

強磁場激変星における新しい 降着柱モデルの構築

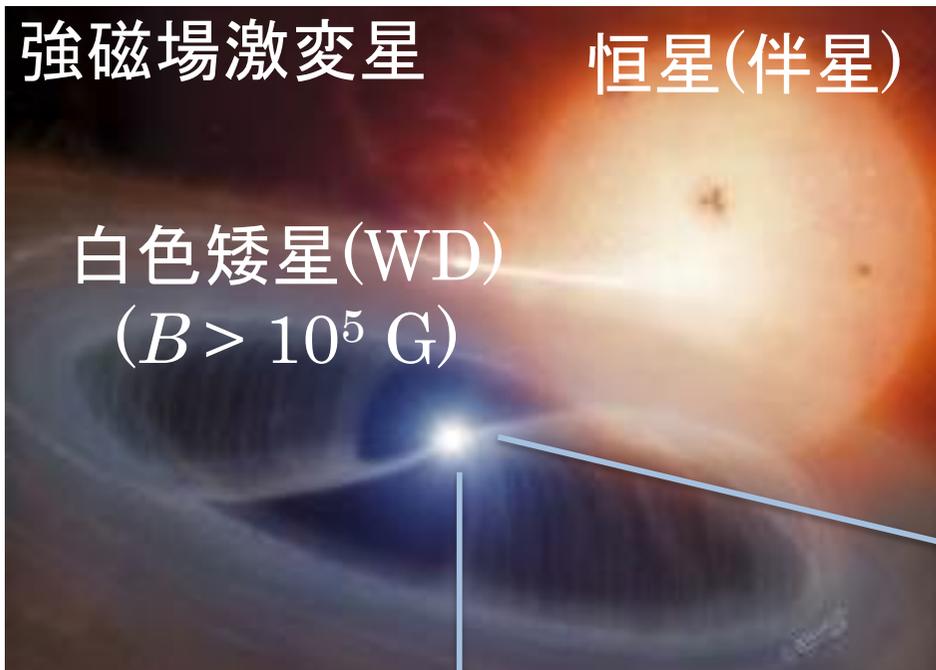
宇宙科学研究所/首都大学東京

林 多佳由

本講演の内容

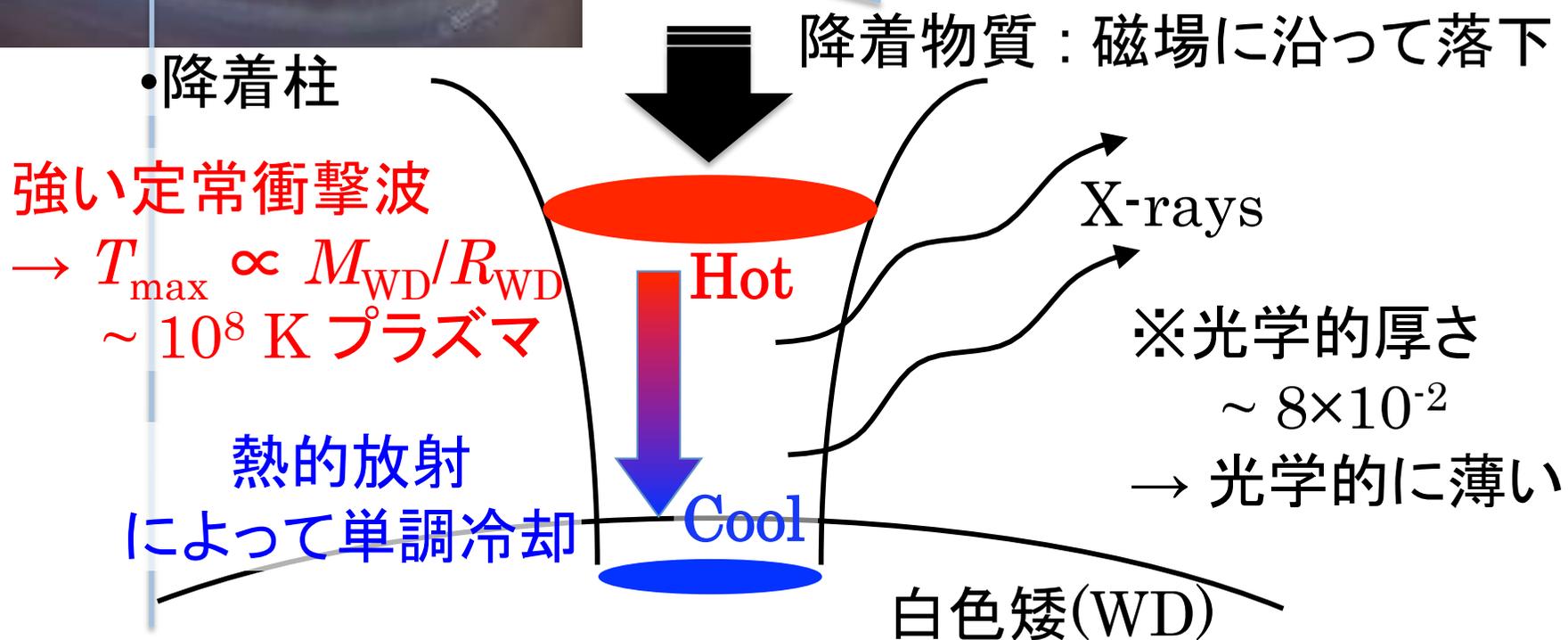
1. 降着柱標準モデルと観測的問題点
2. 降着柱の物理構造の調査
3. スペクトルモデル(ACrad)構築
4. ACradの観測への適用
5. 結果とまとめ

強磁場激変星(mCV)と降着柱



- 白色矮星質量(M_{WD})の測定
 - 降着柱のX線 → 重力ポテンシャル +
 - 理論的な M_{WD} と R_{WD} の関係 (ex. Nauenberg 1972)

➔ M_{WD} と R_{WD} を決定



降着柱の標準モデル (Cropper et al. 1999)

- 連続の式 (仮定1. 断面積一定 (円柱近似))

$$\frac{d}{dz}(\rho v) = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho v = a$$

a : 単位面積の降着率

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

- 運動方程式

$$\rho v \frac{dv}{dz} + \frac{dP}{dz} = \rho F$$

- エネルギー式 ε : 冷却率

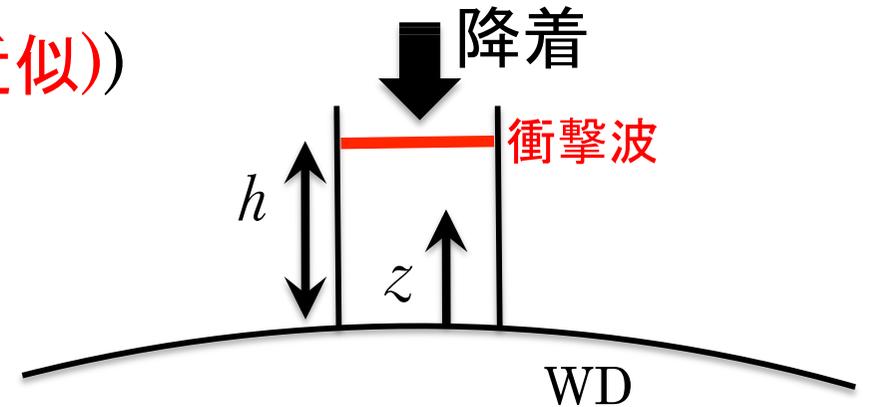
$$\frac{d}{dz} \left[v \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{\gamma P}{\gamma - 1} \right) \right] = \rho F - \varepsilon$$

- 重力

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

- 理想気体の状態方程式

$$P = \frac{\rho k T}{\mu m_{\text{H}}}$$



- 初期条件 (降着柱の頂上)

: 自由落下 & 強い衝撃波

$$v_0 = 0.25 \sqrt{2GM_{\text{WD}} / (R_{\text{WD}} + h)}$$

$$\rho_0 = \frac{a}{v_0}$$

$$P_0 = 3av_0$$

$$T_0 = 3 \frac{\mu m_{\text{H}}}{k} v_0^2$$

- 境界条件: 軟着陸

$$v = 0 \text{ at WD surface}$$

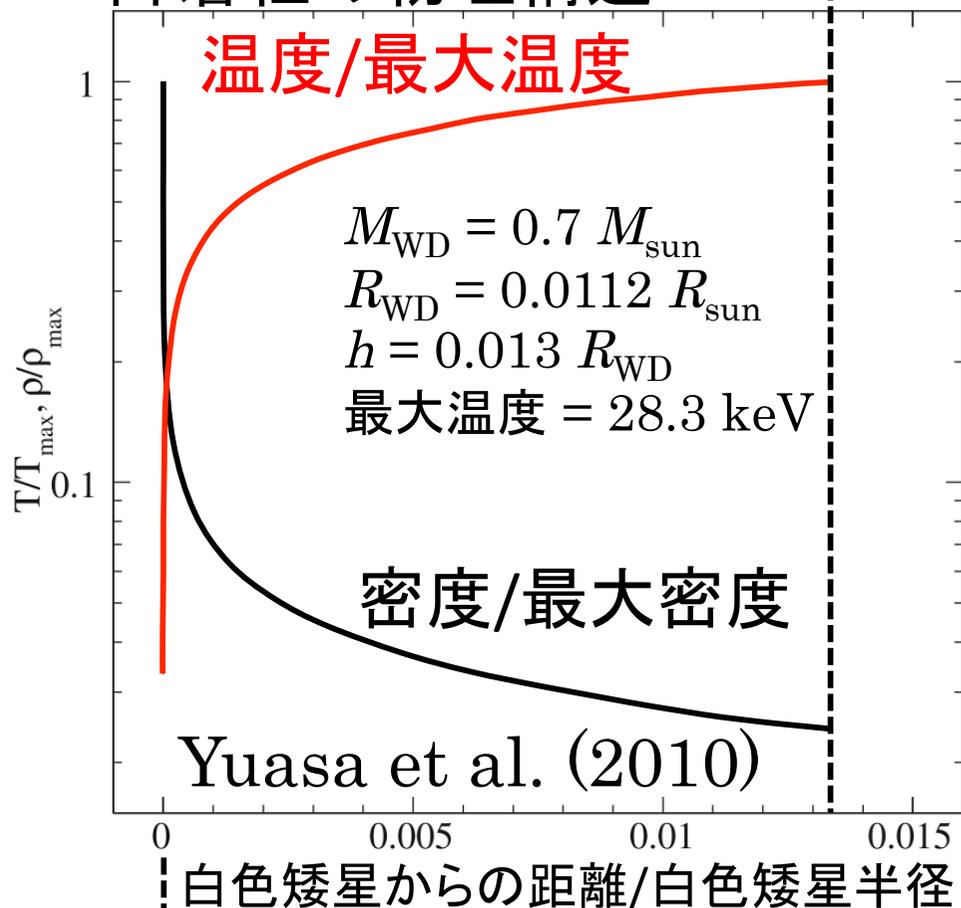
仮定3. イオンと電子温度は一致

$$(T_i = T_e)$$

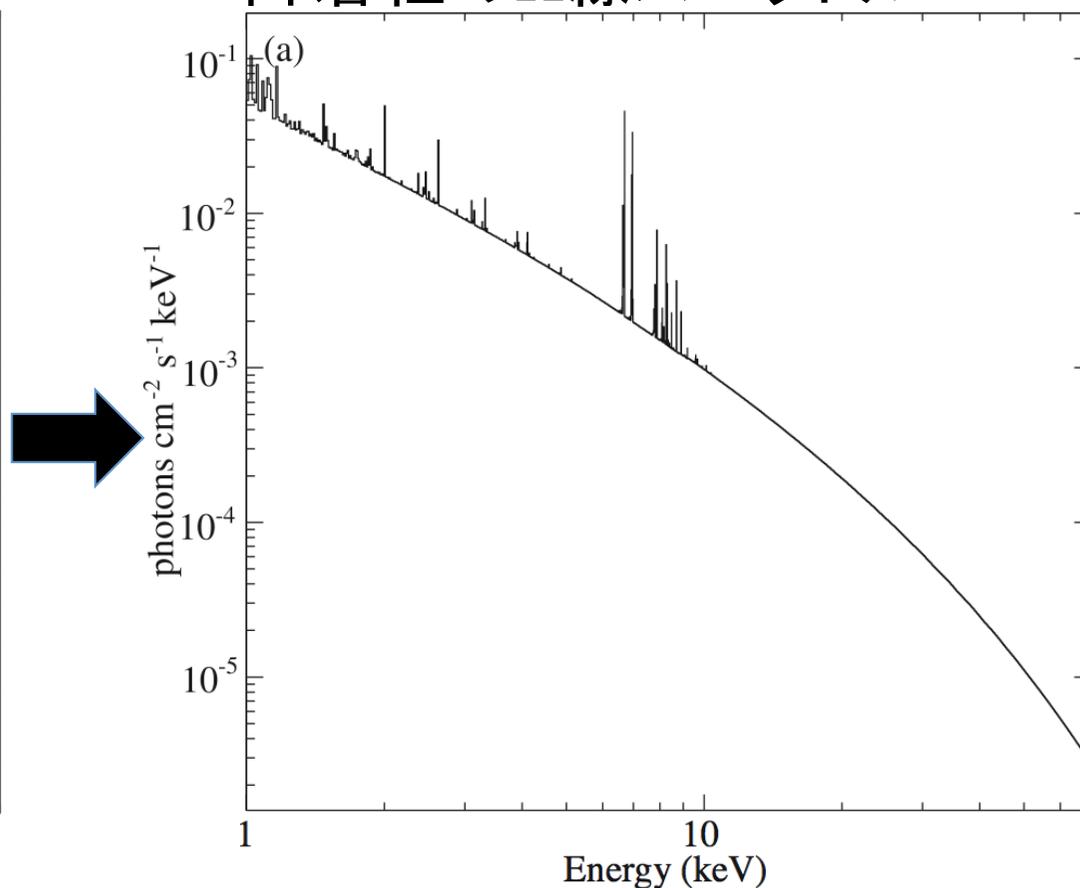
降着柱のX線スペクトルと M_{WD}

衝撃波高さ
(降着柱頂上)

降着柱の物理構造



降着柱のX線スペクトル



白色矮星
表面

観測されたX線スペクトルにfit → mCVの M_{WD} を測定

Suleimanov et al. (2005) : 14 mCVs with *RXTE* 衛星

Yuasa et al. (2010) : 17 mCVs with *すざく*衛星

標準モデルの観測的問題(1)

(1)他の手法に比べて M_{WD} が小さい

※数十年間論争

EX Hydraeの M_{WD}

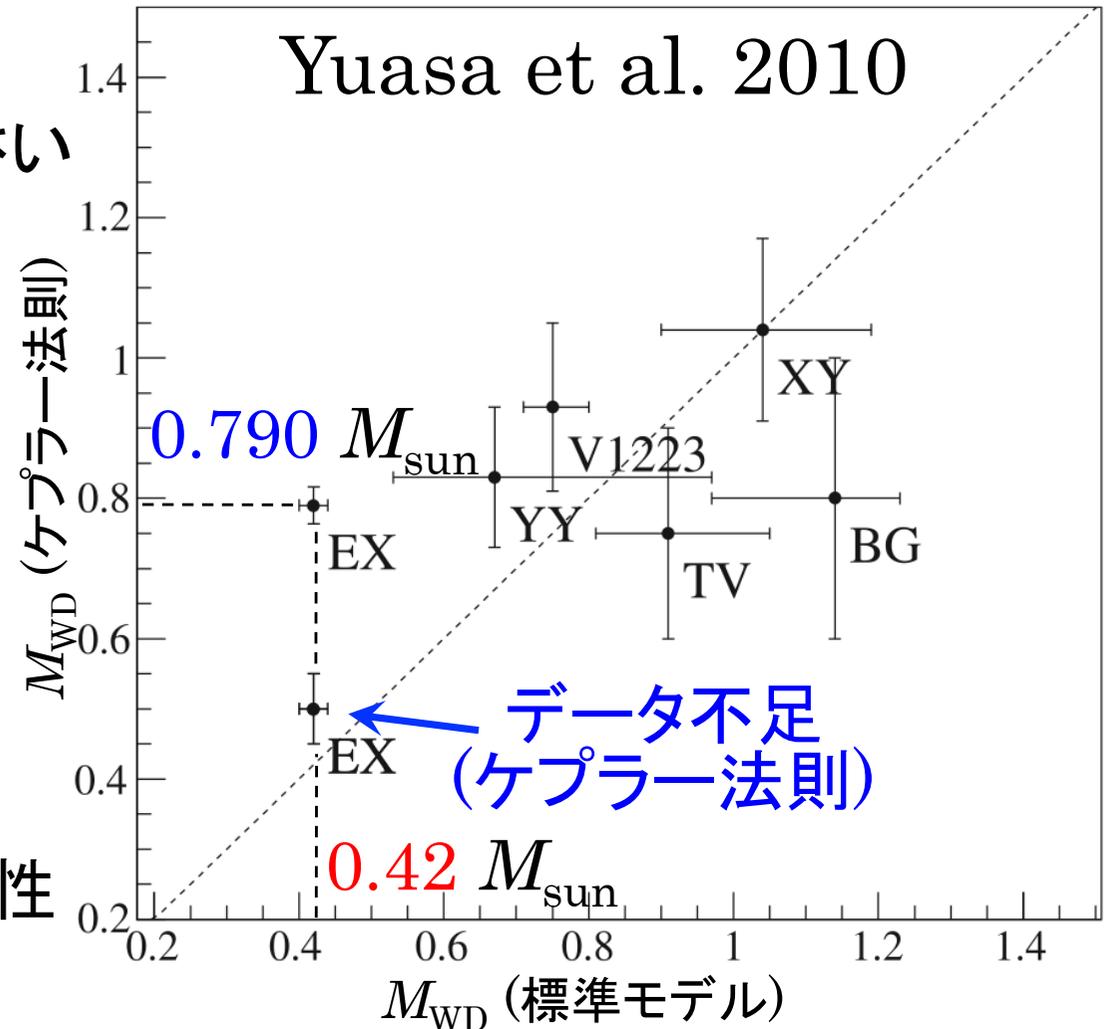
$0.42 \pm 0.02 M_{sun}$: 標準モデル
(Yuasa et al. 2010)

$0.790 \pm 0.026 M_{sun}$: ケプラー則
(Beuermann et al. 2008)

→ 標準モデルでは

温度

M_{WD} を過小評価の可能性



※EX Hydrae : [WDと伴星の視線速度 (K_1, K_2)
食から軌道傾斜角 (i)

→ ケプラー則の M_{WD} : 信頼性高

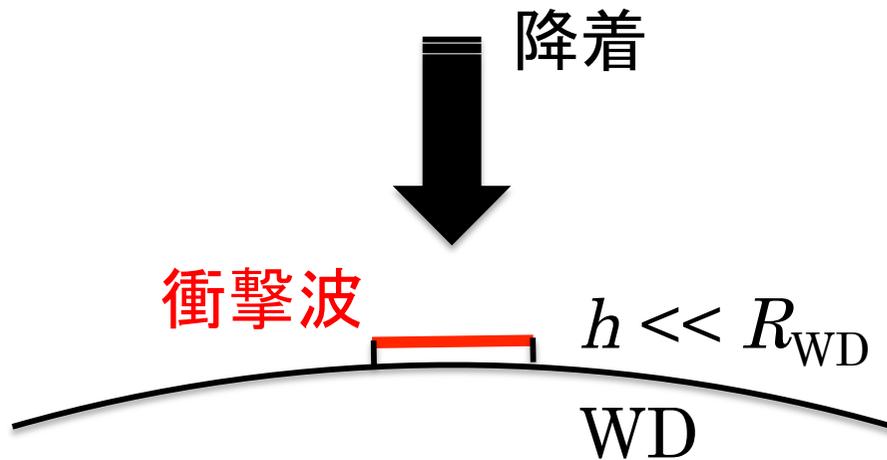
標準モデルの観測的問題(2)

(2) 予想される降着柱の高さ(h)が直接観測より低い(EX Hydrae)

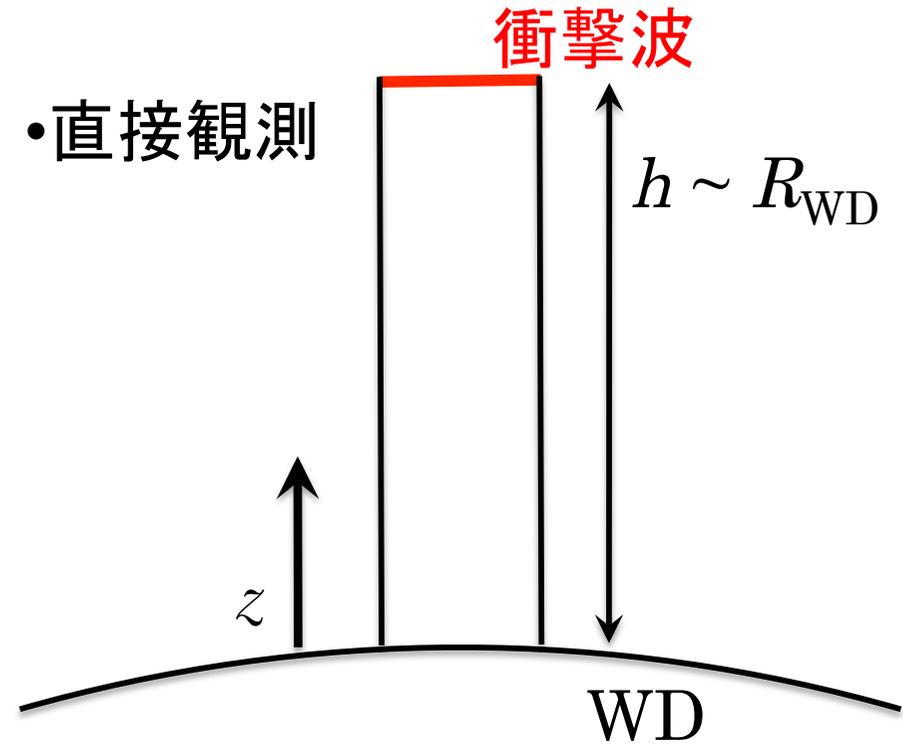
標準モデル $\rightarrow h = 3.7 \times 10^{-3} R_{\text{WD}}$

白色矮星の自転に伴うX線変動 $\rightarrow h \sim R_{\text{WD}}$ (Allen et al. 1998)

• 標準モデル



• 直接観測



➔ 仮定の見直しが必要
($a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、円柱近似、 $T_i = T_e$)

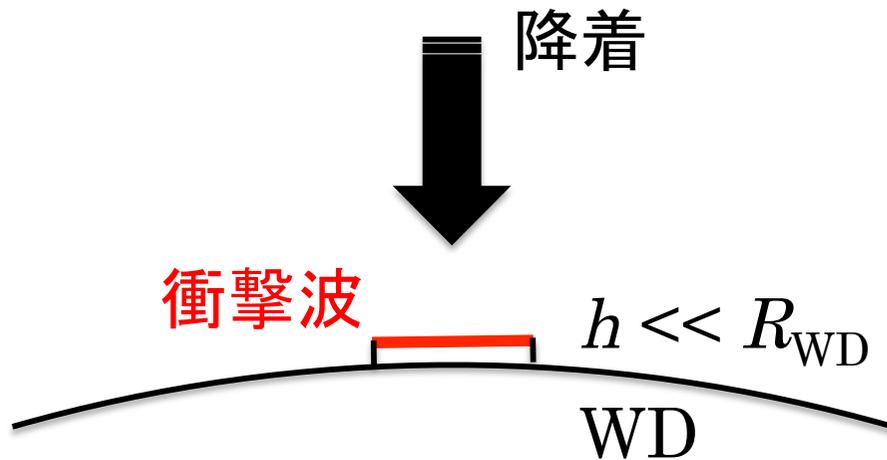
標準モデルの観測的問題(2)

(2) 予想される降着柱の高さ(h)が直接観測より低い(EX Hydrae)

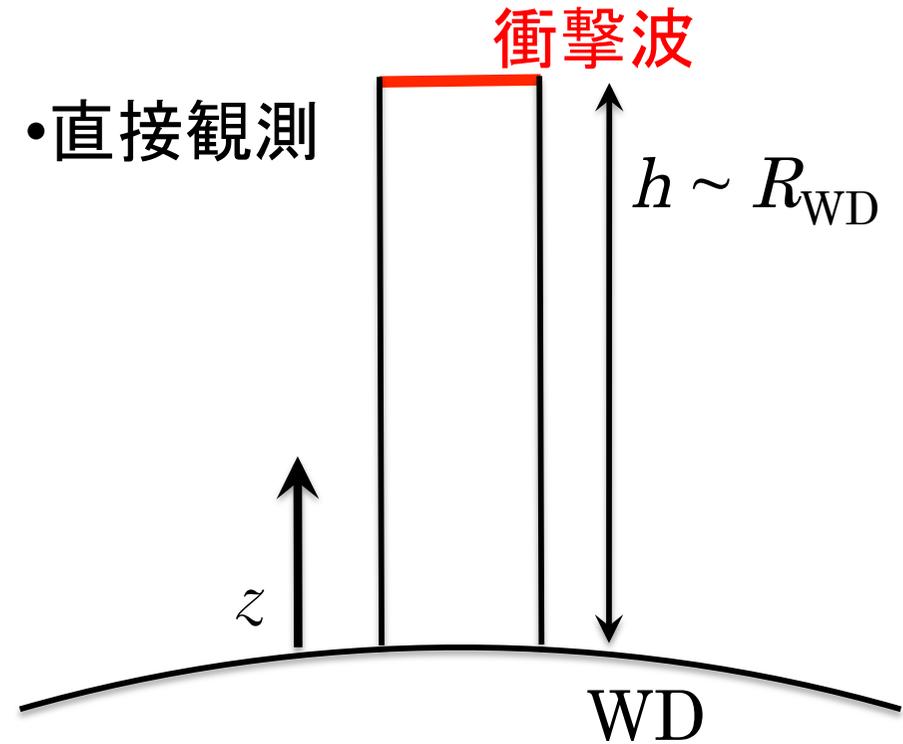
標準モデル $\rightarrow h = 3.7 \times 10^{-3} R_{\text{WD}}$

白色矮星の自転に伴うX線変動 $\rightarrow h \sim R_{\text{WD}}$ (Allen et al. 1998)

• 標準モデル



• 直接観測



仮定の見直しが必要

$(a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、円柱近似、 $T_i = T_e$)

放射が弱い低密度領域で重要

\rightarrow スペクトル全体に効かないので説明を省く

標準モデル仮定の見直し

標準モデルでは $a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と仮定 $\rightarrow a$ は天体によって異なる

$\rho \propto a : a \text{ 小} \rightarrow \rho \text{ 小}$

降着柱高さ(h): 衝撃波面での圧力と動圧の勾配と重力の釣合

$a \text{ 小} \rightarrow \rho \text{ 小} \rightarrow \text{冷却率小} \rightarrow P \text{ 大} \rightarrow h \text{ 大}$

➡ [最大温度低下
双極子磁場幾何学が重要(円柱近似破綻)]

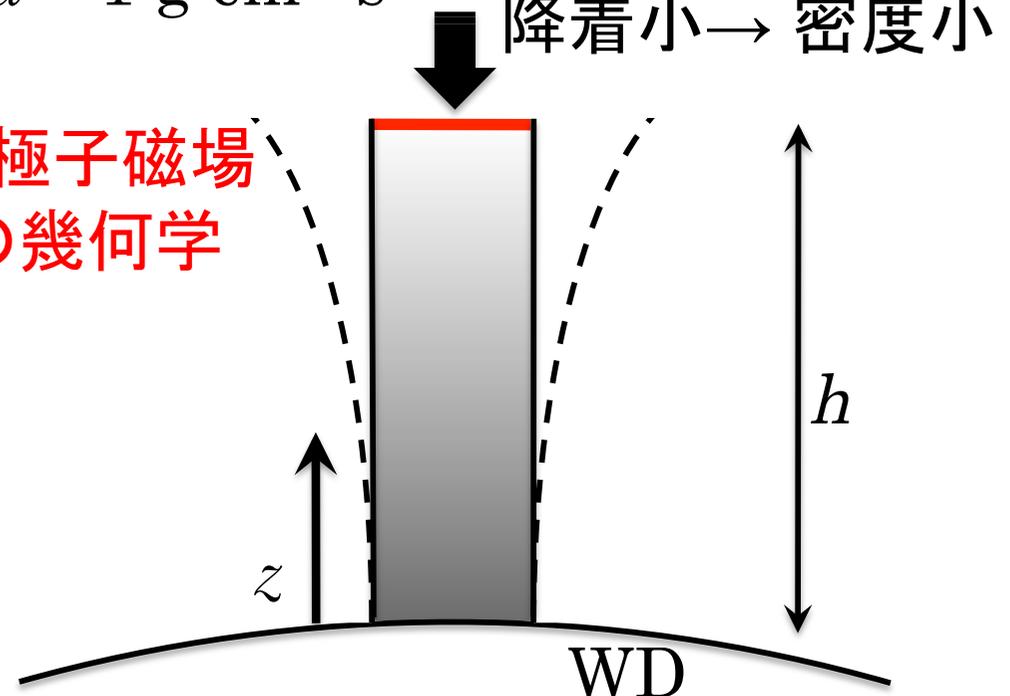
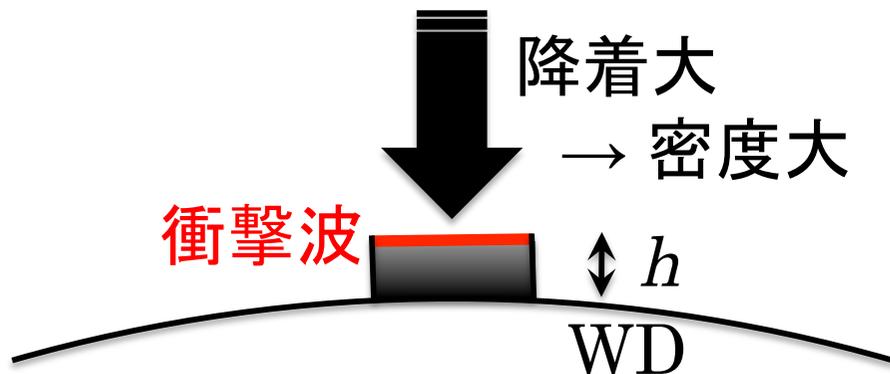
• $a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (標準モデル)

• $a < 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

降着小 \rightarrow 密度小

※グレイスケール: 密度

双極子磁場の幾何学



標準モデルの問題点のまとめ

- 標準モデル

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

円柱近似

イオン電子温度一致

を仮定

→ 降着柱の構造を評価

→ スペクトルモデル構築

→ 観測と比較しパラメーター評価



- 観測的問題

標準モデルによる [白色矮星質量

[降着柱高さ

が他または直接観測と矛盾



- 標準モデルの問題点(仮定の見直し)

標準モデルでは $a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ としているが、

a は天体毎に異なる → 双極子磁場の幾何学が重要になる

本講演の内容

1. 降着柱標準モデルと観測的問題点
2. 降着柱の物理構造の調査
3. スペクトルモデル(ACrad)構築
4. ACradの観測への適用
5. 結果とまとめ

降着柱構造の計算

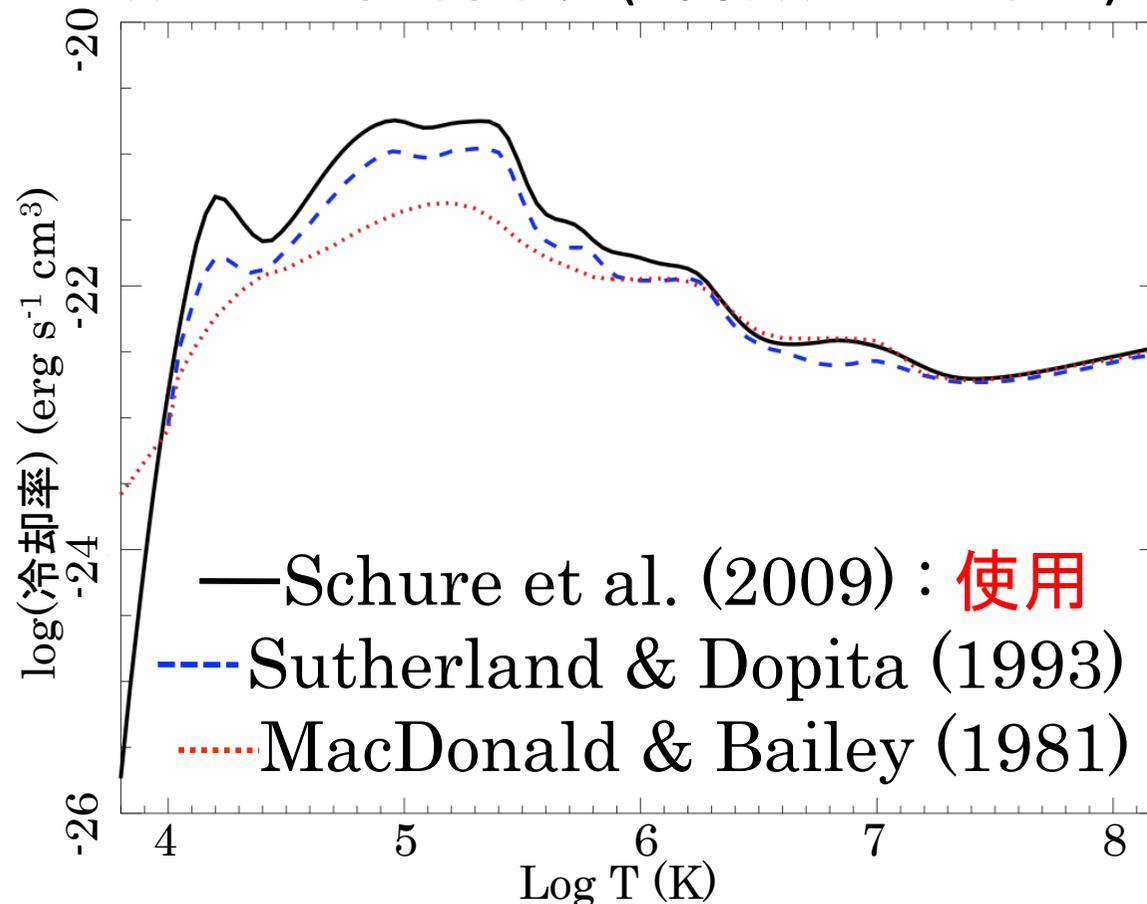
断面積変化 → 連続の式: $\rho v S = \text{const}$ (S : 降着柱の断面積)

