

X線天体観測における輝線・吸収線の 統計的評価方法と「すざく」への適用

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻

宇宙物理実験研究室

宮崎直人

研究の目的

天体からのX線スペクトル…熱放射，コンプトン散乱等の連続スペクトル
+ 特定の波長の輝線・吸収線等のライン構造

ラインの情報は元素組成，電離度，反射構造等を探る重要な手がかり．

検定方法

1. モデルフィット，最小カイ二乗法，F検定 X線天文学で一般的な手法

- 目測でラインのモデルを組み込む必要がある．
- フィッティングの際にモデル全体のカイ二乗の最小値を探すため，局所的なラインのモデルは統計的に不利．

2. 最適化フィルターを用いたモンテカルロ (MC) シミュレーション

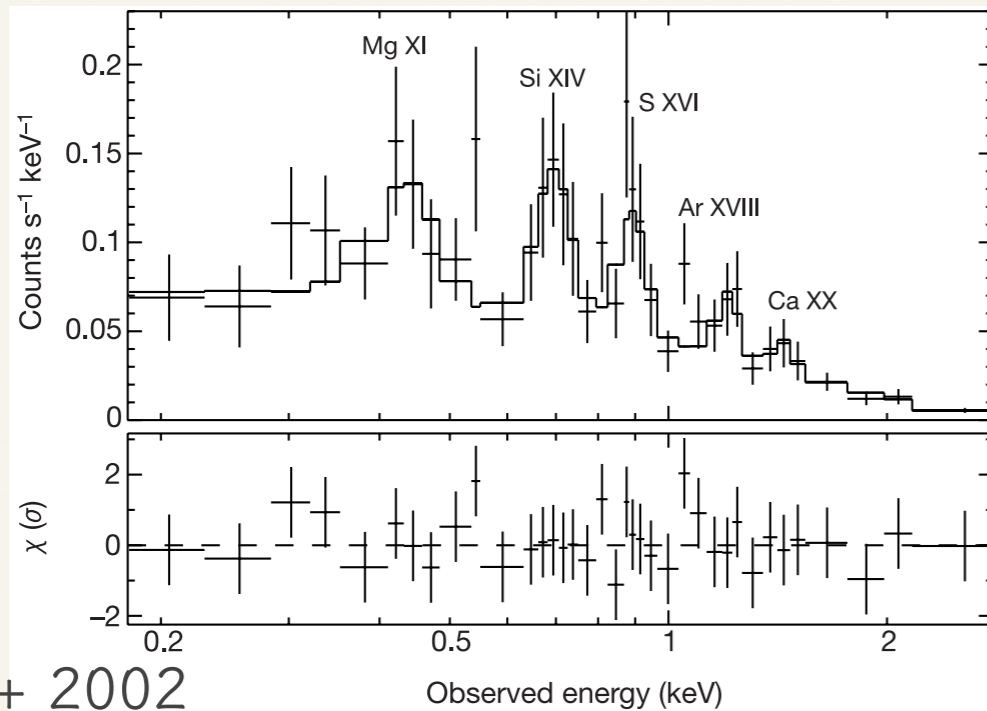
- モデルに連続成分しか使わないためモデル依存が少ない．
- 複数のラインを同時に判定できる．
- 未知のラインに対して有効．

2の方法で未知の輝線・吸収線は無バイアスに探査

先行研究

■ GRB 011211 の残光X線の輝線探査

最小カイ二乗法 & F検定

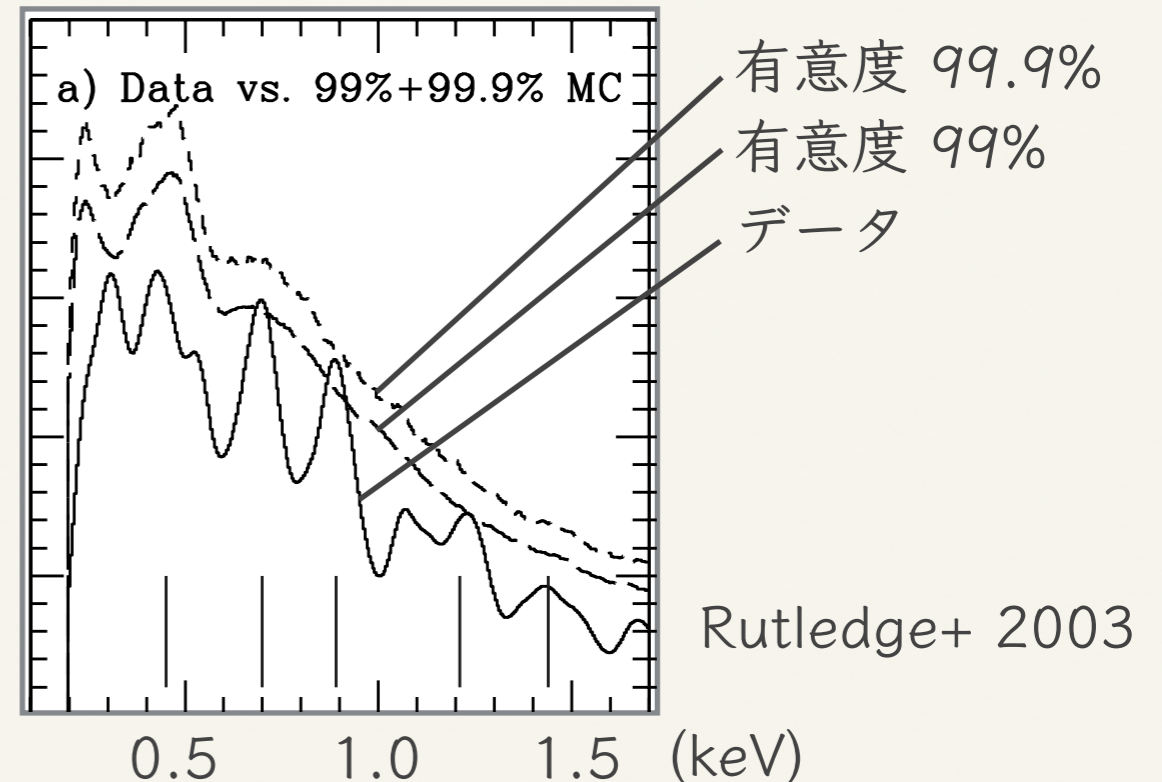


Reeves+ 2002

5本の有意な輝線を検出.
5本の輝線を加えたモデルの有意度は
F検定で99.7%.

輝線の存在を仮定せずに探査 & 観測における統計ゆらぎを考慮するため
厳しい判定基準.

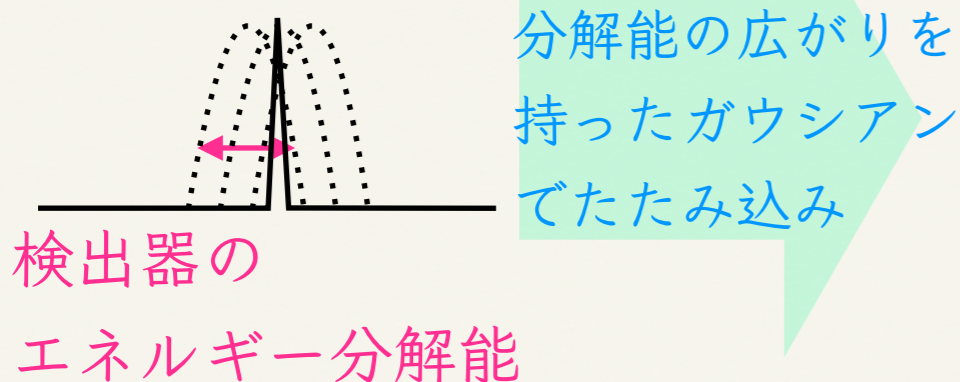
最適化フィルター + MCシミュレーション



輝線の存在を仮定せずに探査.
有意度99%を超えている構造は
2/5.

手法

■ 最適化フィルター



信号のS/N比を
最適化

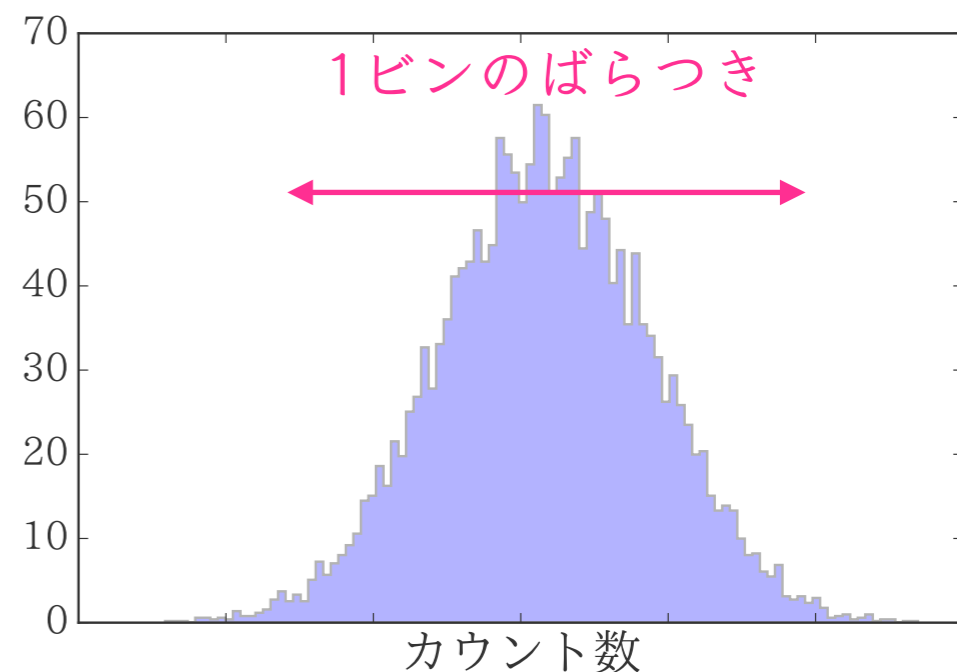
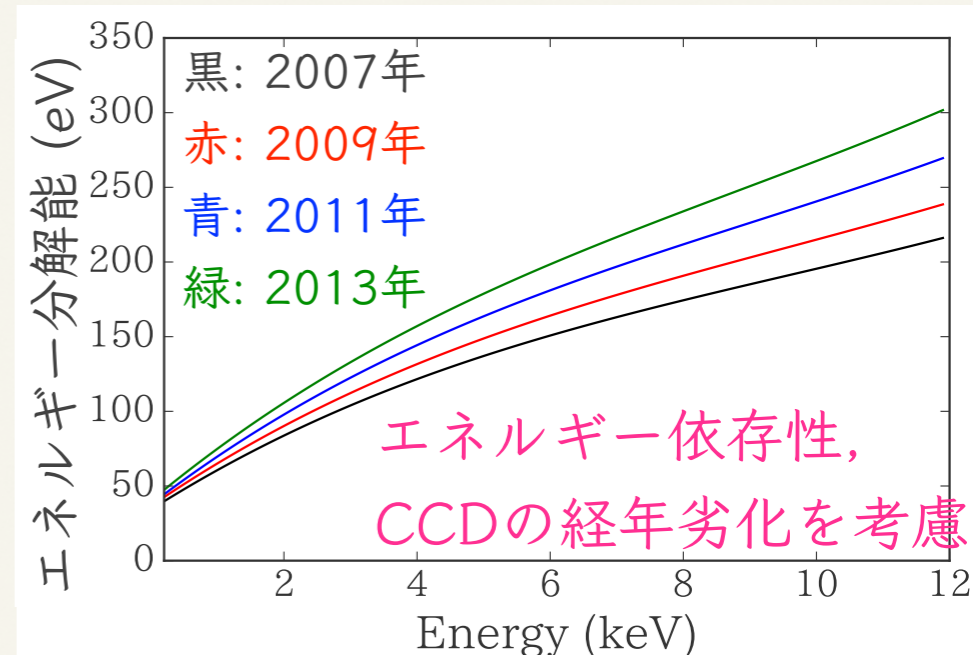
この操作を各ビンに
対して行う

▶ エネルギー軸に適用することで輝線・吸収線を最適化.

■ モンテカルロシミュレーション

1. 連続スペクトルを仮定して10000回乱数を振って生成.
2. 最適化フィルターをかける.
3. 各データビンのカウント数の分布ができる.
4. 分布の両端からラインの有意度を判定.

XISのエネルギー分解能



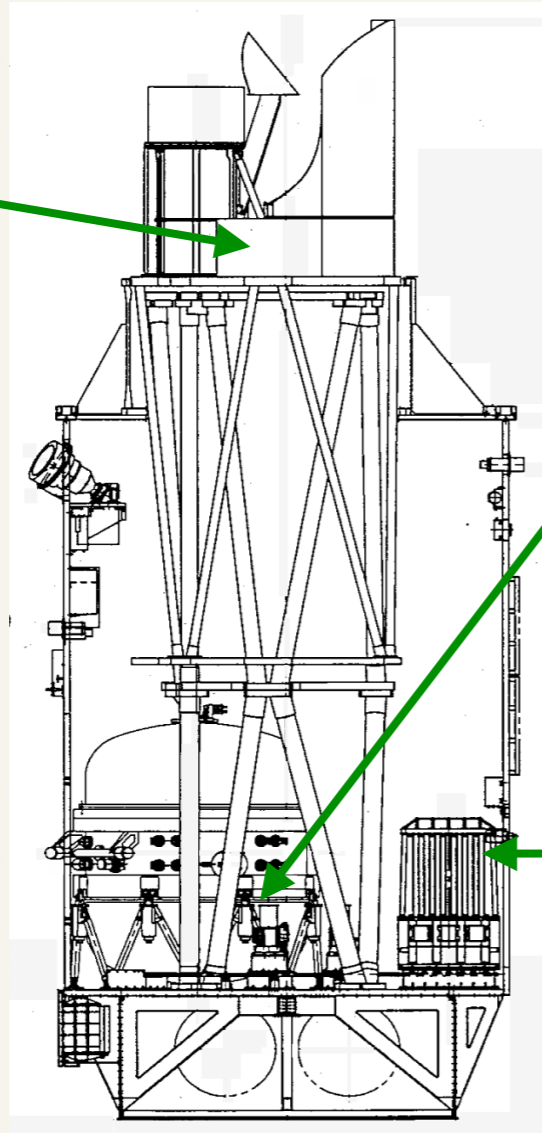
X線天文衛星「すざく」

- 日本の第5番目のX線天文衛星
- 検出器

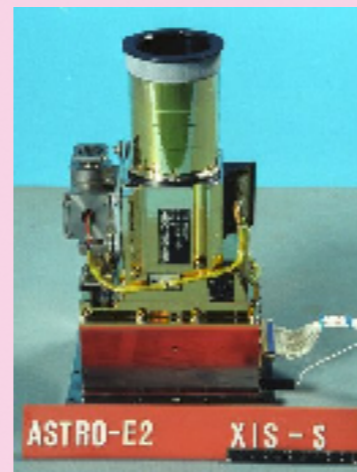
X線CCDカメラXIS: 0.5-10 keV

硬X線検出器HXD: 10-600 keV

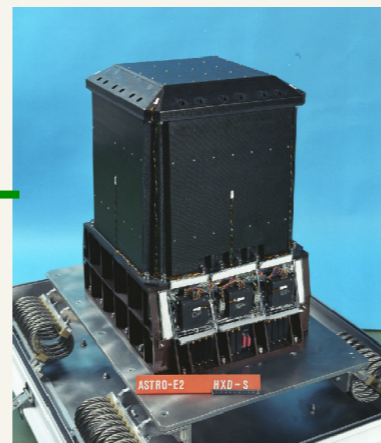
X線望遠鏡XRT



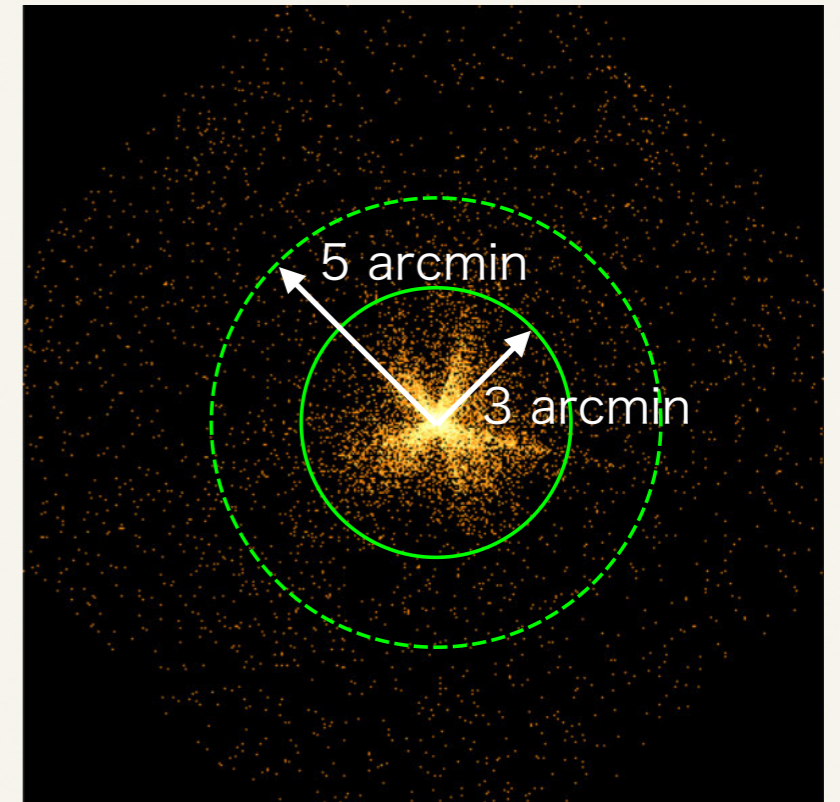
XIS



HXD



XISが撮像したイメージ

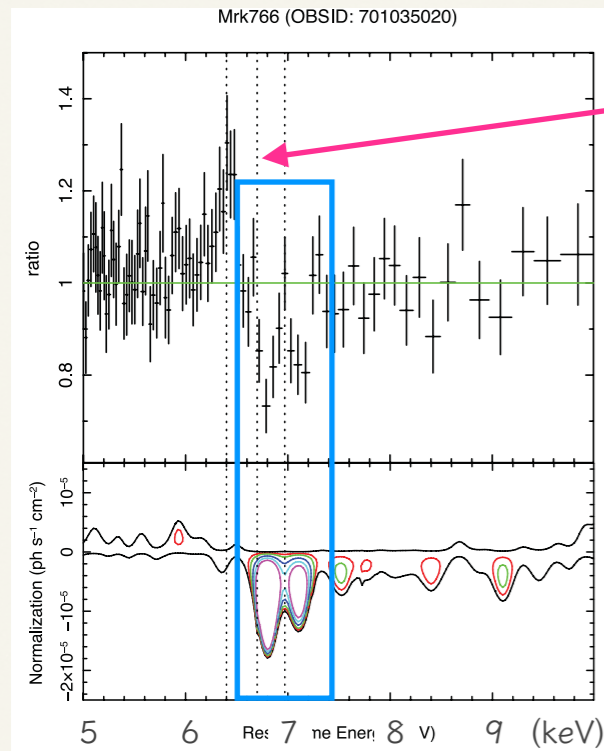


本研究ではXISを使用.

