

3次元放射輸送計算を用いた 超高速アウトフローの観測的研究

(Hagino et al. 2015, MNRAS, 446, 663)

萩野浩一

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA)

ASTRO-Hプロジェクトチーム

共同研究者：小高裕和 (ISAS/JAXA)、Chris Done (Durham)、
Poshak Gandhi (Southampton)、高橋忠幸 (ISAS/JAXA)

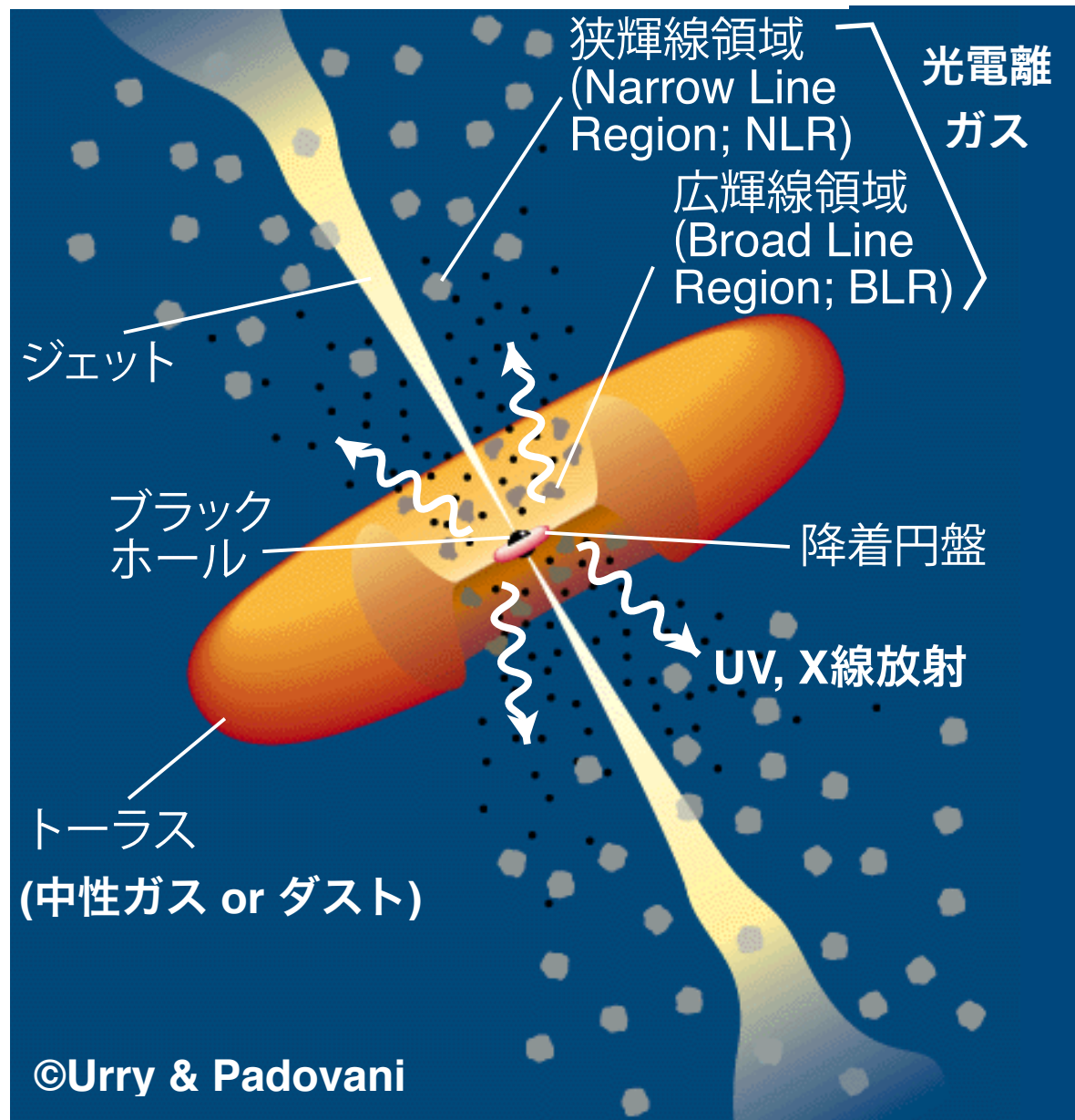
2015.06.21 降着円盤大研究会@京都大学

活動銀河核における重力エネルギー解放

- 活動銀河核(Active Galactic Nuclei; AGN)

ジェットや電磁放射などの強烈な活動を示す銀河の中心領域

AGNの構造の概略図



- AGNのエネルギー源

銀河中心の**超大質量ブラックホール**
(10^6 – 10^{10} 太陽質量($M_{\odot}$))への**降着円盤**による重力エネルギー解放

降着物質の静止質量エネルギーの
~10–50%もの重力エネルギーを解放

→宇宙で最も効率的なエネルギー変換機構

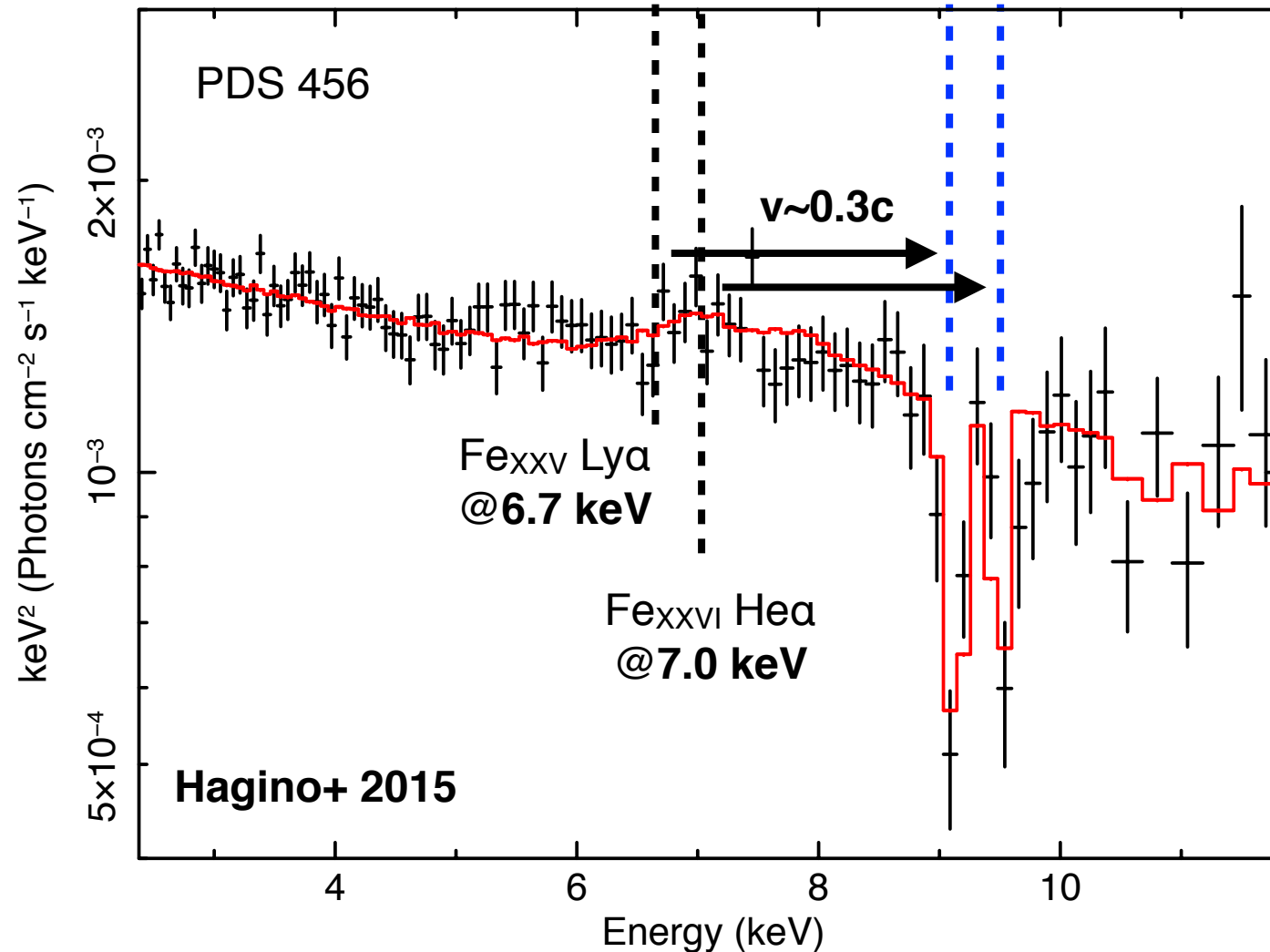
- 莫大なエネルギーを周辺環境へ供給

→“銀河とブラックホールの共進化”

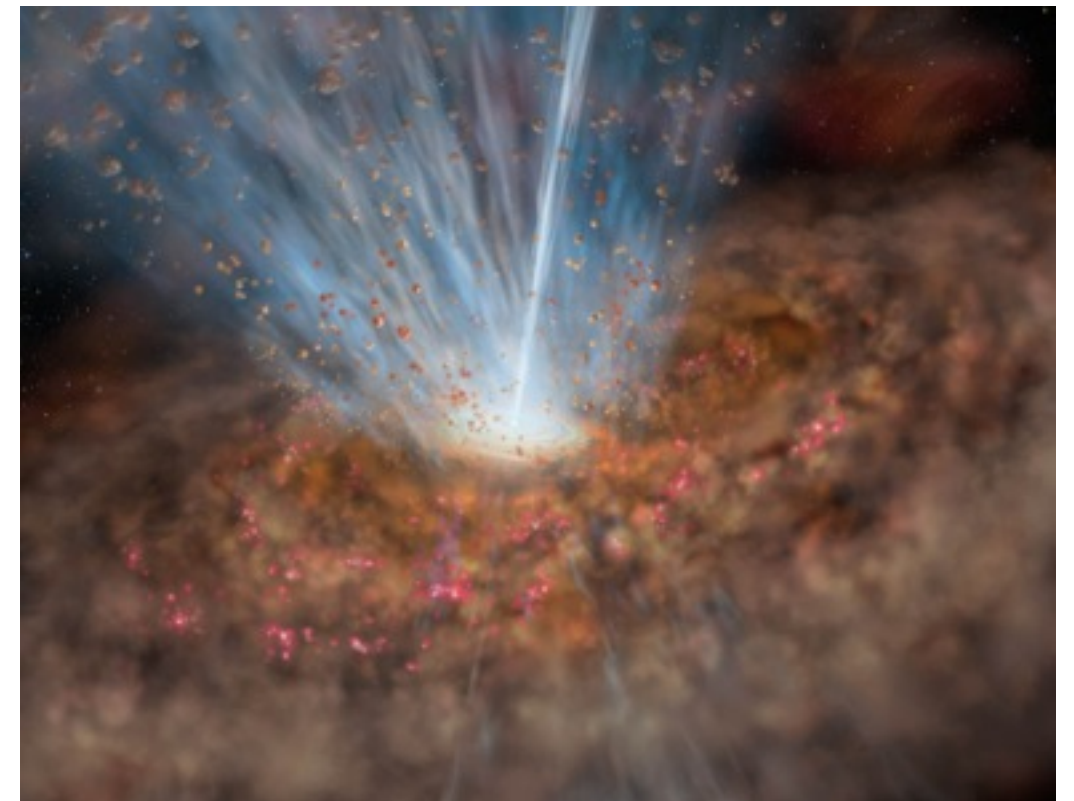
➡ AGNは宇宙の構造進化やエネルギー解放機構を探る上で重要な天体

超高速アウトフロー

超高速アウトフローのスペクトル



- 複数のAGNで**光速の数10%もの速度**でblue-shiftした吸収線が発見(Chartas+ 2002; Reeves+ 2003; Pounds+ 2003a,b)
- 放射源(ブラックホール)から観測者に向かって超高速で動いている吸収体=**超高速アウトフロー(Ultra-fast outflow)**



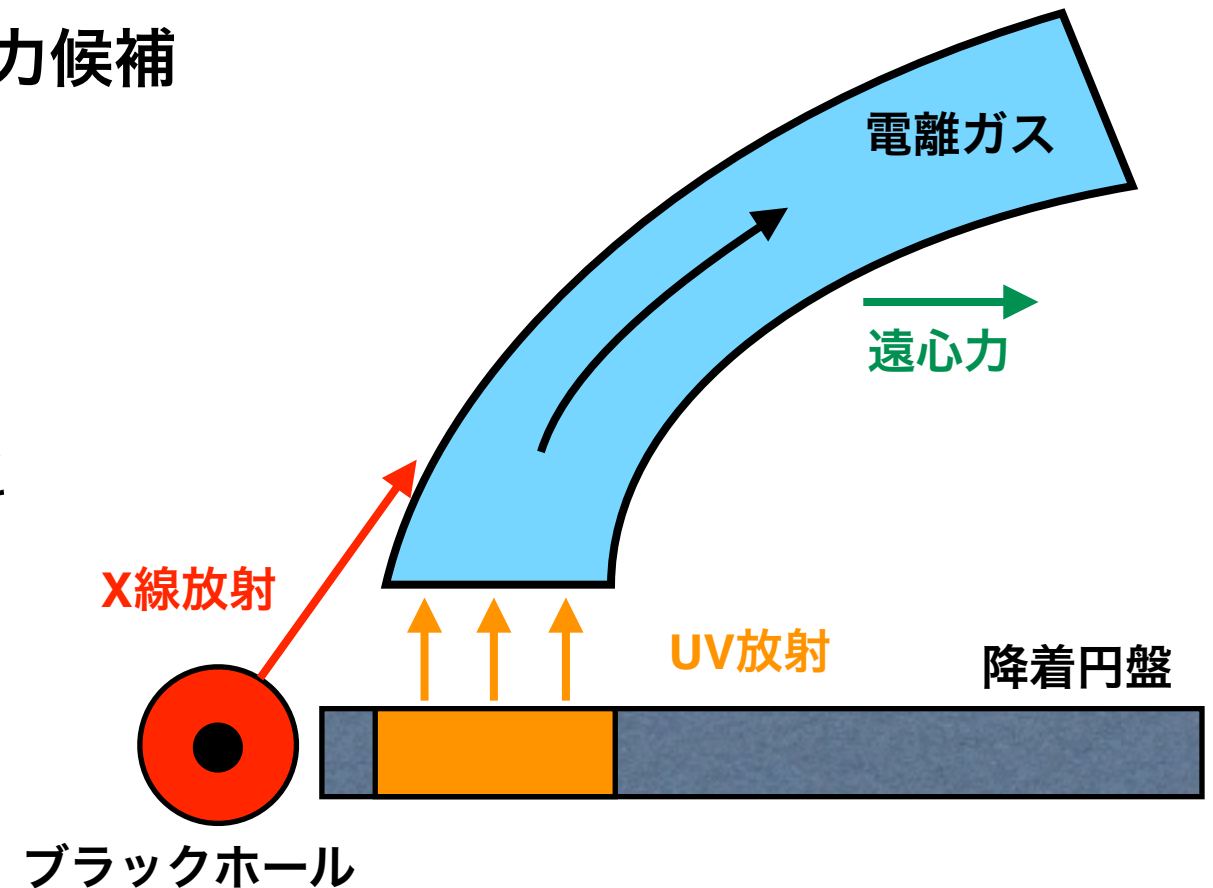
- ジェットとは異なる重力エネルギー解放過程
- ジェットに匹敵するエネルギーを周辺環境へ供給→“共進化”への寄与

超高速アウトフローの加速メカニズム

- **UV-line drivingが加速メカニズムの有力候補**

(Proga+ 2000; Risaliti+ 2010; Nomura+ 2013)

- **“UV-line driving”**：電離ガスが、束縛-束縛遷移によってUV光子を吸収することで光子の運動量(放射圧)を受け取り加速



- 輻射流体シミュレーションなどによる理論研究が活発に行われているが、それらと観測データとの比較はあまり進んでいない。

本講演

UV-line drivingに基づいた仮定のもとで、3次元放射輸送計算を行いスペクトルモデルを構築。これを観測スペクトルに適用した。

スペクトルモデル構築の方法

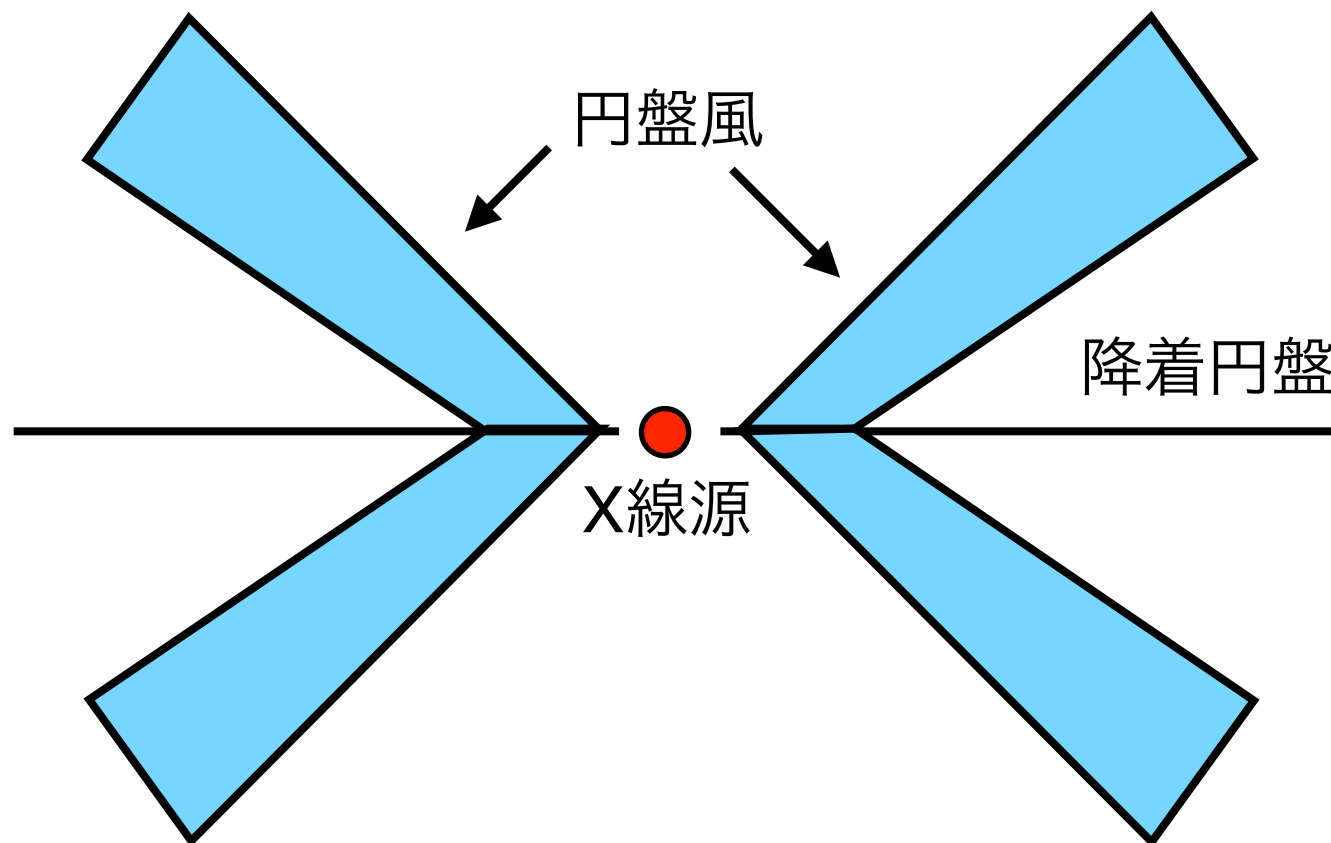
- 降着円盤風のスペクトルモデル構築の流れ
 1. 流線方向の**電離状態の計算**によって円盤風内の電離構造(電子温度、イオンの存在比の空間分布)を決定
 2. 得られた電離構造の中でモンテカルロ法により**3次元放射輸送計算**

モンテカルロ法による放射輸送計算

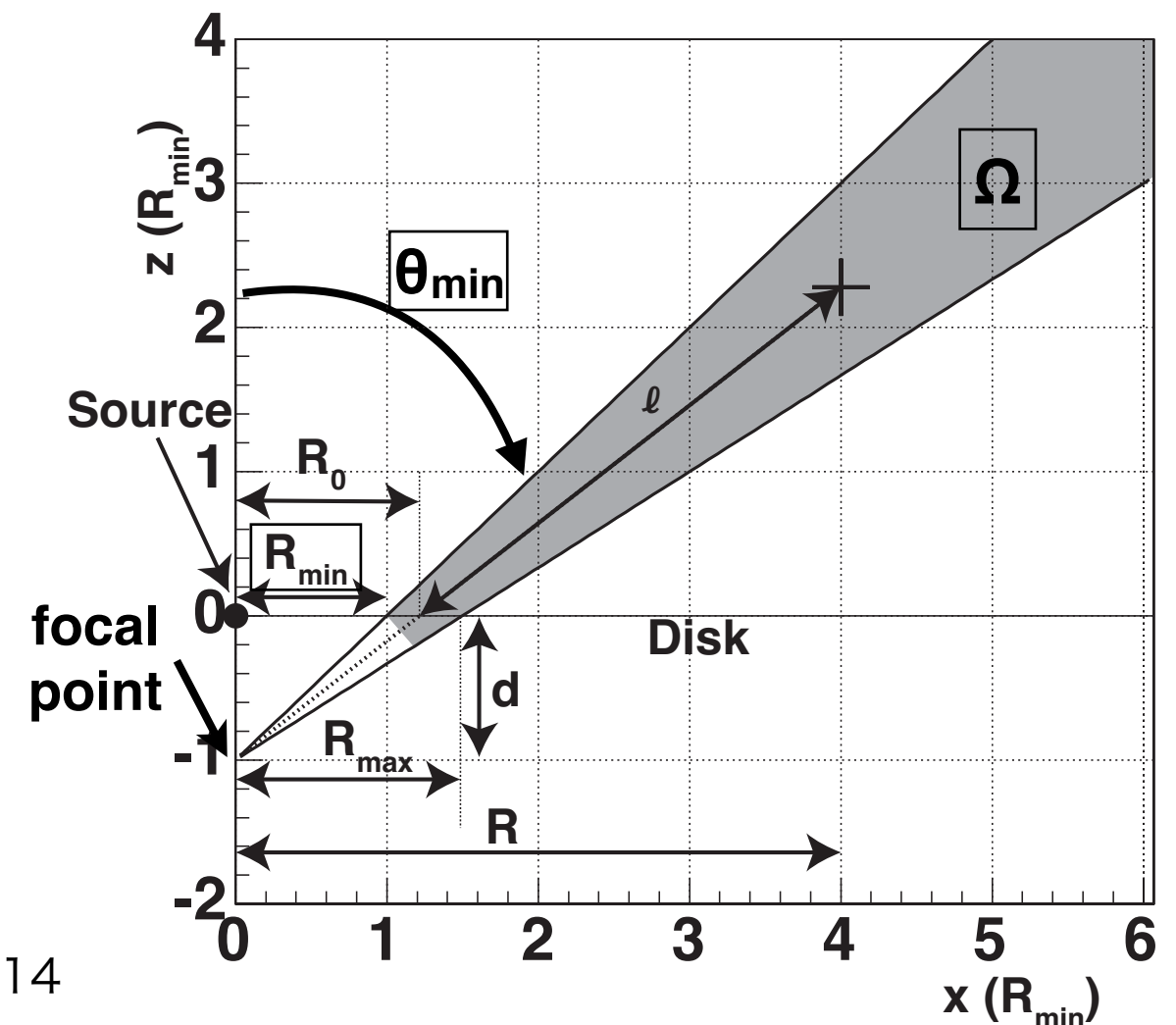
- 光子の輸送と物質との相互作用をモンテカルロ法により計算することで、円盤風内での放射輸送を計算
- モンテカルロ計算には、“MONACO”(Odaka+ 2011)を用いる
- 円盤風ジオメトリは双円錐(biconical)形状を採用(Knigge+ 1995)

