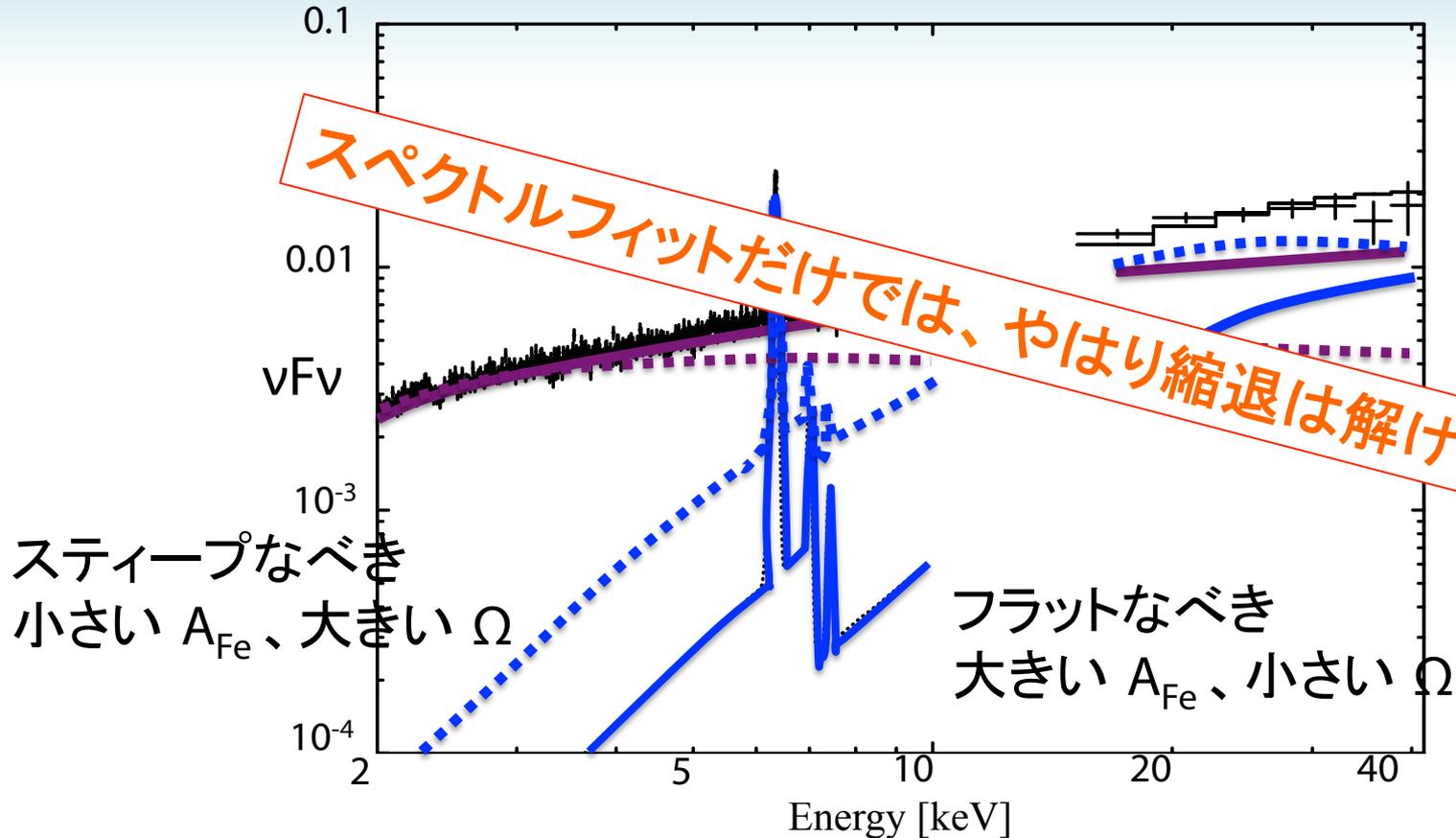
# 10. 変動成分と不変成分のスペクトル解釈



1. 変動成分は弱く吸収を受けたハードな単一PLで再現 → 硬い一次X線成分
2. 不変成分は、顕著なFe-K $\alpha$ 輝線とFe-Kエッジが、遠方で生じた中性反射に似る
3. 中性反射モデルは不変成分をよく再現 → 中性の反射成分
4. 硬い一次X線成分と中性の反射成分で、時間平均スペクトルをよく再現

X線信号を、時間変動とスペクトルの両面から成分に分解することに成功！

# 10. 変動成分と不変成分のスペクトル解釈



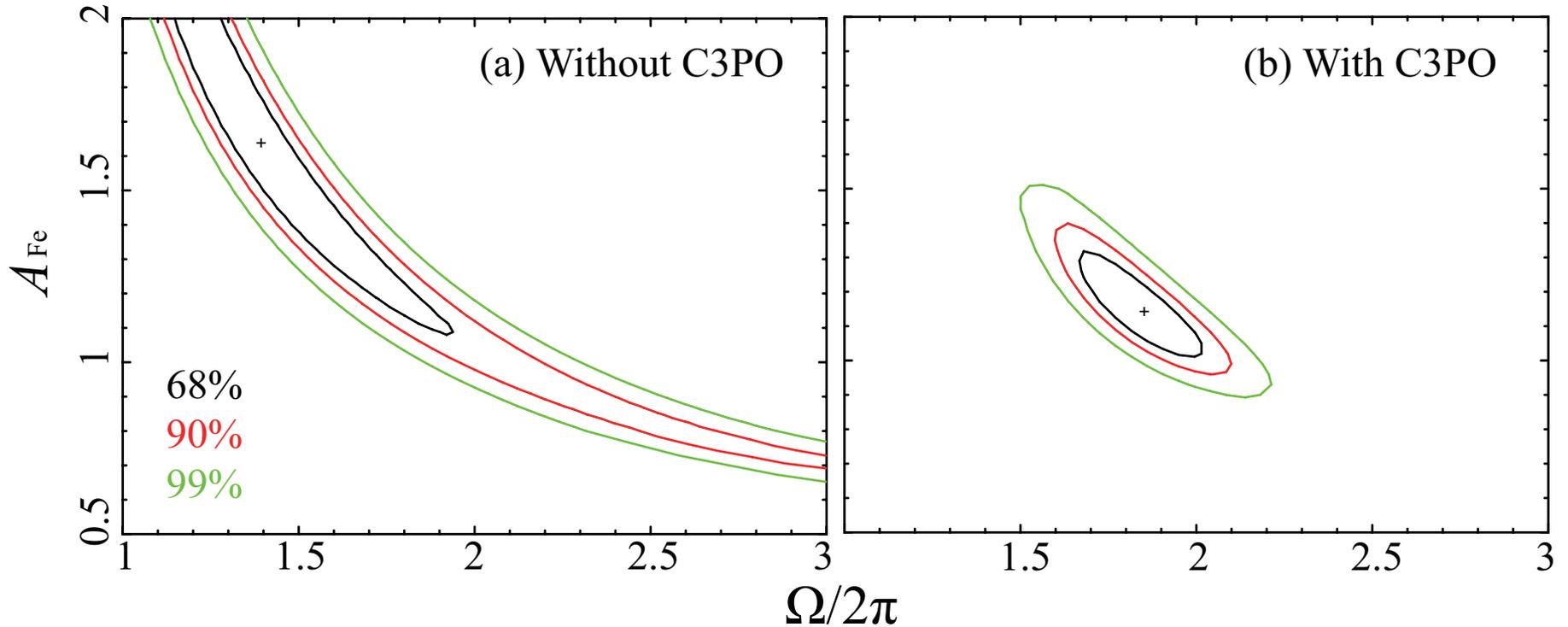
1. 変動成分は弱く吸収を受けたハードな単一PLで再現 → 硬い一次X線成分
2. 不変成分は、顕著なFe-K $\alpha$ 輝線とFe-Kエッジが、遠方で生じた中性反射に似る
3. 中性反射モデルは不変成分をよく再現 → 中性の反射成分
4. 硬い一次X線成分と中性の反射成分で、時間平均スペクトルをよく再現

