

X線による矮新星GK Perseiの 増光期と静穏期の観測

和田 有希

(東京大学大学院 理学系研究科/理化学研究所 仁科加速器研究センター)

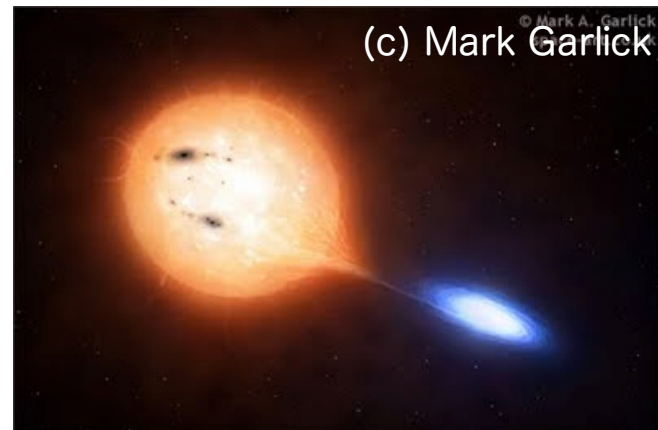
湯浅 孝行, 中澤 知洋¹, 牧島 一夫², 林 多佳由^{3, 4}, 石田 学⁵

1: 東大理 2: 理化学研究所 3: GSFC/NASA 4: 名大理, 5: ISAS/JAXA

Wada et al. submitted

激変星について

- 白色矮星 (WD) と恒星 (低質量) との連星系
- 恒星から白色矮星に向けて降着する
- 激変星はIa型超新星の親星候補 (SD説)
 - > 激変星のWD質量分布が重要



© Mark A. Garlick
(c) Mark Garlick

磁場の強さ

古典新星・回帰新星
(ガスの核融合)

矮新星
(円盤の不定性による降着量の変化)

そのほかの弱磁場連星系

Intermediate
Polar

降着円盤と
降着柱を形成

Polar

降着柱を形成

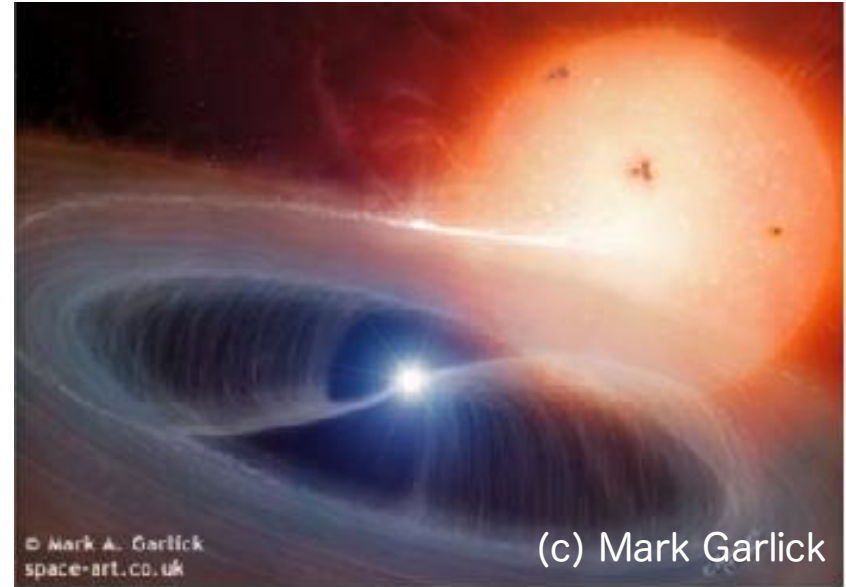
X線観測による白色矮星質量の推定

Intermediate Polar (IP)

- 主系列星と白色矮星 (WD) の連星系 (激変星の一種)
- WDは強磁場を持つ ($B \sim 10^{5-6}$ G).
- 降着ガスは円盤と降着柱を形成

降着柱の物理

- 降着ガスは衝撃波により加熱
- 衝撃波温度 $T_s =$ 重力ポテンシャル



$$T_s \propto M_{WD}/R_{WD} \quad \& \quad M_{WD}-R_{WD} \text{ 関係} \quad \Rightarrow \text{WD質量の推定}$$

(Aizu 1973) (Nauenberg 1972)

(e.g. Ishida 1990, Fujimoto+1997, Suleimanov+2005, Yuasa+2010)

X線による質量推定手法の利点

- X線スペクトルの解析から直接に質量を推定できる
- 軌道傾斜角がわかっていない系でも精度がよい

X線観測による白色矮星質量の推定

Intermediate Polar (IP)

- 主系列星と白色矮星 (WD) の連星系 (激変星の一種)
- WDは強磁場を持つ ($B \sim 10^{5-6}$ G).
- 降着ガスは円盤と降着柱を形成

降着柱の物理

- 降着ガスは衝撃波により加熱
- 衝撃波温度 $T_s =$ 重力ポテンシャル

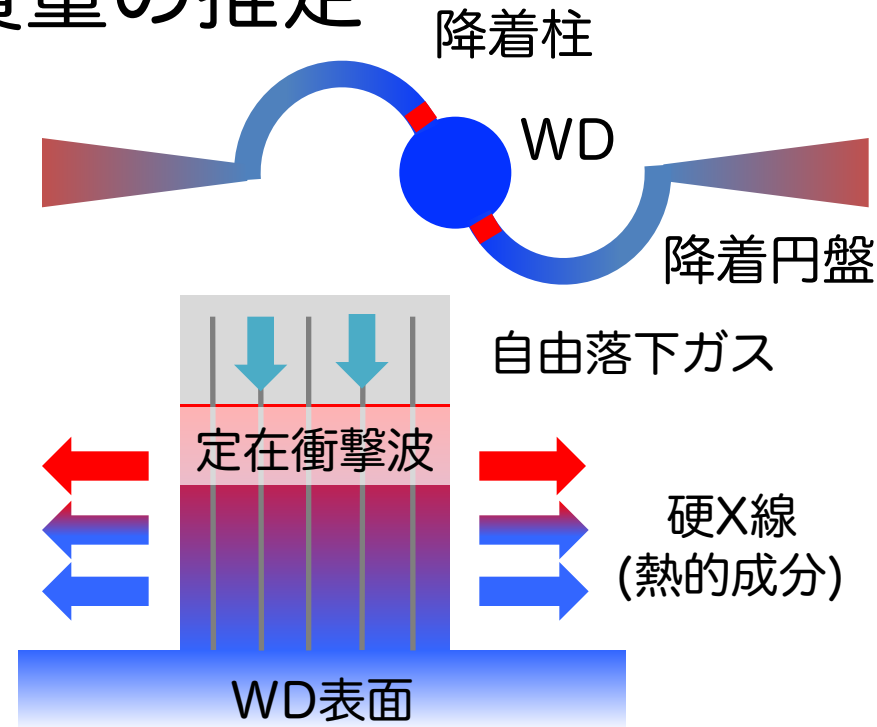
$$T_s \propto M_{WD}/R_{WD} \quad \& \quad M_{WD}-R_{WD} \text{ 関係} \quad \Rightarrow \text{WD質量の推定}$$

(Aizu 1973) (Nauenberg 1972)

(e.g. Ishida 1990, Fujimoto+1997, Suleimanov+2005, Yuasa+2010)