主要な物理素過程

- Photoionization
- Photoexcitation
- Compton scattering
- Doppler effect



$(R_{\min}, \theta_{\min}, \Omega)$ の3パラメータで形状を記述



密度・速度分布

- 円盤風ジオメトリ内での密度・速度分布は以下のように指定

- アウトフロー速度：UV-line driven windで用いられる速度分布(=CAKモデル)(Castor+1975)

$$v_r(l) = v_0 + (v_\infty - v_0) \left(1 - \frac{R_{min}}{R_{min} + l} \right)^\beta$$

- 回転速度：角運動量保存

$$v_\phi(R) = v_{\phi 0} \frac{R_0}{R}$$

- 乱流速度：一定の乱流 v_t + 各シェルのvelocity shear (Schurch & Done 2007)

$$v_{turb}(i) = v_t + \frac{v_r(i) - v_r(i-1)}{\sqrt{12}}$$

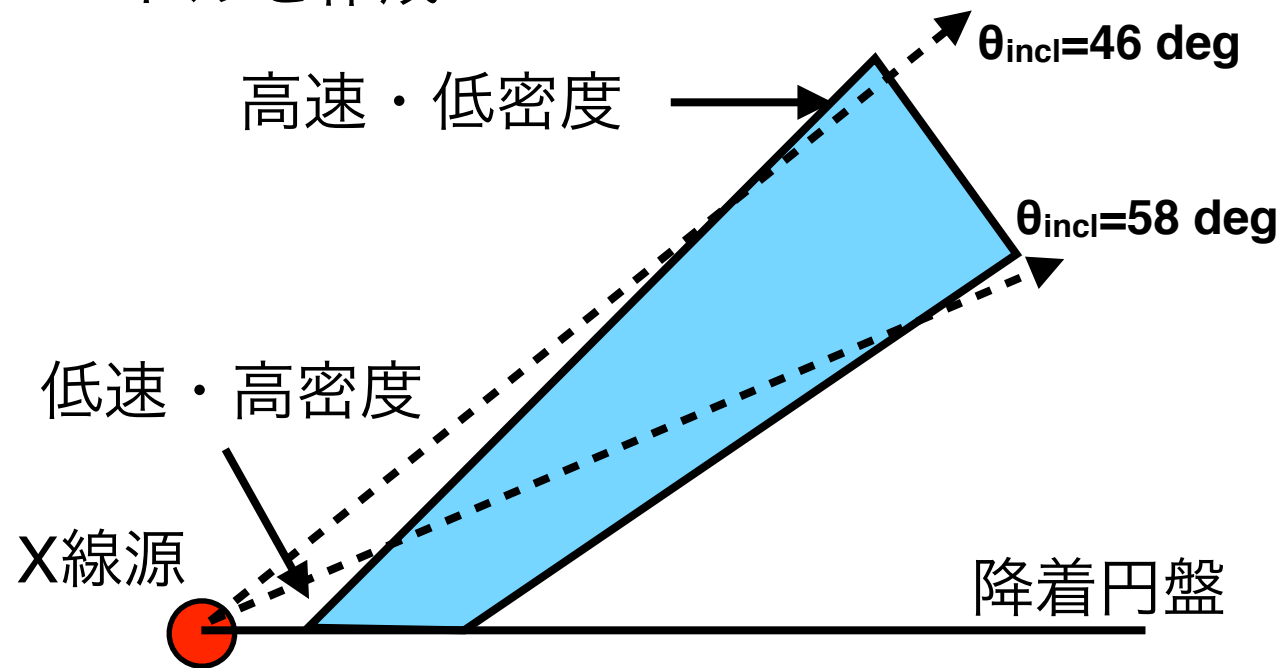
- 密度分布：質量保存

$$\dot{M}_{wind} = 1.23 m_p n v_r 4\pi D^2 \frac{\Omega}{4\pi}$$

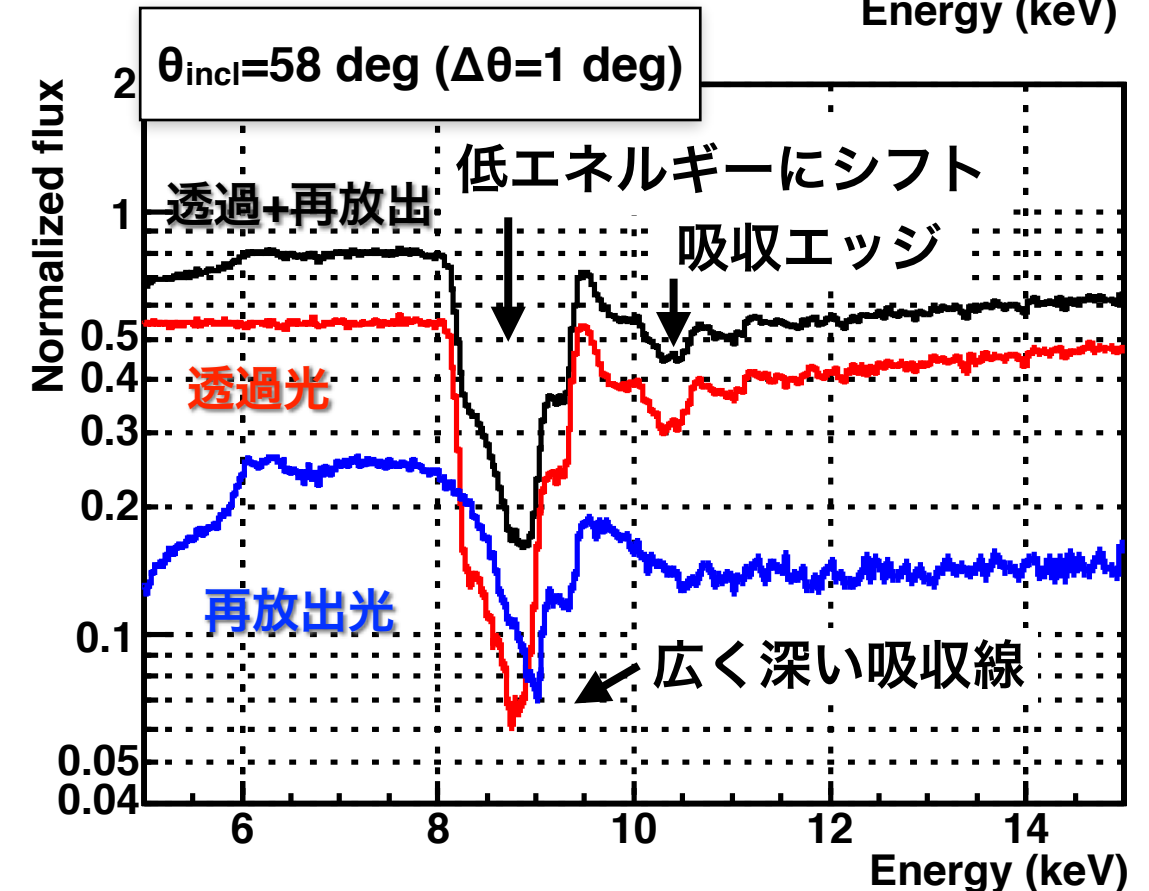
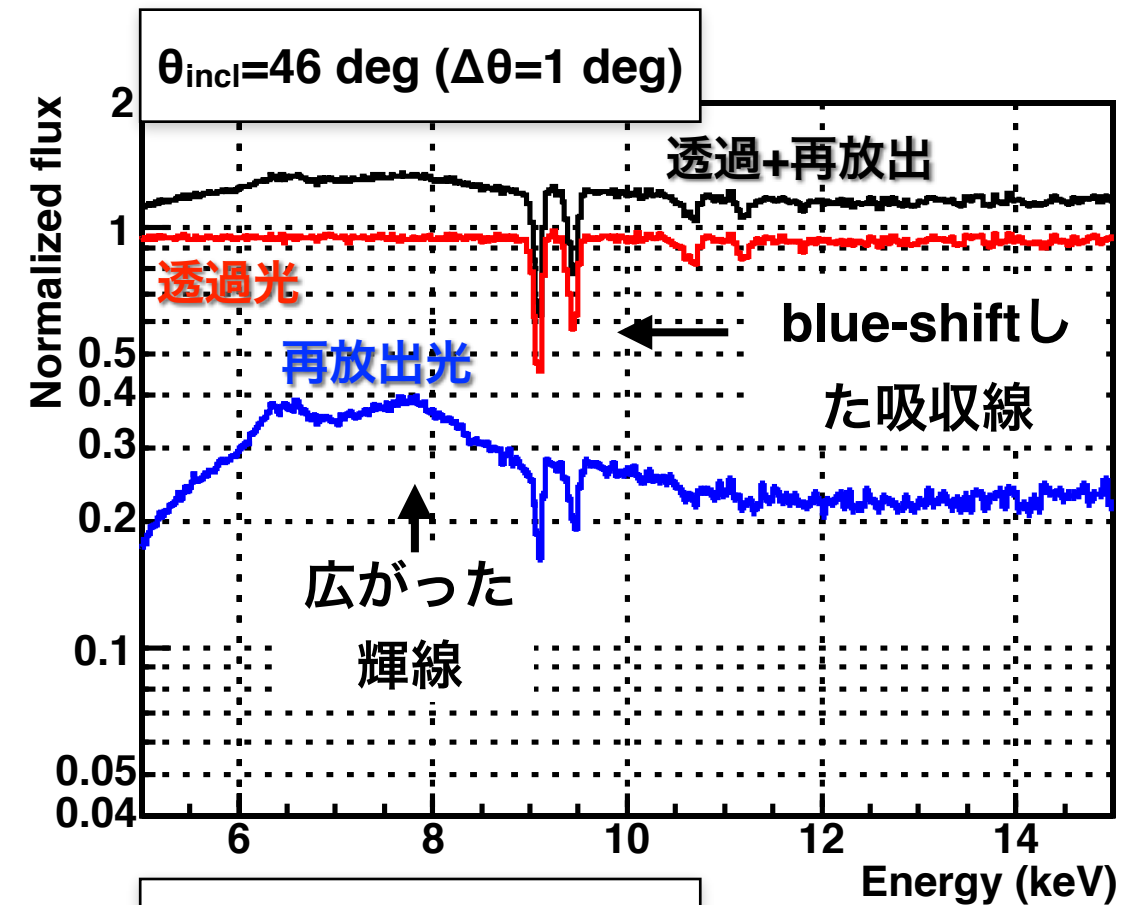
- アウトフロー速度: v_∞ に漸近、密度: $1/r^2$ で減少
- 電離状態はほぼ一定 (電離パラメータ $\xi = L/nr^2 = \text{const.}$)

モンテカルロ計算によるスペクトル

- 観測者の視線方向の光子イベントからスペクトルを作成



- blue-shiftした吸収線と幅の広い輝線構造が見られる
- θ_{incl} が大きくなると、
 - 密度が高くなる→吸収線が深く
 - 速度が遅い部分も見える→幅広くなる
- 吸収線構造が観測者の方向に強く依存

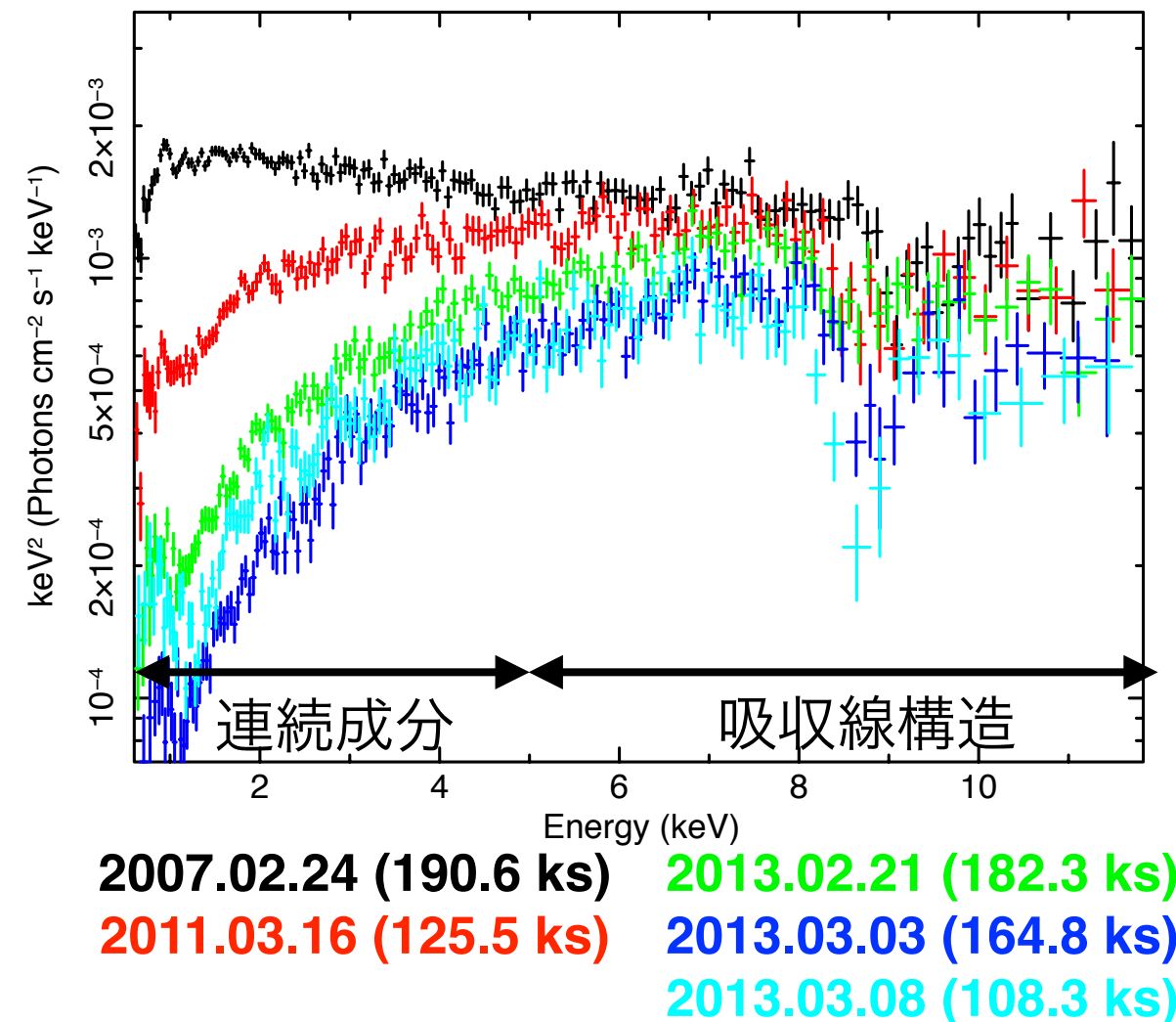


PDS 456の観測データへの適用

- PDS 456のすざくによる観測データに対し、新たに構築したモンテカルロ計算による降着円盤風のスペクトルモデルを適用する。

■ PDS 456

- ▶ $M_{\text{BH}}=2\times 10^9 M_{\odot}$ 、 $L_{\text{bol}}\sim 0.1\text{--}0.3 L_{\text{Edd}}$
- ▶ 超高速アウトフローによる**吸収線が最も顕著**
- ▶ **最もPowerful**($v\sim 0.3c$, $N_{\text{H}}\sim 10^{24}\text{cm}^{-2}$)な超高速アウトフロー
- ▶ 速く大きな**時間変動**



- 連続成分の変動は、吸収線を作る吸収体とは異なるもの(or 異なる場所)による吸収と考える
- ➡ **吸収線のみを円盤風モデルで再現し、連続成分の吸収は既存の電離部分吸収モデルを適用**

終端速度と放出角度による変動の理解

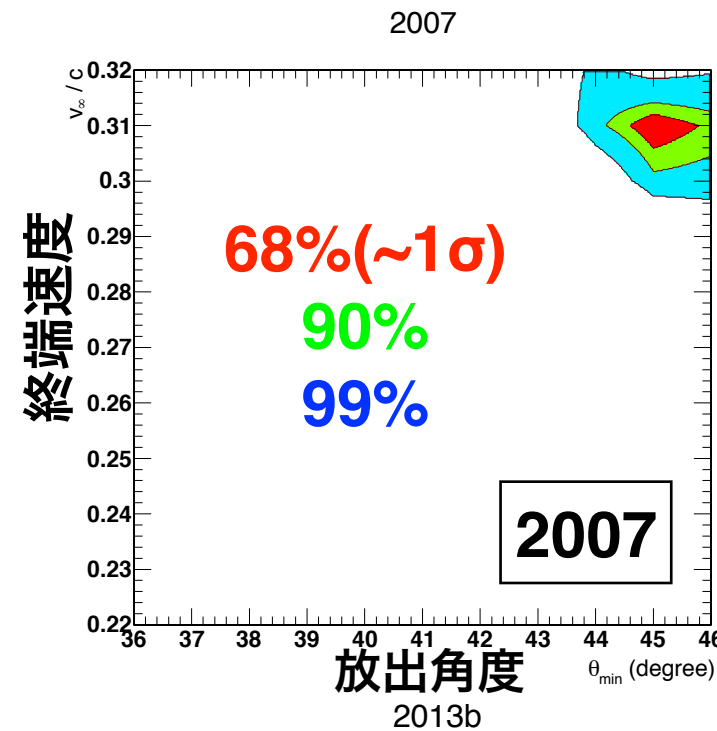
- 終端速度 v_∞ と放出角度 $\theta_{\min}$ を振ってモンテカルロ計算し観測データをフィット

観測データ、流体計算結果(e.g., Proga+ 2000)
から固定したパラメータ

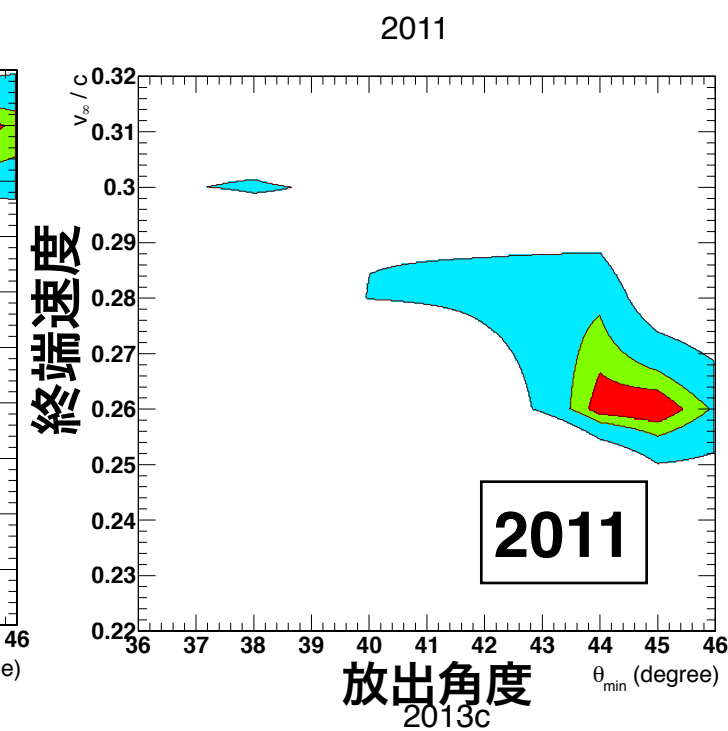
L	4×10
Γ	2.5
v	v
v	1000 km/s
β	1

$\dot{M}$	8M
R	10R
Ω	0.15
θ	48°

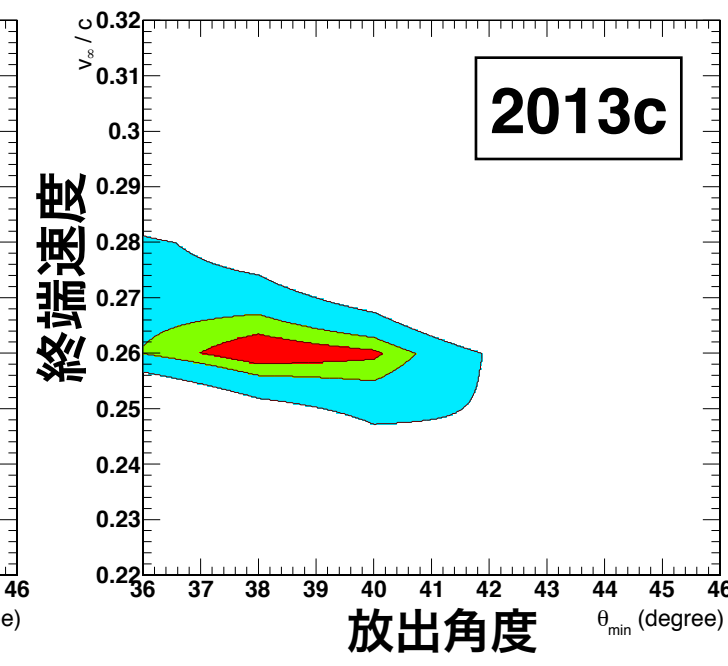
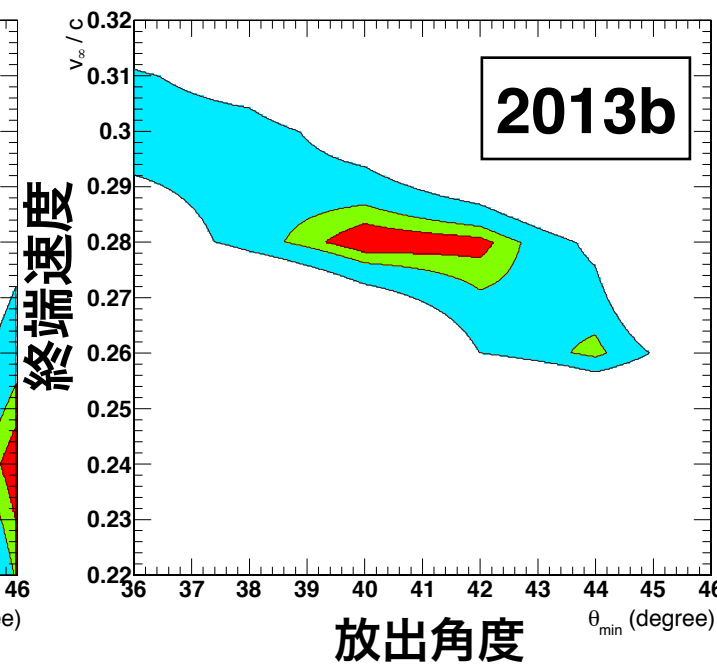
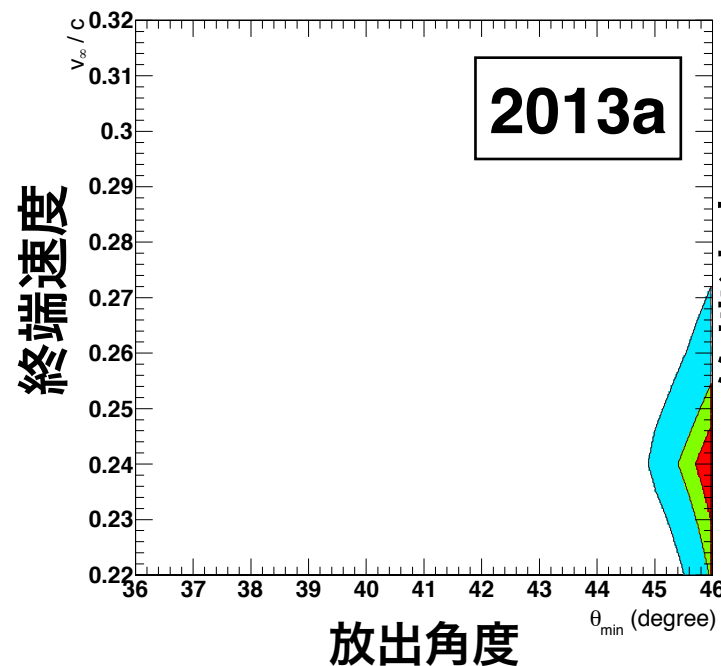
2013a



