

X線天文衛星XRISMによる激変星のサイエンス

石田 学

宇宙科学研究所(JAXA)

— 目次 —

● X線天文衛星XRISM

● 衛星の諸元

● 観測機器

- Resolve (X線カロリメータ)
- Xtend (X線CCDカメラ)

● 激変星からのX線放射

● XRISMによる激変星のサイエンス

● 6.4keV輝線による物理

- 重力ポテンシャルを利用した白色矮星質量の測定
- 境界層光度問題

● プラズマの密度診断

● 矮新星爆発時のコロナのgeometry

— 目次 —

🌟 X線天文衛星XRISM

🌟 衛星の諸元

🌟 観測機器

- Resolve (X線カロリメータ)
- Xtend (X線CCDカメラ)

🌟 激変星からのX線放射

🌟 XRISMによる激変星のサイエンス

🌟 6.4keV輝線による物理

- 重力ポテンシャルを利用した白色矮星質量の測定
- 境界層光度問題

🌟 プラズマの密度診断

🌟 矮新星爆発時のコロナのgeometry

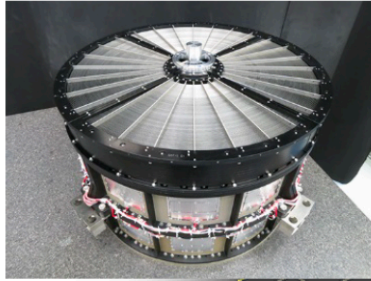
X線天文衛星 *XRISM* (1)

- *XRISM* = X-Ray Imaging & Spectroscopy Mission
 - X線分光撮像衛星
 - 2022年度内打ち上げ予定

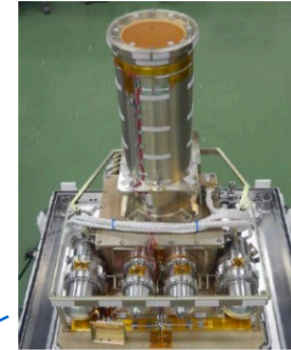
Launch site	Tanegashima Space Center
Launch vehicle	JAXA HII-A rocket
Orbit altitude	550 ± 50 km
Orbit type	Approximately circular orbit
Orbit inclination	31 degree
Dimension	7.9 m x 9.2 m x 3.1 m
Mass	2.3 metric ton
Mission life	3 years + cryogen free operation

X線天文衛星 *XRISM* (2)

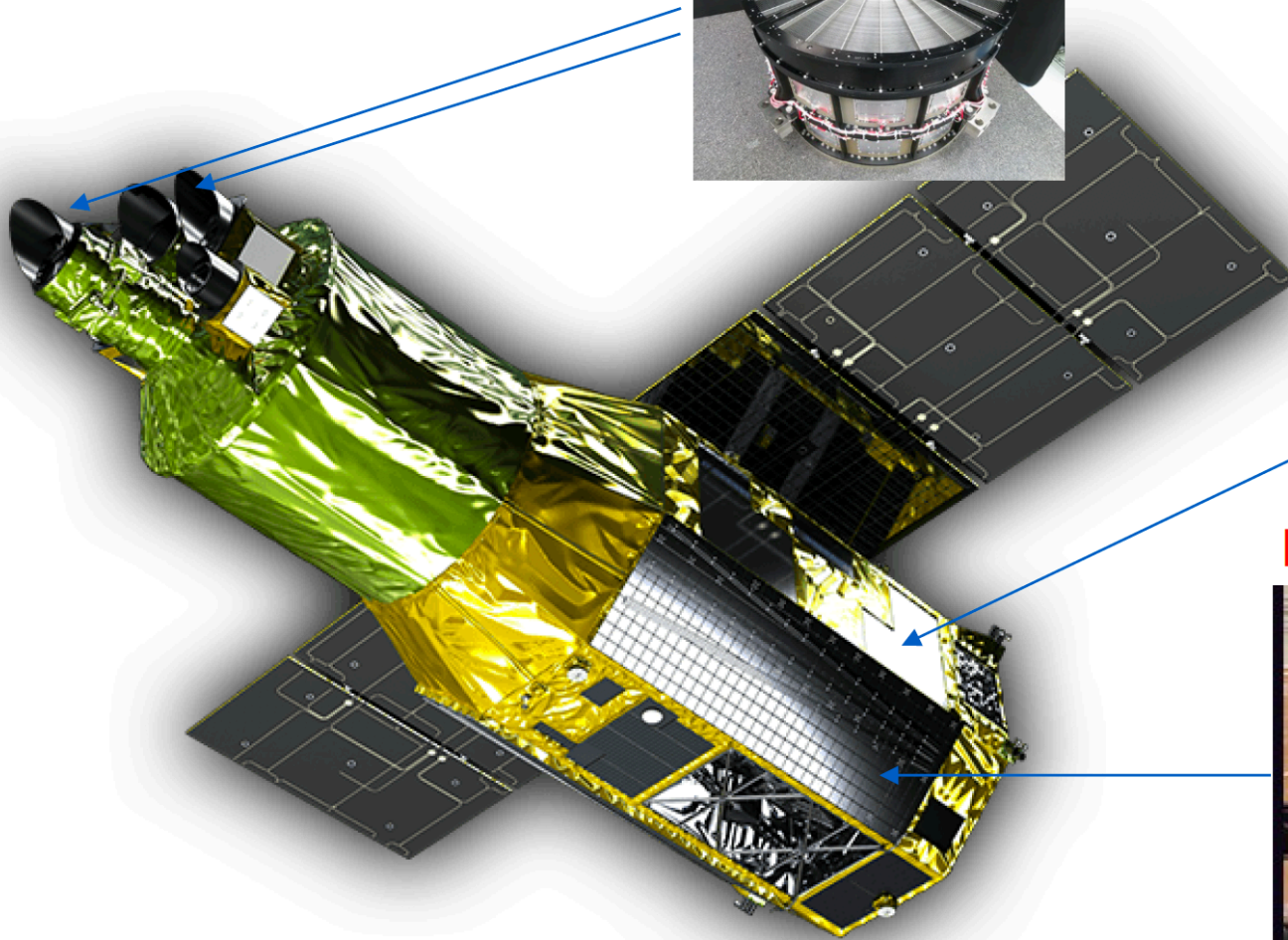
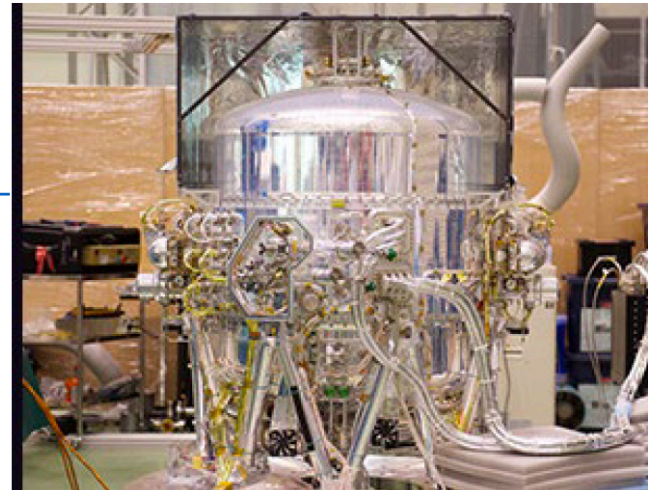
X-ray Mirror Assembly (**XMA**)



