

# Chandra衛星gratingによる intermediate polarの X線分光観測

林 多佳由

(University of Maryland, Baltimore County  
NASA's Goddard Space Flight Center)

# Intermediate Polar (IP)

強磁場激変星は降着円盤での散逸が小さいorなし

→ 弱磁場CVより高温

Intermediate polar (IP): 強磁場激変星のsubclass  
サイクロトン冷却が重要じゃない

→ Polarsより高温 (Cropper et al. 1999)

→ CVで最も高温 → X線で明るい

磁場に沿った質量降着



Next page

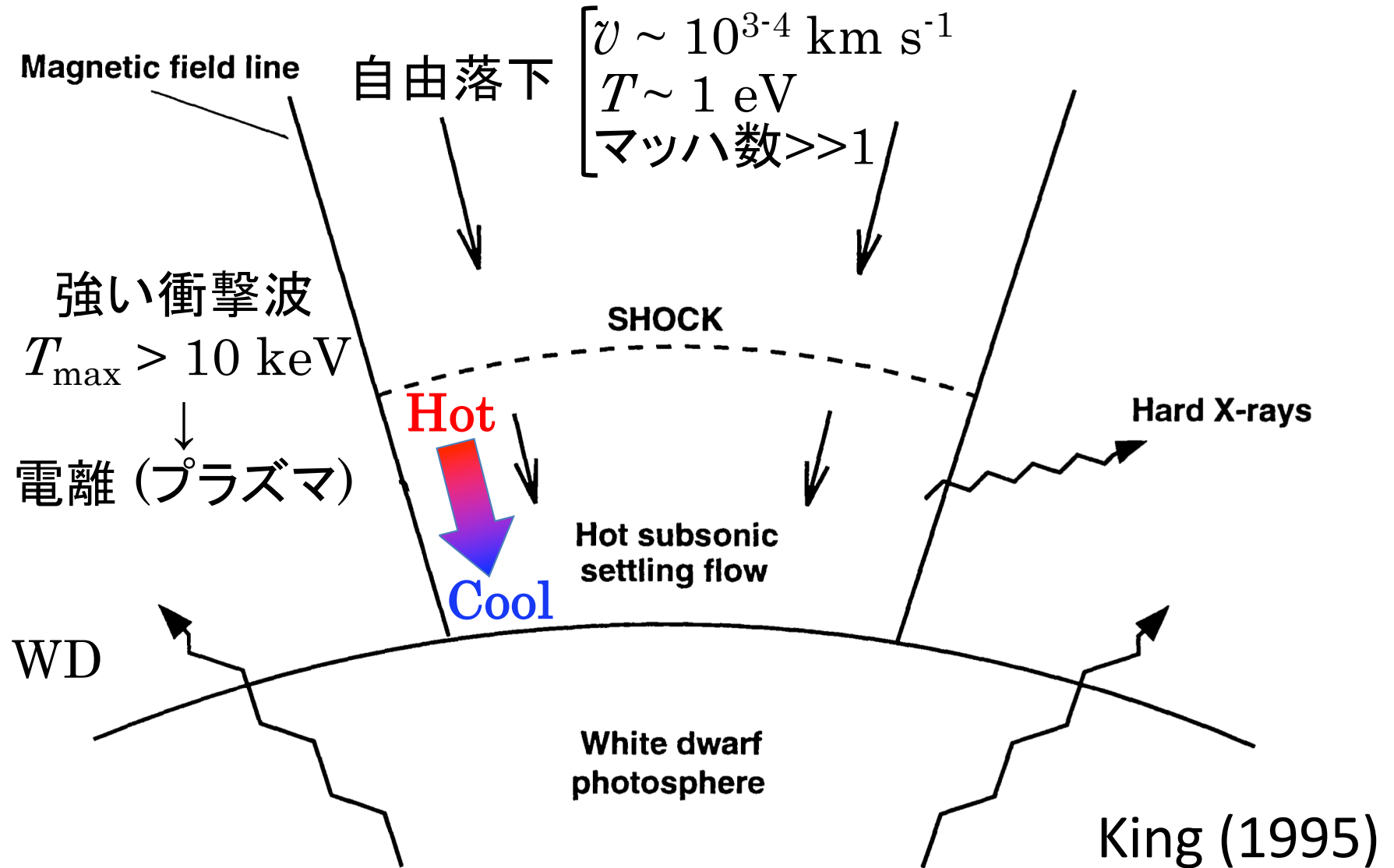


強磁場WD

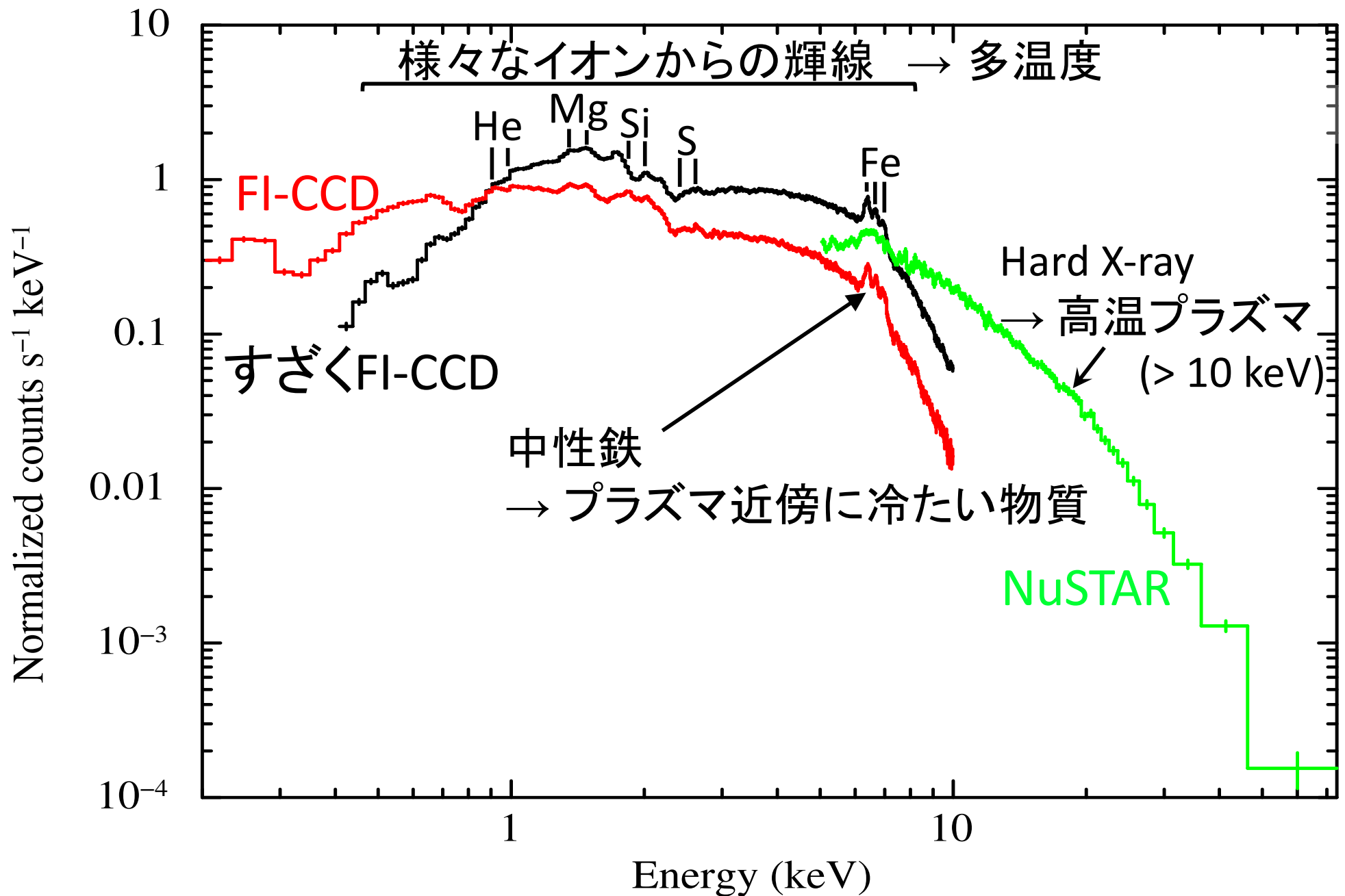
( $B_{WD} \sim 10^{5-6}$  G)