2013b



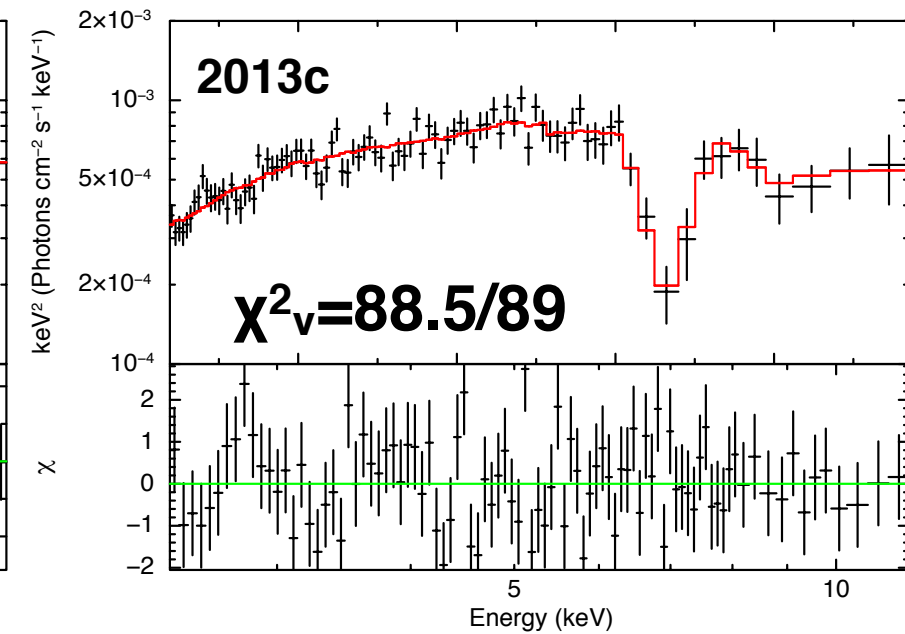
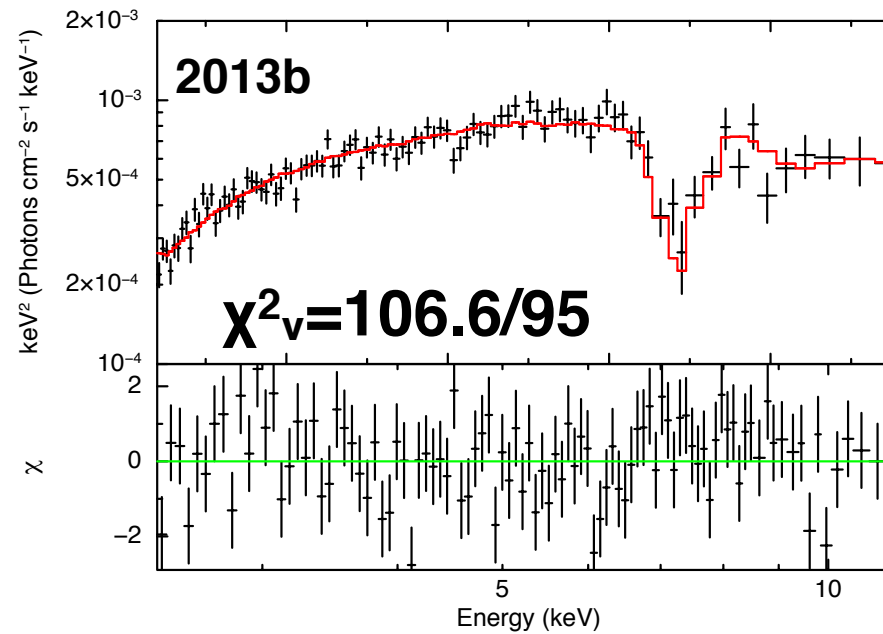
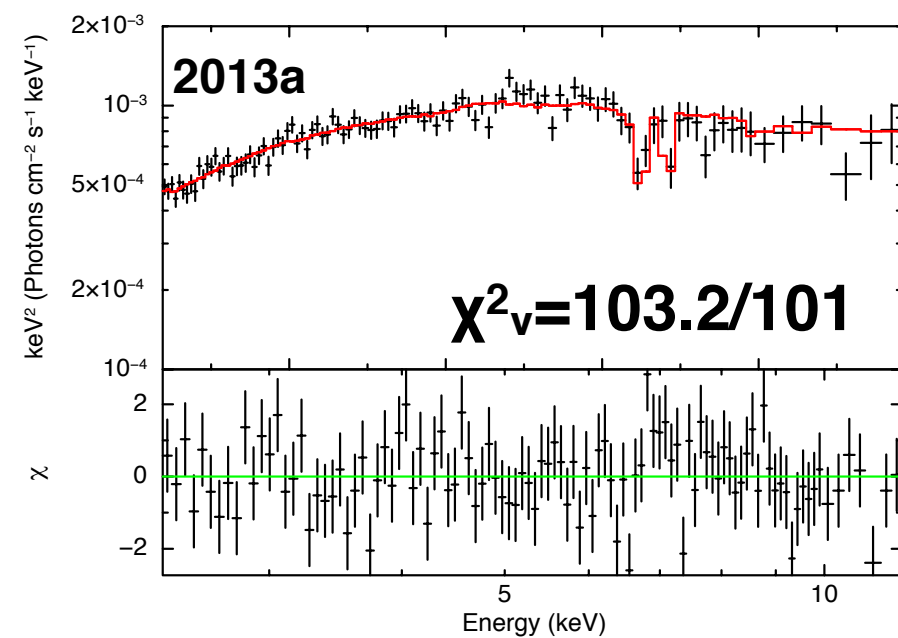
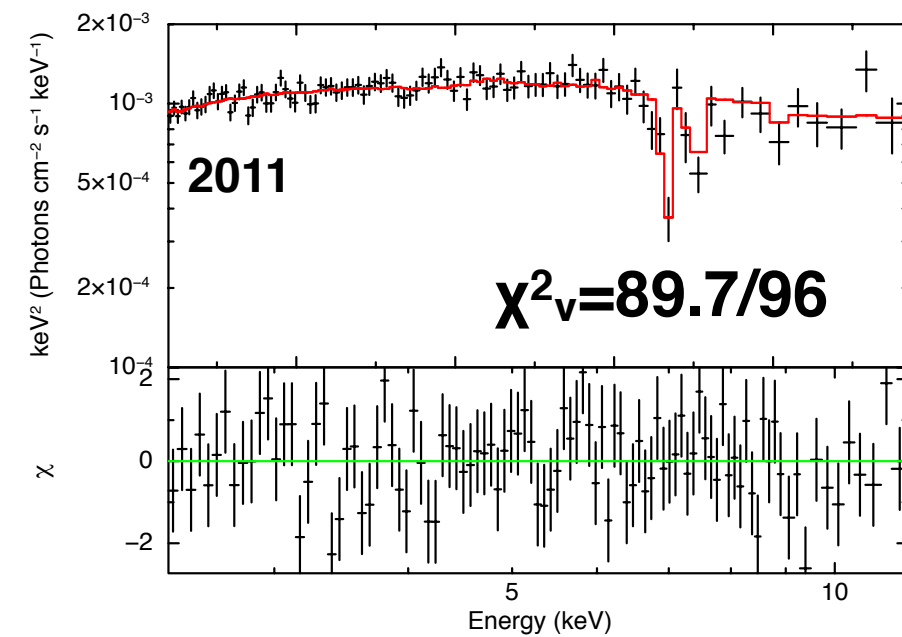
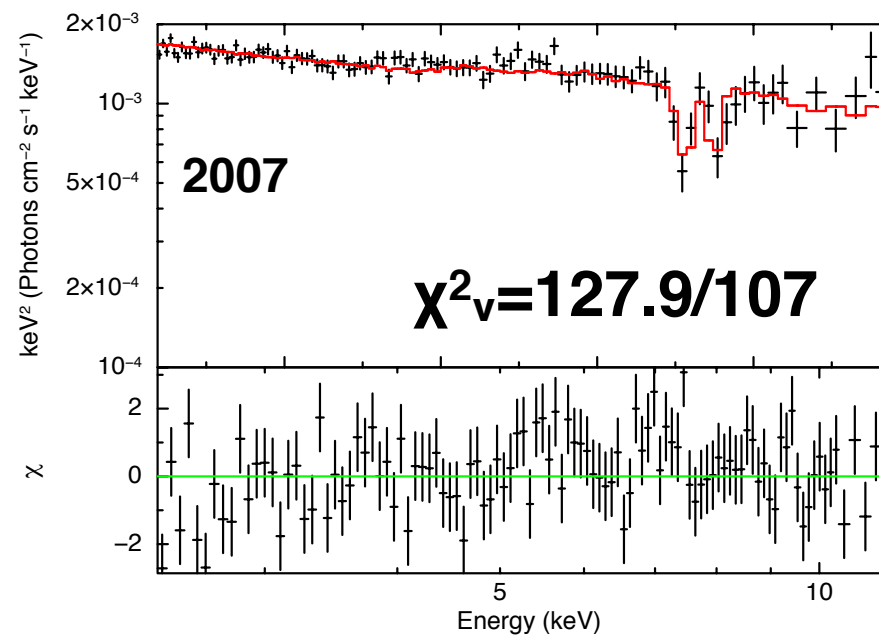
2013c



データを良く再現する v_∞ , $\theta_{\min}$ の値が得られた

終端速度と放出角度のみを変えたスペクトル

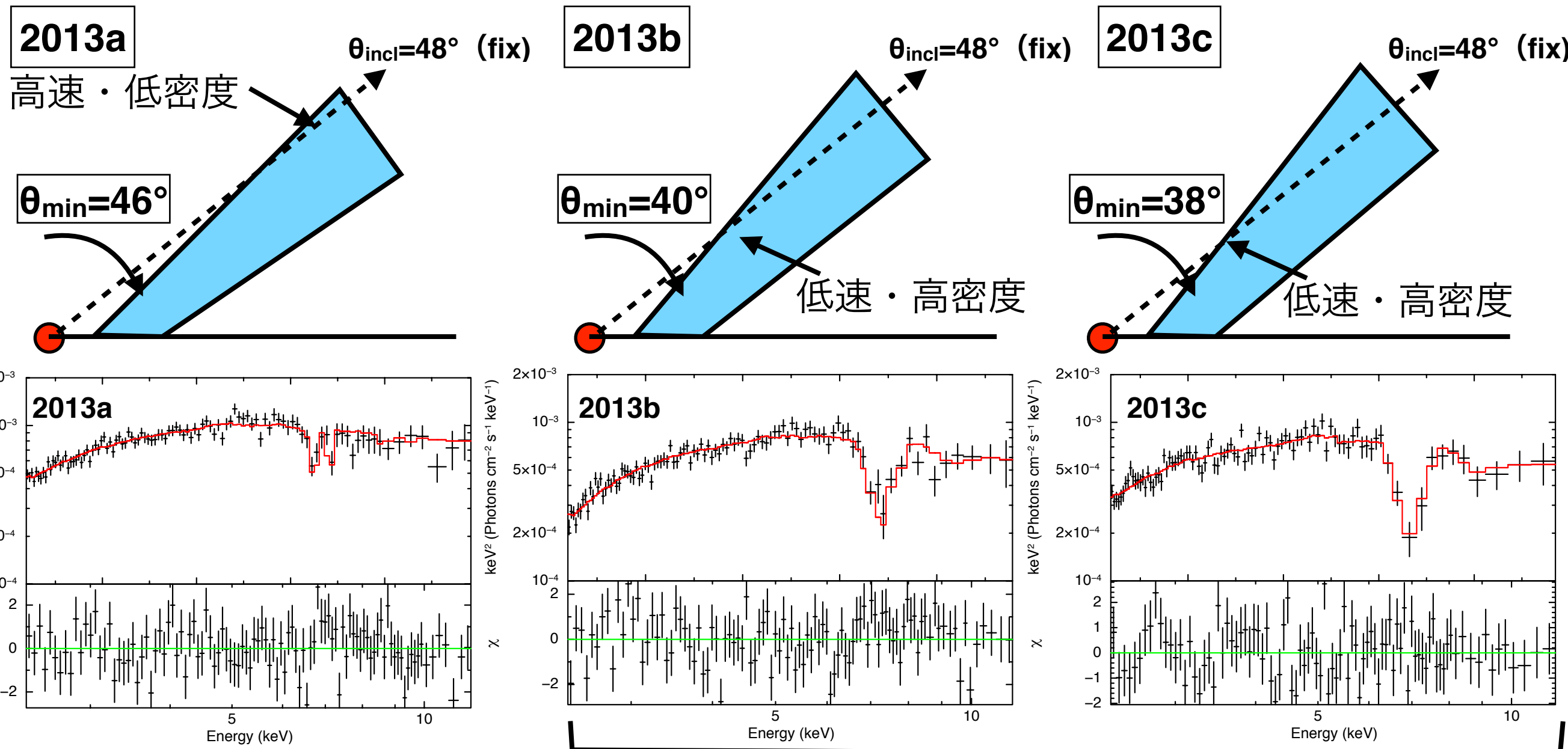
- 終端速度 v_∞ と円盤風角度 $\theta_{\min}$ だけを観測ごとに変え、それ以外のパラメータは変えずにfitしたbest fitの結果



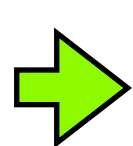
➡ 円盤風の速度と放出角度を変えるだけで全ての観測データを再現することに成功

角度変化による影響の考察

- 得られた角度パラメータの変化が結果のスペクトルにどのように影響しているのか？

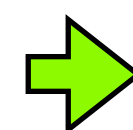


高速部分のみ観測⇒細い吸収線
低密度部分のみ観測⇒浅い吸収線



細く浅い
吸収線

低速部分から高速部分まで観測⇒広い吸収線
高密度部分も観測⇒深い吸収線

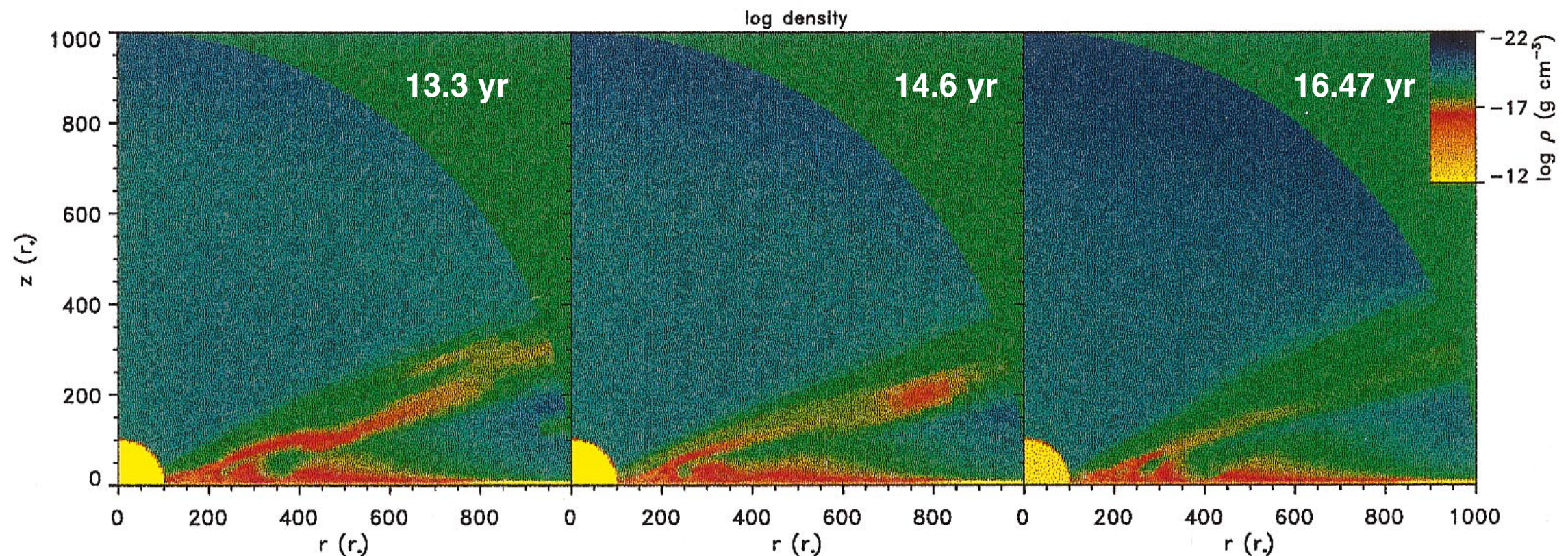


広く深い
吸収線

円盤風形状の不安定性

- モンテカルロ計算によるスペクトルモデルを用いることで、円盤風の放出角度の変化によって、異なる観測時期の全てのスペクトルを説明できる
- UV-line drivingによる降着円盤風の流体計算においても、Kelvin-Helmholtz不安定性により円盤風が波打つことが予想されている

UV-line drivingによる降着円盤風の流体計算結果 (Proga+2000)