手法の検証～AGNのアウトフローの検出～

■ 先行研究

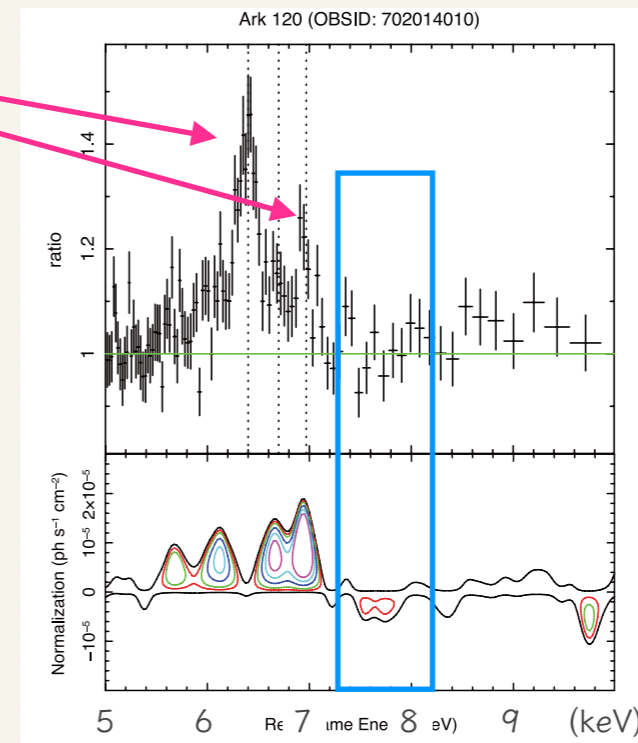
Gofford+ 2013



Mrk 766

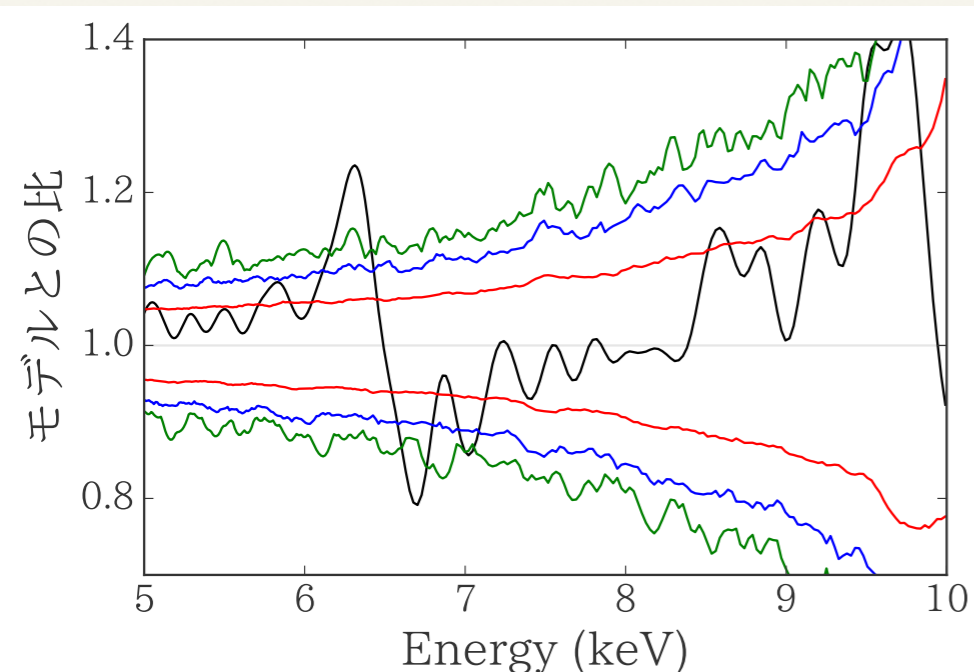
He-like, H-like Fe
の吸収線をF検定で
99.99%以上の有意
度で検出.

Fe輝線



Ark 120

有意な吸収は
検出されず.

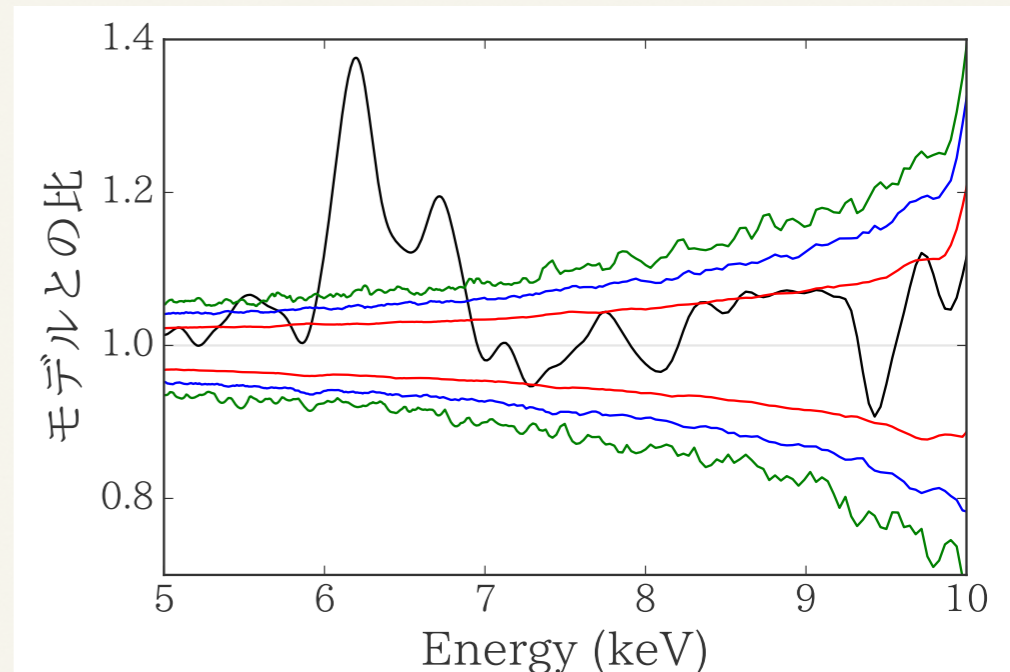


黒: 最適化フィルターを
かけたスペクトル

赤: 2 σ の有意度領域

青: 3 σ の有意度領域

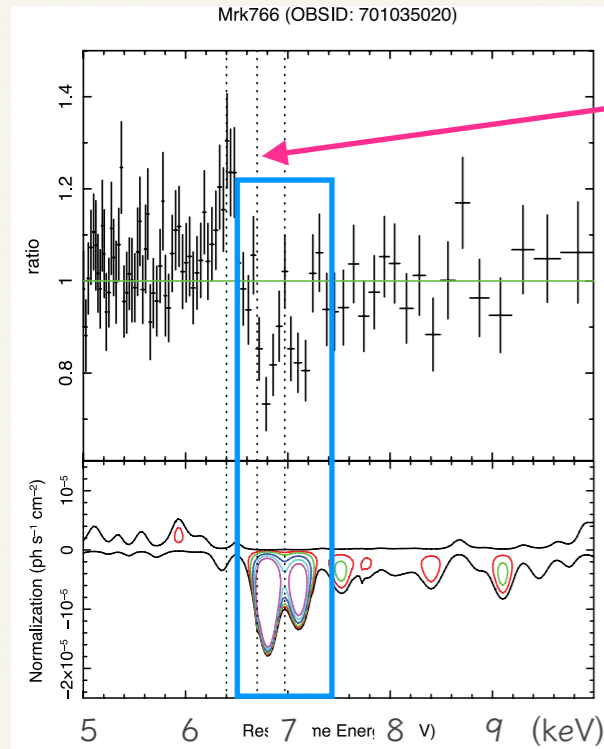
緑: 4 σ の有意度領域



手法の検証～AGNのアウトフローの検出～

■ 先行研究

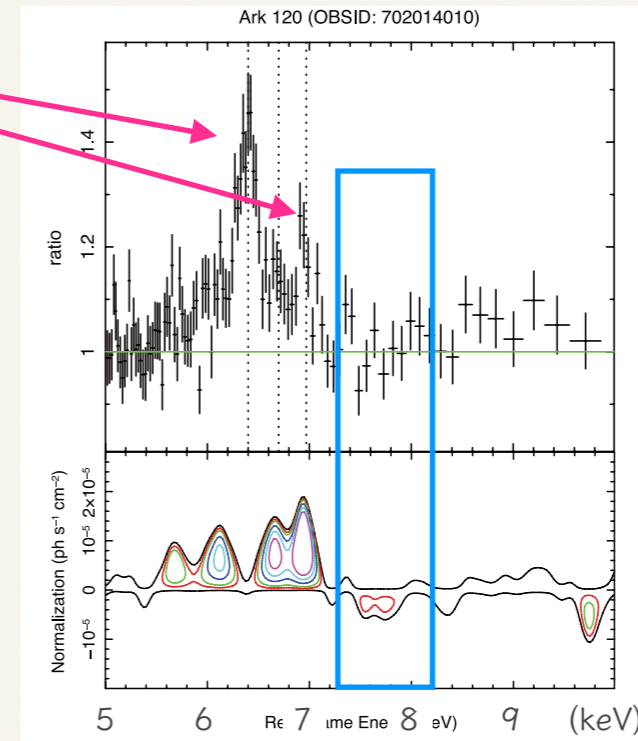
Gofford+ 2013



Mrk 766

He-like, H-like Fe
の吸収線をF検定で
99.99%以上の有意
度で検出.

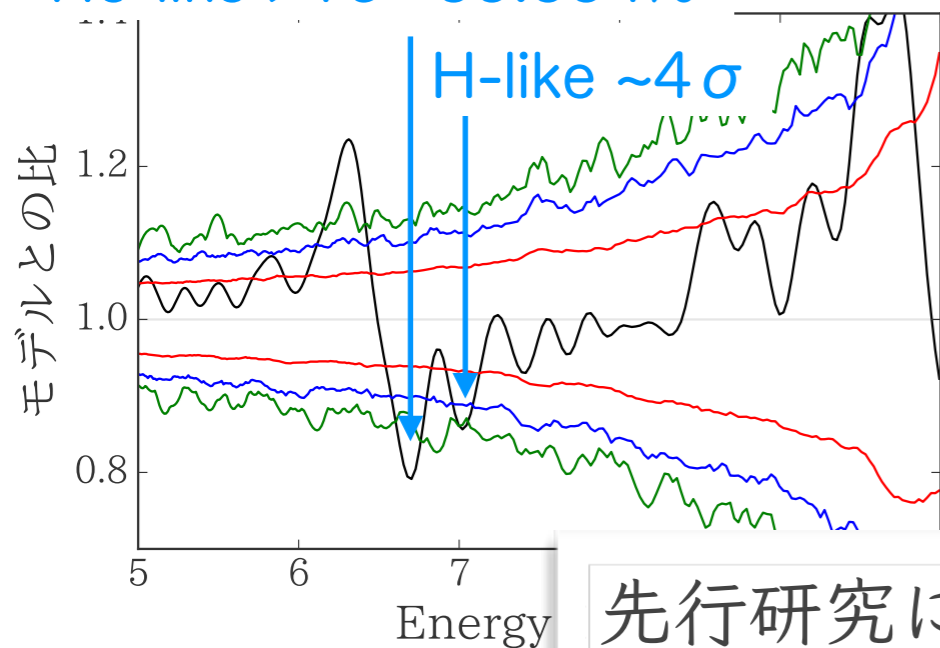
Fe輝線



Ark 120

有意な吸収は
検出されず.

He-like $>4\sigma = 99.994\%$



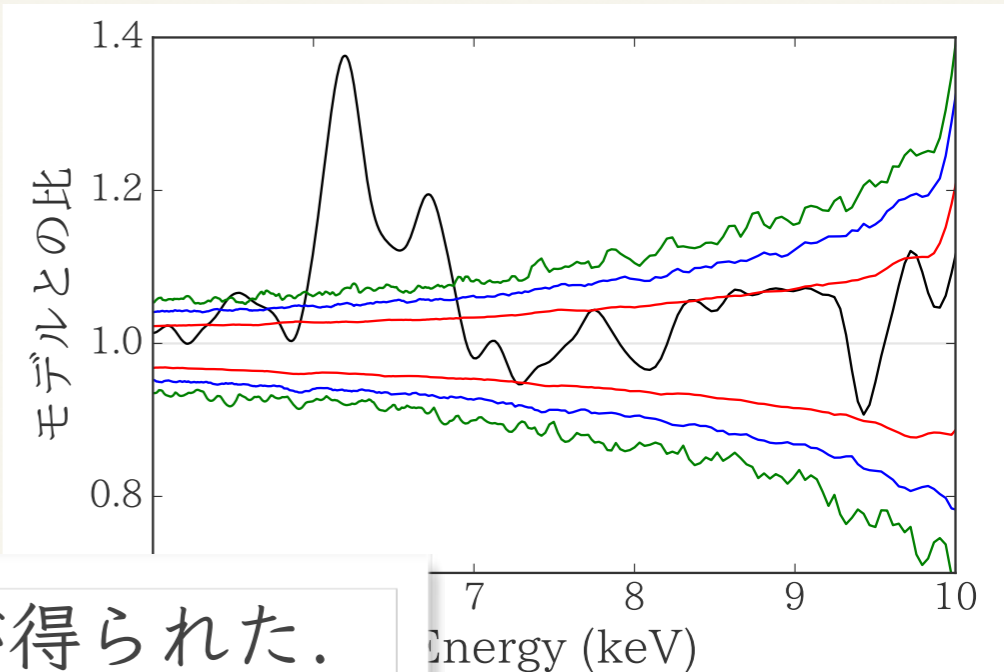
黒: 最適化フィルターを
かけたスペクトル

赤: 2σ の有意度領域

青: 3σ の有意度領域

緑: 4σ の有意度領域

先行研究に矛盾しない結果が得られた.