# IPからのX線

## 降着柱



# IPのX線スペクトル



# IP降着柱モデル (cooling flow)

## - 流体力学方程式

• EOS:  $P = \frac{\rho k T}{\mu m_H}$

• 連続の式:  $\frac{d}{dz}(\rho v S) = 0$

• 運動量:  $\rho v \frac{dv}{dz} + \frac{dP}{dz} = \rho F$

• エネルギー:

$$\frac{d}{dz} \left[ v \left( \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{\gamma P}{\gamma - 1} \right) \right] = \rho F - \varepsilon$$

外力 (重力):  $F = -\frac{GM_{WD}}{(R_{WD} + z)^2}$

## - 初期条件 (強い衝撃波)

$$\begin{cases} v_0 = 0.25 \sqrt{2GM_{WD}/(R_{WD} + h)} \\ \rho_0 = \frac{a}{v_0}, \\ P_0 = 3av_0, \\ T_0 = 3 \frac{\mu m_H}{k} v_0^2, \end{cases}$$

~40 keV (WD近傍の衝撃波)

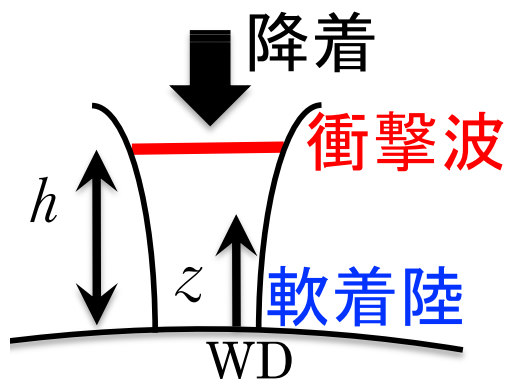
WD質量と半径の関係(Nauenberg 1972)

$$R_{WD} = 0.78 \times 10^9 \left[ \left( \frac{1.44 M_\odot}{M_{WD}} \right)^{2/3} - \left( \frac{M_{WD}}{1.44 M_\odot} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \text{ cm}$$

→  $R_{WD}$  を消去

## - 接続条件 (軟着陸)

$v = 0$  at WD surface



$a = \rho v$ : 降着率/面積

$S$ : 断面積

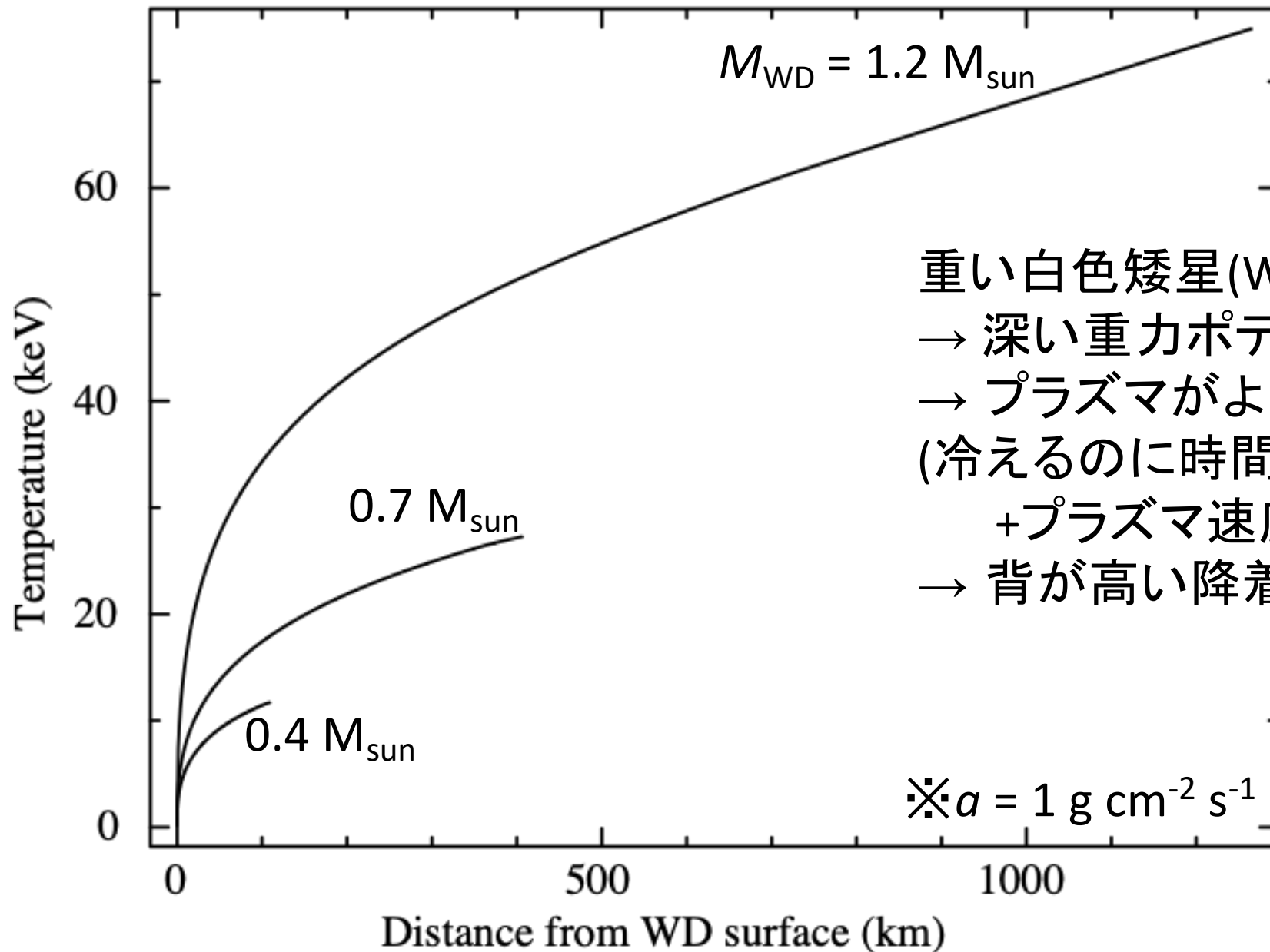
$\rho$ : 密度

$v$ : プラズマ速度

$\varepsilon$ : 冷却率

[ Hoshi 1973, Aizu 1973  
Cropper et al. 1998, 1999  
Hayashi & Ishida 2014 ]