X線信号を、時間変動とスペクトルの両面から成分に分解することに成功！

# 11. C3PO法の有効性

スペクトルフィットのみ

C3PO法による成分分解



C3PO法によって Fe-K $\alpha$ 輝線の反射成分continuumに対する等価幅が決定  
→ 反射の卓越しない普通のI型セイファートでも、パラメータの縮退が解けた

この結果から、ここからの議論における反射体の鉄のアバundanceは 1 Solar と仮定する

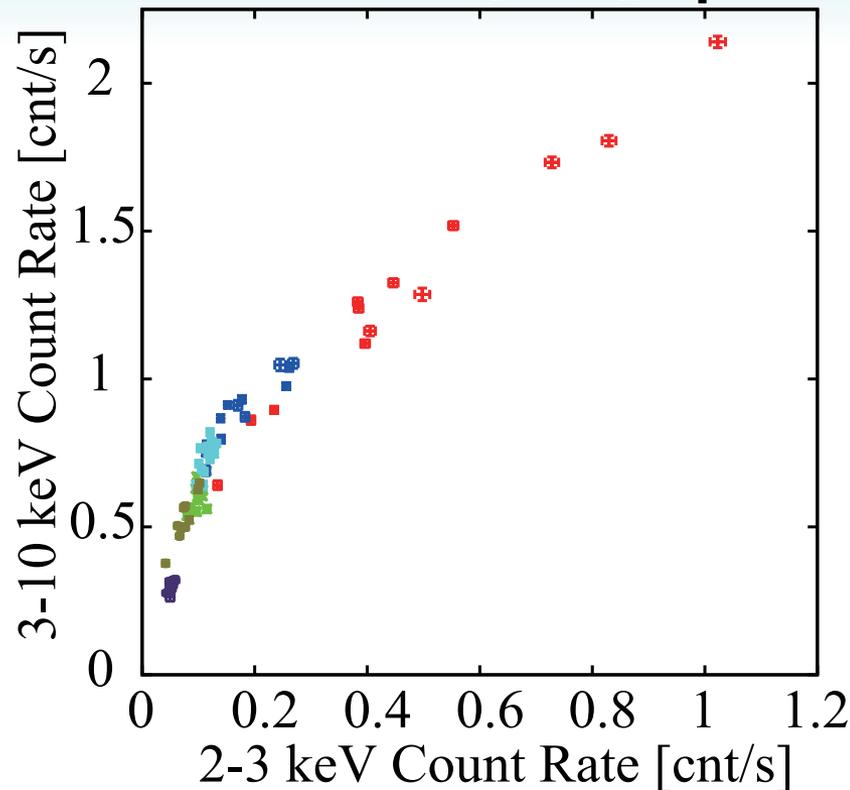
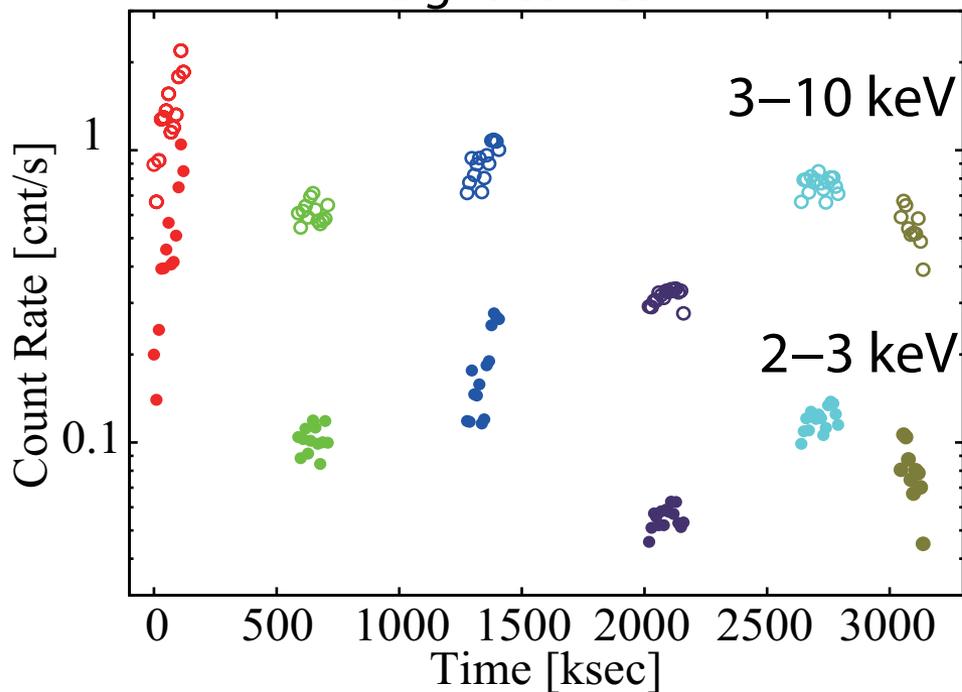
# III. C3PO法を「すざく」のNGC3227 アーカイブデータに適用した結果 (プレスリリースした結果)

# 12. I型セイファートNGC 3227からのX線の時間変動

「すざく」で6回観測 (各露光時間 ~50 ksec)