X線による質量推定手法の利点

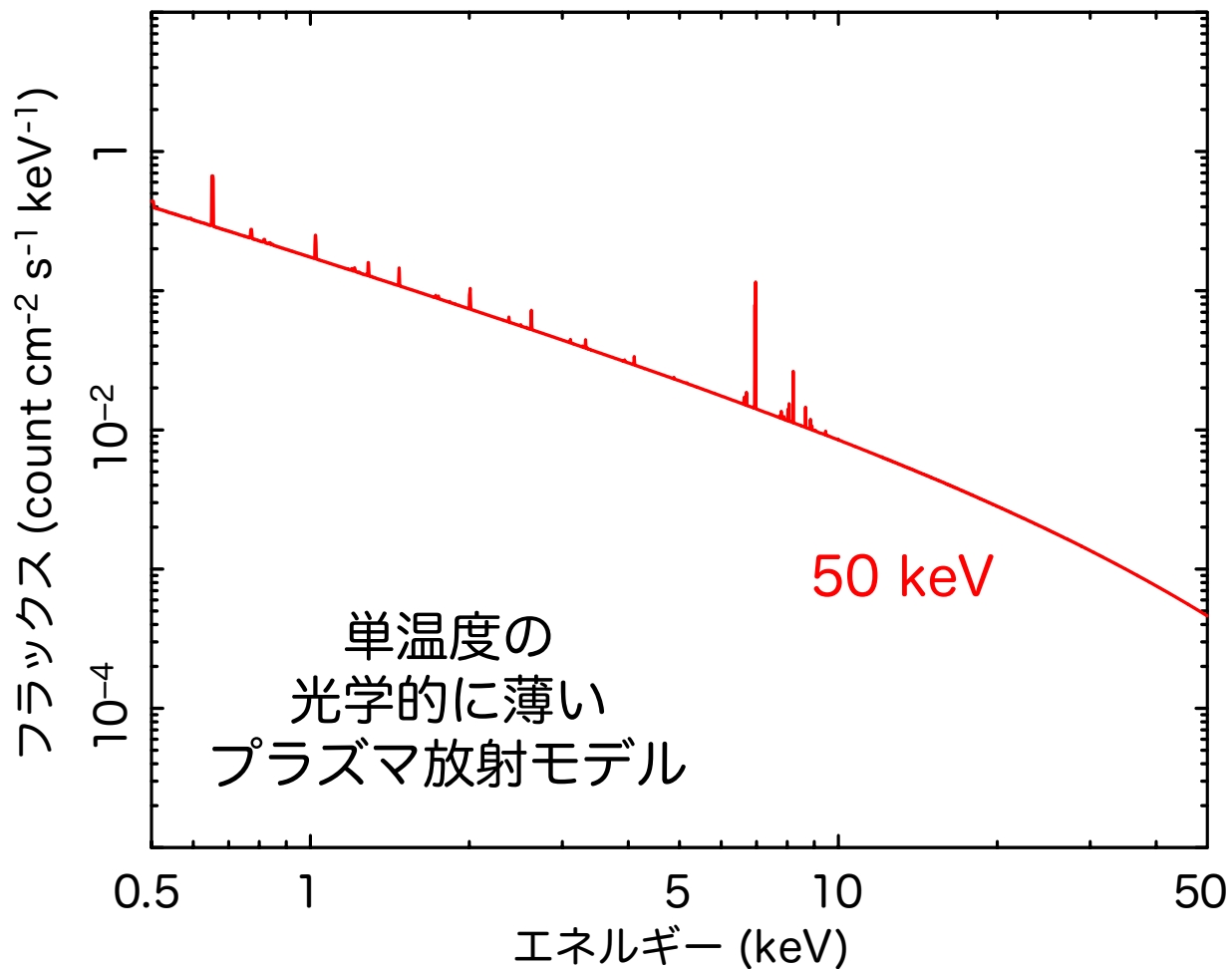
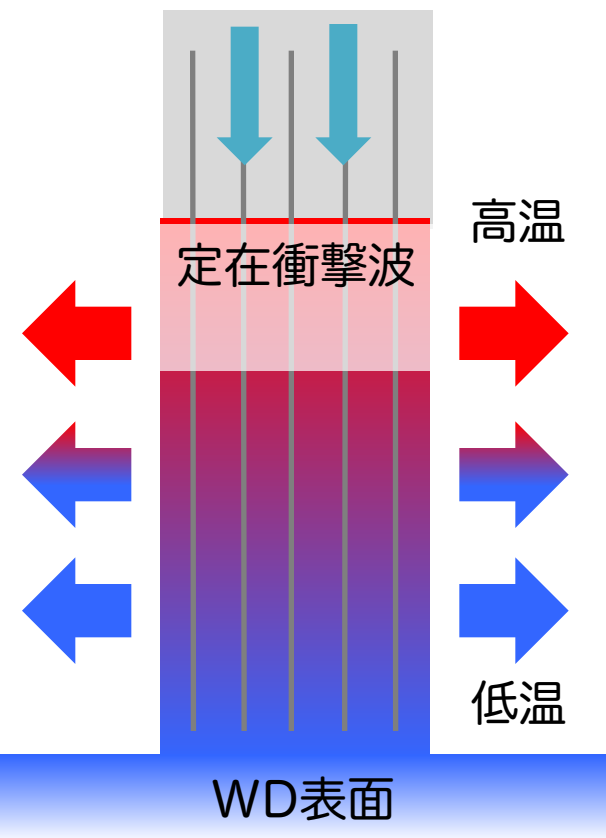
- X線スペクトルの解析から直接に質量を推定できる
- 軌道傾斜角がわかっていない系でも精度がよい



多温度モデルによる衝撃波温度の推定

多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (Done & Osborne 1997)

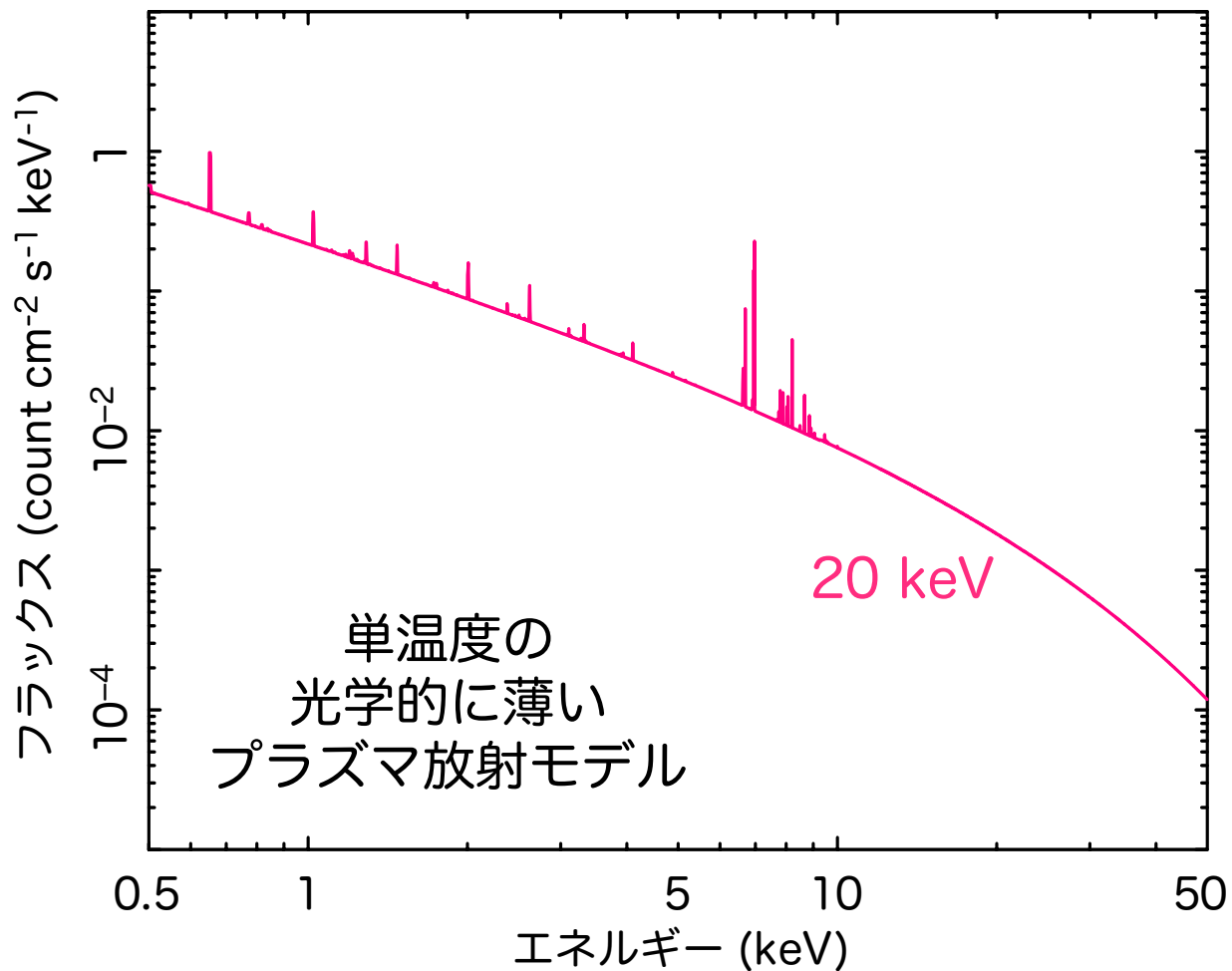
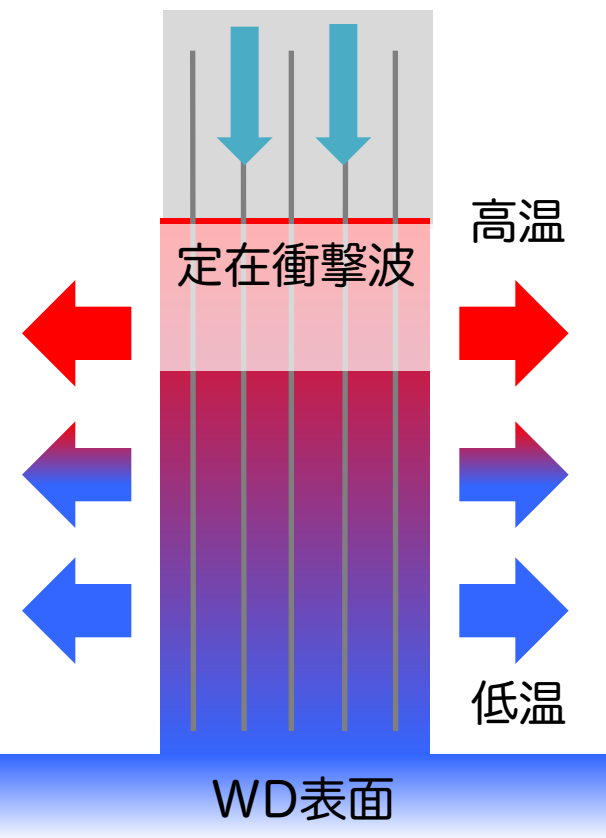
- 単温度のプラズマ放射モデルを温度で積分
- 熱的制動放射による連続成分と電離した元素からの輝線成分



多温度モデルによる衝撃波温度の推定

多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (Done & Osborne 1997)