双極子磁場 → $S \propto (R_{\text{WD}} + z)^3$ (白色矮星中心からの距離)

a の違いを考慮

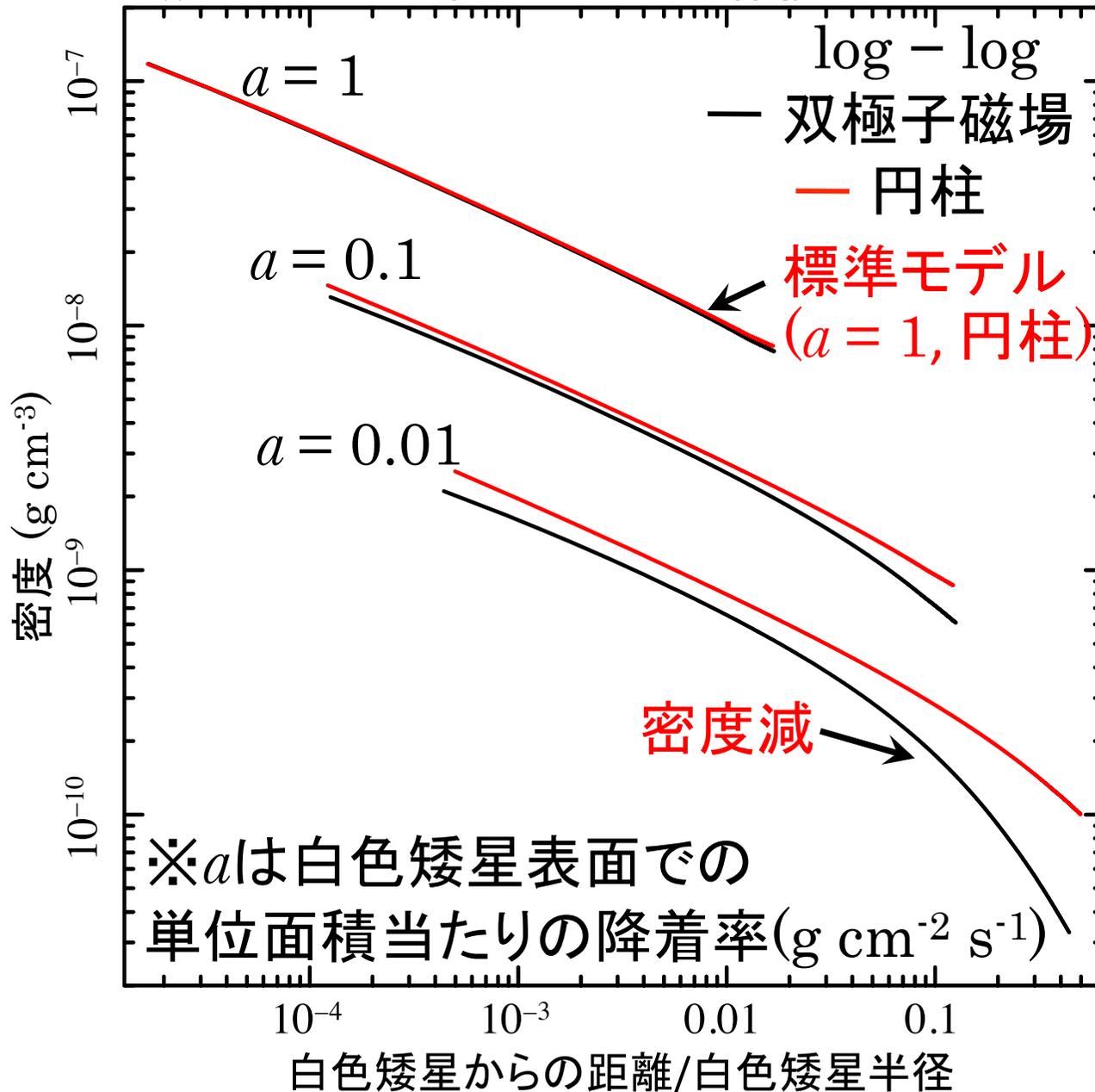
➡ 数値積分で流体力学の連立微分方程式を解く

• 熱的放射の冷却関数 (輝線放射も考慮)



双極子磁場と円柱の降着柱密度分布

$$M_{\text{WD}} = 0.7 M_{\text{sun}} \quad Z = 1 Z_{\text{solar}} \quad (Z: \text{重元素量})$$



右端 : 降着柱の頂上
 左端 : 計算した下限
 (特別な意味はない)

- a 小 \rightarrow ρ 小
 - 双極子降着柱 :
 頂上に向い断面積大
 \rightarrow 密度減
 - a 小 \rightarrow 降着柱伸展
 \rightarrow 双極子幾何学が重要
- $\left[\begin{array}{l} a \text{大} \rightarrow \text{双極子は} \\ \text{円柱降に収束} \end{array} \right]$

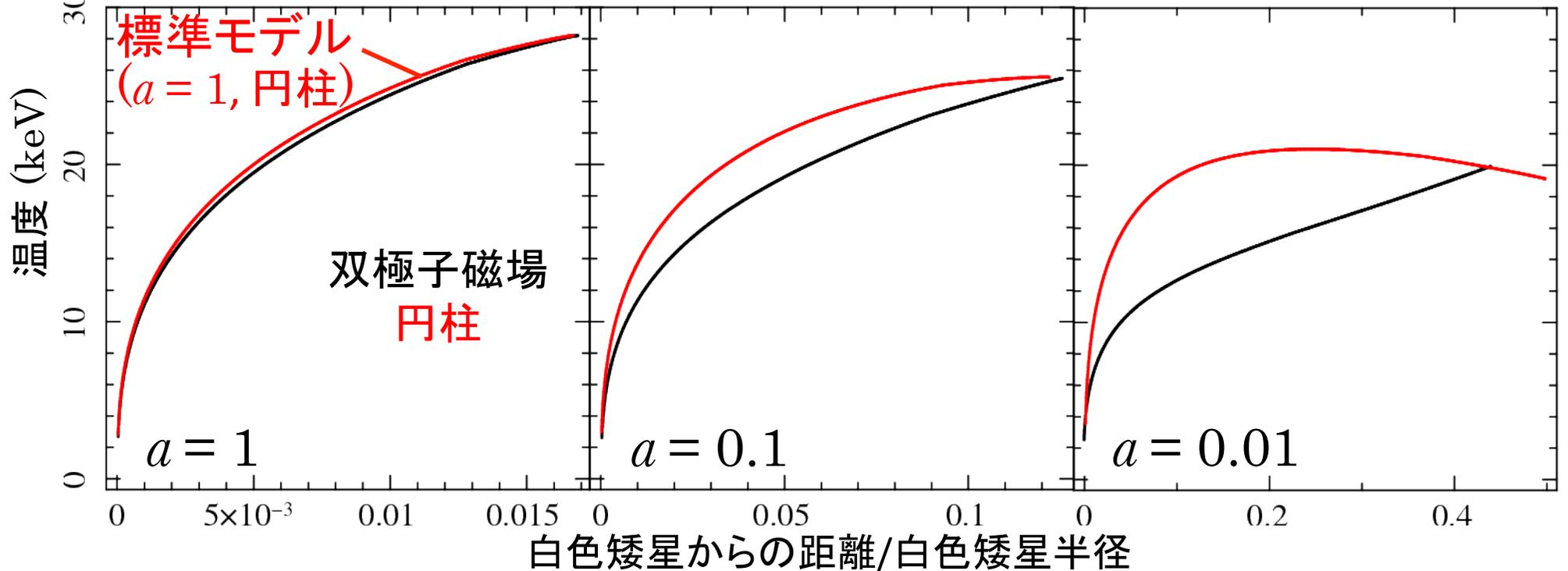
※ a は白色矮星表面での
 単位面積当たりの降着率 ($\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

白色矮星からの距離/白色矮星半径

双極子磁場と円柱の降着柱温度分布

$M_{WD} = 0.7 M_{sun}$ $Z = 1 Z_{solar}$

※右端は降着柱の頂上



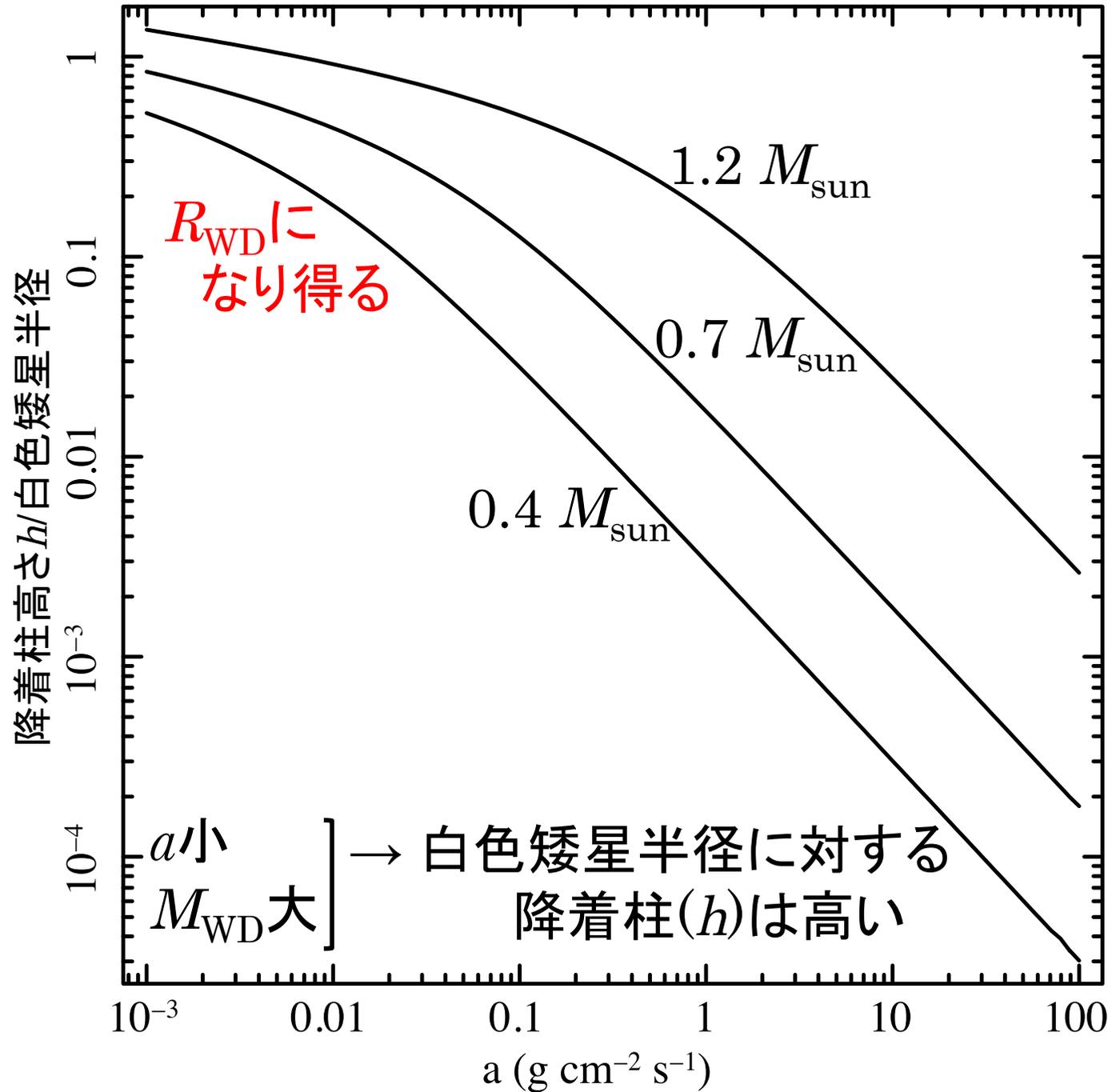
•降着柱内の力の釣り合い(標準モデル) (動圧と熱的圧力の勾配で重力を支持)
$$\frac{d}{dz}(\rho v^2 + P) = -\frac{GM_{WD}}{z^2} \rho$$

衝撃波通過後は P が支配的 $\rightarrow P$ の勾配は z のみで決まる

\rightarrow 双極子での ρ の上昇を打ち消す (円柱と同じ P 分布を得るため)

\rightarrow 円柱と比較して **温度低下が速い**

a と双極子降着柱の高さ



※ M_{WD} 大 \rightarrow R_{WD} 小
 \rightarrow 実際の高さ
 M_{WD} 間で近い

R_{WD} に
なり得る

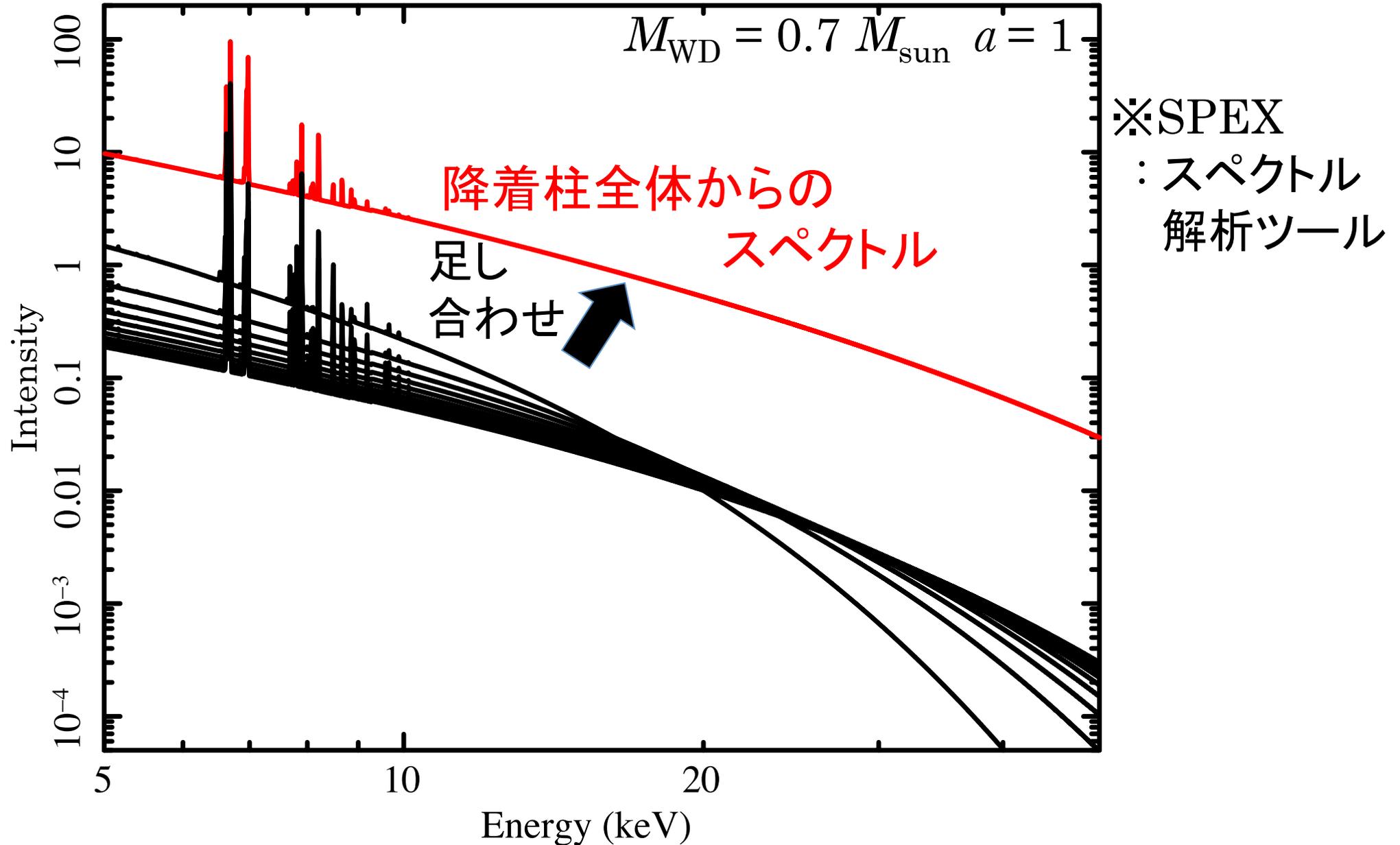
a 小
 M_{WD} 大] \rightarrow 白色矮星半径に対する
降着柱 (h) は高い

本講演の内容

1. 降着柱標準モデルと観測的問題点
2. 降着柱の物理構造の調査
3. スペクトルモデル(ACrad)構築
4. ACradの観測への適用
5. 結果とまとめ

スペクトルモデル構築

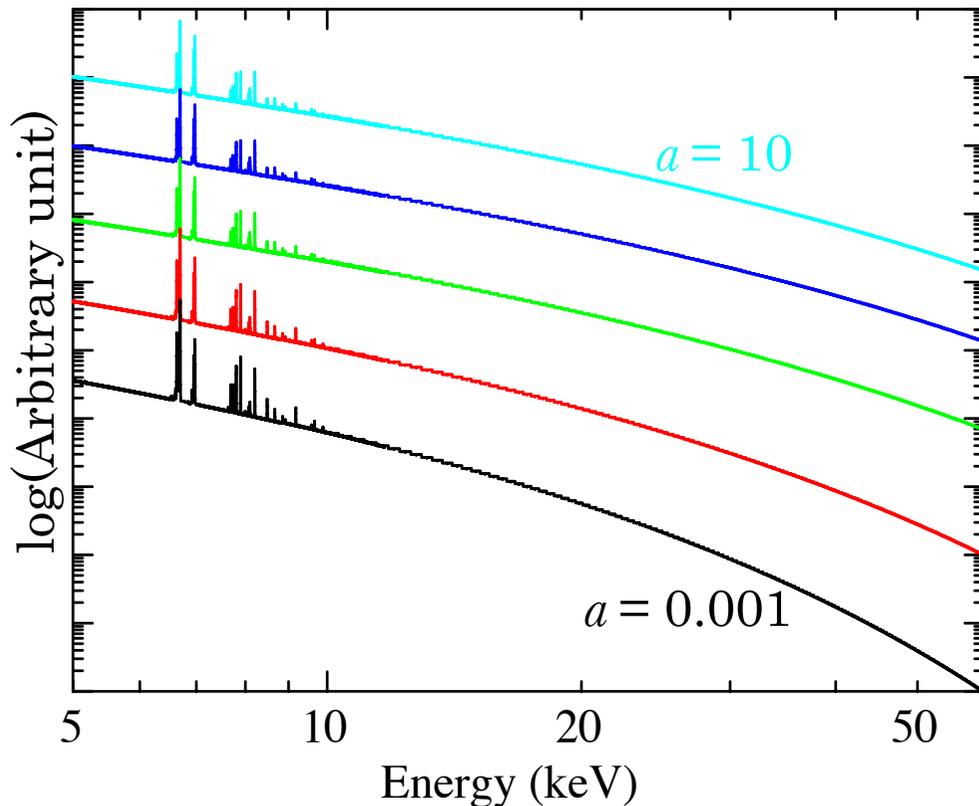
- 降着柱を100分割 → それぞれのスペクトルを計算(SPEX使用)
→ 足し合わせ



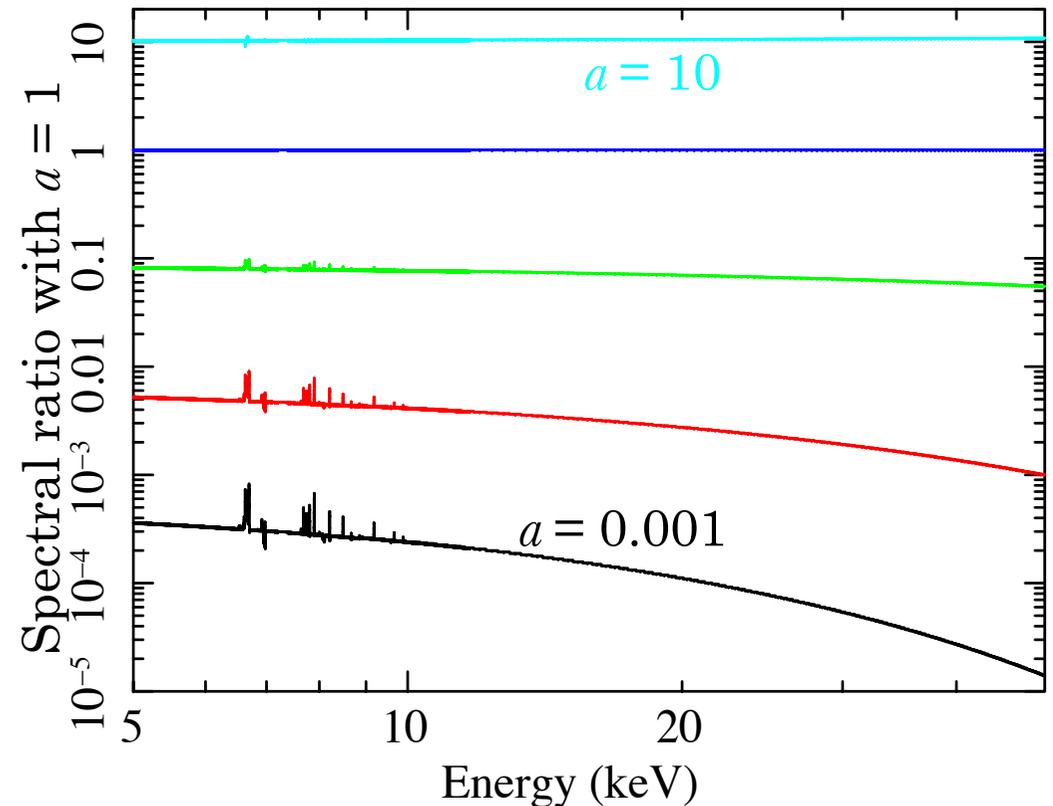
a とスペクトル

$M_{\text{WD}} = 0.7 M_{\text{sun}}$ $Z = 0.3 Z_{\text{solar}}$ $a = 10, 1, 0.1, 0.01, 0.001 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

•スペクトル



• $a = 1$ とのスペクトル比



$a > 1$: a に対して不変(密度温度分布の形が不変のため)

$a < 1$: a 減少 \rightarrow 温度低下 \rightarrow 連続成分 \rightarrow 弱



XSPECに組み込む \rightarrow 以下、「ACrad model」と呼ぶ

(※Accreion Column radiationの略)

本講演の内容

1. 降着柱標準モデルと観測的問題点
2. 降着柱の物理構造の調査
3. スペクトルモデル(ACrad)構築
4. ACradの観測への適用
5. 結果とまとめ

サンプル

- V1223 Sagittarii (典型的な強磁場激変星)

$$D = 527_{-43}^{+54} \text{ pc (Beuermann et al. 2004)}$$

$$i = 24 \pm 7 \text{ deg (Beuermann et al. 2004)}$$

$$M_{\text{WD}} = 0.82_{-0.06}^{+0.05} M_{\text{sun}} \text{ (標準モデル; Hayashi et al. 2011)}$$

$$L_{0.1-100} = 24.3 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} \text{ (Suleimanov et al. 2005) } \leftarrow$$

降着柱の高さ $h < 0.07 R_{\text{WD}}$ (WDの反射X線による直接観測)
→ 標準モデルと一致 (Hayashi et al. 2011)

- EX Hydrae

$$D = 64.5 \pm 1.2 \text{ pc (Beuermann et al. 2003)}$$

$$i = 77.8 \pm 0.4 \text{ deg (Hoogerwerf 2005) } \leftarrow \text{「食」} \rightarrow \text{誤差小}$$

$$M_{\text{WD}} = 0.79 \pm 0.026 M_{\text{sun}} \text{ (ケプラー則; Beuermann et al. 2008)}$$

$$= 0.42 \pm 0.02 M_{\text{sun}} \text{ (降着柱モデル; Yuasa et al. 2010)}$$

$$L_{0.1-100} = 0.17 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1} \text{ (Suleimanov et al. 2005) } \leftarrow$$

→ V1223 Sagittariiに比べ2桁以上暗い

→ 単位面積当たりの降着率 a も ~2桁程度小さい(?)

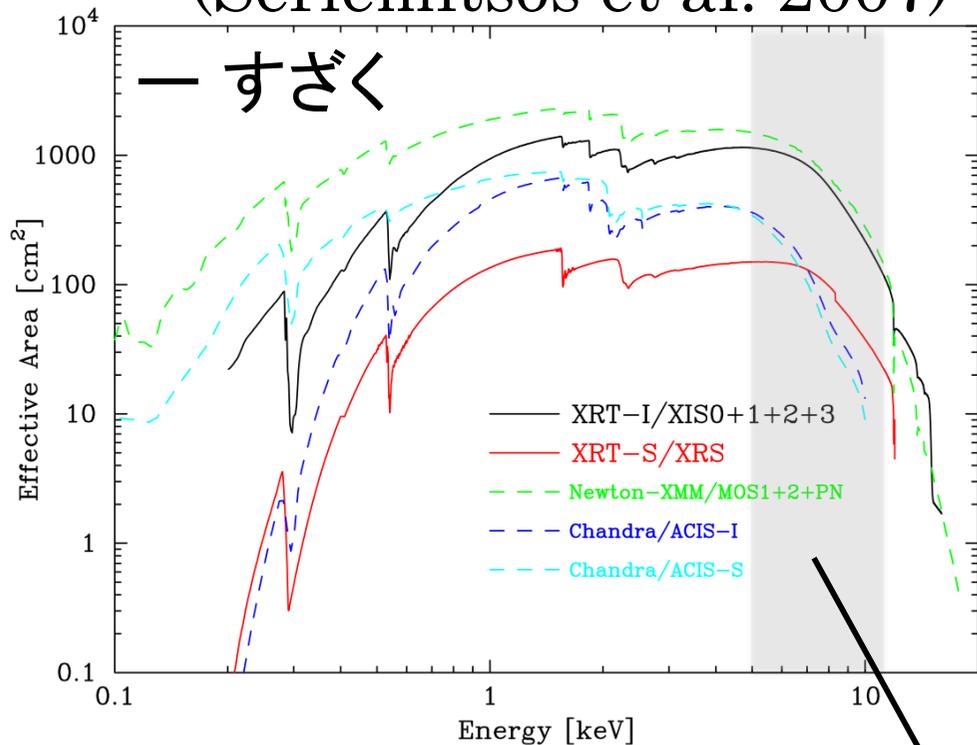
降着柱の高さ (h) $\sim 1 R_{\text{WD}}$ (WDの自転に伴うX線光度変動)

→ 標準モデルより2~3桁高い (Allen et al. 1998)

すざく衛星観測システム

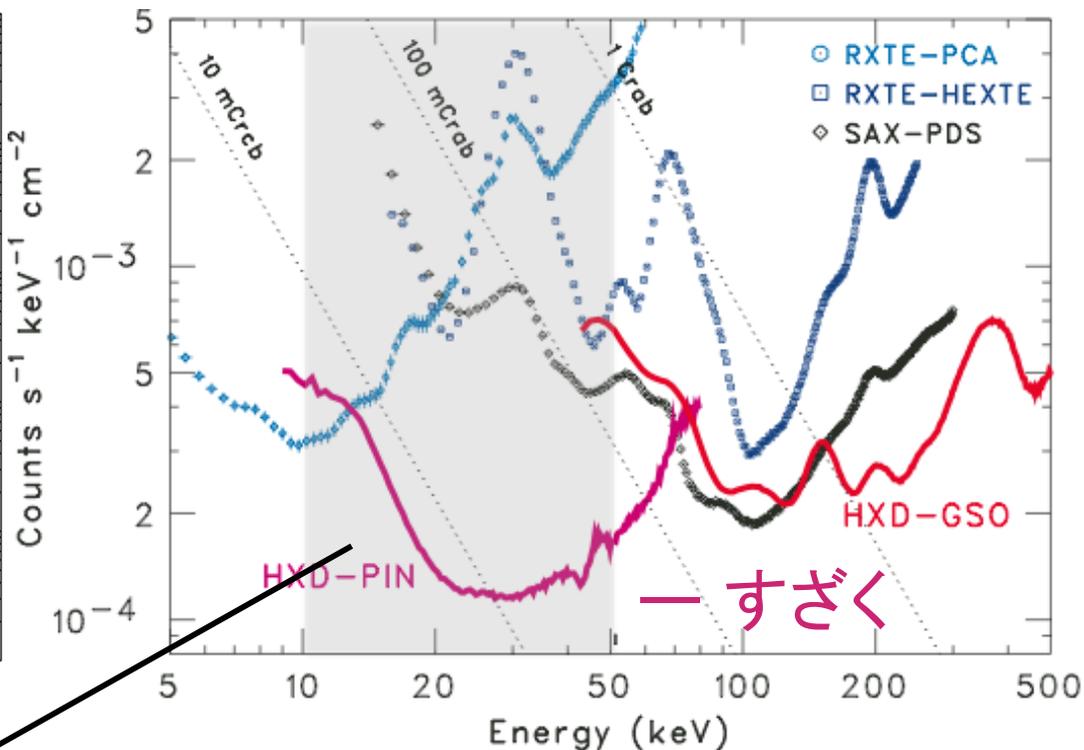
•X線望遠鏡+X線CCD

有効面積の多衛星との比較
(Serlemitsos et al. 2007)



•硬X線検出器

検出器感度の他衛星との比較
(Mitsuda et al. 2007)



降着柱研究で重要なエネルギーバンド

(降着柱のスペクトルの違いが顕著、吸収の影響が小さい)

大有効面積 (5 - 12 keV)

最高の検出感度 (10 - 50 keV)



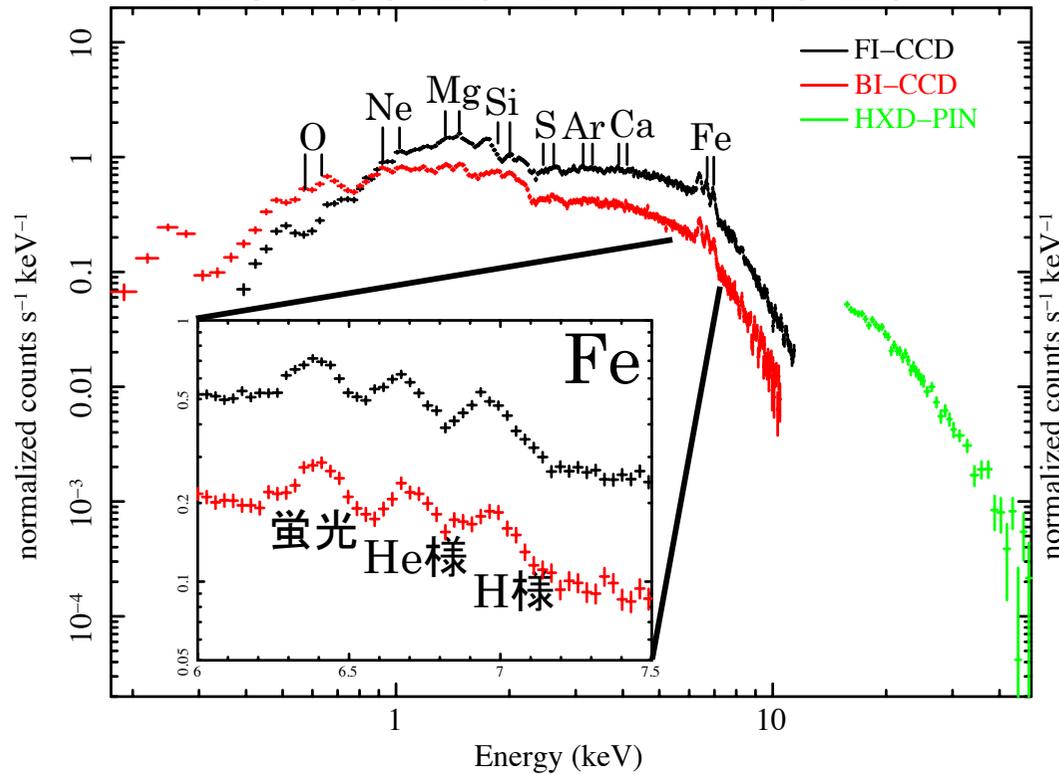
すざく衛星は降着柱研究に最適

観測

•V1223 Sagittarii

2007年4月観測

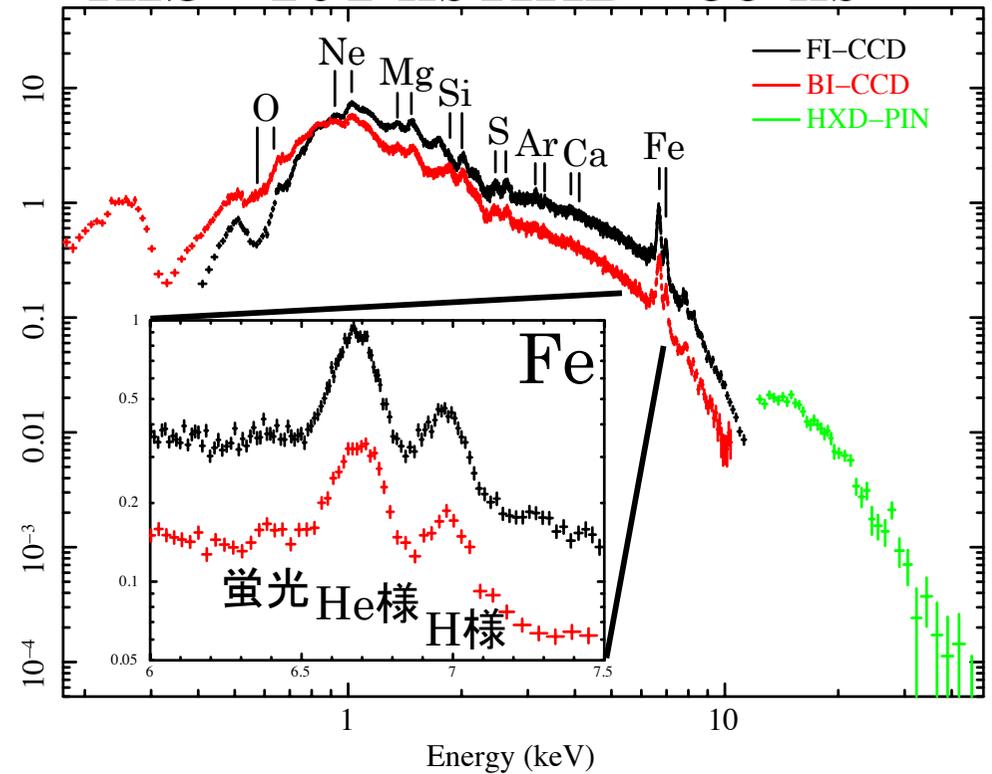
XIS : 60 ks HXD : 46 ks



•EX Hydrae

2007年7月観測

XIS : 101 ks HXD : 59 ks

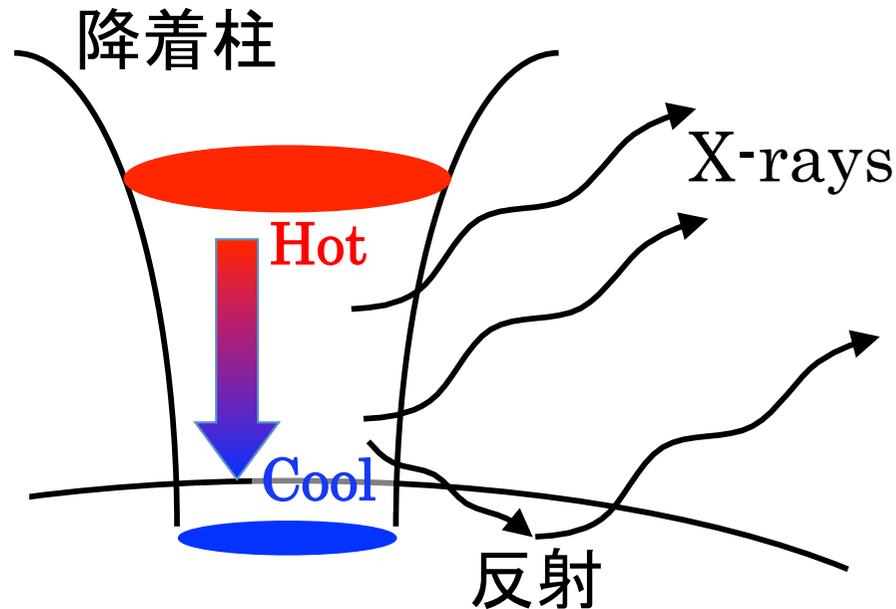


50 keVまでの良質なスペクトル

フィットモデル

phabs × (ACrad + Gaussian) × pcfabs

- 光電吸収 [$\exp(-N_H\sigma)$]: phabs in XSPEC
→ 水素柱密度 (N_H)
- 降着柱からの放射: **ACrad** → M_{WD}, a, Z