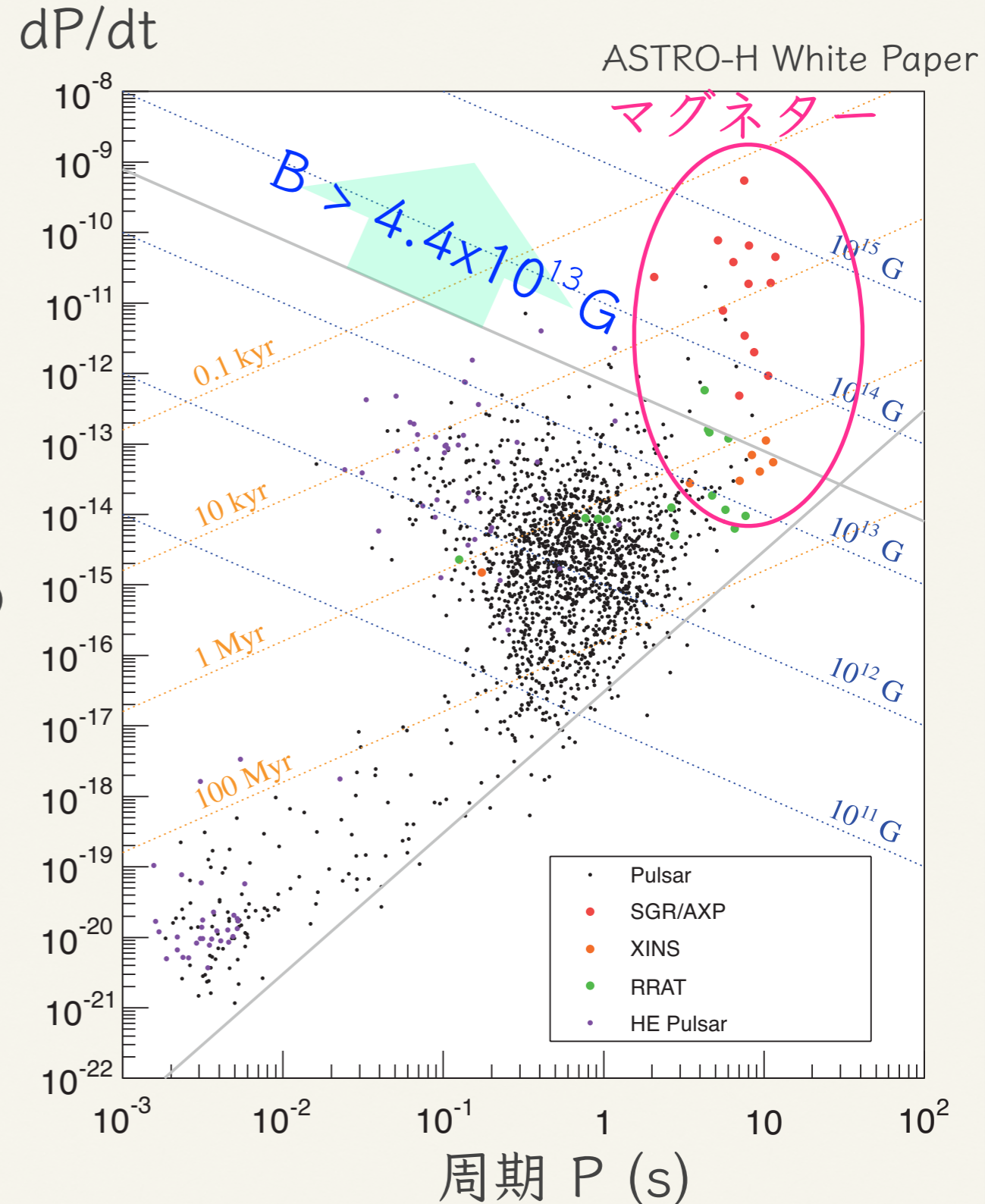
マグネター

■ マグネター

- 中性子星の一種 ($R \sim 10$ km, $M \sim M_{\text{太陽}}$)
- $P \sim 2\text{--}12$ s, dP/dt 大
- 磁気エネルギーを放射源とする
- 比較的若い (< 10 万年)
- 磁場 $B = 10^{13\text{--}15}$ G = $10^{9\text{--}11}$ T
- $B > 4.4 \times 10^{13}$ G (臨界磁場) より, QED の高次の摂動を無視できなくなる.

✧ 例: 光子の分裂

$$\gamma \rightarrow \gamma + \gamma$$



サイクロトロン共鳴線

磁場中の荷電粒子の角振動数 $\omega_c = \frac{qB}{m}$

電子, 陽子のランダウ準位の間隔

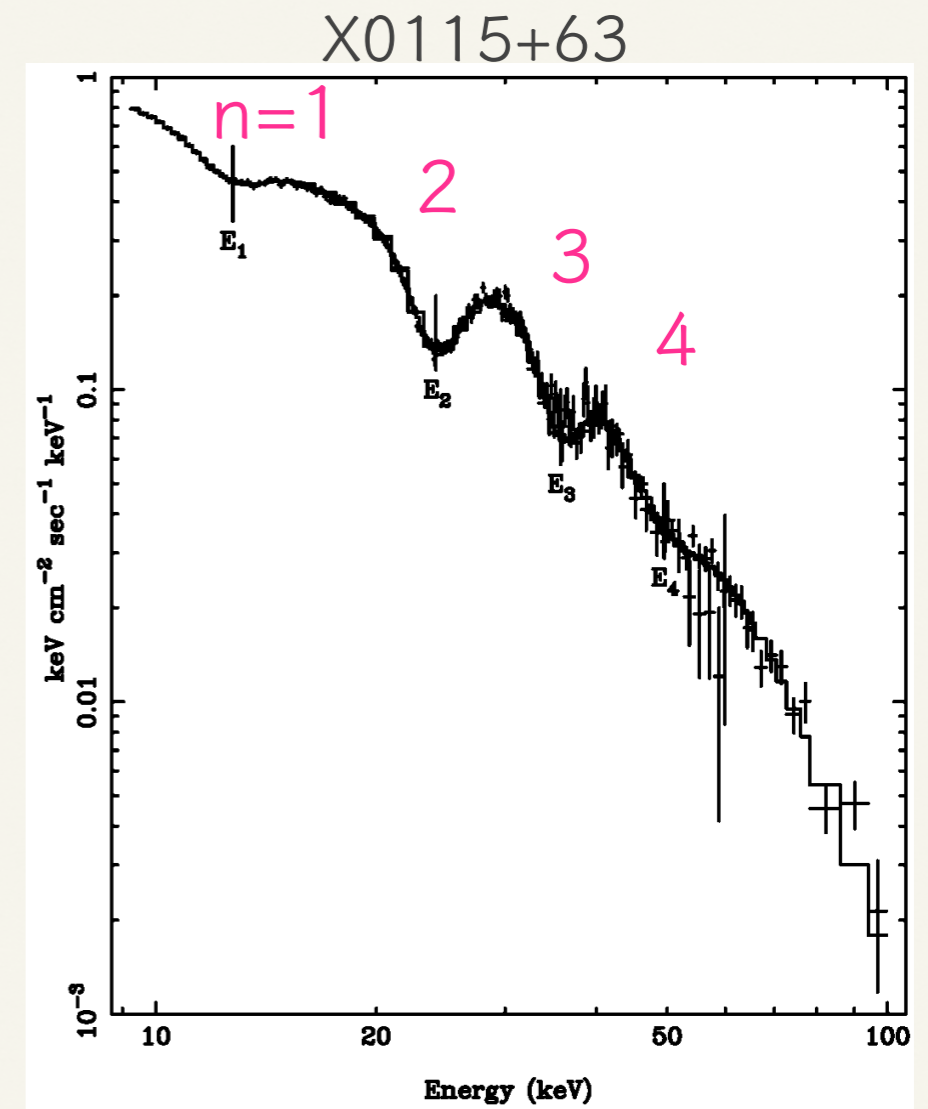
$$E_n = 11.6n \left(\frac{B}{10^{12} \text{ G}} \right) \text{ keV} \quad (\text{電子})$$

$$E_n = 0.63n \left(\frac{B}{10^{14} \text{ G}} \right) \text{ keV} \quad (\text{陽子})$$

星の表面磁場を測定できる重要な手がかり.
連星を成す中性子星($B \sim 10^{12} \text{ G}$)の17天体で観測.
 $n=2, 3, \dots$ の高調波成分が現れる場合もある.

パルス(自転)位相に依存, 広がった吸収線.

マグネター($B \sim 10^{14} \text{ G}$)では, ~ 2000 倍重い陽子のサイクロトロン共鳴がX線領域で起こることが予想されるが, 確かな報告例は少ない.

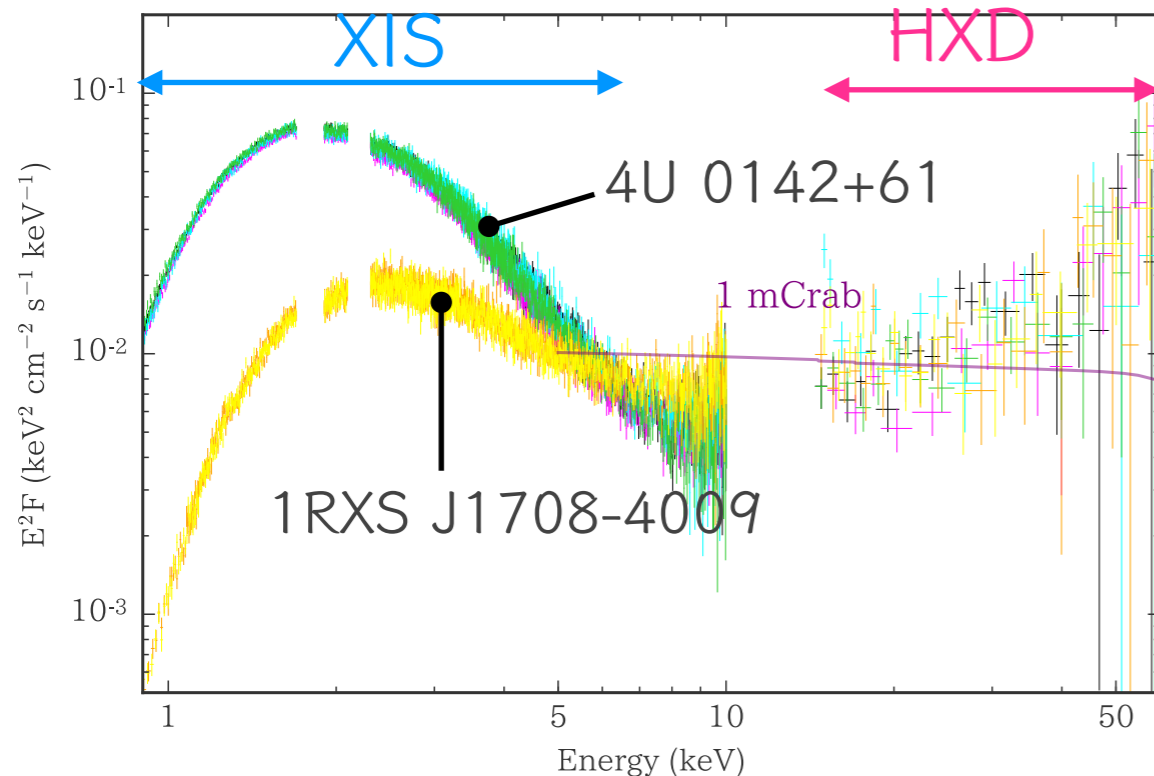


Santangelo+ 1999

「すざく」による観測

天体名	双極子磁場 (G)	観測開始	観測時間 (ks)	カウントレート (c/s)	
4U 0142+61	1.3×10^{14}	2007-08-13 04:04:13	99.6	7.789 ± 0.010	4回
		2009-08-12 01:41:15	107.3	7.342 ± 0.009	
		2011-09-07 15:43:32	38.5	8.451 ± 0.015	
		2013-07-31 10:05:39	101.1	8.107 ± 0.010	
1RXS J1708-4009	4.7×10^{14}	2009-08-23 16:25:08	60.8	1.767 ± 0.006	2回
		2010-09-27 14:41:52	62.7	1.608 ± 0.006	