Xtend-Soft X-ray Imager

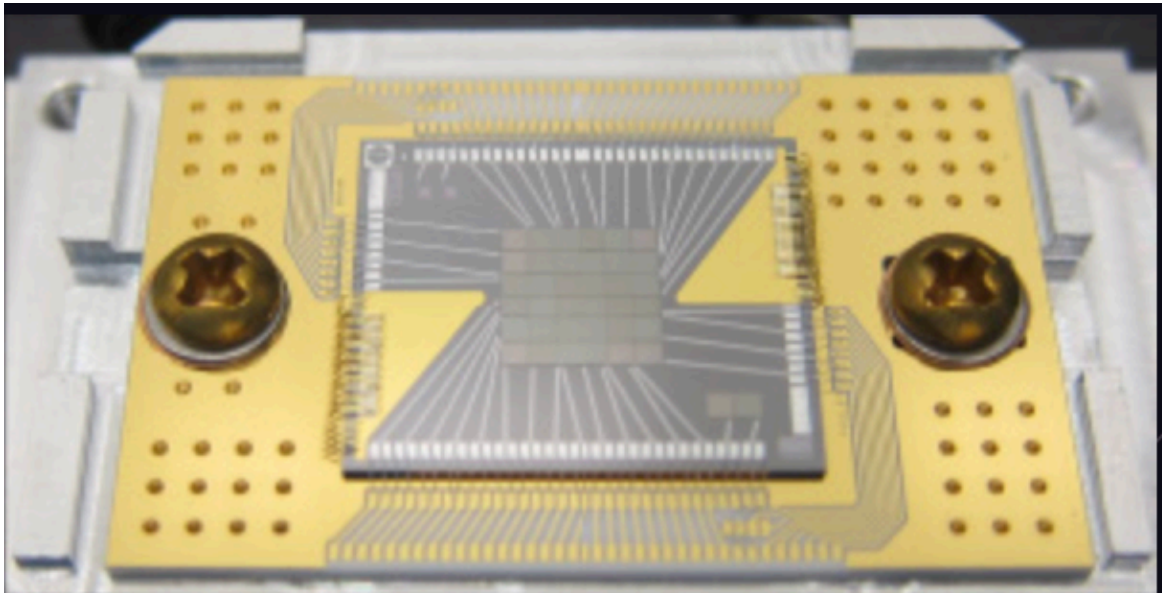


Resolve-Soft X-ray Spectrometer



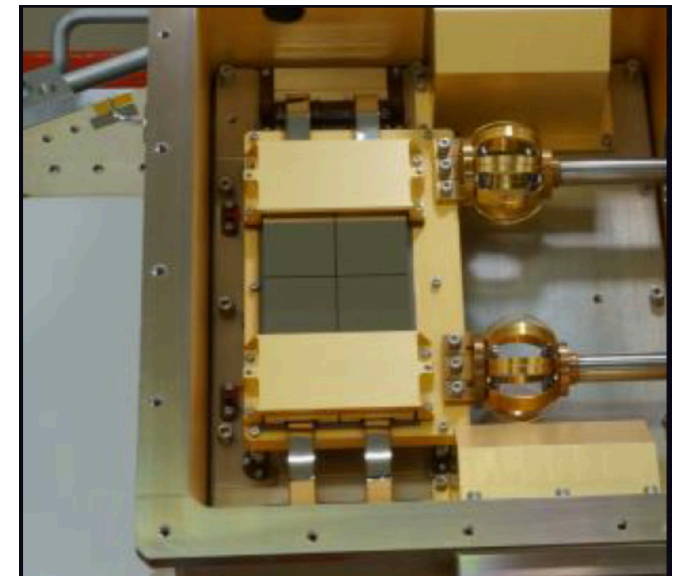
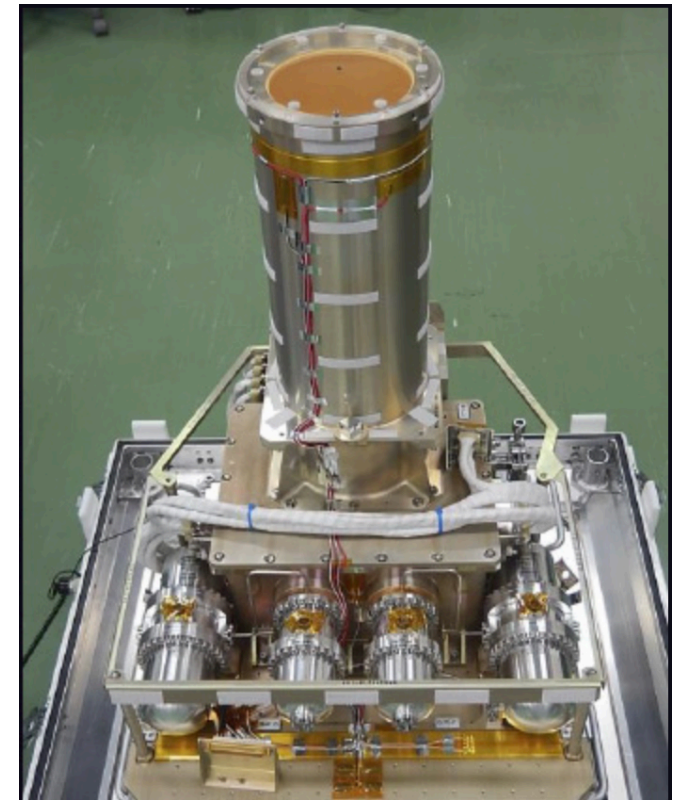
Resolve

- X線マイクロカロリメータ
 - 入射X線を熱に変換して温度上昇を検出
 - 断熱消磁冷凍機+He冷媒+機械式冷凍機を用いて検出器を~50mKまで冷却
 - 無冷媒運転可能
 - エネルギー分解能: 4~5 eV@6 keV ($E/\Delta E \geq 1000$)
 - エネルギー帯域: 0.4-20 keV (31-0.62 Å)
 - 1 keV = 12.4 Å = 1.24 nm
 - 視野
 - 検出器サイズ5.0 mm×5.0 mm = 3.0分角×3.0分角

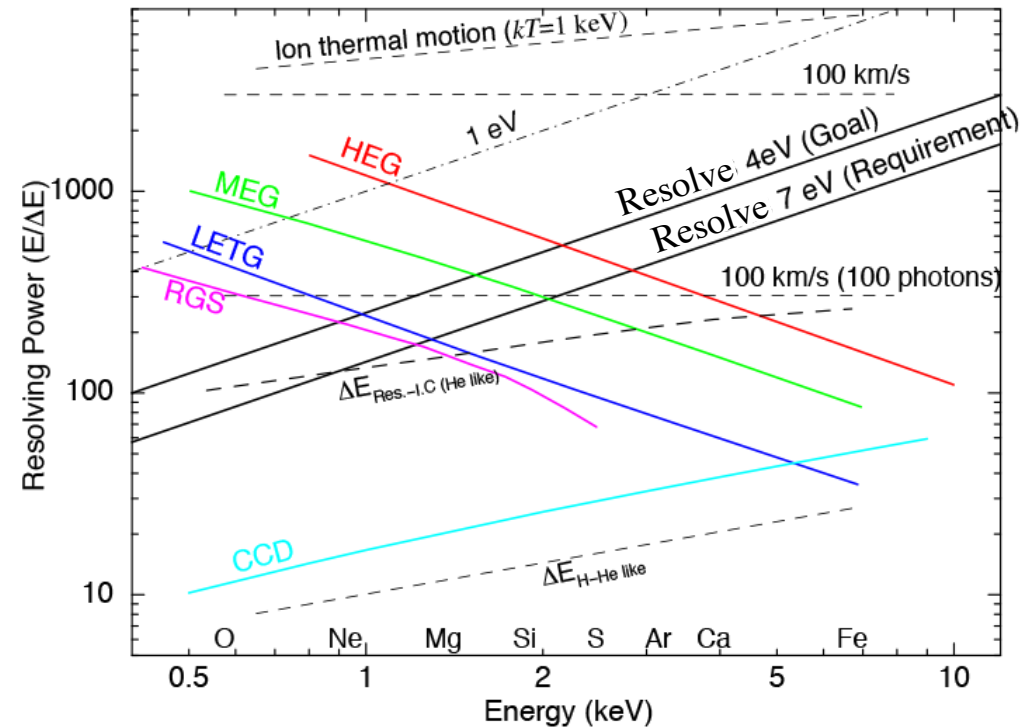
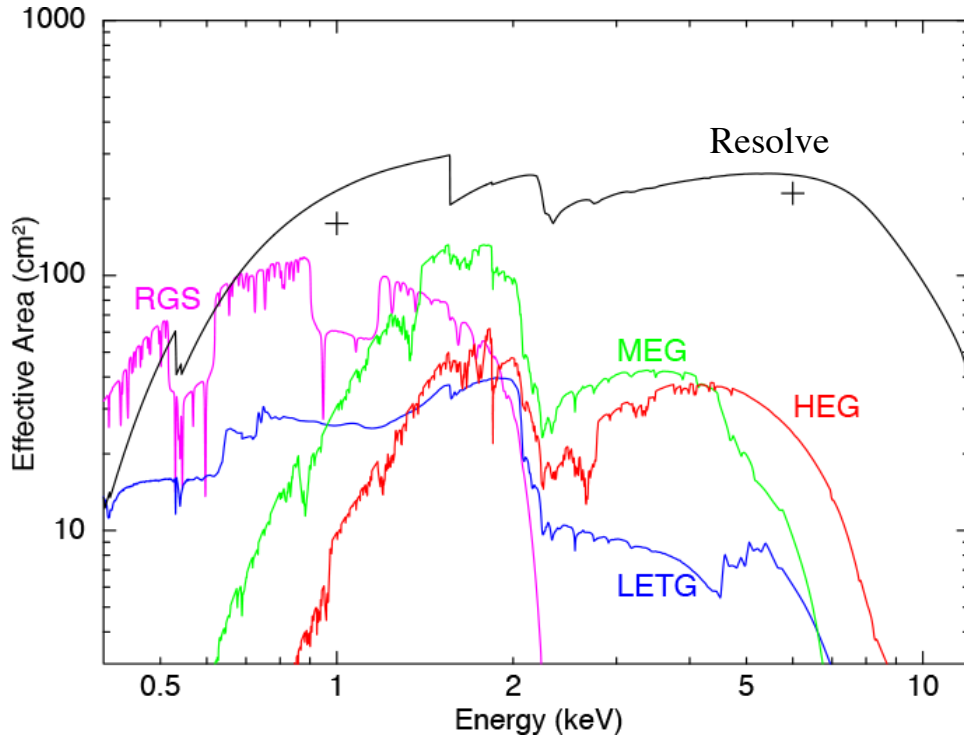


Xtend

- X線CCDカメラ
 - エネルギー帯域: 0.2-15 keV (62-0.83 Å)
 - エネルギー分解能: 250 eV @ 6 keV
 - 広い視野
 - 検出器サイズ 63 mm × 63 mm (ギャップ 1 mm)
= 38.7分角 × 38.7分角
 - Resolveへの視野外からの漏れ込み推定
 - 新天体発見・Transient天体の検出



Chandra, XMM-Newton と XRISM



● *Chandra* (1999～) HEG/MEG、*XMM-Newton* (2000～) RGS と比べて Resolve は

- 特に高エネルギー側で大きな有効面積
- $E \geq 2$ keV で高いエネルギー分解能
 - 高エネルギー側の特性X線、Si, S, 特に Fe の特性X線に advantage あり。
- 非分散型分光計
 - 広がった天体の精密分光ができる唯一の分光器 (ただし狭視野)

— 目次 —

🌍 X線天文衛星XRISM

🌍 衛星の諸元

🌍 観測機器

- Resolve (X線カロリメータ)
- Xtend (X線CCDカメラ)