- ※ 白色矮星表面からの反射
FeK α とコンプトン成分
→ スペクトルを变形
→ **反射成分の評価も重要**

- 蛍光FeK α : Gaussian → [エネルギー中心は6.4 keVに固定
輝線幅は0 eVに固定]
- コンプトン成分(次項)

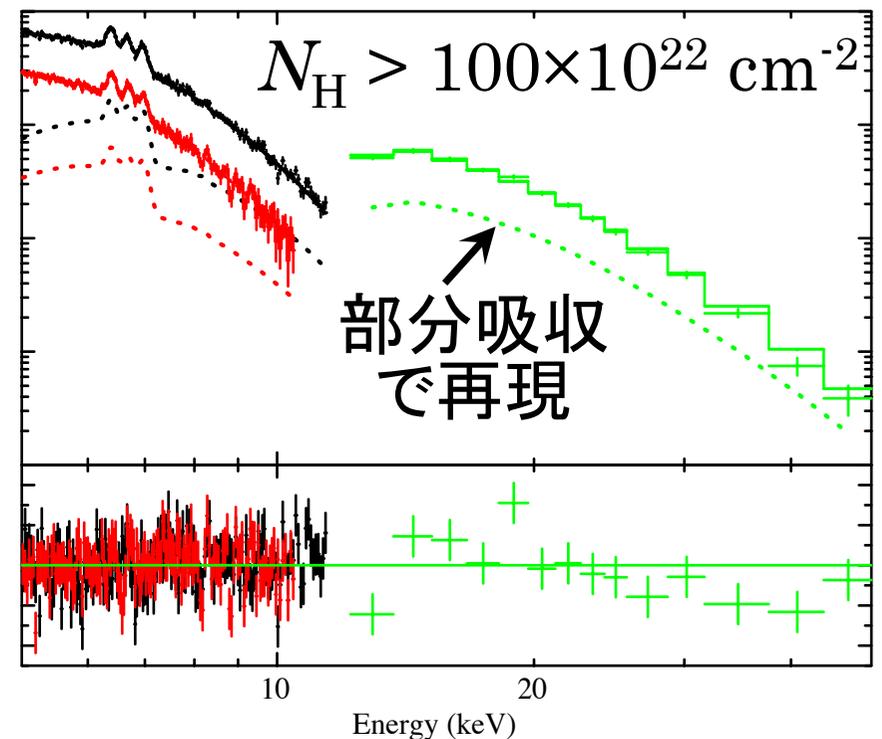
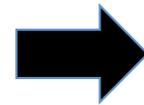
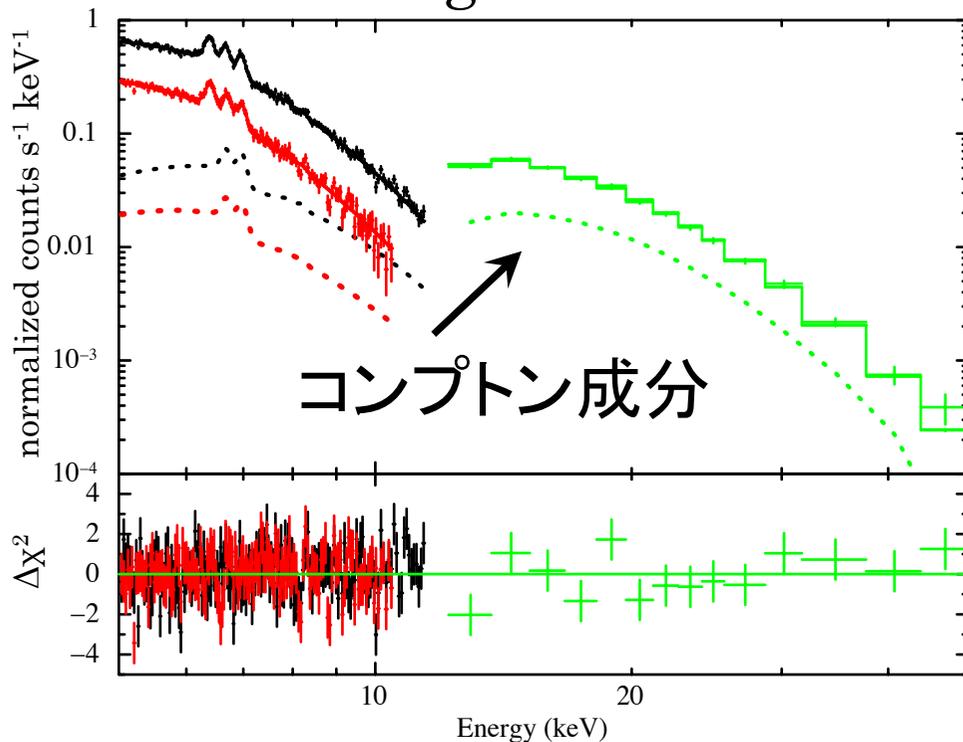
フィットモデル(つづき)

•コンプトン成分 [$C_{pc} \exp(-N_{Hpc} \sigma) + (1 - C_{pc})$]での部分吸収で代用
: pcfabs in XSPEC

→ 水素柱密度(N_{Hpc}), covering fraction (C_{pc})

【モデルスペクトルの一部に強い吸収
→ コンプトン反射成分を再現(計算時間の節約)
 M_{WD} 系統誤差は統計誤差の範囲内
(Cropper et al. 1998)】

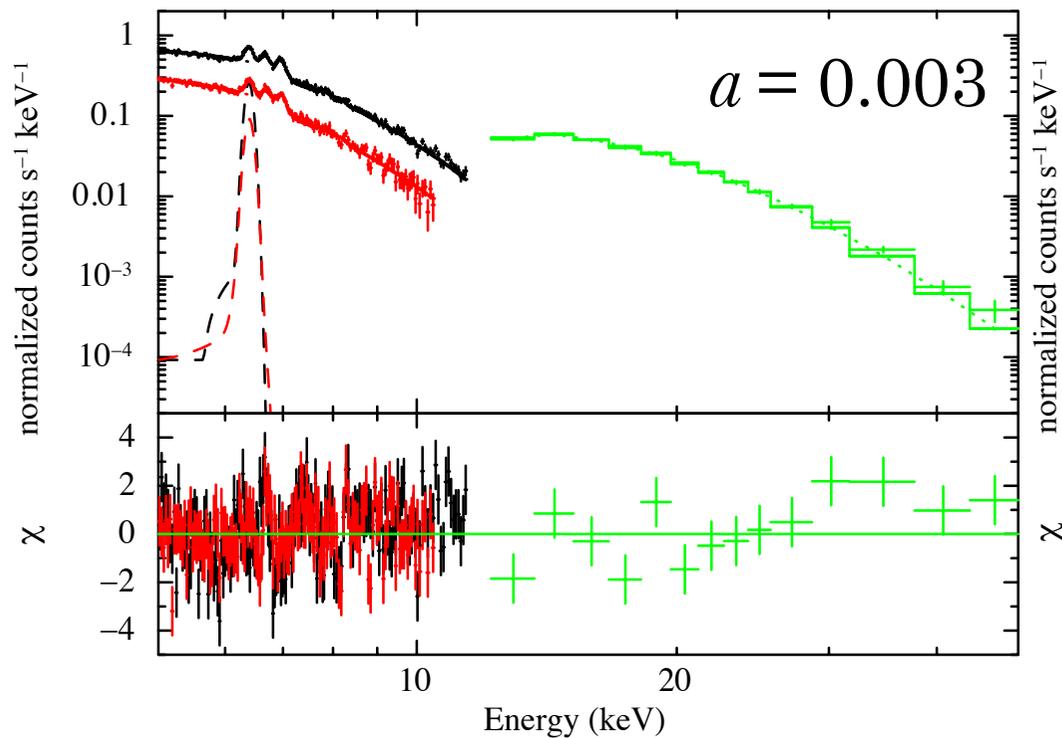
V1223 Sagittarii



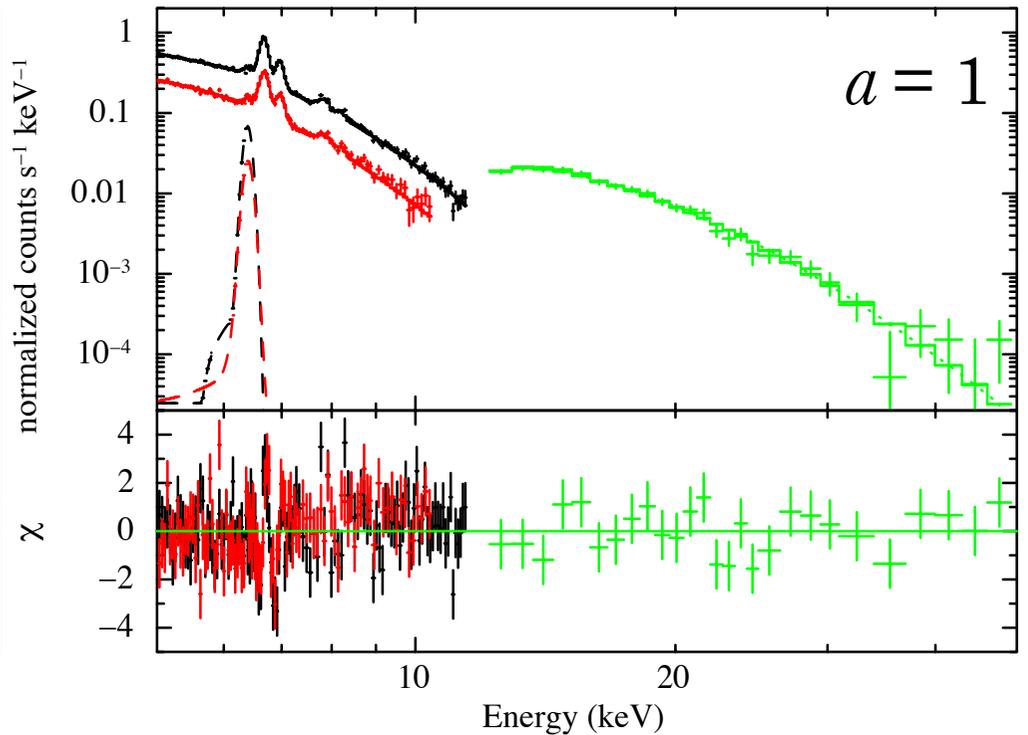
フィット結果

M_{WD} と a は強くcouple $\rightarrow \log a = -3.5 \sim 1.5$ を0.5刻みで固定しフィット

•V1223 Sagittarii



•EX Hydrae

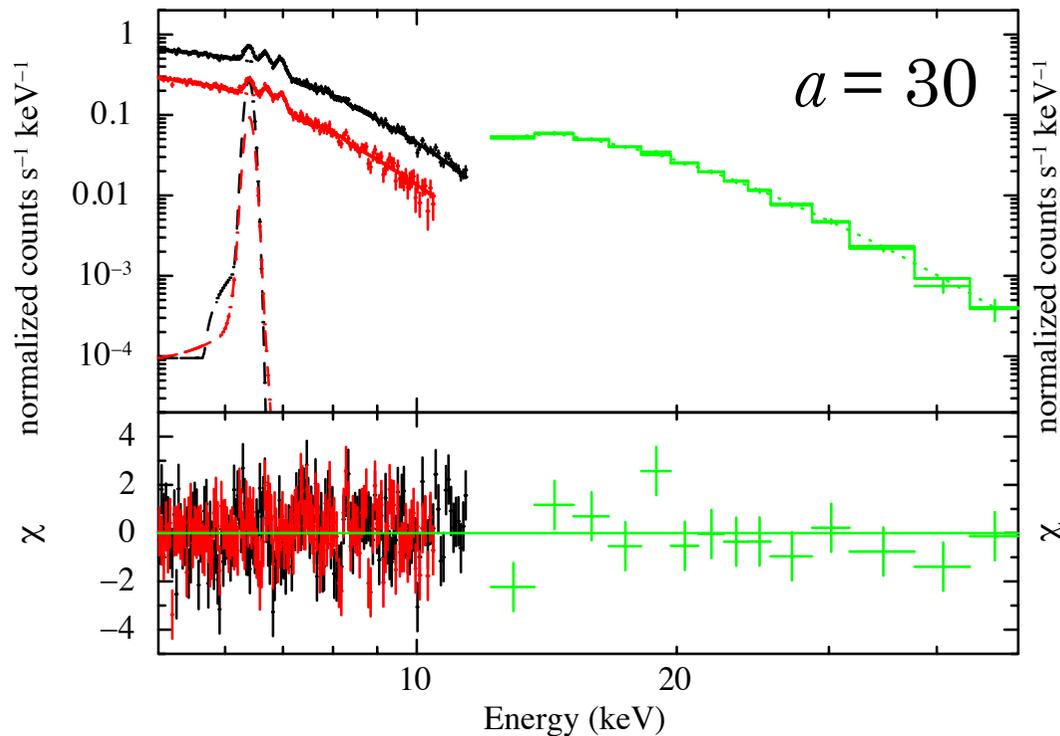


※ a がベストフィットと異なる場合

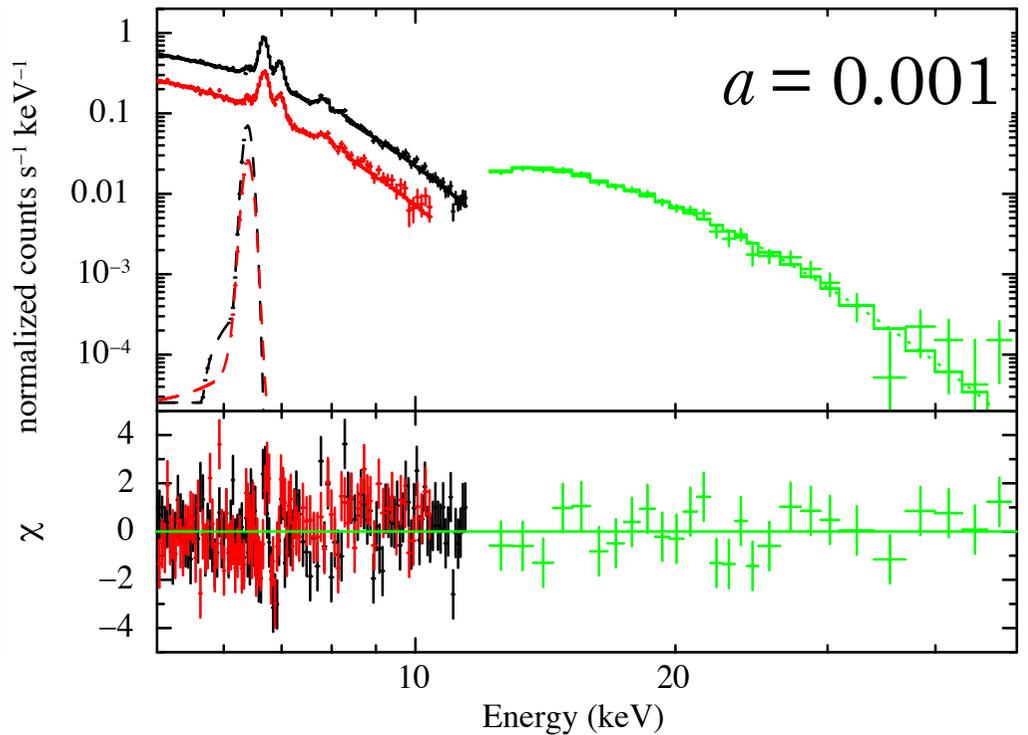
フィット結果

M_{WD} と a は強くcouple $\rightarrow \log a = -3.5 \sim 1.5$ を0.5刻みで固定しフィット

•V1223 Sagittarii



•EX Hydrae

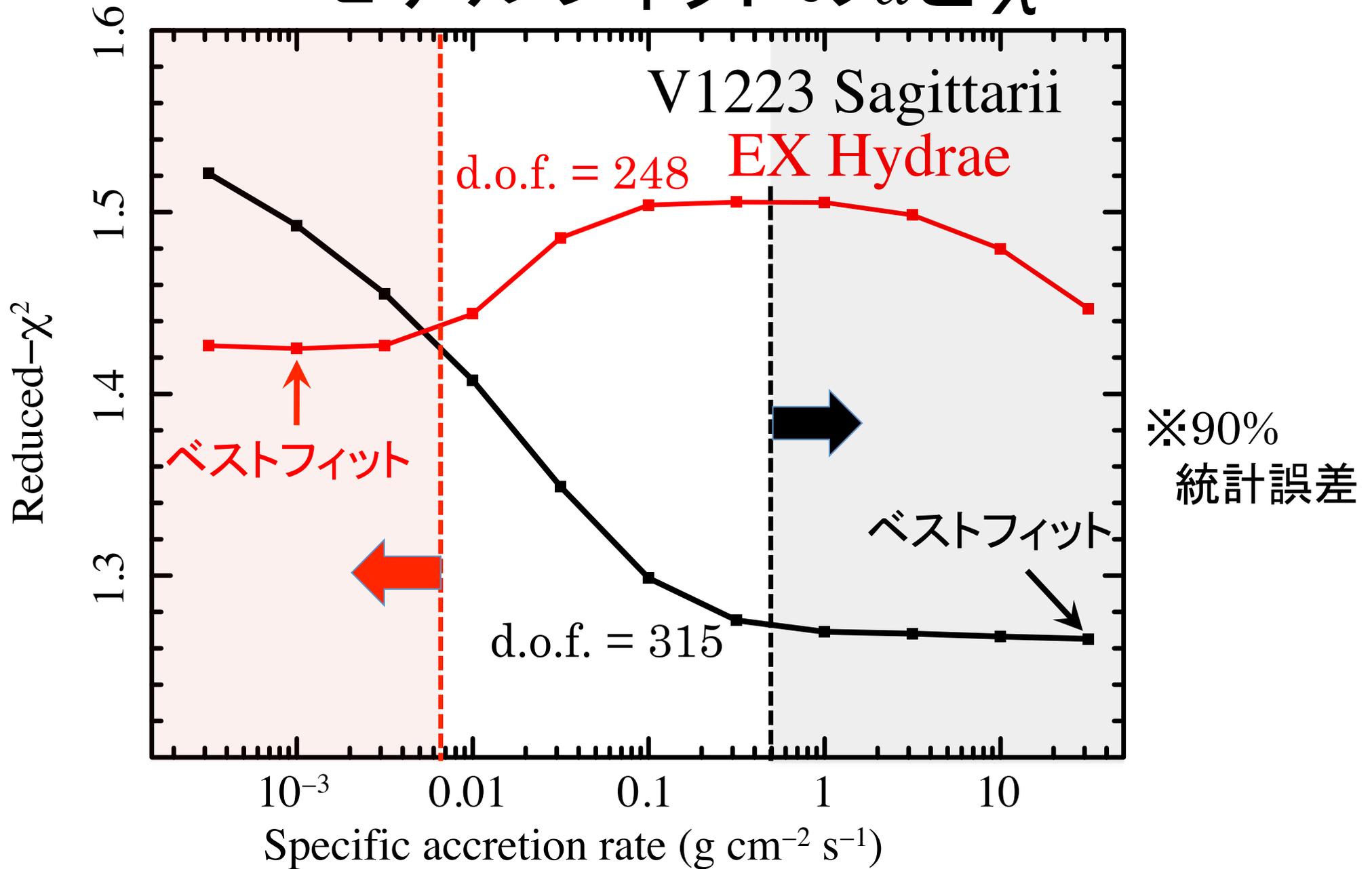


モデルは観測されたスペクトルを再現

※EX HydraeのFeK α 輝線周りは

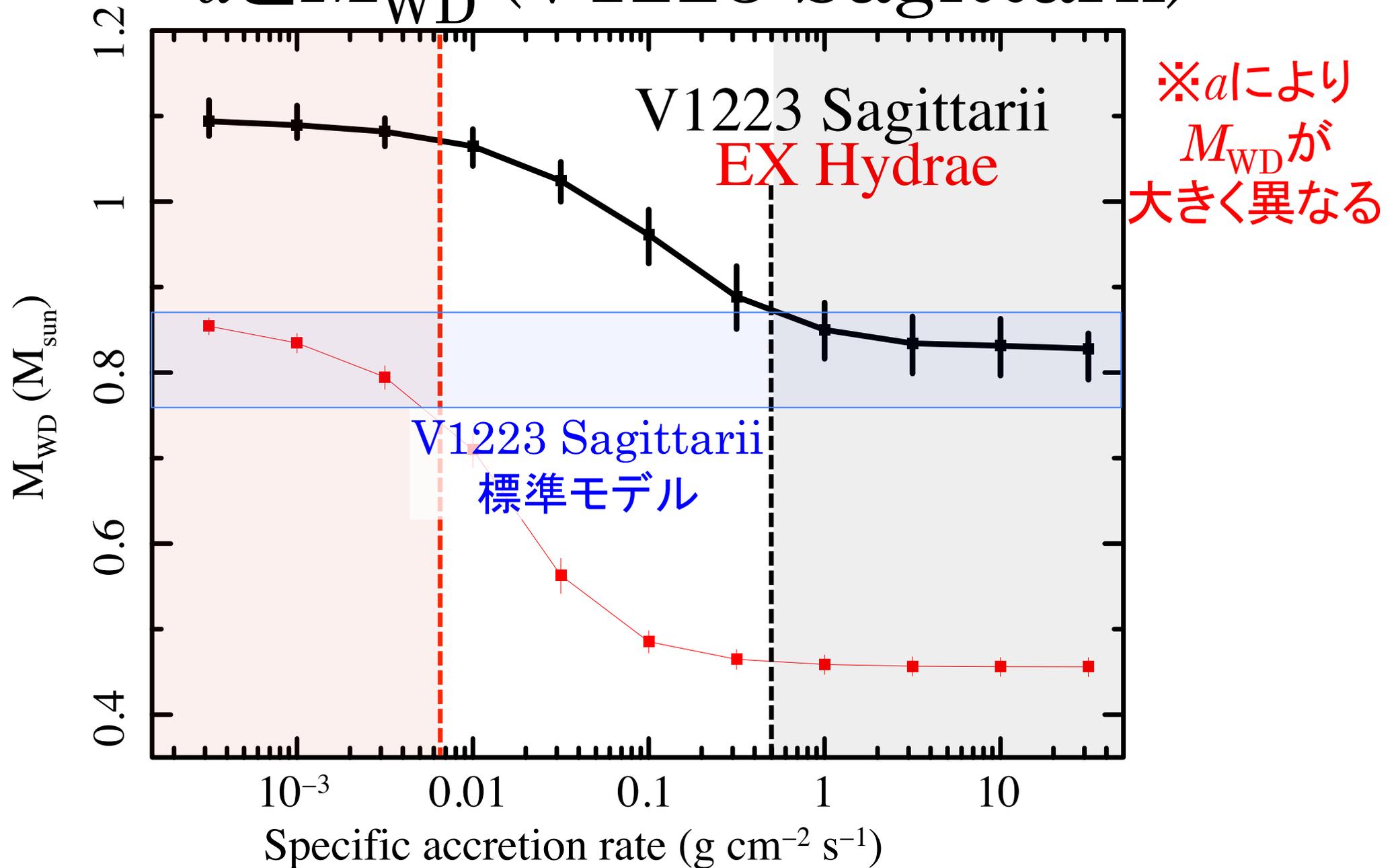
応答関数の系統誤差のため残差が残る

モデルフィットの a と χ^2



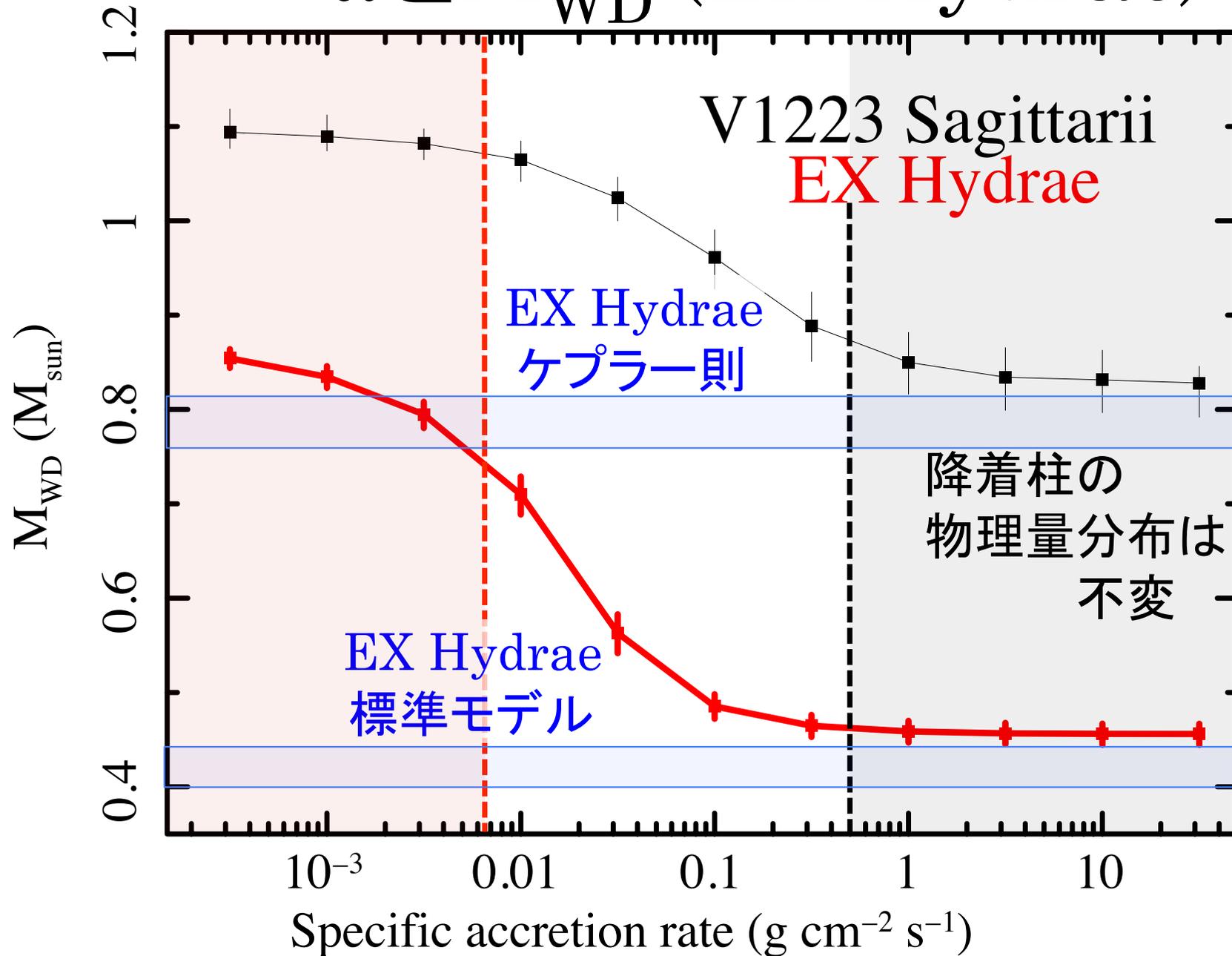
V1223 Sgr : $a > 0.5 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ EX Hya : $a < 0.007 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

a と M_{WD} (V1223 Sagittarii)



V1223 Sgr : $M_{\text{WD}} = 0.83^{+0.08}_{-0.04} M_{\text{sun}} \rightarrow$ 標準モデルと一致

a と M_{WD} (EX Hydrae)



※ a により
 M_{WD} が
大きく異なる

EX Hya : $> 0.73 M_{\text{sun}}$

質量降着率と降着面積率

フラックス (F) ← スペクトルフィッティング
天体までの距離 (D) ← 既知

→ 光度 : $L = 4\pi D^2 F$
(観測)

※白色矮星の質量と半径の関係 (Nauenberg 1972)

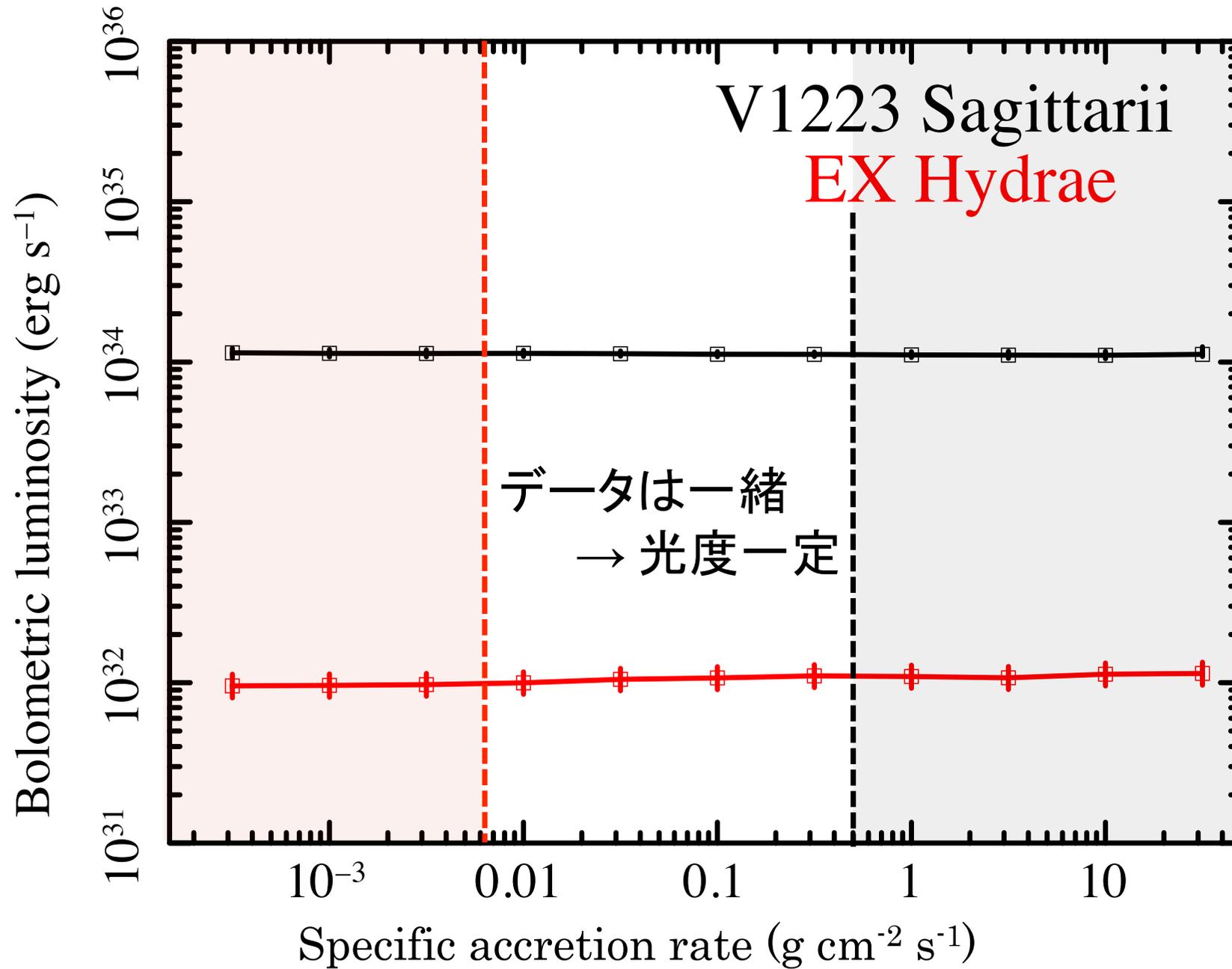
$$R_{\text{WD}} = 0.78 \times 10^9 \left[\left(\frac{1.44 M_{\text{sun}}}{M_{\text{WD}}} \right)^{2/3} - \left(\frac{M_{\text{WD}}}{1.44 M_{\text{sun}}} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \text{ cm}$$

光度 : 解放される重力ポテンシャル → $L = \frac{GM\dot{M}_{\text{WD}}}{R_{\text{WD}}} \rightarrow$ 質量降着率