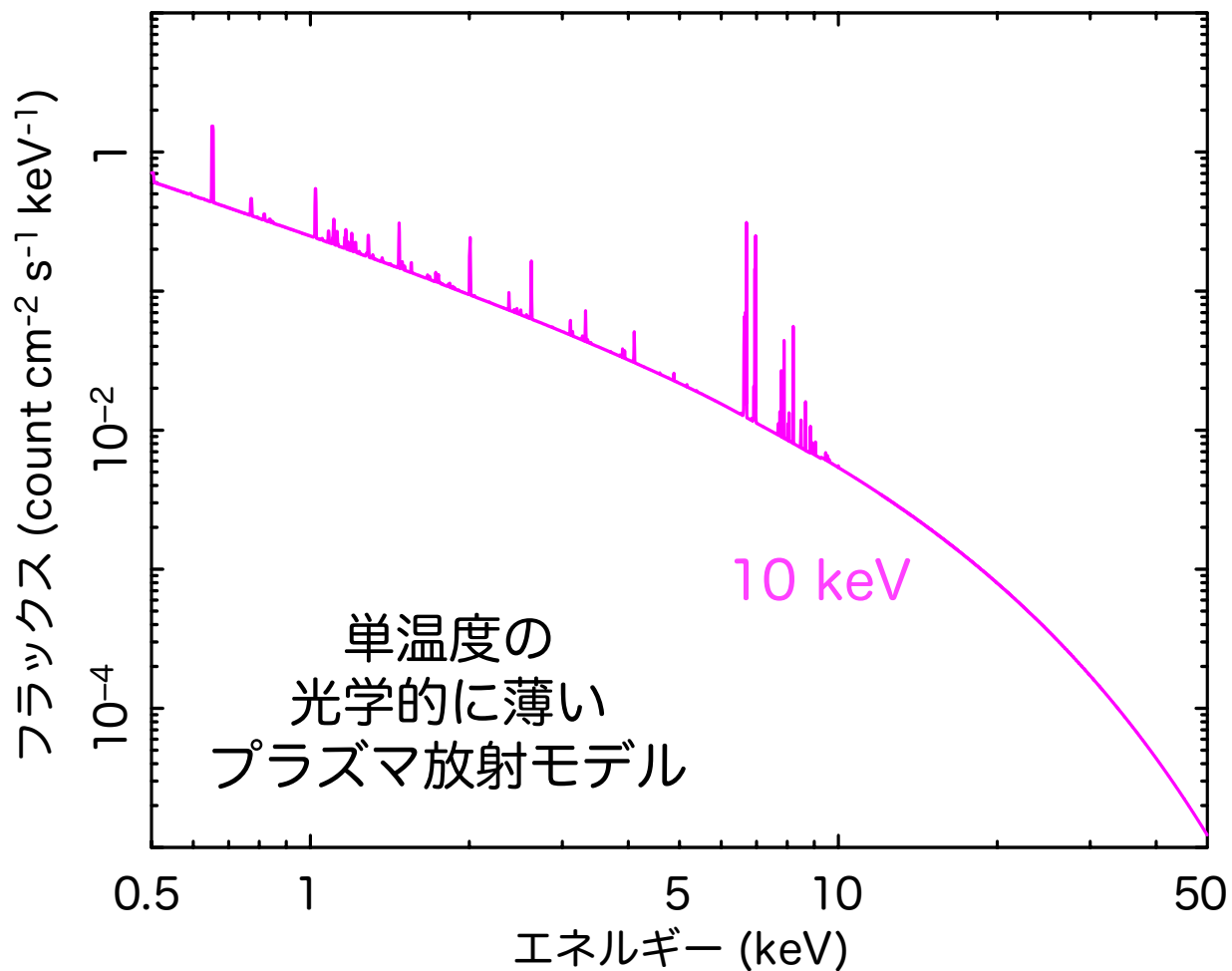
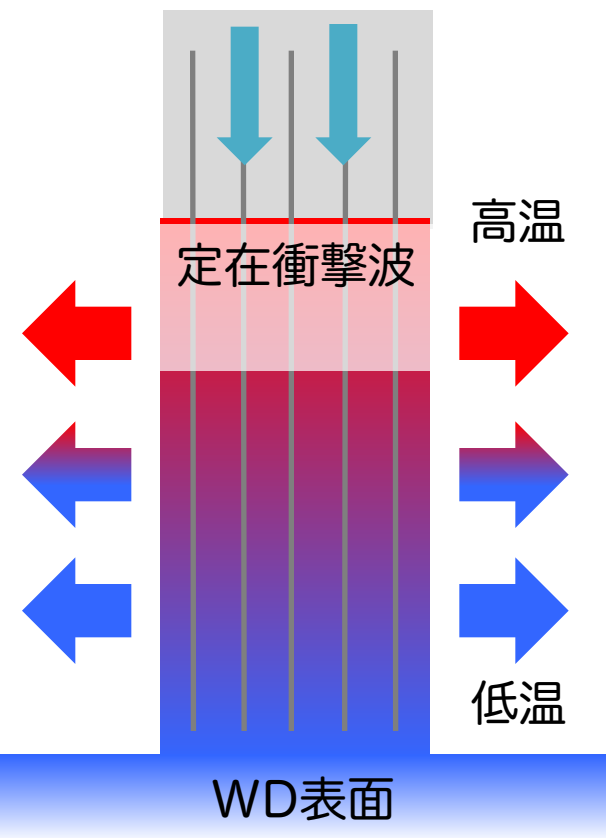
- 単温度のプラズマ放射モデルを温度で積分
- 熱的制動放射による連続成分と電離した元素からの輝線成分



多温度モデルによる衝撃波温度の推定

多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (Done & Osborne 1997)

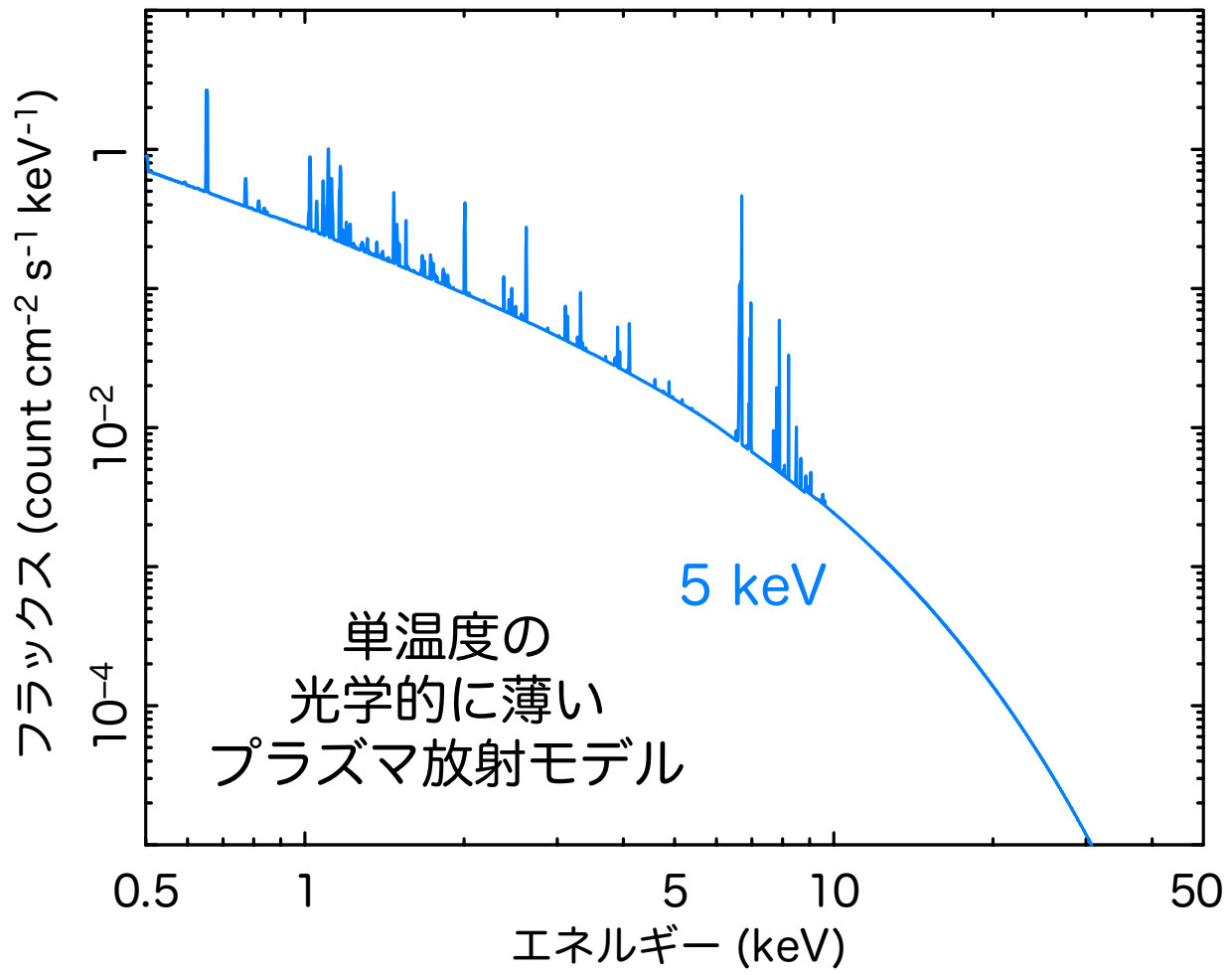
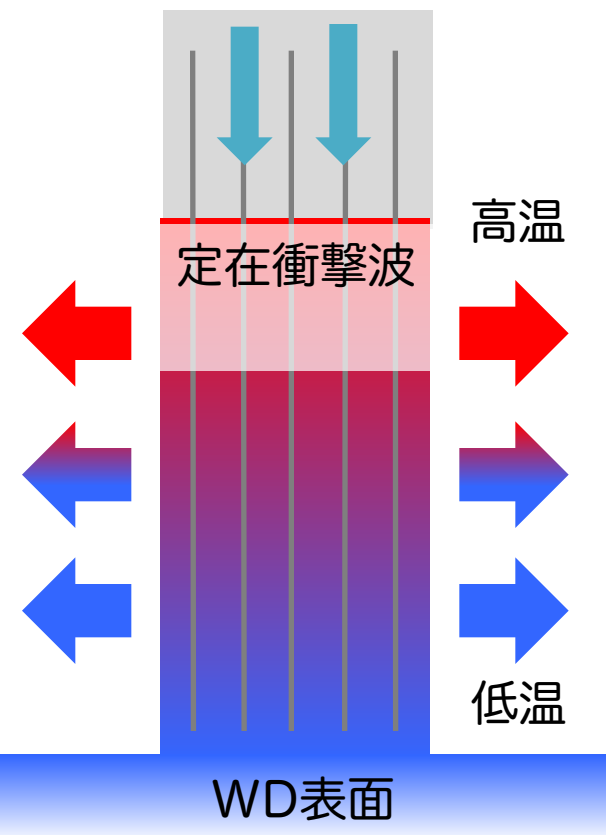
- 単温度のプラズマ放射モデルを温度で積分
- 熱的制動放射による連続成分と電離した元素からの輝線成分