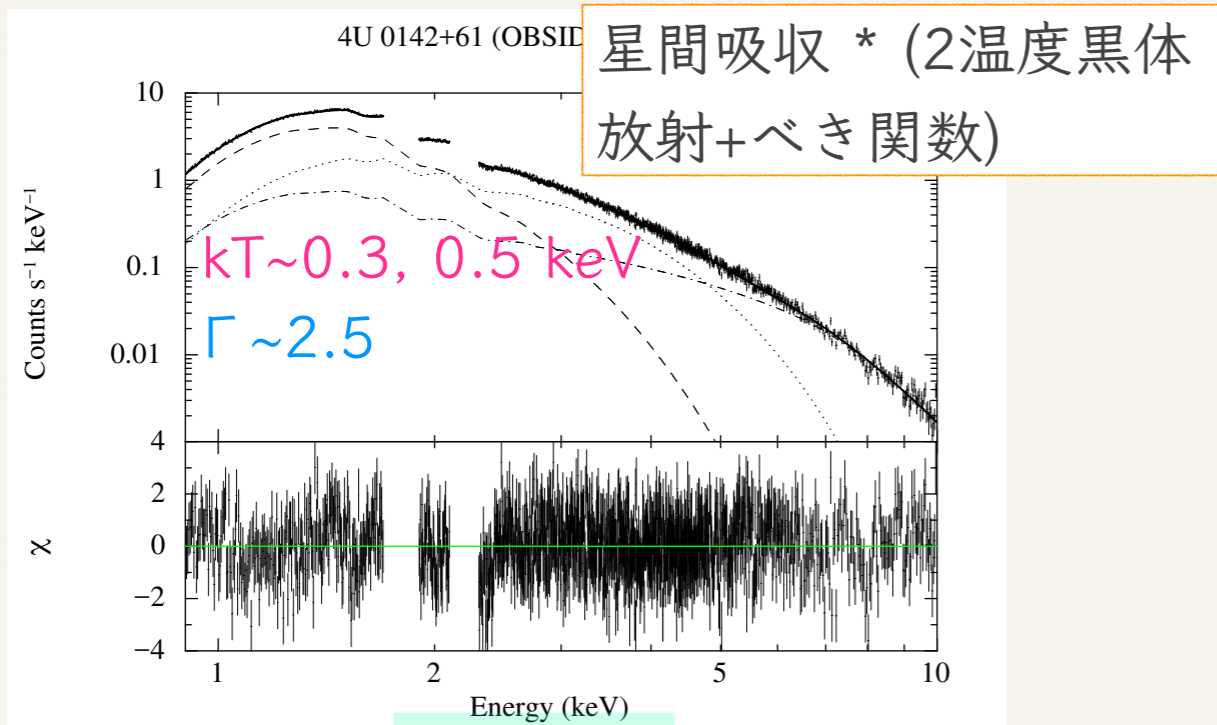
検出器応答のかかっていないスペクトル



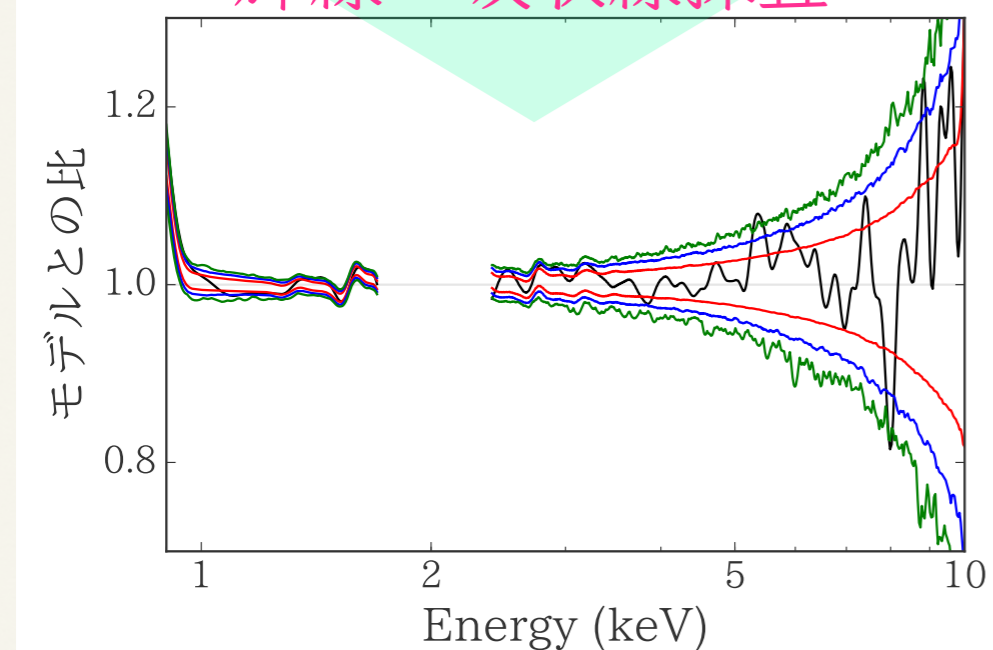
観測間でスペクトルの
変化は見られない。

位相平均スペクトルへの適用

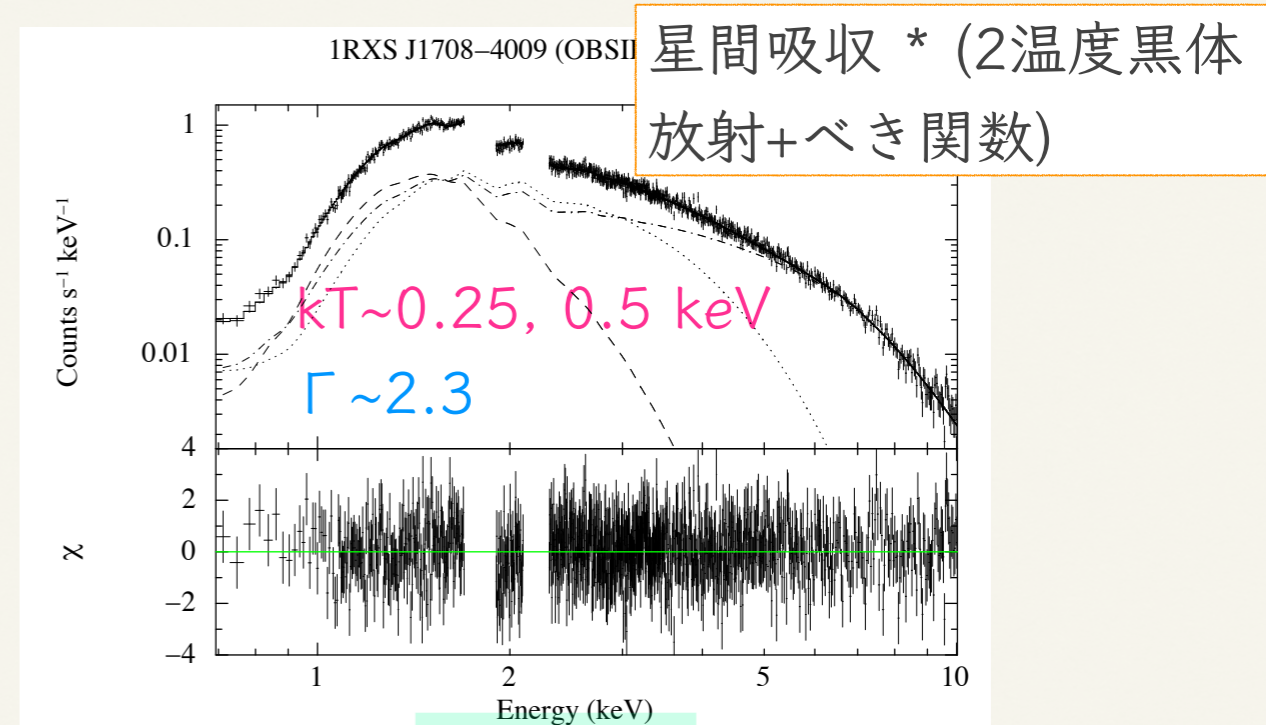
4U 0142+61



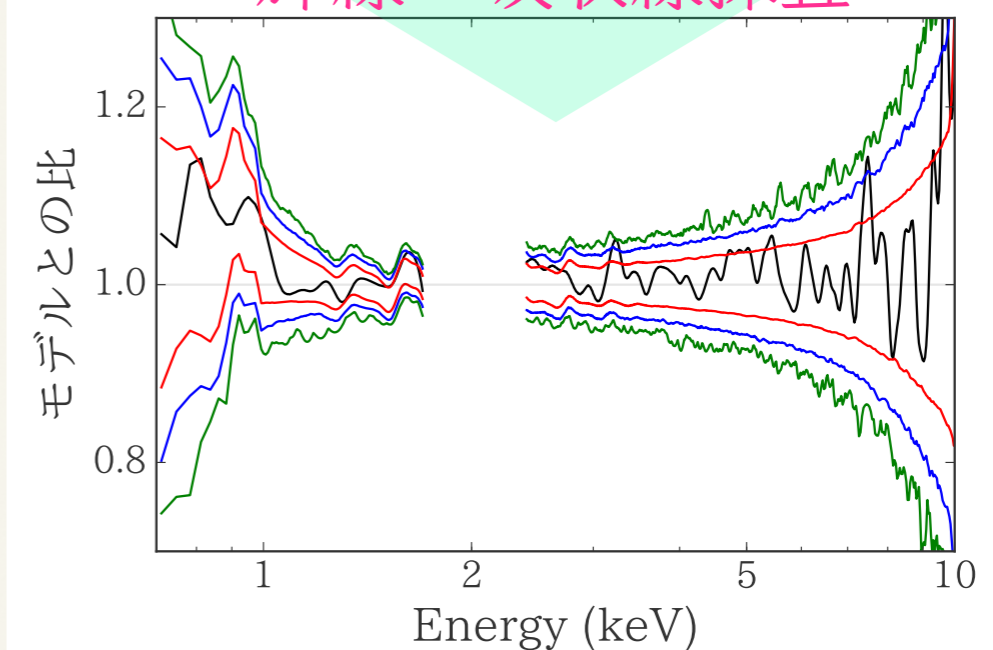
輝線・吸収線探查



1RXS J1708-4009

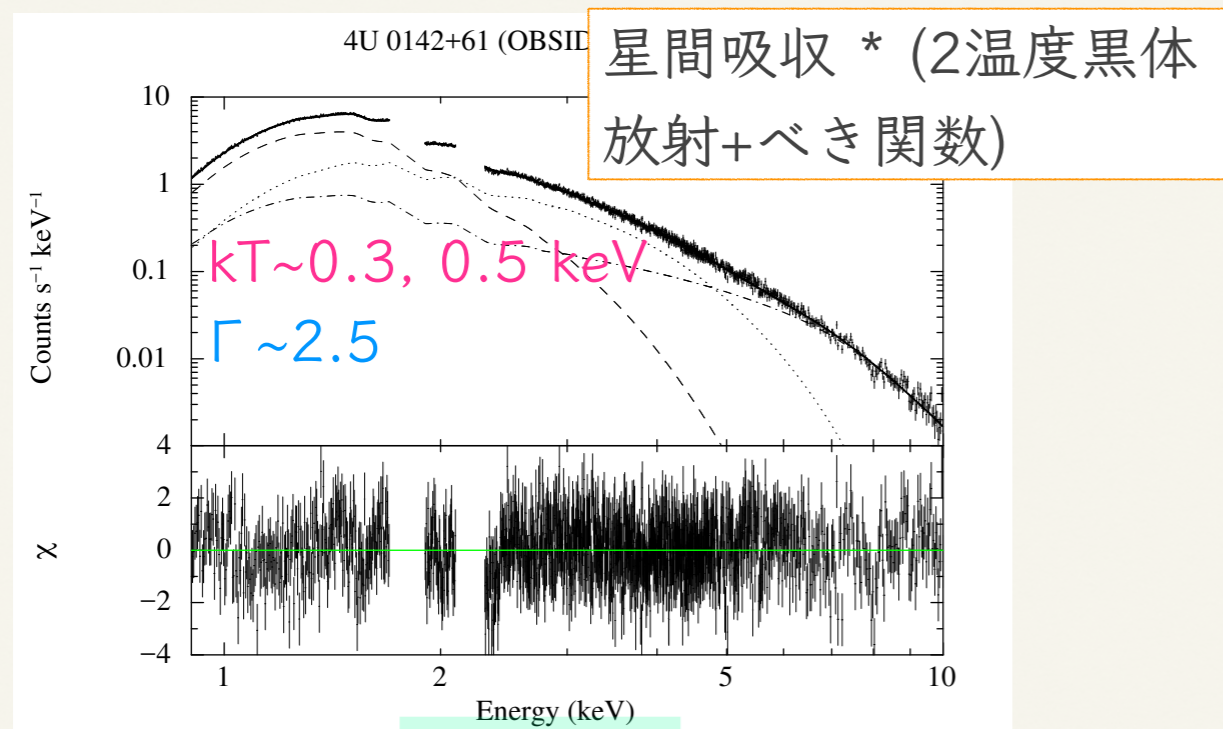


輝線・吸収線探查

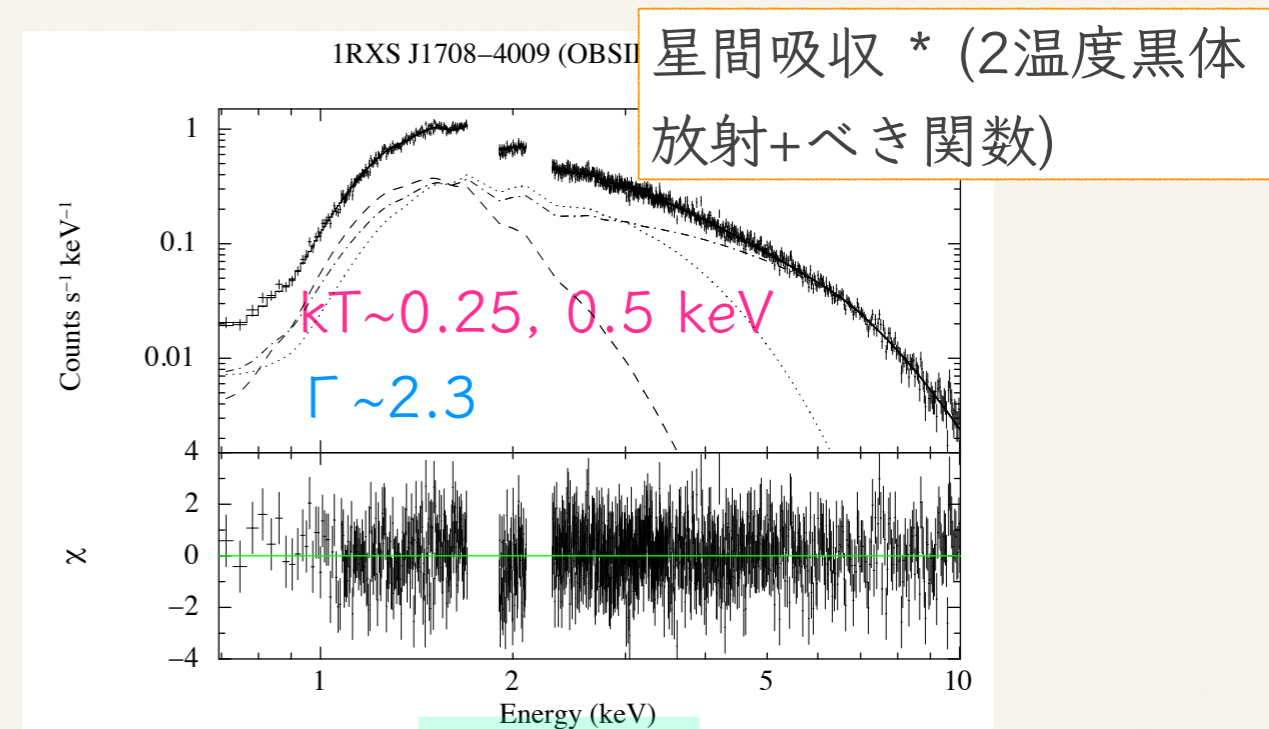


位相平均スペクトルへの適用

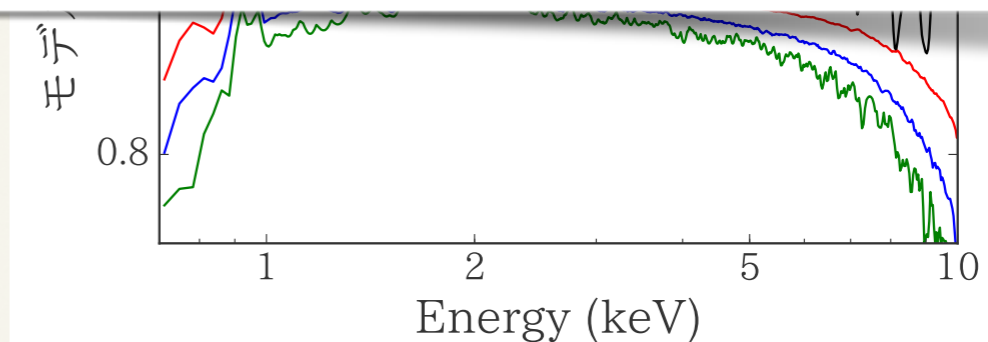
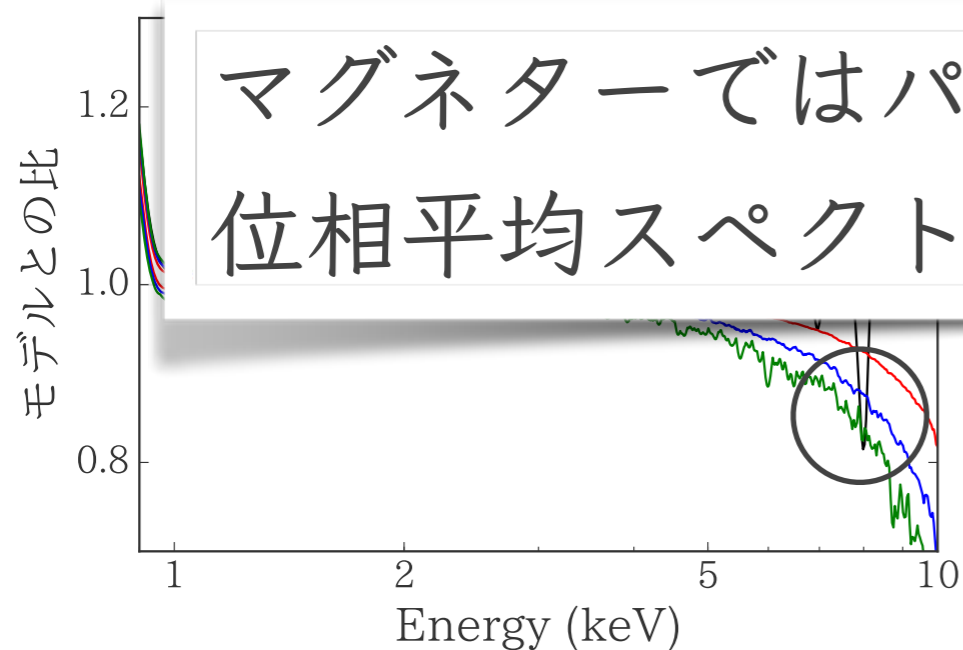
■ 4U 0142+61



■ 1RXS J1708-4009



マグネターではパルス位相による変動もあるため、位相平均スペクトルだけでは判断できない。



位相分けスペクトルへの適用

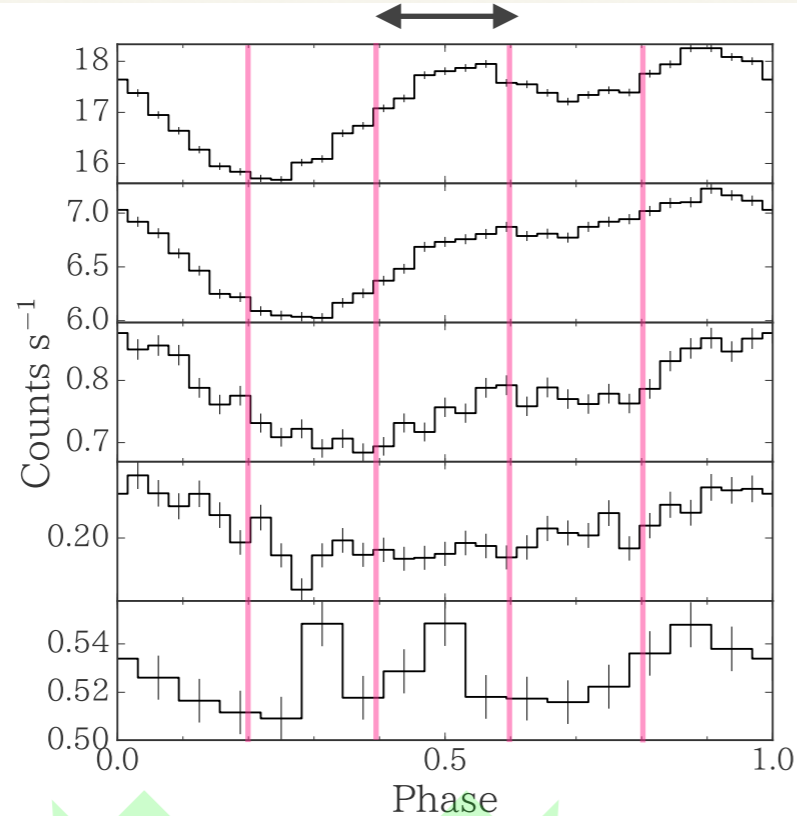
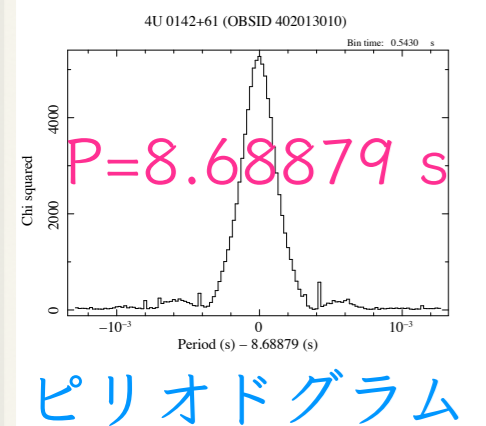
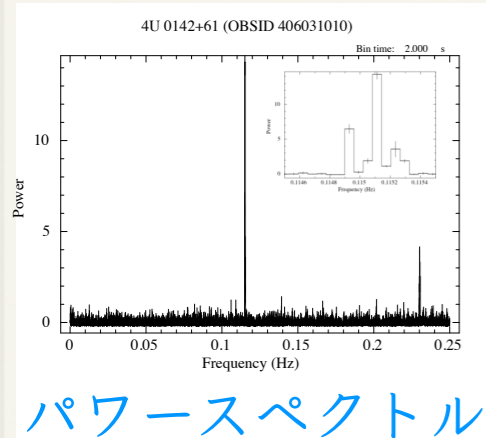
- パルス周期(自転周期)を求め、周期で畳み込んだライトカーブを作成
- 0.2 PHASEごとにイベントを切り出してスペクトルを解析