Noda et al. (2014), ApJ

Light curves



☆ 1、3観測目 → ~数時間の速い時間変動, その他 → ~数週間の遅い時間変動

☆ CCP分布は PL関数 (曲線)では説明できない

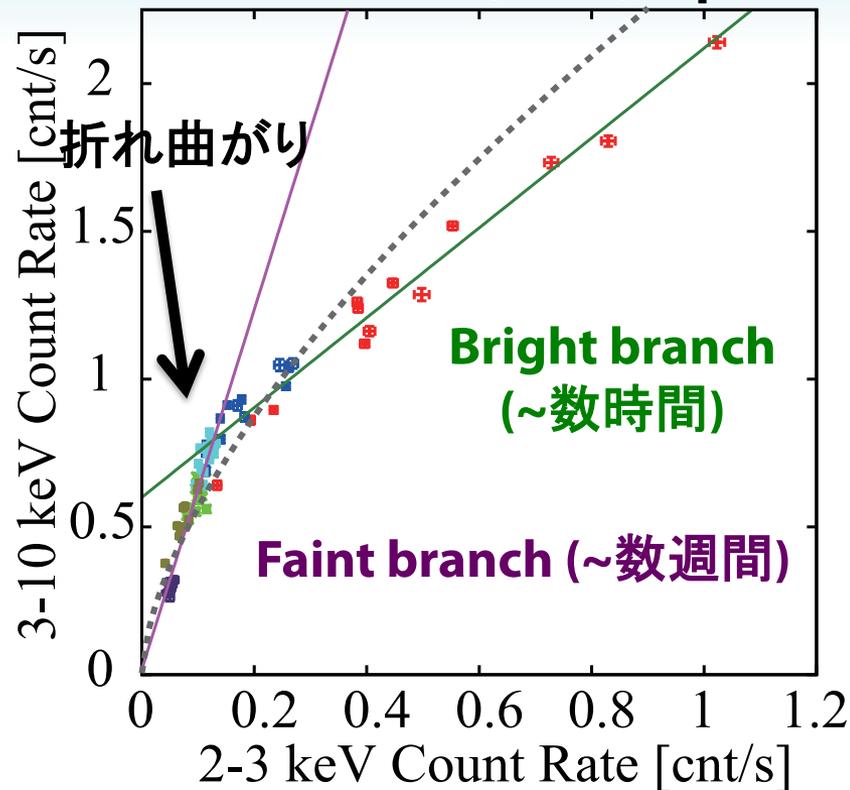
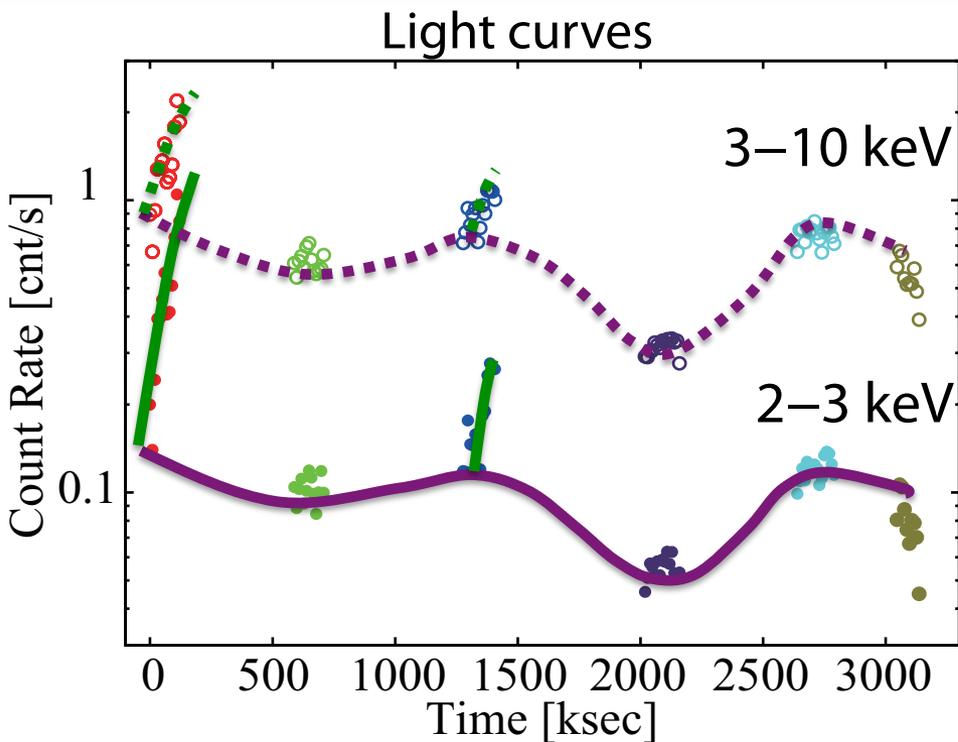
→ 2つの直線 (ここから Bright branch and Faint branch と呼ぶ)が必要  
2-3 keVバンドの 0.16 cnt/s の地点にクリアな折れ曲がり

☆ 2つのブランチにそれぞれC3PO法を適用 → 4つの成分 (変動×2、不変×2)

# 12. I型セイファートNGC 3227からのX線の時間変動

「すざく」で6回観測 (各露光時間 ~50 ksec)