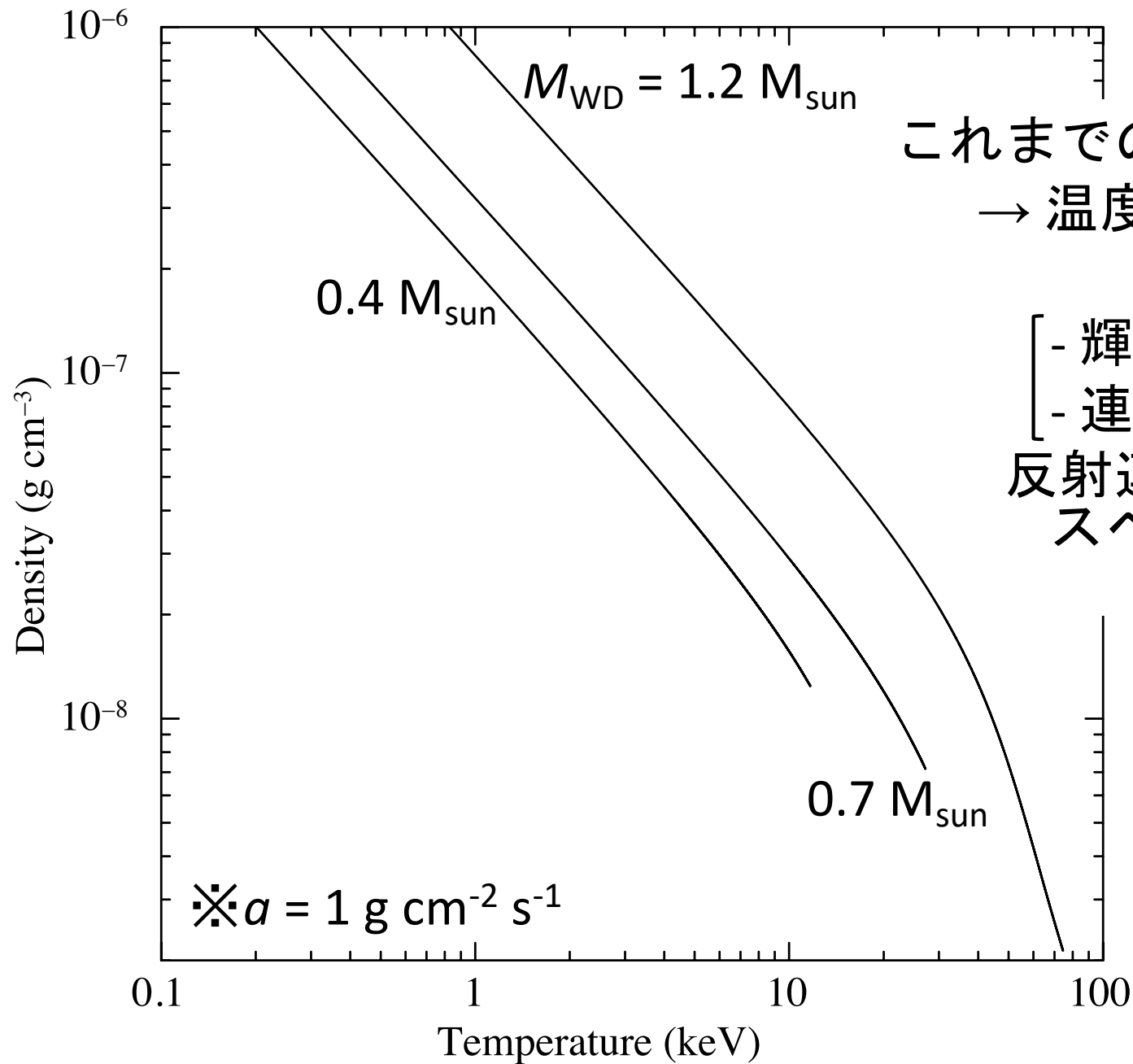
# 降着柱の温度分布



重い白色矮星(WD)  
→ 深い重力ポテンシャル  
→ プラズマがより高温  
(冷えるのに時間がかかる)  
+ プラズマ速度が速い  
→ 背が高い降着柱

※  $a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# 降着柱の温度と密度



これまでの多くの研究

→ 温度と密度の関係から  
 $M_{\text{WD}}$ などを測定

- 輝線強度比
- 連続成分の形

反射連続成分や吸収による  
スペクトル変化が  
系統誤差要因

Ishida (1991)

Ishida & Fujimoto (1995)

Cropper et al. (1998, 1999)

Ezuka & Ishida (1999)

Suleimamov et al. (2005)

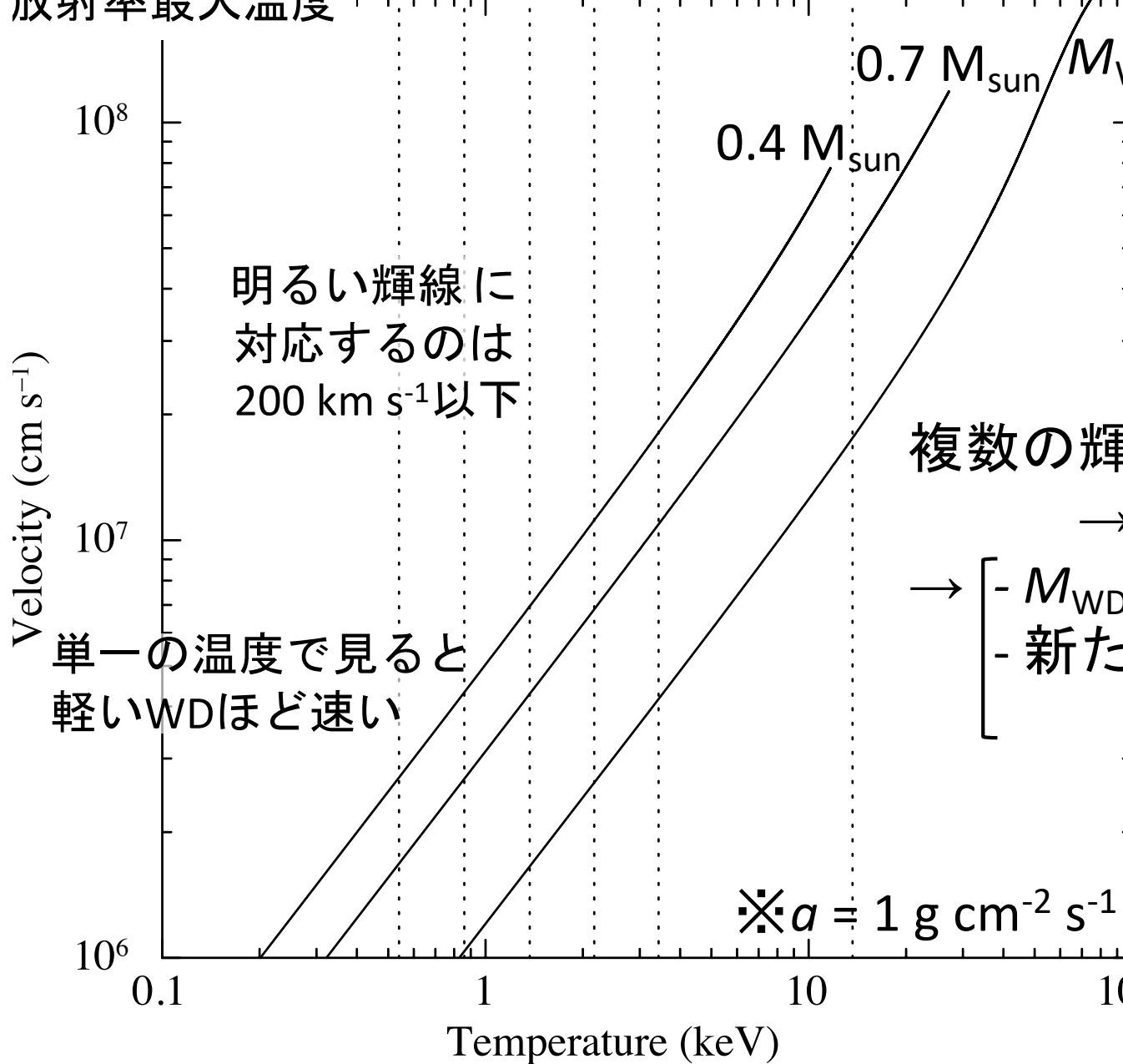
Yuasa et al. (2010)

Hayashi & Ishida (2014)

# 降着柱の温度と速度

H-likeイオンの  
放射率最大温度

→ He Mg Si S Ar Fe



明るい輝線に  
対応するのは  
 $200 \text{ km s}^{-1}$ 以下

単一の温度で見ると  
軽いWDほど速い

複数の輝線のドップラー偏移  
→ 温度と速度の関係  
→ [  $M_{\text{WD}}$  などのパラメータ測定  
- 新たな視点からの  
降着柱モデルの検証 ]