多温度モデルによる衝撃波温度の推定

多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (Done & Osborne 1997)

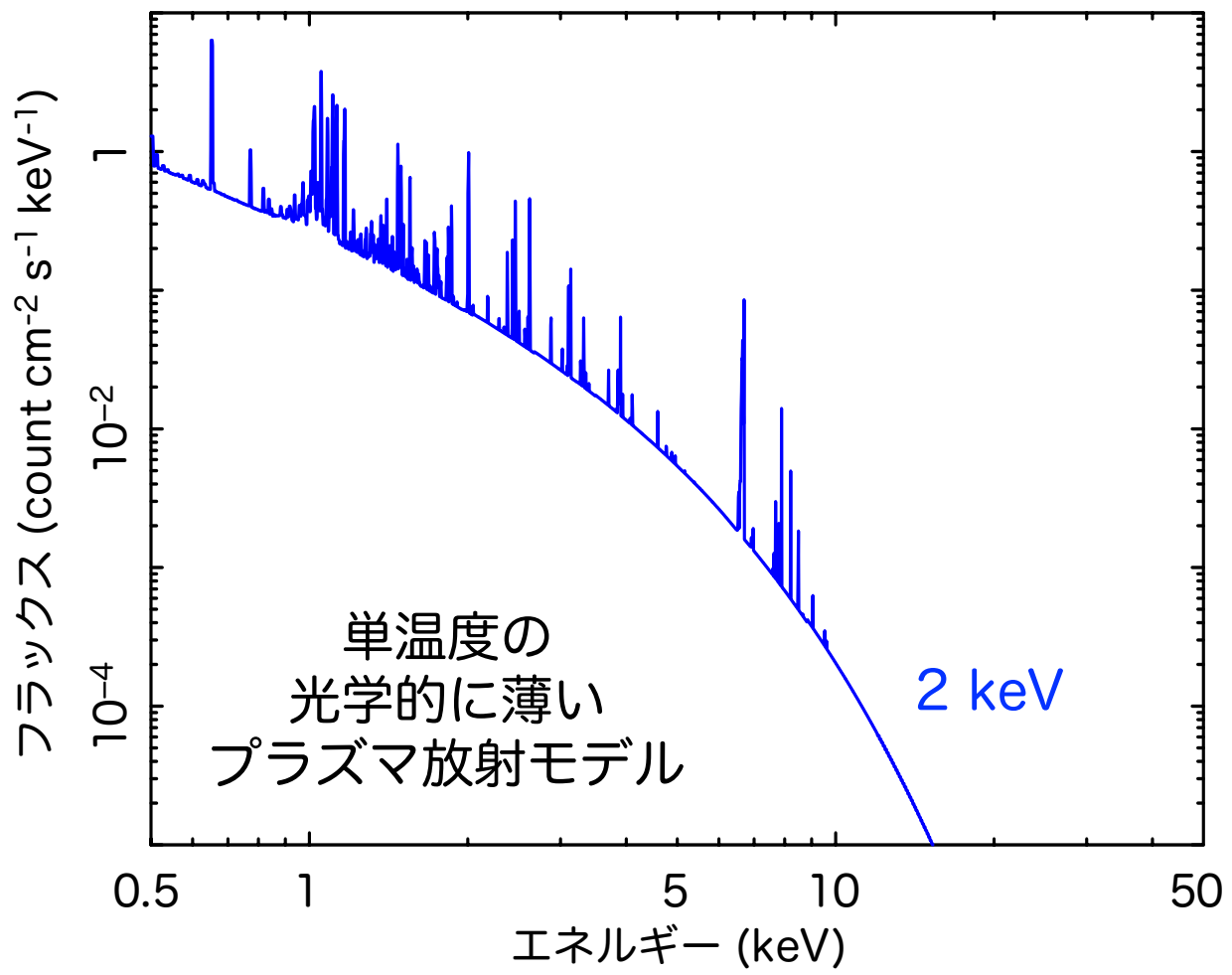
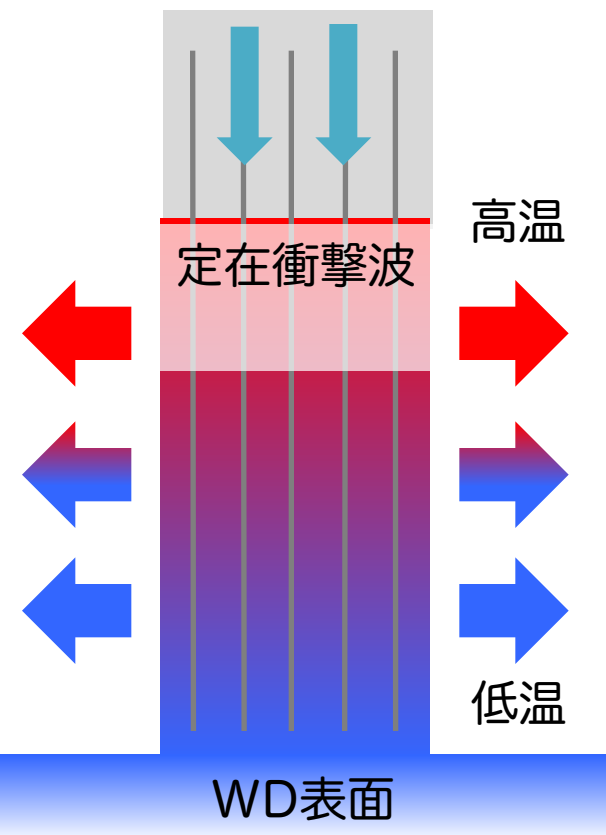
- 単温度のプラズマ放射モデルを温度で積分
- 熱的制動放射による連続成分と電離した元素からの輝線成分



多温度モデルによる衝撃波温度の推定

多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (Done & Osborne 1997)

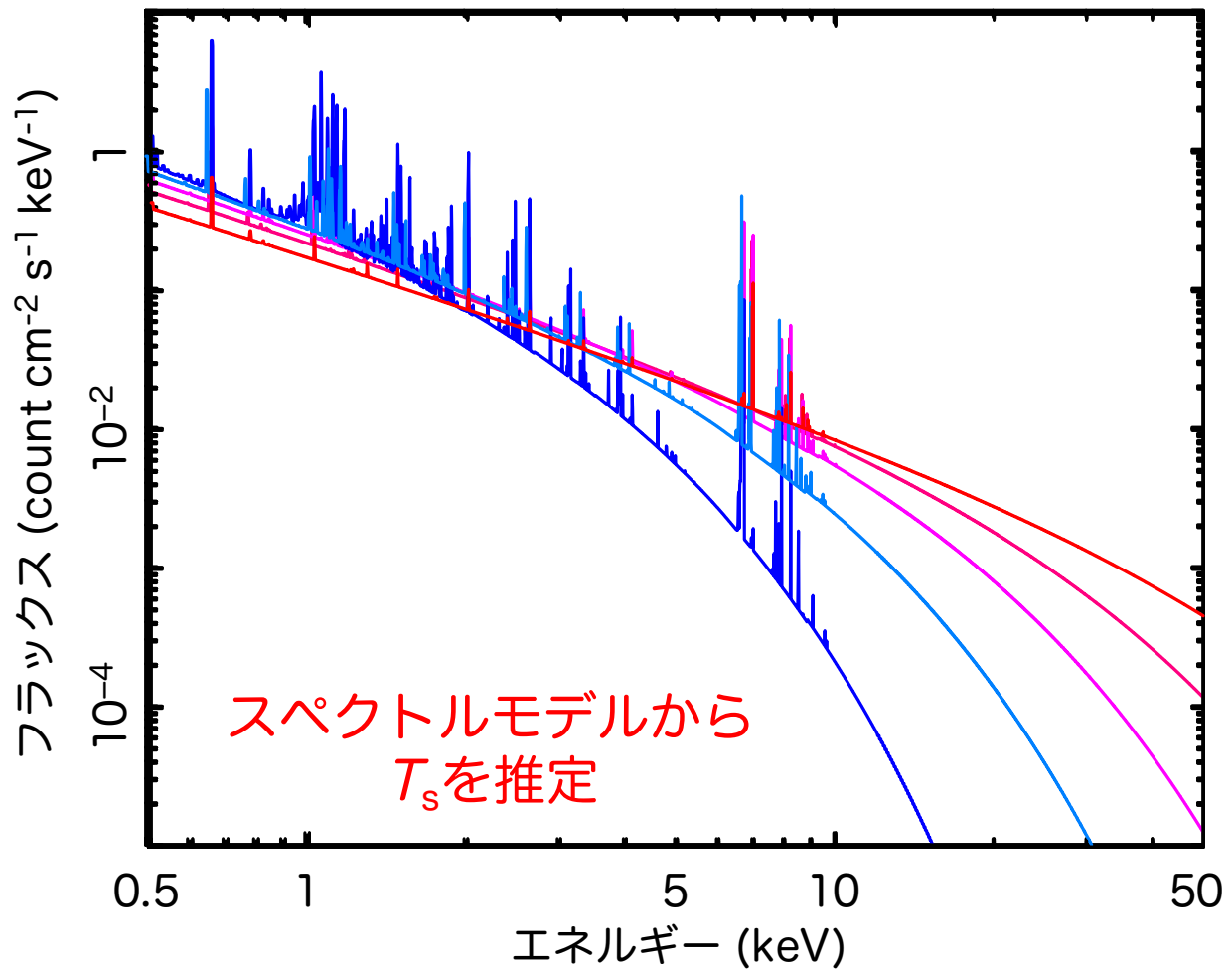
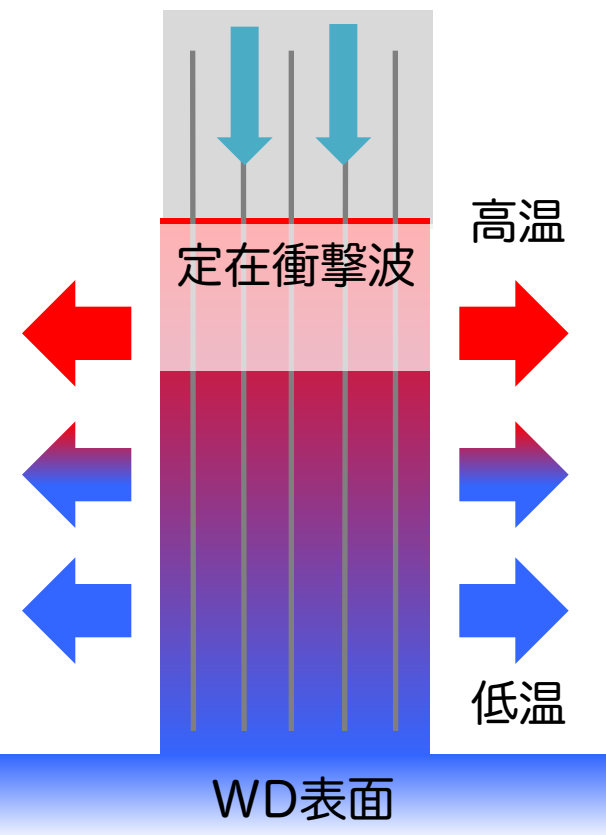
- 単温度のプラズマ放射モデルを温度で積分
- 熱的制動放射による連続成分と電離した元素からの輝線成分