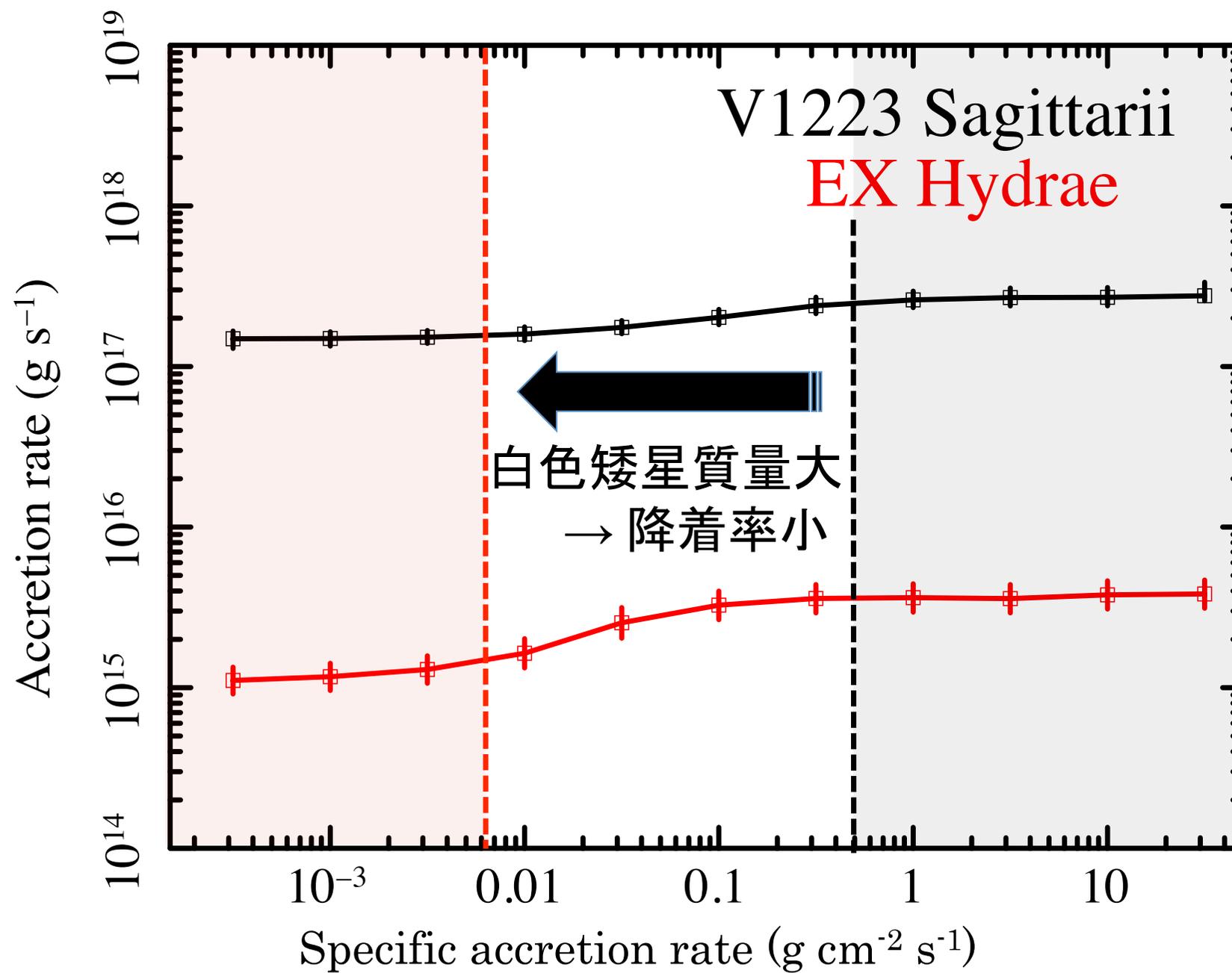
質量降着率 : 降着する面積 × 単位面積降着率 (a) → $\dot{M} = \frac{\text{降着面積}}{4\pi R_{\text{WD}}^2} f a$
→ 降着面積率 (f)

f (降着面積率) : 白色矮星表面全体に対する
降着する面積(降着柱の底面積)の割合 ($f < 1$)

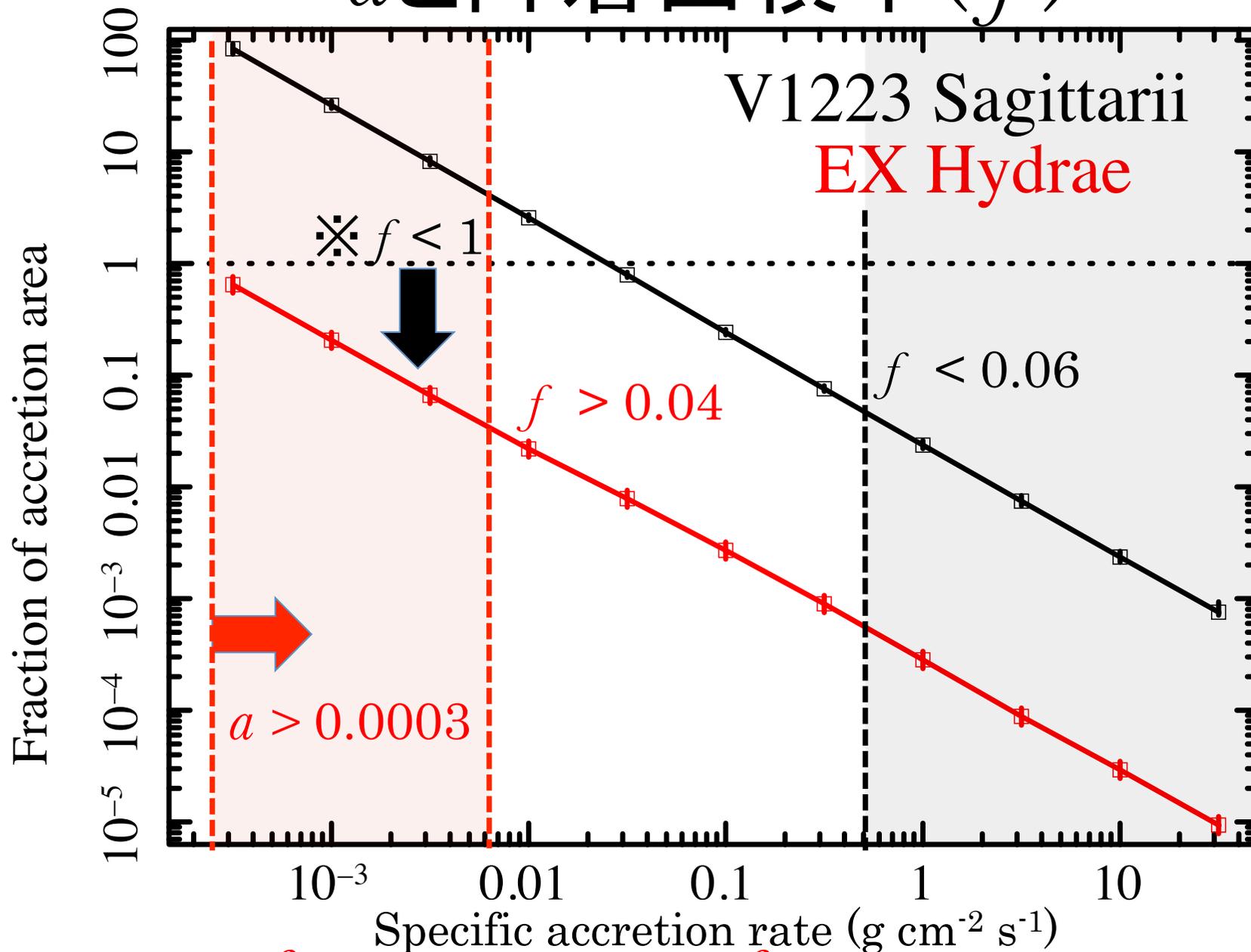
a と光度 (0.001-100 keV)



a と質量降着率

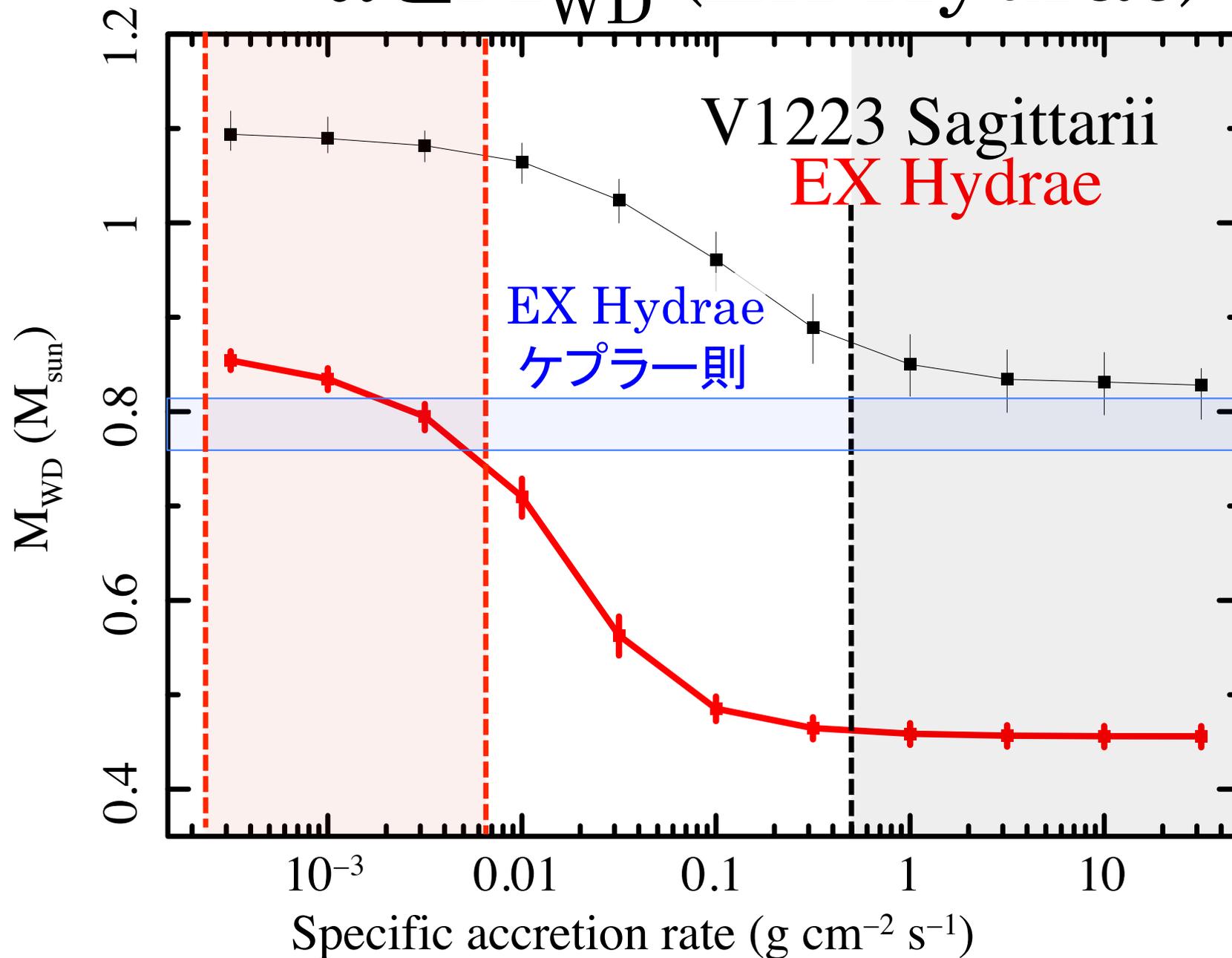


a と降着面積率(f)



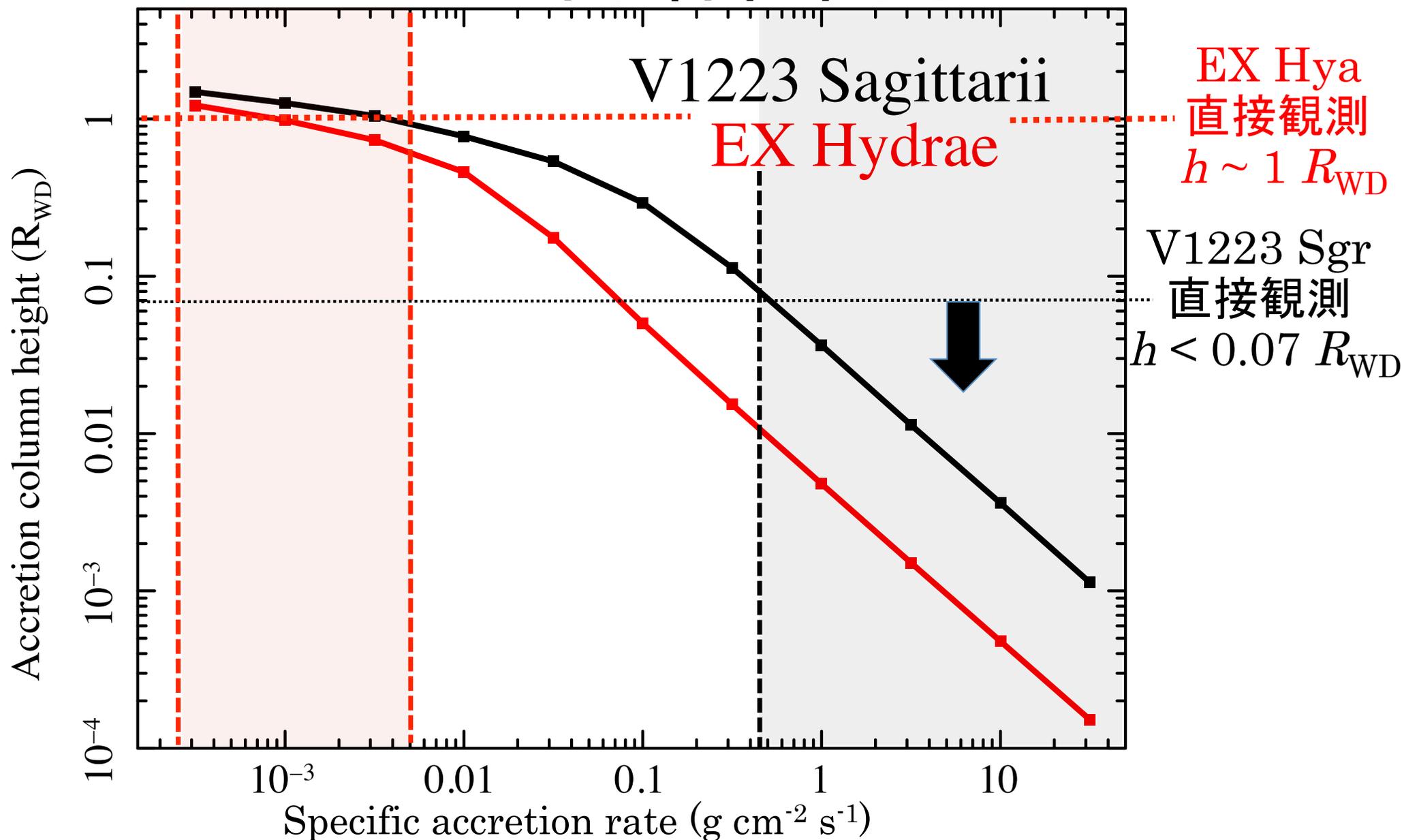
V1223 Sgr : $f < 0.06$ EX Hya : $f > 0.04$,
 $0.0003 < a < 0.007 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

a と M_{WD} (EX Hydrae)



EX Hya : $0.83^{+0.03}_{-0.1} M_{\text{sun}}$ → ケプラー則 ($0.79 \pm 0.026 M_{\text{sun}}$) と一致

a と降着柱高さ



V1223 Sgr : $h < 0.09 R_{\text{WD}}$

→ 直接観測と一致

EX Hya : $0.6 < h < 1.2 R_{\text{WD}}$

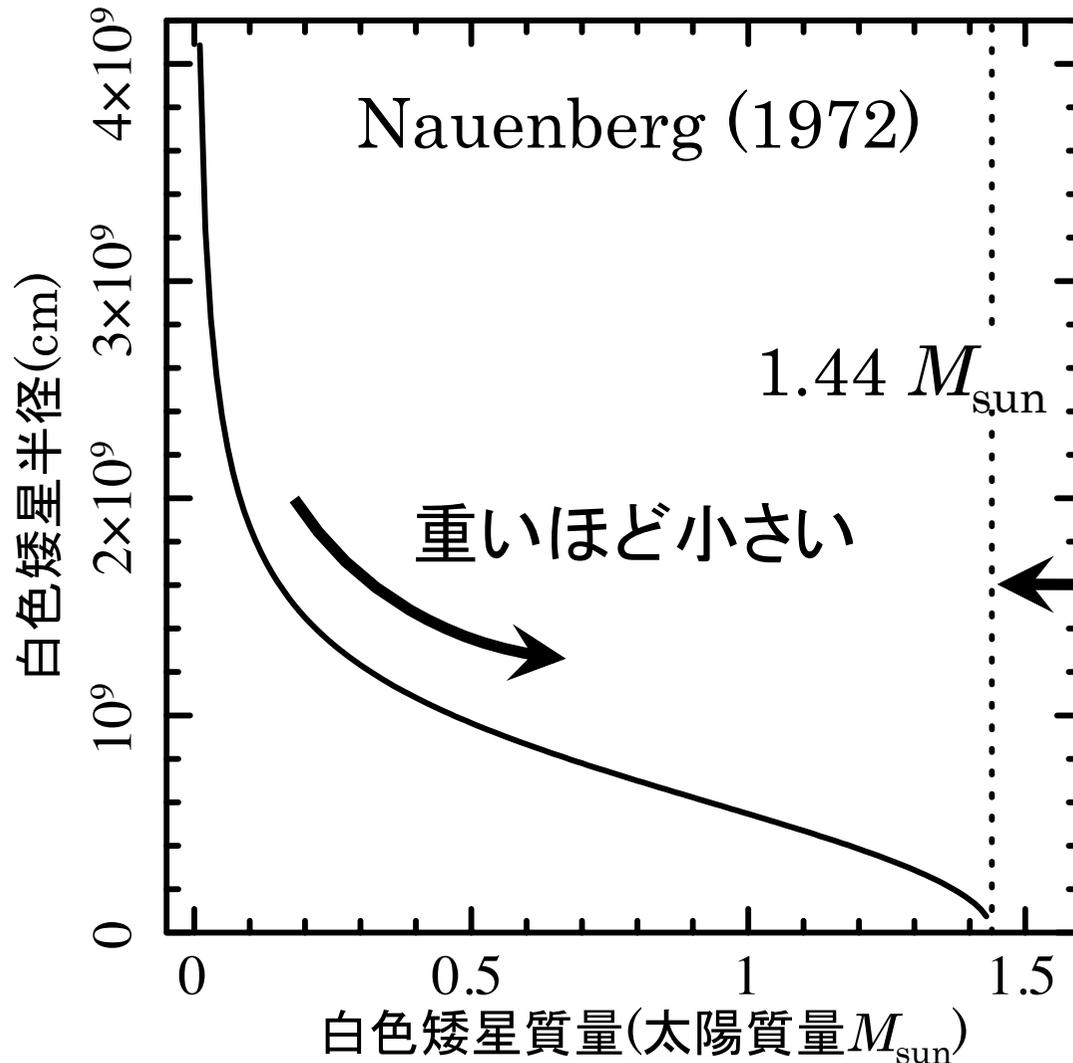
→ 直接観測と一致

本講演の内容

1. 降着柱標準モデルと観測的問題点
2. 降着柱の物理構造の調査
3. スペクトルモデル(ACrad)構築
4. ACradの観測への適用
5. 結果とまとめ

白色矮星 (White Dwarf ; WD)

質量 $M_{WD} \sim 10^{33}$ g (太陽位) } → 高密度天体
半径 $R_{WD} \sim 10^{8-9}$ cm (地球位) } (密度 $\sim 10^6$ g cm⁻³)



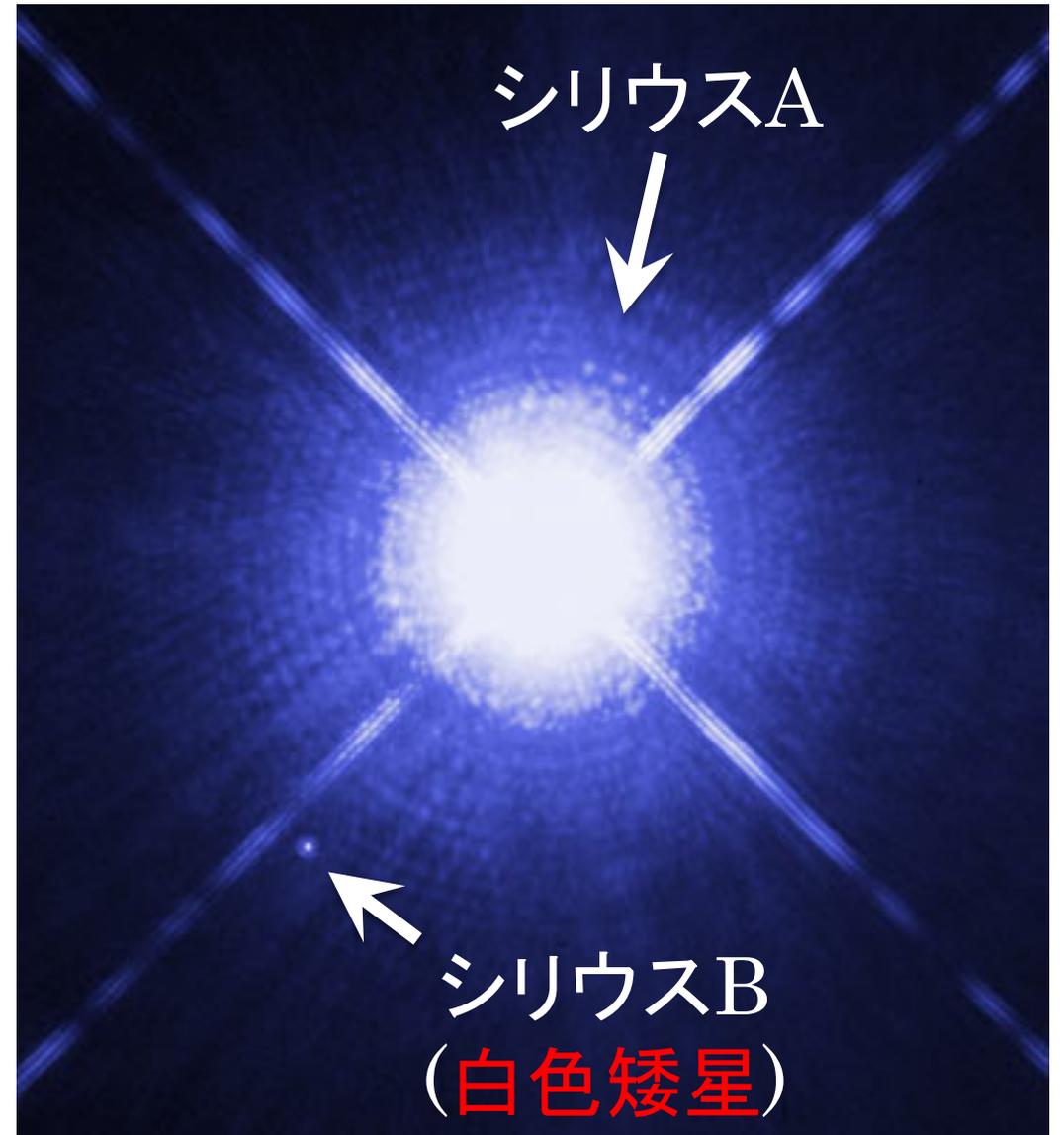
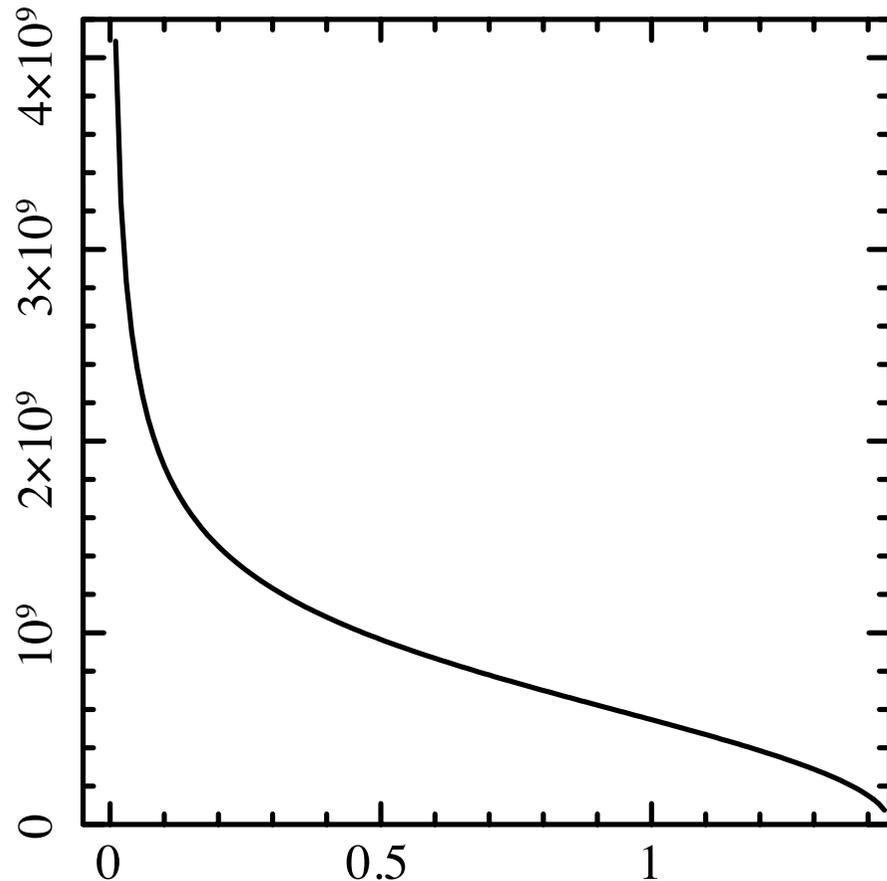
電子の縮退圧で重力を支持
質量大 → 密度大
→ 縮退圧大 → 重力に対抗
➡ 重いほど小さい

質量に限界($1.44 M_{sun}$)が存在
(チャンドラセカール限界)

白色矮星

質量 $M_{\text{WD}} \sim 10^{33}$ g (太陽位)
半径 $R_{\text{WD}} \sim 10^{8-9}$ cm (地球位)
→ 高密度天体

電子の縮退圧で重力を支持



(ハッブル宇宙望遠鏡)

激変星の分類

弱磁場激変星 ($B < 10^6$ G) : 降着円盤は白色矮星近傍まで

強磁場激変星 ($B > 10^6$ G) : 磁場が降着流に影響
降着物質が磁力線に沿って落下

• Polar ($B > 10^7$ G)

$$P_{\text{spin}} = P_{\text{orbit}}$$

降着円盤なし

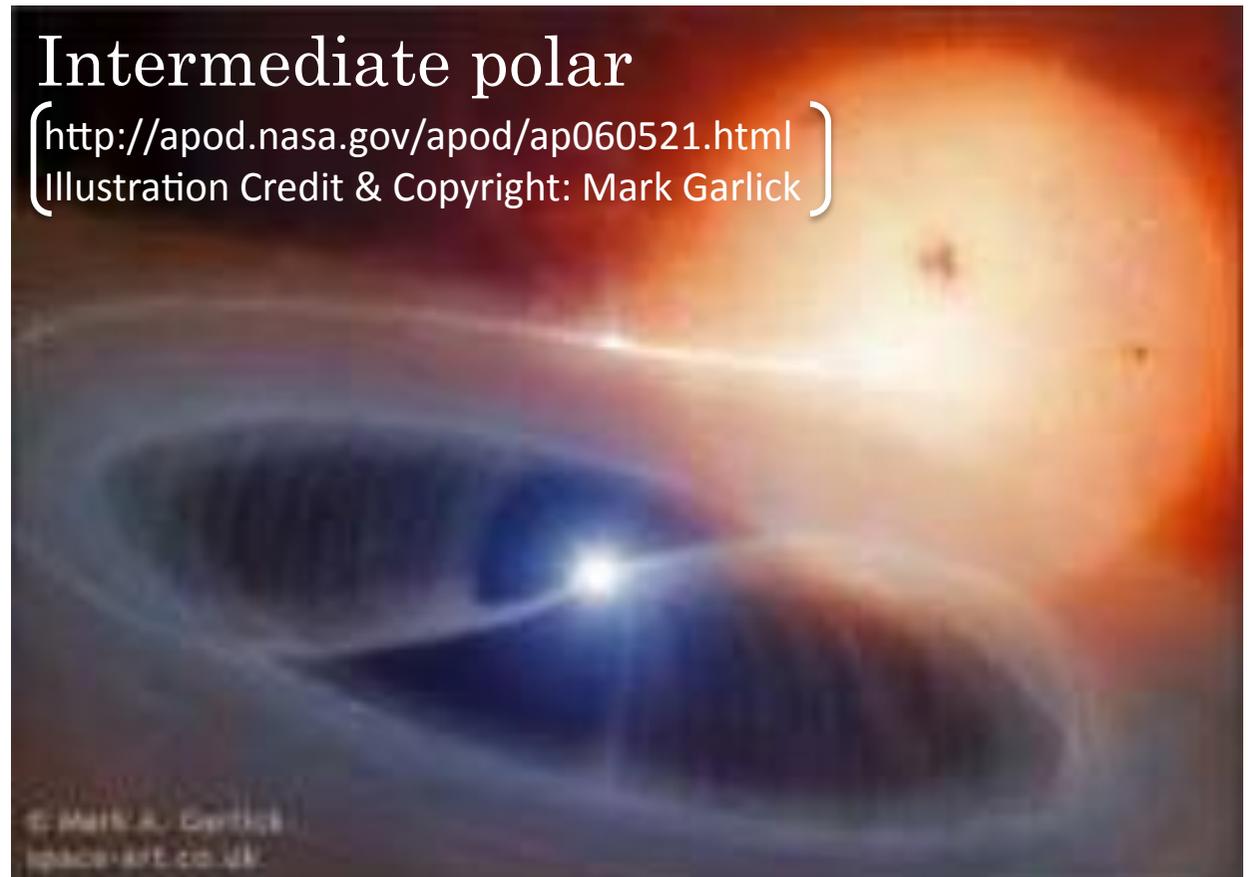
• **Intermediate polar**
(以後**IP**)

$$(B < 10^7 \text{ G})$$

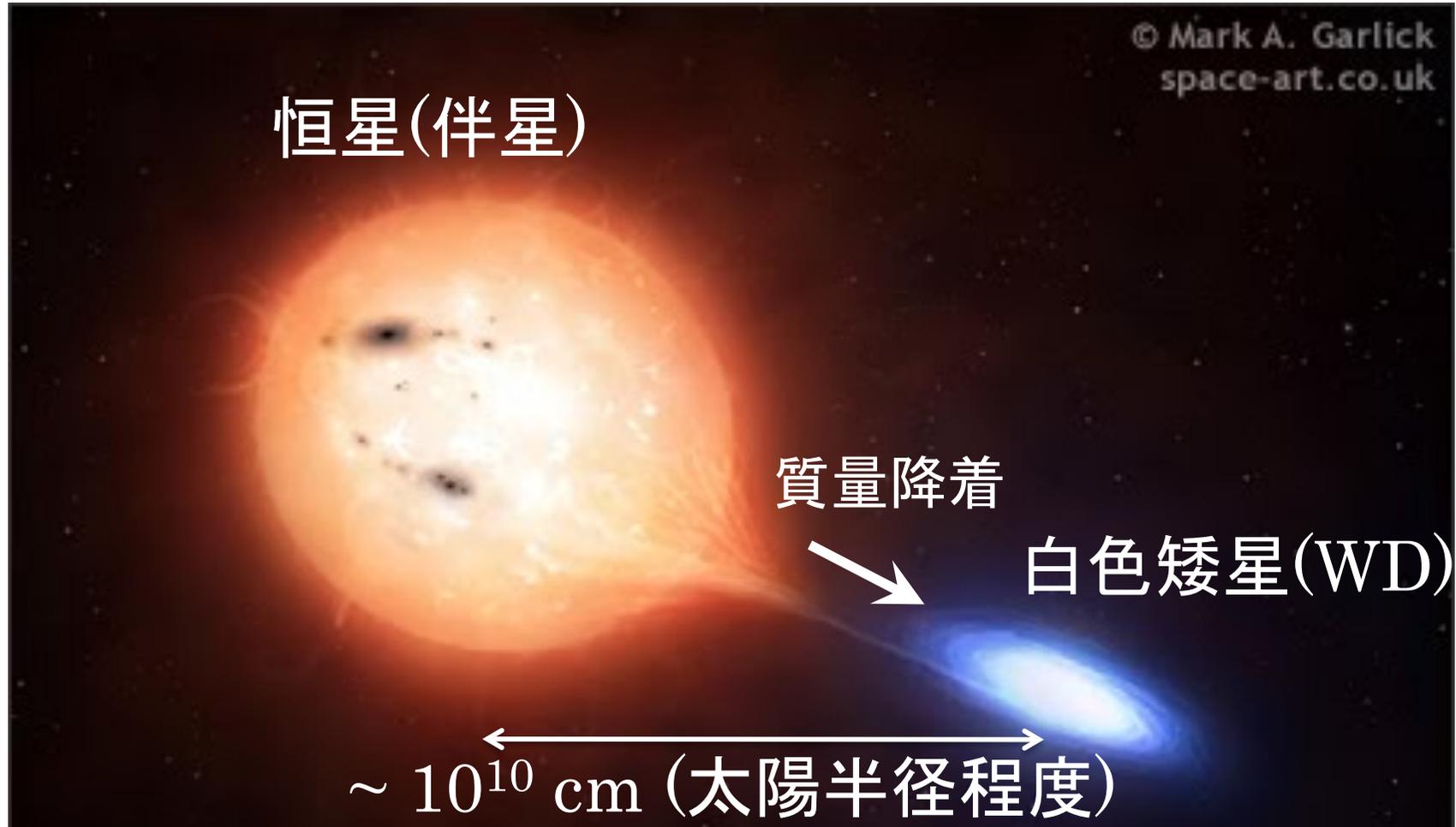
$$P_{\text{spin}} < P_{\text{orbit}}$$

降着円盤あり

V1223 Sagittarii,
EX Hydrae...