🌍 激変星からのX線放射

🌍 XRISMによる激変星のサイエンス

🌍 6.4keV輝線による物理

- 重力ポテンシャルを利用した白色矮星質量の測定
- 境界層光度問題

🌍 プラズマの密度診断

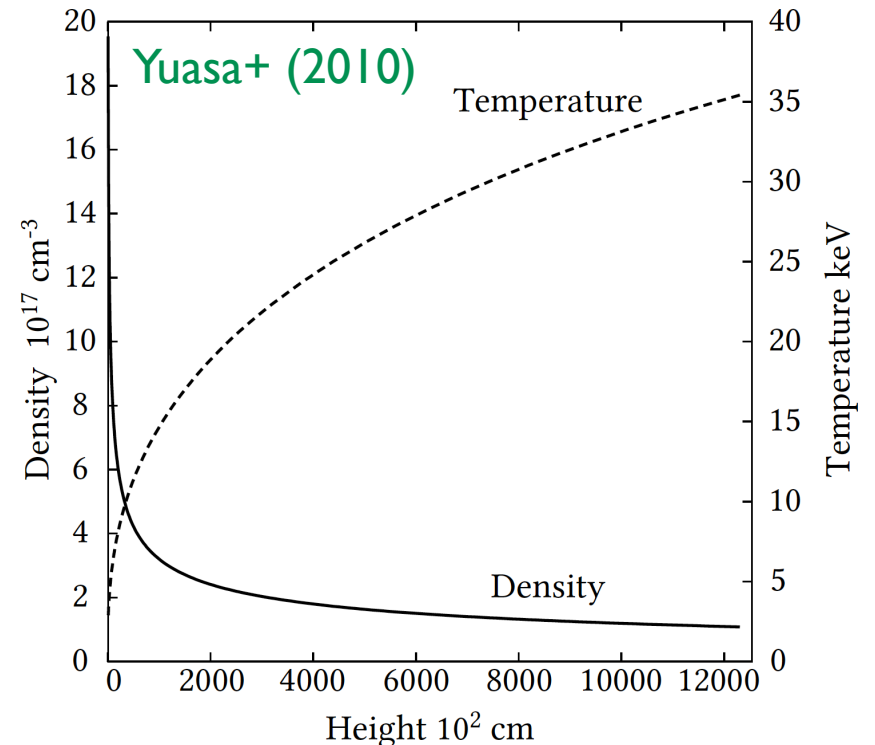
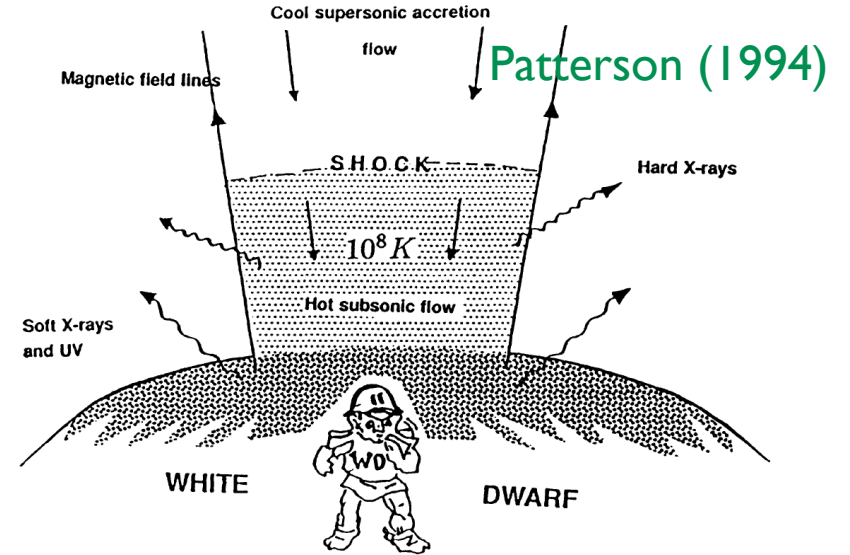
🌍 矮新星爆発時のコロナのgeometry

硬X線波長帯での強磁場激変星

- 磁極への降着
- 定在衝撃波によるプラズマ加熱
 - $M \approx 100$
- 光学的に薄い高温プラズマの形成
- 衝撃波の温度

$$\begin{aligned}
 kT_S &= \frac{3}{16} \mu m_H v_{\text{ff}}^2 = \frac{3GM_{\text{wd}}}{8R_{\text{wd}}} \mu m_H \\
 &= 22 \left(\frac{M_{\text{wd}}}{0.6M_{\odot}} \right)^{4/3} \text{ [keV]}
 \end{aligned}$$

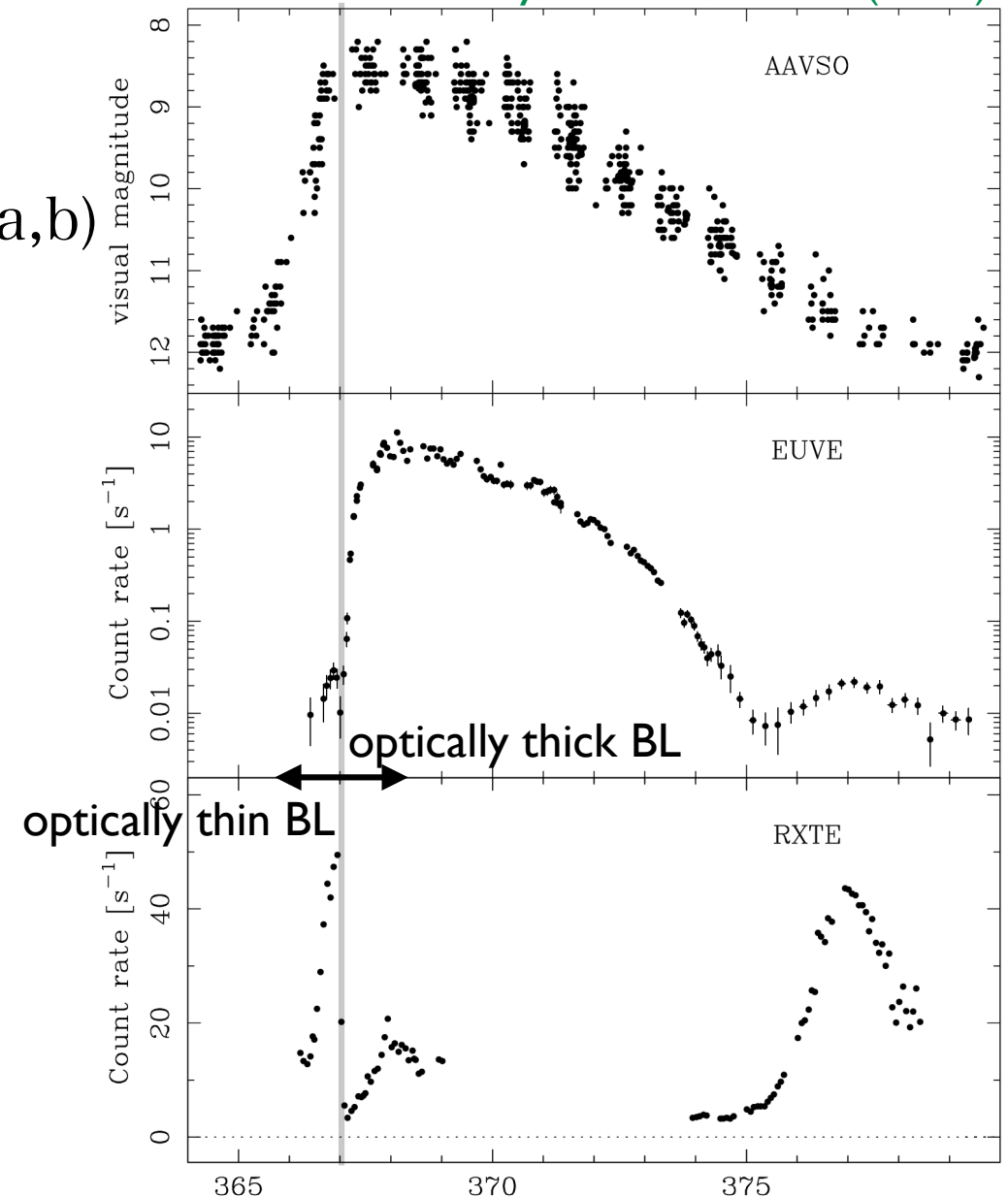
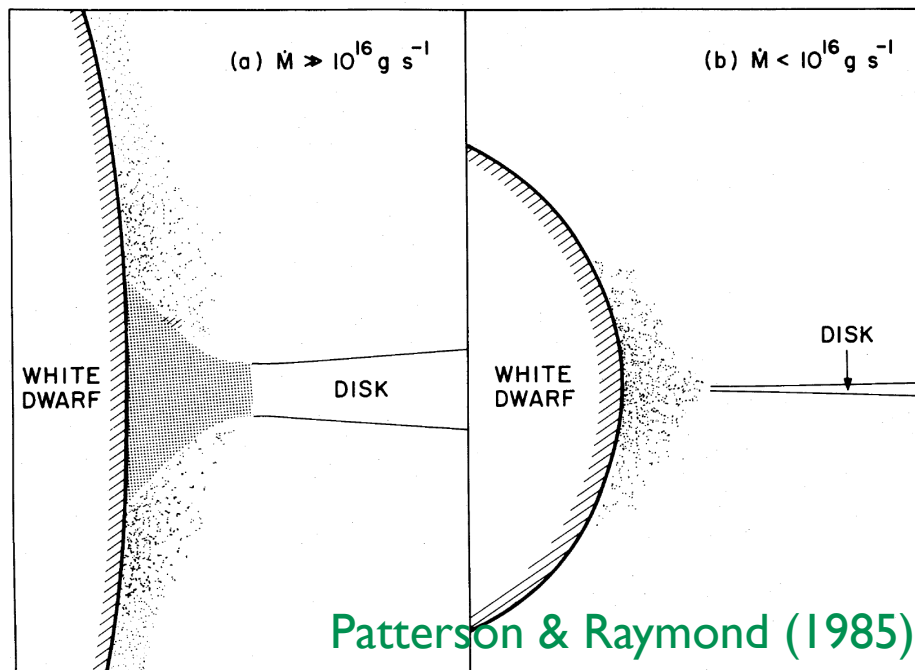
- 冷却流
 - Cooling (multi-temperature) plasma