➡ 降着円盤風の不安定性を観測的に示唆？

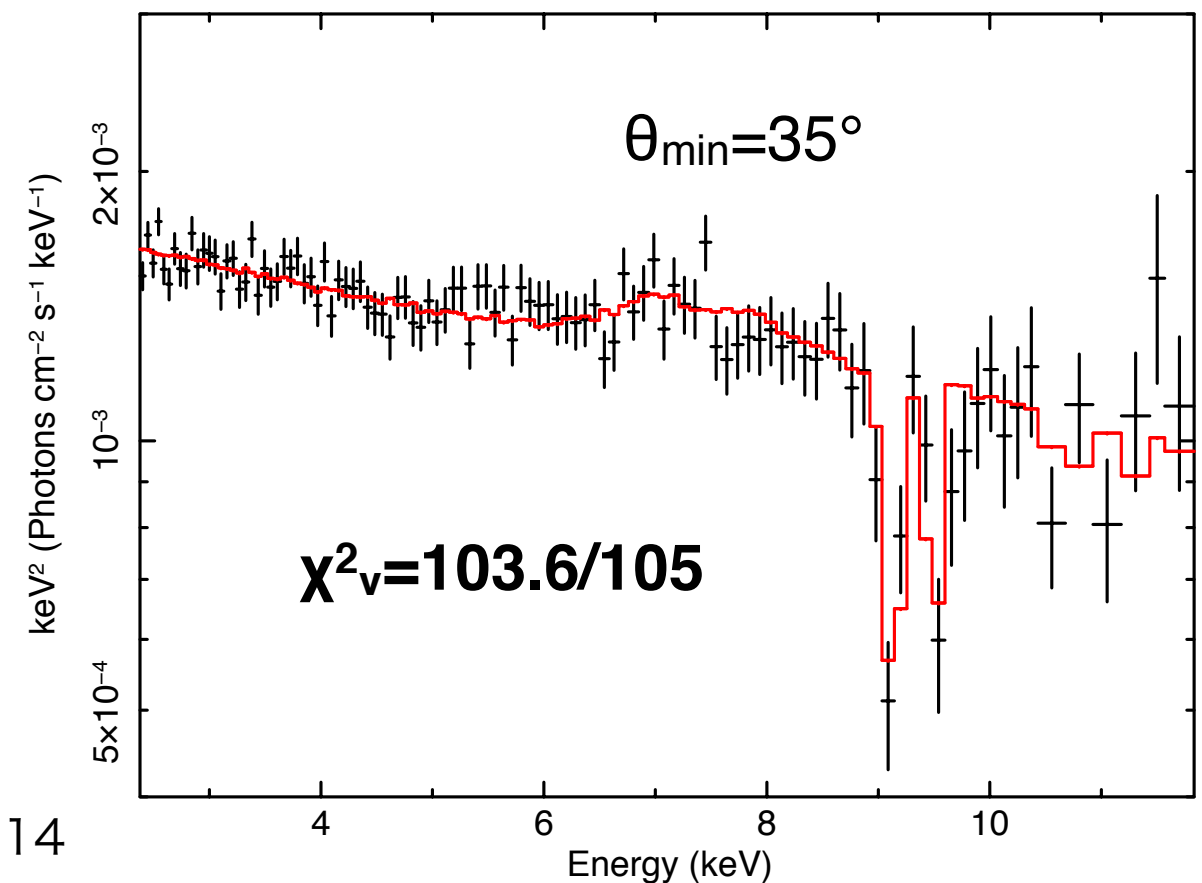
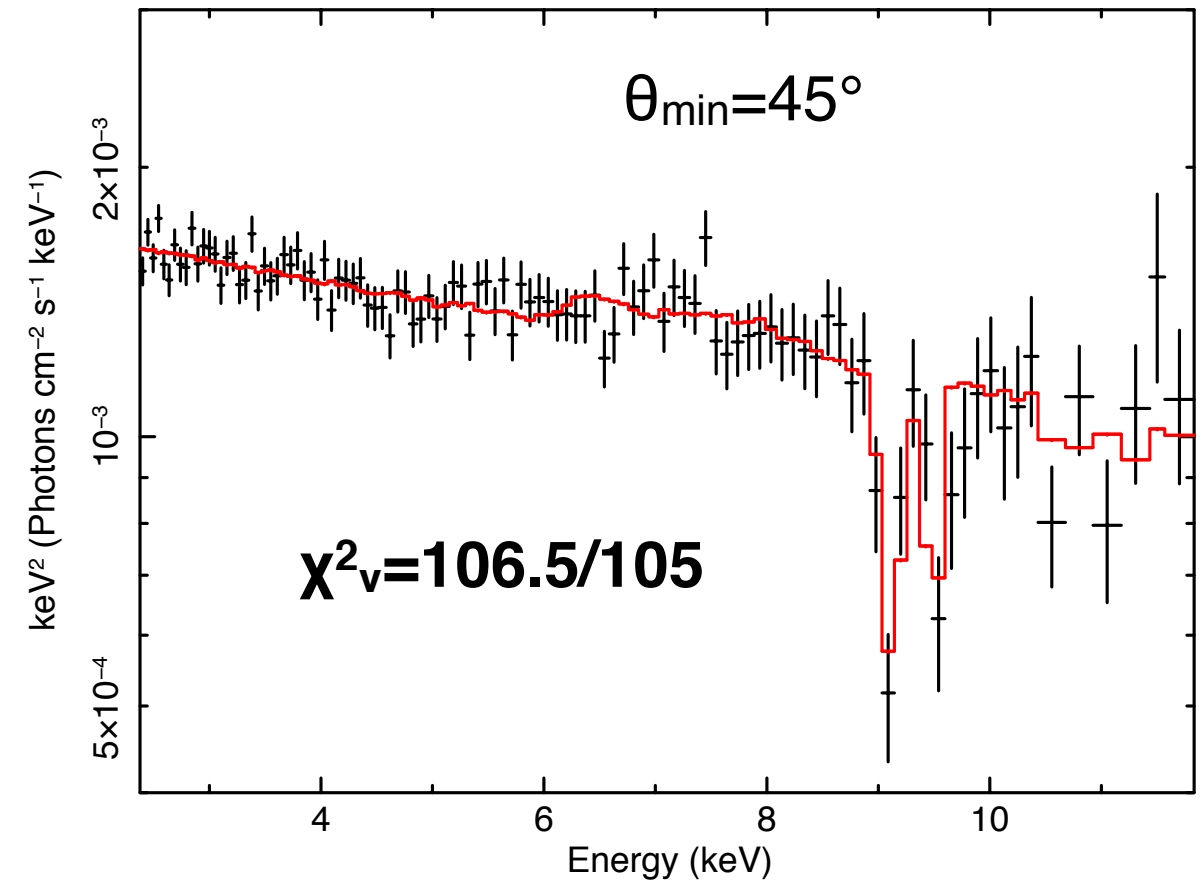
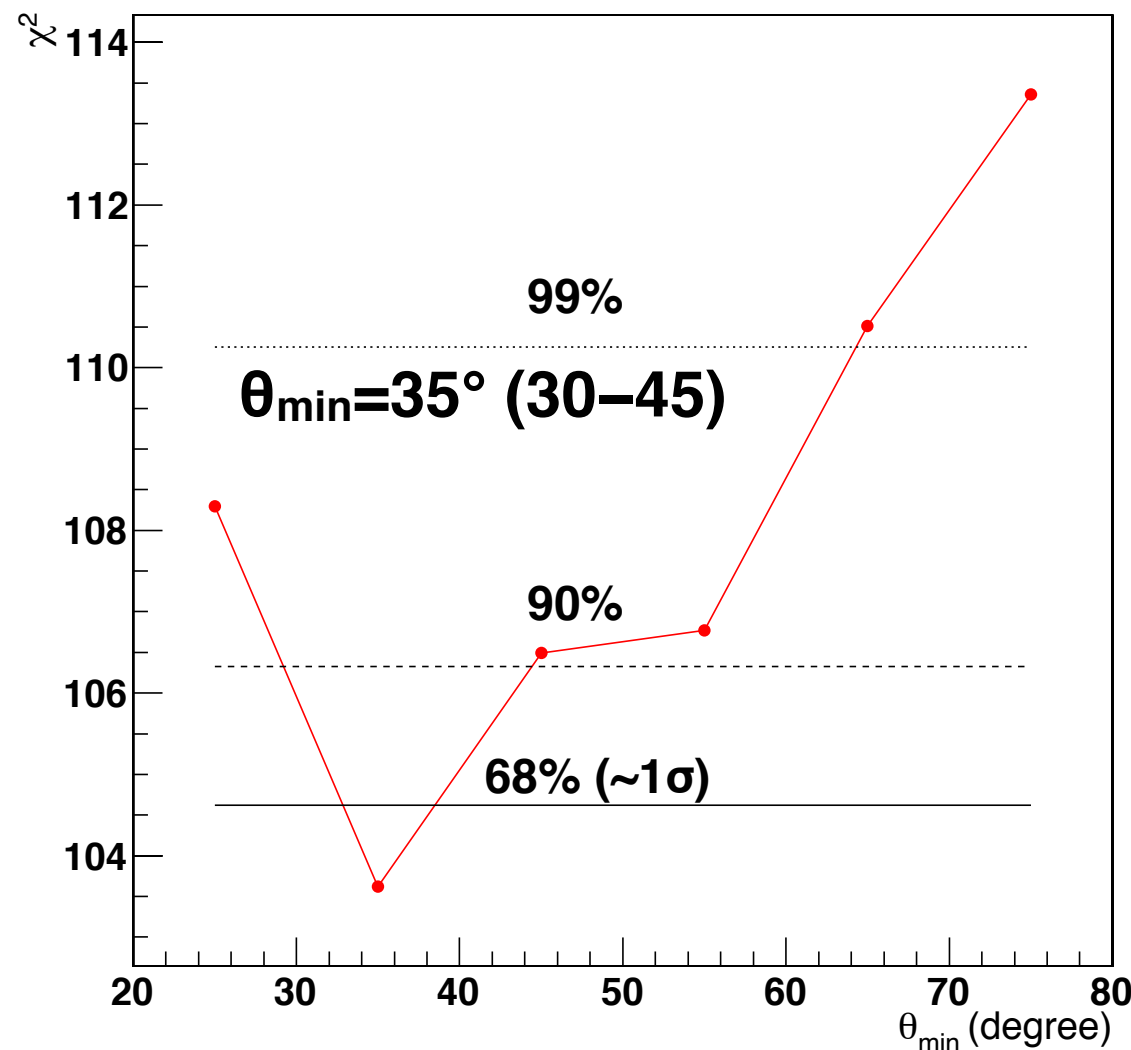
結論

- 超高速アウトフローのX線スペクトルモデルを新たに構築した
 - ✓ UV-line drivingの理論計算結果をもとに仮定したパラメータで、すざくによるPDS 456のすべての観測データをよく再現できた。
 - ✓ 吸収線スペクトルの変動は、終端速度と円盤風の角度の変化のみによって説明できる。これは、円盤風の不安定性を示唆している可能性がある。

PDS

2007年の観測データとの比較：輝線

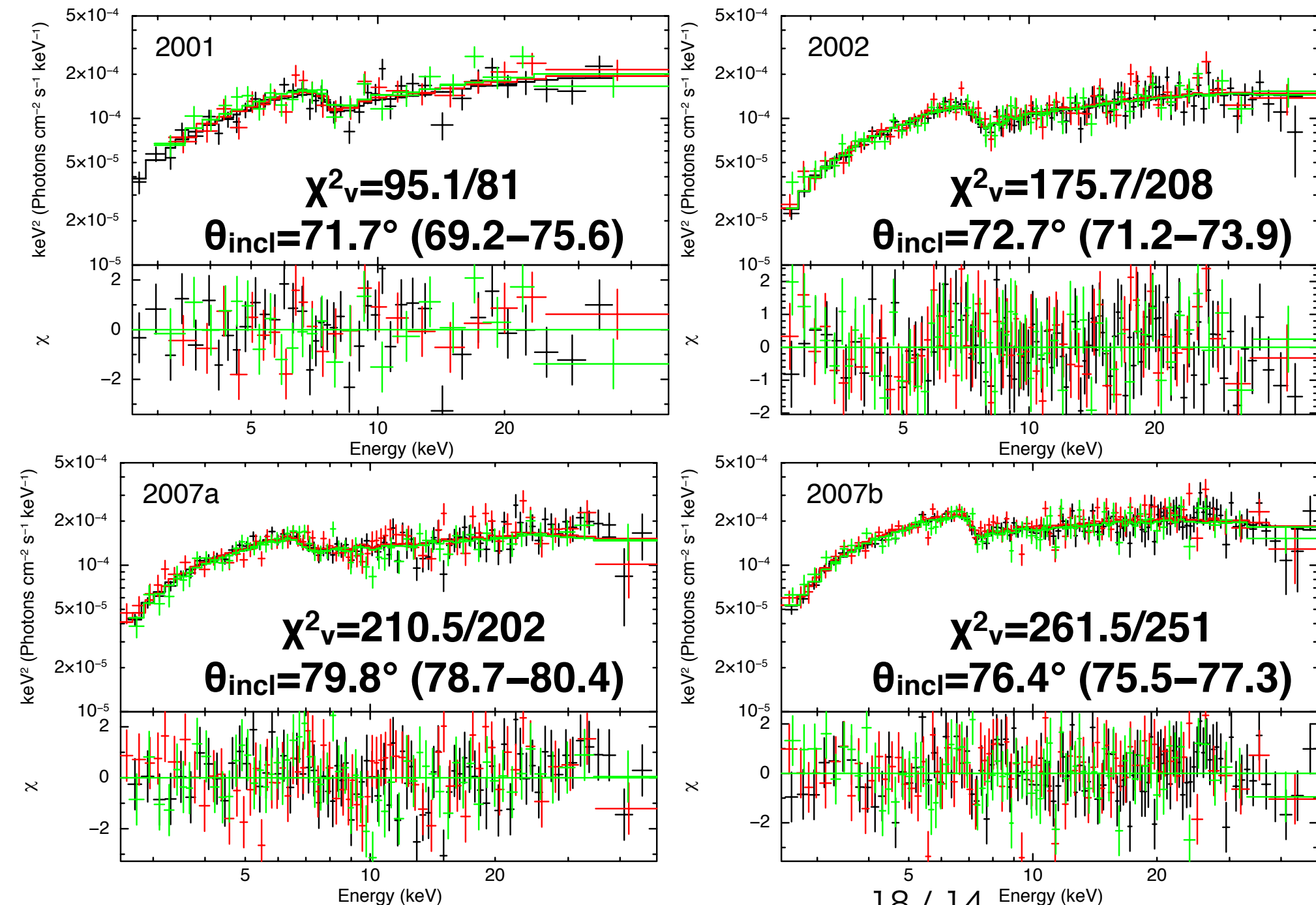
- 輝線も含めた広いエネルギー範囲(2.0-10 keV)で観測データと比較(v_∞ , $\dot{M}_{\text{wind}}$ は固定)
 - 輝線の赤方偏移成分の形状を使って円盤風の形状(θ_{min})を探ることができる
- ➡ 輝線において円盤風からの成分が支配的ならば、 $\theta_{\text{min}}=30^\circ\text{--}45^\circ$ に制限できる



APM

異なる観測時期のデータのモデル化

- 質量放出率 $\dot{M}_{\text{wind}}=70M_{\odot}/\text{yr}$, 終端速度 $v_{\infty}=0.4c$ で固定し、観測者の視線方向 θ_{incl} だけを観測ごとに変えた
- ➡ **円盤風の放出角度に対する視線方向の角度を変えるだけで全ての観測データを再現**

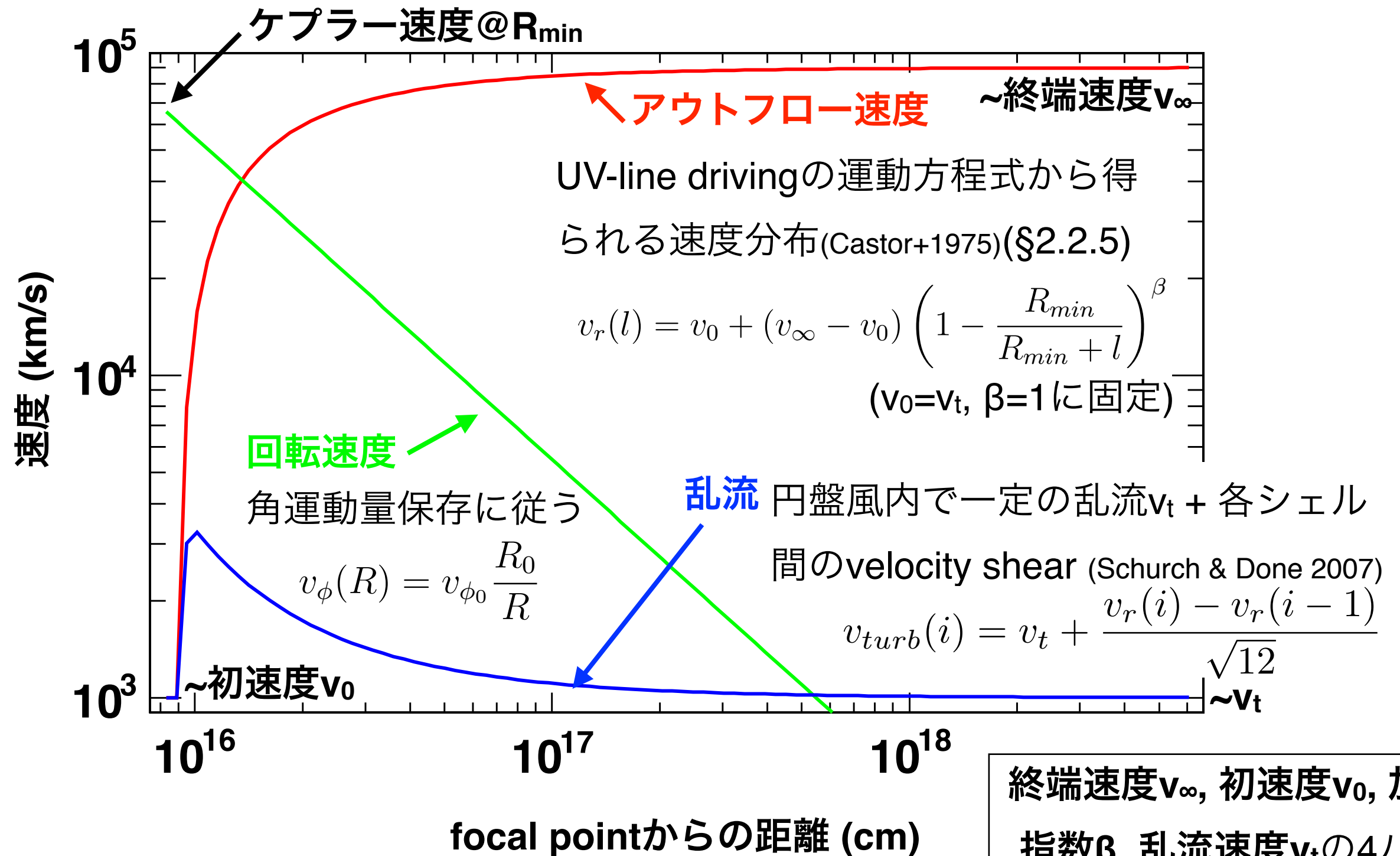


➡ **PDS 456と同様に
円盤風の放出角度
の変動でスペクトル
の変化を説明可能**

Model setup

密度・速度分布

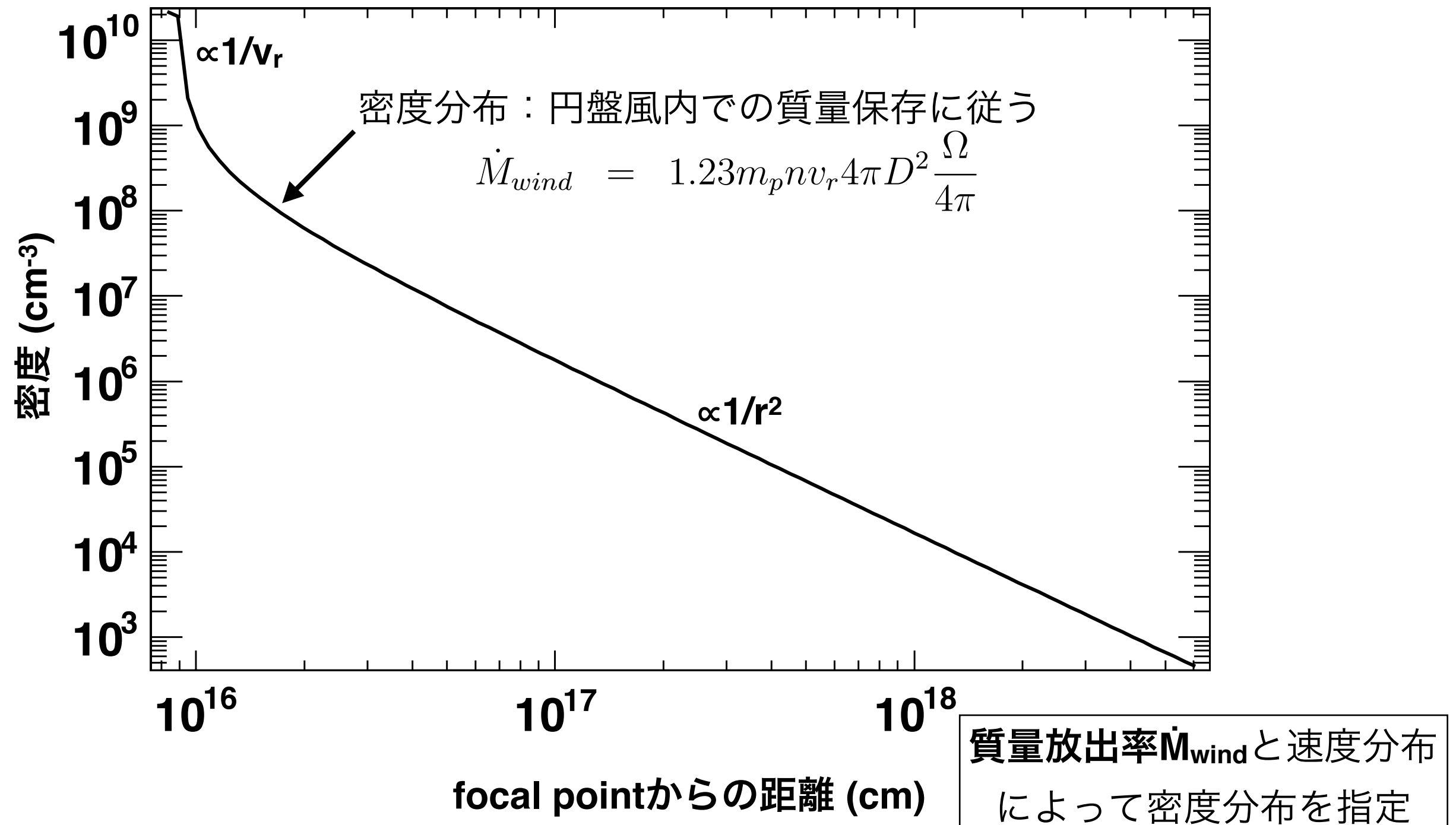
- アウトフロー方向にシェル状に分割し、各シェル内で一定の速度・密度を仮定



終端速度 v_{∞} , 初速度 v_0 , 加速指数 β , 乱流速度 v_t の4パラメータで速度分布を指定

密度・速度分布

- 速度分布から密度分布を計算



Discussion

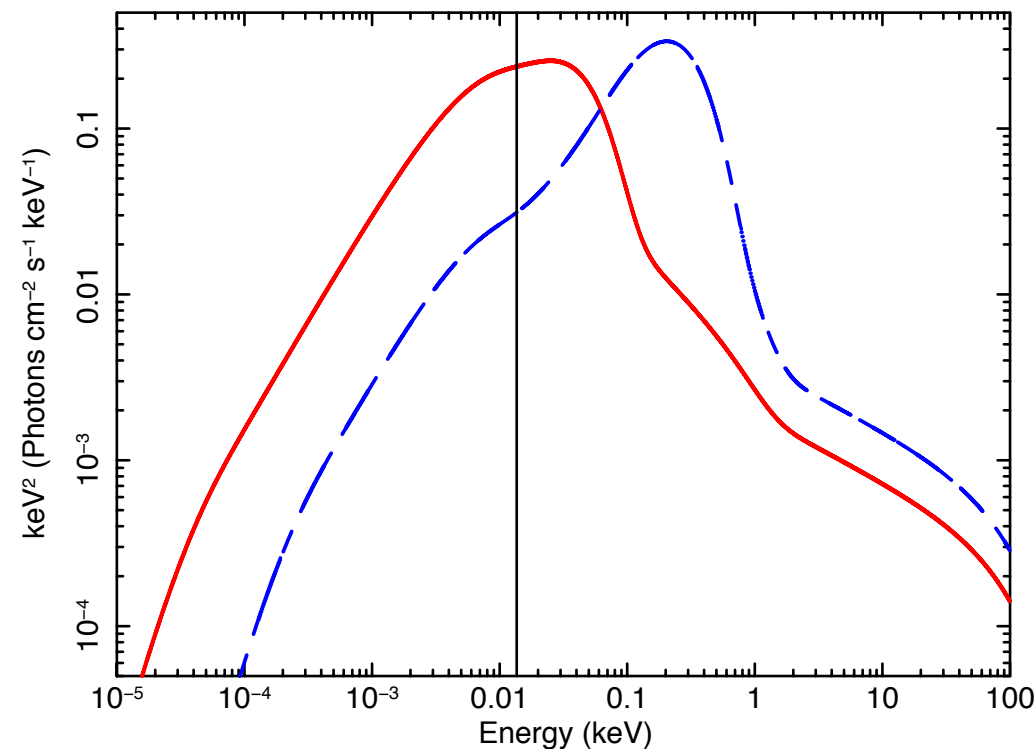
超高速アウトフローの統一描像

- UV-line drivingでは、 $\dot{M}_{\text{wind}}/\dot{M}_{\text{Edd}} \sim 0.2$ の物質を放出できる(Laor & Davis)
- ➡ PDS 456 ($\dot{M}_{\text{wind}}/\dot{M}_{\text{Edd}} = 0.13 (> 0.08)$), APM 08279+5255 ($\dot{M}_{\text{wind}}/\dot{M}_{\text{Edd}} = 0.17 - 0.21$)のどちらの結果もUV-line drivingの理論計算結果とコンシステント
UV-line drivingにもとづくシミュレーション結果(Laor & Davis)

L/L_{Edd}	a^1	$\dot{M}_{\text{in}}^2$	$\dot{M}_{\text{acc}}^3$	$\dot{M}_{\text{wind}}^4$
0.3	0	0.302	0.515	0.21
	0.9	0.302	1.174	0.87
1.0	0	1.007	2.282	1.09
	0.9	1.007	5.588	4.58

- 従来の研究では、超高速アウトフローの変動は「柱密度または電離状態が変わっている(Gofford+ 2014)」というように、何の物理的描像もない説明だった
- 本研究では、円盤風の速度と放出角度だけが変化するという新たな描像が得られた
- この描像では超高速アウトフローが定常的に存在すると考えられる→**周辺環境へ莫大なエネルギーを供給**