■ 4U 0142+61

0.2 PHASE

■ 1RXS J1708-4009

P=11.00540 s



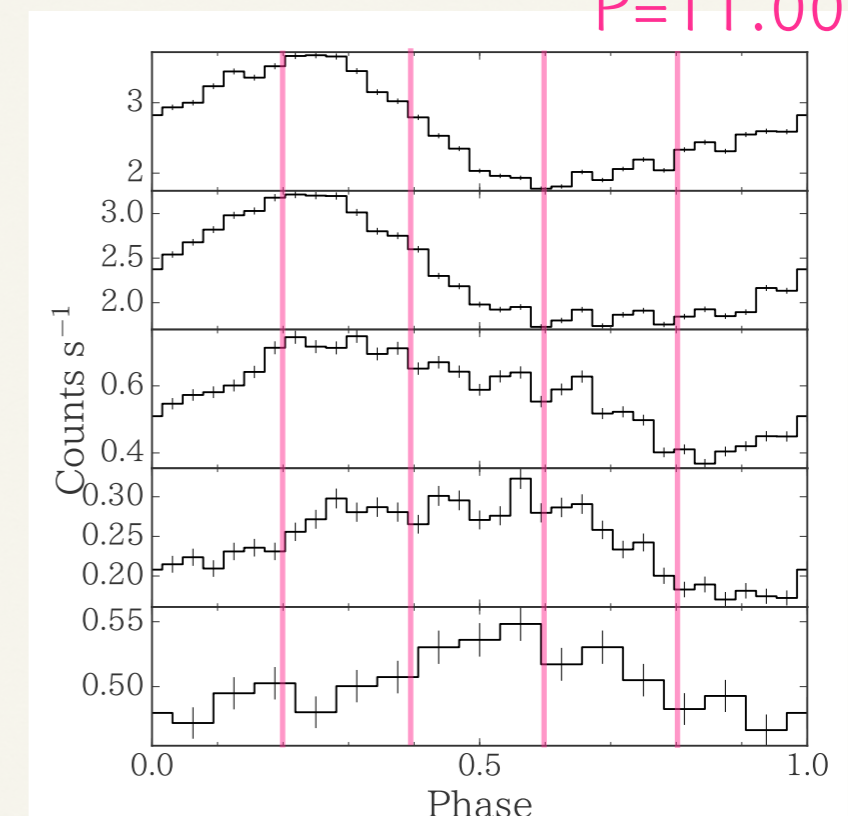
0.5-2 keV

2-4 keV

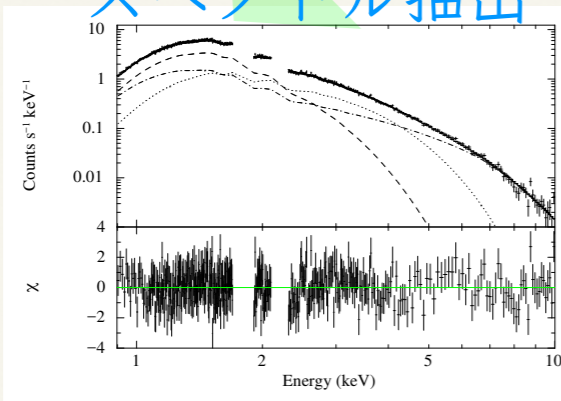
4-6 keV

6-10 keV

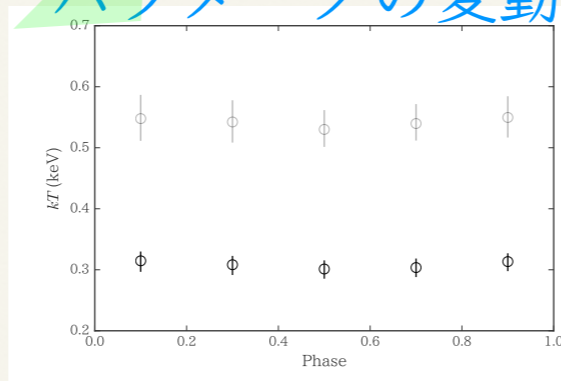
12-60 keV



スペクトル抽出



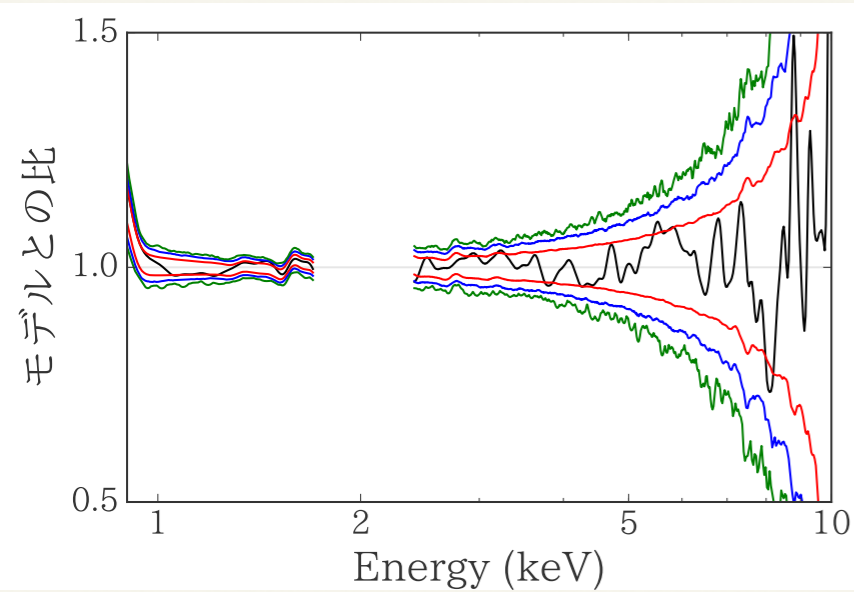
パラメータの変動



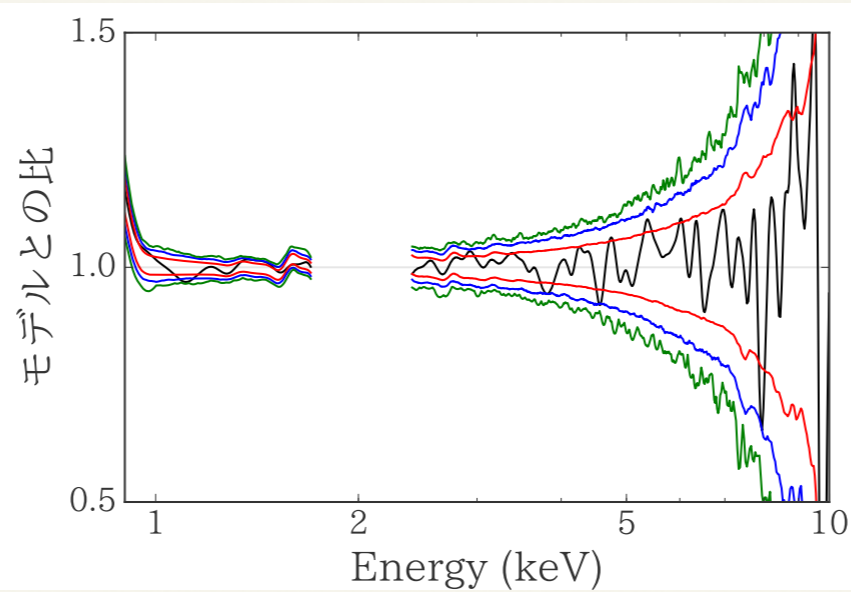
位相分けスペクトルへの適用

■ 4U 0142+61

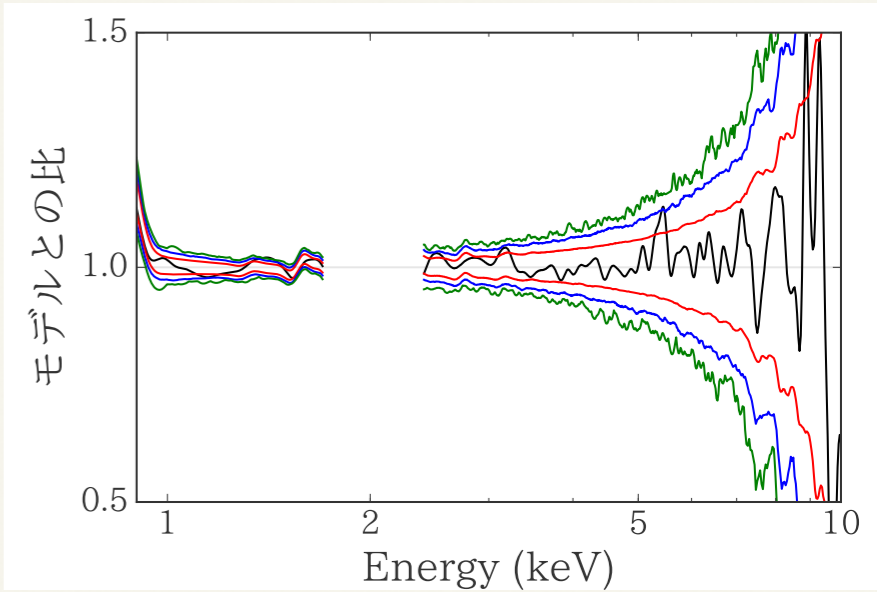
◆ PHASE 0-0.2



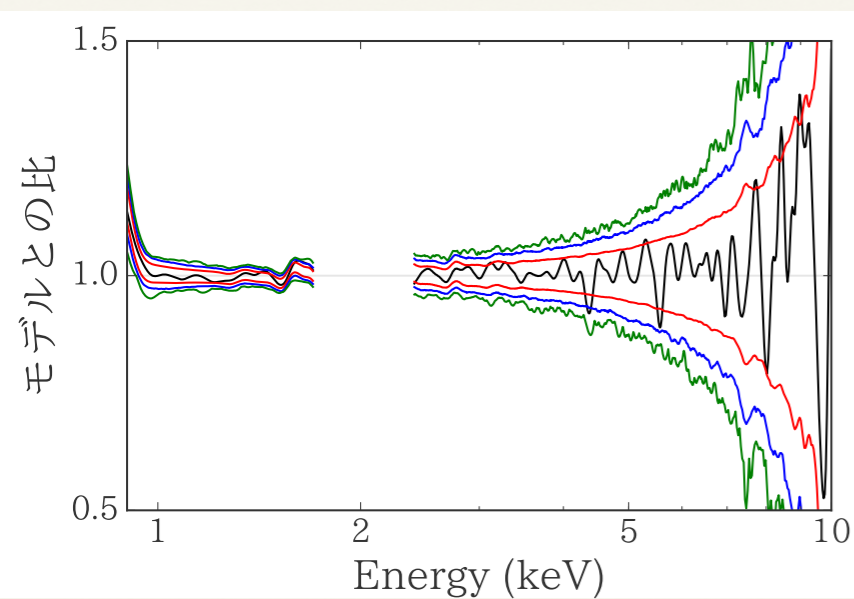
◆ PHASE 0.2-0.4



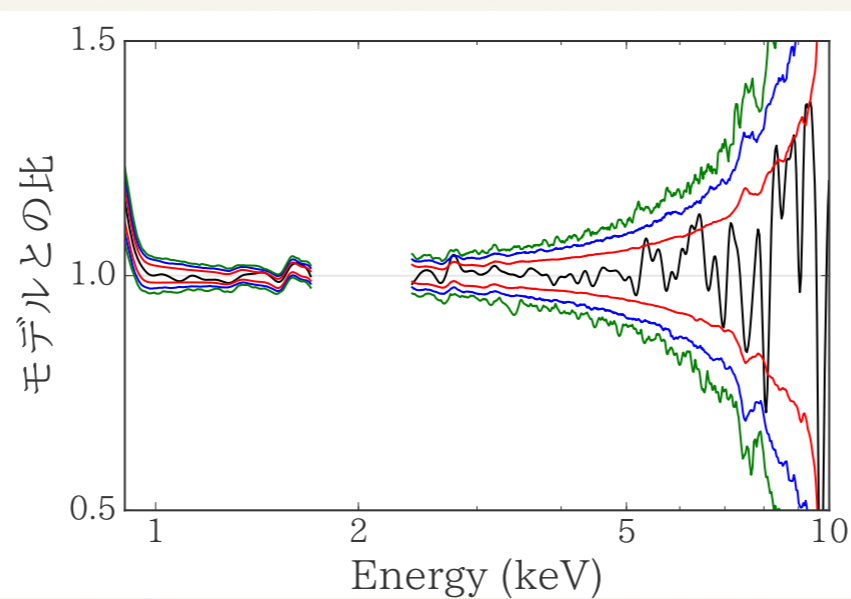
◆ PHASE 0.4-0.6



◆ PHASE 0.6-0.8



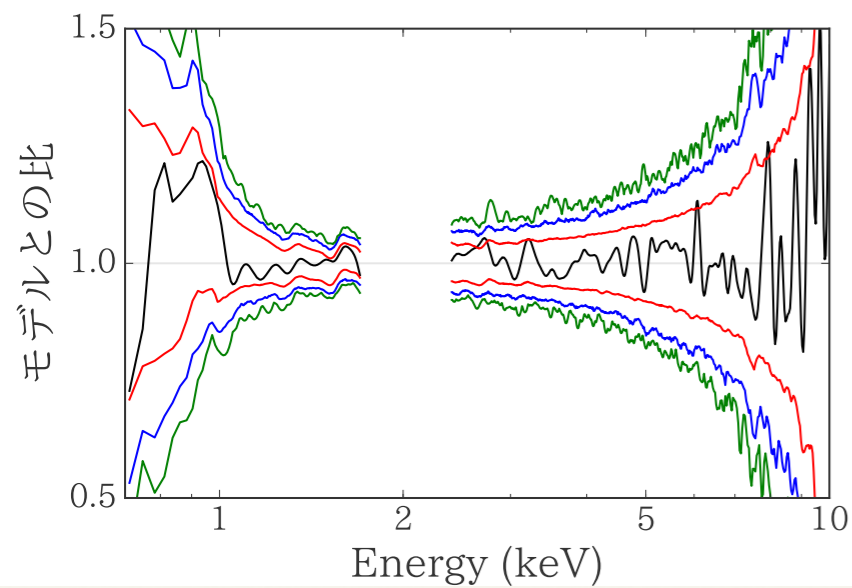
◆ PHASE 0.8-1.0



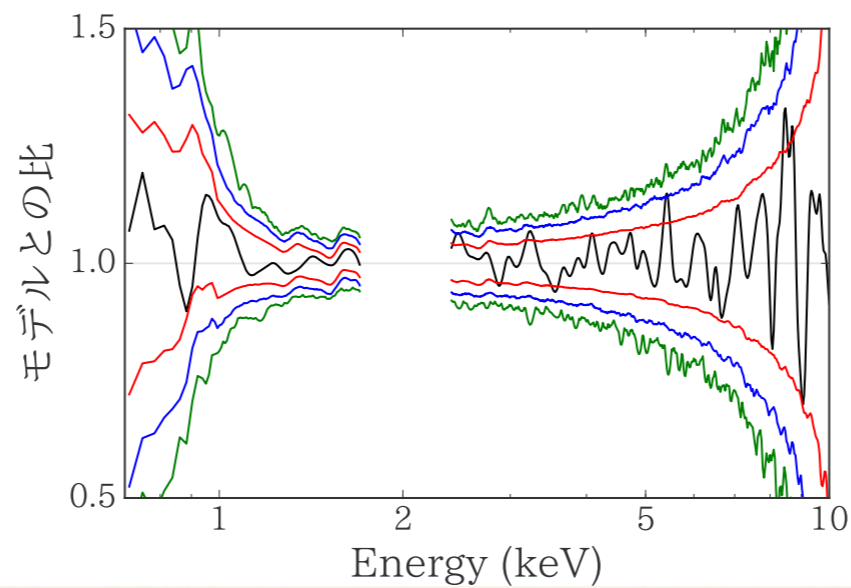
位相分けスペクトルへの適用

■ 1RXS J1708-4009

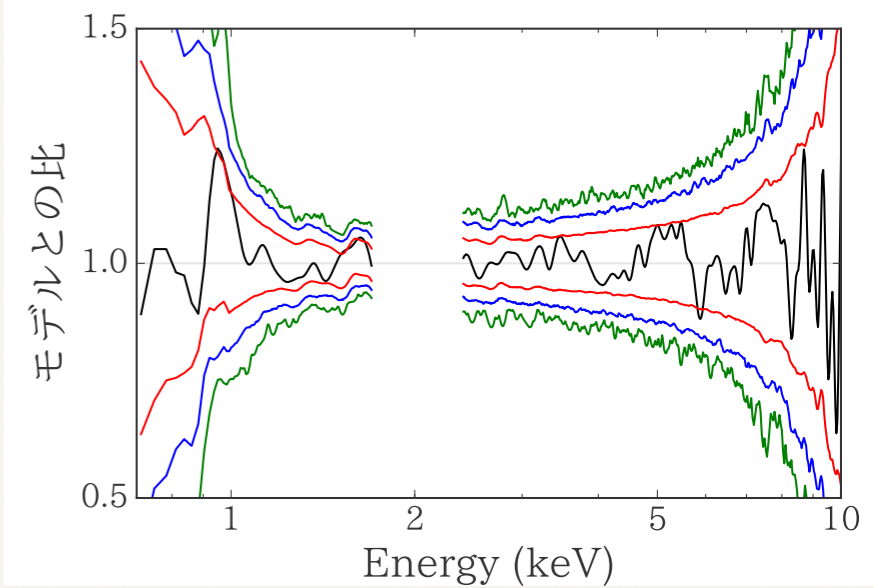
◆ PHASE 0-0.2



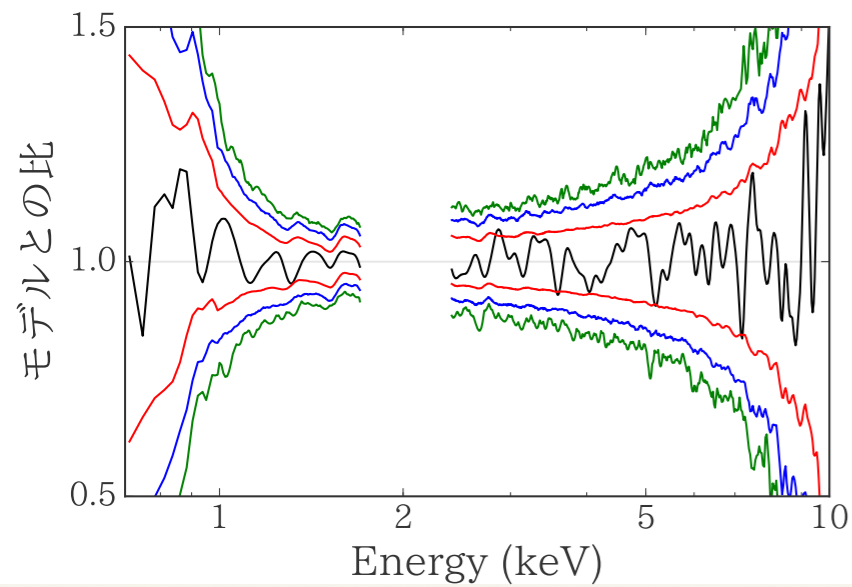
◆ PHASE 0.2-0.4



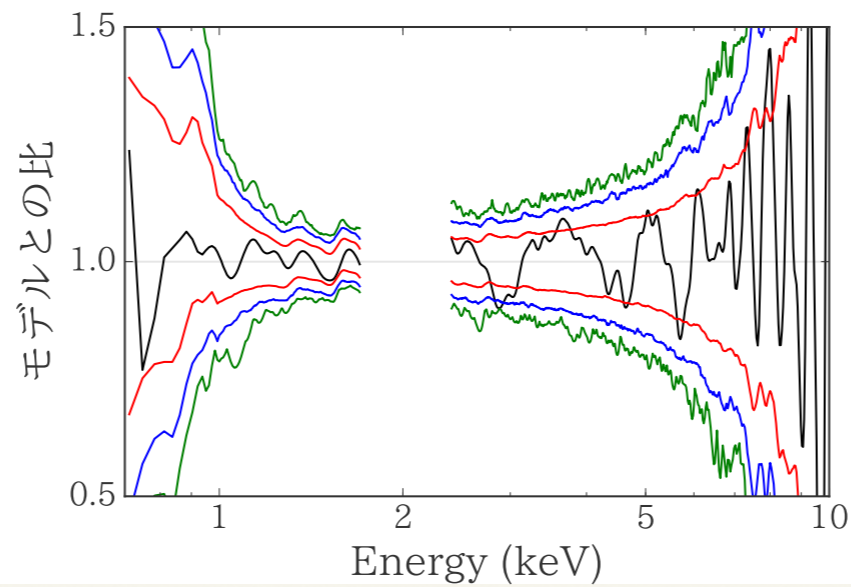
◆ PHASE 0.4-0.6



◆ PHASE 0.6-0.8