多温度モデルによる衝撃波温度の推定

多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデル (Done & Osborne 1997)

- 単温度のプラズマ放射モデルを温度で積分
- 熱的制動放射による連続成分と電離した元素からの輝線成分



本研究の目的

質量推定手法の課題

- ガスは無遠からの自由落下を仮定
- 円盤の内縁半径 (R_{in}) が小さい場合は重力ポテンシャルを過小評価 (Ezuka & Ishida 1999, Suleimanov+2005)

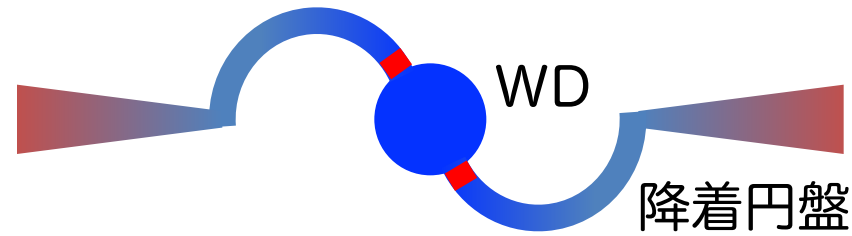
質量推定手法を R_{in} を取り込んで改良する

R_{in} を決定する物理

- 磁気圧と降着円盤のガス圧で決まる (Ghosh & Lamb 1979)
- 質量降着率の変化が大きい系では R_{in} も大きく変化 ($R_{in} \propto \dot{M}^{-2/7} B^{4/7}$)
ex) 120倍の質量降着率増加で R_{in} は0.25倍

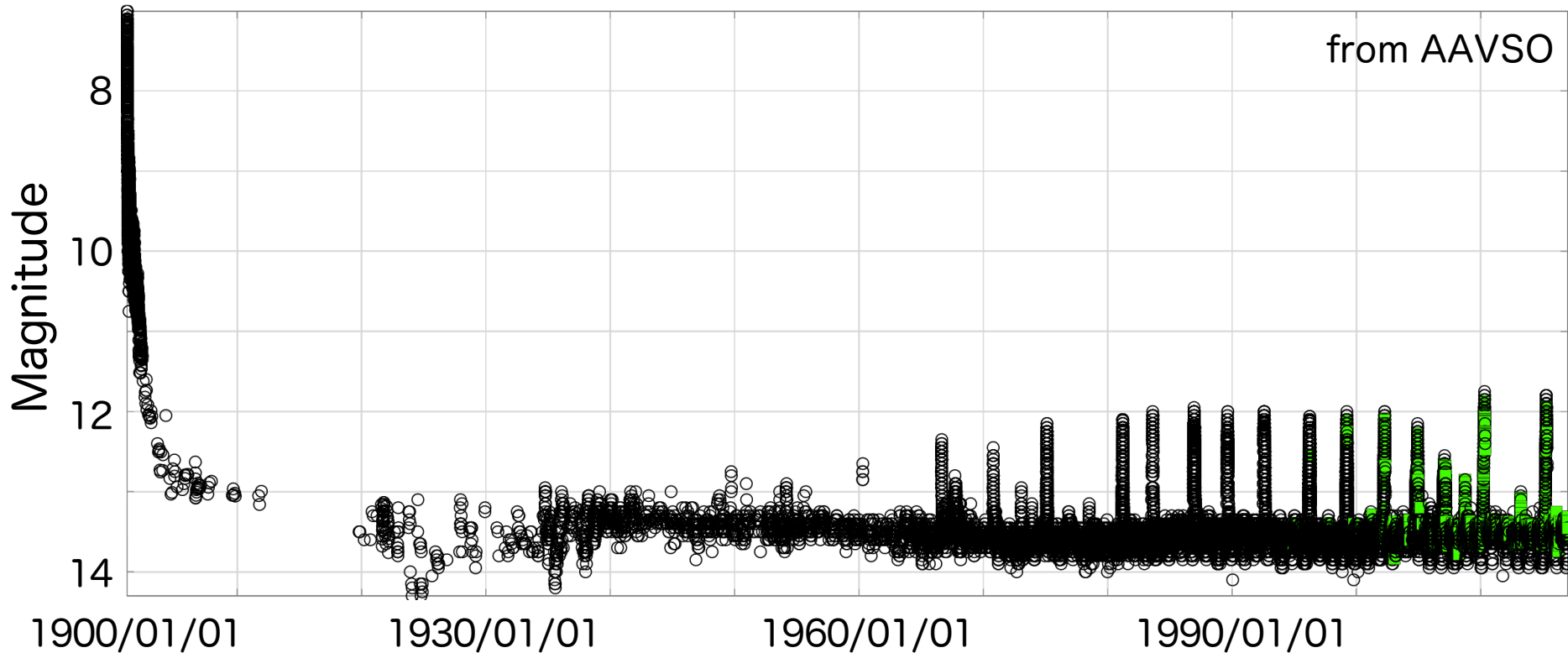
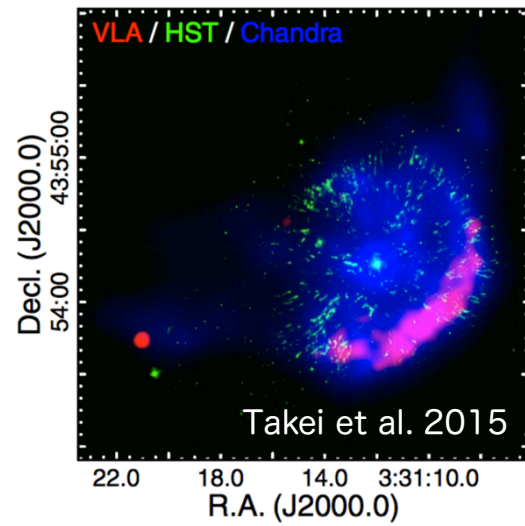
観測天体：GK Persei

- 2-3年おきに矮新星outburstを起こす
 - > 降着円盤の不安定性により質量降着率が増大
- GK PerseiはIPの中で矮新星outburstを起こす特異な例
- R_{in} が小さいため、可視光とX線での M_{WD} が矛盾
- **outburstとquiescenceの R_{in} の比から M_{WD} を推定する手法を開発・適用**



GK Perseiの性質

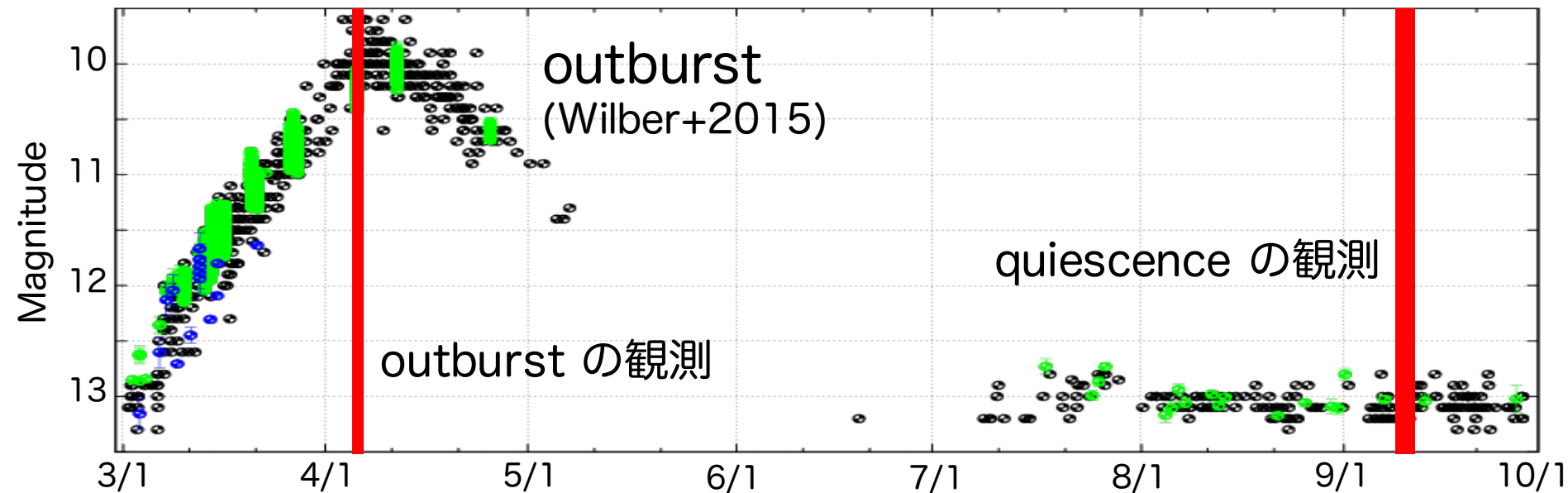
- 1901年に古典新星爆発 -> 新星残骸がX線で観測
- 1960年代から矮新星爆発が観測される (2~3年に1度)
- 1985年にX線で自転に伴うパルスを発見
 - > 白色矮星が強磁場をもつことが判明