超高速アウトフローの形成過程への示唆



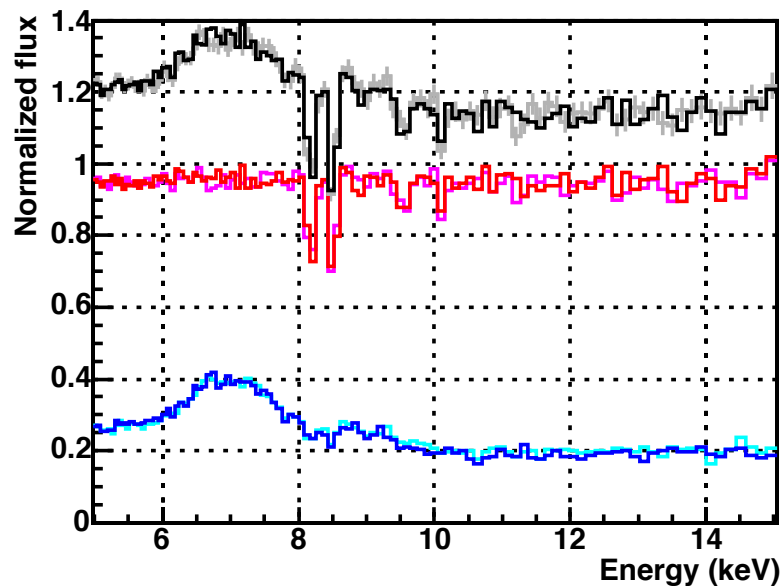
- PDS($\sim 10^9$), APM($\sim 10^{10}$)はUVで明るい&Xで暗い $\rightarrow$ 大質量AGNではUV-line driving?
- 10^6 のAGNだとUVで暗く、Xで明るい $\rightarrow$ xUV-line drivingではない?

parameter dependence

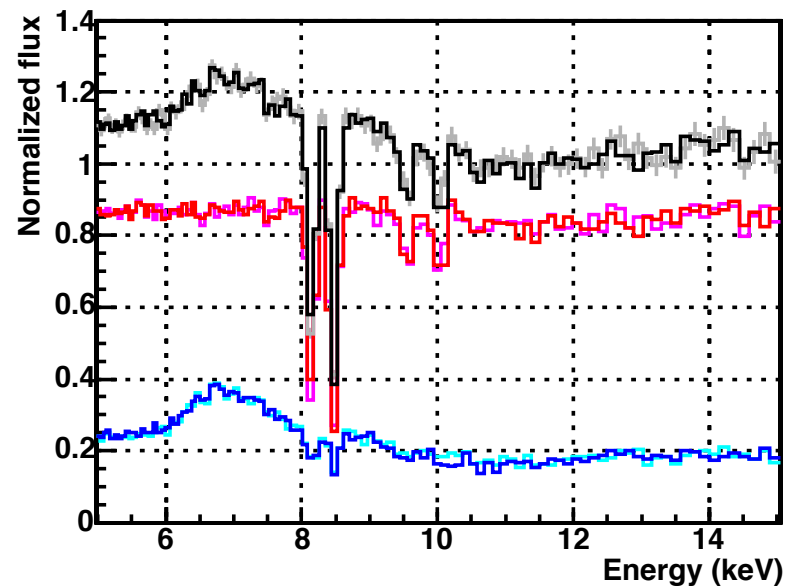
Self-similarity (M_{BH} 依存性)

- $M_{\text{BH}}=2e9$, $L_x=1.6e45$, $\Gamma=2.6$, $M=15$, $v=0.5c$
➡ $M_{\text{BH}}=5e6$, $L_x=4e42$, $\Gamma=2.6$, $M=0.0375$, $v=0.5c$

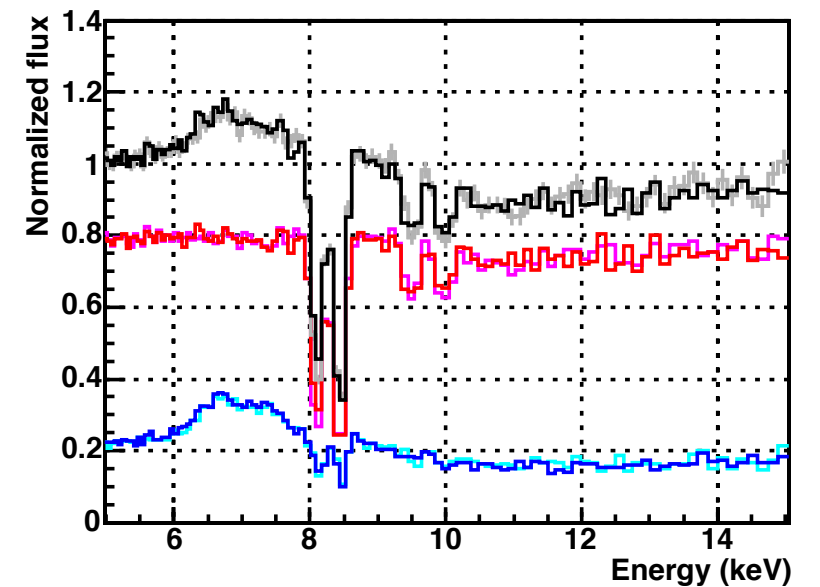
45–47 deg



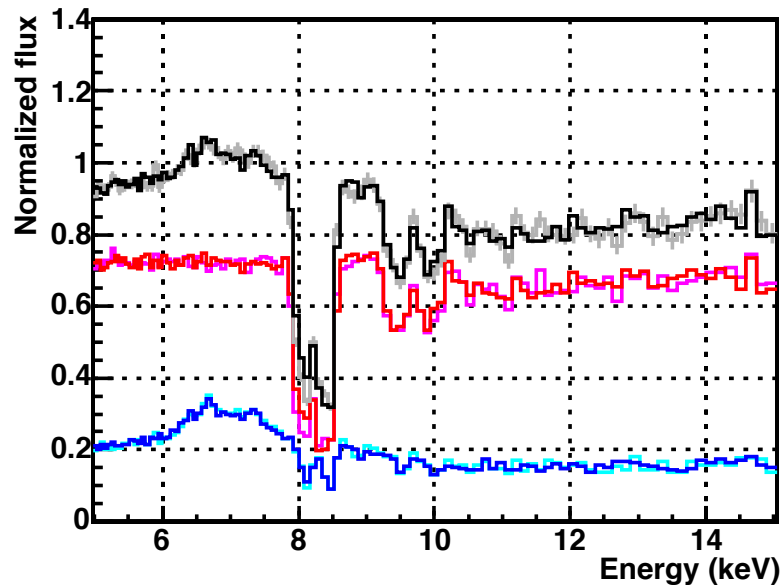
47–49 deg



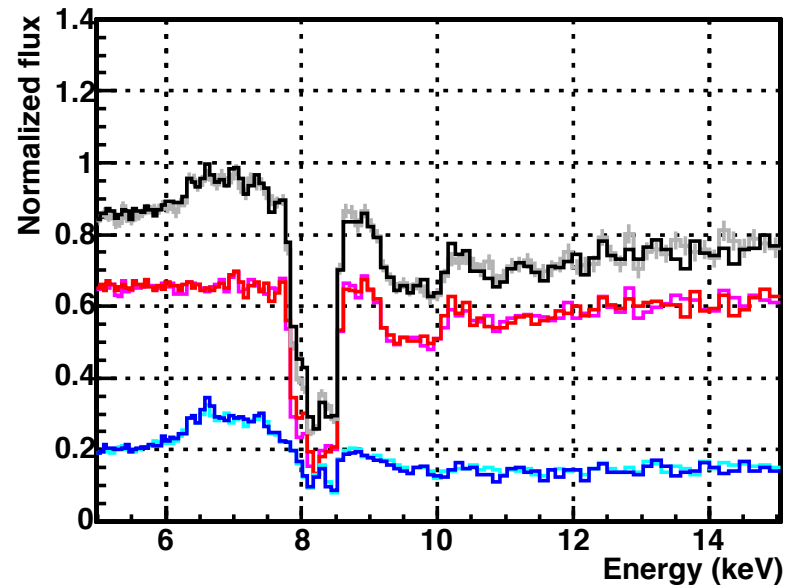
49–51 deg



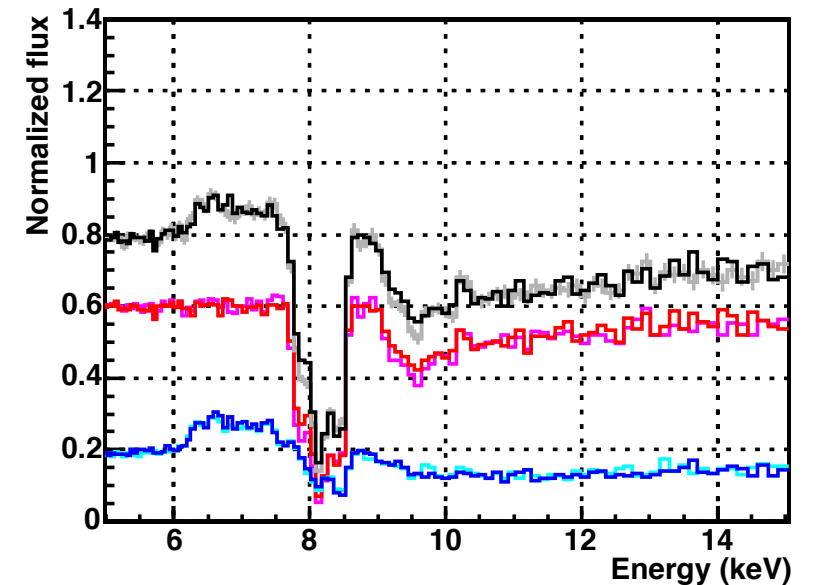
51–53 deg



53–55 deg



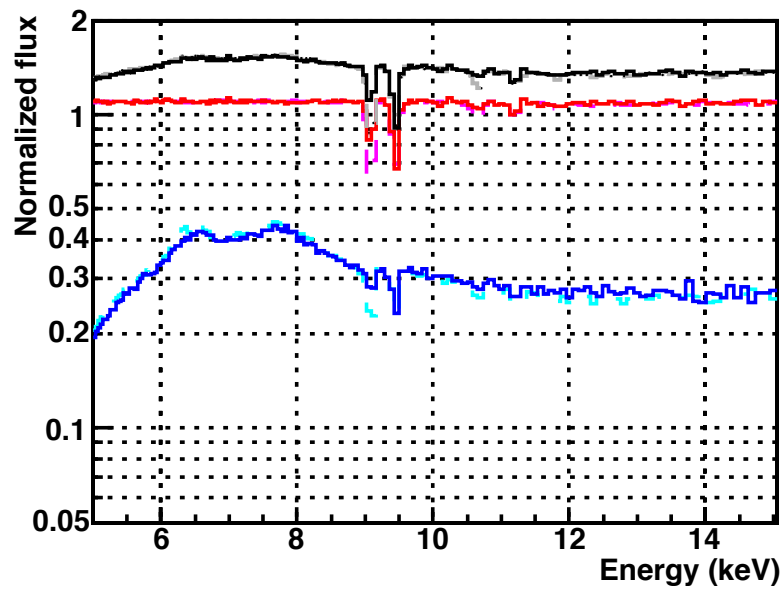
55–57 deg



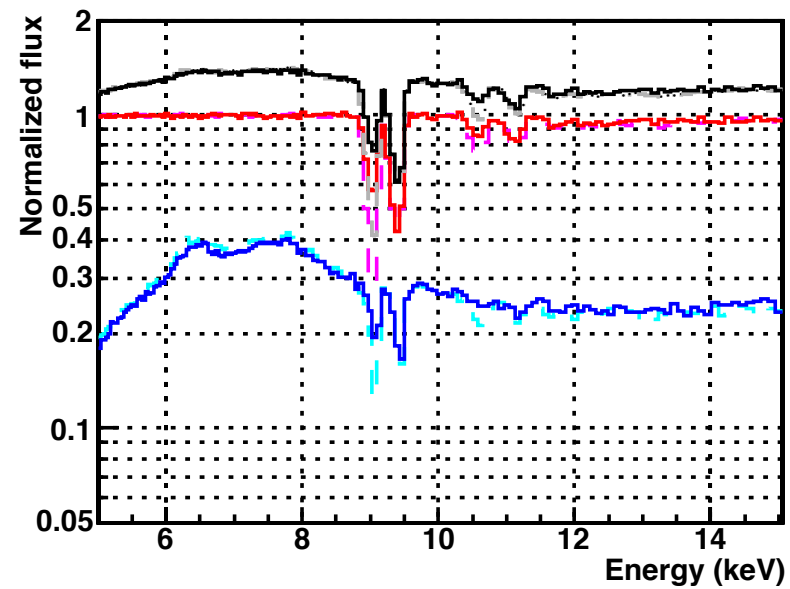
「依存性

- $\Gamma=2.5 \rightarrow 2.4$
- 電離状態(吸収線の比)が変わる (高エネルギー光子が増え、より電離)

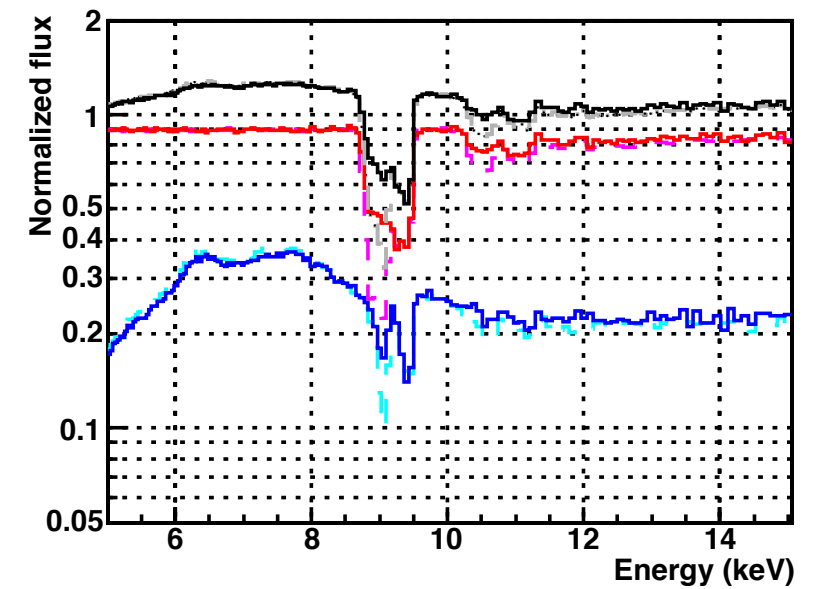
45–47 deg



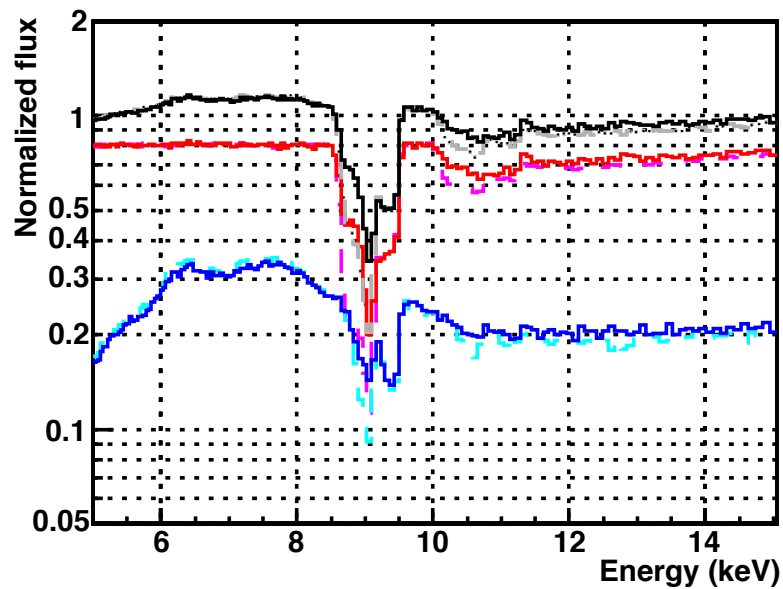
47–49 deg



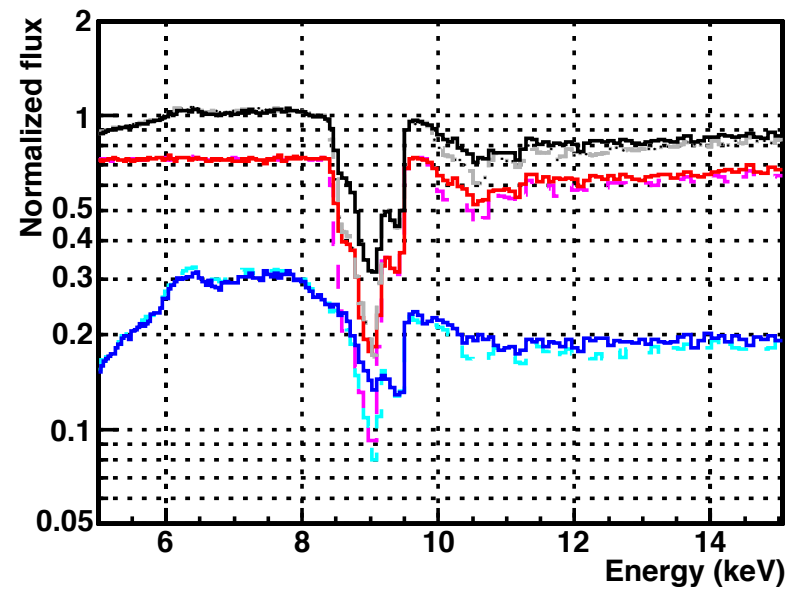
49–51 deg



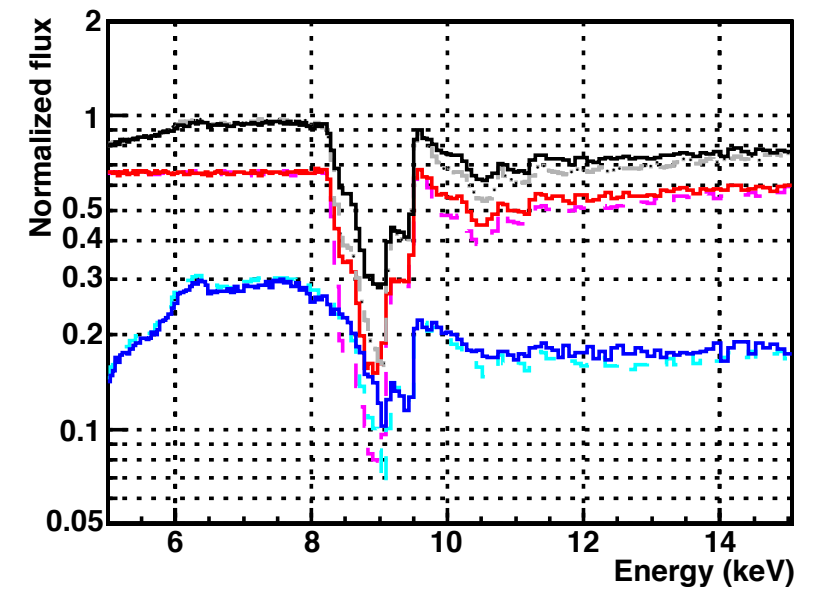
51–53 deg



53–55 deg



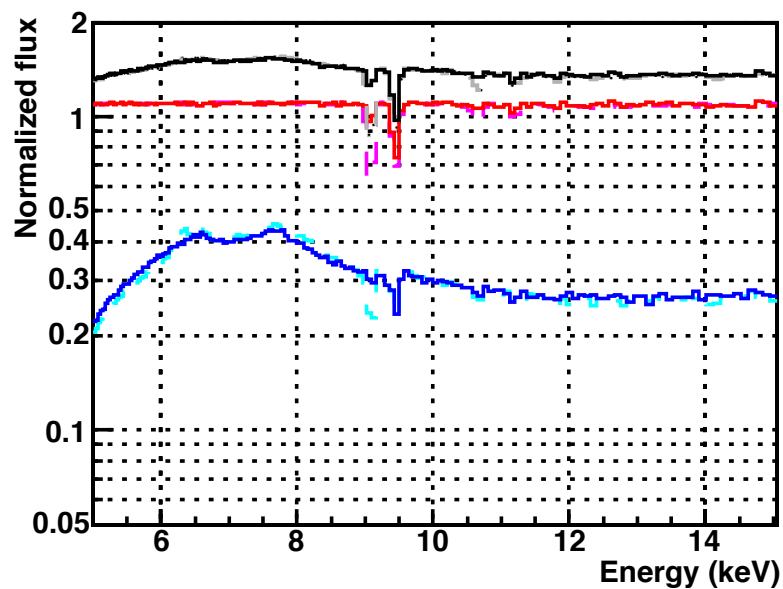
55–57 deg



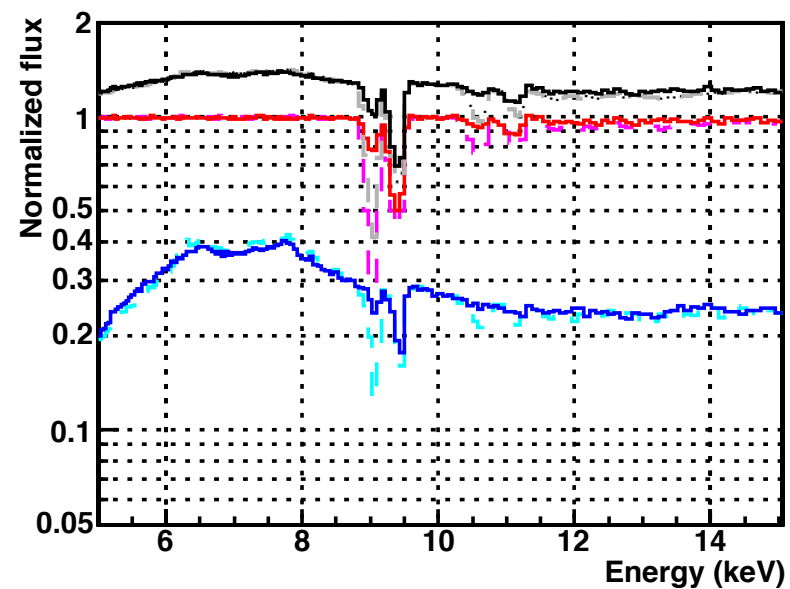
L依存性

- $L_x = 1e44 \rightarrow 4e44$ erg/s
- 電離状態(吸収線の比)が変わる (より電離)