# Chandra衛星搭載grating

- 既存のX線天文衛星で最も高いエネルギー分解能

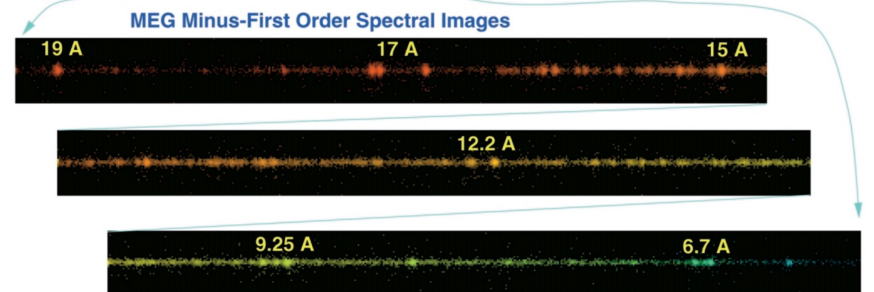
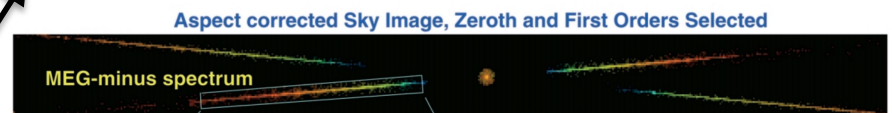
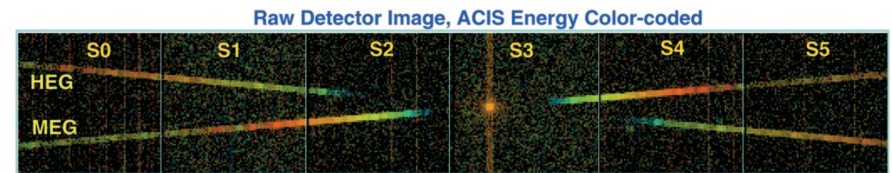
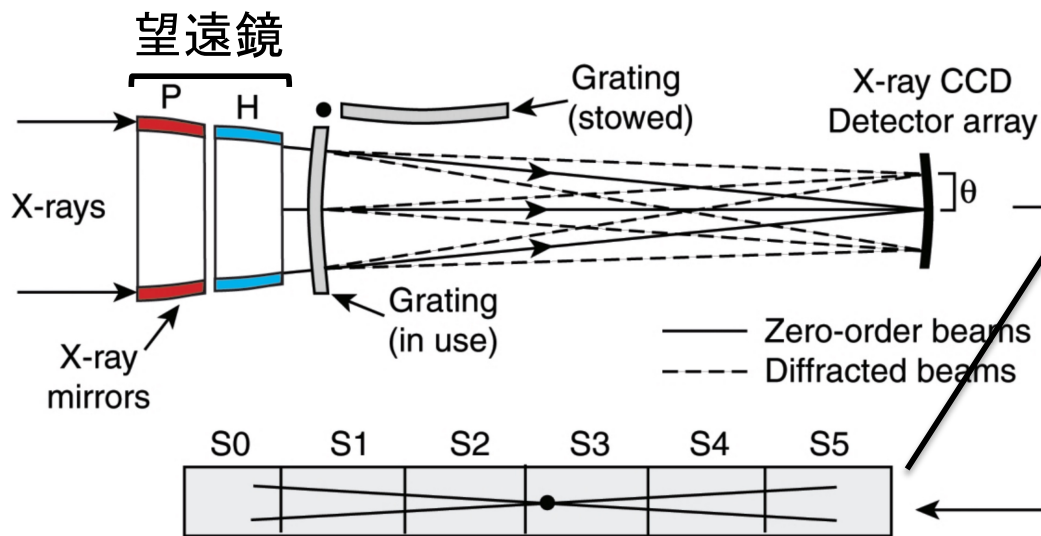
High-Energy Transmission Grating (HETG)

- High Energy Grating (HEG): Energy range = 0.8 – 10 keV  
 $\Delta E/E = 1070 - 65$  (1000 @ 1 keV)

- Medium Energy Grating (MEG): Energy range = 0.4 – 5 keV  
 $\Delta E/E = 970 - 80$  (660 @ 0.826 keV)

エネルギー絶対精度:  $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$

エネルギー相対精度:  $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$

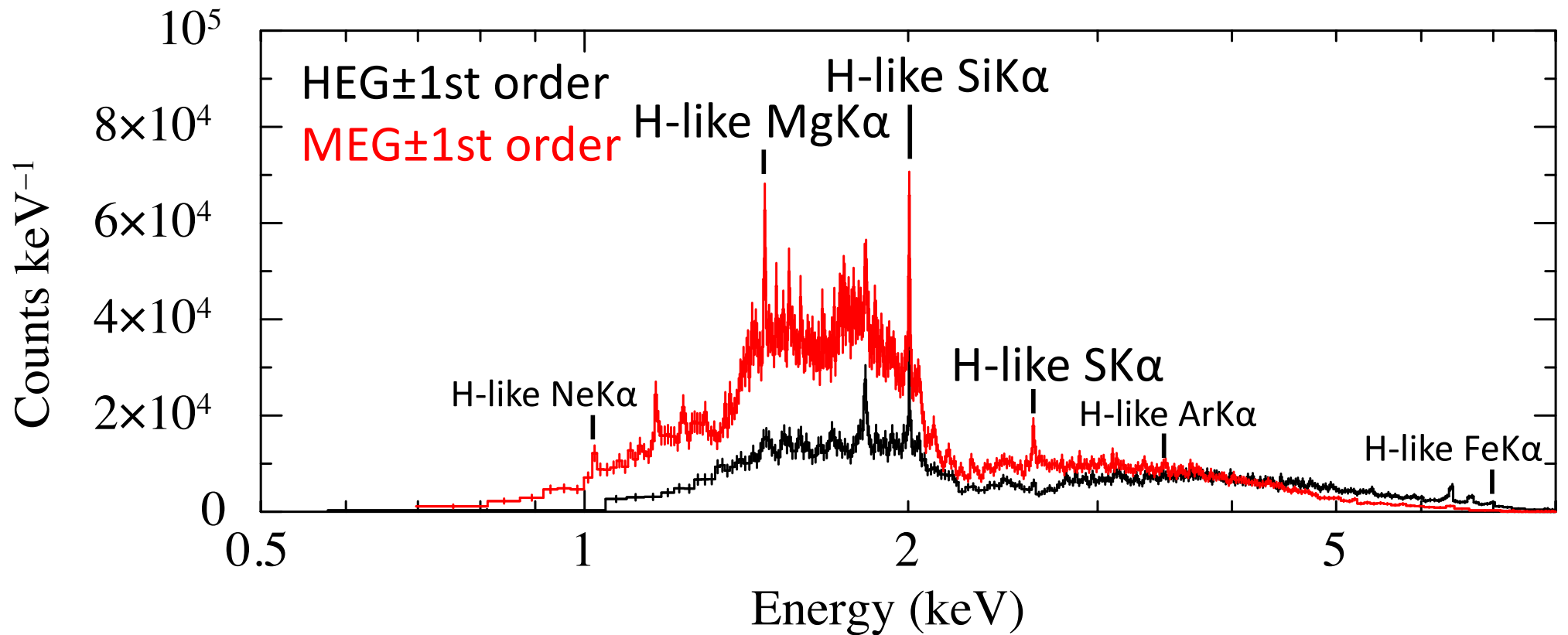


V2400 OphiucusとV1223 Sagittariiを観測

# V2400 Ophiucus

- 降着円盤を持たない特異なIP
- X線で最も明るいIPの一つ
- $D = 700$  pc (Gaia EDR3)
- $L_{0.1-100} = 8 \times 10^{33}$  erg s<sup>-1</sup>
- 自転周期  $P_{\text{spin}} = 927.66$  s (Buckley et al. 1995)
- 軌道周期  $P_{\text{orb}} = 3.43$  hr (Buckley et al. 1995)
- 最大温度  $T_{\text{max}} = 23\text{-}26$  keV  
(Yuasa et al. 2010, Joshi et al 2019)
- ほぼpole-onで1つの降着柱が常に見えている  
(Buckley et al. 1995)  
→ 自転平均の解析