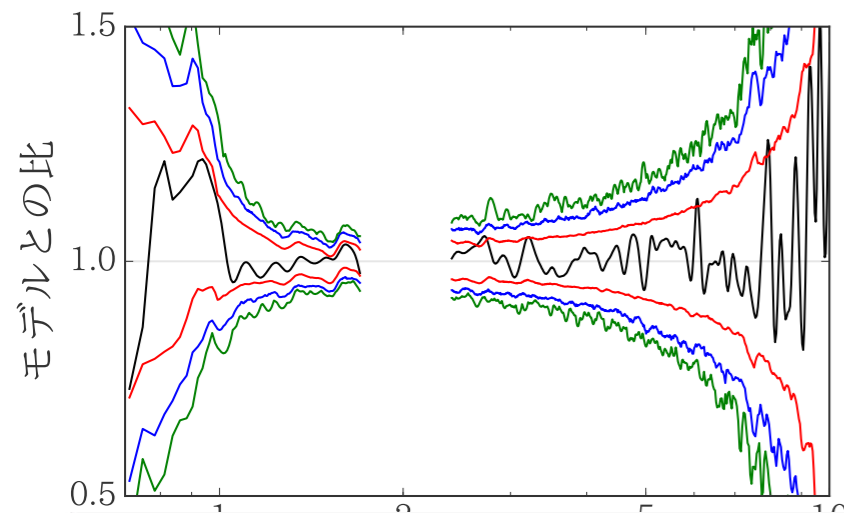
◆ PHASE 0.8-1.0



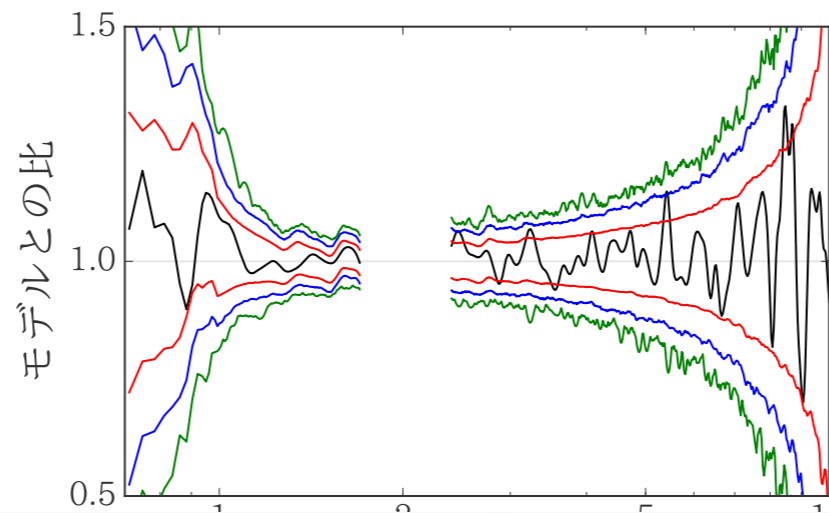
位相分けスペクトルへの適用

■ 1RXS J1708-4009

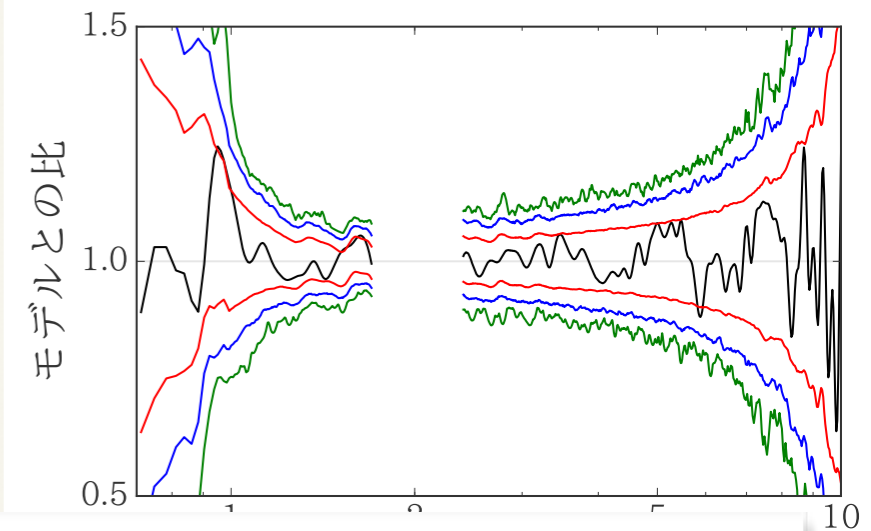
◆ PHASE 0-0.2



◆ PHASE 0.2-0.4

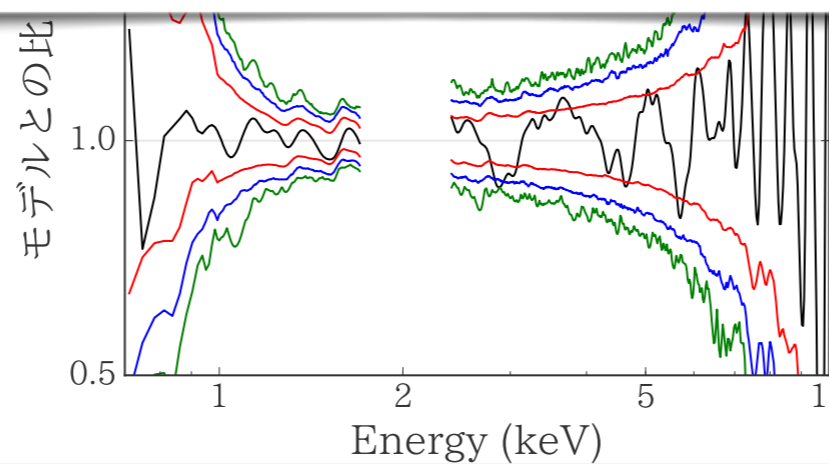
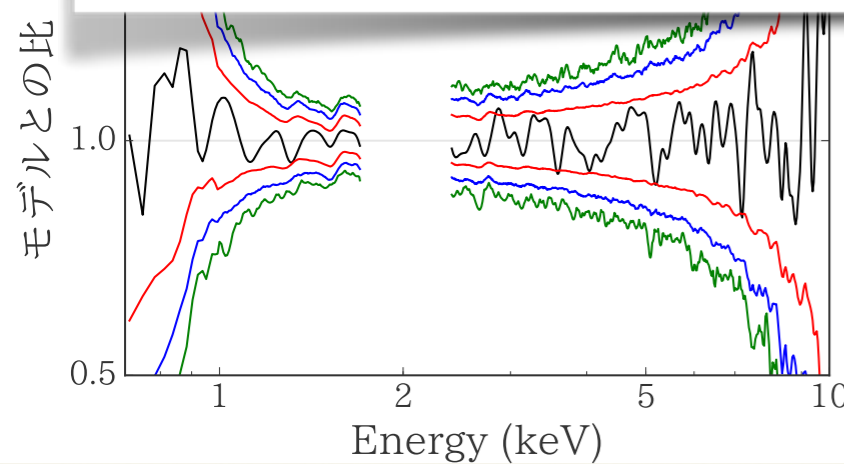


◆ PHASE 0.4-0.6



位相に依存する輝線・吸収線は存在せず.

➡ サイクロトロン吸収線は検出されなかったと判断.

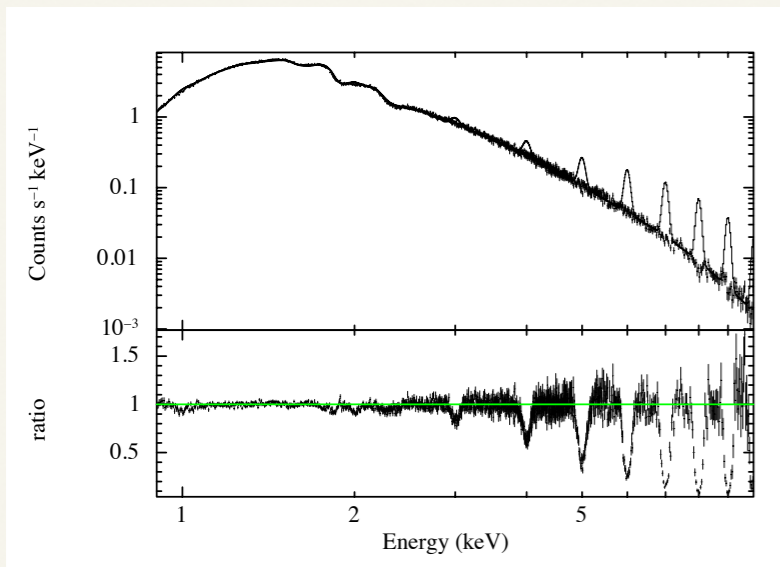


サイクロトロン共鳴線が検出されなかった原因を考察する.

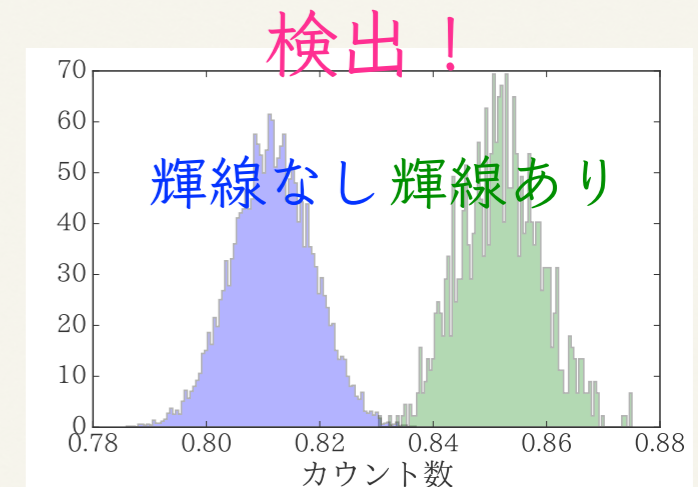
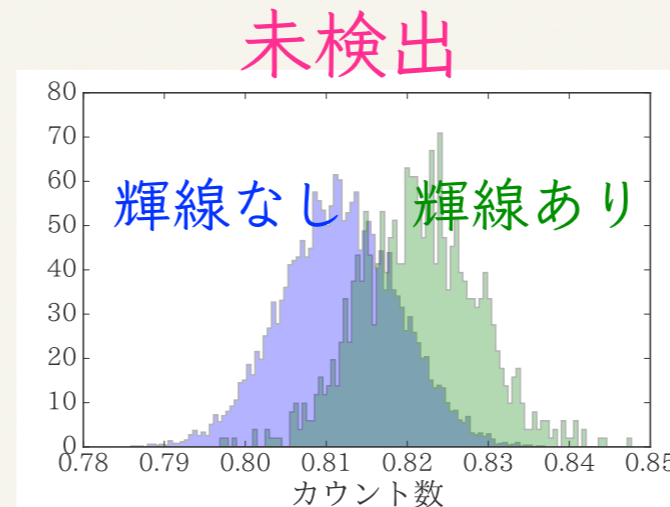
1. 吸収線の強度がXISの検出限界を下回っていた. あるいは, 有意に広がっていた.
2. 吸収線がXISの観測領域 (0.5-10 keV) から外れていた.
3. 物理的な制限がはたらいた.

考察1: 輝線・吸収線の上限值

■方法…連続成分にラインを加えたモデルのモンテカルロシミュレーションを行い，分布を比較する．

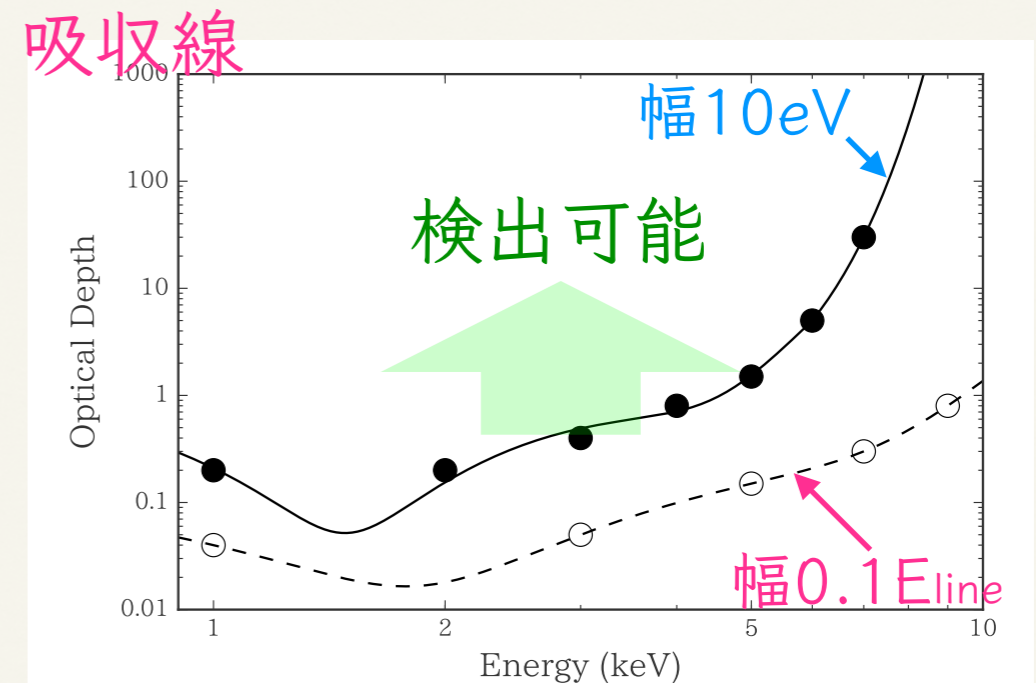
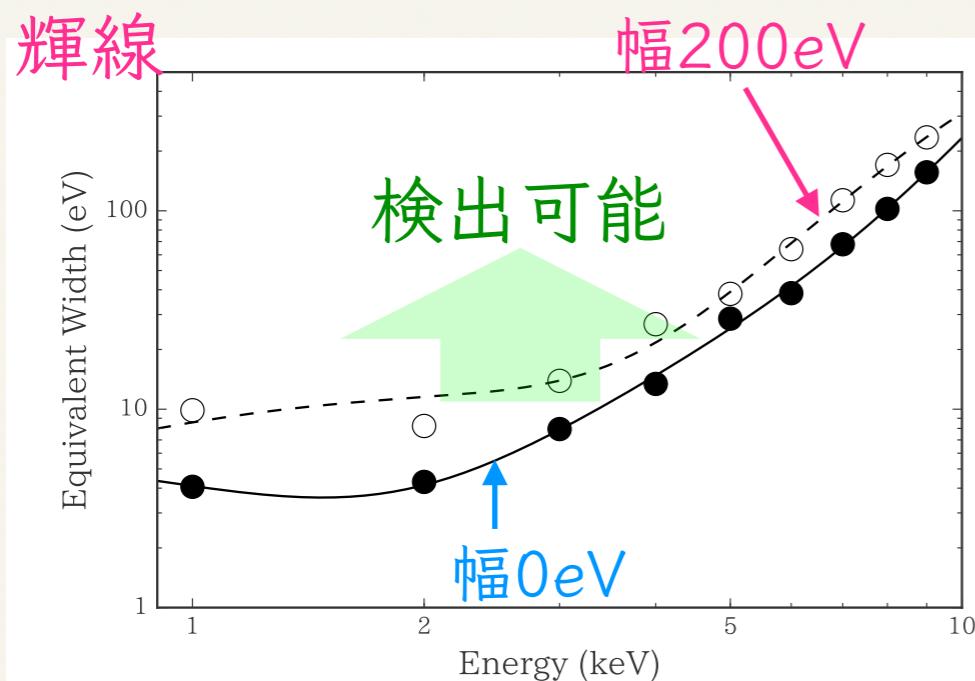


1000回作成,
フィルターを
かける



検出されるまで強度を変えながら繰り返す

■4U 0142+61の上限值(観測時間10万秒，有意度4 σ)



考察2: 双極子磁場と表面磁場

弱磁場マグネターから2例の陽子サイクロtron吸収線.