NuSTARによる2つの観測

可視光ライトカーブ (2015年3月 - 9月)

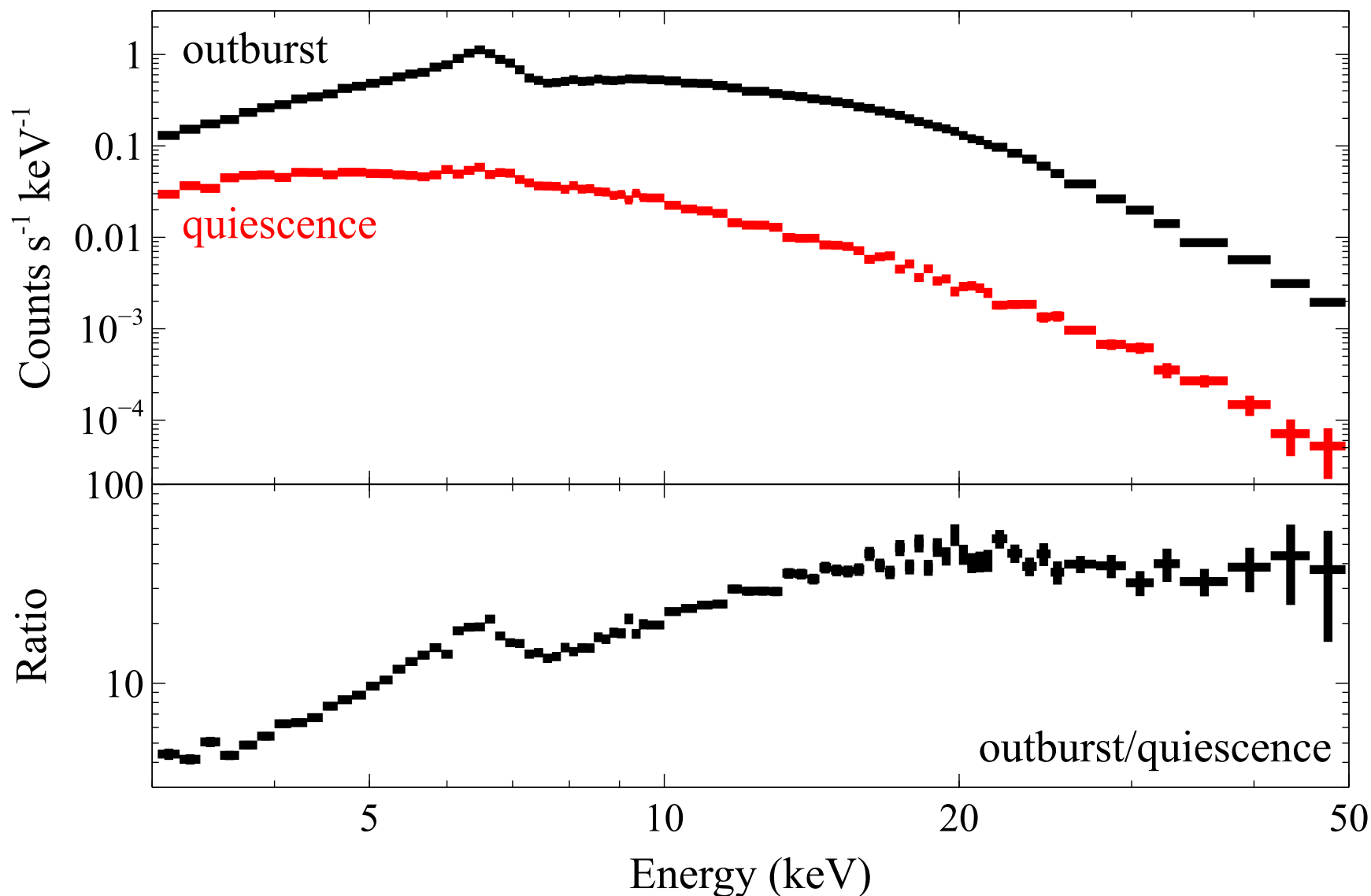
from AAVSO



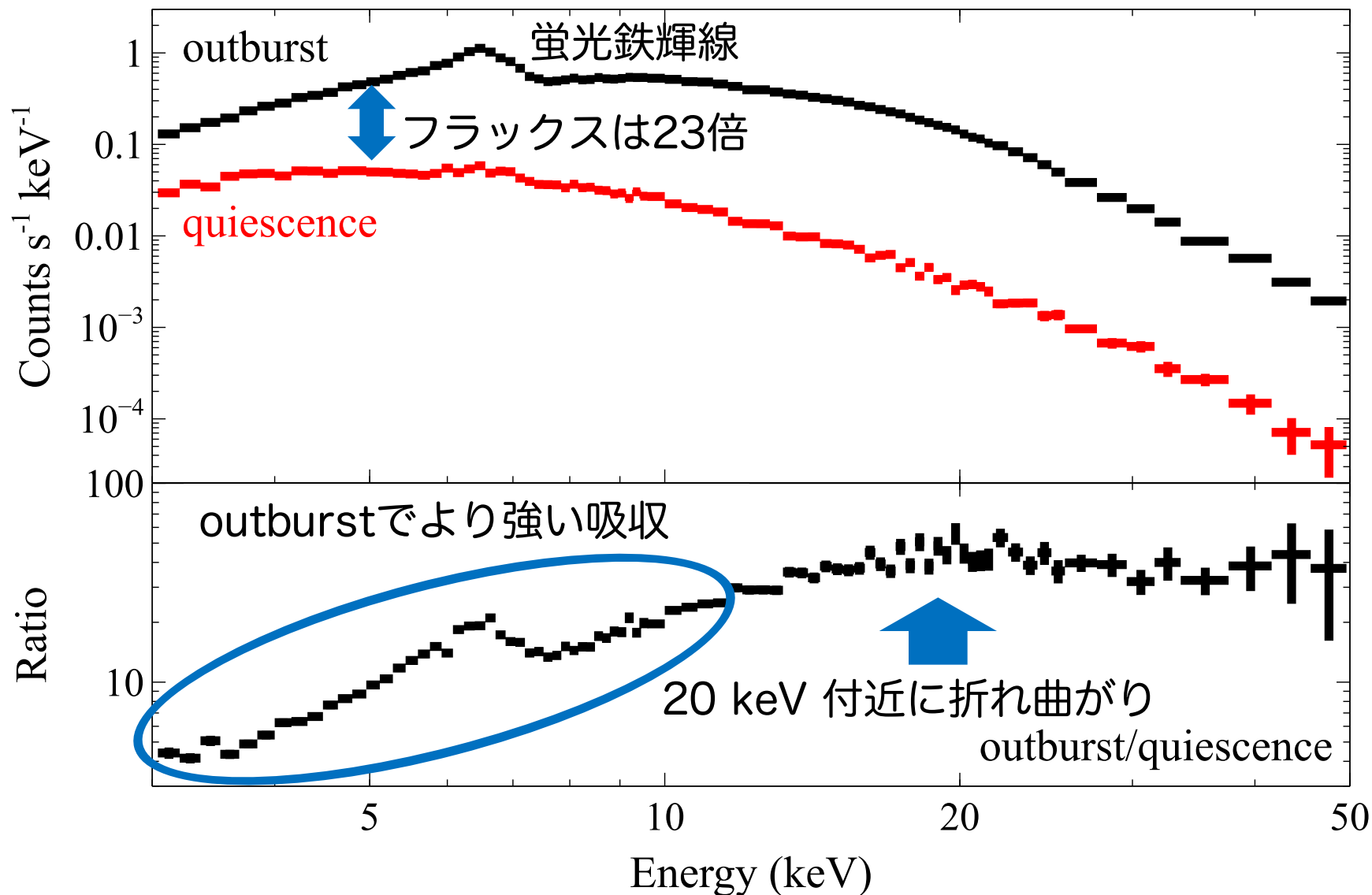
NuSTAR による観測 (3-79 keV: T_s の決定精度に優れる)

	観測開始日	観測時間	種別
outburst	2015-04-04	42 ksec	ToO (Zemko+2016)
quiescence	2015-09-09	72 ksec	PI: 湯浅