硬X線波長帯での矮新星

Wheatley, Mauche, Mattei (2003)

- 可視光の静穏時 (Quiescence)
 - 光学的に薄い境界層
 - 境界層入口で最高温度 (Takeo+21a,b)
 - 冷却流
- 可視光の爆発時 (Outburst)
 - 光学的に厚い境界層: EUV放射
 - 硬X線はdisc coronaから放射

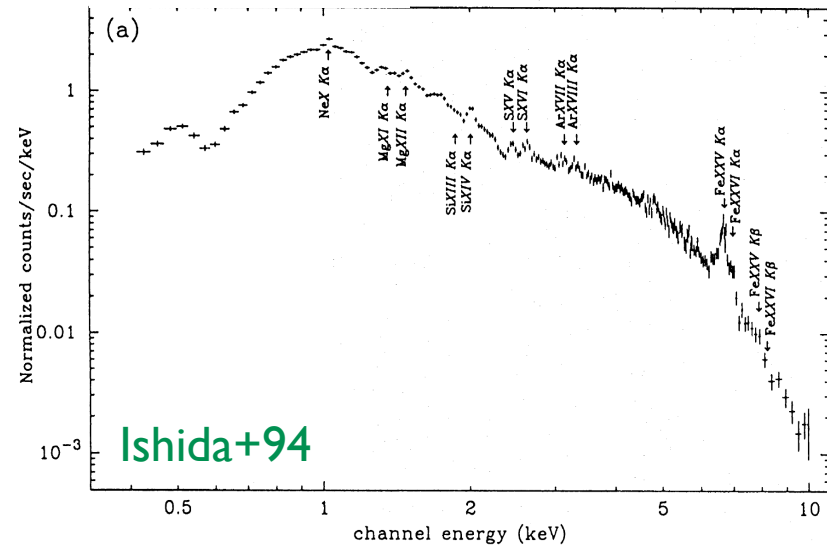


X線ではQuiescenceの方が明るい。
2022年7月28日 京都大学吉田キャンパス

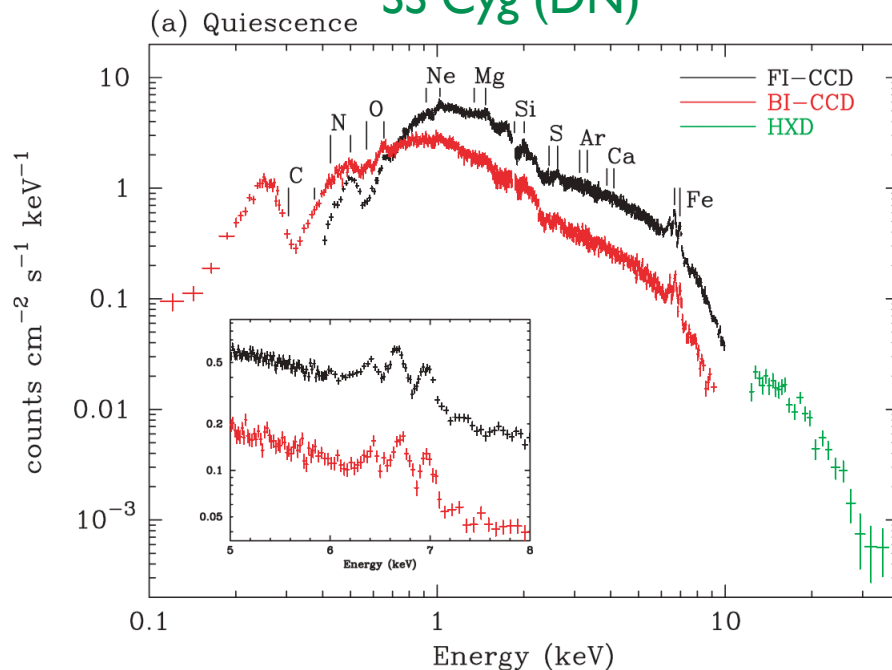
観測されたスペクトル

- mCV、DNeいずれも光学的に薄い高温プラズマからの放射
 - 連続成分
 - 主に制動放射 (+Free-bound放射)
 - 輝線
 - ヘリウム様、水素様に電離した重元素からの特性K α 線
 - 主にプラズマ電子の衝突励起

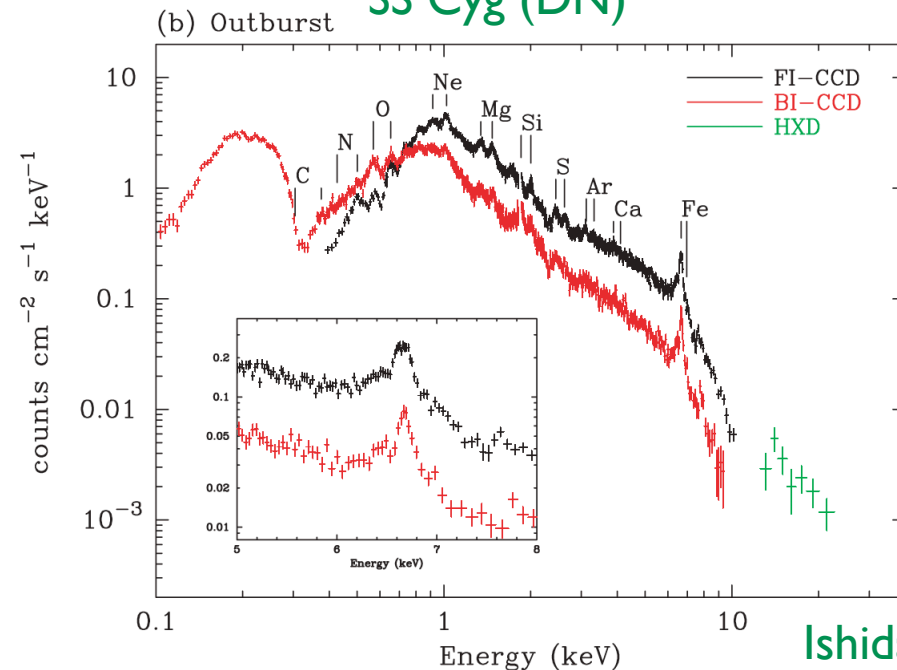
EX Hya (mCV)



SS Cyg (DN)

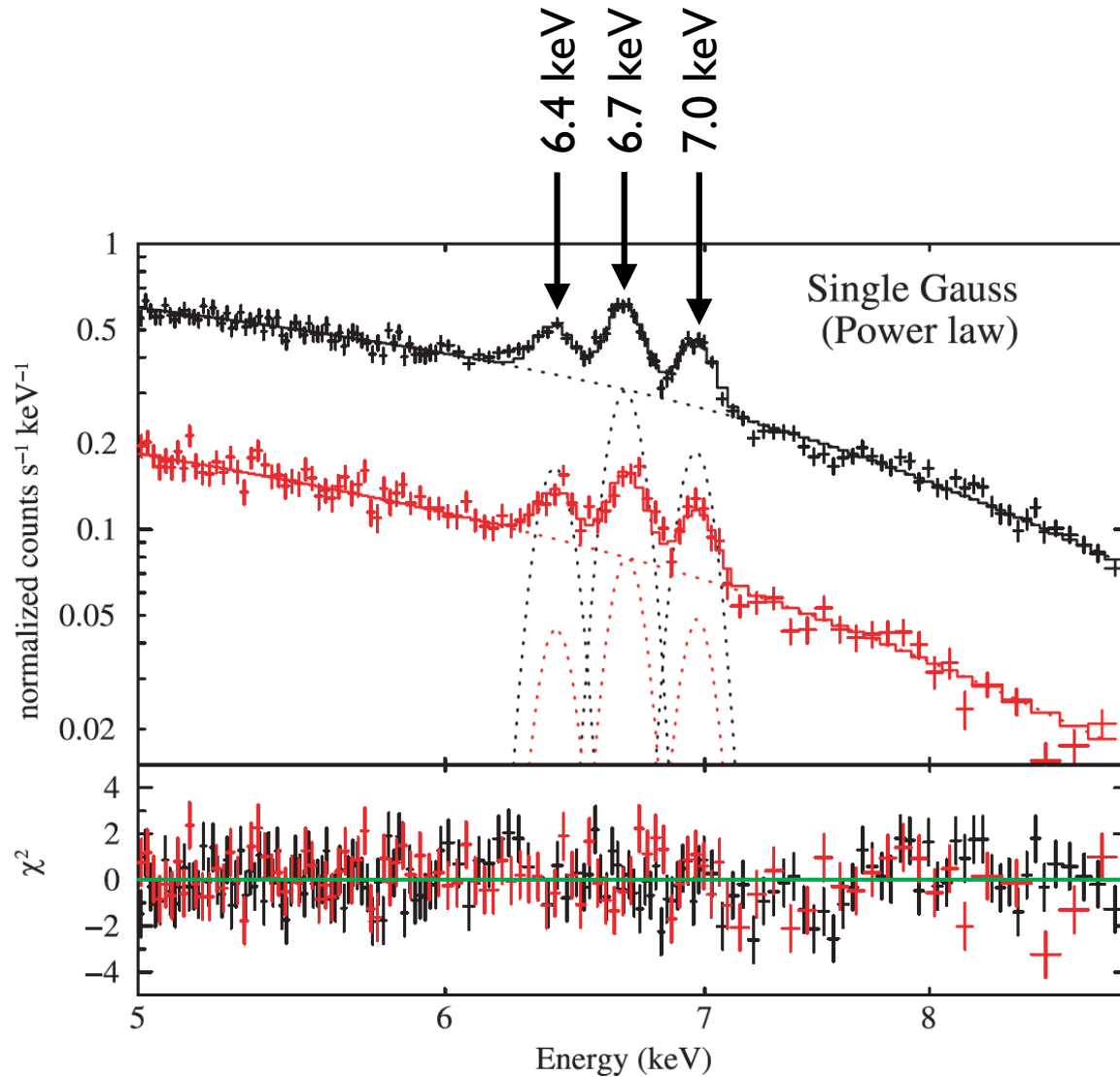


SS Cyg (DN)