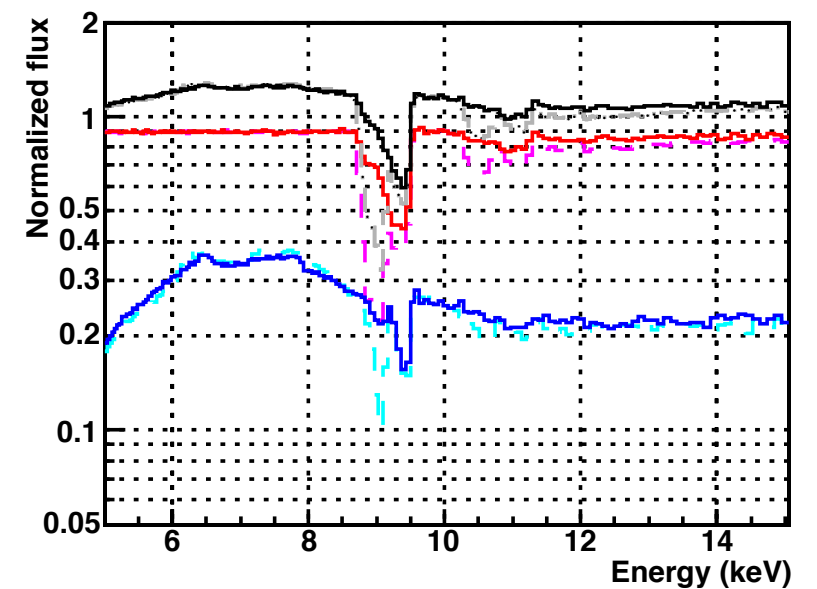
45–47 deg



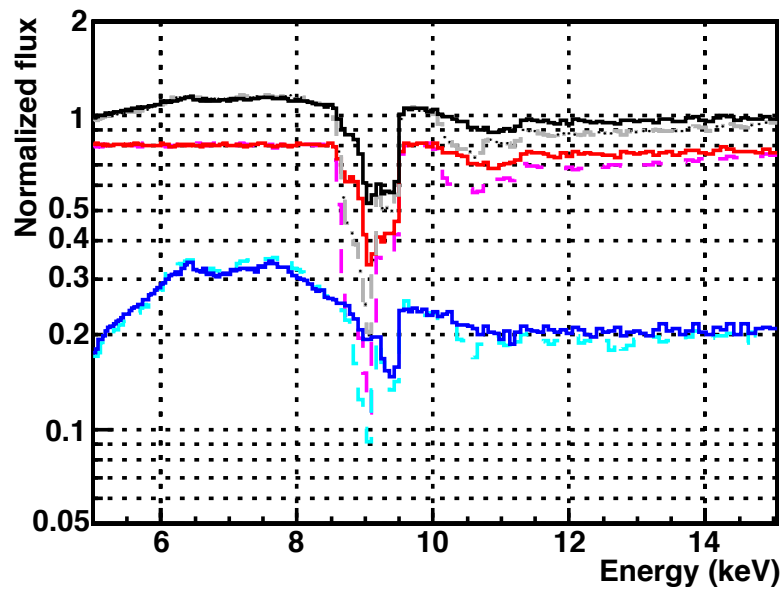
47–49 deg



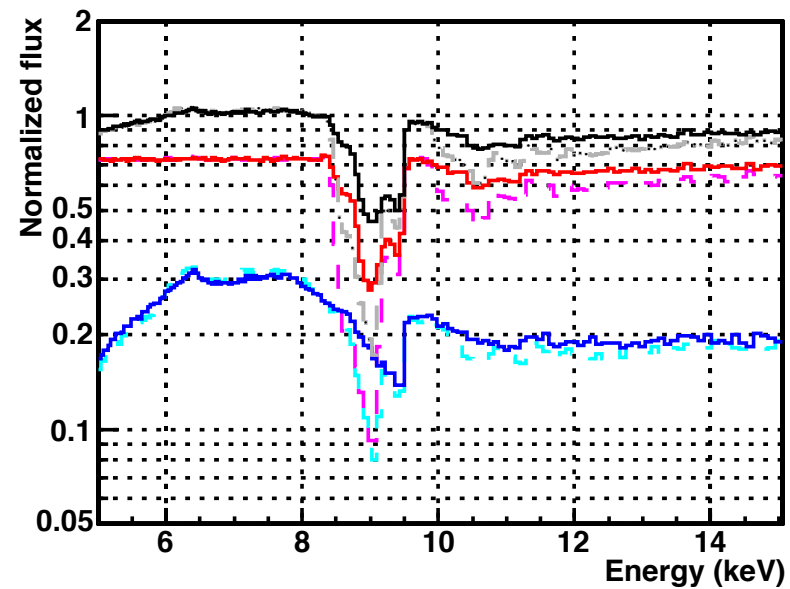
49–51 deg



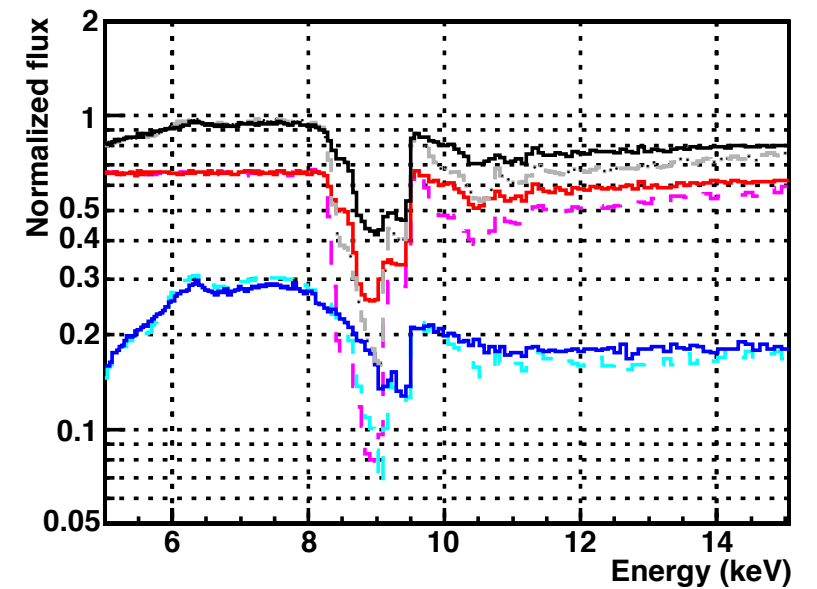
51–53 deg



53–55 deg



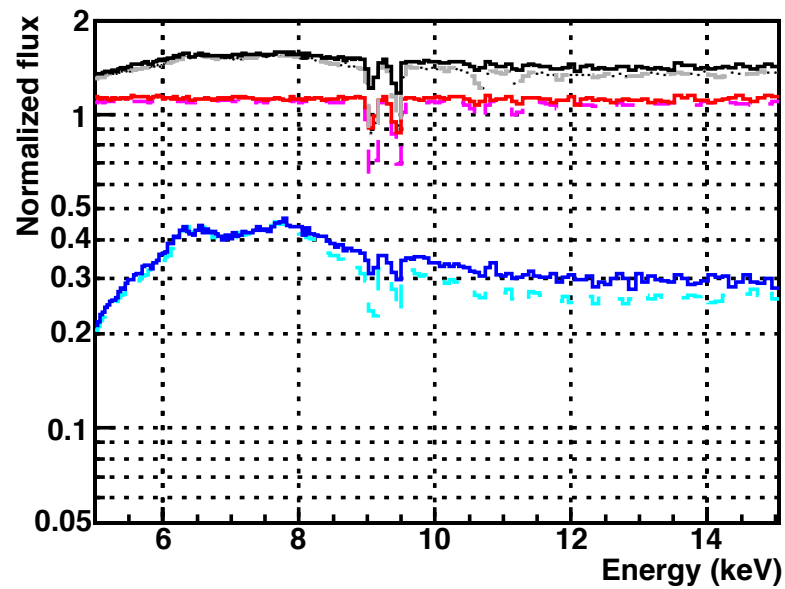
55–57 deg



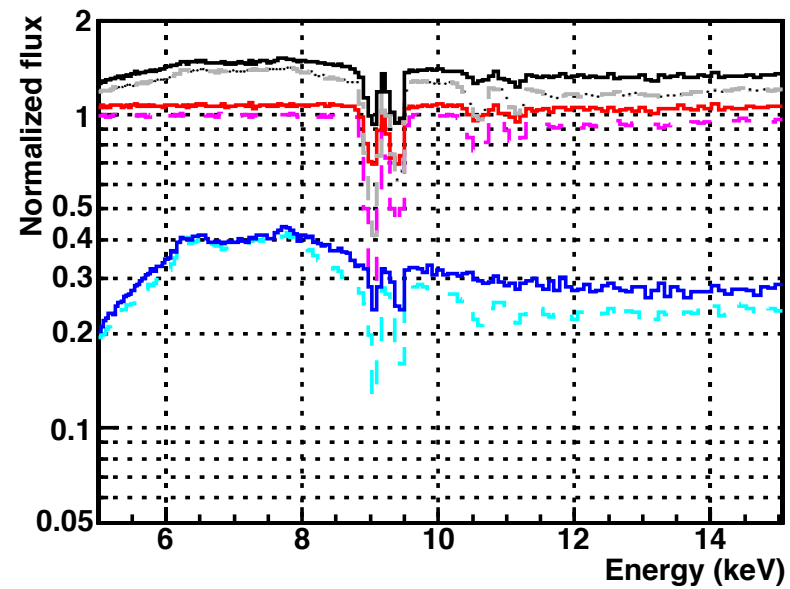
Ω 依存性

- $\Omega=0.15 \rightarrow 0.30$
- column densityが減る。電離度少し上昇。

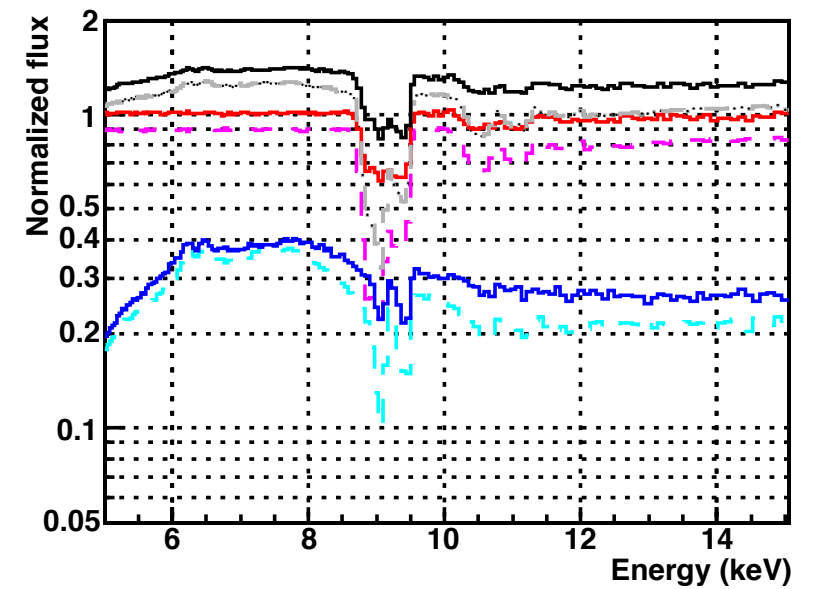
45–47 deg



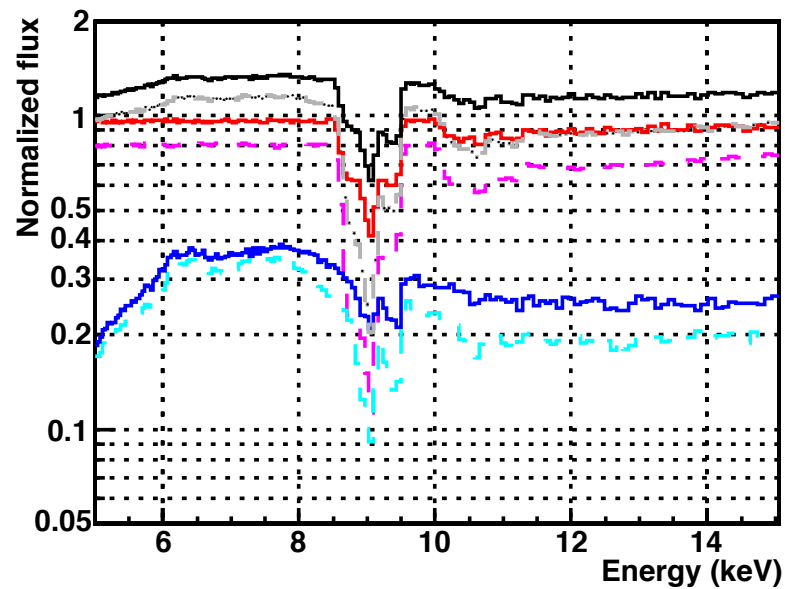
47–49 deg



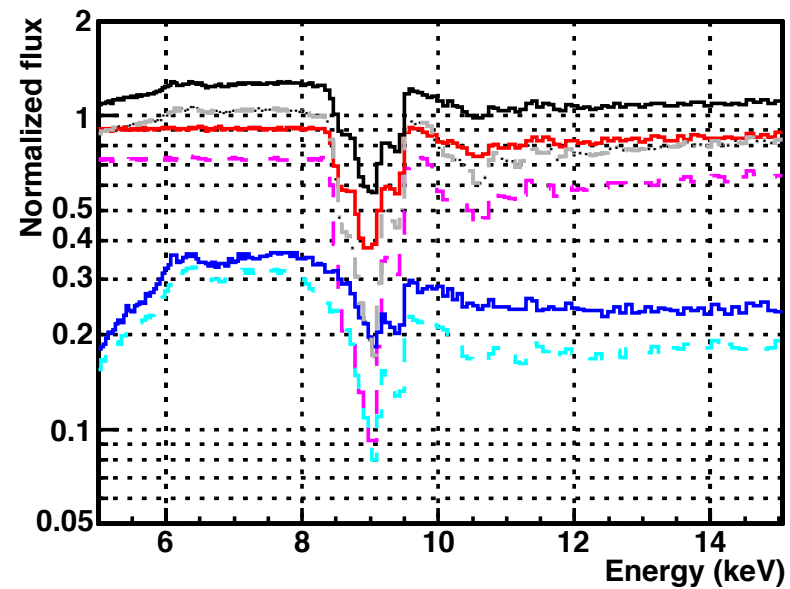
49–51 deg



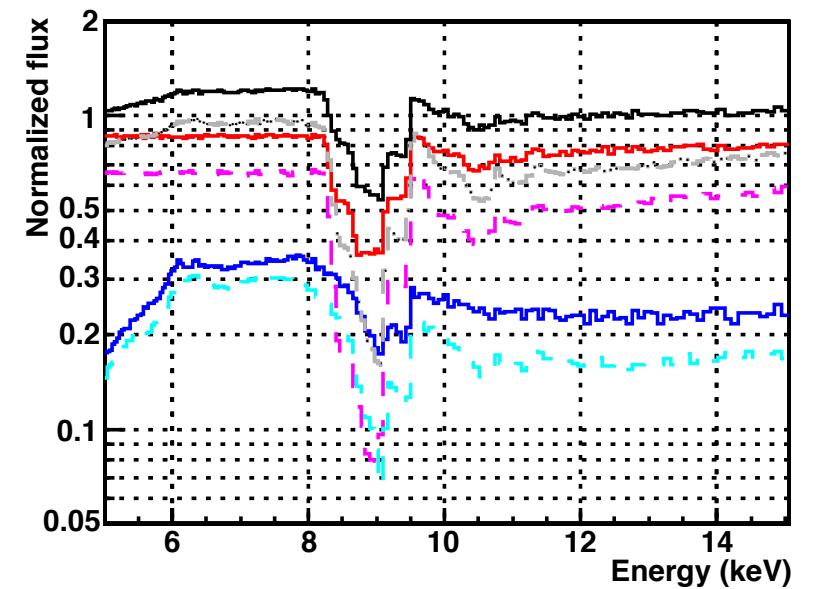
51–53 deg



53–55 deg



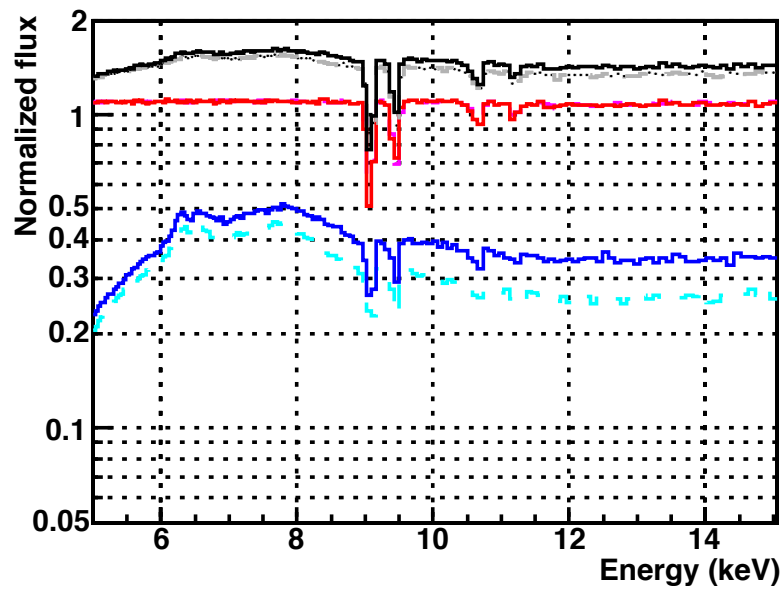
55–57 deg



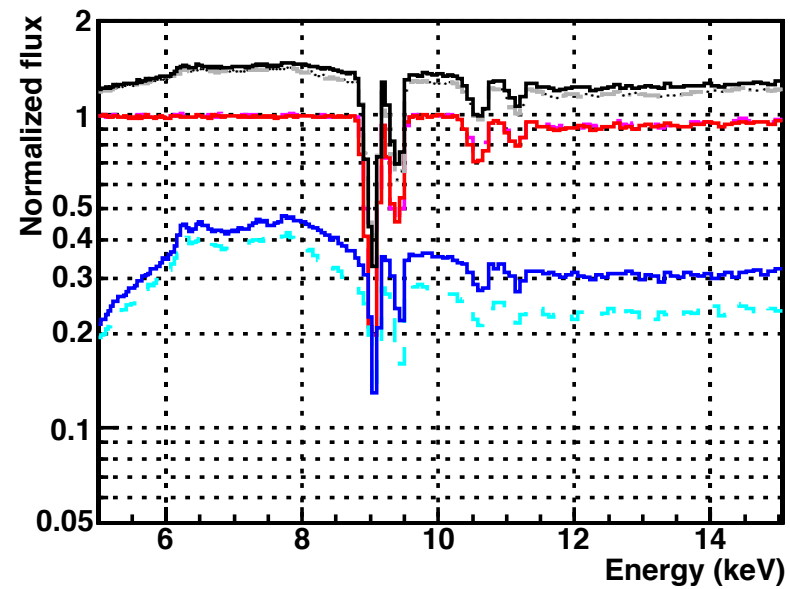
Ω 依存性2

- $\Omega=0.15 \rightarrow 0.30$ & $\dot{M}=10 \rightarrow 20 \text{ M}_{\odot}/\text{yr}$ ($n=\text{const}$)
- reprocessed成分が増える