激変星(Cataclysmic Variable; CV)



新星爆発
Ia型超新星

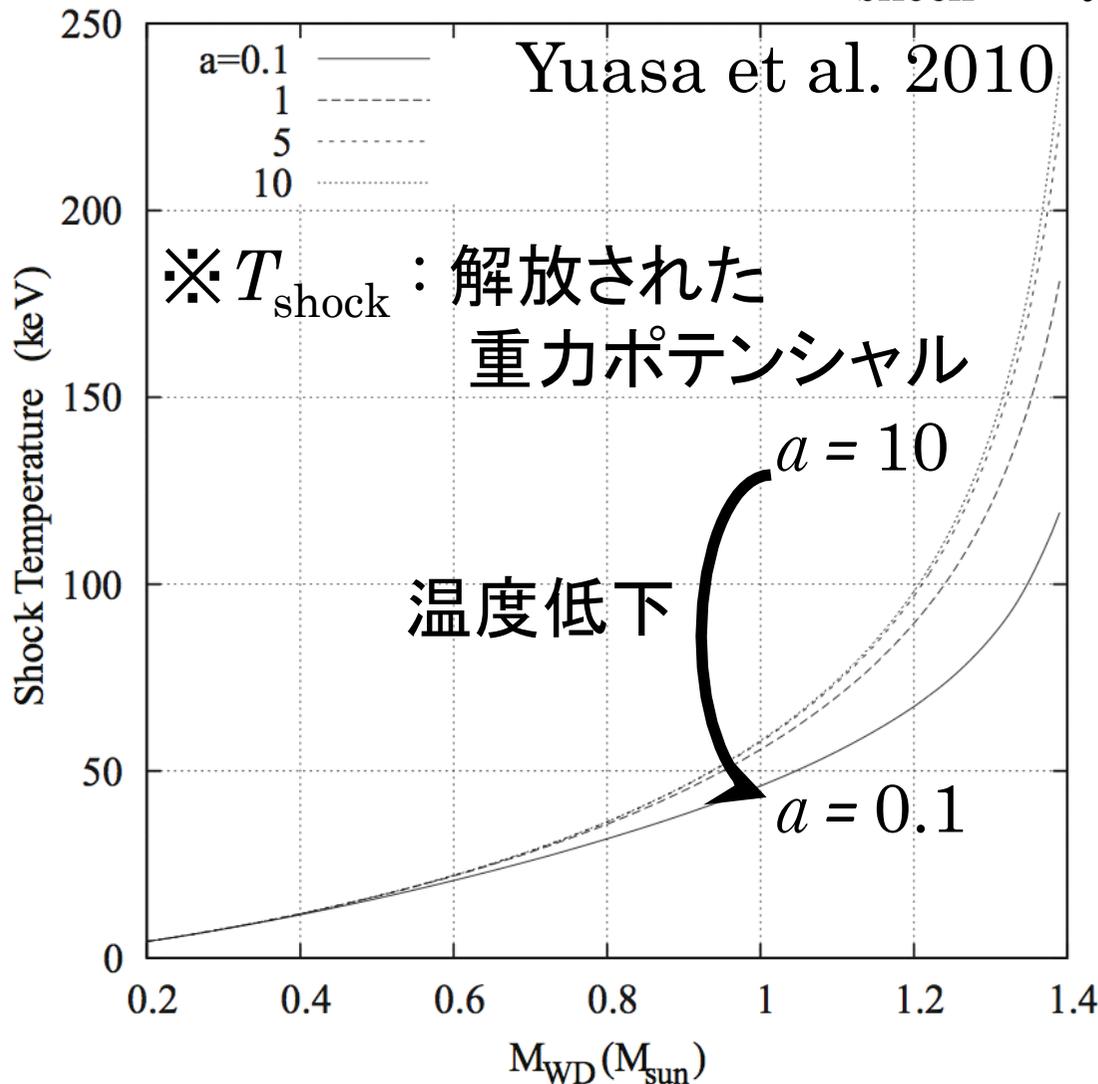
】 を起こし重元素を生成 → 宇宙の化学進化
※白色矮星の質量
→ 新星爆発の頻度
超新星を起こすか

降着柱の a 依存性

標準モデルでは $a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と仮定

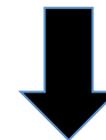
しかし、 a は天体によって異なる

• 衝撃波通過直後の温度(T_{shock})



a 低下 \rightarrow ρ 低下
 T_{shock} 低下 (左図から)
 \rightarrow 降着柱伸展 (h 増加)

a 低下 \rightarrow ρ 低下
 \rightarrow 冷却率低下
 \rightarrow 冷却時間延長
 \rightarrow h 増加



T_{shock} 低下 \rightarrow スペクトル変化

ρ 低下 \rightarrow イオン電子

の非平衡が重要

h 増加 \rightarrow 円柱近似破綻

断面積の変化

$h \sim R_{WD} \rightarrow$ 円柱近似は破綻

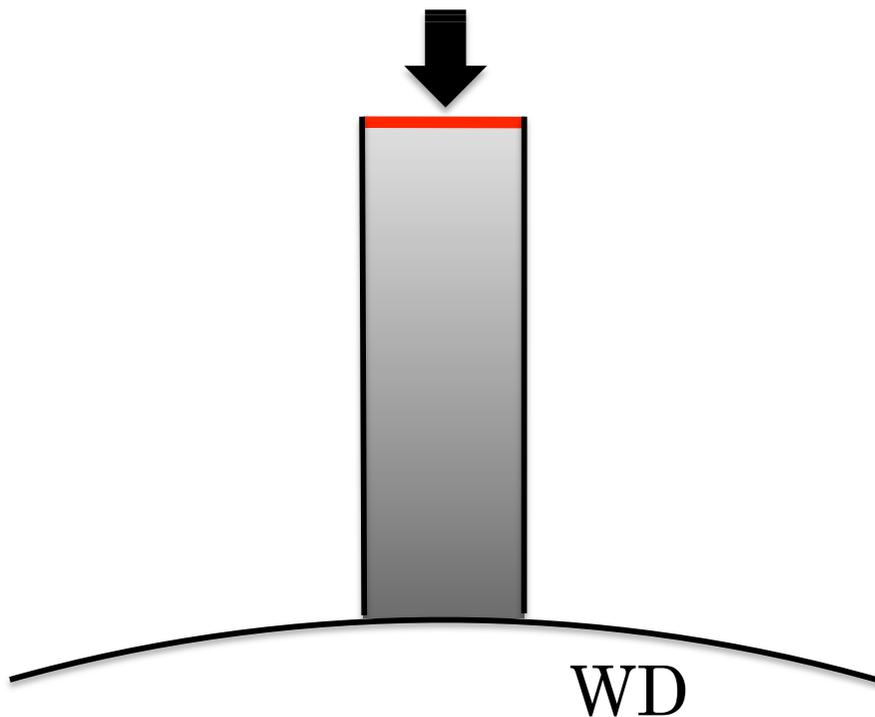
- 断面積の変化を考慮した連続の式

$$\rho v S = const \quad S: \text{降着柱の断面積}$$

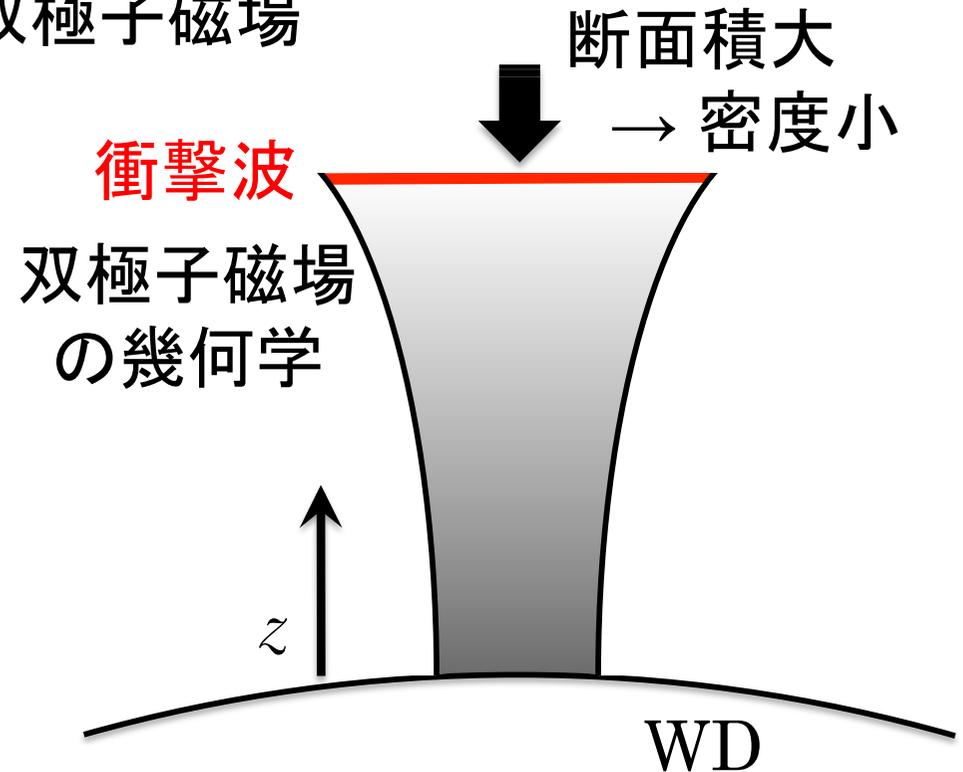
- 双極子磁場

$S \propto (R_{WD} + z)^3 \rightarrow$ 白色矮星から離れるにつれ S 大 \rightarrow 密度小

- 円柱(標準モデル)



- 双極子磁場



電子の加熱(電子イオン温度の不一致)

通過直後 : $T_i \gg T_e \rightarrow$ クーロン散乱により電子が加熱

※スペクトルから得られるのは電子温度

\rightarrow 電子温度の見積もりは重要

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{T_i - T_e}{t_{eq}} \quad \text{Spitzer (1962)}$$

$$t_{eq} = 5.87 \frac{A_e A_i}{\underline{n_i} Z_e^2 Z_i^2 \ln \Lambda} \left(\frac{T_i}{A_i} + \frac{T_e}{A_e} \right)^{3/2} \text{ s}$$

$\left(\begin{array}{l} T : \text{温度}, t : \text{時間}, Z : \text{電荷}, A : \text{原子質量}, n : \text{数密度} \\ \text{添字 } i : \text{イオン}, \text{添字 } e : \text{電子} \\ \text{※ } A_e = 1/1836 \end{array} \right)$

$\ln \Lambda$: クーロン対数 (散乱する距離の上限)

$$\ln \Lambda \sim 15.9 + \ln \left(\frac{T_e}{10^8 \text{ K}} \right) - \ln \left(\frac{n_e}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} \right)^{1/2}$$

XSPECへの組み込み

$M_{\text{WD}} = 0.4 \sim 1.4 M_{\text{sun}}$ を $0.05 M_{\odot}$ 刻み
 $Z = 0.1 \sim 1.0 Z_{\text{solar}}$ を $0.1 Z_{\text{solar}}$
 $\log a = \underline{-4, -3.75, -3.5, -3.25, -3, -2.75, -2.5, -2.25, -2, -1.5,}$
(変化が顕著な領域) $-1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
のパラメータの3360のスペクトルを計算

→ M_{WD} と Z の間は線形補間

a の間はスプライン補間 (a によるスペクトル変化が顕著)



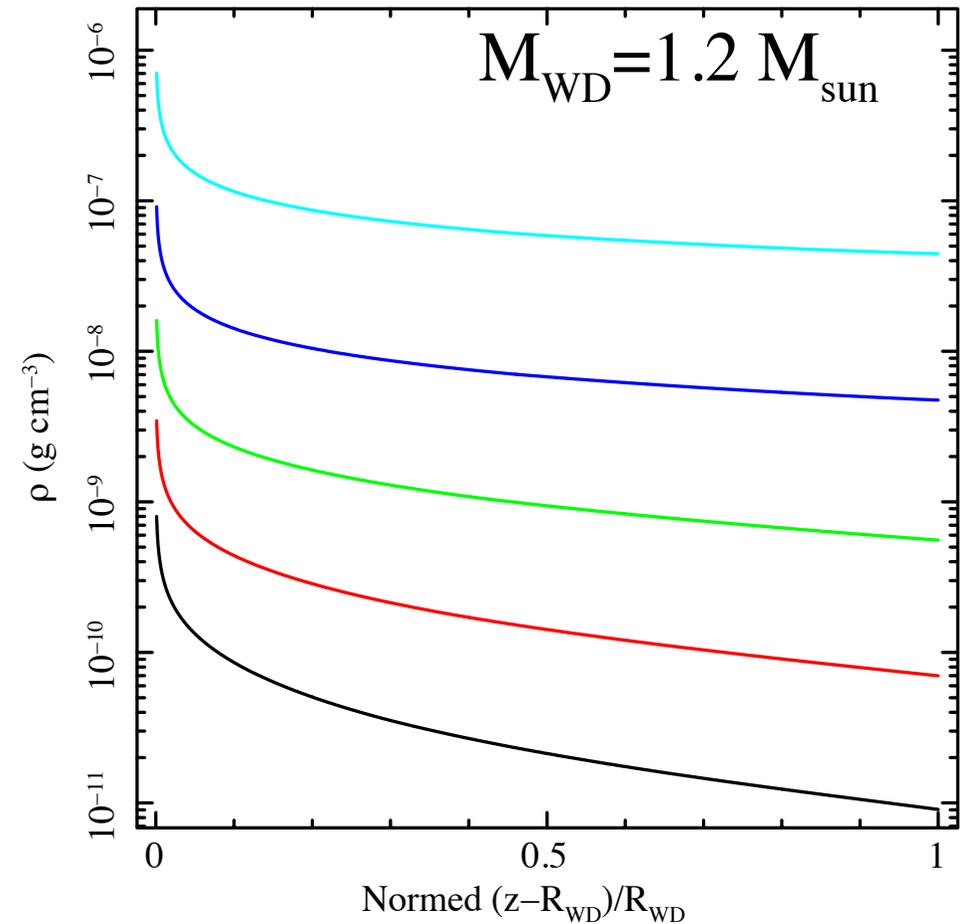
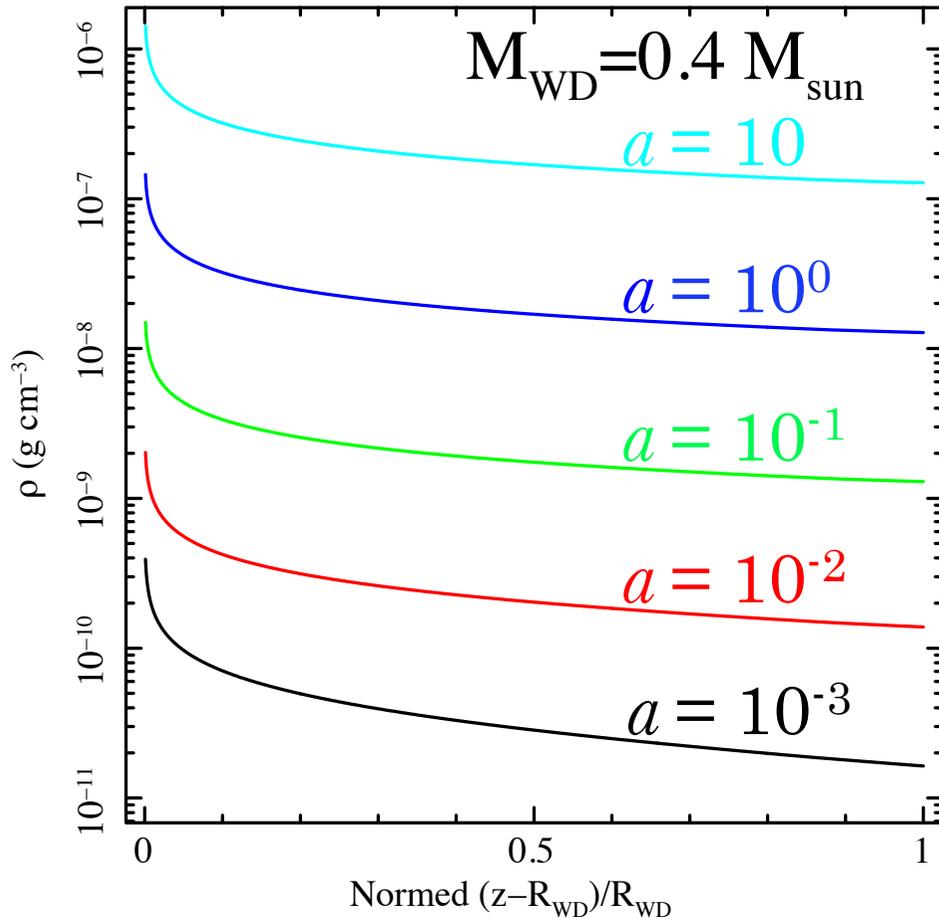
XSPECに組み込む

以下で新しいスペクトルモデル「ACrad model」と呼ぶ

(※Accreion Column radiationの略)

a と円柱降着柱の密度分布

※降着柱の高さで規格化



$\rho v = a$ $\left[\begin{array}{l} a \text{により } \rho \text{ の絶対値は大きく変化} \\ \text{重い白色矮星} \rightarrow \text{ポテンシャルが深く落下速度が大きい} \\ \rightarrow \rho \text{ 低下} \end{array} \right.$

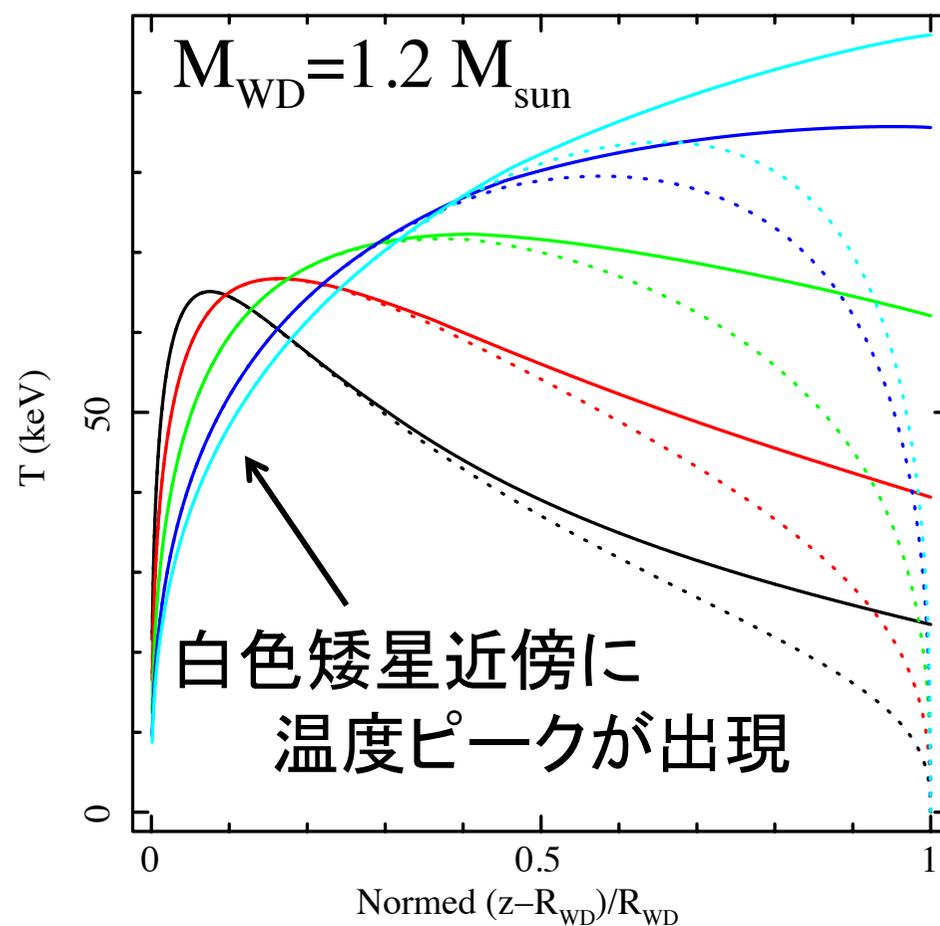
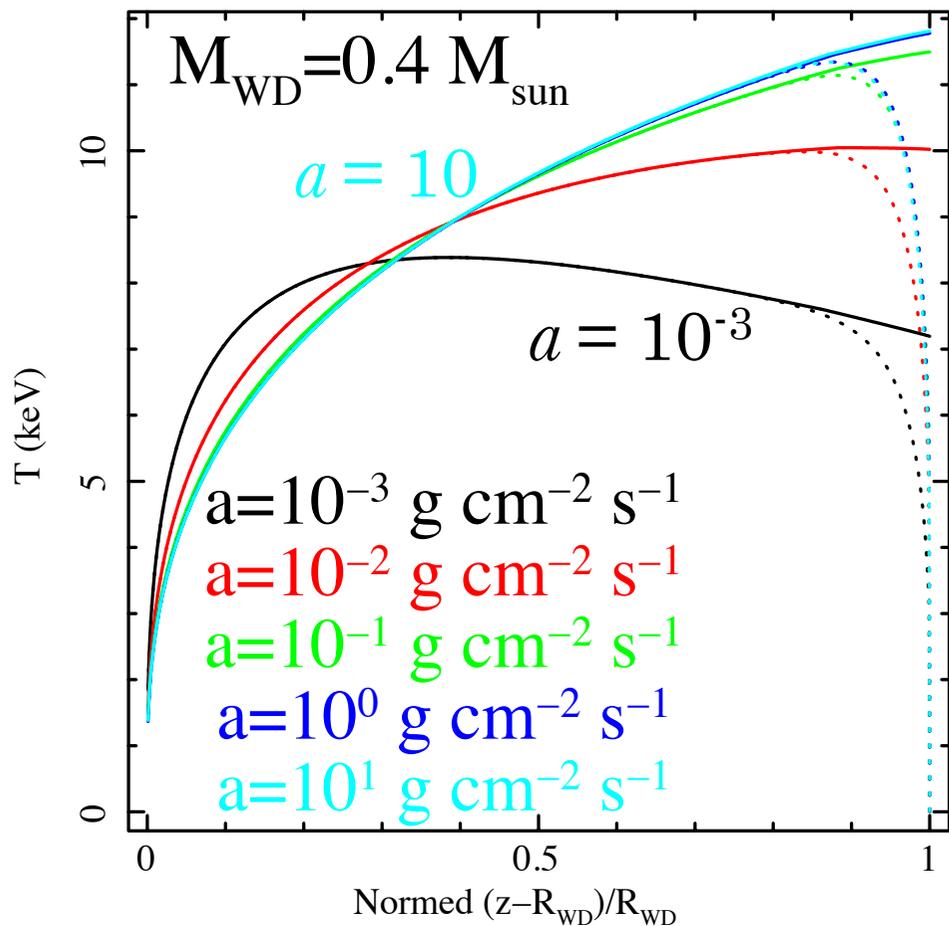
密度分布に顕著な変化はなし

a と円柱降着柱の温度分布

— 平均温度

--- 電子温度

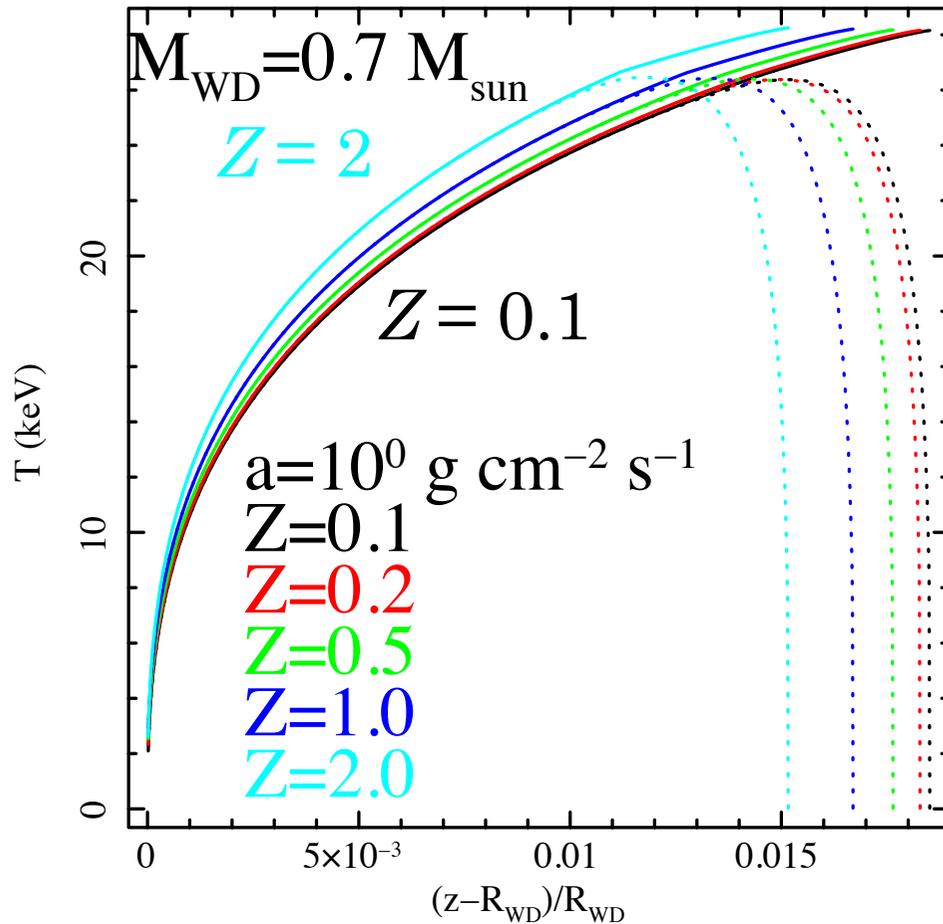
※降着柱の高さで規格化



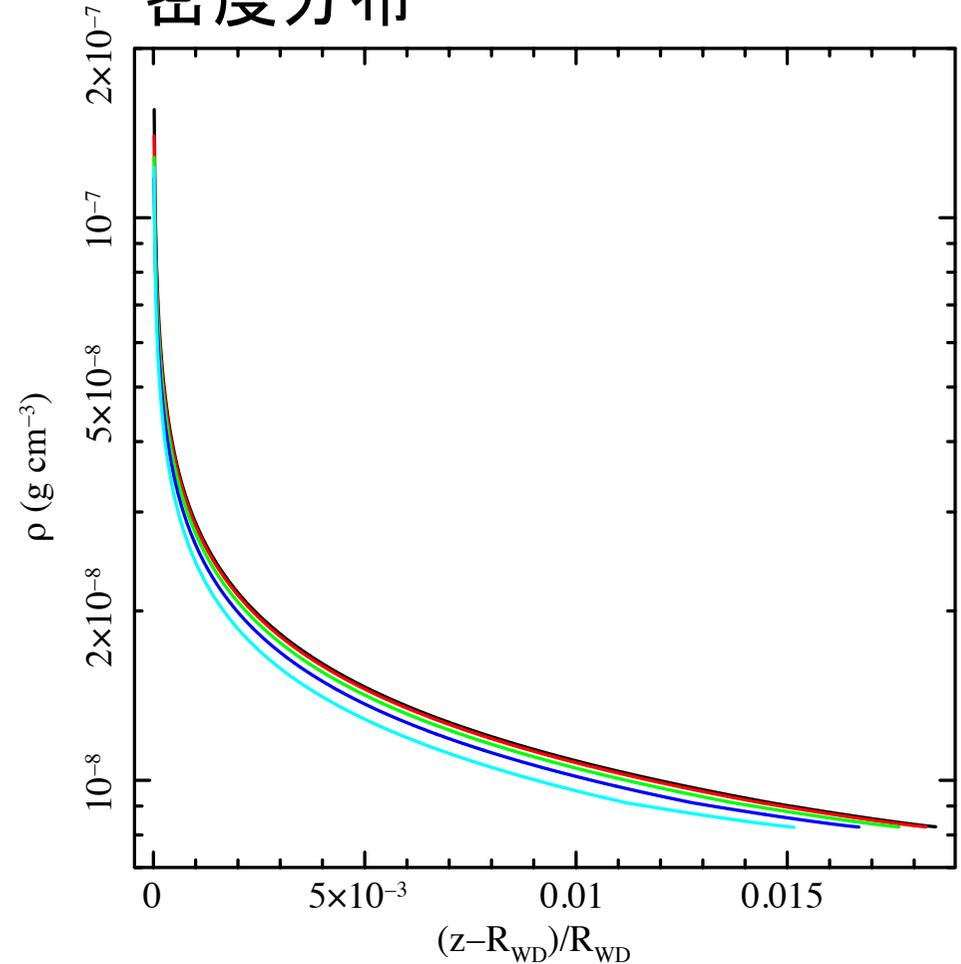
- a 減少により
- 温度低下：冷却率低下に伴う降着柱の伸展
 - ピーク変化：放射冷却と重力による加熱のバランス
- ※重いほど顕著 → 密度、自由落下速度が大きいため
降着柱頂上付近での滞在時間が短い

元素量と円柱降着柱の物理構造

温度分布(—平均 ---電子)



密度分布

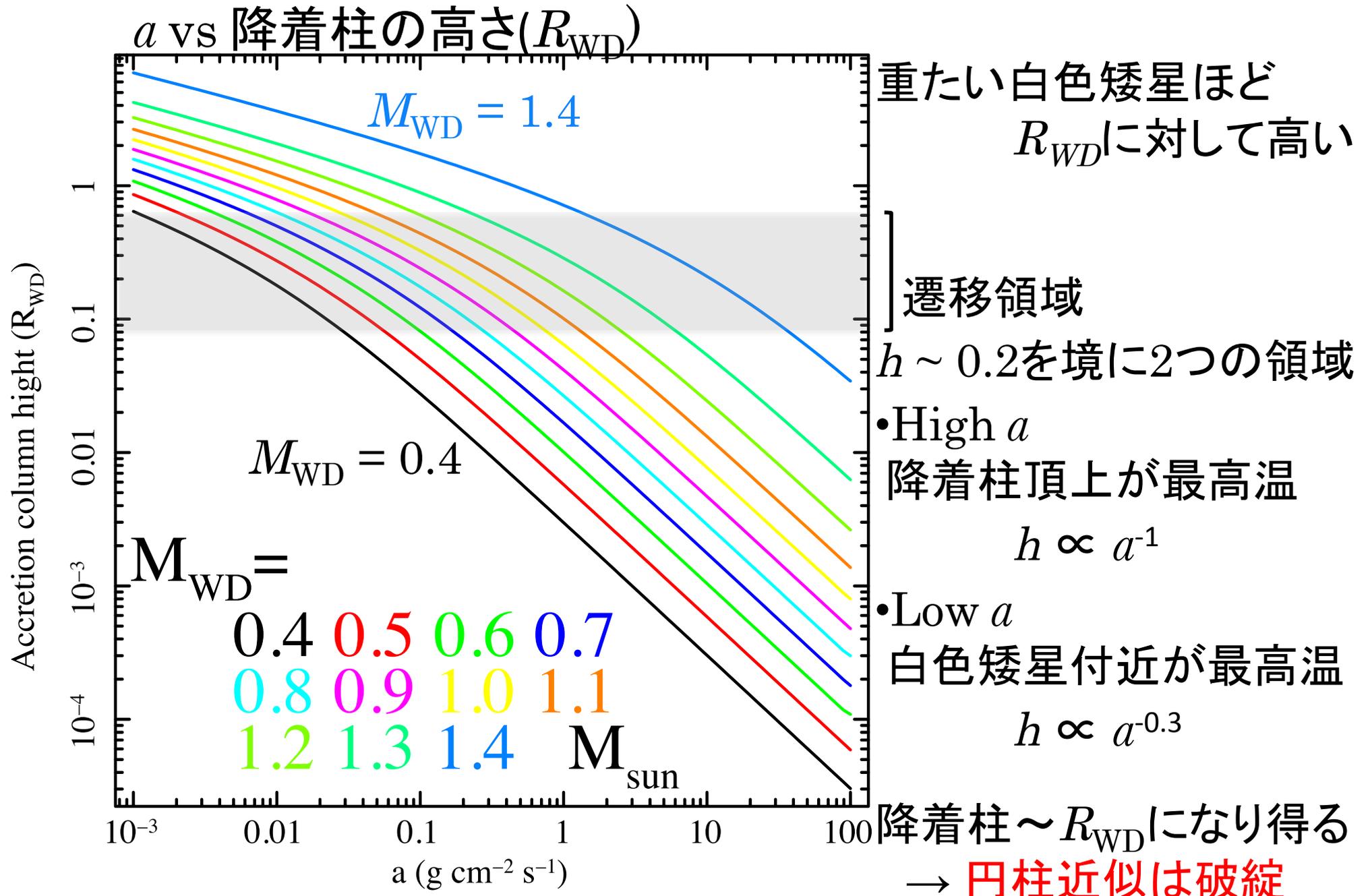


IPでは $Z = 0.1 \sim 0.6 Z_{sun}$ (Yuasa et al. 2010)