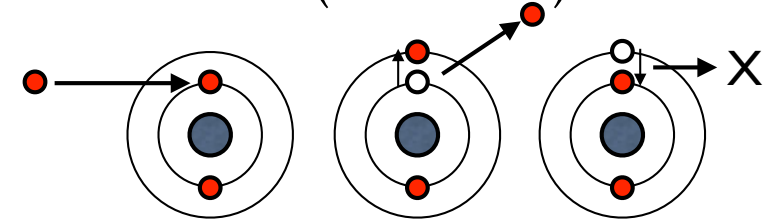
Ishida+09

Feの特性K α 線

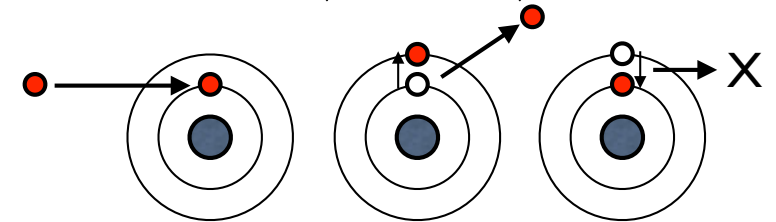


- プラズマからの輝線

- 6.7 keV (He-like)

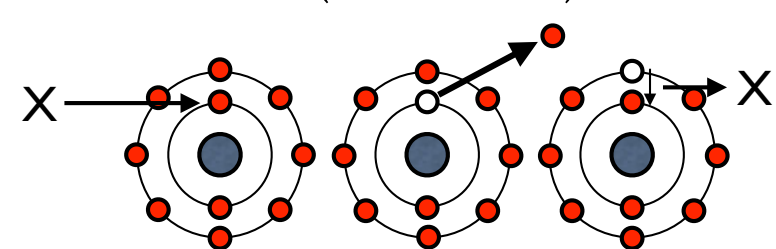


- 7.0 keV (H-like)



- 蛍光輝線

- 6.4 keV (Neutral)



- 白色矮星表面、降着円盤

— 目次 —

🌍 X線天文衛星XRISM

🌍 衛星の諸元

🌍 観測機器

- Resolve (X線カロリメータ)
- Xtend (X線CCDカメラ)

🌍 激変星からのX線放射

🌍 XRISMによる激変星のサイエンス

🌍 6.4keV輝線による物理

- 重力ポテンシャルを利用した白色矮星質量の測定
- 境界層光度問題

🌍 プラズマの密度診断

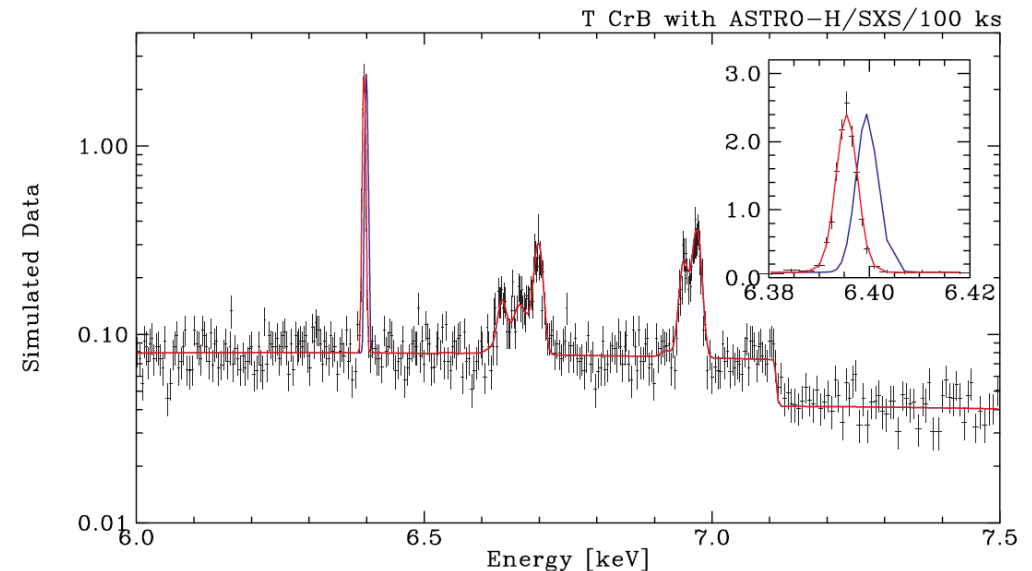
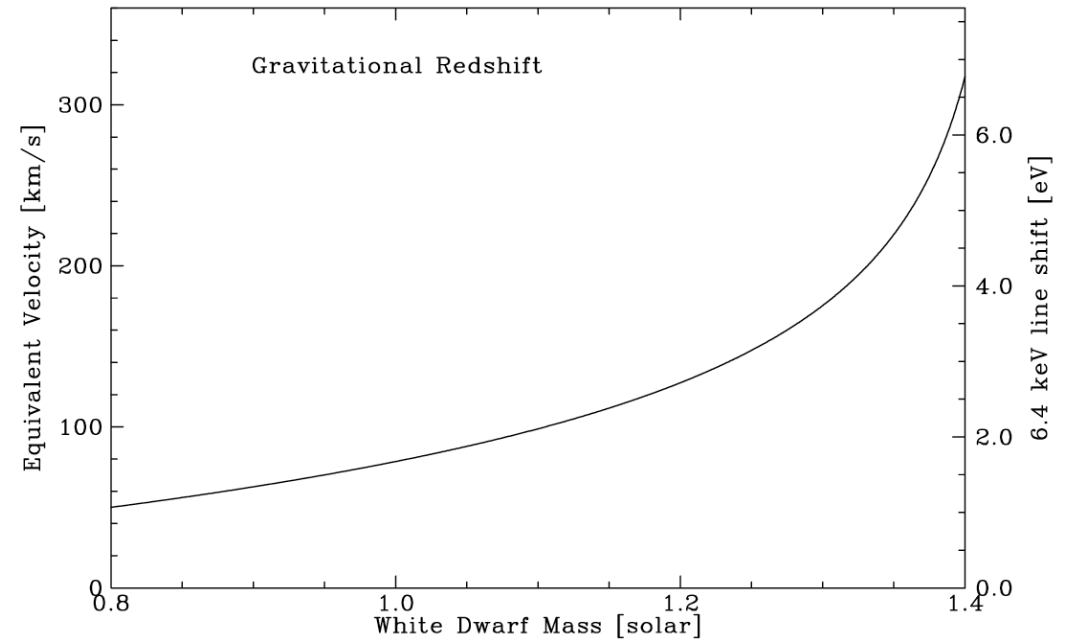
🌍 矮新星爆発時のコロナのgeometry