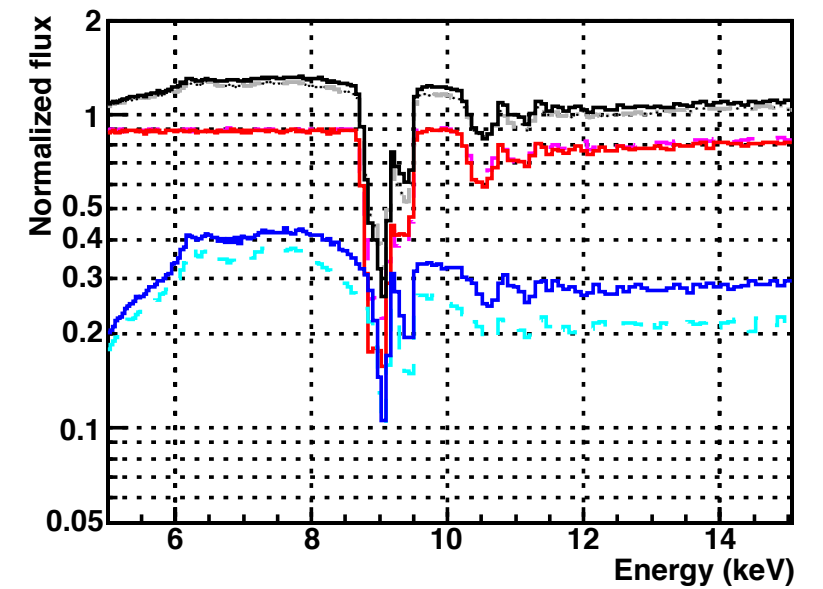
45–47 deg



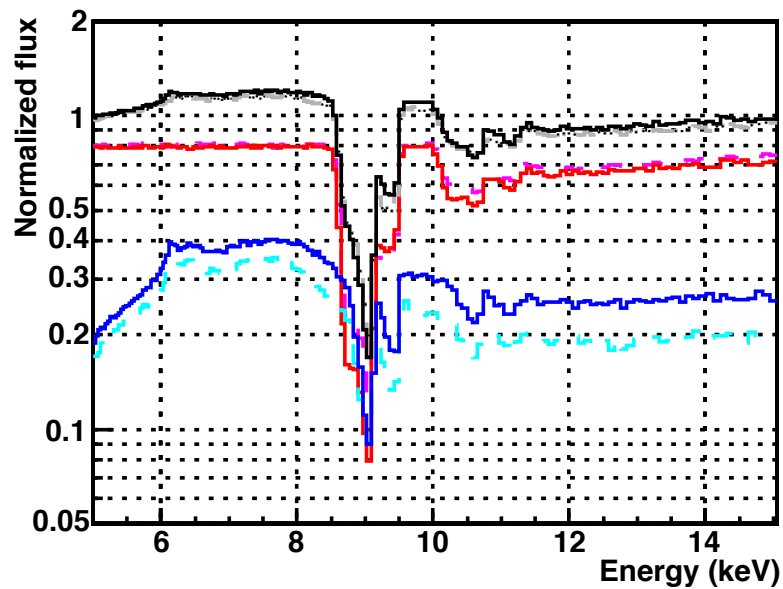
47–49 deg



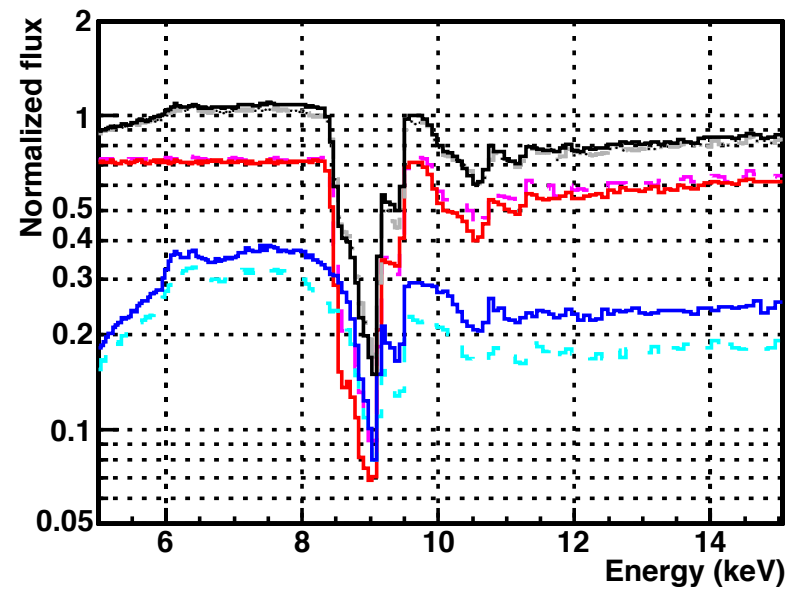
49–51 deg



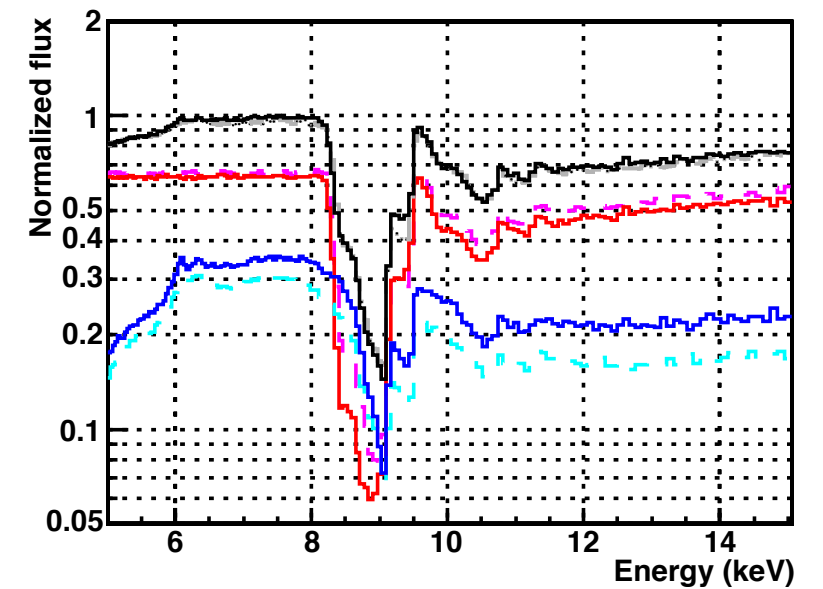
51–53 deg



53–55 deg



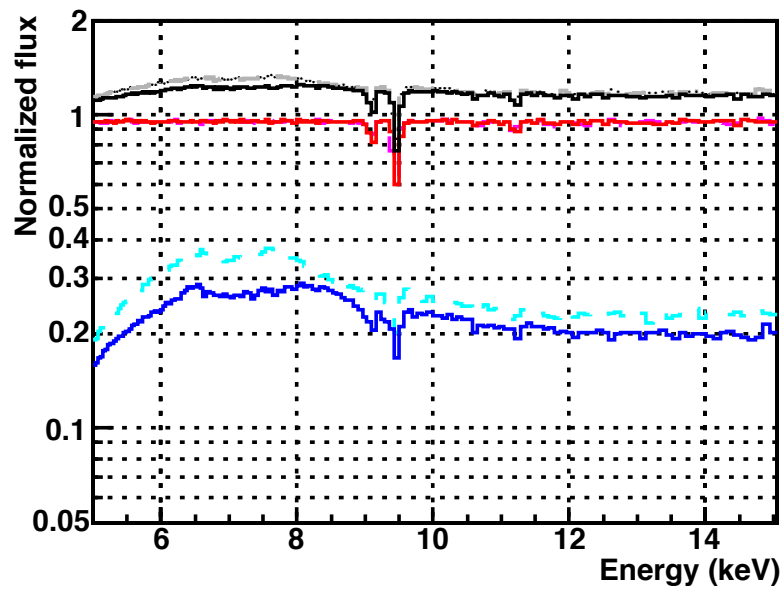
55–57 deg



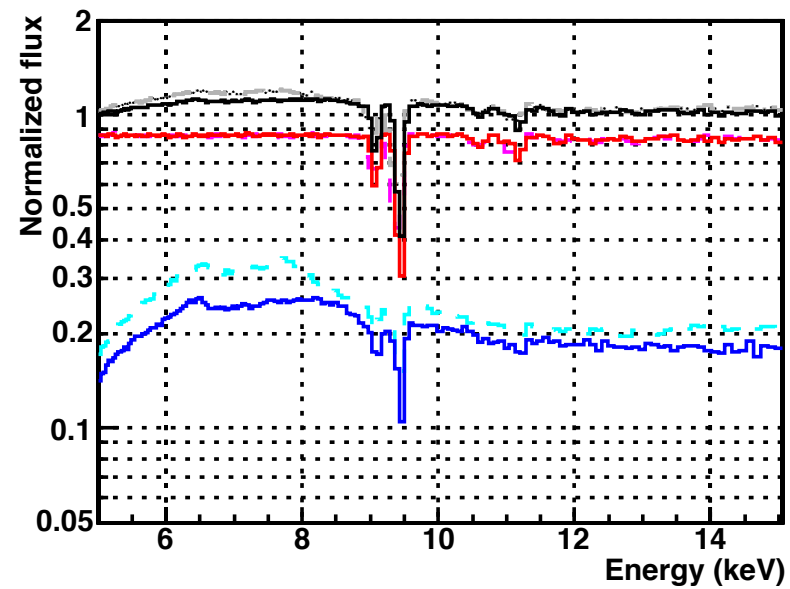
β 依存性

- $\beta=1 \rightarrow 0.5$
- 大きな θ_{incl} でも吸収線が細い+reprocessedが減る

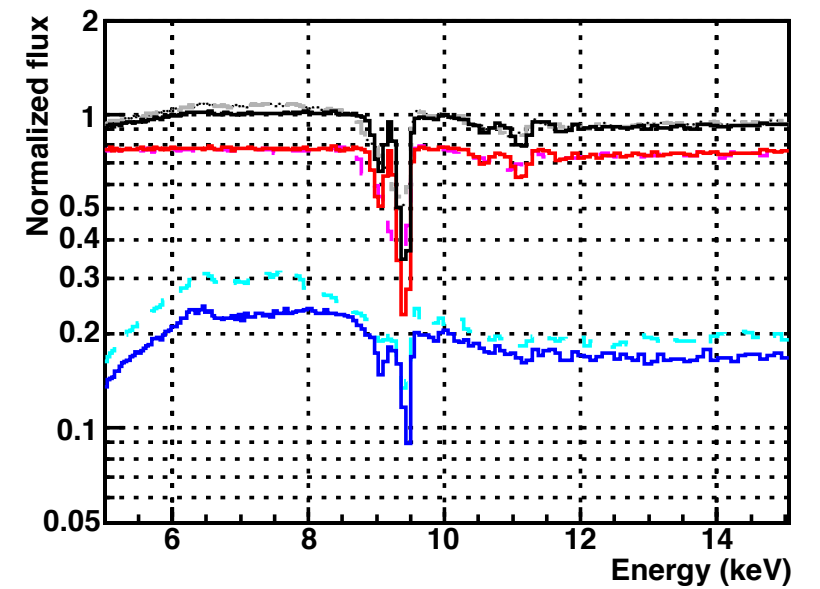
45–47 deg



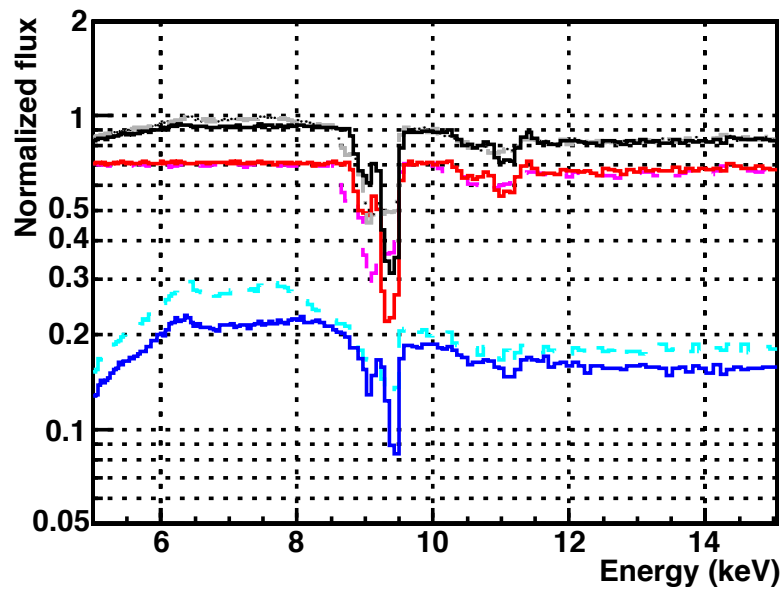
47–49 deg



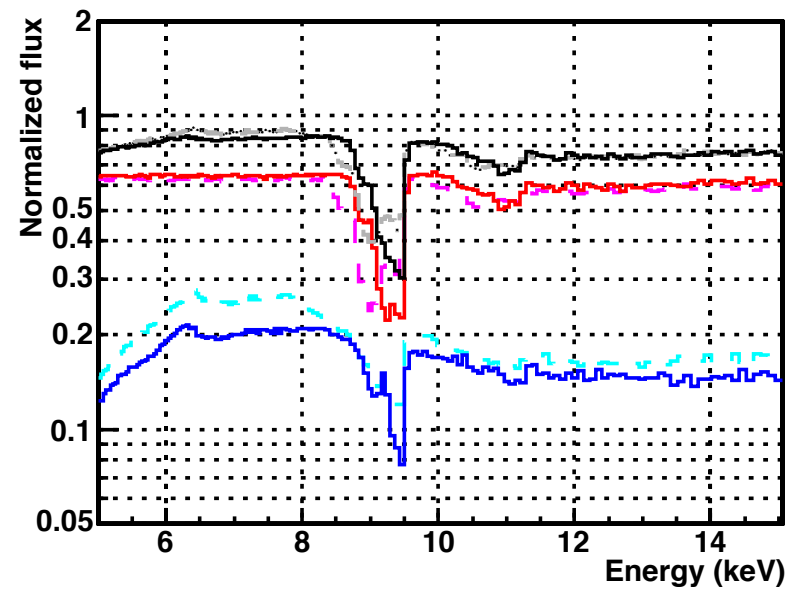
49–51 deg



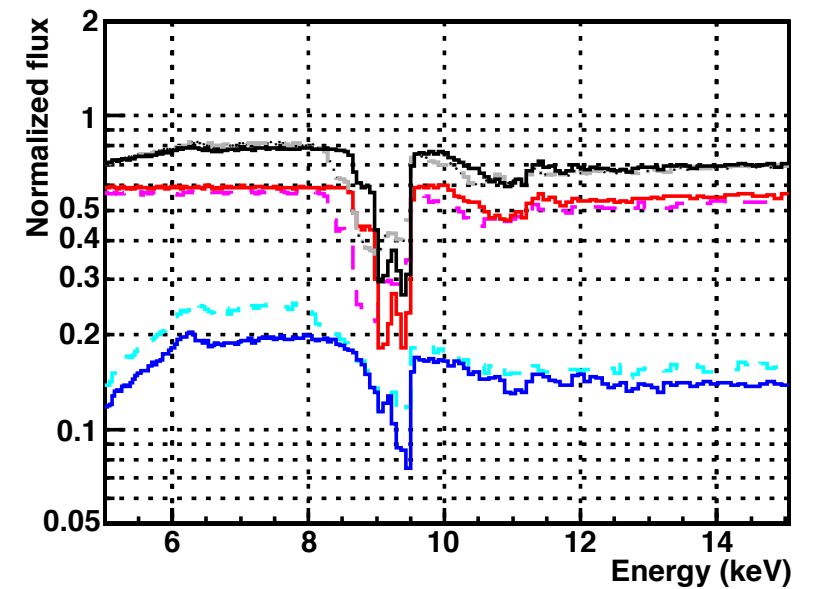
51–53 deg



53–55 deg



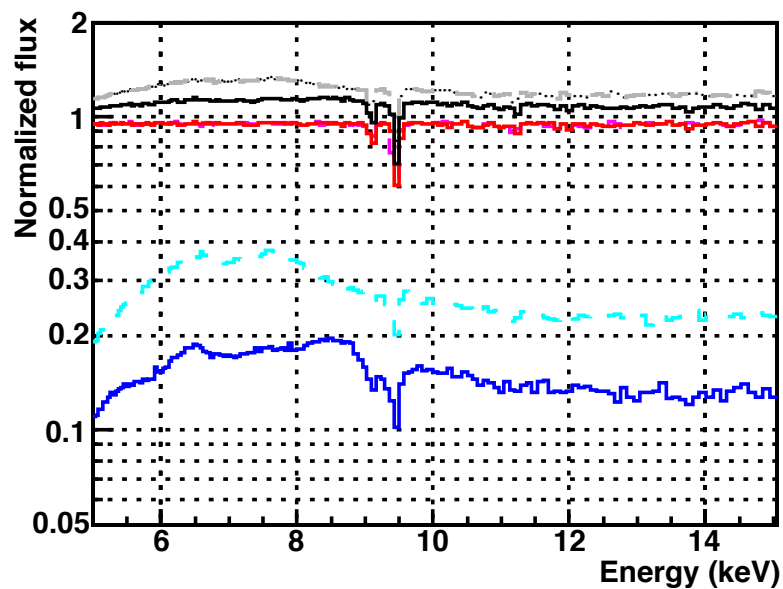
55–57 deg



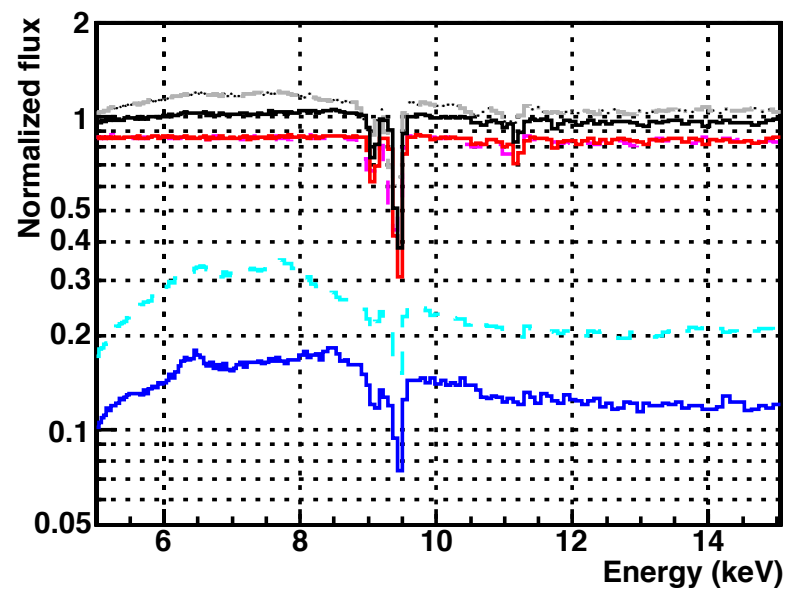
v_0 依存性

- $v_0=1000 \text{ km/s} \rightarrow 0.15c (=45000 \text{ km/s})$
- 大きな θ_{incl} でも吸収線が細い+reprocessedが減る

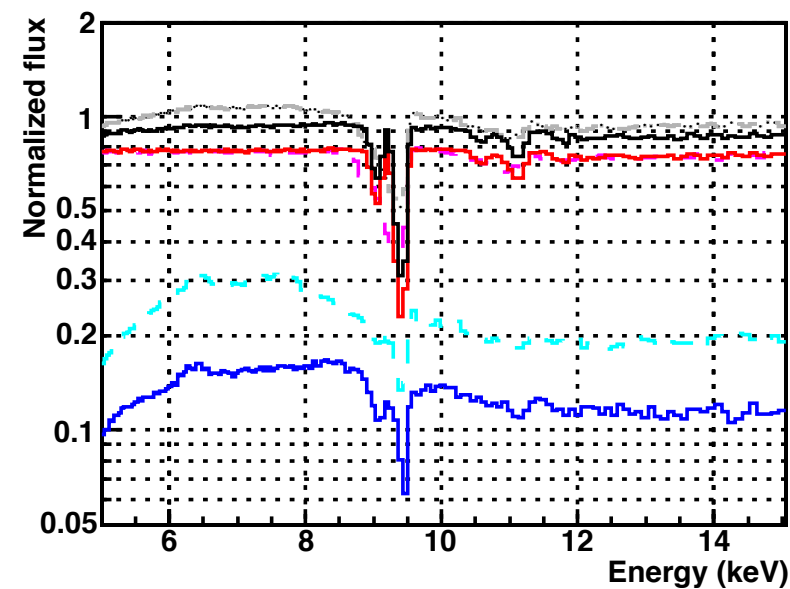
45–47 deg



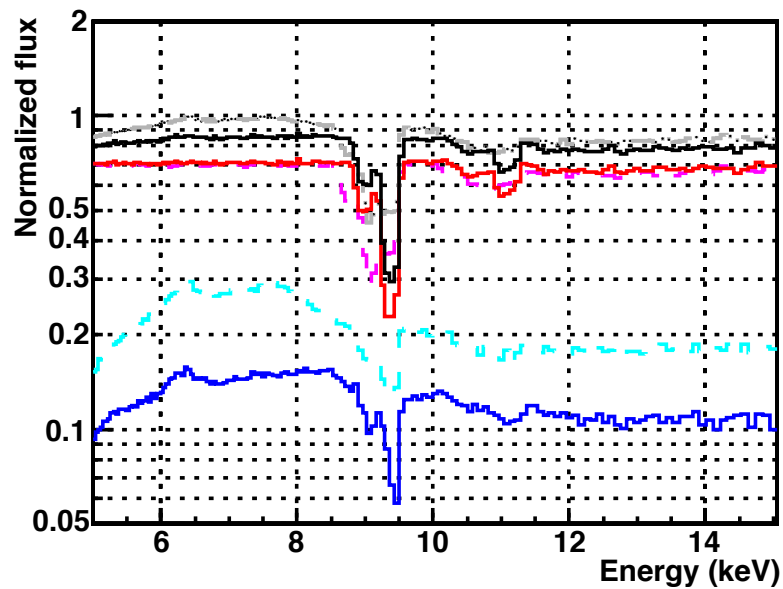
47–49 deg



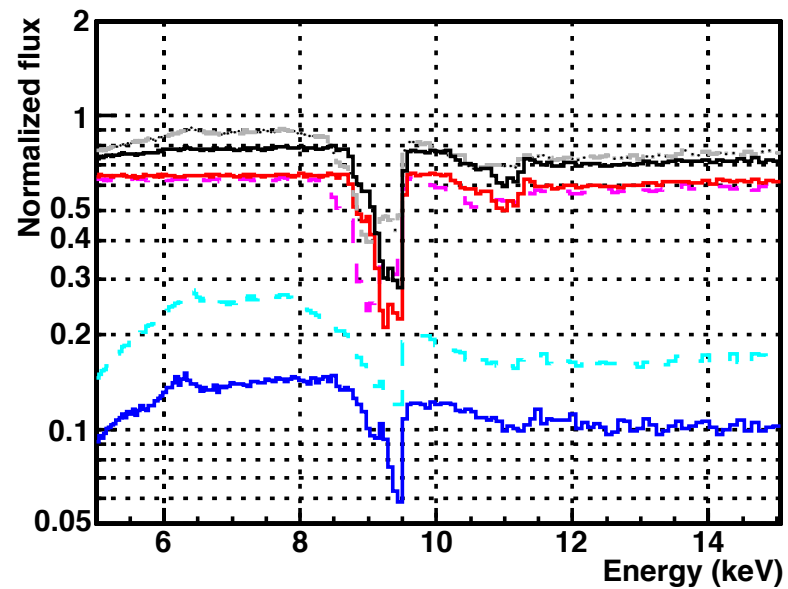
49–51 deg



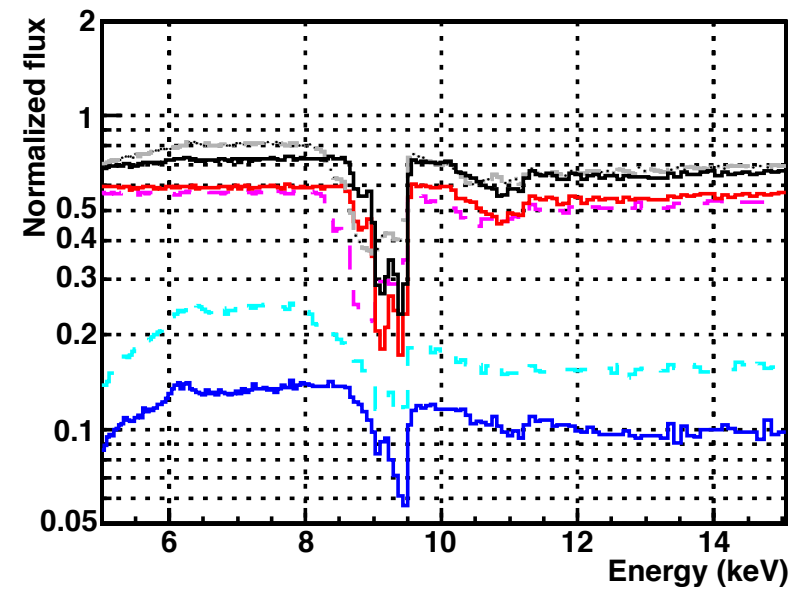
51–53 deg



53–55 deg



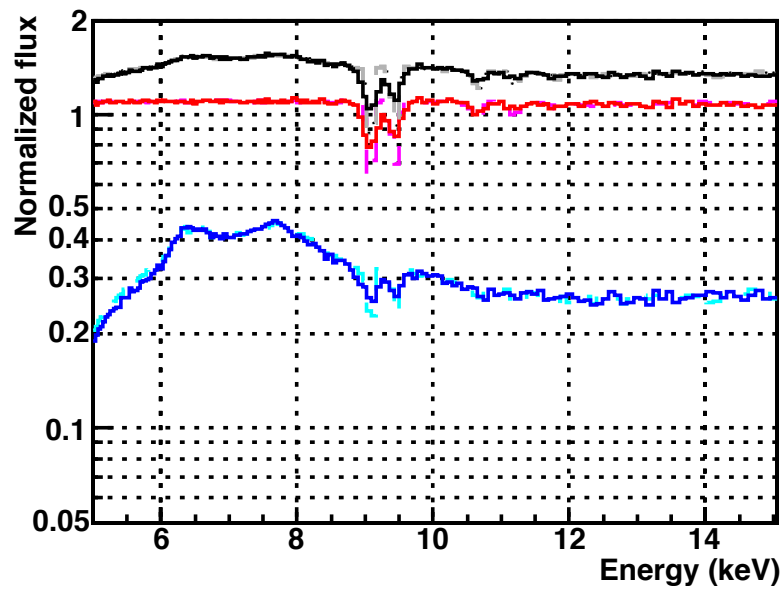
55–57 deg



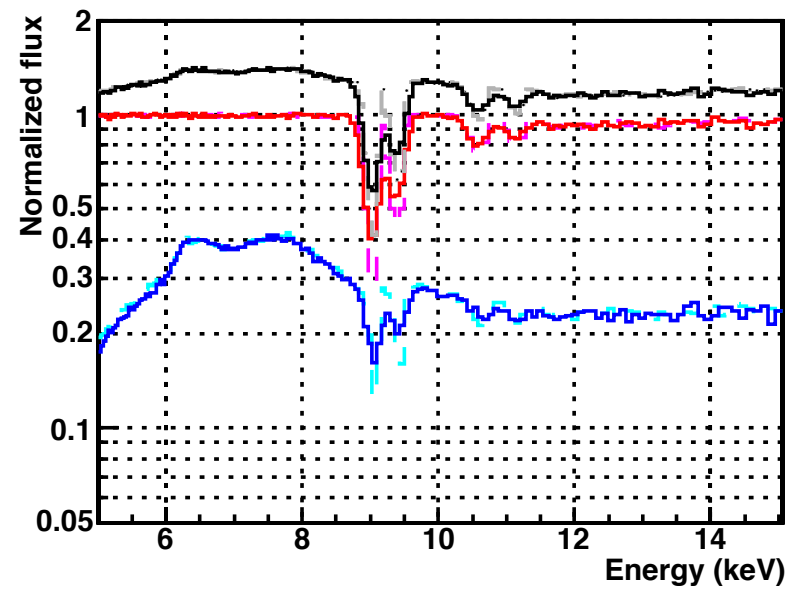
v_t 依存性

- $v_t=1000 \text{ km/s} \rightarrow 5000 \text{ km/s}$
- 吸収線が太くなるが、大きな $\theta_{\text{incl}}(\geq 50^\circ)$ では変わらない