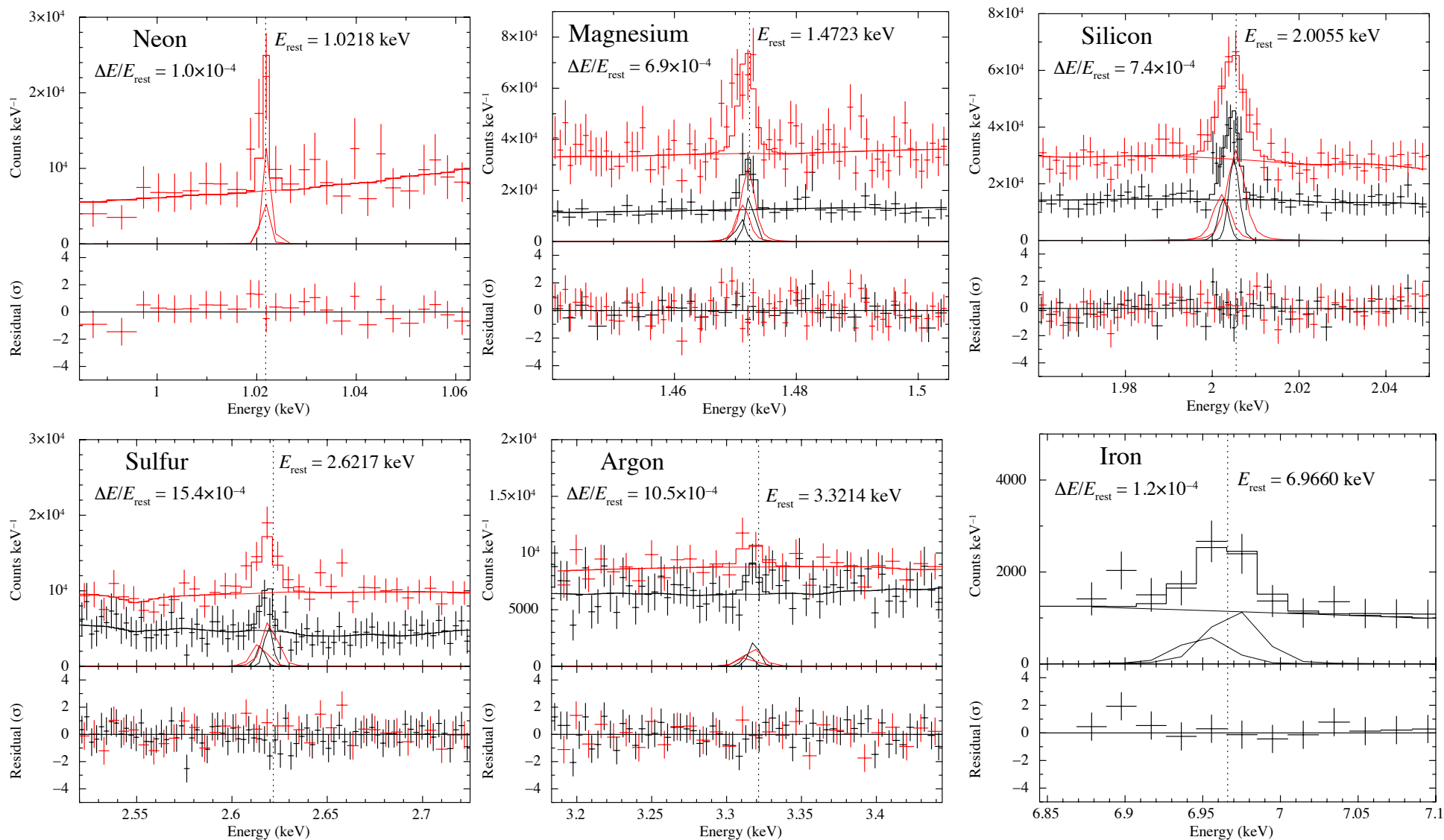
# V2400 OphのChandra grating観測



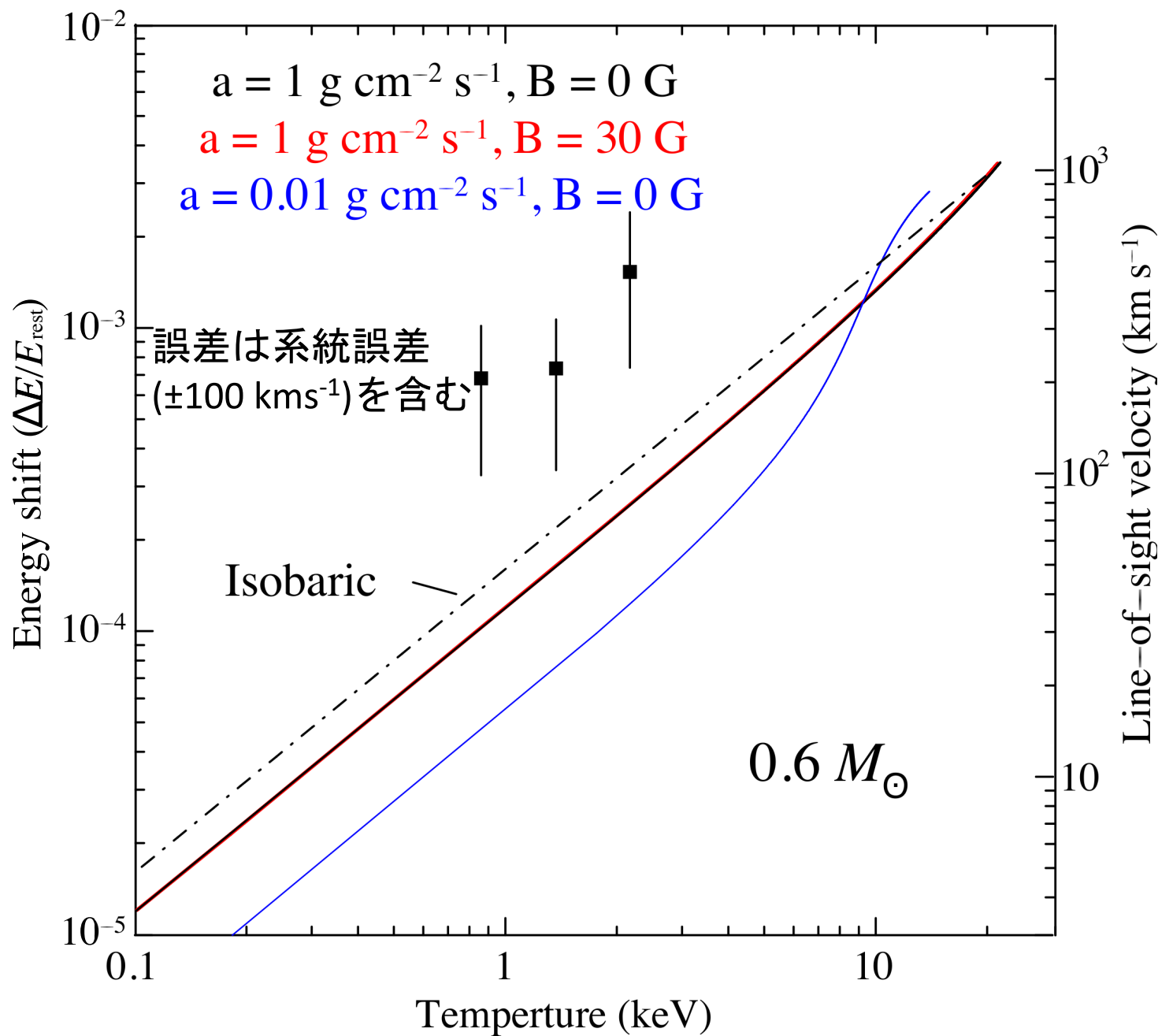
Chandra cycle-20  
2020年5月  
積分時間: 180 ks