Noda et al. (2014), ApJ



☆ 1、3観測目 → ~数時間の速い時間変動, その他 → ~数週間の遅い時間変動

☆ CCP分布は PL関数 (曲線)では説明できない

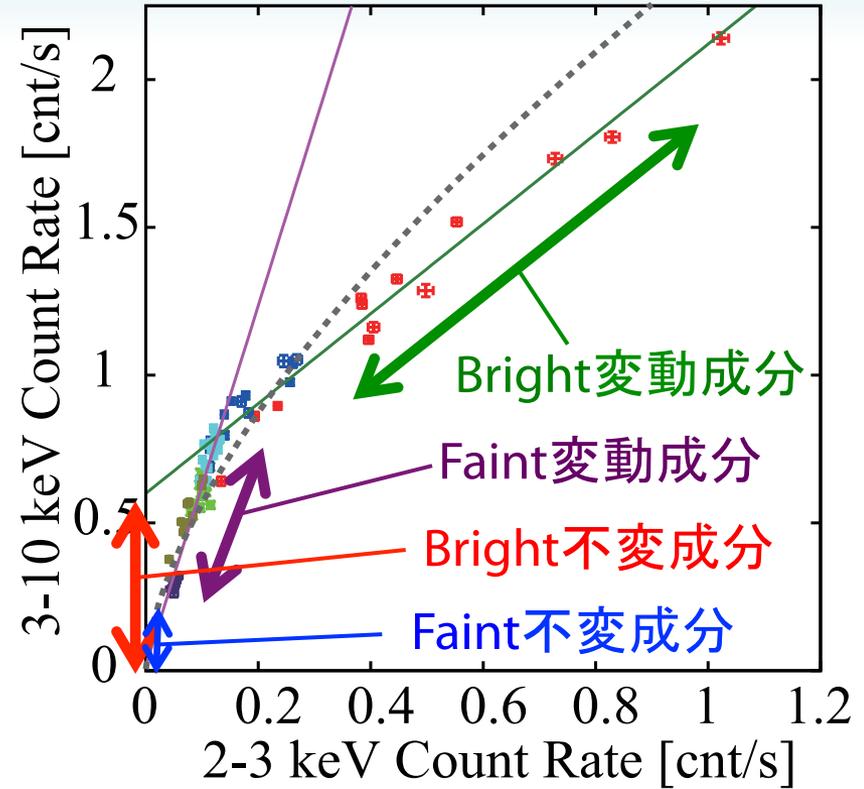
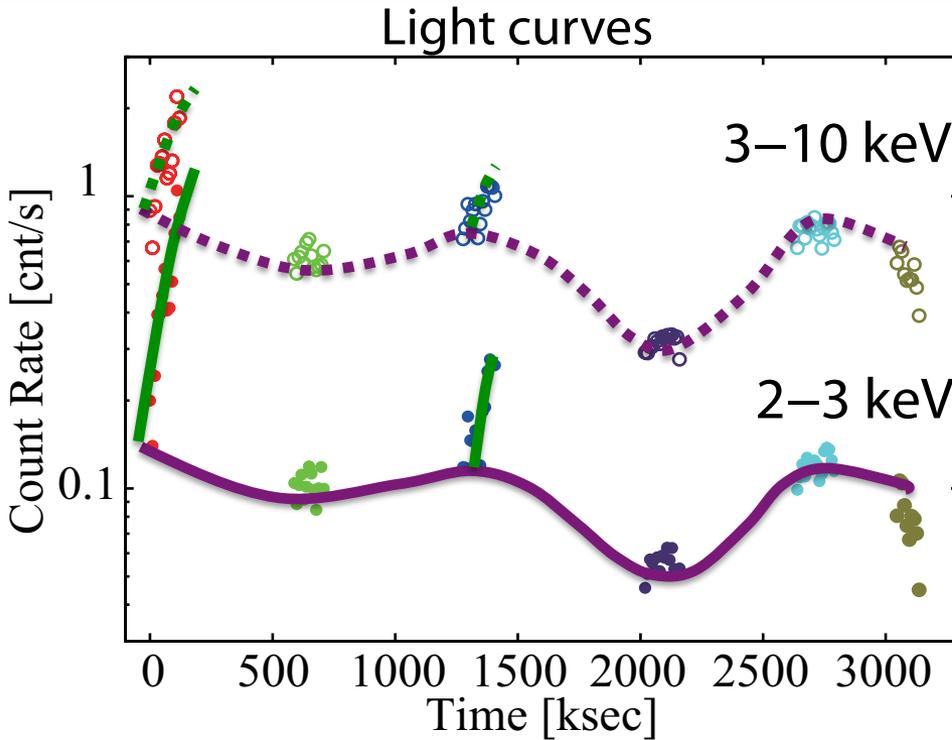
→ 2つの直線 (ここから Bright branch and Faint branch と呼ぶ)が必要  
2-3 keVバンドの 0.16 cnt/s の地点にクリアな折れ曲がり

☆ 2つのブランチにそれぞれC3PO法を適用 → 4つの成分 (変動×2、不変×2)

# 12. I型セイファートNGC 3227からのX線の時間変動

「すざく」で6回観測 (各露光時間 ~50 ksec)

Noda et al. (2014), ApJ



☆ 1、3観測目 → ~数時間の速い時間変動, その他 → ~数週間の遅い時間変動

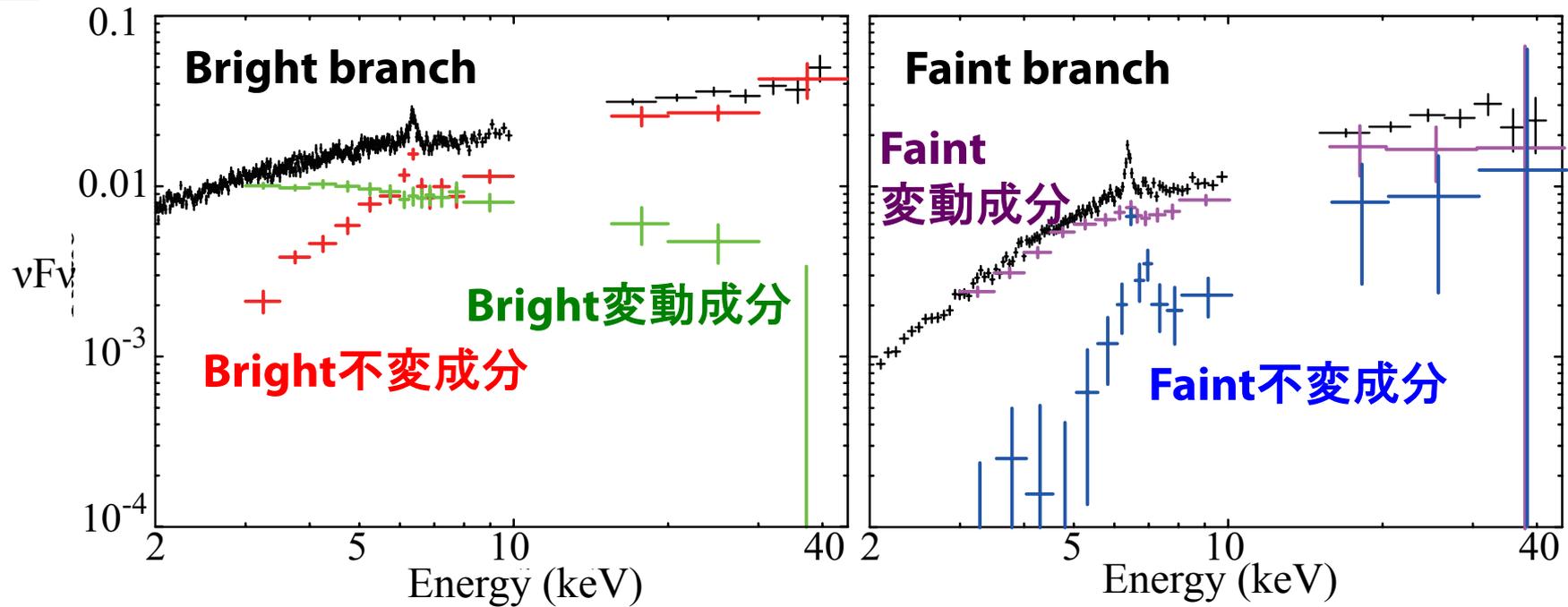
☆ CCP分布は PL関数 (曲線)では説明できない

→ 2つの直線 (ここから Bright branch and Faint branch と呼ぶ)が必要  
2-3 keVバンドの 0.16 cnt/s の地点にクリアな折れ曲がり

☆ 2つのブランチにそれぞれC3PO法を適用 → 4つの成分 (変動×2、不変×2)