6.4 keV輝線による白色矮星質量の測定

- 幅の狭い6.4 keV輝線は白色矮星表面から放射されている。
- 一般相対論の重力redshiftを利用

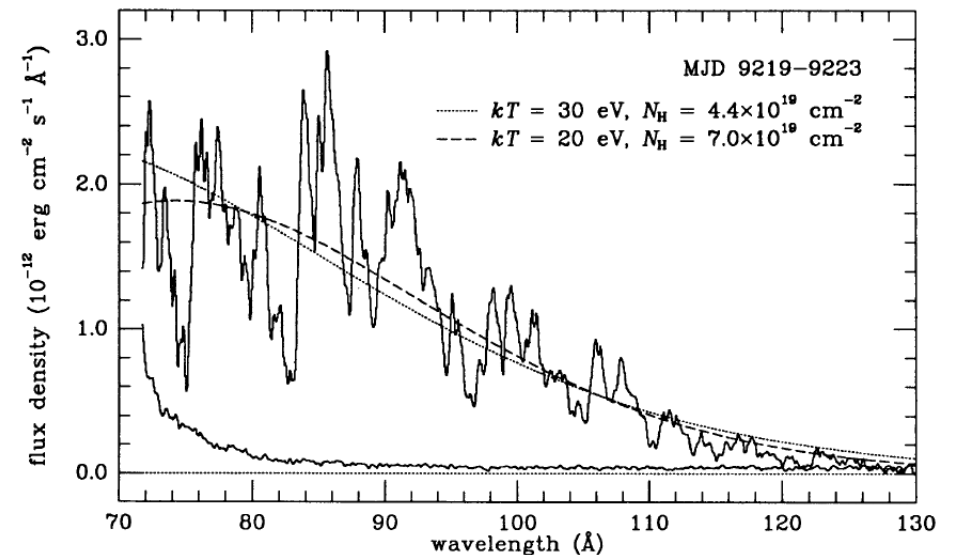
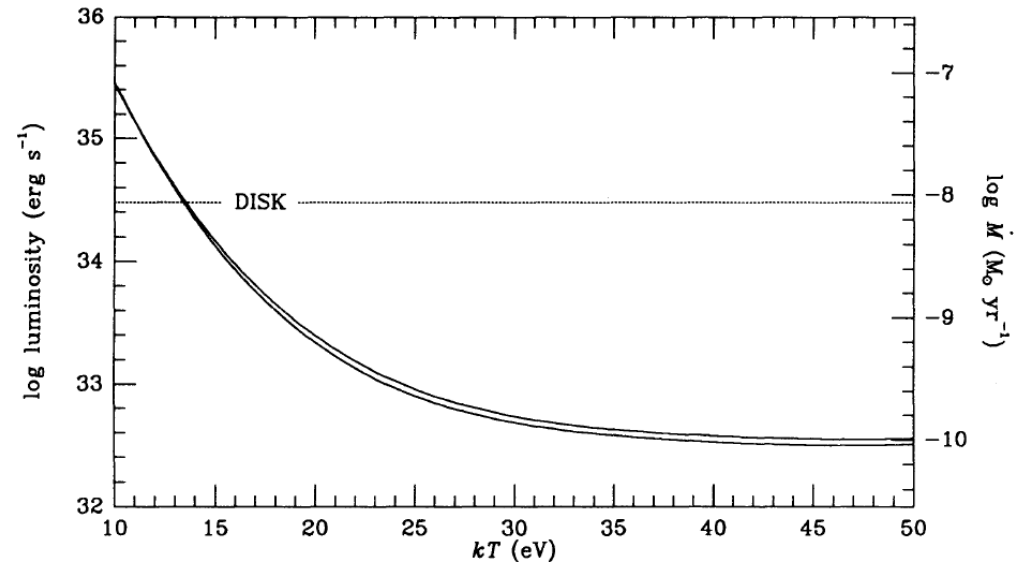
$$E_{\text{obs}} = E_{\text{lab}} \sqrt{1 - \frac{2GM_{\text{wd}}}{c^2 R_{\text{wd}}}}$$

- 白色矮星質量
 - システムの基本パラメタ
 - $\Delta E = 5 \text{ eV}$ 程度だが中心エネルギーの決定精度はその数倍は容易
 - 蝕連星以外にも適用可能
 - SS Cyg
 - $M_{\text{wd}} = 1.19 \pm 0.02 M_{\odot}$ (Friend+90)
 - $M_{\text{wd}} = 0.81 \pm 0.19 M_{\odot}$ (Bitner+83)
 - 重い白色矮星はIa型超新星の有力候補天体
 - XRISMではPV Phaseで T CrBを観測予定



境界層光度問題

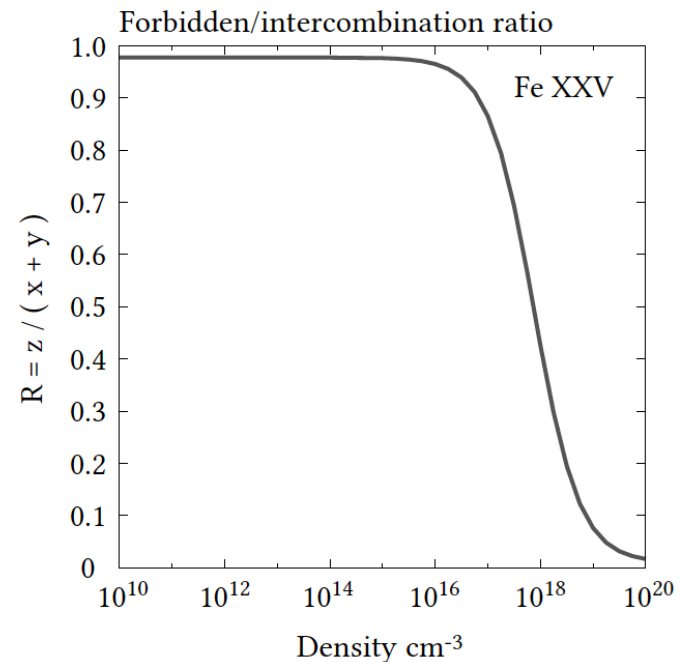
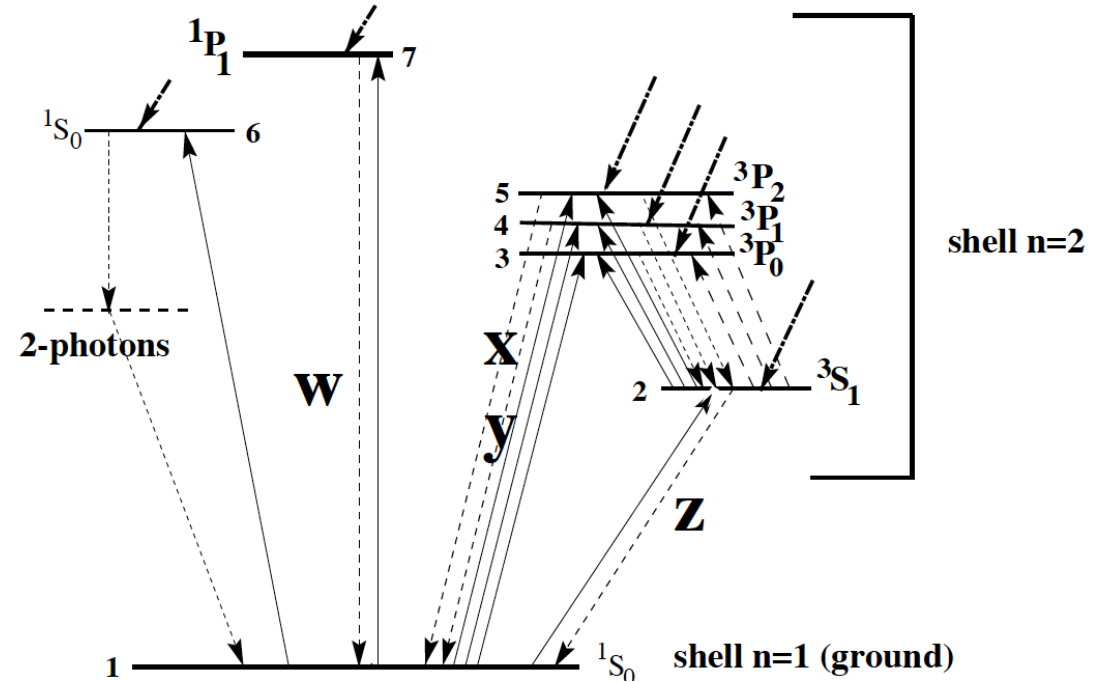
- SS Cyg のanomalous outburst (1993年8月17~23日)のEUVE衛星による観測
 - Discの光度
 - $L_{\text{bl}} = 2 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$ (スペクトルから $kT > 20 \text{ eV}$)
 - $L_{\text{bl}}/L_{\text{disc}} < 0.07$
 - $L_{\text{disc}} = 3 \times 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ (Optical-far UV)
 - 白色矮星の自転が無視できる場合、ビリアル定理から $L_{\text{bl}} = L_{\text{disc}}$
 - Disc Instability model (Last 2001)
 - 高速回転するaccretion belt
 - Huang+96, Sion+96, Cheng+97, Szcodey+98...
 - 6.4 keV輝線のエネルギー幅から白色矮星の自転速度 ω を測定できる。
 - $L_{\text{bl}} = L_{\text{disc}} [1 - (\omega/\omega_{\text{K}})^2]$, ただし ω_{K} は白色矮星表面でのbreak-up角速度



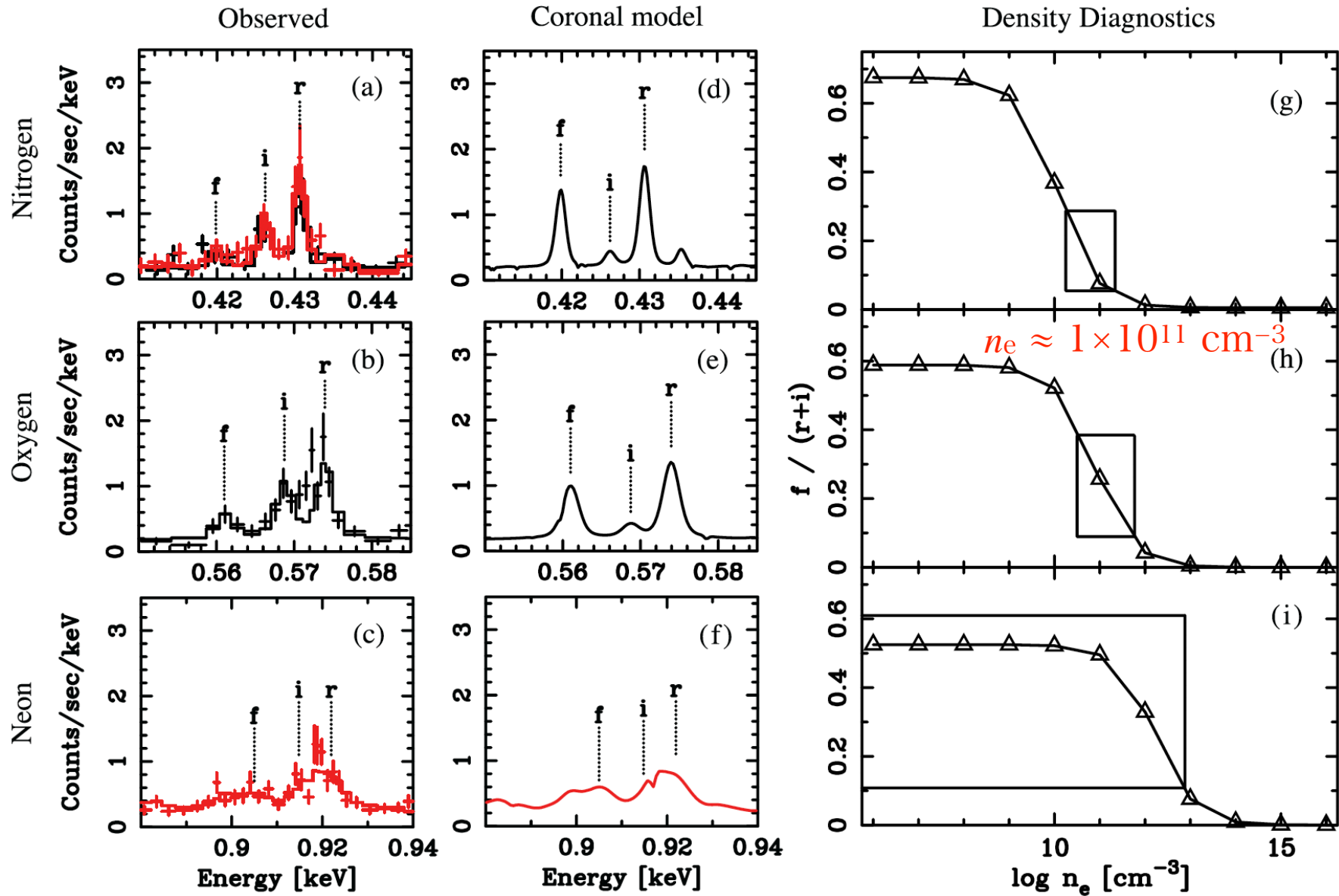
Mauche, Raymond, Mattei (1995)