# フィッティング

H-like Ne, Mg, Si, S, Ar, Fe K $\alpha$ にベキ関数+2xガウシアン(K $\alpha$ 1と K $\alpha$ 2)  
→ 全てで赤方偏移 → WDへガスが落ちている方向 (予想通り)



# 赤方偏移と降着柱モデル



過去の観測から

$$T_{\text{max}} = 23 - 26 \text{ keV}$$

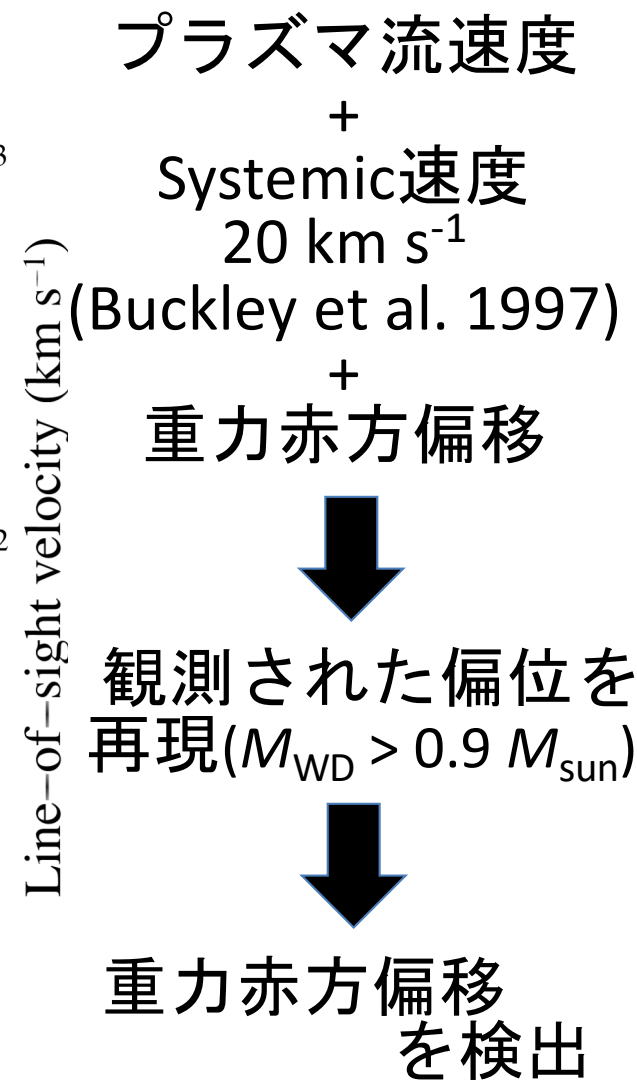
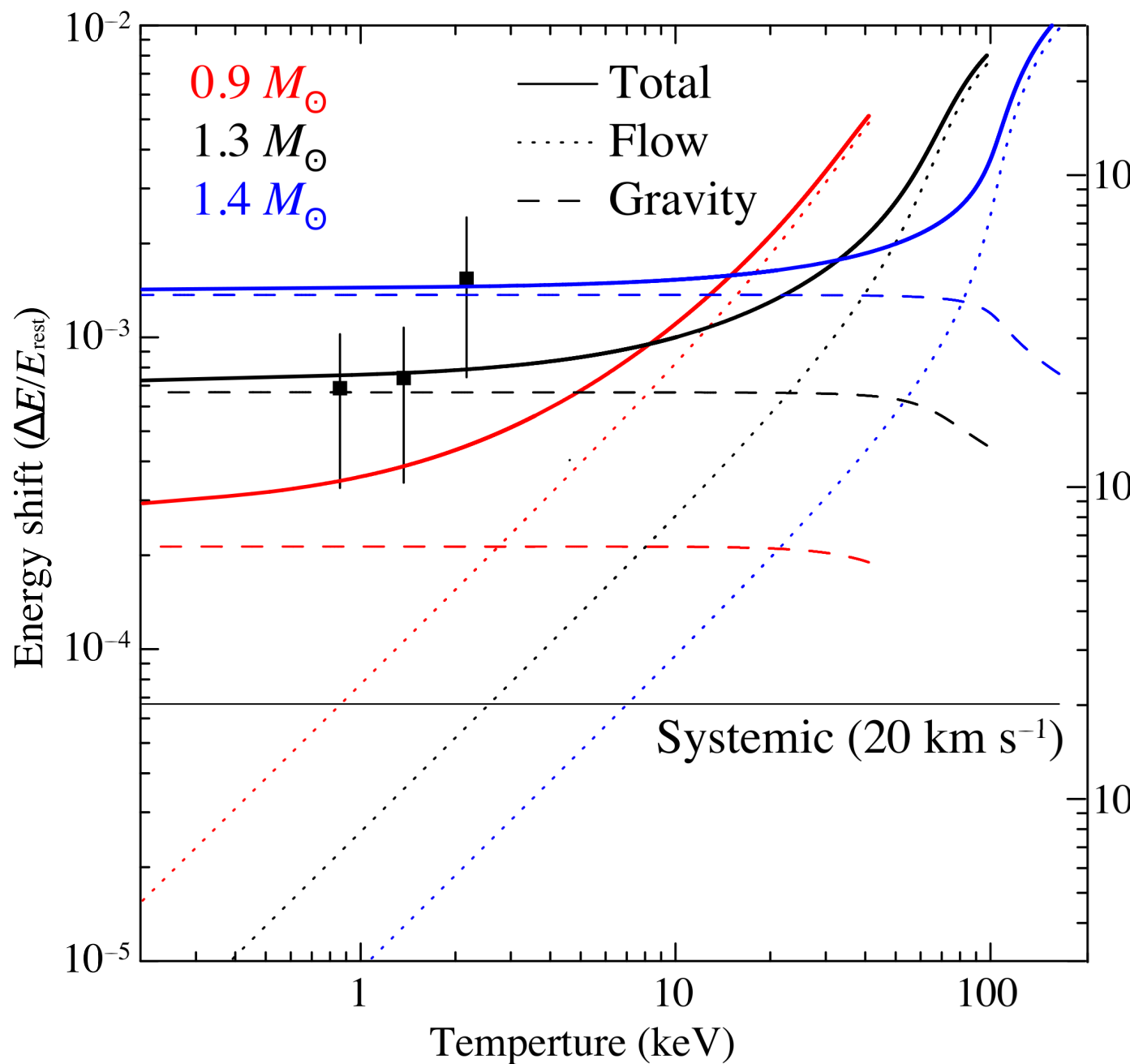