■ SGR 0142+5279

双極子磁場: 6×10^{12} G

$E_{\text{line}} \sim 2$ keV

$\rightarrow 3.2 \times 10^{14}$ G (Bdの ~ 50 倍)

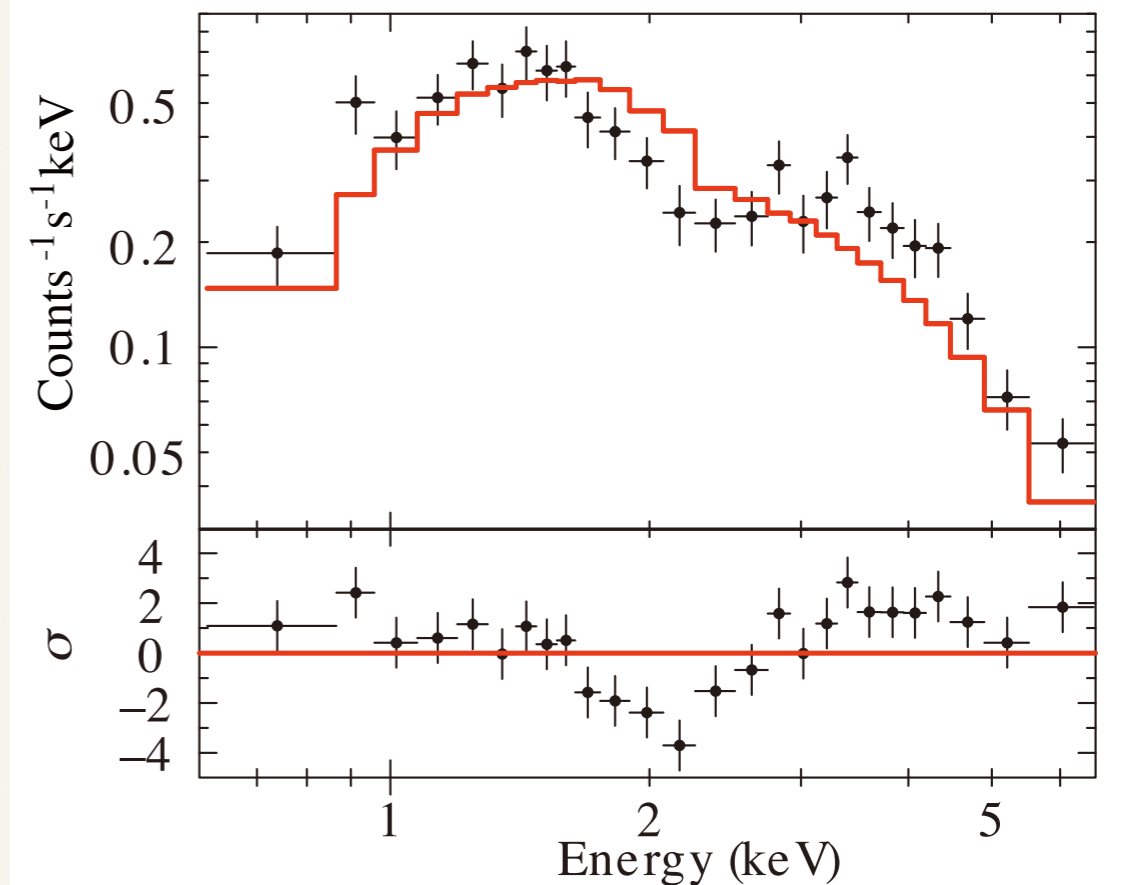
■ SWIFT J1822.3-1606

双極子磁場: 3×10^{13} G

$E_{\text{line}} \sim 10$ keV

$\rightarrow 3.2 \times 10^{14}$ G (Bdの10-50倍)

SGR 0142+5279の位相分けスペクトル



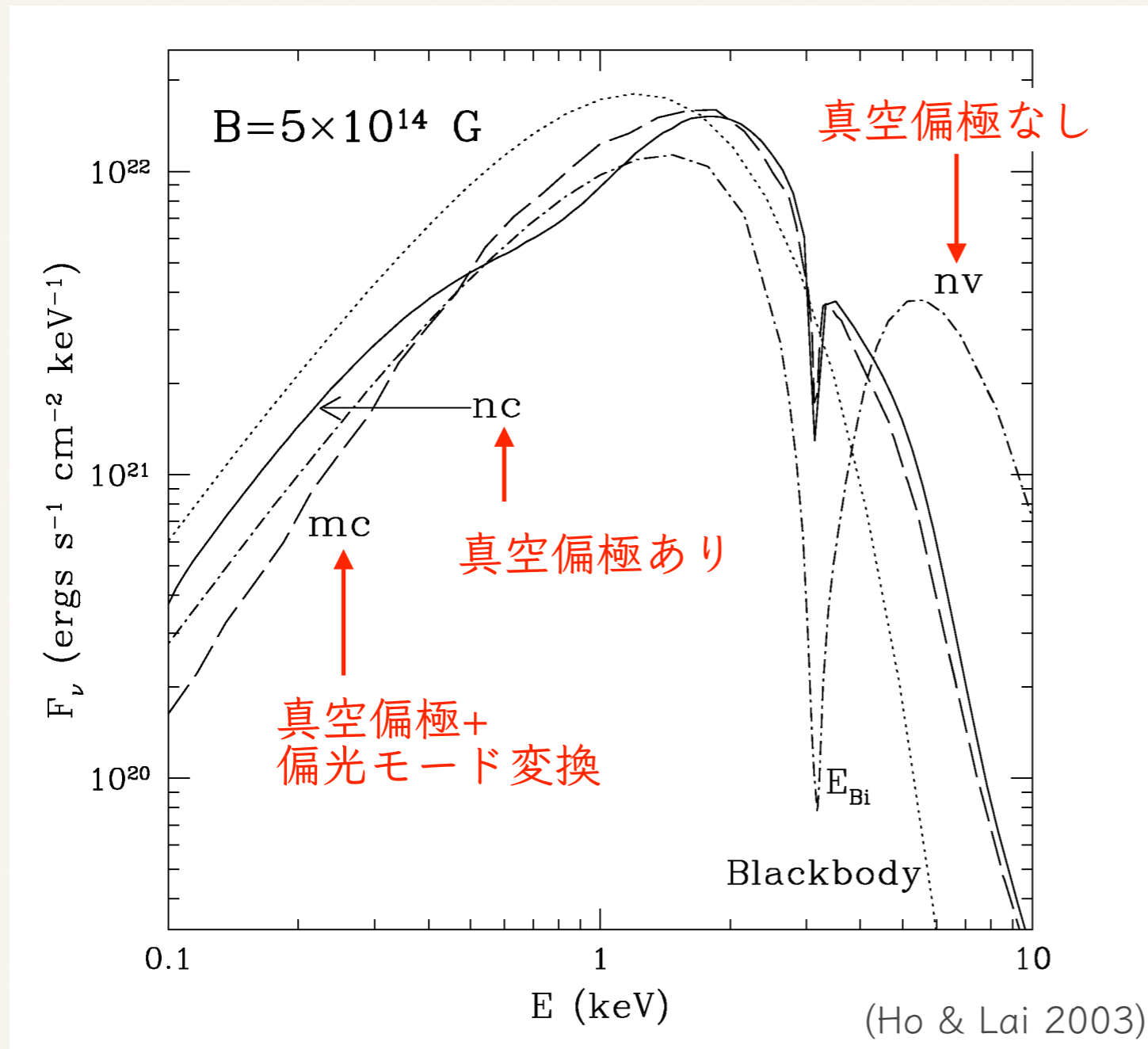
Tiengo+ 2013

吸収線から求まる磁場は dP/dt の磁場より1桁以上大きい.

(吸収線は双極子磁場+表面磁場を反映?)

今回の観測にも当てはまるとすると, XISの帯域を超える.

考察3: 理論からの予測



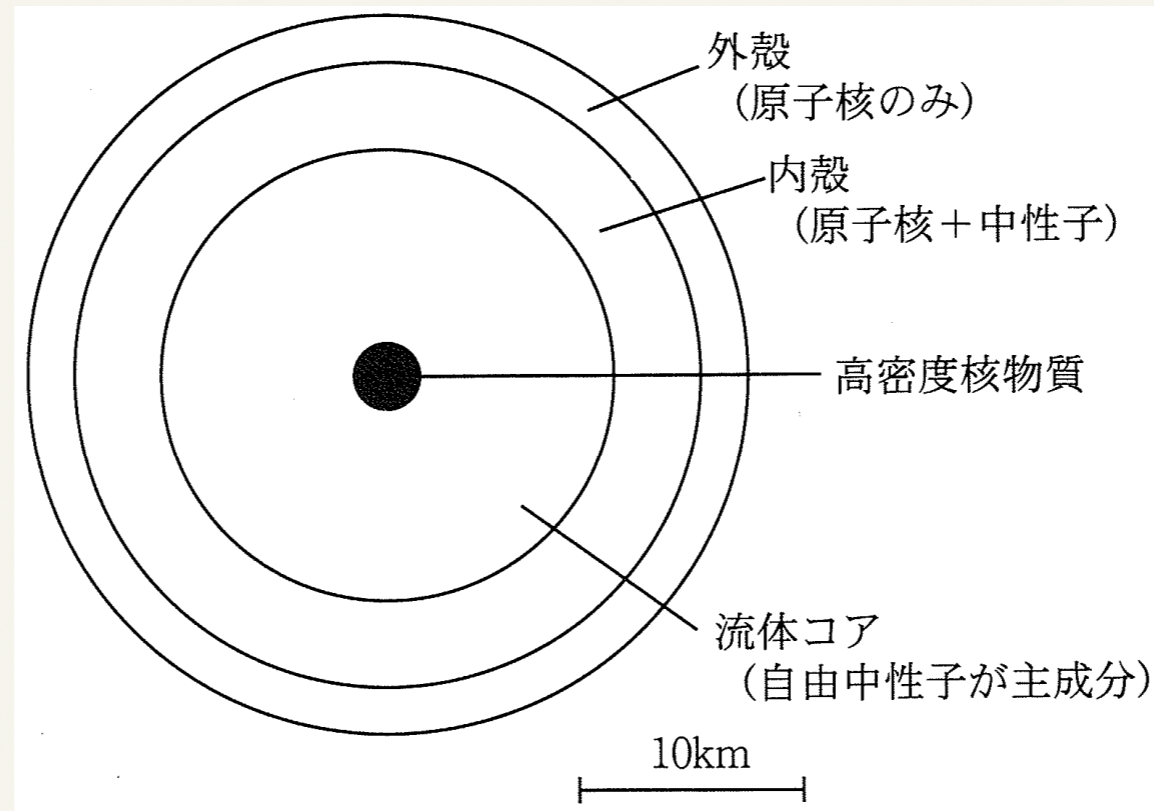
真空偏極やX線偏光のモード変換の効果で、高エネルギー側の光子が削減されて吸収線の等価幅が減少する. (Ho & Lai 2003)

まとめ

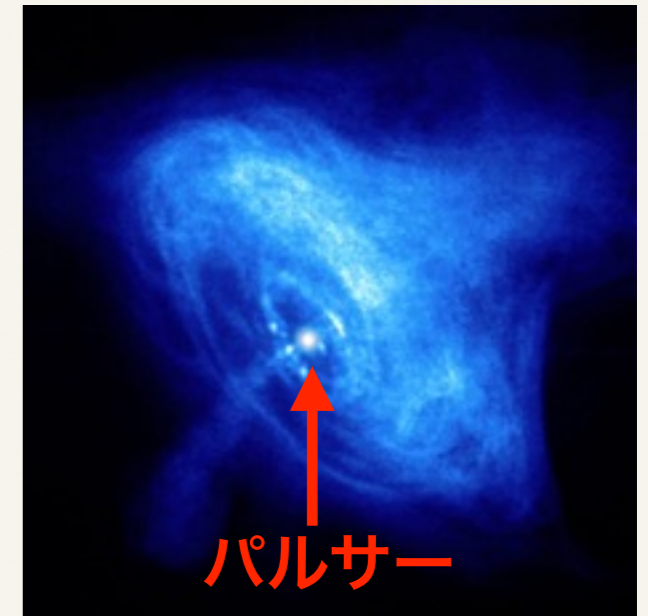
- ☑ 過去にガンマ線バーストの残光X線における輝線探査に用いられてきた，「最適化フィルターを用いたモンテカルロシミュレーション」の手法を「すざく」のデータに適用．
- ☑ AGN のアウトフローの吸収に適用し，吸収線を先行研究に矛盾なく検出できることを確認．
- ☑ 同様の手法をマグネターのスペクトルに適用したが，時間平均，位相分けスペクトルのいずれから有意な輝線・吸収線は検出されなかった．
- ☑ 「すざく」における観測の上限値を定めることに成功した．
- ☑ 来月打ち上げ予定のASTRO-H衛星による超精密分光観測，X線偏光観測に期待．

中性子星

- 太陽質量の8倍以上の恒星が重力崩壊型の超新星爆発をしてできる.
- 中性子の縮退圧で保っている.
- 質量は太陽程度だが、半径は10 km程度→ **高密度**
- 回転周期は1 ms～30 s→ **高速回転**
- **強磁場** ($B > 10^{11}$ G)