# 13. NGC 3227で分解されたX線スペクトル成分

Noda et al. (2014), ApJ

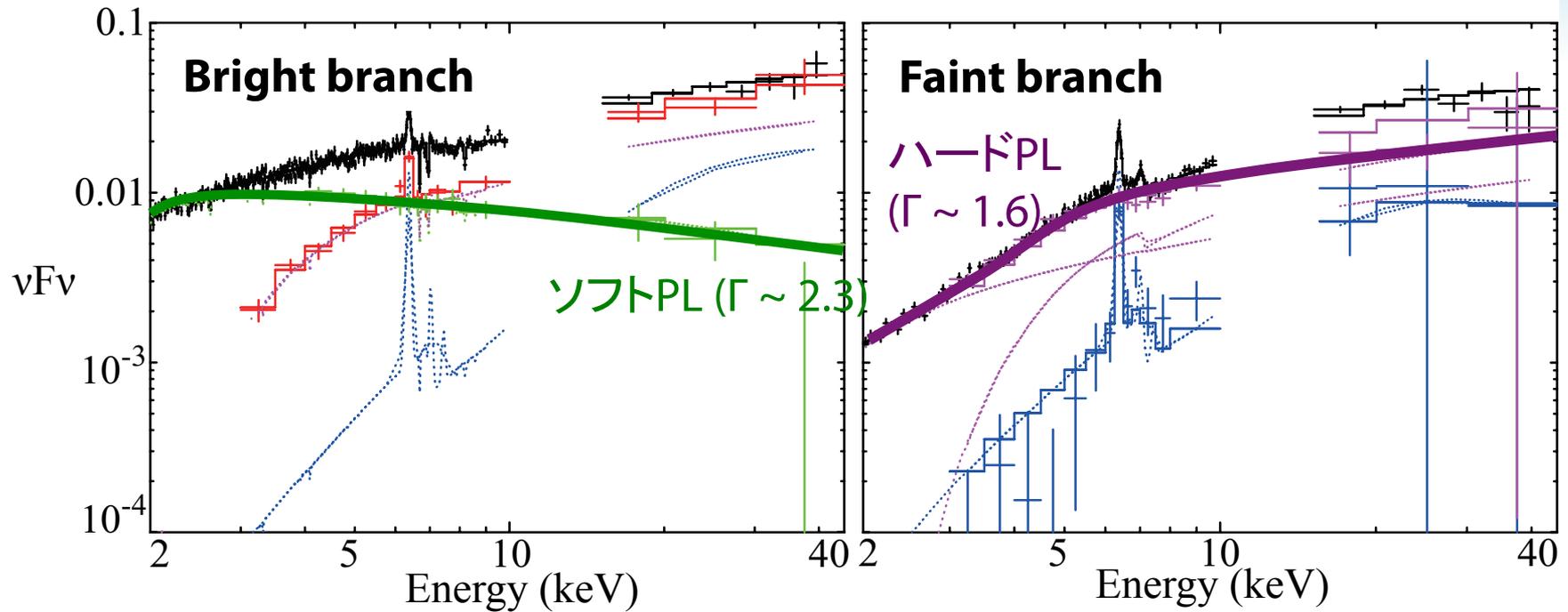


$$\text{Bright branch} = \text{ソフトPL成分} + \text{ハードPL成分} + \text{反射\&Fe-K}\alpha\text{成分} \\ = \text{Faint branch}$$

- ☆ ソフトPL成分が消えてもハードPL成分は残る上、スペクトルの形も違う  
共に二次的な成分ではない (反射, 部分吸収, ...) → 両方ともコロナの成分
- ☆ 暗い時間帯にはコロナ成分は単一だが、明るい時間帯には複数生じる  
→ 定常的に存在するコロナと、現れたり消えたりするコロナの2種類

# 13. NGC 3227で分解されたX線スペクトル成分

Noda et al. (2014), ApJ



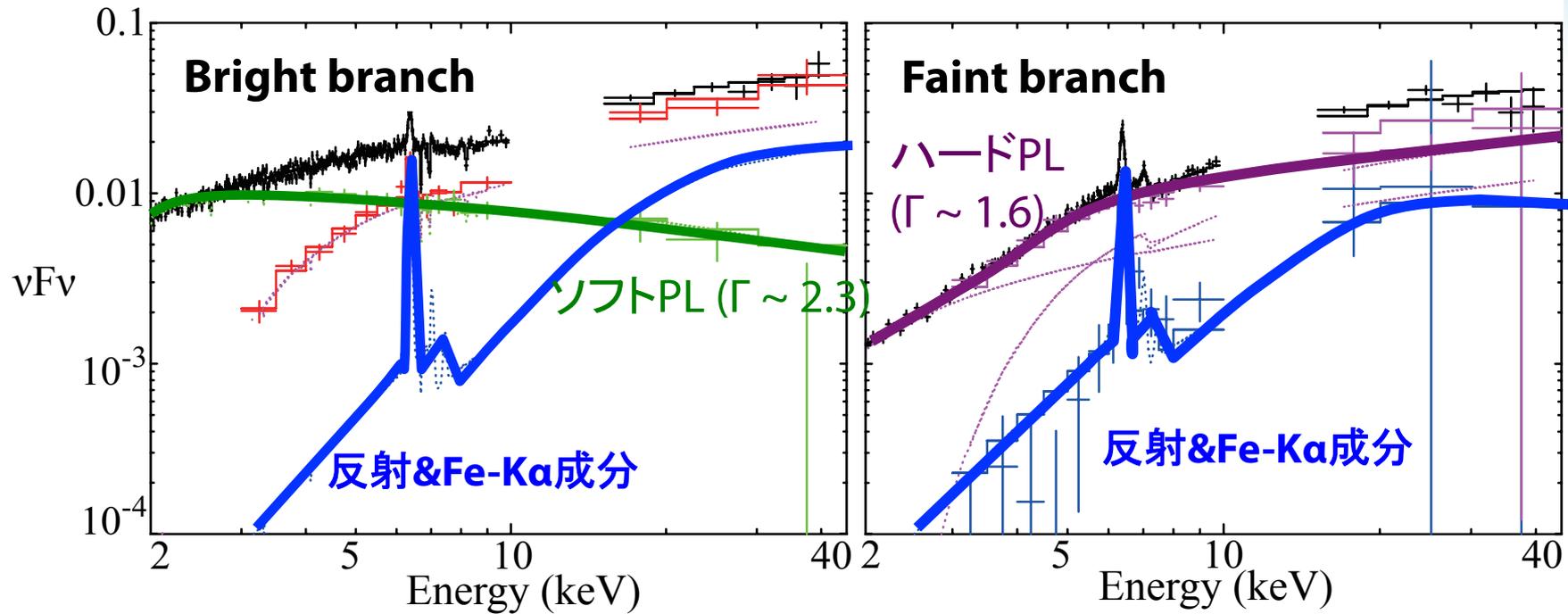
$$\text{Bright branch} = \text{ソフトPL成分} + \text{ハードPL成分} + \text{反射\&Fe-K}\alpha\text{成分} \\ = \text{Faint branch}$$