プラズマの密度診断

- He-like tripletによる密度診断
 - $1s2s$ (3S_1)は寿命が長いいため、プラズマ密度が臨界値を超えると放射脱励起で $(1s)^2(^1S_0)$ に落ちる前にさらなる電子衝突で $1s2p(^3P_{2,1,0})$ に励起される。
 - z(禁制線)の強度が弱まり、その分x+y(異重項間遷移線)の強度が上がる。



AE Aquarii (1)



Itoh+06

AE Aquarii (2)

● Intermediate Polar

- $P_{\text{orb}} = 9.88 \text{ hr}$
- $P_{\text{spin}} = 33 \text{ sec}$
 - Break-up speedに近い回転速度
- $kT = 4 \text{ keV}$
 - 典型的な強磁場激変星よりも一桁低い温度
- プロペラ効果の有力候補天体

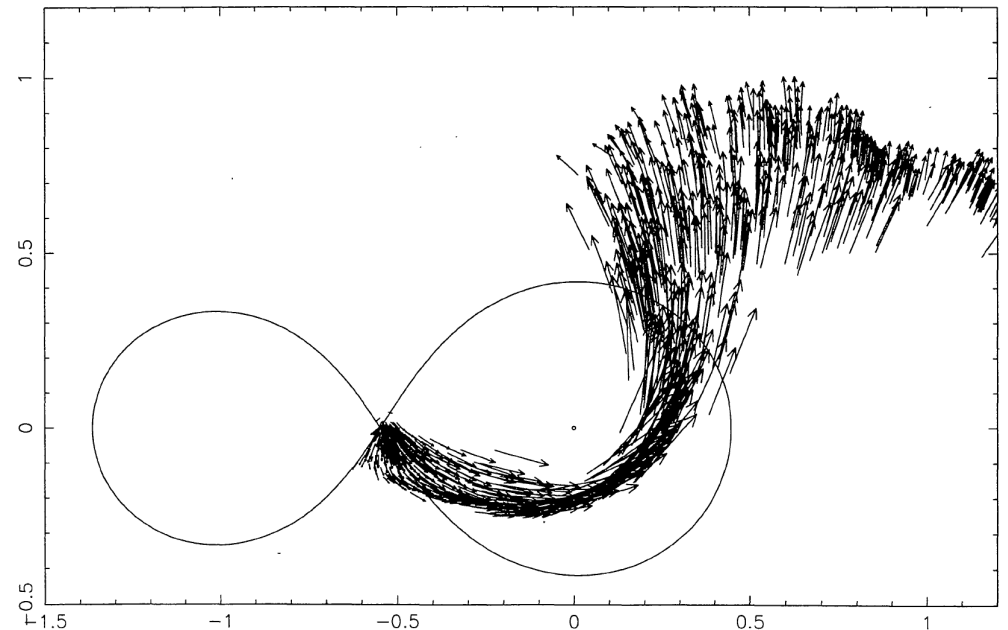
● 観測結果

- $EM = n_e^2 V \approx 1 \times 10^{53} \text{ cm}^{-3}$
- $n_e \approx 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

$$\rightarrow \ell_p \approx (EM/n_e^2)^{1/3}$$

$$= (2-3) \times 10^{10} \text{ cm} \gg R_{\text{wd}}$$

- 白色矮星まで落ちていない。
 - XRISMで軌道周期に連動したプラズマ輝線のDopplerが見えれば解決。



Wynn & King (1997)

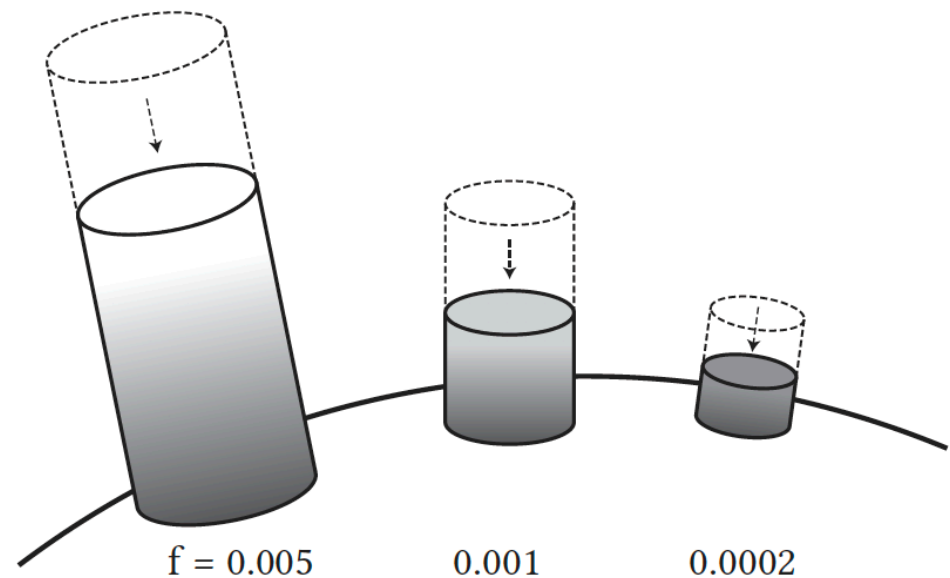
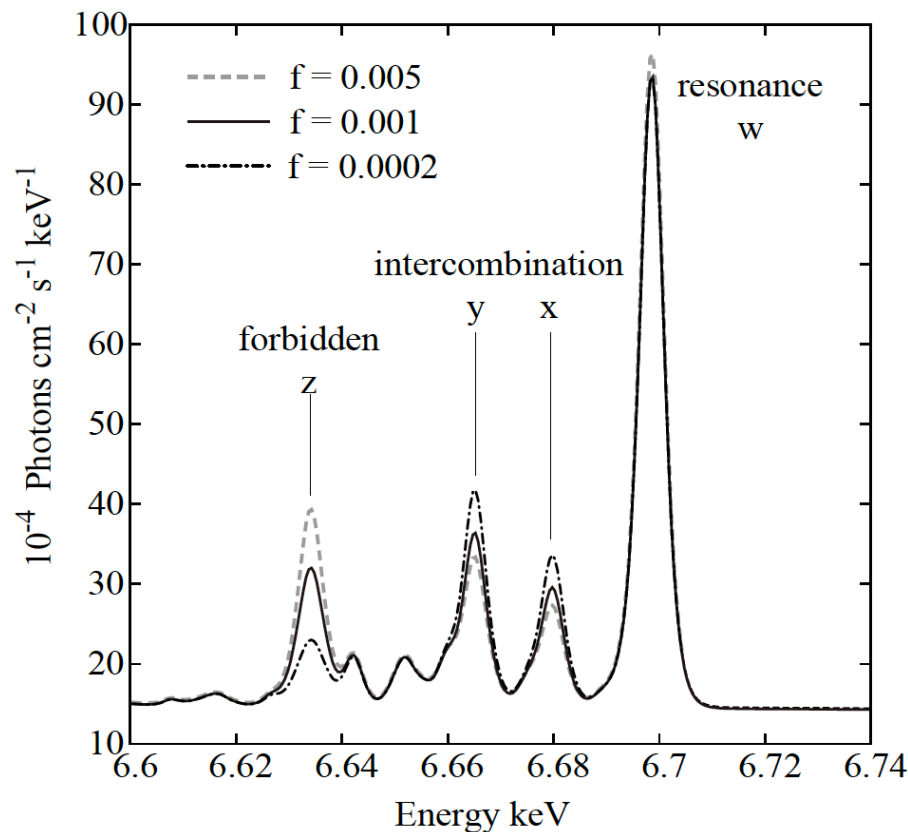
強磁場激変星Post-shock regionの密度診断

● The intermediate Polar V1223 Sgr

- $M_{\text{wd}} = 0.79M_{\odot}$ (Yuasa+08)
- 質量降着率 = $8.4 \times 10^{16} \text{ g s}^{-1}$ (Hayashi+11)
- 密度がわかると放射領域の形状が解ける。