かに星雲



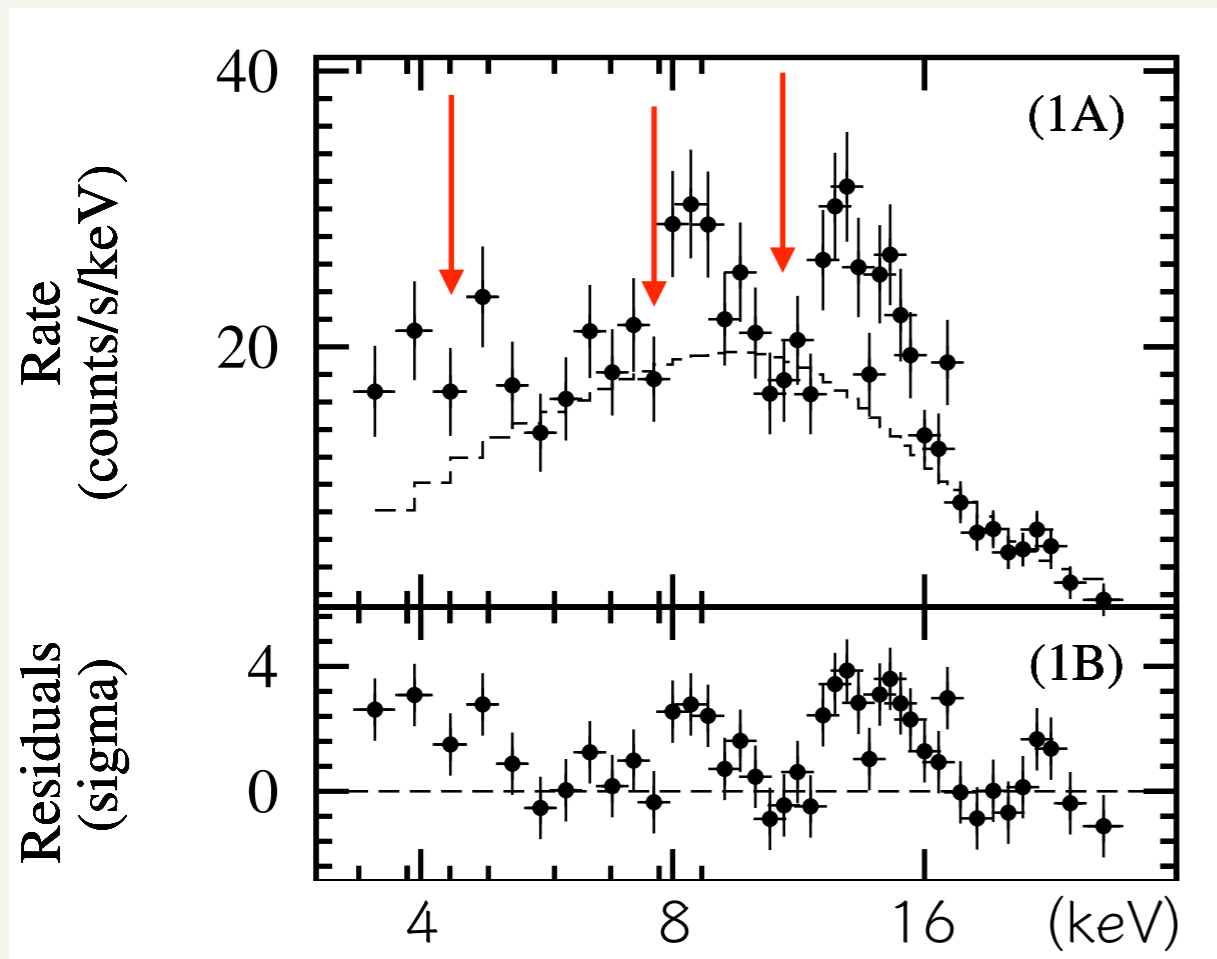
©JAXA

中性子星内部の構造
『宇宙物理学』より

吸収が発見された例(4U 0142+61)

◆ 4U 0142+61 (Gavril+ 2007)

- RXTE, 2007年2月のバースト後



~4, ~8, ~14 keV に3つの吸収線
らしき構造が見つかった
一番大きな ~14 keV が本物だと
すると、共鳴線から求まる磁場は

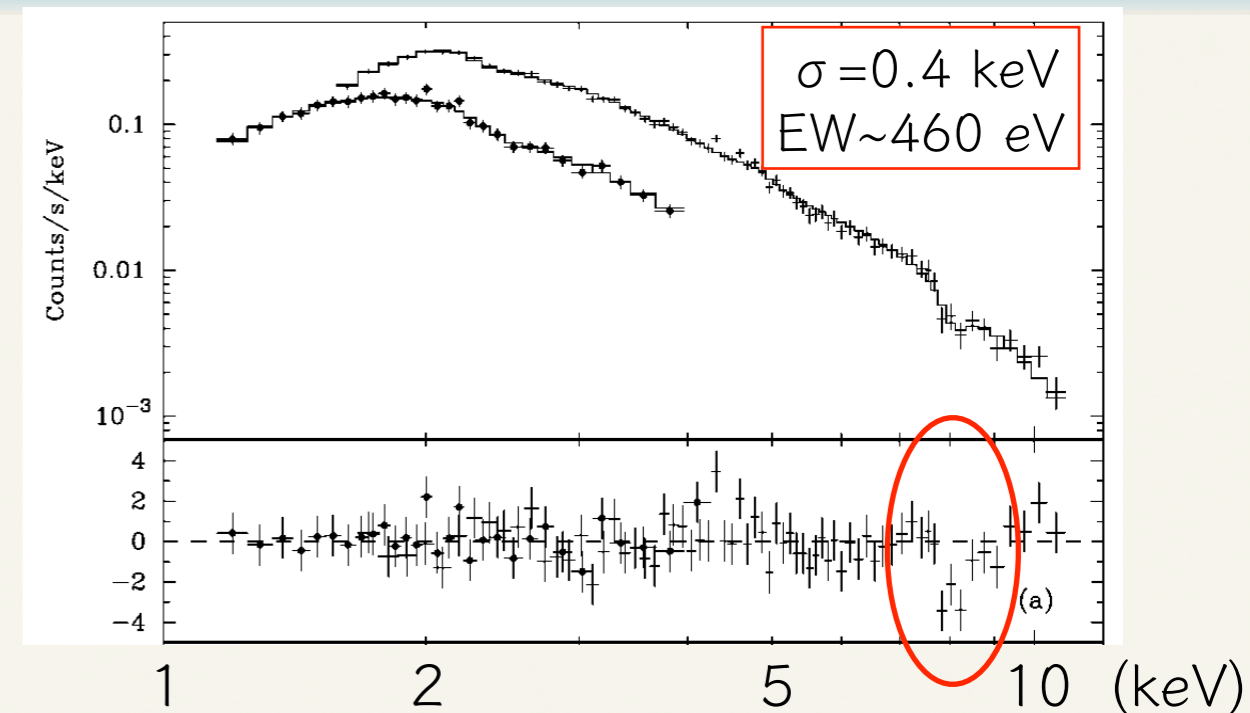
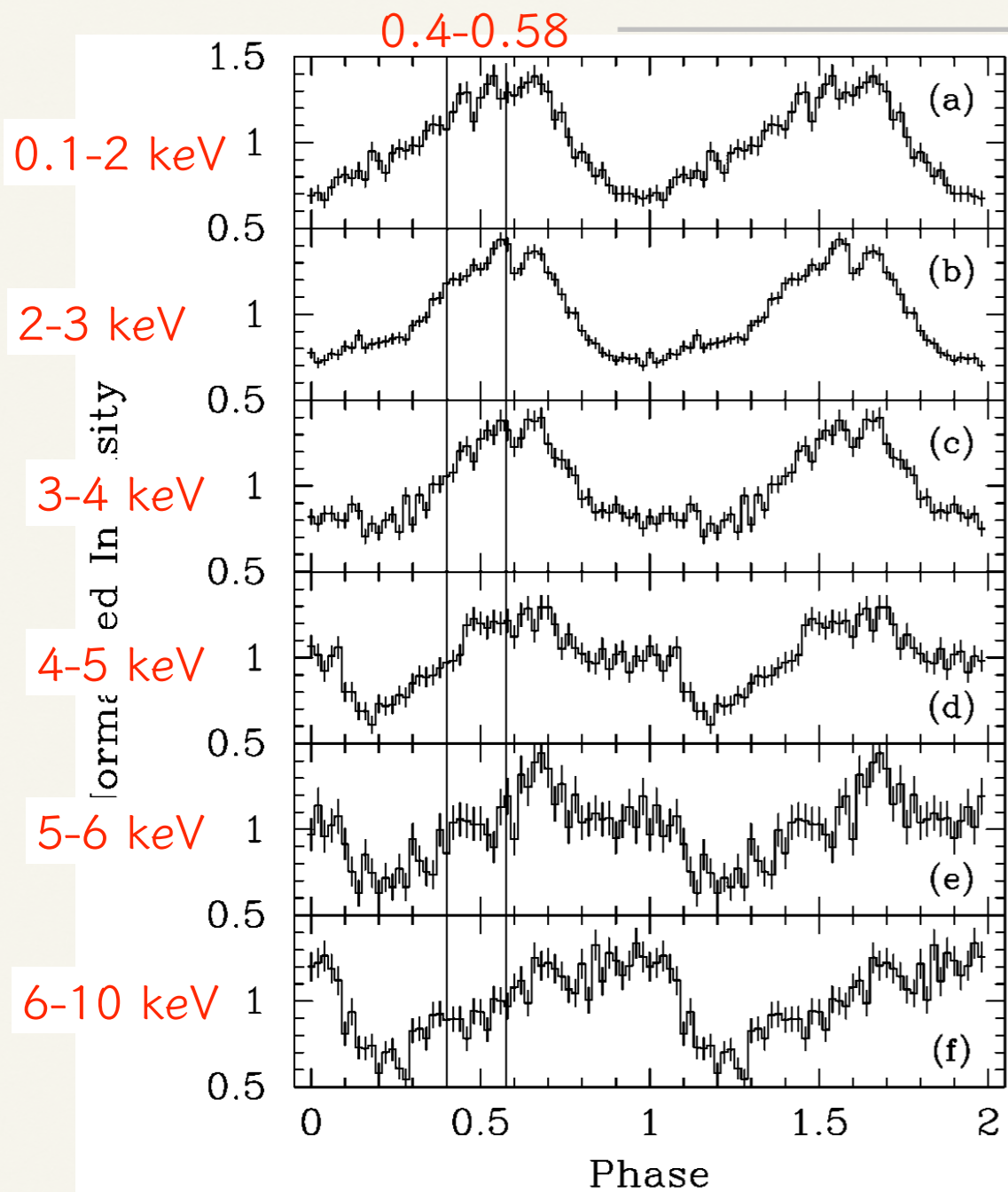
$B = 2.2 \times 10^{15}$ G (proton RCF)

$B = 1.2 \times 10^{12}$ G (electron RCF)

吸収が発見された例(1RXS J1708-4009)

❖ 1RXS J1708-4009 (Rea+ 2003)

- BeppoSAX, 1999/2001年の観測時



特定の位相に現れる吸収線

→ 通常連星パルサーでも同様の傾向
(Santangelo+ 1999)

サイクロトロン吸収だとすると、

$B = 1.6 \times 10^{15}$ G (proton RCF),

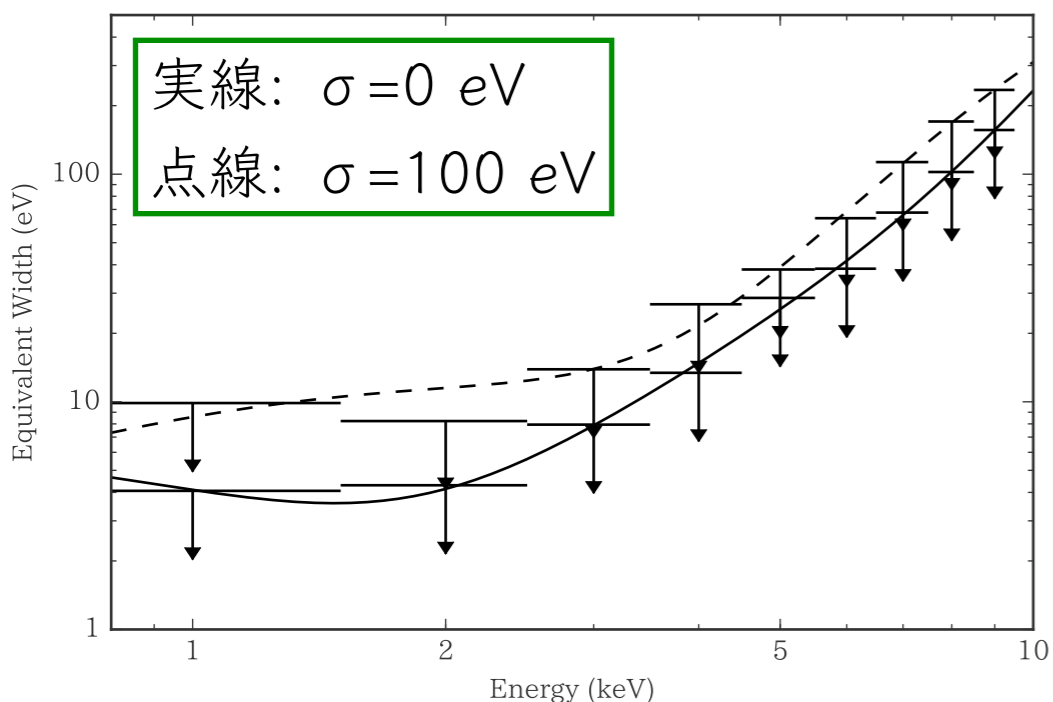
$B = 9.2 \times 10^{11}$ G (electron RCF)

しかし、その後の2003年のXMM-Newton
の観測では吸収線は発見されず.

(Rea+ 2005)

上限値の比較 (4U 0142+61)

❖ 今回の結果 (Suzaku, 2007年)

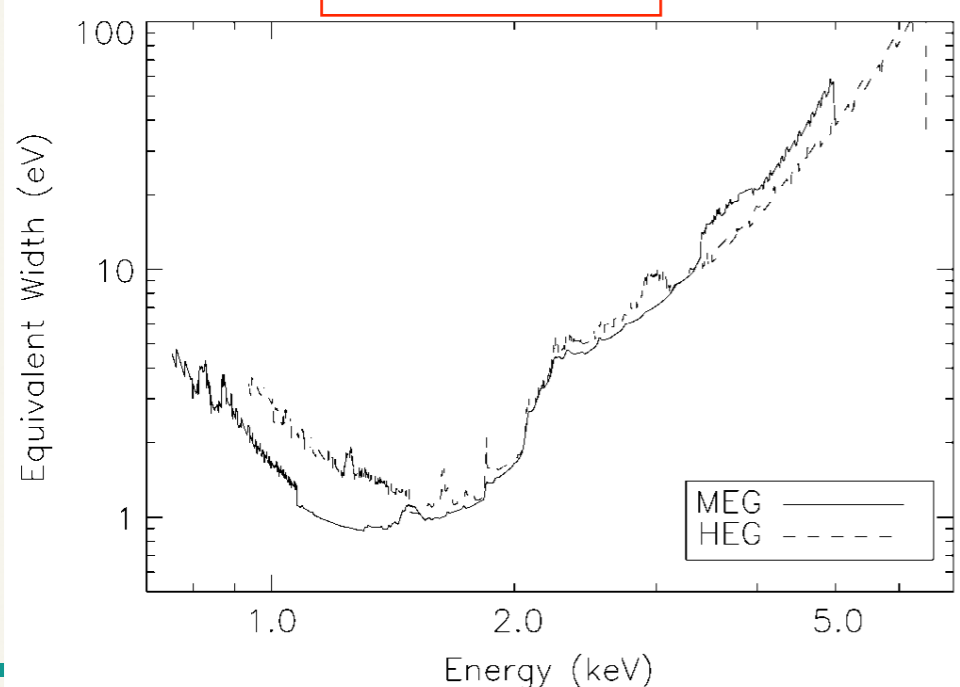


❖ XMM-Newton, 2004年, MC (Rea+ 2007)

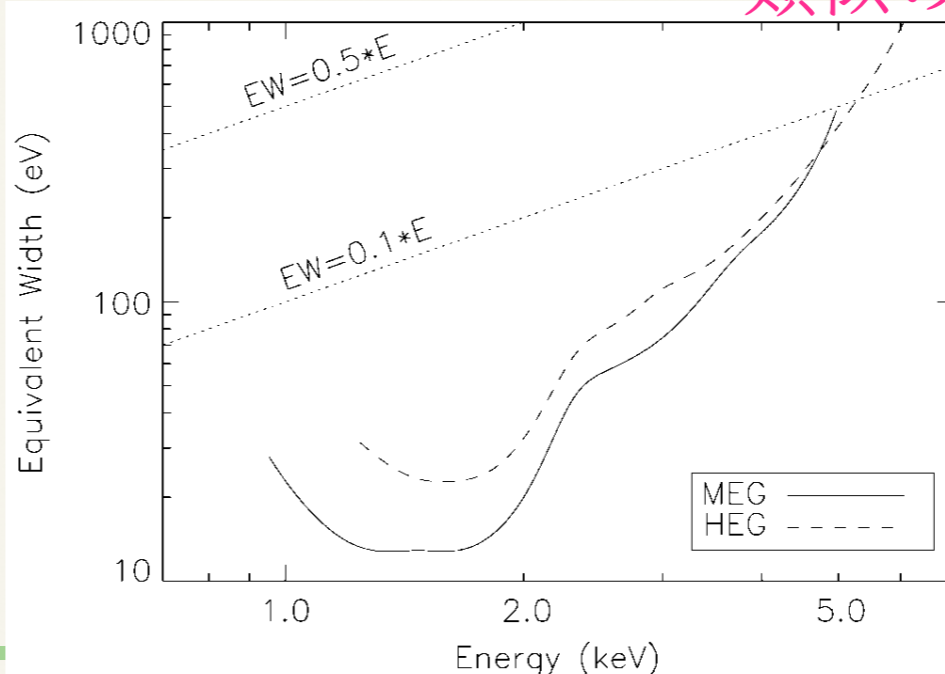
Energy range (keV)	$\sigma_{\text{line}} = 0$ (eV)	$\sigma_{\text{line}} = 100$ (eV)
1-2	<4	<9
2-3	<4	<7
3-4	<12	<19
4-5	<16	<21
5-6	<25	<37
6-7	<46	<51
7-8	<88	<124
8-9	<405	<416
9-10	<527	<789

❖ Chandra, 2001年 (Juett+ 2002), F-test

narrow line



broad line



CCDの Newton とは
類似の結果となった