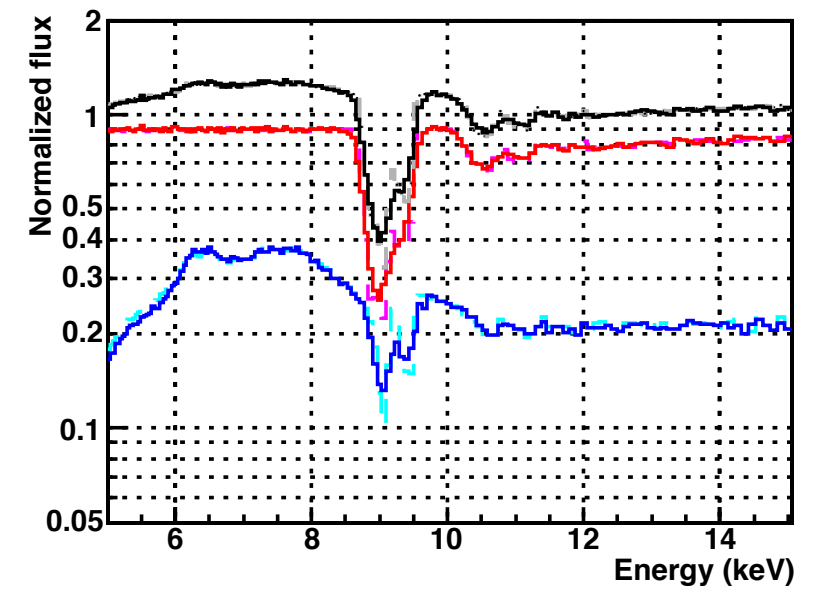
45–47 deg



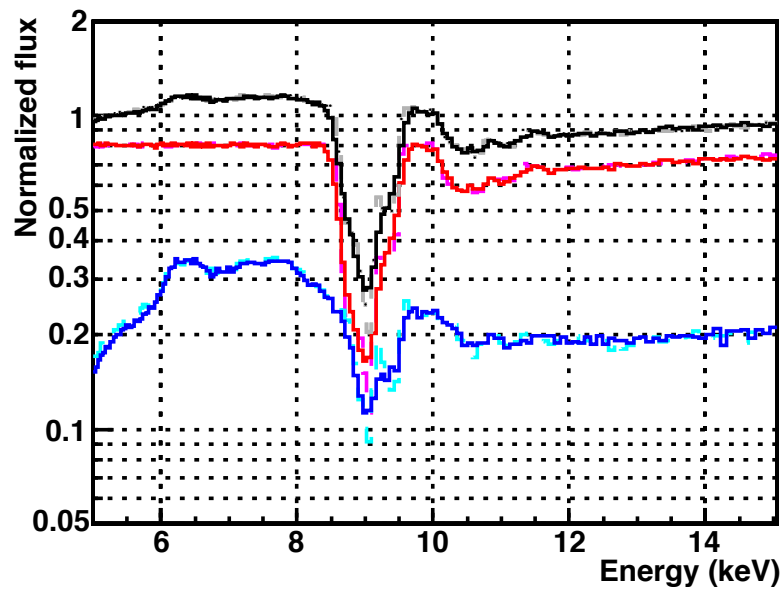
47–49 deg



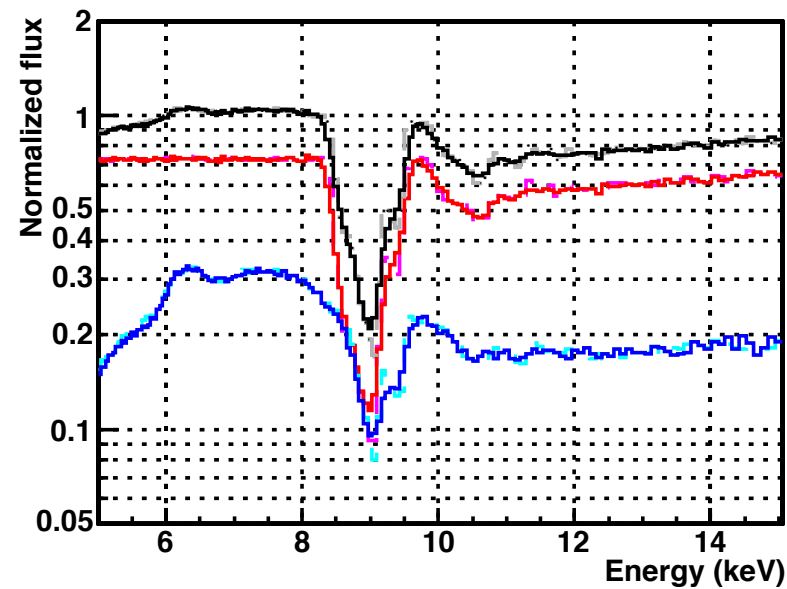
49–51 deg



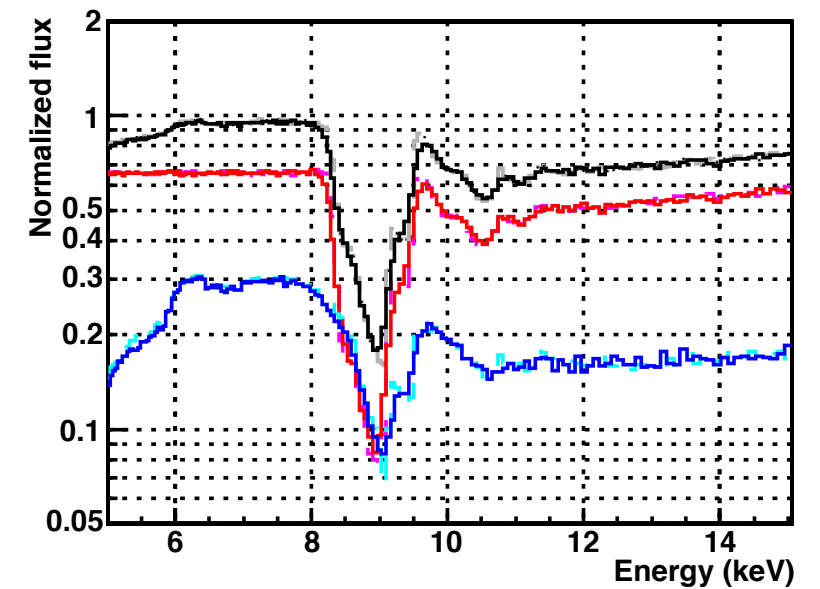
51–53 deg



53–55 deg



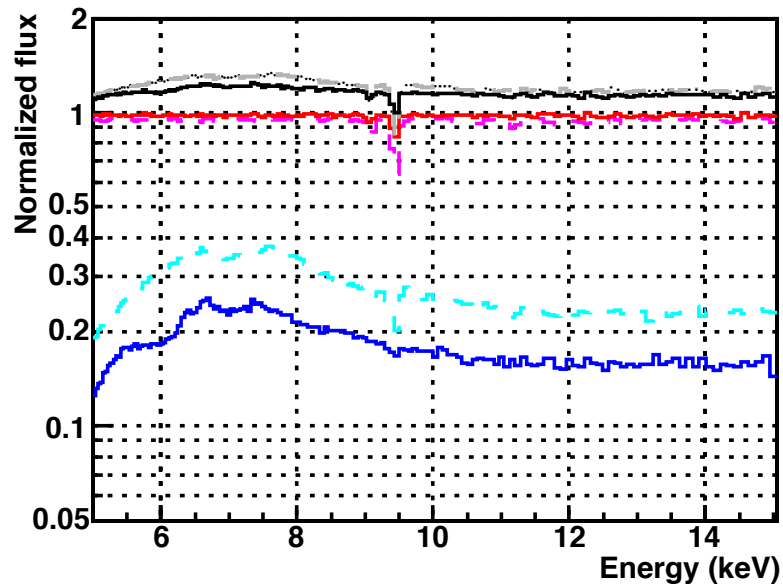
55–57 deg



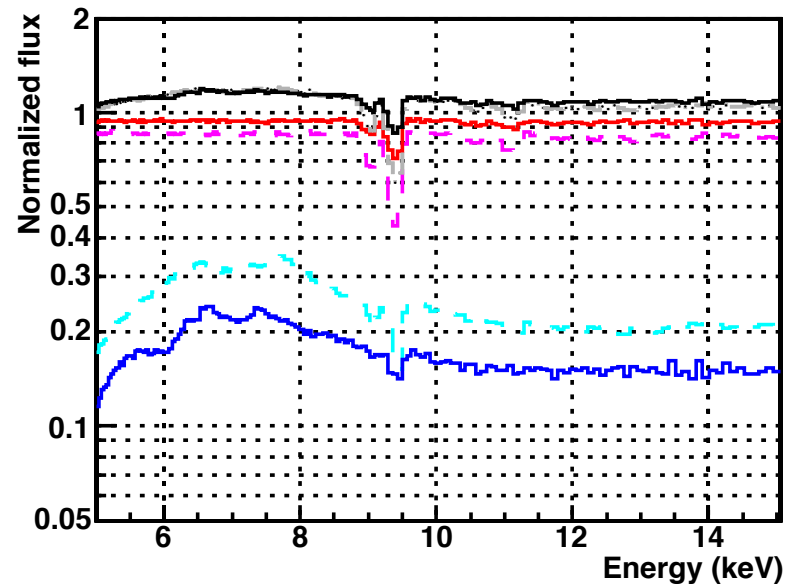
$R_{\min}$ 依存性

- $R_{\min}=20R_g \rightarrow 50R_g$
- 柱密度が小さくなる($n r \propto \dot{M}/v\Omega R_{\min}$)

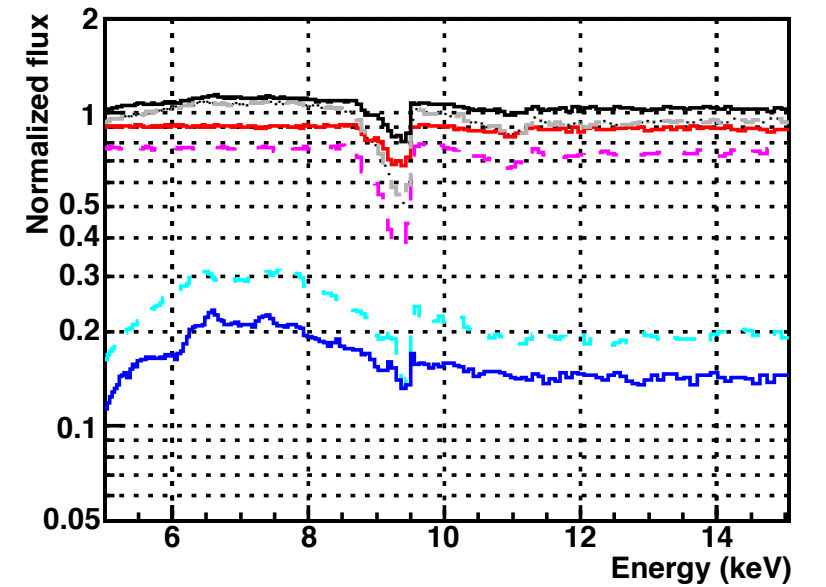
45–47 deg



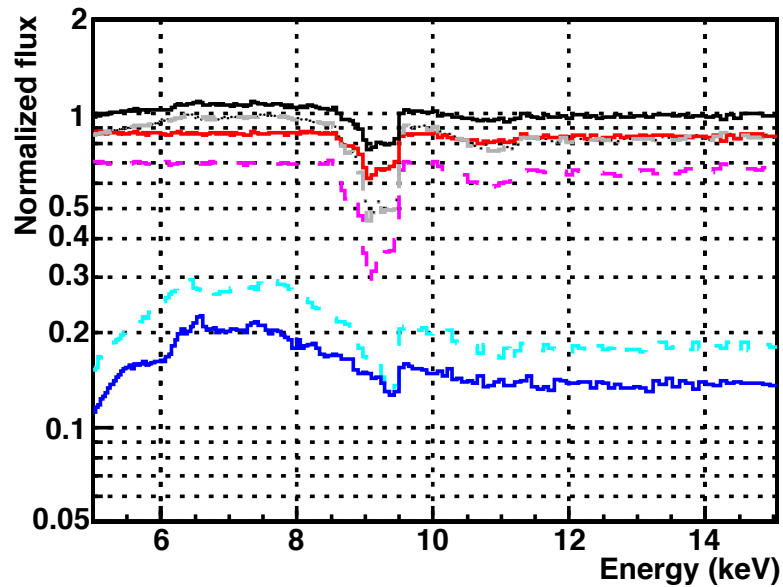
47–49 deg



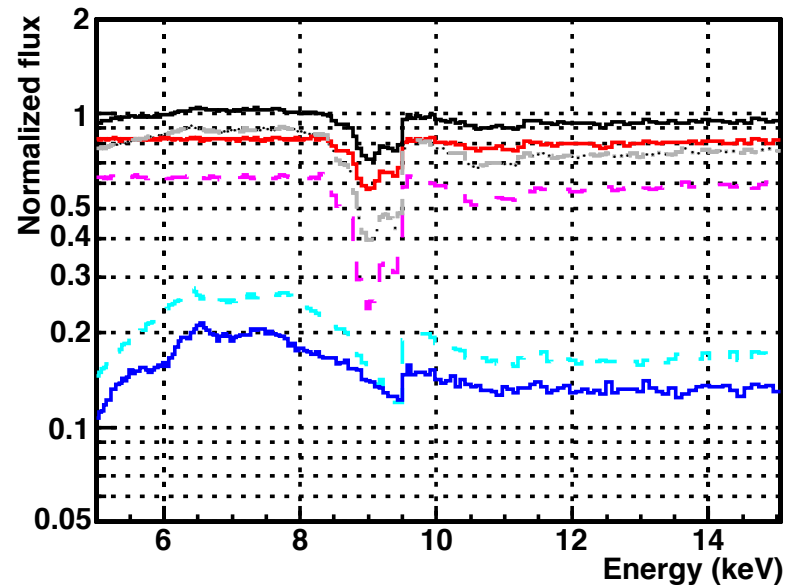
49–51 deg



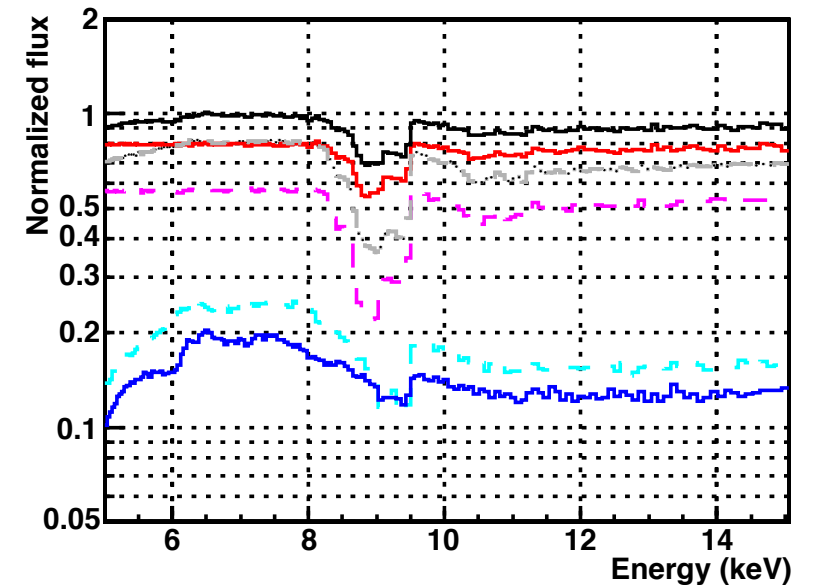
51–53 deg



53–55 deg

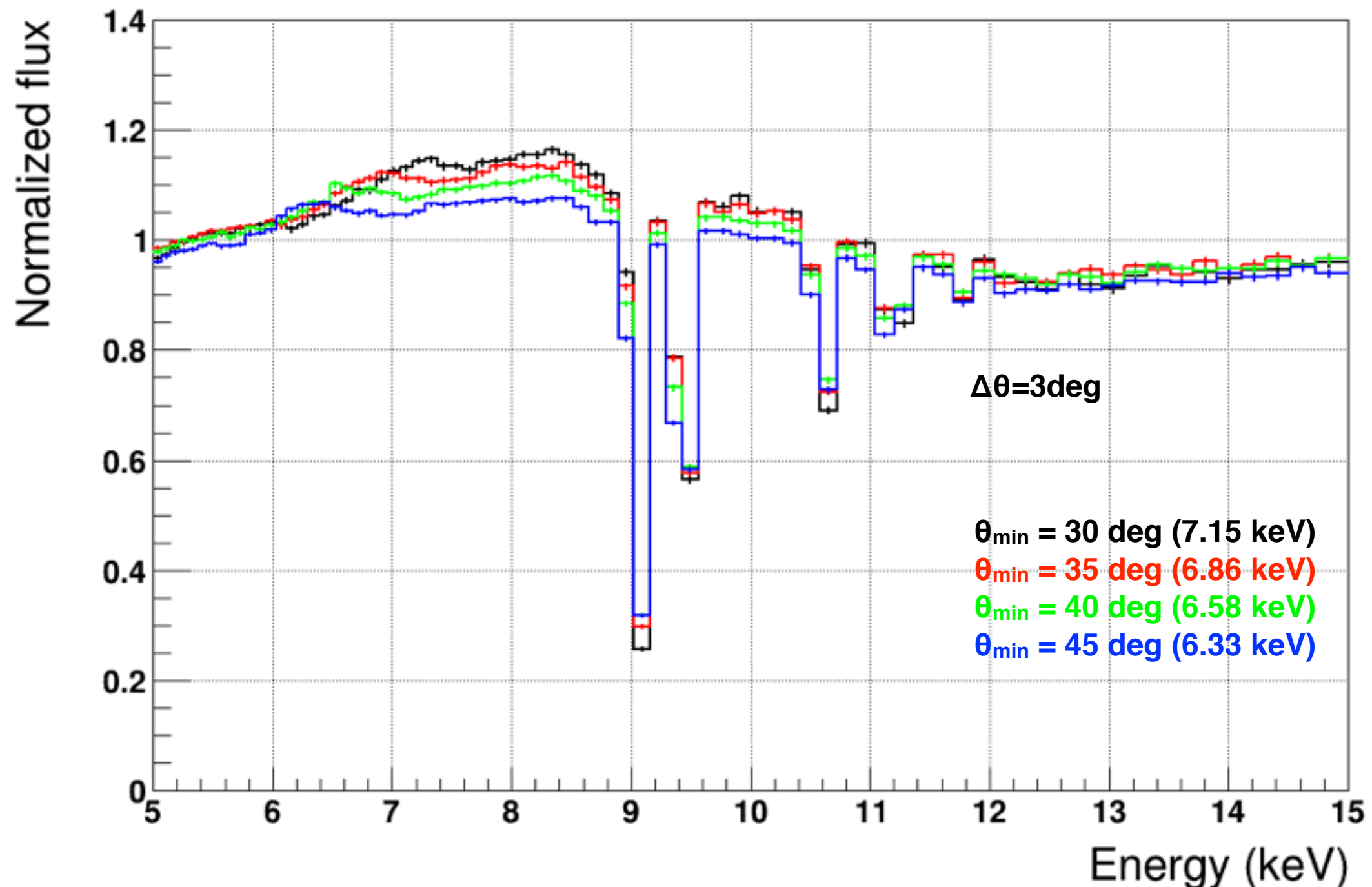


55–57 deg



$\theta_{\min}$ 依存

- $\theta_{\min}$ をかえると、輝線の赤方偏移成分が変わる



モデルパラメータのスペクトルへの影響

- 降着円盤風からの放射スペクトルには11個のパラメータが影響する

電離状態
(吸収線の強度比)

$$\xi = L / nr^2 \propto \frac{L\Omega v_\infty}{\dot{M}_{\text{wind}}}$$

電離光子	速度・密度	ジオメトリ	観測者
光度L 光子指数Γ	終端速度 質量放出率	立体角Ω blueshift	柱密度 $N_H = nr \propto \frac{\dot{M}_{\text{wind}}}{\Omega v_\infty R_{\text{min}}}$ (吸収線の深さ)
吸収線構造の θ_{incl} 依存性		内縁半径	
	加速指数β 初速度	円盤風方向	輝線の赤方偏移成分
	乱流速度		視線方向

吸収線の幅(Doppler broadening, 複数の速度成分)

- v_∞ , $\dot{M}_{\text{wind}}$, θ_{incl} : フリーパラメータ (それぞれ吸収線の位置, 深さ, 幅に影響する)
- 光度L, べき指数Γ : 観測に基づいて決定
- 立体角Ω, 内縁半径 R_{min} : $\Omega/4\pi=0.15$, $R_{\text{min}} \sim 2/(v/c)^2 R_{\text{go}}$. $\dot{M}_{\text{wind}}$ の値に影響
- 加速指数β, 初速度 v_0 : $\beta=1$, $v_0=v_t=1000$ km/s. v_∞ , θ_{incl} の値に影響し、円盤風の加速に直接迫れる→今後の研究
- 乱流速度 v_t : $v_t=1000$ km/s. 吸収線幅に影響。小さければ影響は少ない。
- 円盤風角度 θ_{min} : $\theta_{\text{min}}=45^\circ$. 輝線形状だけに影響 (§5.3.3)