☆ ソフトPL成分が消えてもハードPL成分は残る上、スペクトルの形も違う  
共に二次的な成分ではない (反射, 部分吸収, ...) → 両方ともコロナの成分

☆ 暗い時間帯にはコロナ成分は単一だが、明るい時間帯には複数生じる  
→ 定常的に存在するコロナと、現れたり消えたりするコロナの2種類

# 13. NGC 3227で分解されたX線スペクトル成分

Noda et al. (2014), ApJ



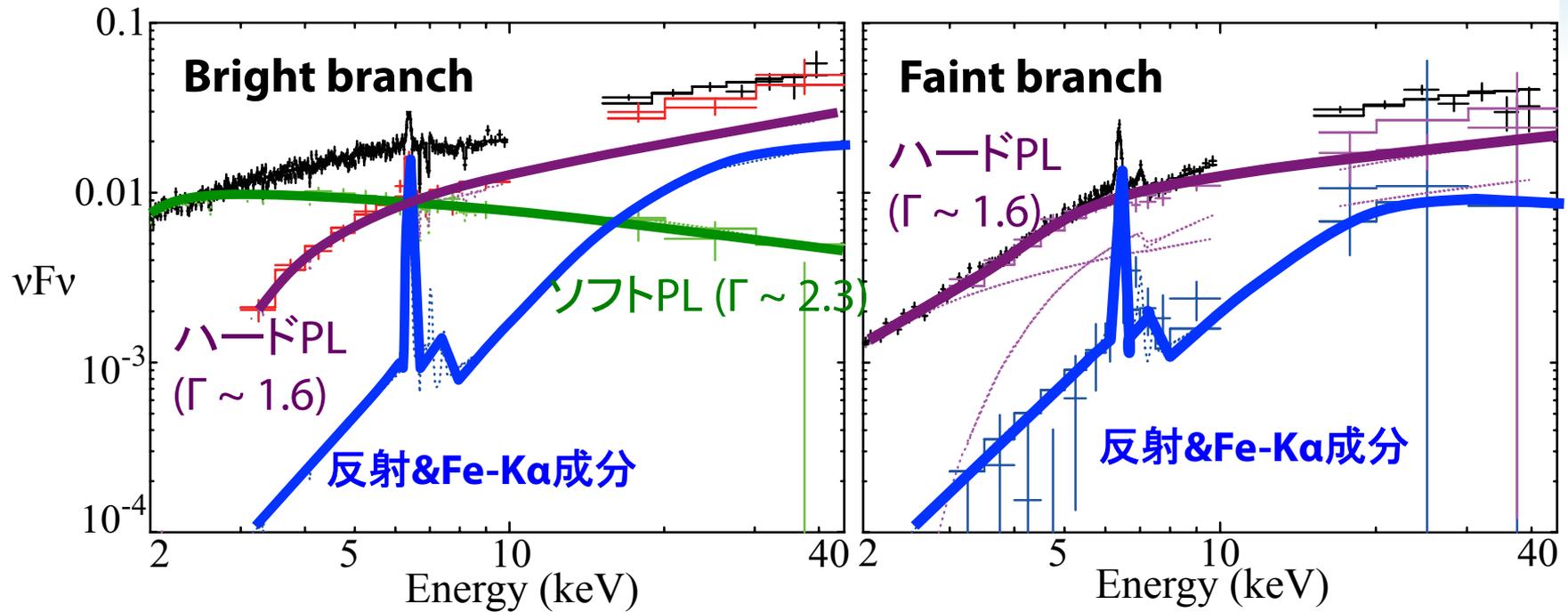
$$\text{Bright branch} = \text{ソフトPL成分} + \text{ハードPL成分} + \text{反射\&Fe-K}\alpha\text{成分} \\ = \text{Faint branch}$$

☆ ソフトPL成分が消えてもハードPL成分は残る上、スペクトルの形も違う  
共に二次的な成分ではない (反射, 部分吸収, ...) → 両方ともコロナの成分

☆ 暗い時間帯にはコロナ成分は単一だが、明るい時間帯には複数生じる  
→ 定常的に存在するコロナと、現れたり消えたりするコロナの2種類

# 13. NGC 3227で分解されたX線スペクトル成分

Noda et al. (2014), ApJ



$$\text{Bright branch} = \text{ソフトPL成分} + \text{ハードPL成分} + \text{反射\&Fe-K}\alpha\text{成分} \\ = \text{Faint branch}$$

☆ ソフトPL成分が消えてもハードPL成分は残る上、スペクトルの形も違う  
共に二次的な成分ではない (反射, 部分吸収, ...) → 両方ともコロナの成分

☆ 暗い時間帯にはコロナ成分は単一だが、明るい時間帯には複数生じる  
→ 定常的に存在するコロナと、現れたり消えたりするコロナの2種類

# 14. 議論 ~BH周囲の2種類のX線生成領域~

☆ CCP折れ曲がり境界にエンジンが状態遷移  
恒星質量BHの降着状態に相当か

## ○ ハードな一次X線

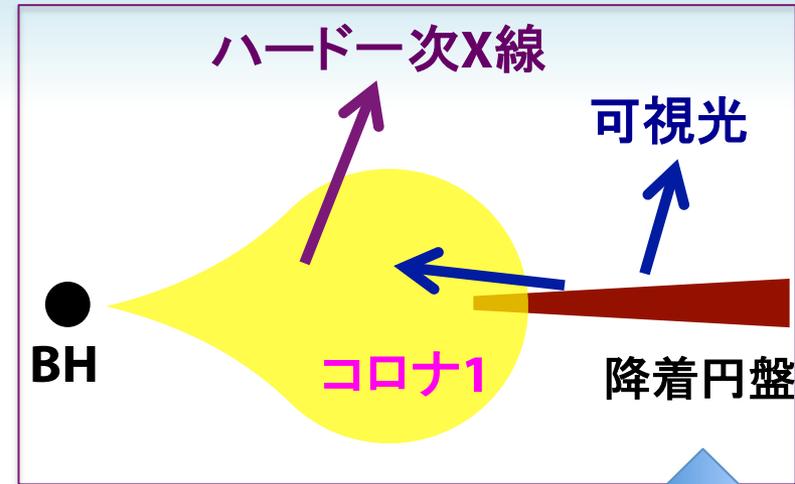
- ・ 質量降着率が小さい時に卓越
- ・ 数週間 ( $\sim 1000 R_g/c$ ) で時間変動
- ・ ハードなスペクトル ( $\Gamma \sim 1.7$ )

円盤内縁に形成されたコロナのコンプトン?