→ 重元素量の影響は限定的

Zが小さいと輝線冷却が小さい → 降着柱が伸びる

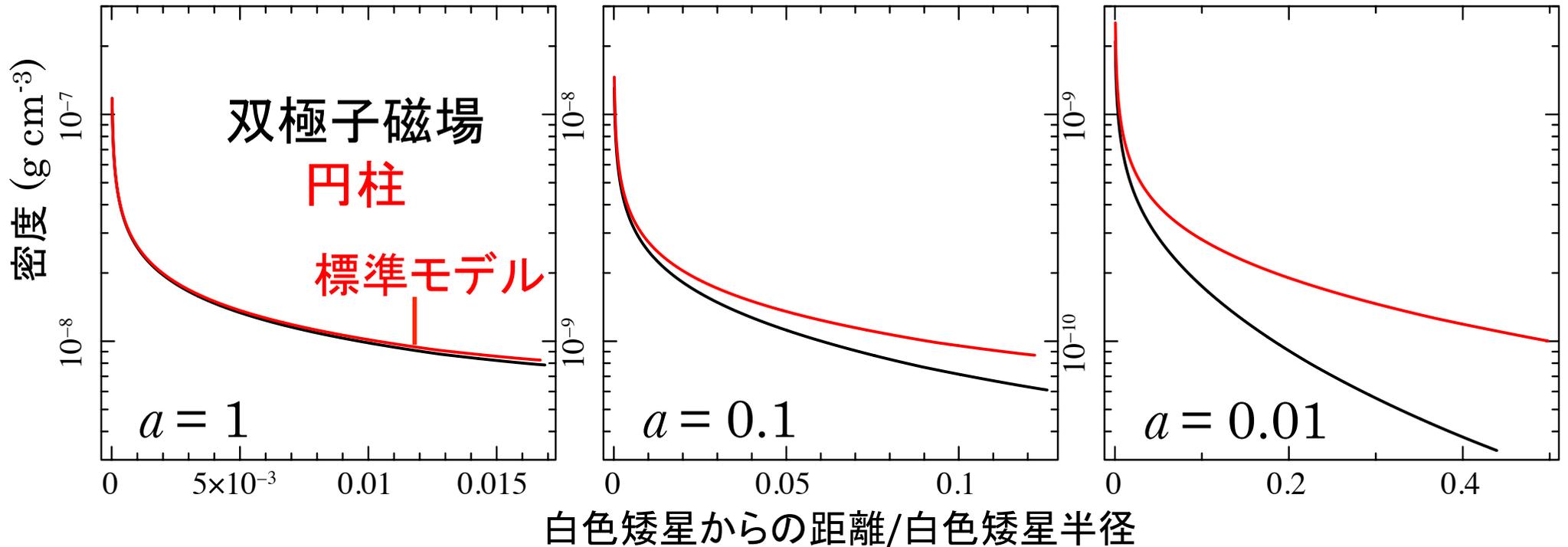
a と円柱降着柱の高さ



双極子磁場と円柱の降着柱密度分布

$$M_{\text{WD}} = 0.7 M_{\text{sun}} \quad Z = 1 Z_{\text{solar}}$$

※右端は降着柱の頂上



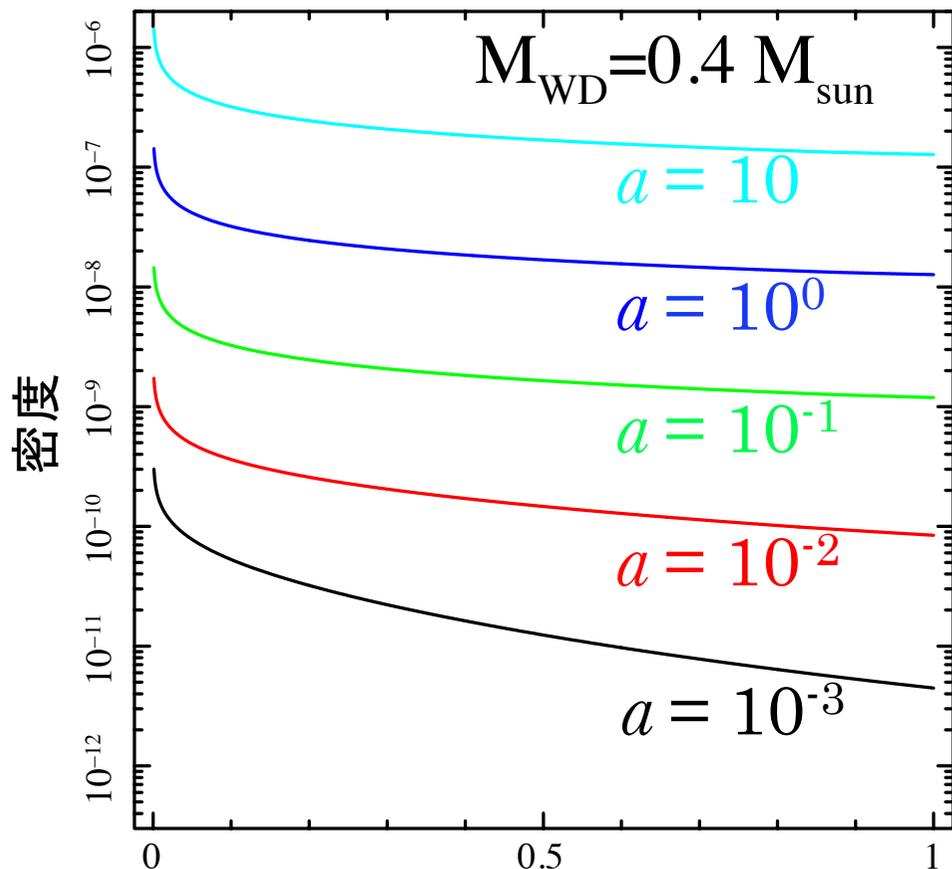
※ a は白色矮星表面での単位面積当たりの降着率($\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

円柱降着柱に対し双極子降着柱は、

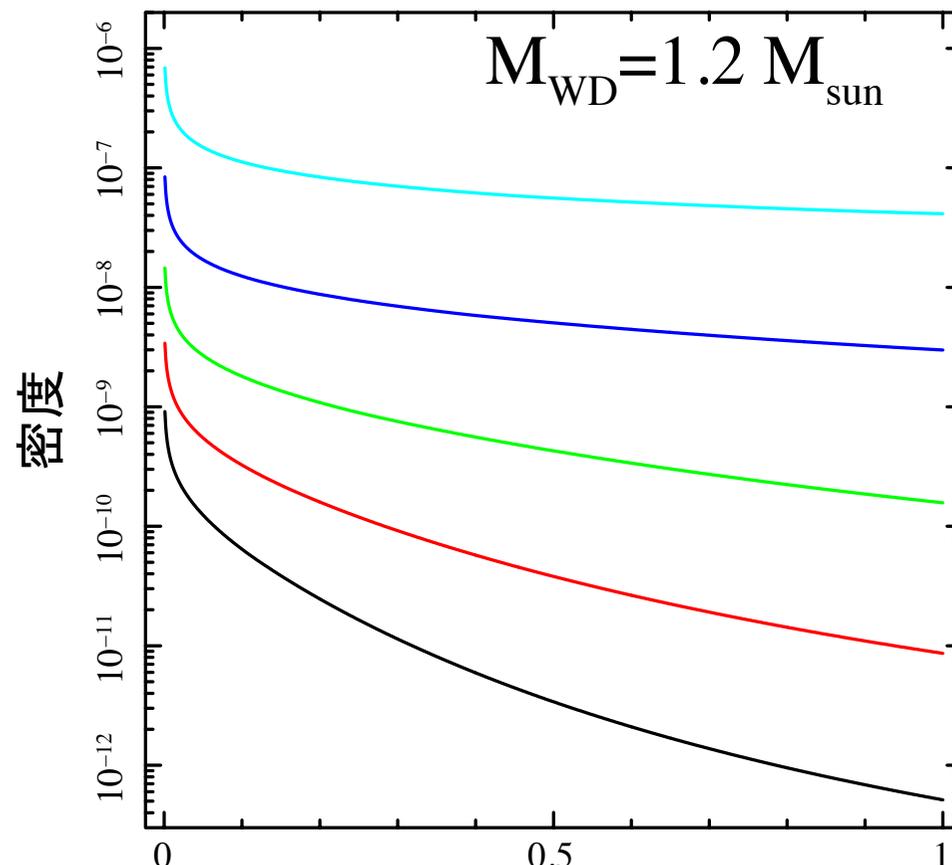
頂上に向かって断面積大 → 密度減
ノズルの効果 → 流体加速の効果 → 密度減
(a が小さい → 降着柱伸展 → 双極子幾何学の効果大)

a と双極子降着柱の密度分布

※降着柱の高さで規格化



白色矮星からの距離/降着柱高さ



白色矮星からの距離/降着柱高さ

$$\rho v S = a \left[a \text{により } \rho \text{の絶対値は大きく変化} \right]$$

a の減少により降着柱伸展 $\rightarrow \rho$ 勾配大

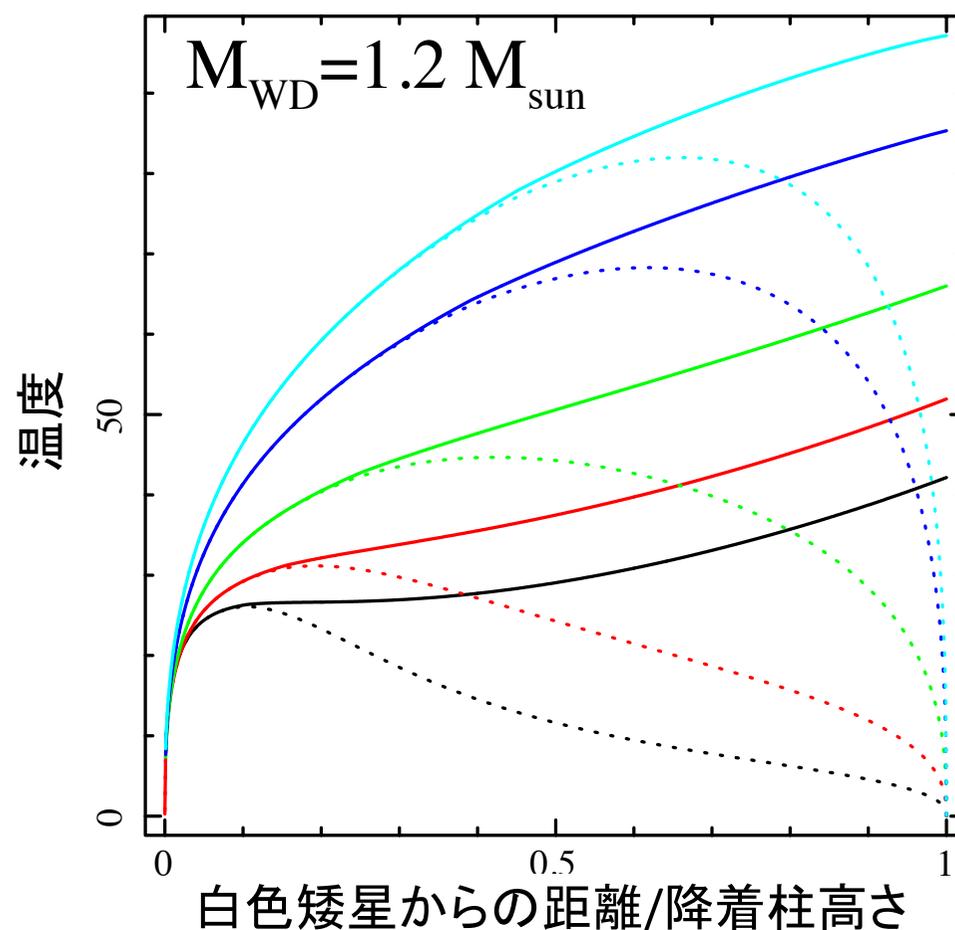
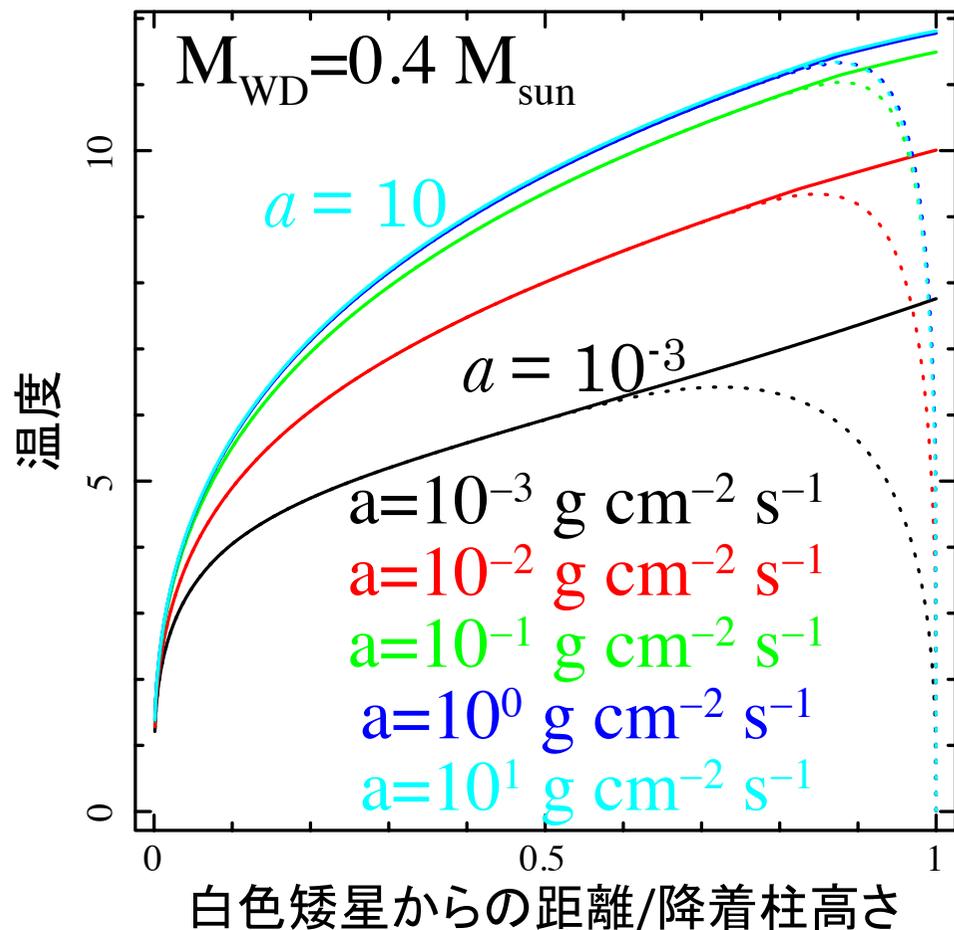
重い白色矮星 \rightarrow ポテンシャルが深く落下速度が大きい
 $\rightarrow \rho$ 低下

a と双極子降着柱の温度分布

— 平均温度

--- 電子温度

※降着柱の高さで規格化

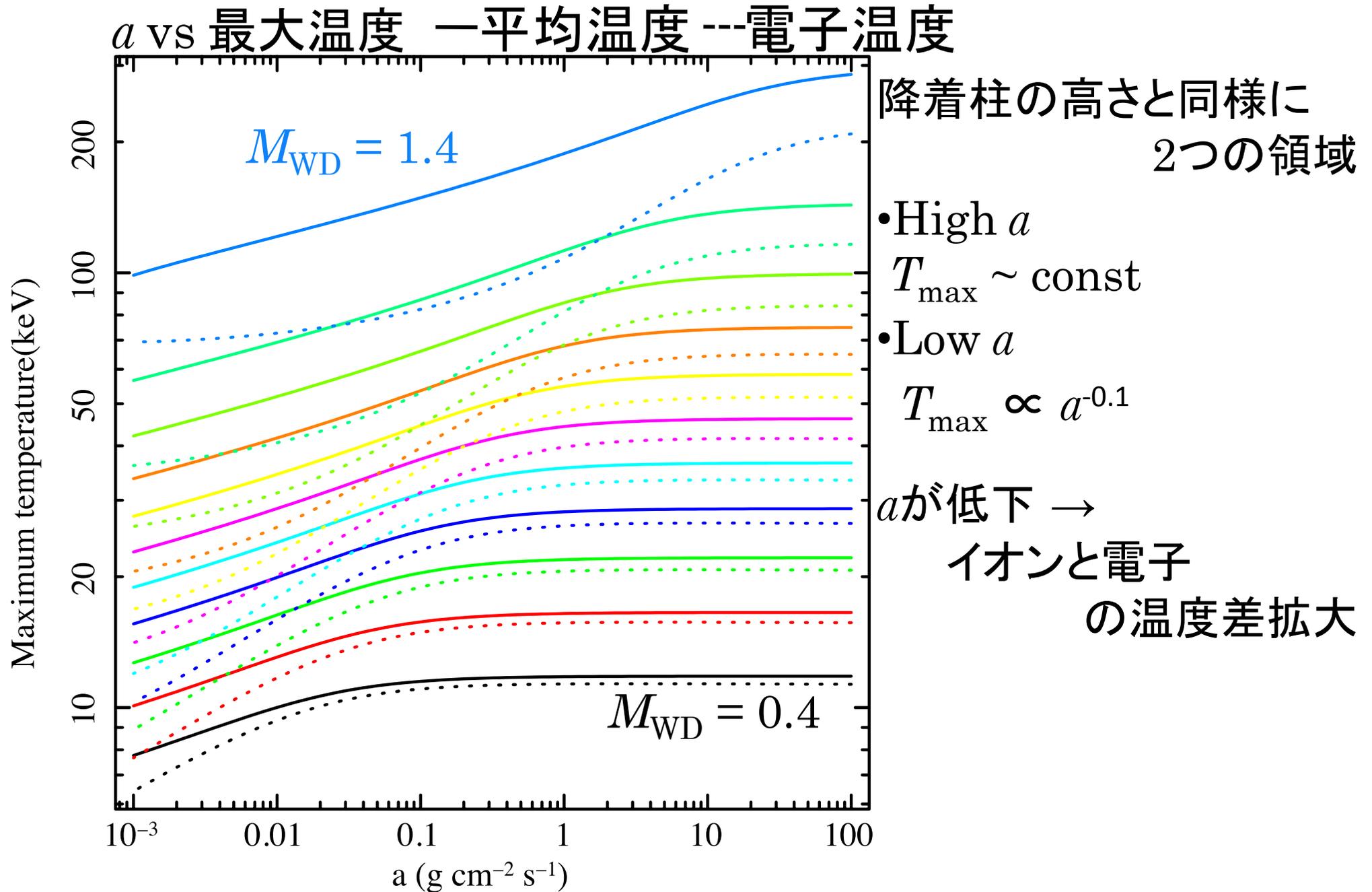


a 減少により

- 温度低下 : 冷却率低下に伴う降着柱の伸展
- 降着柱頂上で最高音 : ノズルの効果による冷却
- 非平衡領域拡大(電子温度ピーク) : 密度減、速度大

※重い白色矮星ほど顕著

a と双極子の最大温度



SPEXによる電離度の取り扱い

それぞれのcomponent :

$nt > 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s} \rightarrow$ 衝突電離平衡プラズマ(CIE) \rightarrow 電離 = 電子温度

$nt < 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s} \rightarrow$ 電離非平衡プラズマ(NEI) (Masai 1994)

(※Feの電離度のみ注目：IPでは吸収構造が複雑
 $\rightarrow \sim 5 \text{ keV}$ 以下のスペクトルは使用困難 (Ezuka & Ishida 1999))

Neijモデル(SPEXのNEIを表現するモデル) :

CIEプラズマの T_i & T_e がある値にjump $\rightarrow nt$ に従い電離度を算出

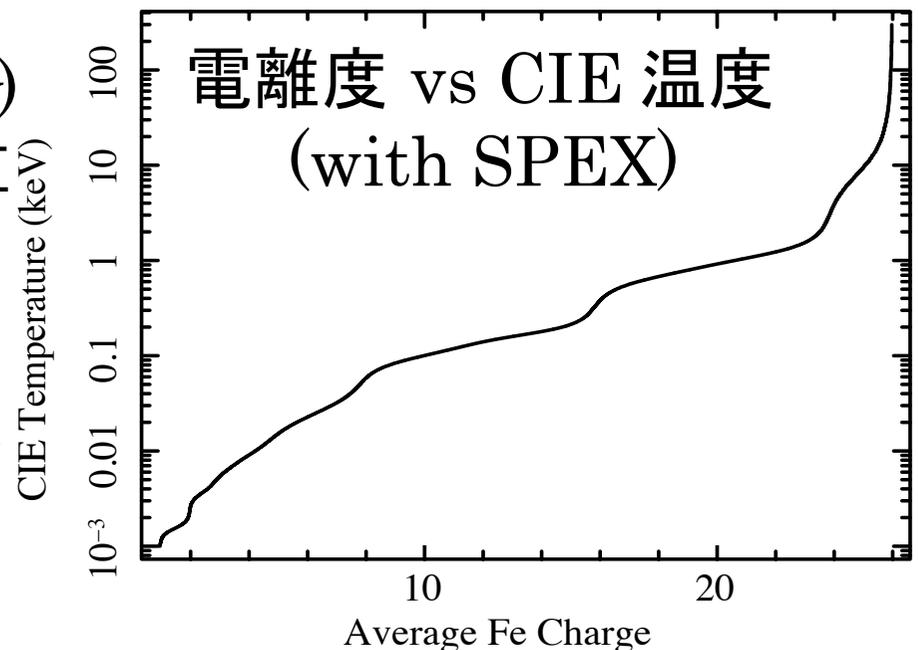
1st comp. : [jump前 : 0.002 keV (SPEXの制限)

(衝撃波面) [jump後 : 数値計算の T_e
 $\rightarrow \rho$ と滞在時間($(h/100)/v$)

からFe電離度を計算

2nd 以降 : [1stのFe電離度に
対応するCIE 温度算出
 \rightarrow jump前 : 1st Fe電離度
のCIE温度

jump後 : 数値計算の T_e



使用ツール

- XSPEC (Arnaud 1996) :

X線天文学の標準的なスペクトル解析ツール

自作のスペクトルモデルを簡単に組み込み可能

- SPEX (Kaastra et al. 1996) :

SRONで開発されたスペクトル解析ツール

XSPECのプラズマモデルよりも約4000ほど多くの輝線

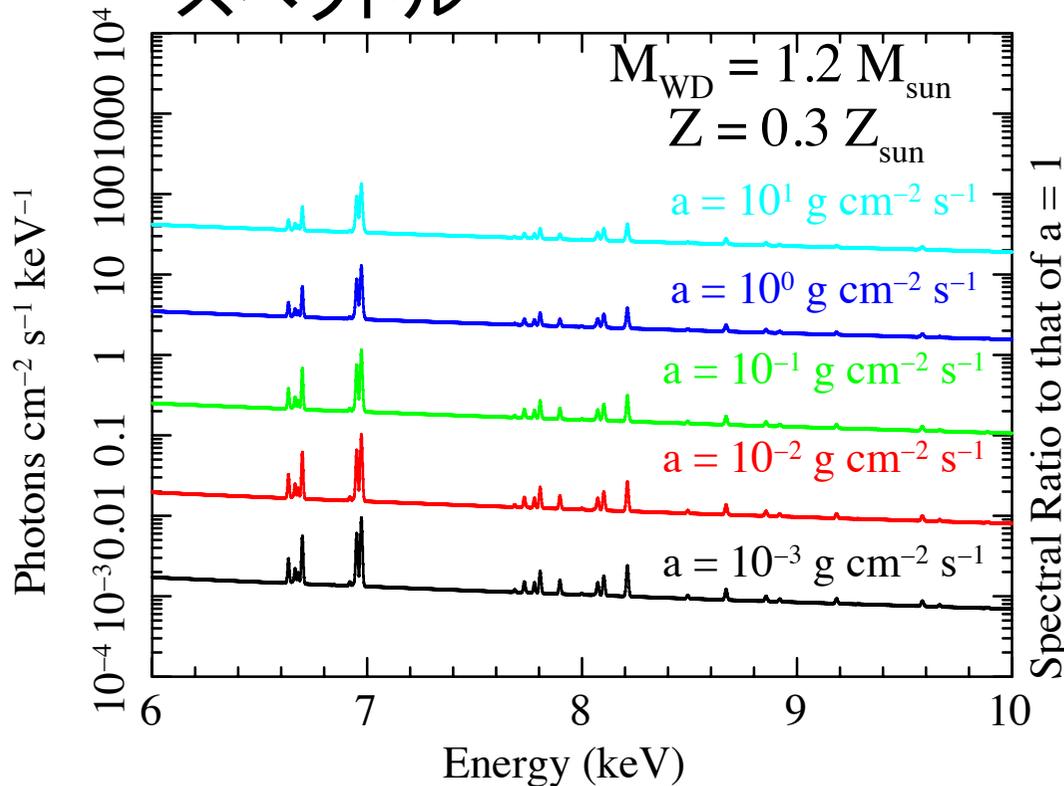
1 MeVまでのプラズマからの放射扱える

(XSPECは100 keVまで)

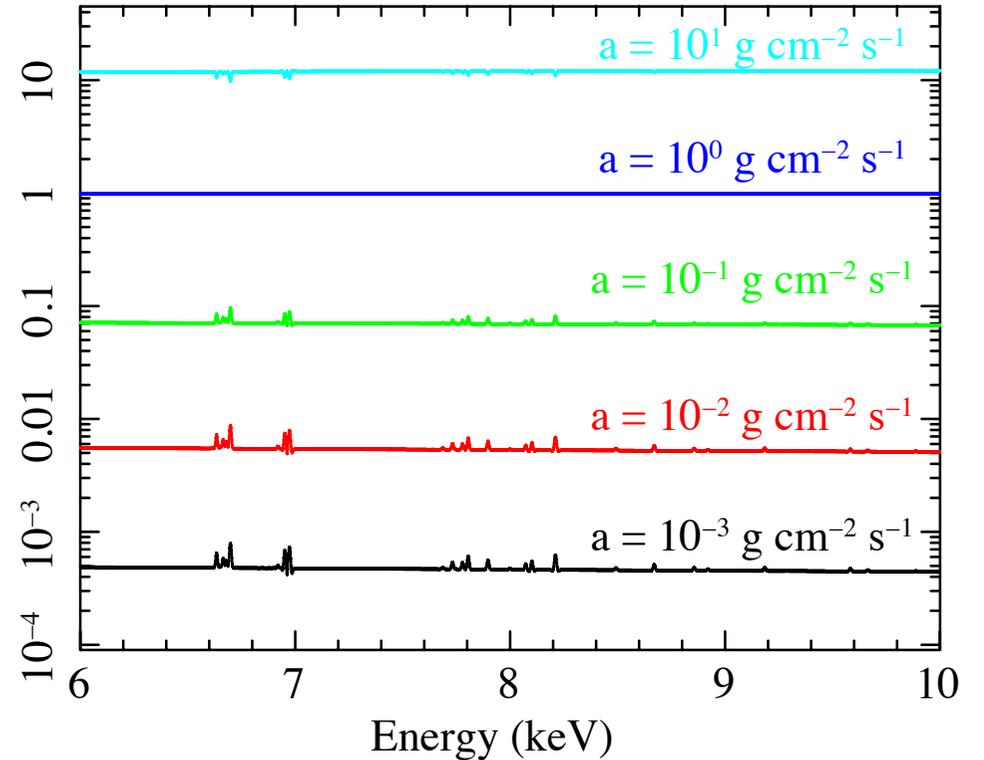
a とスペクトル($1.2 M_{\odot}$, 5-10 keV)

$a = 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ $Z = 0.3 Z_{\odot}$

スペクトル



$a = 1$ との比



a 減少 \rightarrow 降着率減少 \rightarrow 強度減少
 \rightarrow 温度低下 \rightarrow He様輝線強
 \rightarrow H様輝線強

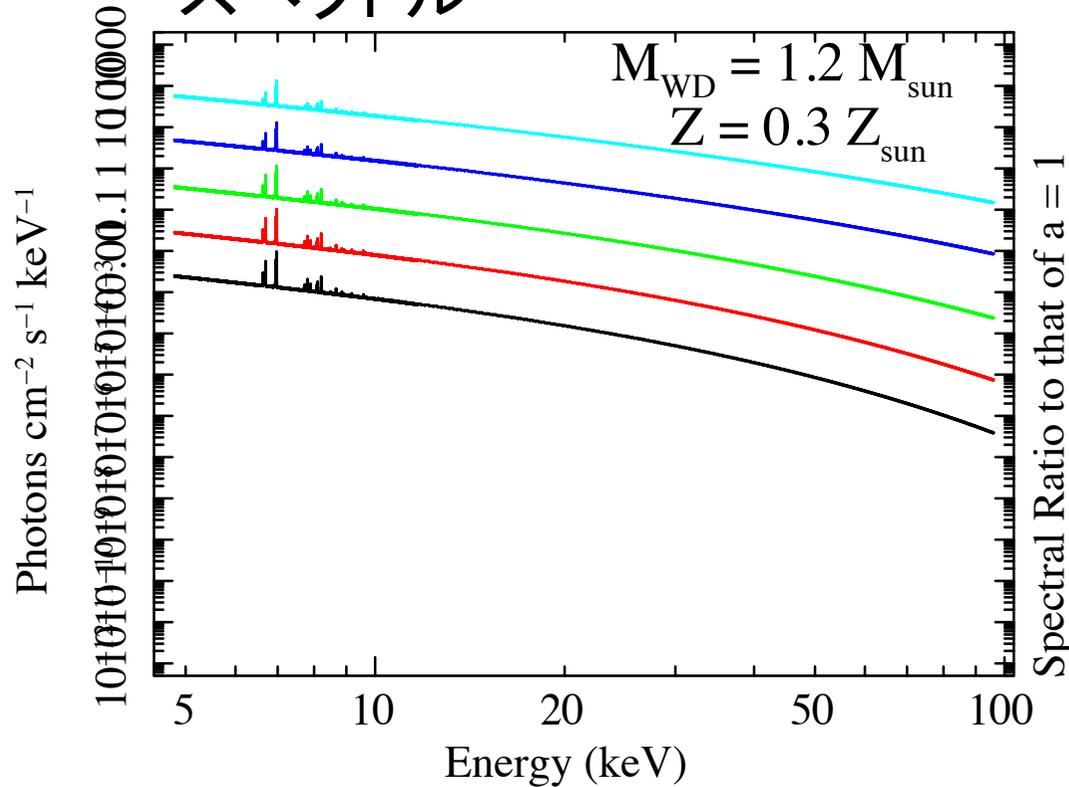
(連続成分に対して)

(重い白色矮星では非常に高温($T_{\text{max}} = 40\text{-}100 \text{ keV}$)
 \rightarrow 完全電離イオン多数 \rightarrow 温度低下によりH, He様イオン増)

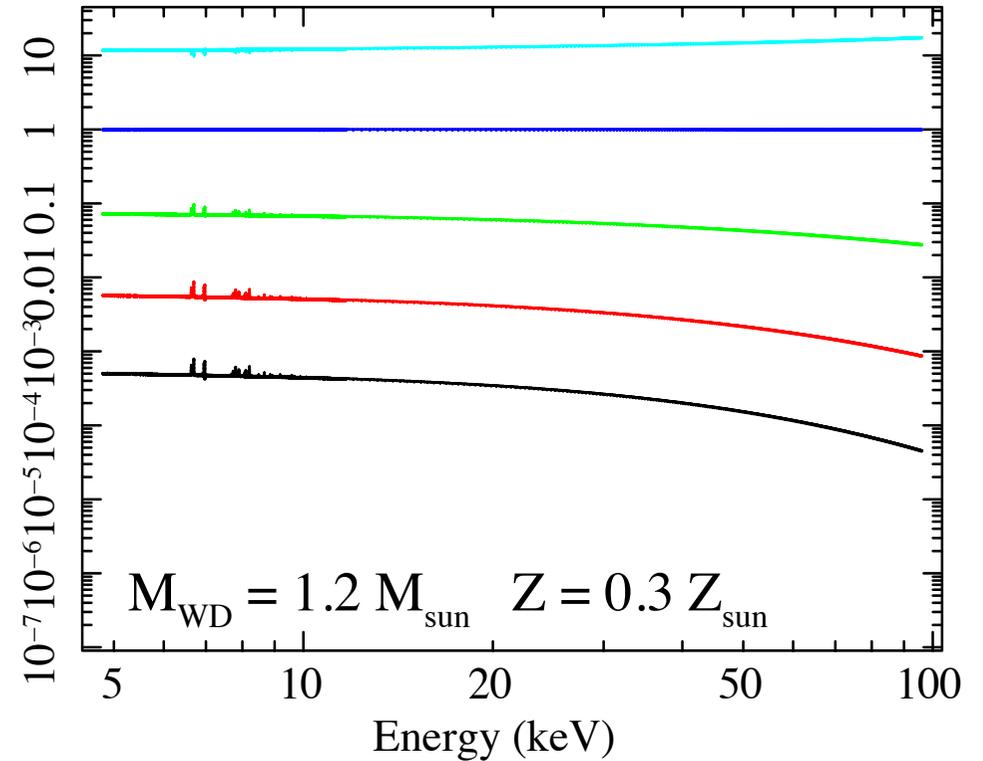
a とスペクトル($1.2 M_{\odot}$, 5-100 keV)

$a = 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ $Z = 0.3 Z_{\odot}$

スペクトル



$a = 1$ との比



a 減少 \rightarrow 温度低下 \rightarrow 高エネルギー領域で強度弱

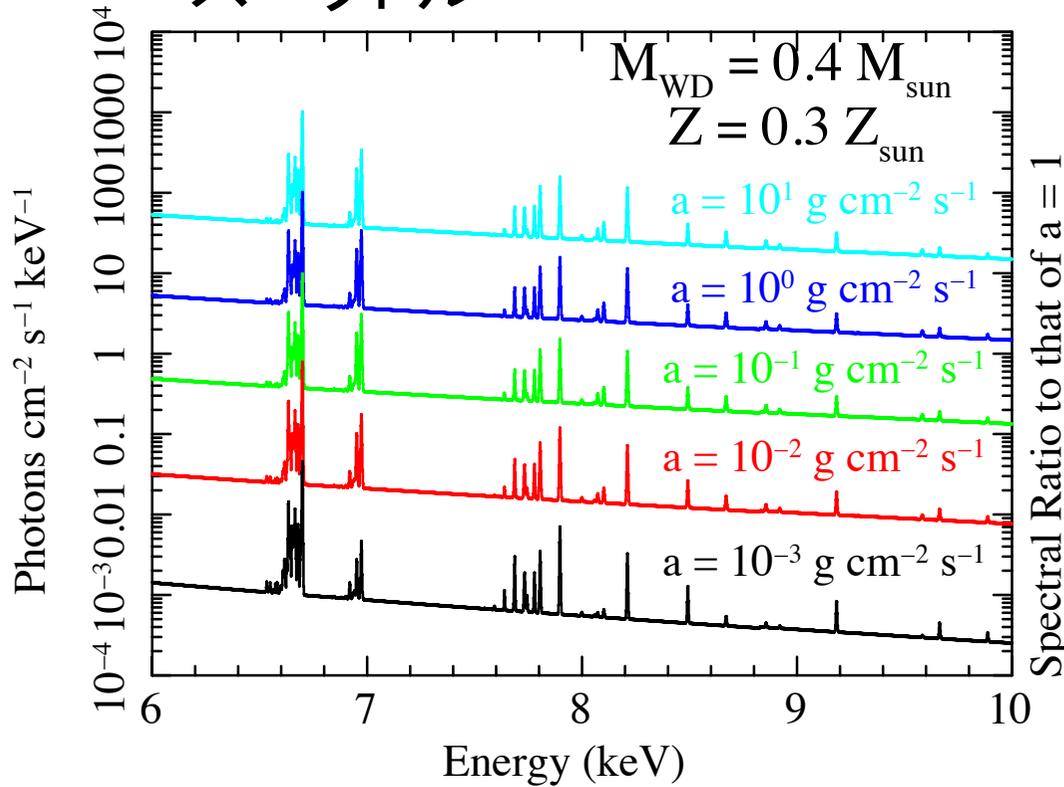
※軽い白色矮星よりも効果は小さい

a とスペクトル($0.4 M_{\odot}$, 5-10 keV)