Result	f		
	0.0002	0.001	0.005
$h_s \text{ cm}$	2.52×10^5	1.25×10^6	6.14×10^6
$kT_s \text{ keV}$	35.7	35.7	35.4
$\rho_s \text{ cm}^{-3}$	5.42×10^{17}	1.08×10^{17}	2.18×10^{16}
$v_s \text{ cm s}^{-1}$	1.36×10^8	1.36×10^8	1.36×10^8

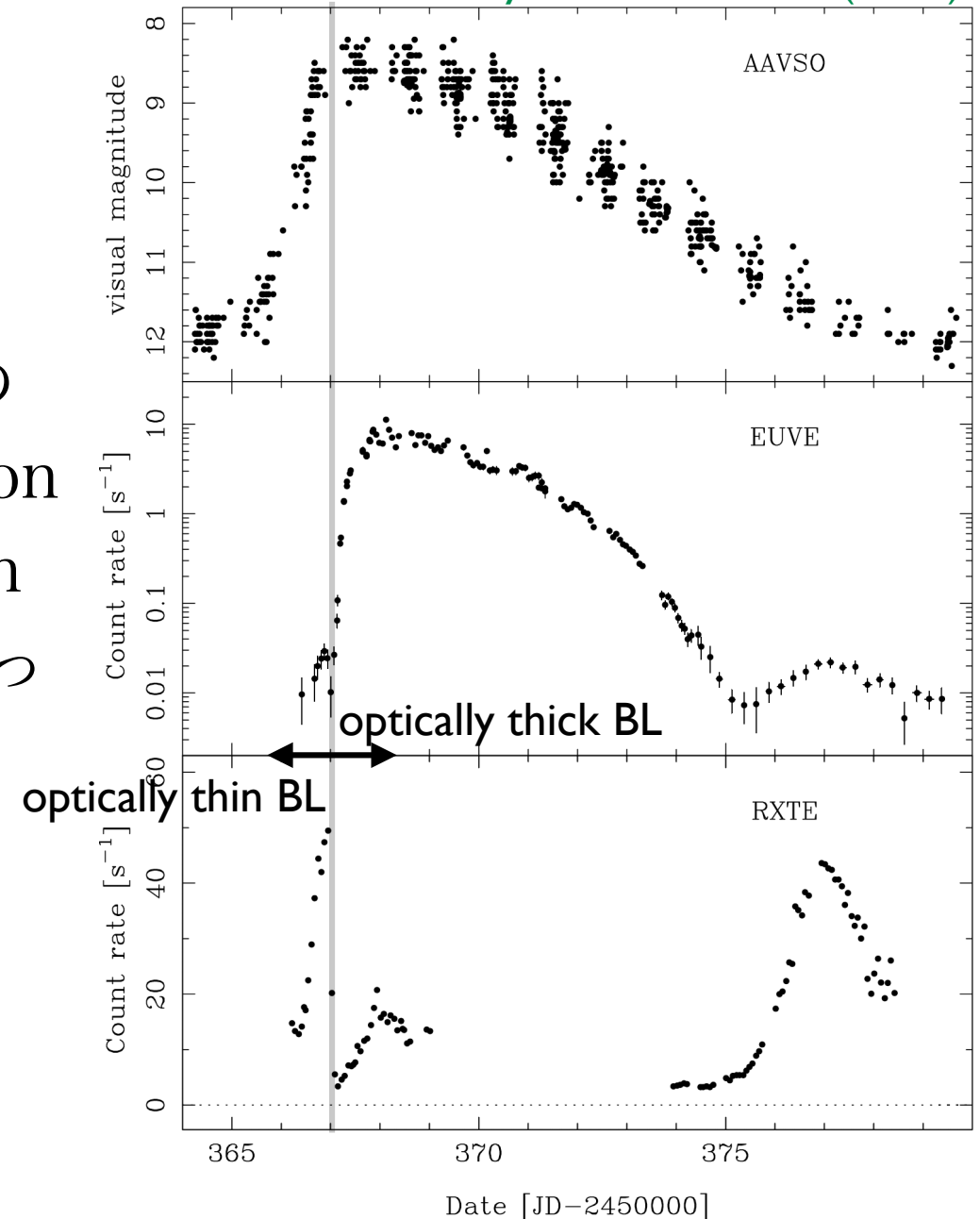
* h_s , kT_s , ρ_s , and v_s are shock height measured from the WD surface, plasma temperature, density, and falling velocity directly below the shock.



矮新星爆発時のCoronaのgeometry (1)

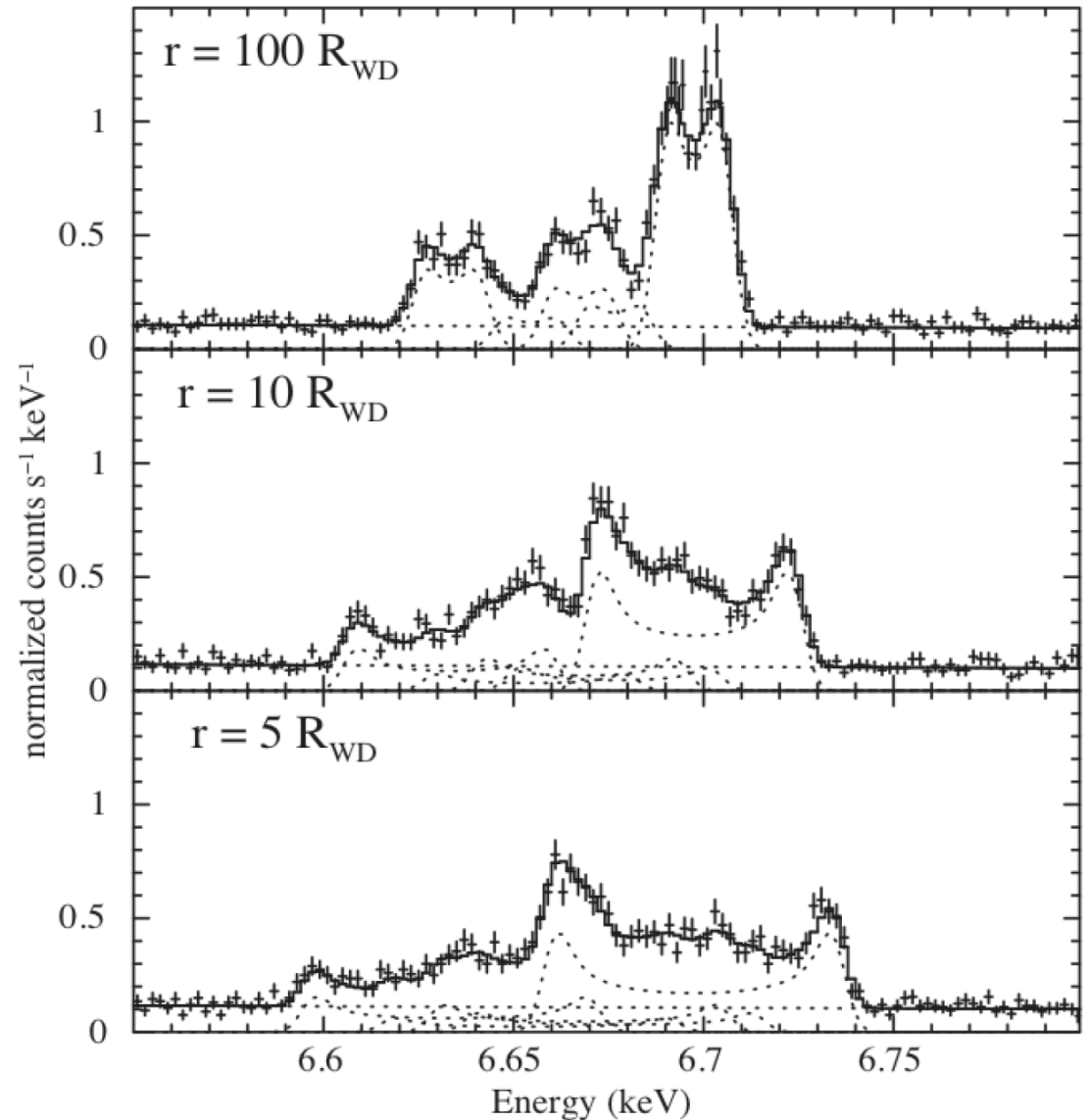
Wheatley, Mauche, Mattei (2003)

- 可視光の爆発時 (Outburst)
- 光学的に厚い境界層: EUV放射
- SS Cygの多波長観測で境界層の optically-thin to thick transition が捉えられているが、transition 後でも硬X線放射はゼロにはなっていない。
- 硬X線はdisc coronaから放射されていると考えられる。



矮新星爆発時のCoronaのgeometry (2)

- コロナの存在する領域
 - 「すぎく」のスペクトル解析から $R < 1.2 R_{\text{WD}}$ (Takeo+21b)
- XRISM Resolveの観測
 - コロナの存在する最内縁の半径に迫ることができると期待。



— まとめ —

● X線天文衛星XRISM

● 衛星の諸元

● 観測機器

- Resolve (X線カロリメータ)
- Xtend (X線CCDカメラ)

● 激変星からのX線放射

● 最高温度 >10 keVのcooling (multi-temperature) plasmaからの放射

● XRISMによる激変星のサイエンス

● 6.4keV輝線による物理

- 重力ポテンシャルの測定による白色矮星質量の測定
- 境界層光度問題
 - 6.4 keV輝線のエネルギー幅から白色矮星の自転速度を測ることで解決

● プラズマの密度診断

- 強磁場激変星のpost-shock accretion columnの幾何学の理解

● 矮新星爆発時のコロナのgeometry

- コロナが立っている最内縁の半径を推定できる。