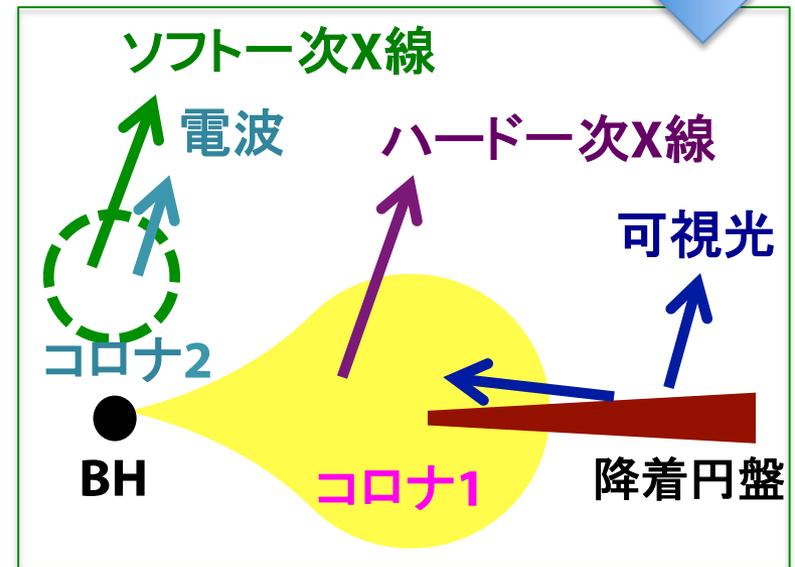
## ○ ソフトな一次X線

- ・ 質量降着率が大きい時に出現
- ・ 数時間 ( $\sim 25 R_g/c$ ) で時間変動
- ・ ソフトなスペクトル ( $\Gamma \sim 2.3$ )

BHの近傍に形成されたコンパクトジェット?



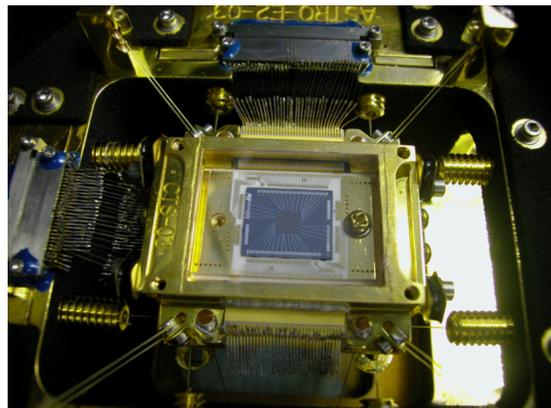
初めてこの状態遷移を提案



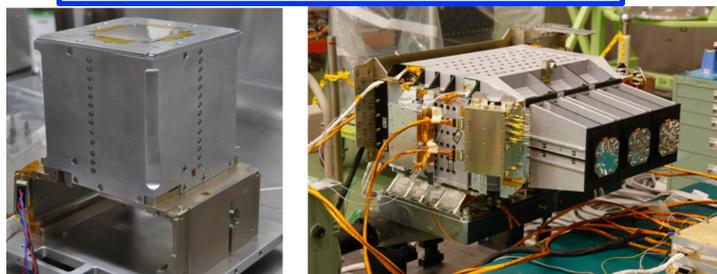
→ 今後はX線と可視光(円盤黒体)および電波(ジェット放射)の同時モニタが鍵

# 15. 次期X線天文衛星ASTRO-H (写真はTakahashi+14より)

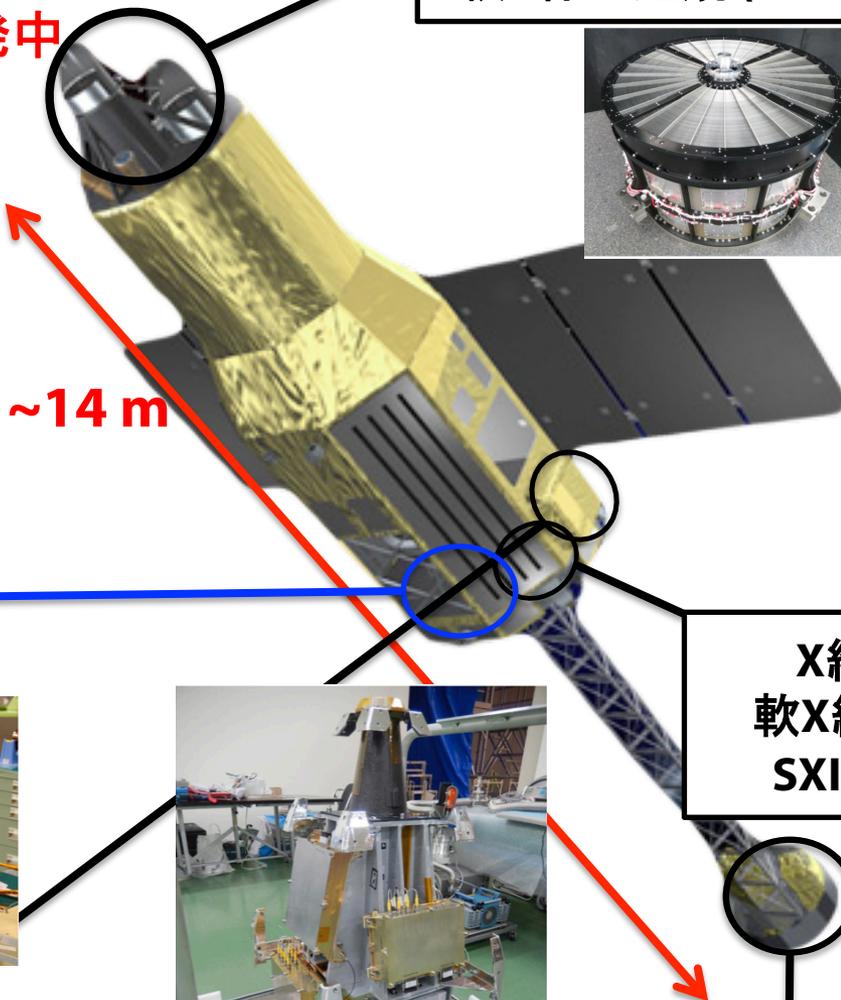
- ☆ 0.3–12 keVで精密分光 ( $\Delta E \sim 7$  eV)
- ☆ 0.3–600 keVの広帯域高感度
- ☆ 今年度の打ち上げに向け開発中