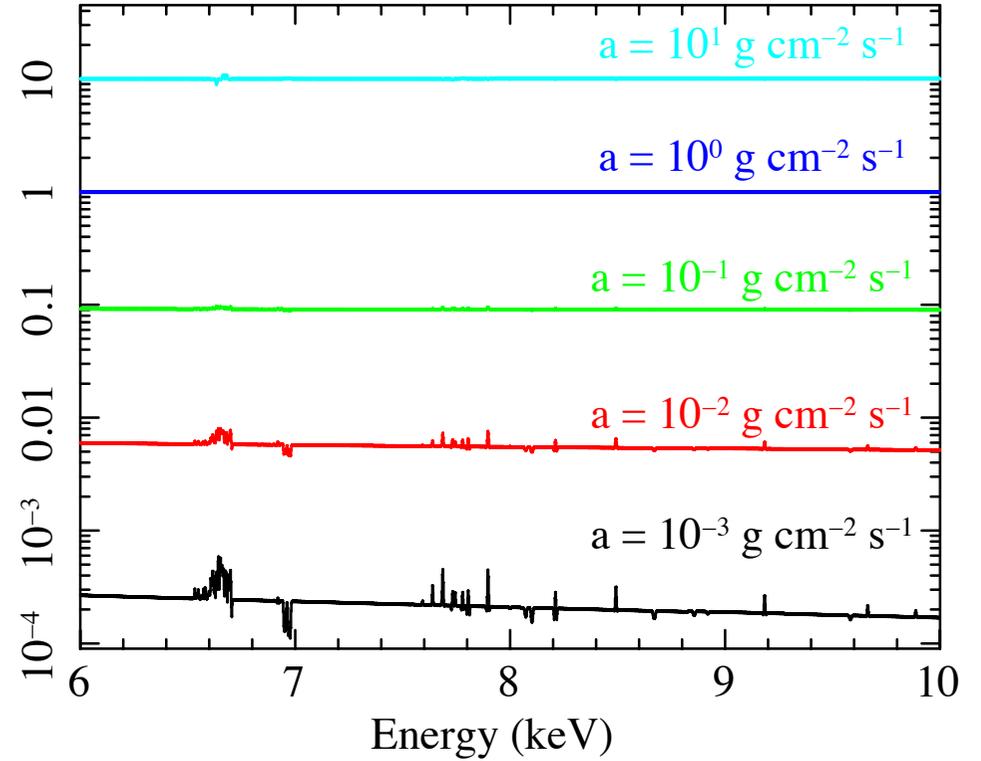
$a = 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ $Z = 0.3 Z_{\odot}$

スペクトル

$a = 1$ との比



Spectral Ratio to that of $a = 1$



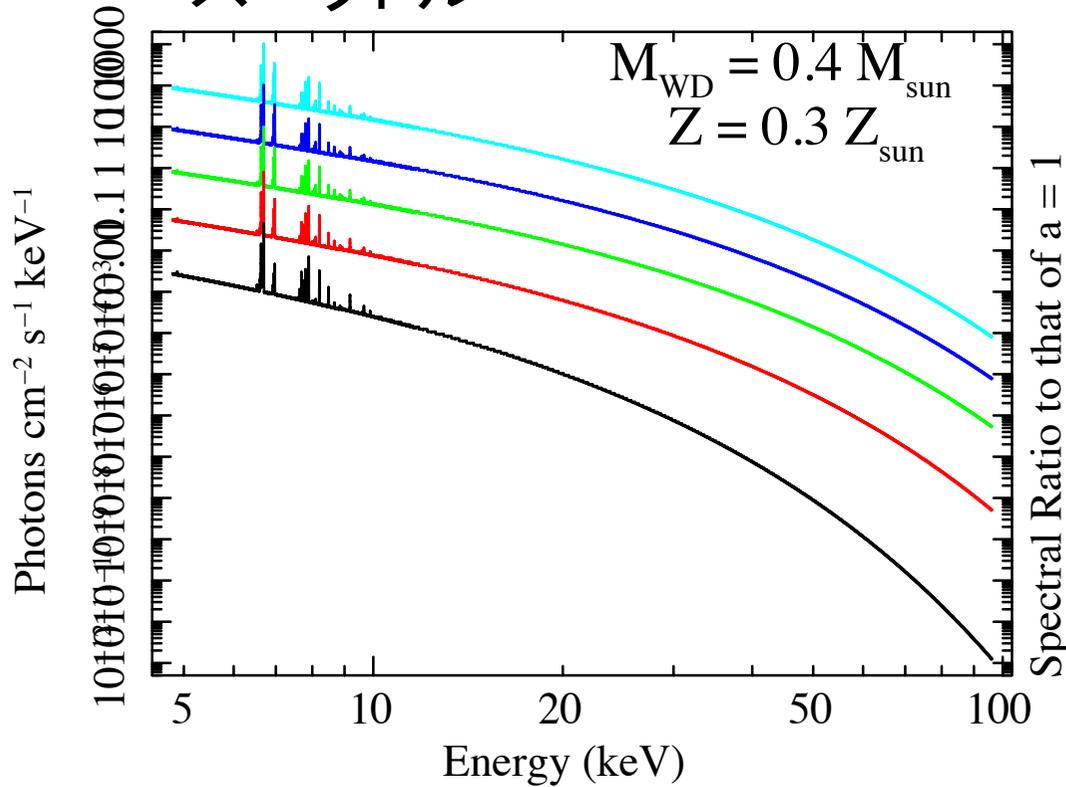
a 減少 \rightarrow 降着率減少 \rightarrow 強度減少
 \rightarrow 温度低下 \rightarrow He様輝線強
 \rightarrow H様輝線弱

(連続成分に対して)

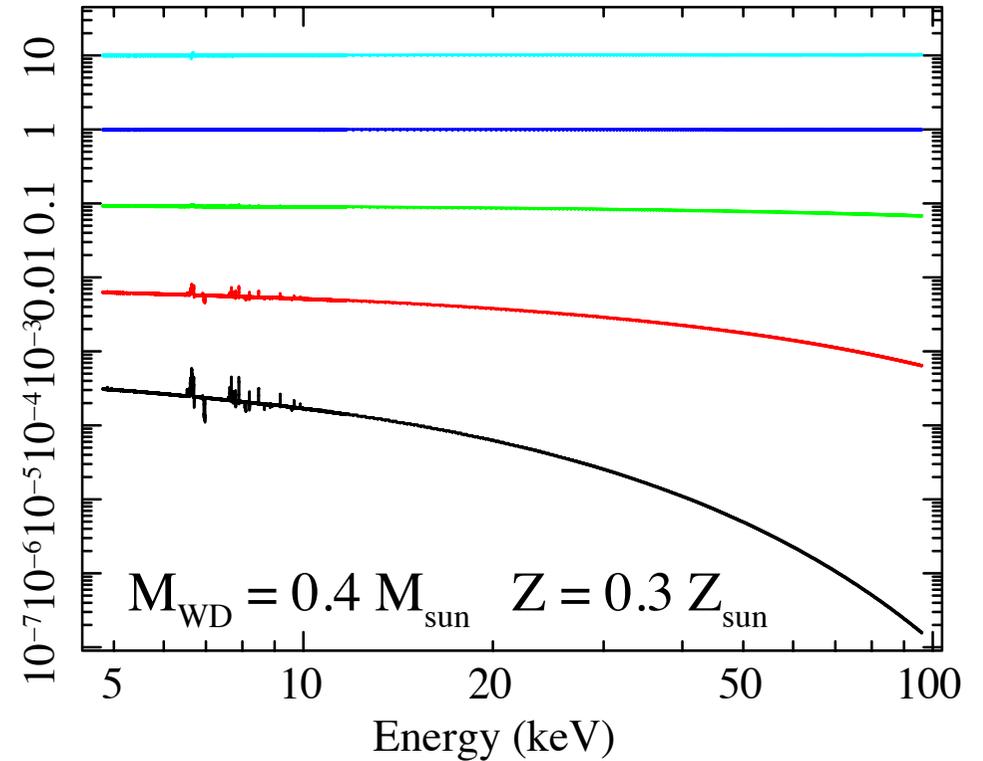
a とスペクトル($0.4 M_{\odot}$, 5-10 keV)

$a = 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ $Z = 0.3 Z_{\odot}$

スペクトル



$a = 1$ との比



a 減少 \rightarrow 温度低下 \rightarrow 高エネルギー領域で強度弱

サンプル(1) V1223 Sagittarii

D (距離) = 527_{-43}^{+54} pc (Beuermann et al. 2004)

i (軌道傾斜角) = 24 ± 7 deg (Beuermann et al. 2004)

$M_{\text{WD}} = 0.82_{-0.06}^{+0.05} M_{\text{sun}}$ (標準モデル; Hayashi et al. 2011)

光度 (0.1-100 keV) $L_{0.1-100} = 24.3 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$

(Suleimanov et al. 2005)

降着柱の高さ $h < 0.07 R_{\text{WD}}$ (白色矮星からの
反射X線による直接観測
(Hayashi et al. 2011))

→ 標準モデルと一致

サンプル(2) EX Hydrae

$D = 64.5 \pm 1.2$ pc (Beuermann et al. 2003)

$i = 77.8 \pm 0.4$ deg (Hoogerwerf 2005) ← 「食」 → 誤差小

$M_{\text{WD}} = 0.79 \pm 0.026 M_{\text{sun}}$ (ケプラー則; Beuermann et al. 2008)

$= 0.42 \pm 0.02 M_{\text{sun}}$ (降着柱モデル; Yuasa et al. 2010)

$L_{0.1-100} = 0.17 \times 10^{33}$ erg s⁻¹ (Suleimanov et al. 2005)

- V1223 Sagittariiに比べ2桁以上暗い
- 降着率も~2桁程度小さい
- a も~2桁程度小さい可能性

降着柱の高さ (h) $\sim 1 R_{\text{WD}}$ (白色矮星の自転に伴うX線光度変動)
(Allen et al. 1998)

→ 標準モデルより2~3桁高い

サンプル(2) EX Hydrae

$D = 64.5 \pm 1.2$ pc (Beuermann et al. 2003)

$i = 77.8 \pm 0.4$ deg (Hoogerwerf 2005) ← 「食」 → 誤差小

$M_{\text{WD}} = 0.79 \pm 0.026 M_{\text{sun}}$ (ケプラー則; Beuermann et al. 2008)

$= 0.42 \pm 0.02 M_{\text{sun}}$ (降着柱モデル; Yuasa et al. 2010)

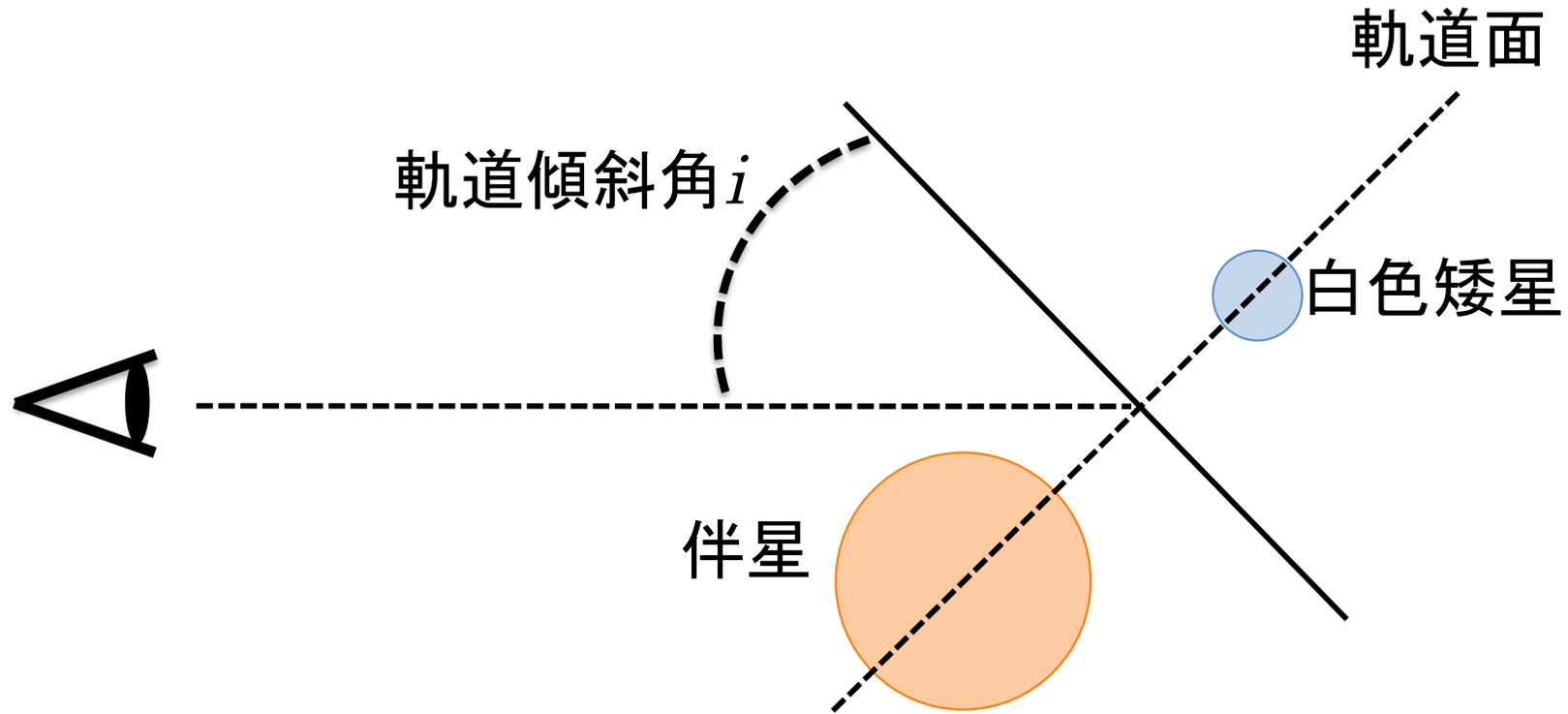
$L_{0.1-100} = 0.17 \times 10^{33}$ erg s⁻¹ (Suleimanov et al. 2005)

- V1223 Sagittariiに比べ2桁以上暗い
- 降着率も~2桁程度小さい
- a も~2桁程度小さい可能性

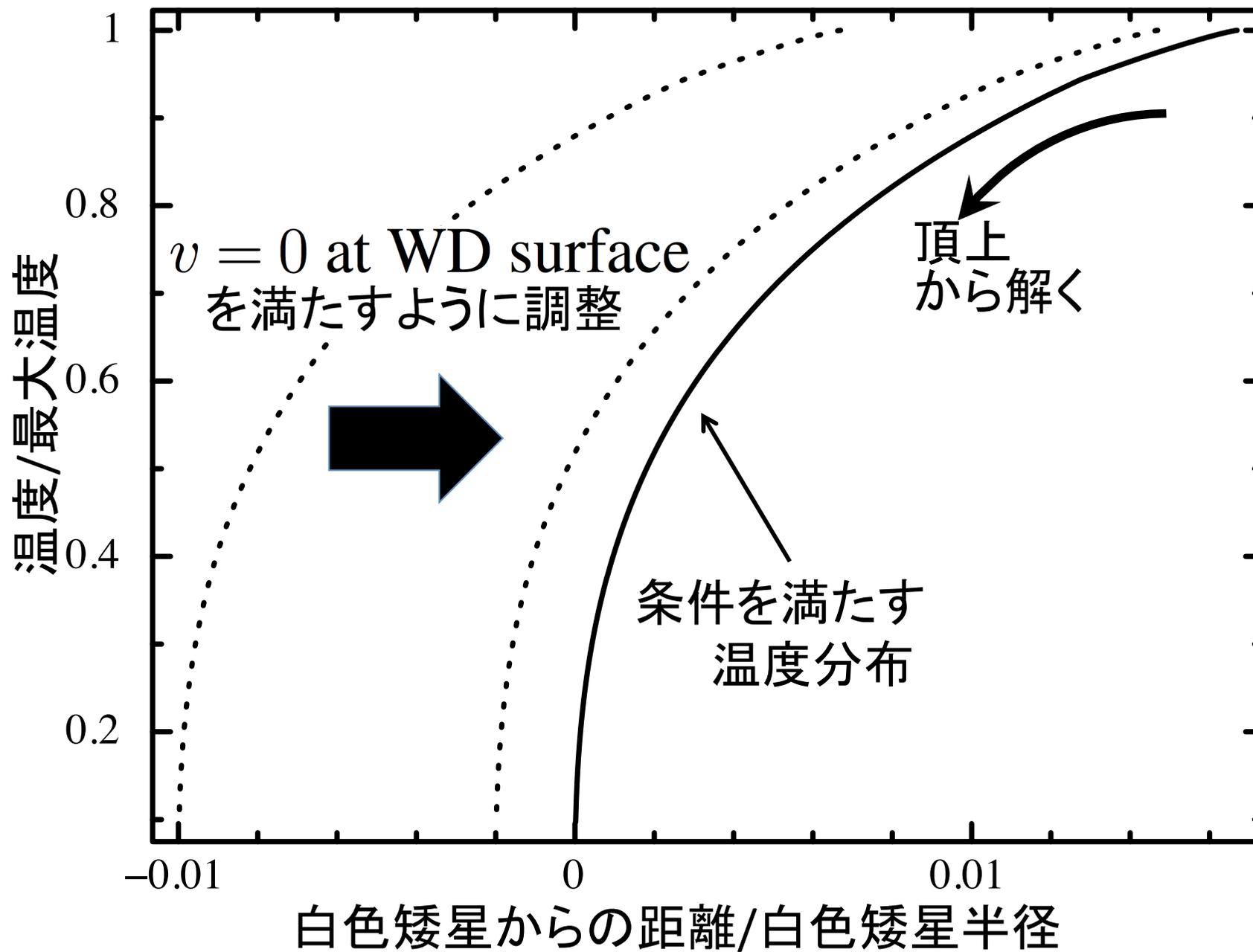
降着柱の高さ (h) $\sim 1 R_{\text{WD}}$ (白色矮星の自転に伴うX線光度変動)
(Allen et al. 1998)

→ 標準モデルより2~3桁高い

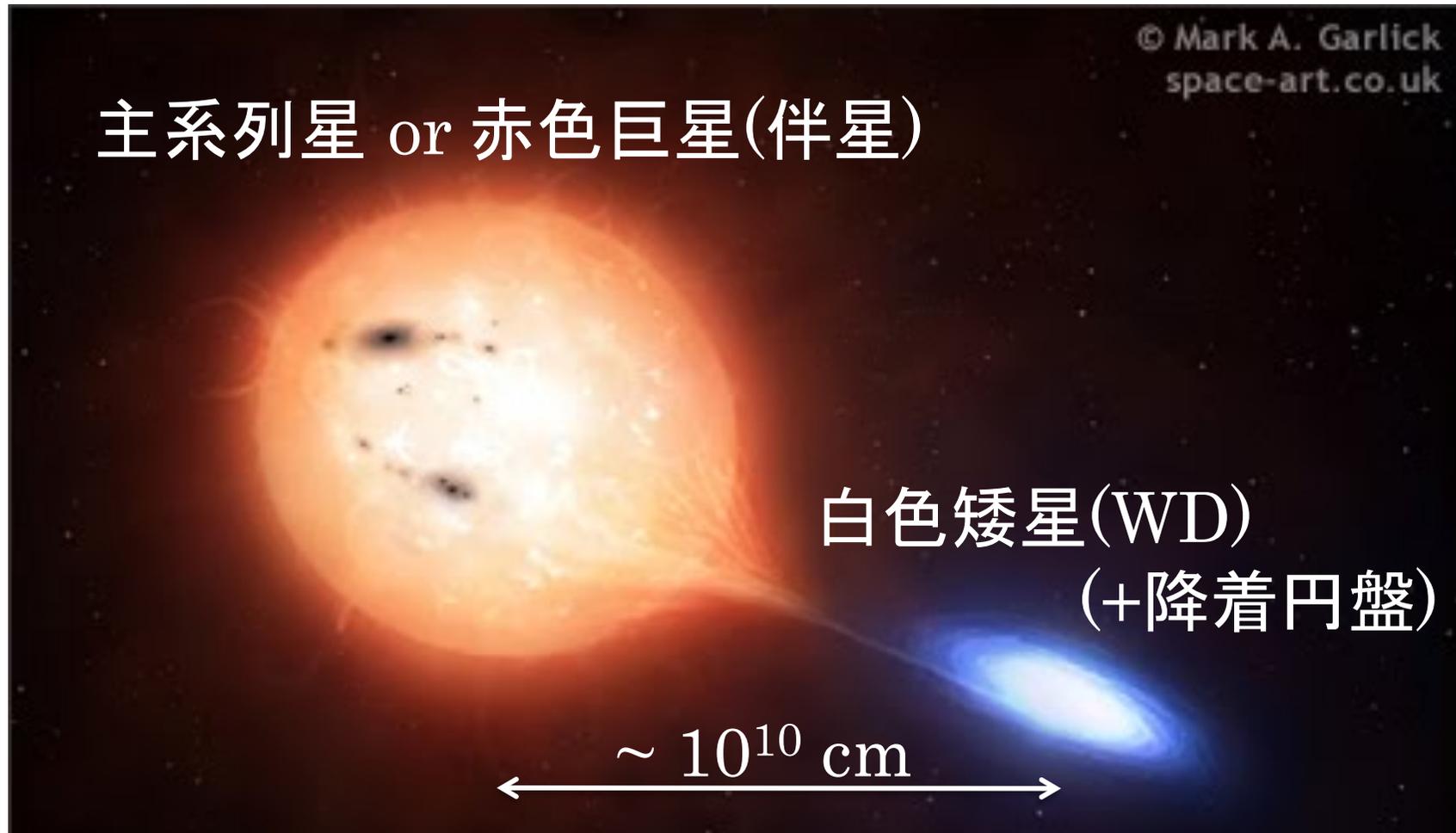
軌道傾斜角



Shooting method



激変星



矮新星爆発
新星爆発
Ia型超新星 } の親星 → 宇宙の化学進化

銀河面に広がったX線放射の起源
 10^{12} eV以下の宇宙線起源の候補

白色矮星の質量
→ 新星爆発の頻度
超新星を起こすか

断面積の変化(ノズルの効果)

- 断面積が変化する場合の連続の式

$$\rho v S = \text{const} \quad S: \text{降着柱の断面積}$$

対数を取って微分すると $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} + \frac{1}{v} \frac{dv}{dz} + \frac{1}{S} \frac{dS}{dz} = 0$ (*)

- 外力なしの場合の流体の運動方程式

$$\rho v \frac{dv}{dz} + \frac{dP}{dz} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{d\rho}{dz} = -\frac{\rho v}{c^2} \frac{dv}{dz} \quad C: \text{音速}$$

式(*)に代入

$$\left(\frac{v^2}{c^2} - 1\right) \frac{dv}{dz} = \underline{\underline{(\mathcal{M}^2 - 1) \frac{dv}{dz}}} = \frac{v}{S} \frac{dS}{dz} \quad \mathcal{M}: \text{マッハ数}$$

流れに沿って断面積が減少する場合

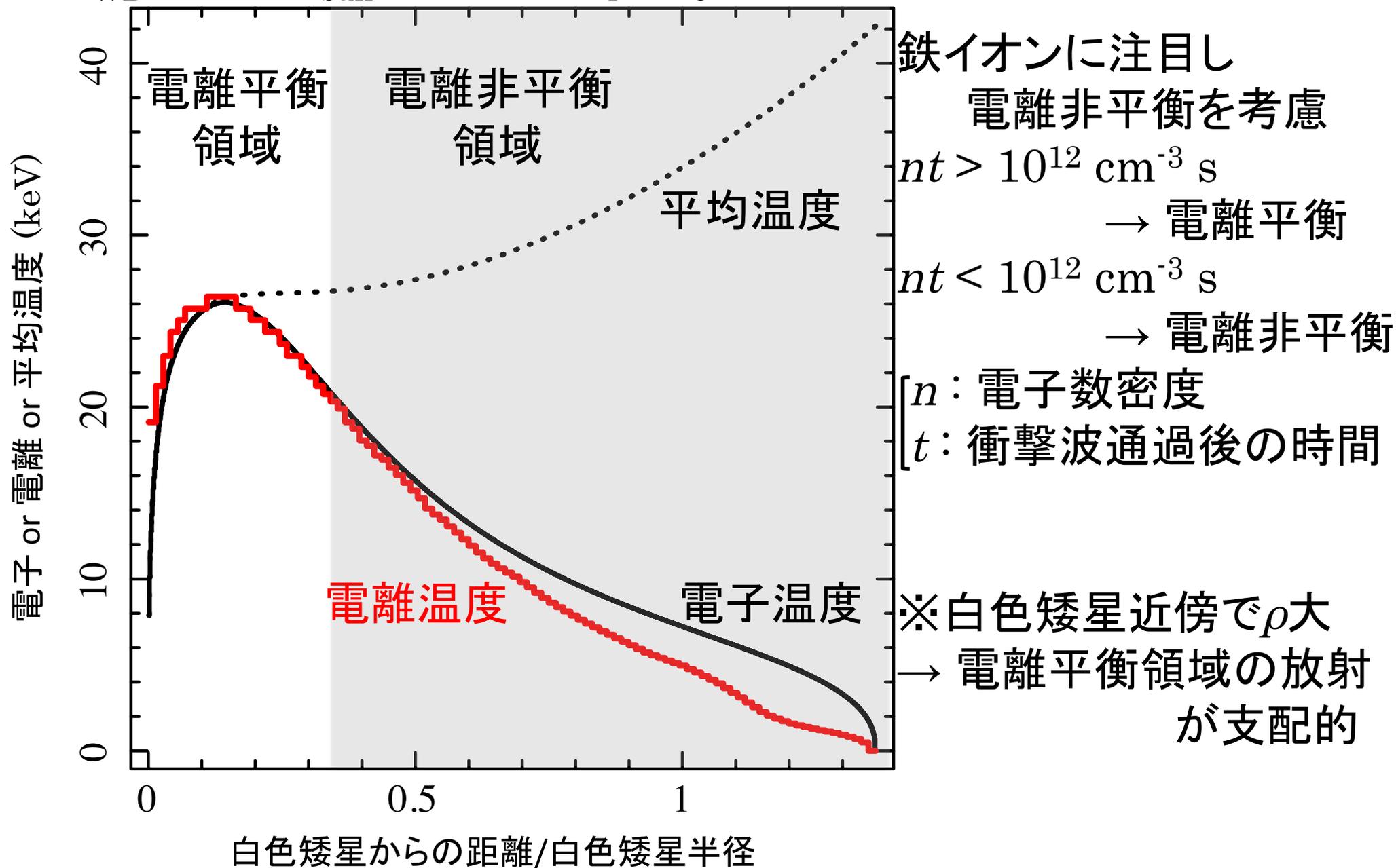
$\mathcal{M} > 1 \rightarrow$ 減速(運動 \rightarrow 熱エネルギー)

$\mathcal{M} < 1 \rightarrow$ 加速(熱 \rightarrow 運動エネルギー)

※降着柱では $\mathcal{M} < 1$

降着柱内の電離非平衡

$M_{WD} = 1.2 M_{sun}$ $a = 10^{-3}$ (T_i と T_e の不一致が顕著なケース)



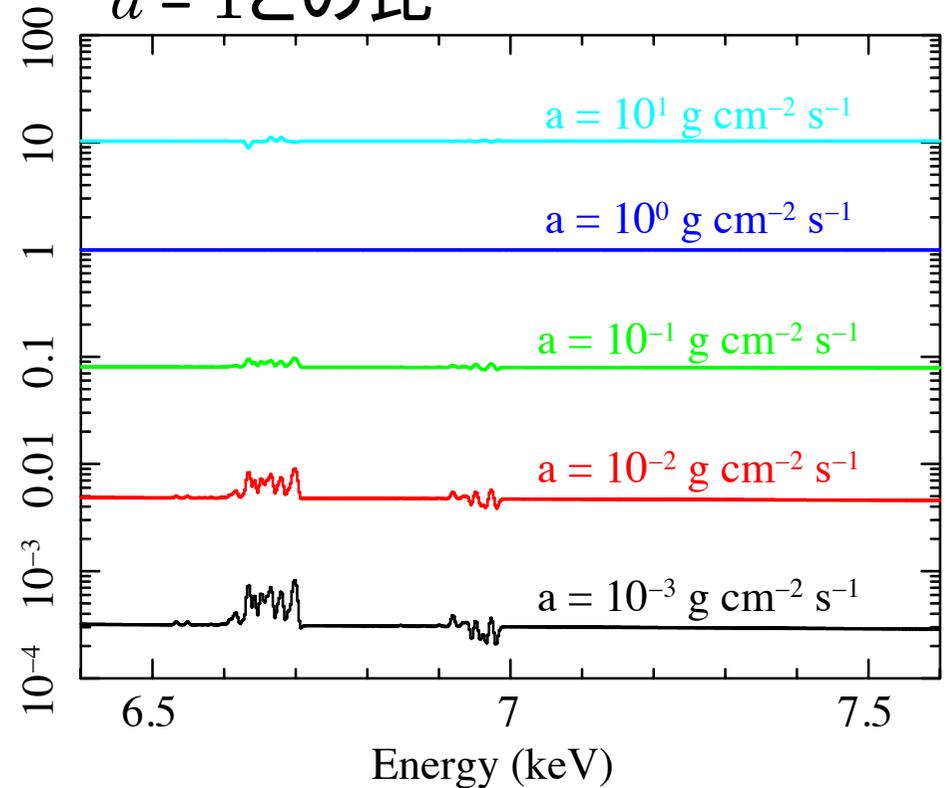
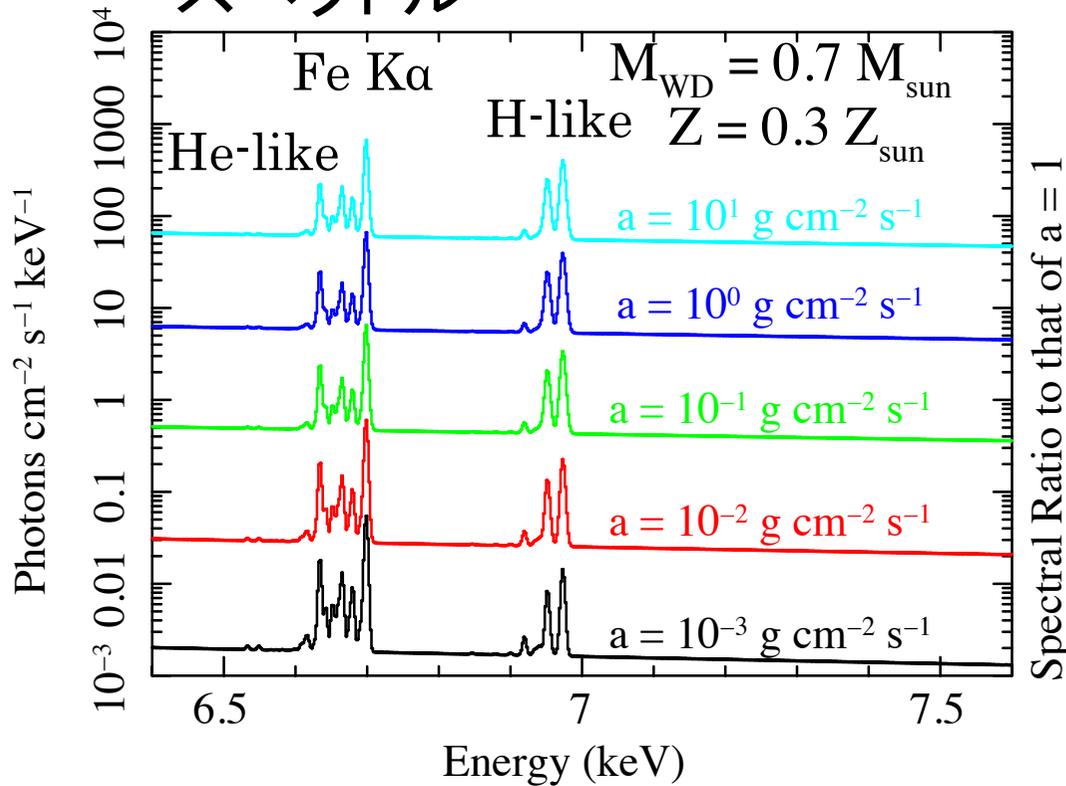
a とスペクトル(鉄イオン)

$M_{\text{WD}} = 0.7 M_{\text{sun}}$ $Z = 0.3 Z_{\text{solar}}$

$a = 10, 1, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$

スペクトル

$a = 1$ との比

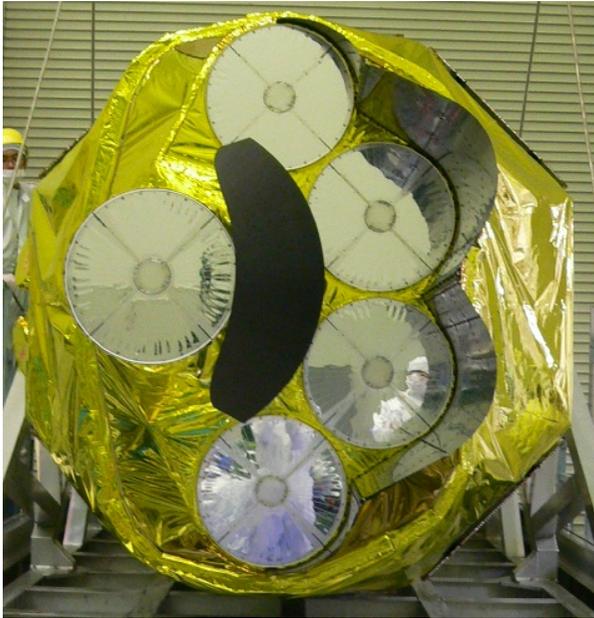


a 減少 \rightarrow 降着率減少 \rightarrow 強度減少
 \rightarrow 温度低下 \rightarrow He様輝線強
 \rightarrow H様輝線弱