$M_{\text{WD}} > 0.6 M_{\text{sun}}$   
最もプラズマ流  
が速い場合



観測された偏移を  
説明できない

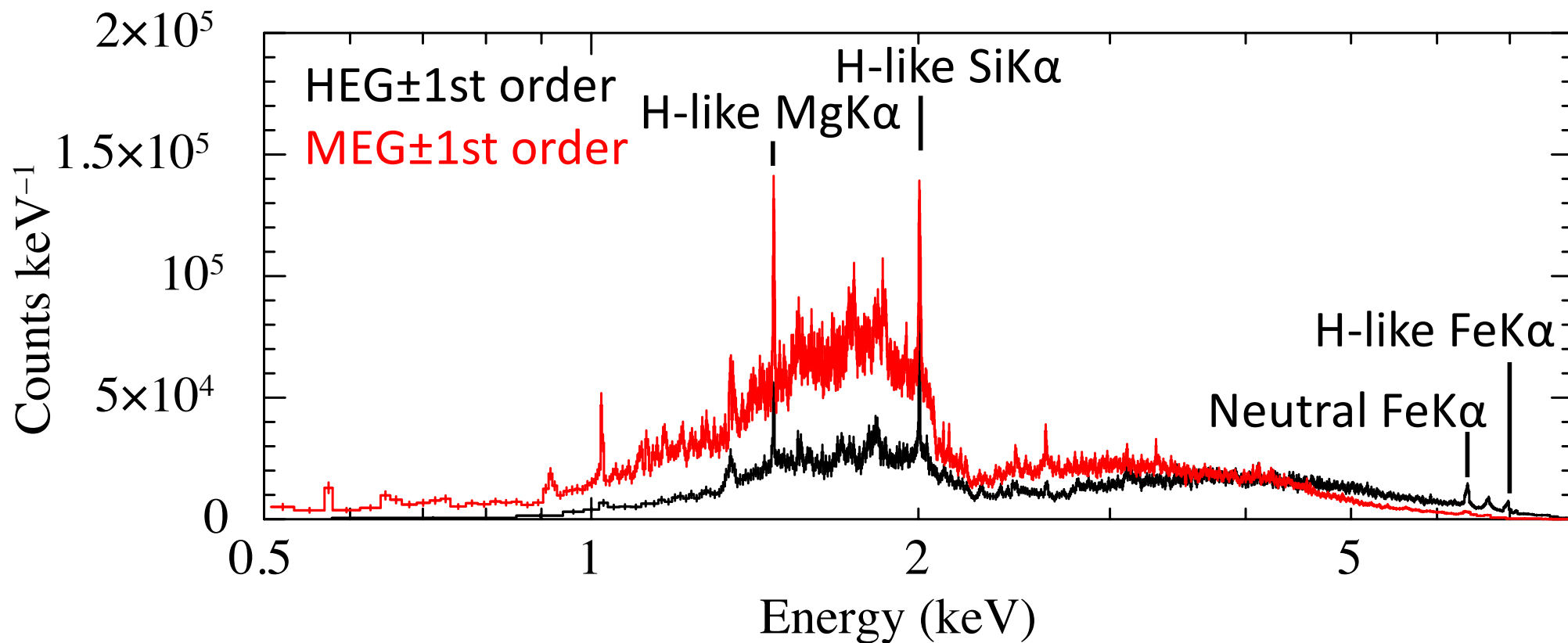
# 赤方偏移と降着柱モデル+重力赤方偏移



# V1223 Sagittarii

- 典型的なIP
- X線で最も明るいIPの一つ
- $D = 561$  pc (Gaia EDR3)
- $L_{0.1-100} = 1.3 \times 10^{34}$  erg s<sup>-1</sup> (Hayashi et al. 2011)
- 自転周期  $P_{\text{spin}} = 745.63$  s (Osborne et al. 1985)
- 軌道周期  $P_{\text{orb}} = 3.37$  hr (Jablonski & Steiner 1988)
- 白色矮星質量  $M_{\text{WD}} = 0.92 \pm 0.02 M_{\text{sun}}$  (Hayashi et al. 2020)
- 視線速度と降着柱の角度  $i = 48 - 62$  deg  
の間に振動 (Hayashi et al. 2020)  
→ 自転位相で分割した解析