X線マイクロカロリメータ  
軟X線分光検出器  
SXS : 0.3-12 keV

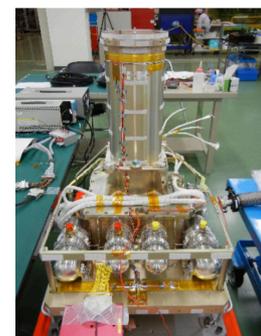


コンプトンカメラ  
軟ガンマ線検出器  
(SGD) :  $\sim 50$ -600 keV

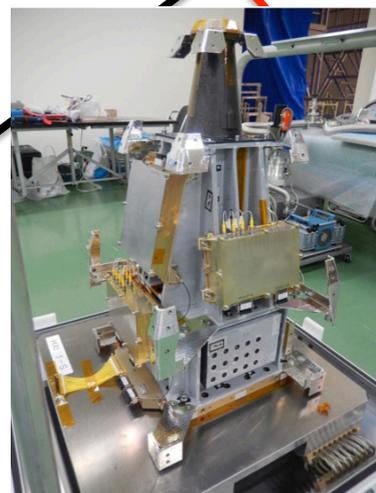


$\sim 14$  m

軟X線望遠鏡 (SXT)  
軟X線望遠鏡 (HXT)



X線CCDカメラ  
軟X線撮像検出器  
SXI : 0.4-12 keV



硬X線撮像検出  
HXI : 5-80 keV



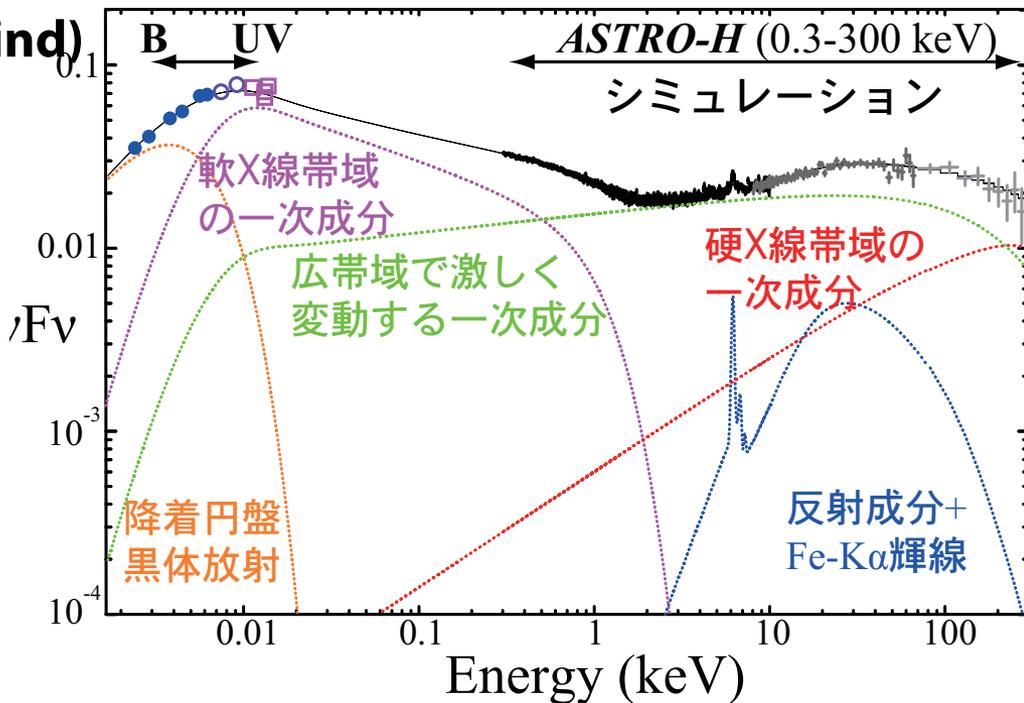
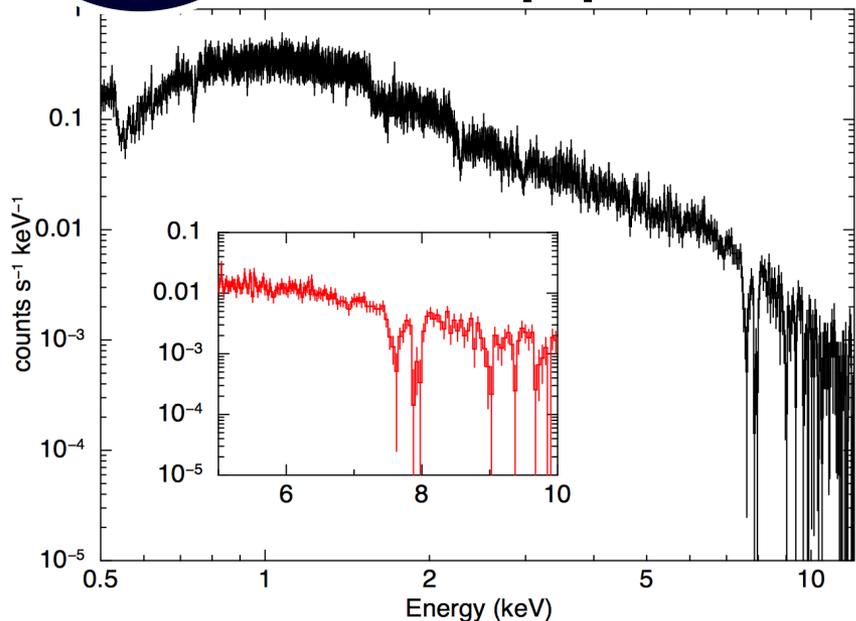
# 16. ASTRO-H を用いた研究

Markarian 509

PDS 456 SXS 100 ks sim.

可視光+SXI+HXI+SGD 100 ksec sim.

(A-H white paper; AGN wind)



- ☆ AGN wind 吸収線から質量損失率
- ☆ 相対論的に広がった鉄輝線の抽出

- ☆ 降着円盤の黒体放射から質量降着率
- ☆ X線の全コロナ成分から輻射への変換率
- ☆ 広帯域の連続成分の正確なスペクトル

- 巨大ブラックホール周辺の質量収支(エンジンの効率)を決める
- 吸収構造と連続成分を正確かつ同時に決めて、BHスピンの迫る

# 17. Summary

- ☆ 活動銀河核は、巨大ブラックホールが支配するエンジンが、降着する物質の重力エネルギーを効率よく輻射に変換することで輝く。
- ☆ 活動銀河核からのX線スペクトル成分は、それぞれ異なるタイムスケールで時間変動するため、それを利用して成分分解するC3PO法を開発。
- ☆ NGC 3227の「すぎく」データに適用したところ、複数の異なるコロナから生じる成分を発見。定常的に存在するものと、明るい時のみ現れるものが存在。エンジンの新たな描像としてプレスリリース。
- ☆ 今年度、次期X線天文衛星ASTRO-Hが打ち上げ予定。X線の精密分光と広帯域の同時観測により、巨大ブラックホール周辺の質量収支や、相対論的に広がった鉄輝線の抽出に期待。