解析結果：エネルギースペクトルの比較

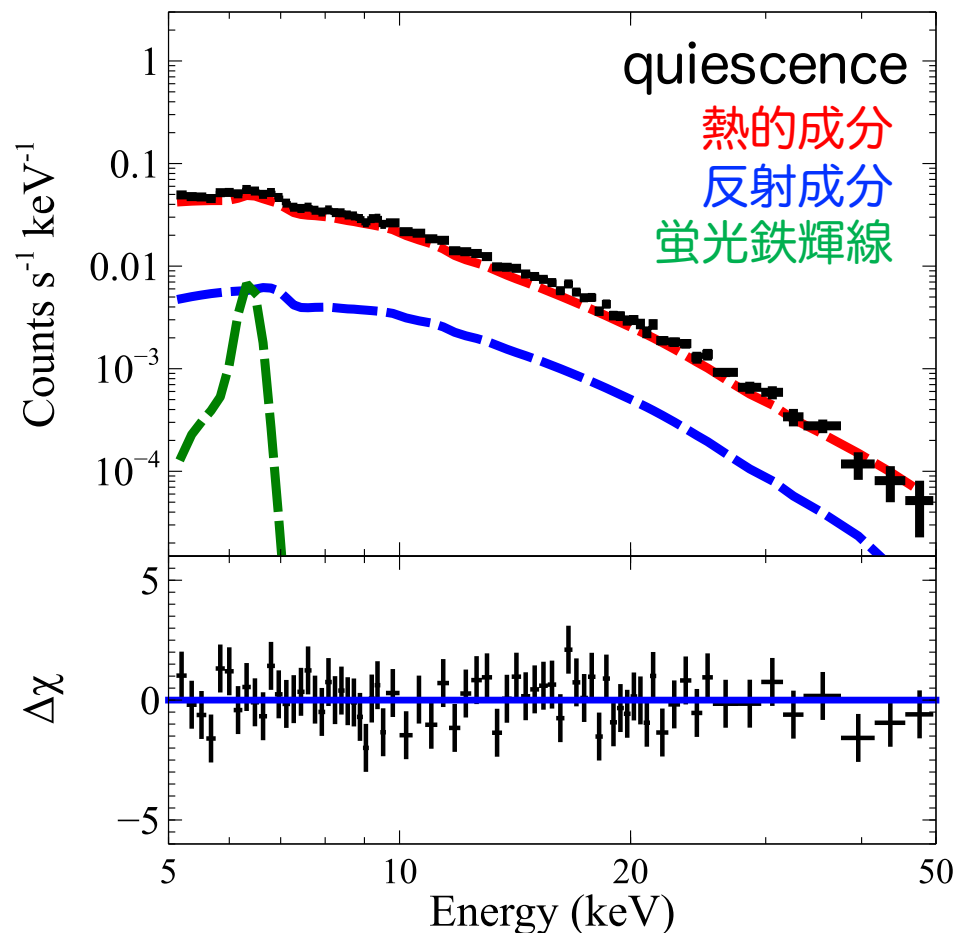
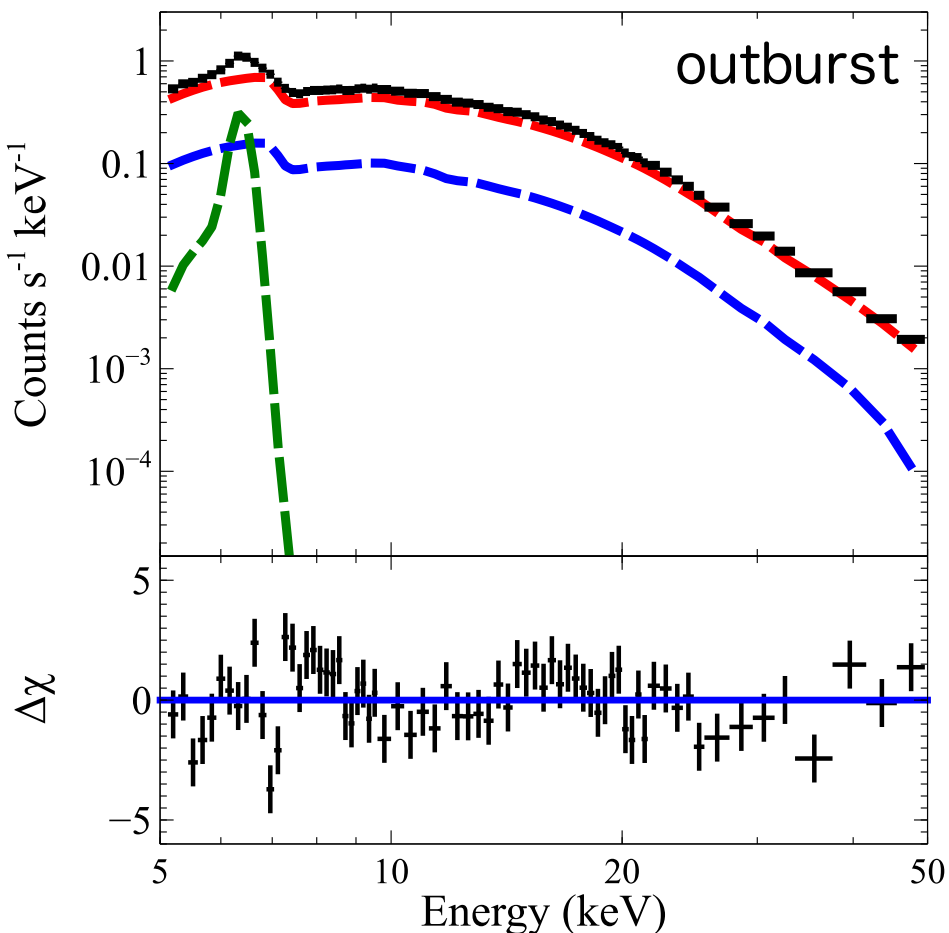


解析結果：エネルギースペクトルの比較



解析結果：モデルフィット

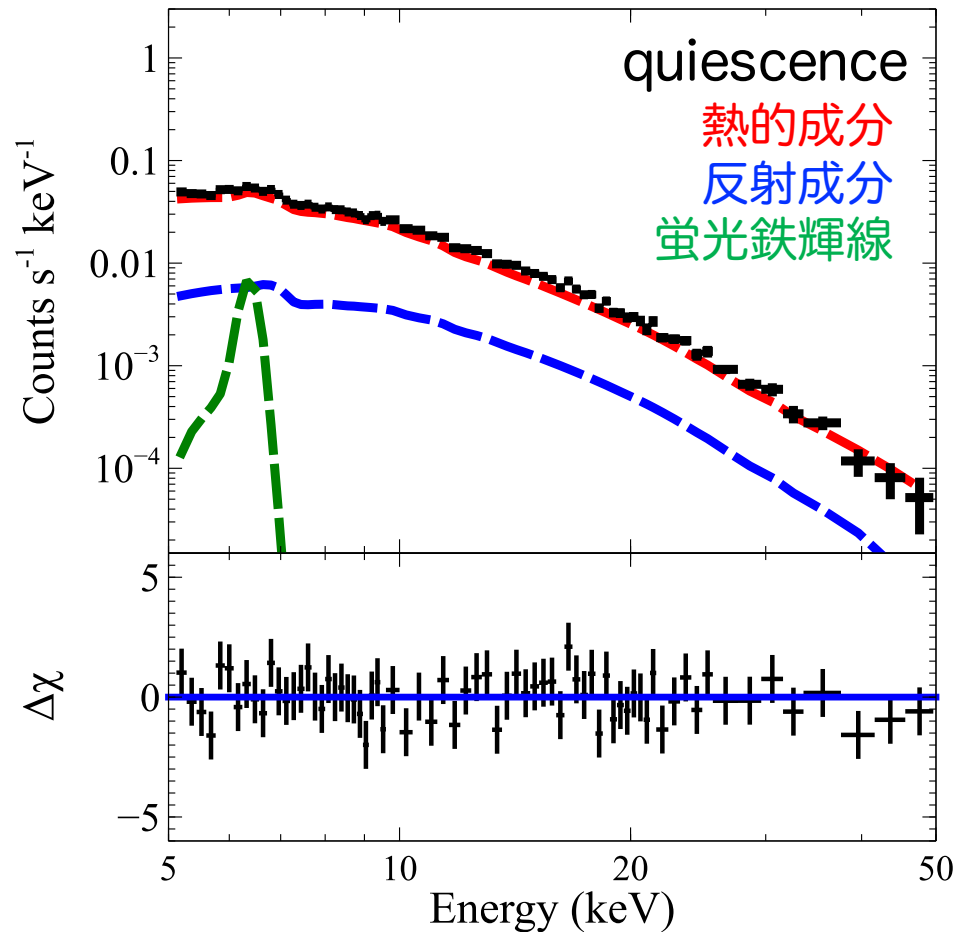
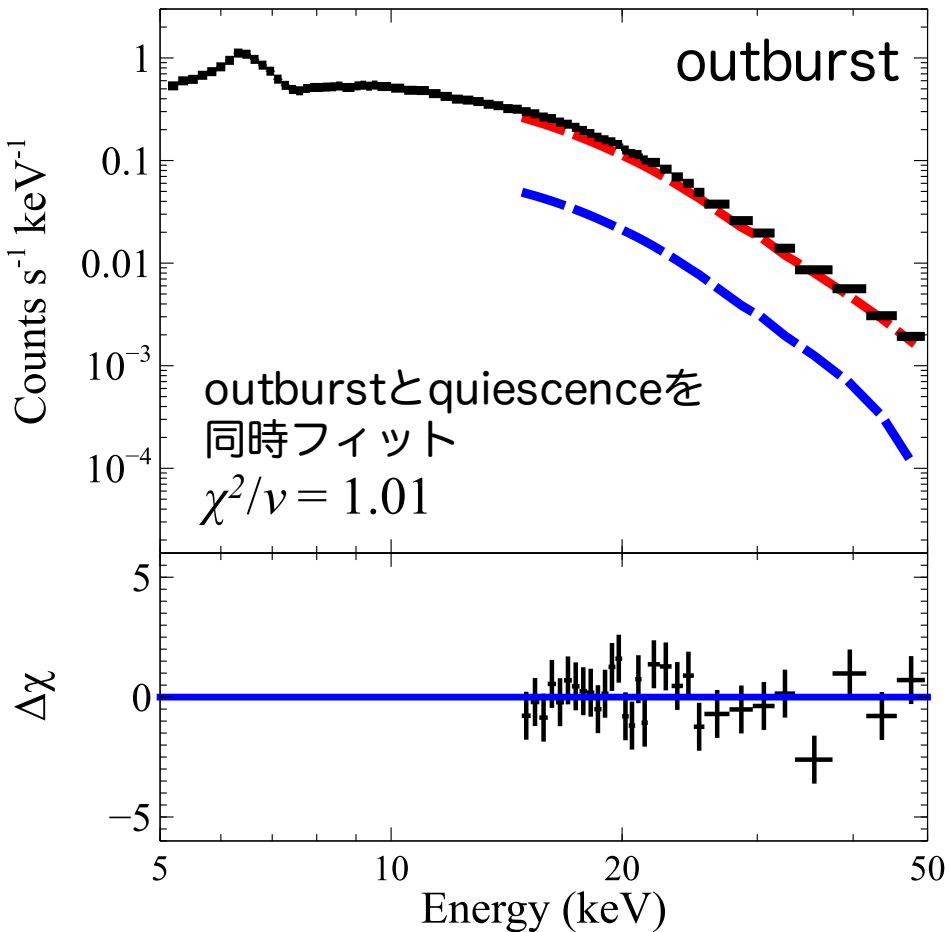
モデル：降着ガスからの熱的放射, 光電吸収, WD表面での反射, 蛍光鉄輝線