# V1223 SgrのChandra grating観測



Chandra cycle-21  
2020年7 – 8月  
積分時間: 249 ks

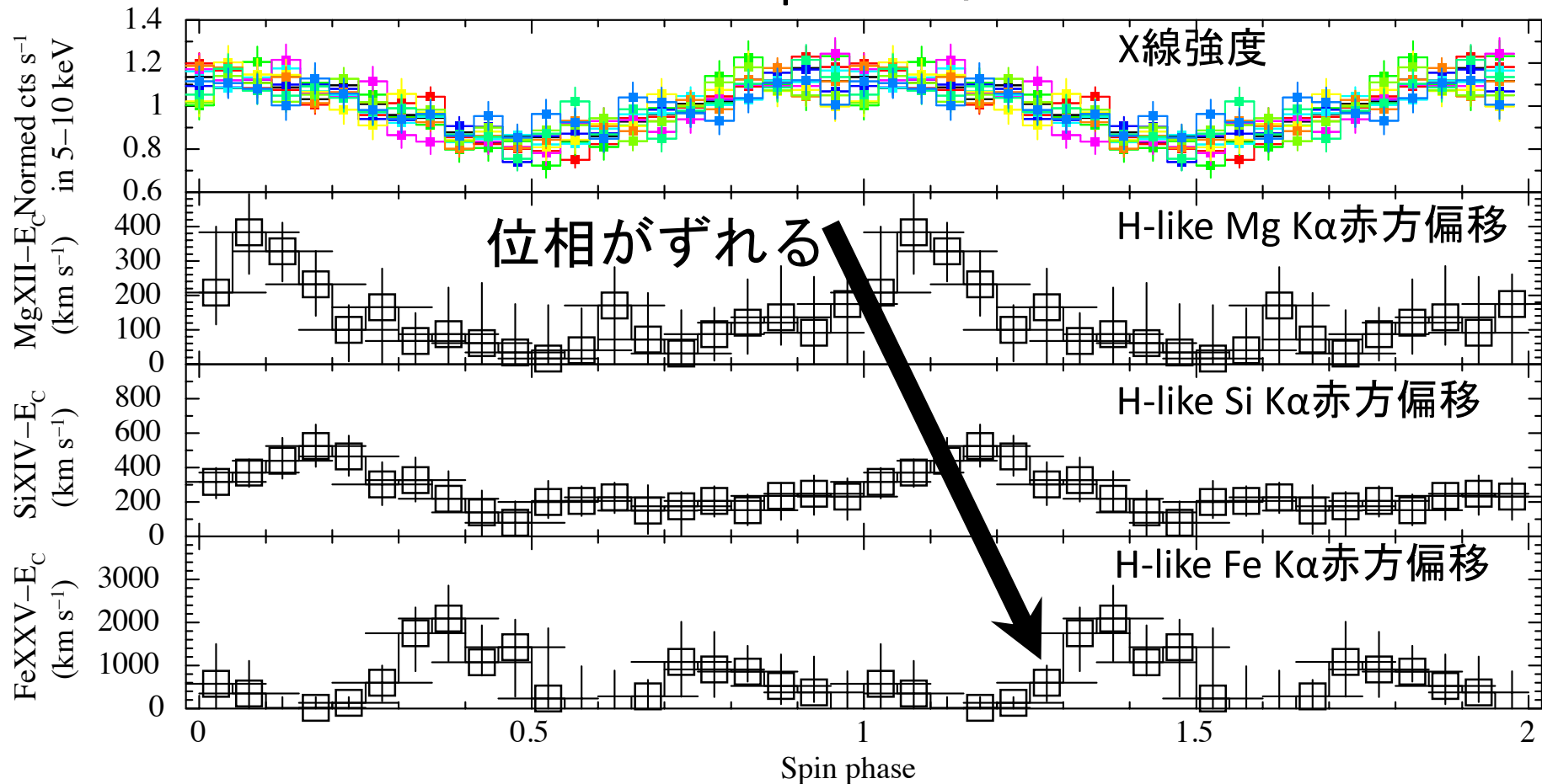
Chandra cycle-1  
2000年4月  
積分時間: 50 ks



# 自転位相毎のプラズマ速度

0.15自転位相毎にスペクトルを抽出

→ V2400 Ophと同様にフィッティング

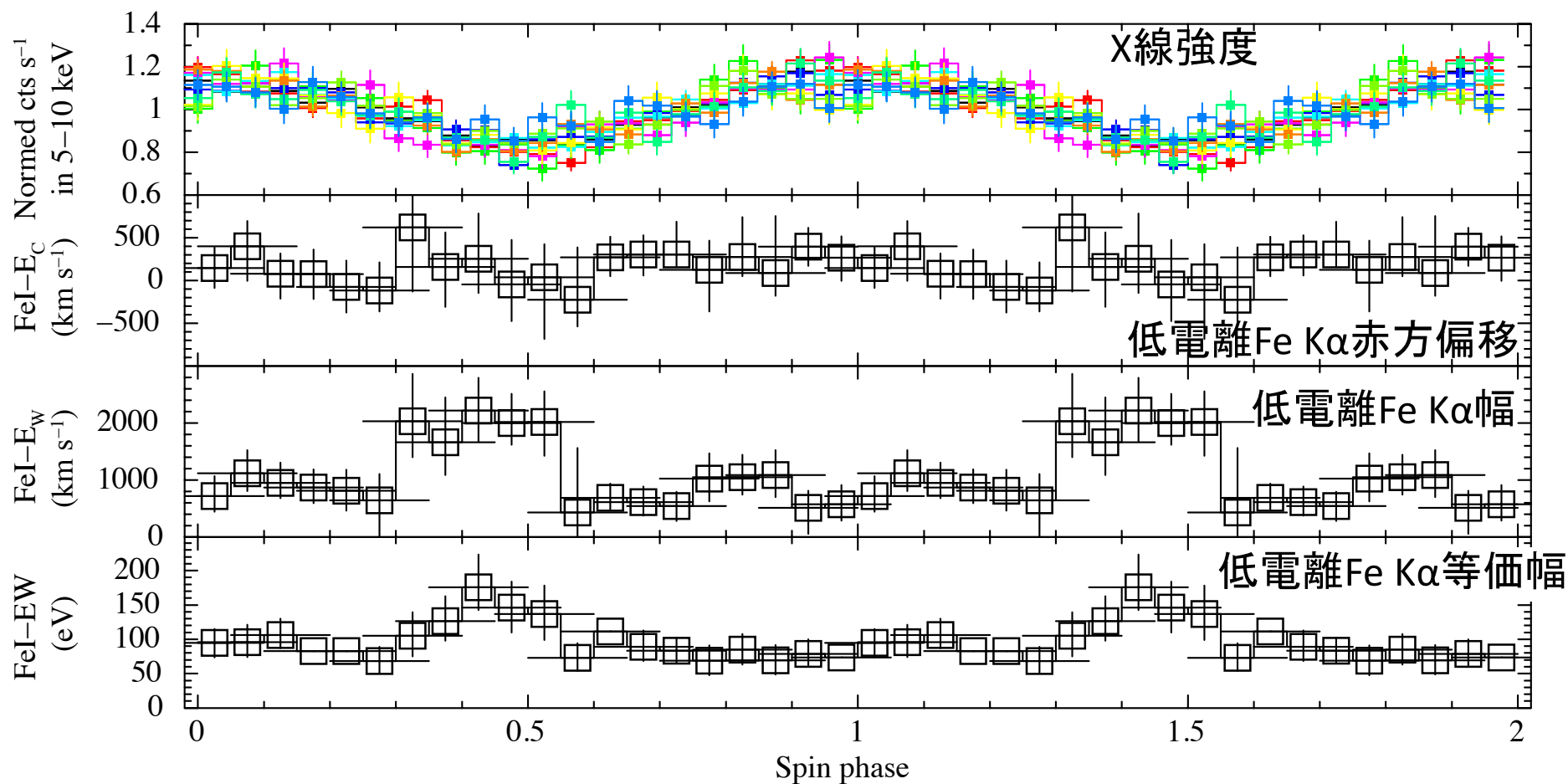


H-like Mg, Si, Fe Kα で赤方偏移の振動を検出

→ 視線速度の変化(予想通り)

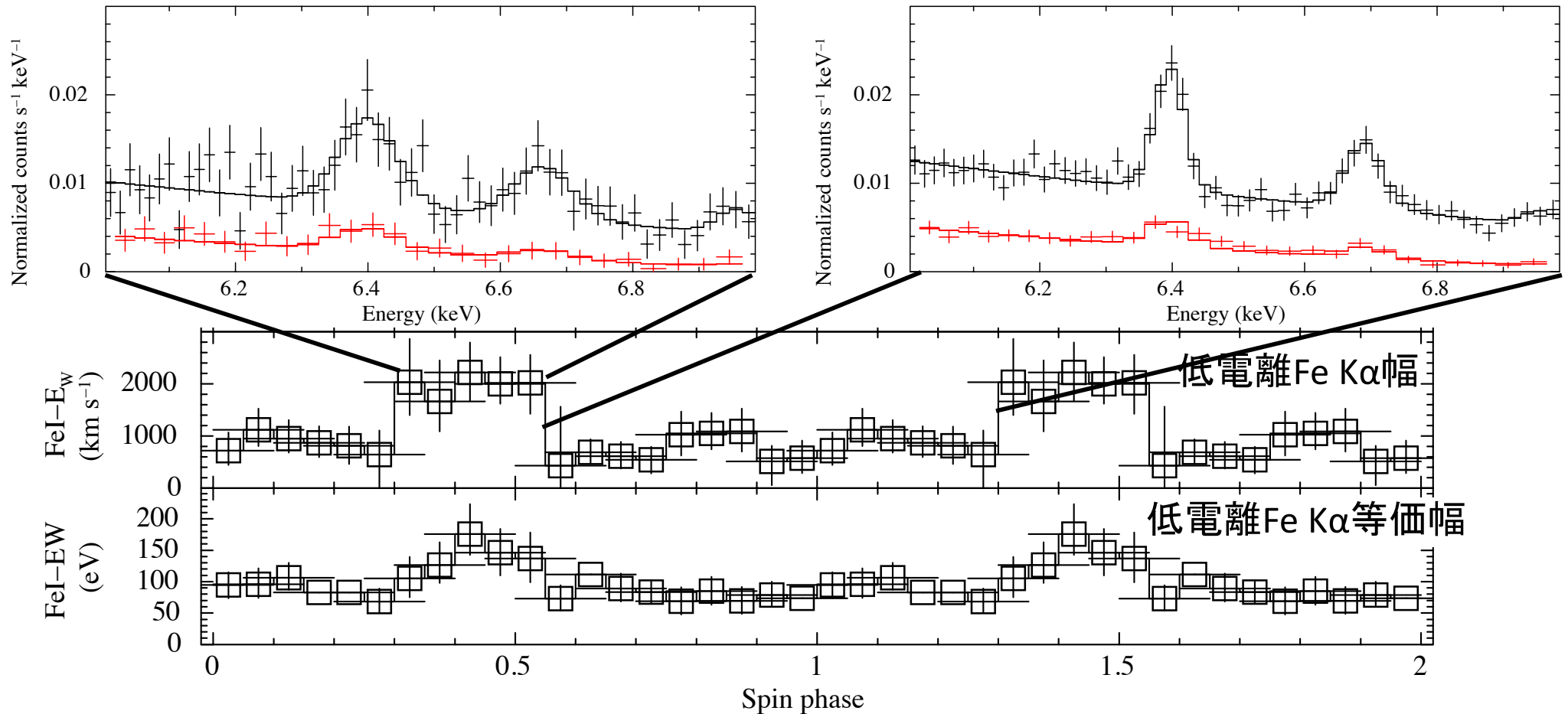
ピークの位相高エネルギーほど遅れる (→ 降着柱の曲率?)

# 自転位相毎のreprocess成分(中性Fe)



0.3 - 0.55位相で低電離Fe K $\alpha$ 幅が倍増 (等価幅も増大?)

# 自転位相毎のreprocess成分(FeI)



0.3 – 0.55位相で低電離Fe K $\alpha$ 幅が倍増 (等価幅も増大?)

→ 2つの降着柱の衝撃波通過前のガスからの反射

(赤方偏移+青方偏移)

# まとめ

Chandra衛星HETG gratingでV2400 OphとV1223 Sgrを観測

V2400 Oph

[ H-like Mg, Si, S K $\alpha$ 線で赤方偏移を検出 ( $\sim 200 - 400 \text{ km s}^{-1}$ )  
プラズマ速度だけでは説明できない  
プラズマ速度 + 重力赤方偏移 + systemic速度で説明  
重力赤方偏移を検出 ( $M_{\text{WD}} > 0.9 M_{\text{sun}}$ )

V1223 Sgr

[ H-like Mg, Si, Fe K $\alpha$ 線で赤方偏移の振動を検出  
振動のピークが高エネルギーほど遅れる  
→ 降着柱の曲率?  
中性Fe K $\alpha$ の幅がある位相で倍増  
→ 2つの降着柱の衝撃波通過前ガスからの反射?  
(赤方偏移+青方偏移)