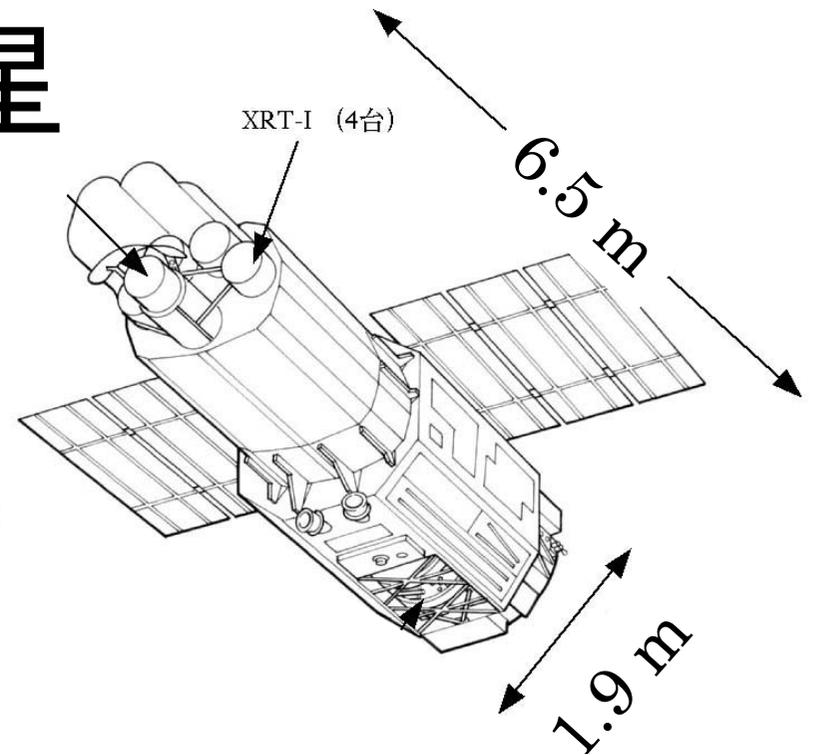
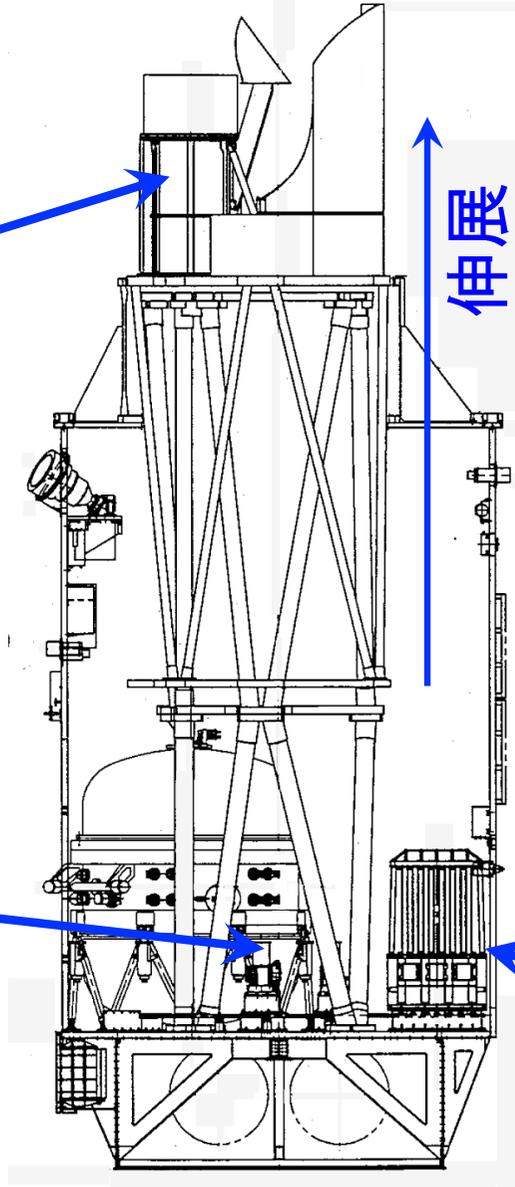
(連続成分に対して)

すざく衛星

X線望遠鏡 (XRT)



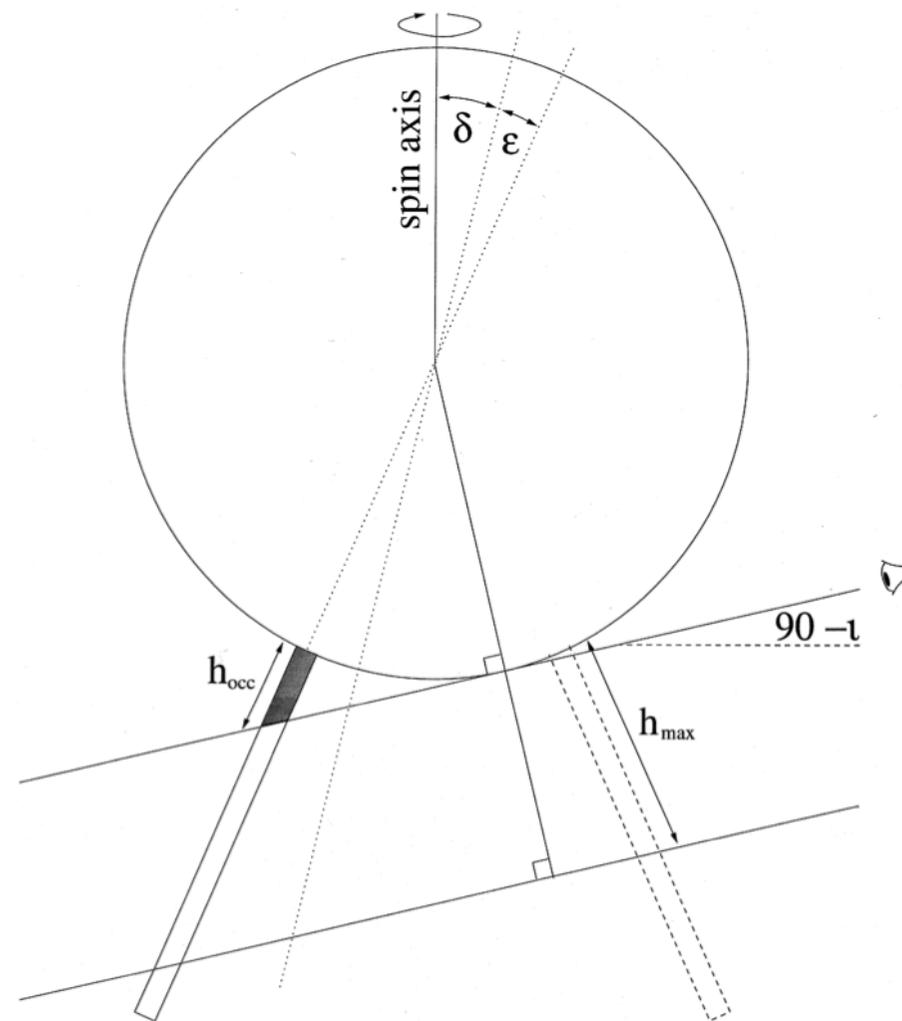
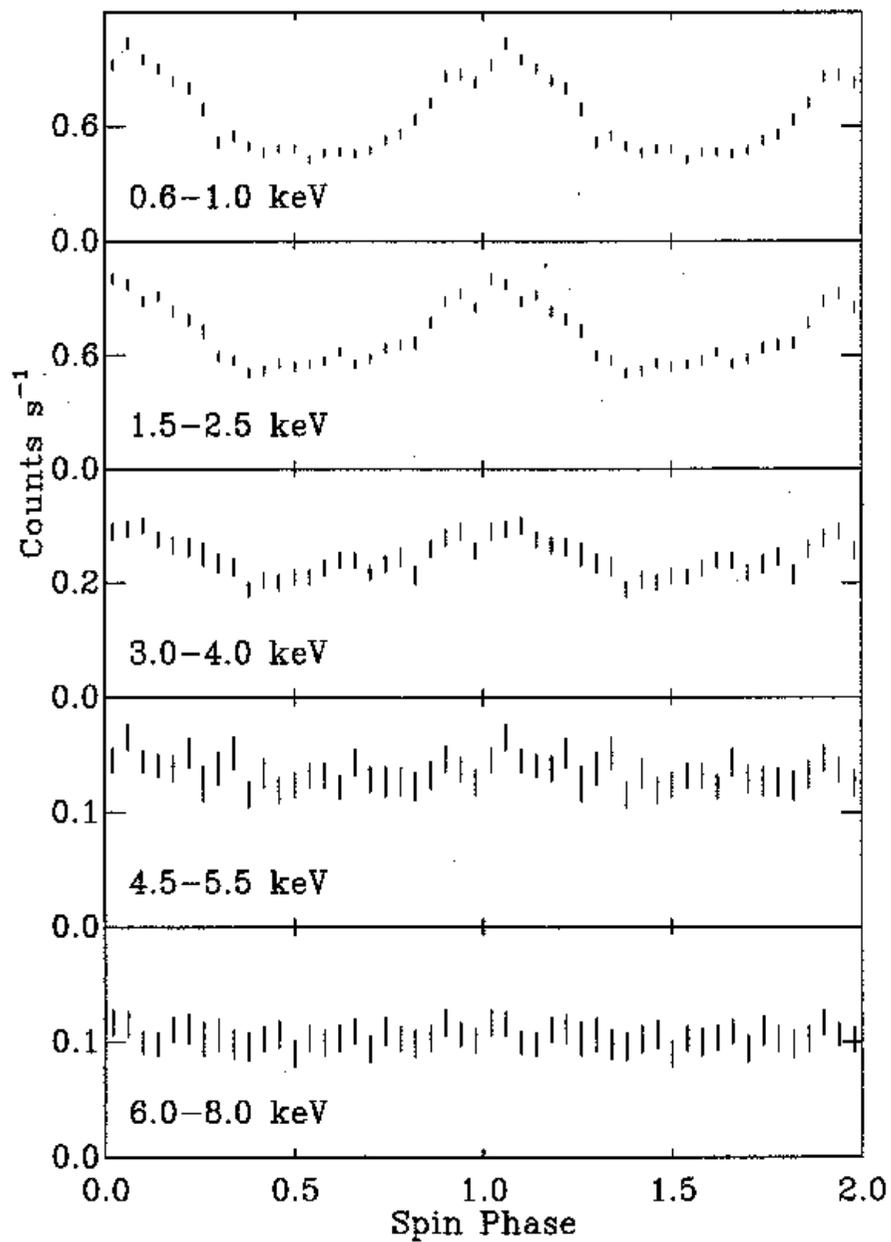
X線CCD (XIS)
(0.2-12 keV)



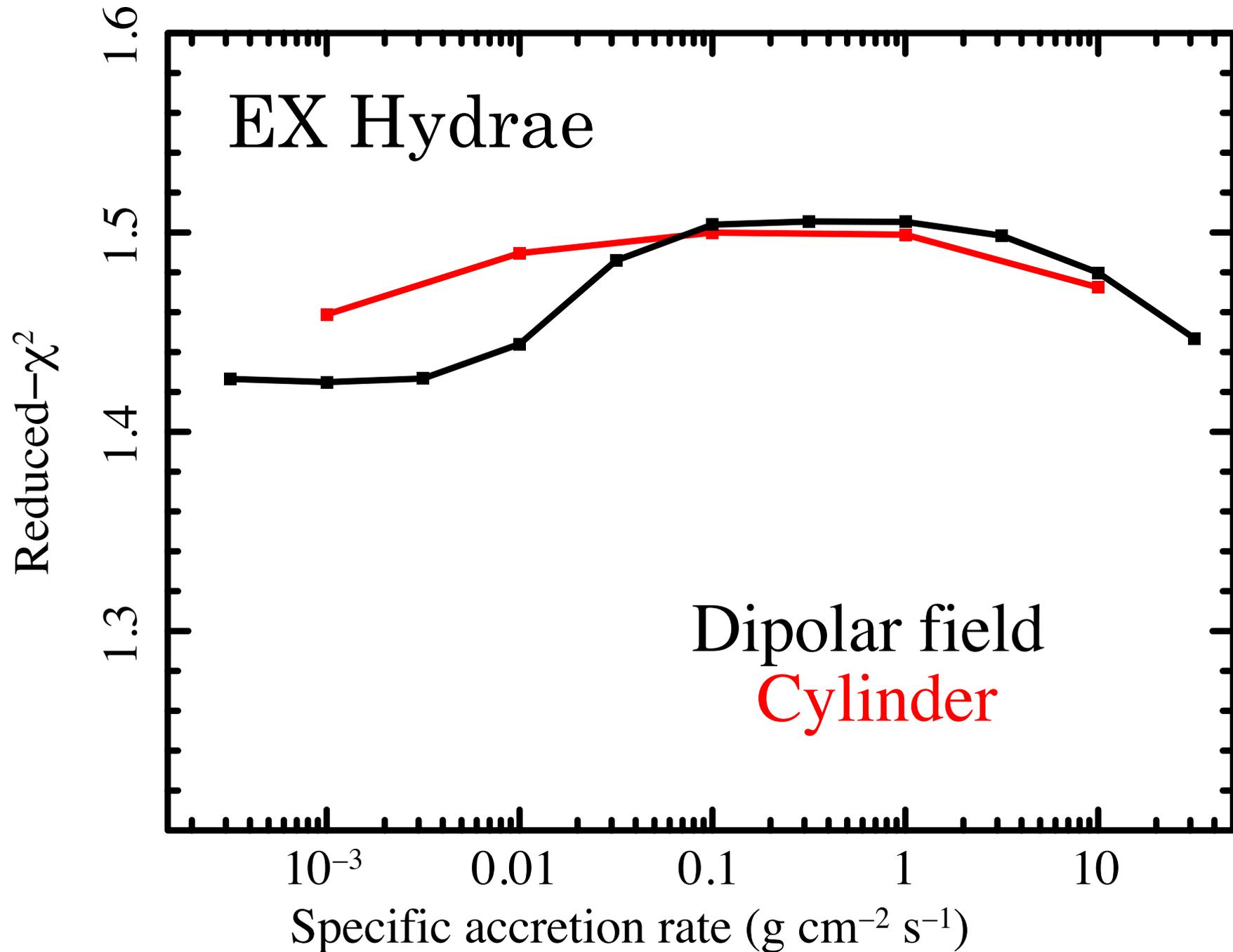
硬X線検出器 (HXD)
: 10-600 keV



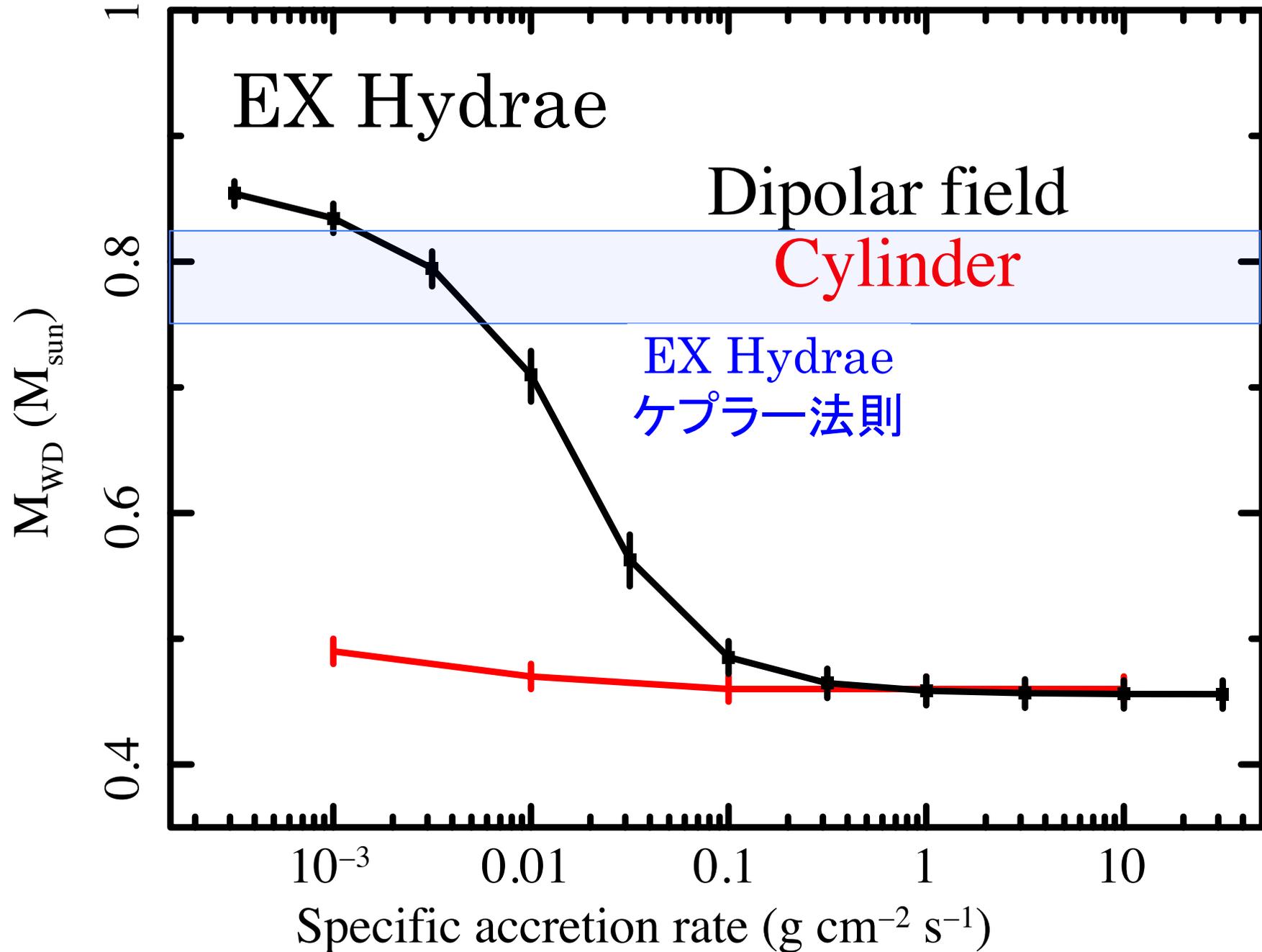
EX Hydraeの*h*の直接観測



双極子磁場と円柱降着柱の比較

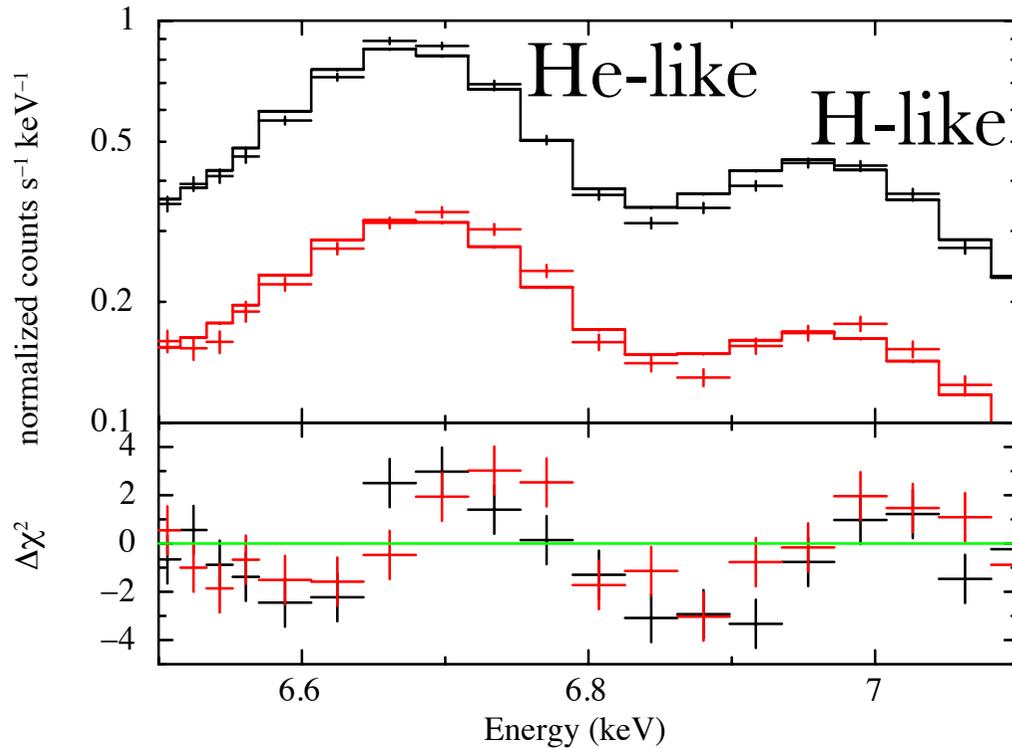


双極子磁場と円柱降着柱の比較

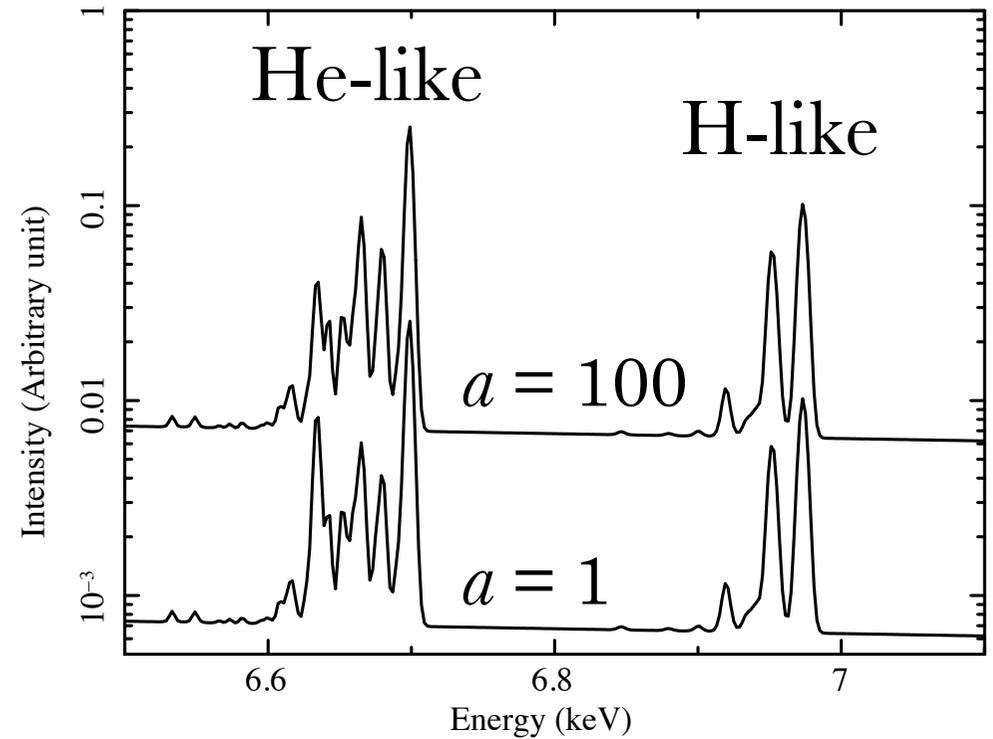


EX Hydrae in $a > 1$

• $a = 1$ FeK α 輝線 (fit結果)



• FeK α 輝線 (モデル)



• $a = 1 \text{ g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ でのフィット

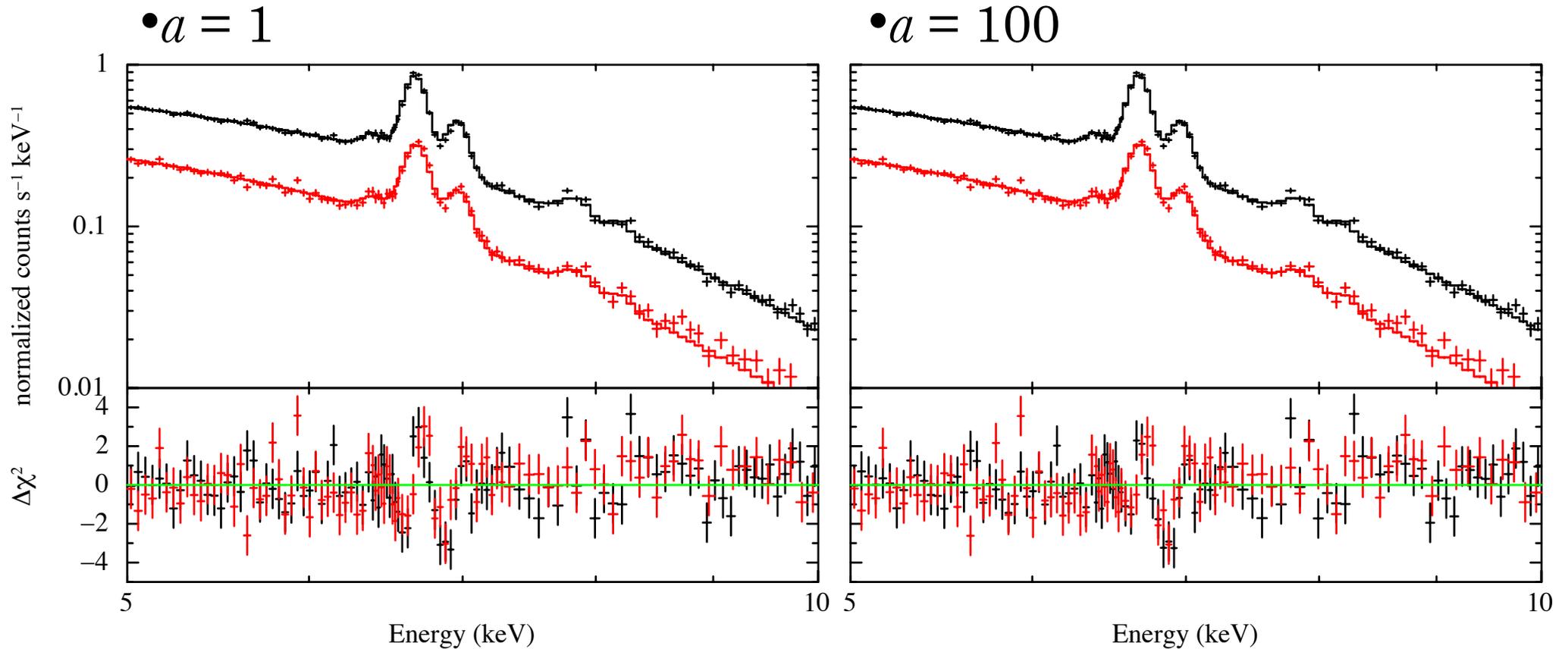
He-like FeK α 輝線の [低エネルギー側：モデル超過
高エネルギー側：モデル不足

$a > 1$ で降着柱の物理構造の分布の形は不変

しかし、**密度の絶対値は異なる**

• a 大 \rightarrow (異重項間遷移線/禁制線)大 (Feの臨界密度： $\rho_c \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

EX Hydrae in $a > 1$



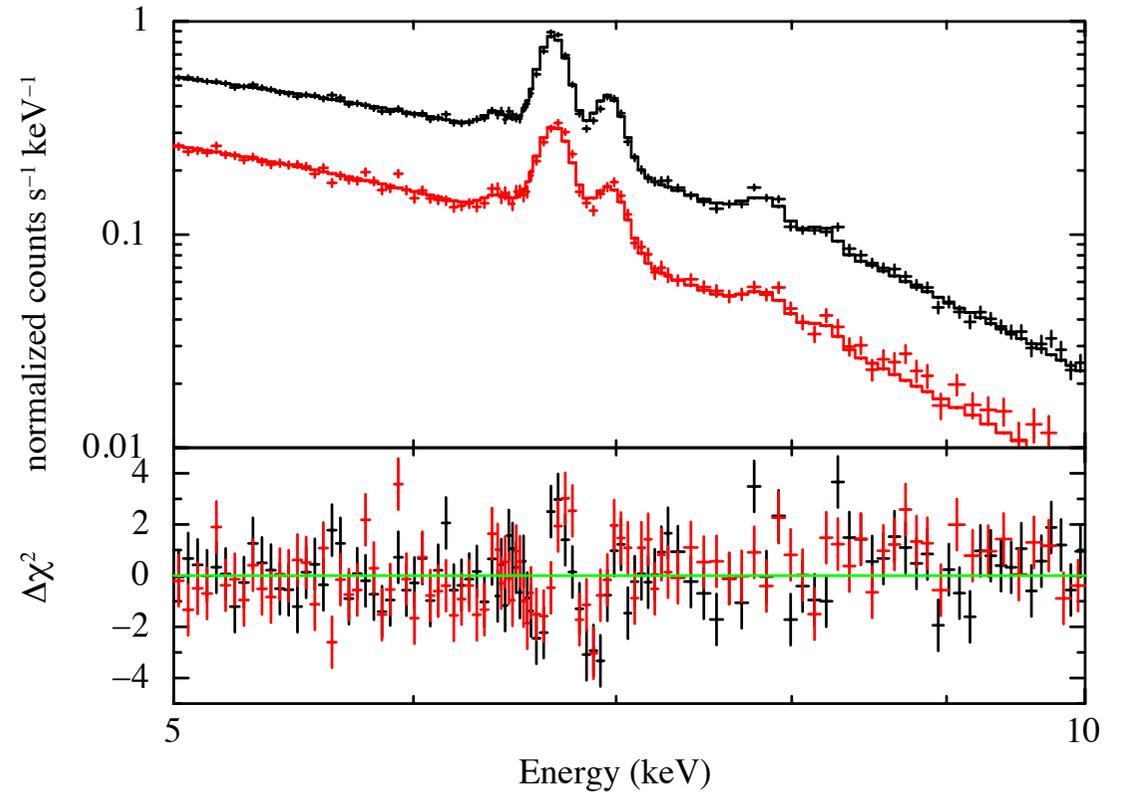
a 大 \rightarrow (異重項間遷移線/禁制線)大
 \rightarrow 残差減少 \rightarrow fit改善

ただし、応答関数の系統誤差、

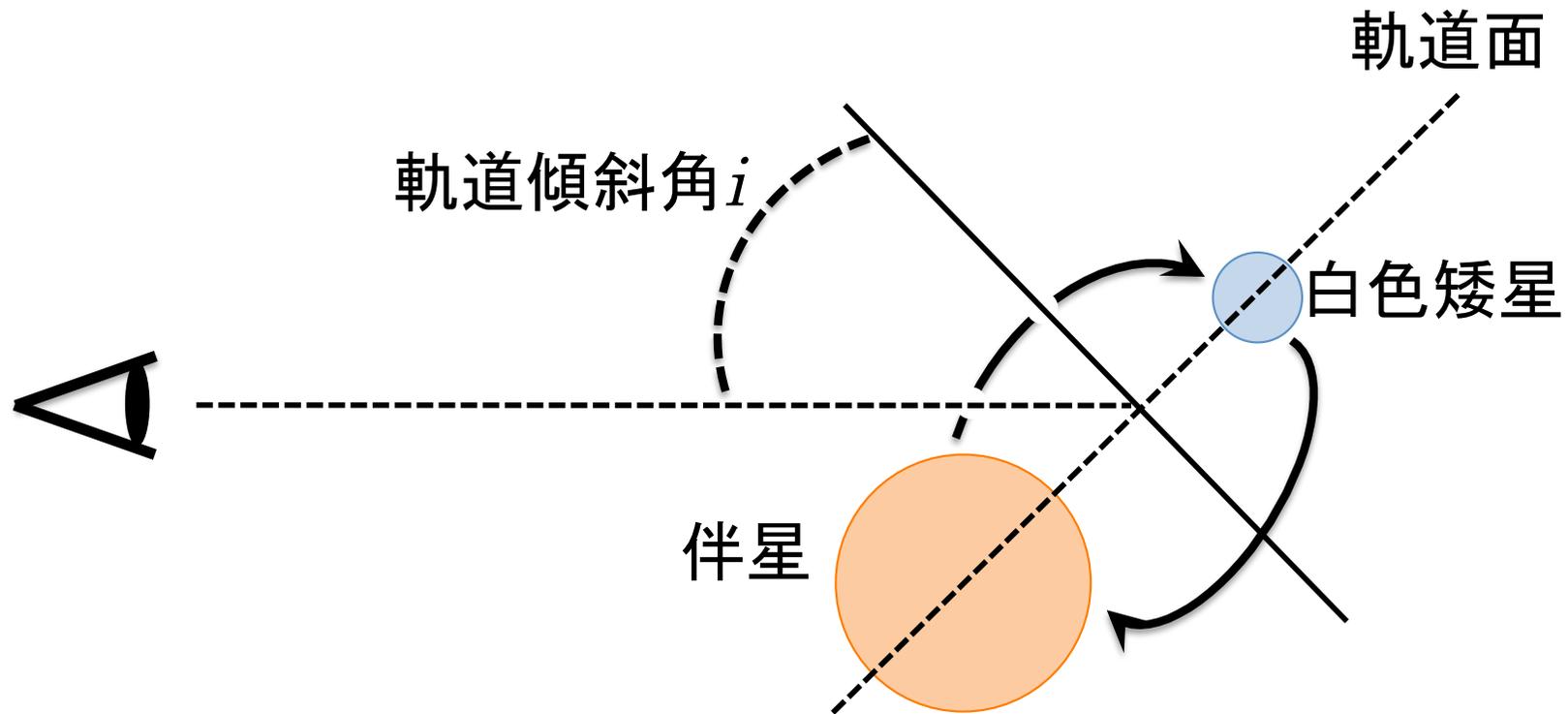
過去の観測(M_{WD}, h, f)との比較から棄却

EX Hydrae in $a > 1$

• $a = 1$



軌道傾斜角



結果とまとめ(2)

(3) すざくデータに適用 (降着率大のV1223 Sgrと小のEX Hya)

→ a により M_{WD} の見積もりは異なる

V1223 Sgr : a 大 → 標準モデルが良い近似

$$\left[\begin{array}{l} M_{\text{WD}} = 0.83_{-0.04}^{+0.08} M_{\text{sun}} \text{ (標準モデルと一致)} \\ h < 0.09 \ R_{\text{WD}} \text{ (直接観測と一致)} \end{array} \right.$$

EX Hya : a 小 → 標準モデル破綻

$$\left[\begin{array}{l} M_{\text{WD}} = 0.83_{-0.1}^{+0.03} M_{\text{sun}} \text{ (ケプラー則と一致)} \\ \rightarrow \text{EX Hyaの} M_{\text{WD}} \text{の論争に決着} \\ 0.6 \leq h \leq 1.2 \ R_{\text{WD}} \text{ (直接観測と一致)} \end{array} \right.$$

V1223 SgrとEX Hyaの M_{WD} 同等 → スペクトルの違いは a

強力な M_{WD} 測定手法としてX線的手法を確立

(ケプラー則は必要なデータを揃えるのが困難)

→ 多くの強磁場激変星の白色矮星質量を正確に測定