複雑な吸収のためoutburstで低エネルギー側の残差が大きい

解析結果：モデルフィット

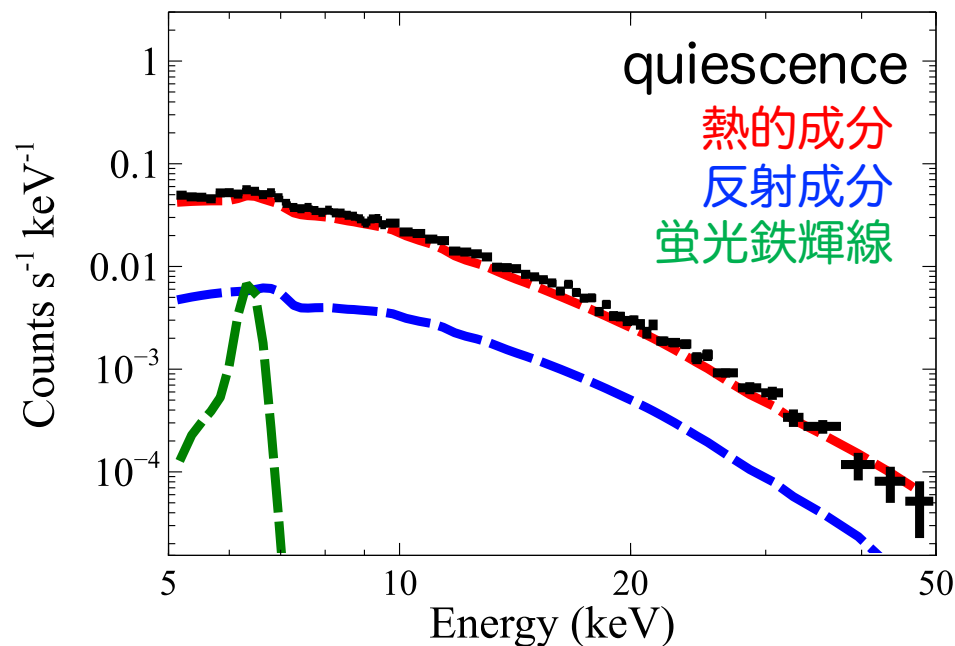
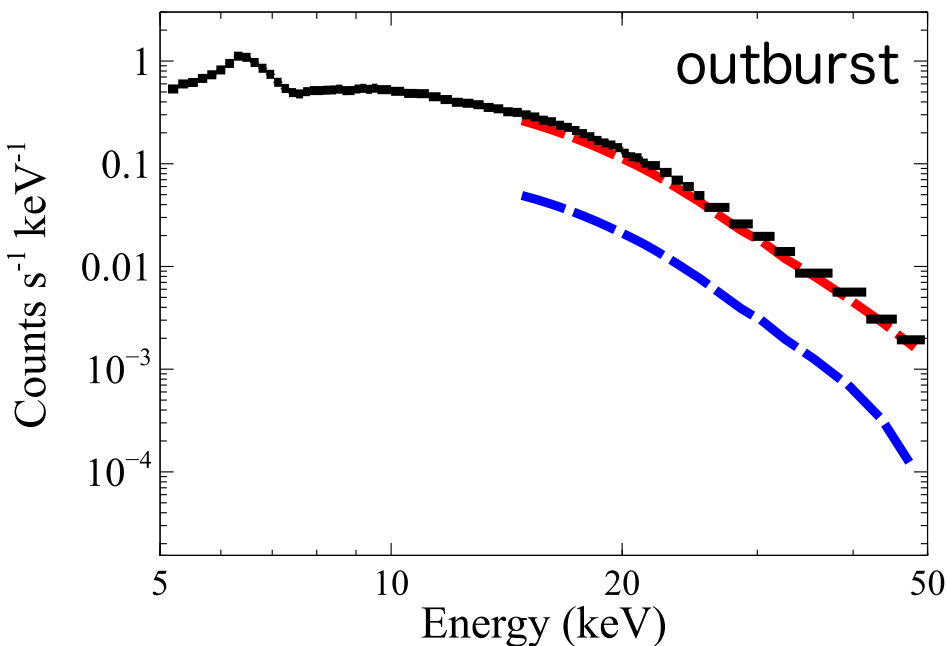
モデル：降着ガスからの熱的放射, 光電吸収, WD表面での反射, 蛍光鉄輝線



outburstは15-50 keVの帯域を使用 -> フィットが改善

解析結果：モデルフィット

モデル：降着ガスからの熱的放射, 光電吸収, WD表面での反射, 蛍光鉄輝線



	T_s (keV)	F_x (erg/cm ² /s; 0.01-100 keV)
outburst	19.7 (+1.3/-1.0)	$(3.6 +0.5/-0.8) \times 10^{-9}$
quiescence	36.2 (+3.5/-3.2)	$(5.5 +0.5/-0.9) \times 10^{-11}$

↪ 0.54倍 ↪ 65倍

T_s の低下 + F_x の増加 → outburstで R_{in} が縮小した

質量推定手法の改良

円盤内縁からWD表面までの重力解放へ修正

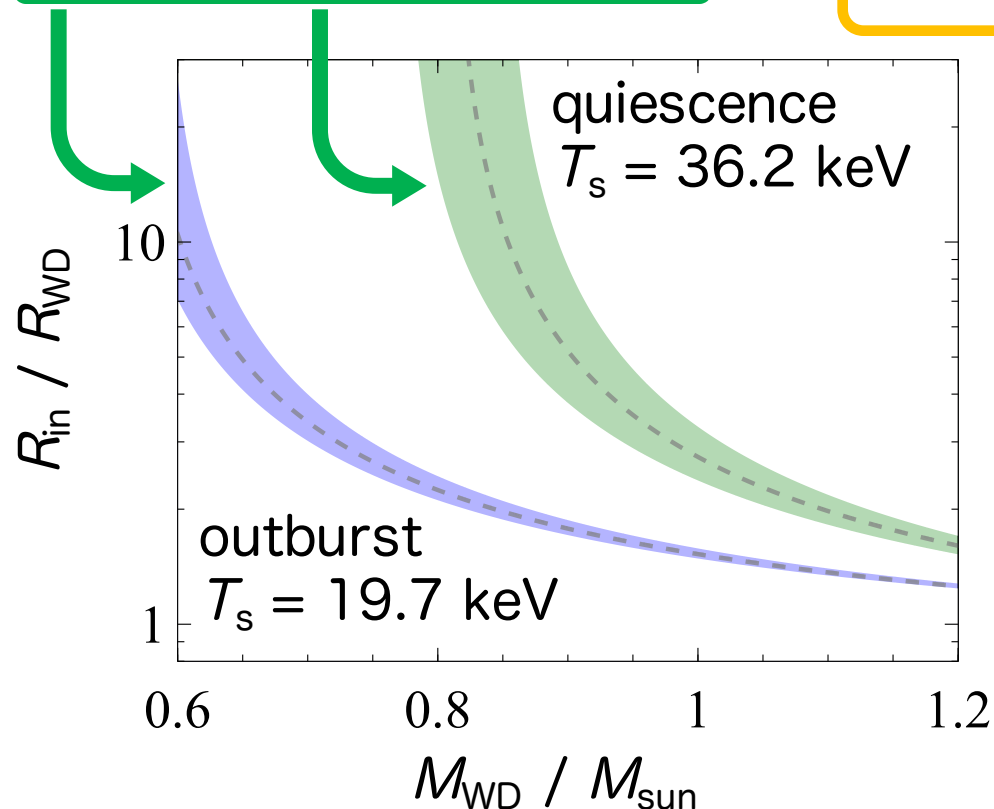
$$F_x \propto M_{\text{WD}} \dot{M} (1 - R_{\text{WD}}/R_{\text{in}})$$

+

$$T_s \propto M_{\text{WD}} (1 - R_{\text{WD}}/R_{\text{in}})$$

Alfven半径の関係式 (Ghosh & Lamb 1979) より

$$\frac{R_q}{R_b} = \left(\frac{\dot{M}_q}{\dot{M}_b} \right)^{-2/7} = \left(\frac{F_q \cdot T_q^{-1}}{F_b \cdot T_b^{-1}} \right)^{-2/7}$$



- 本観測では $R_q / R_b = 3.9 \pm 0.5$
- T_s が得られたときの R_{in} と M_{WD} の関係をプロット

質量推定手法の改良

円盤内縁からWD表面までの重力解放へ修正

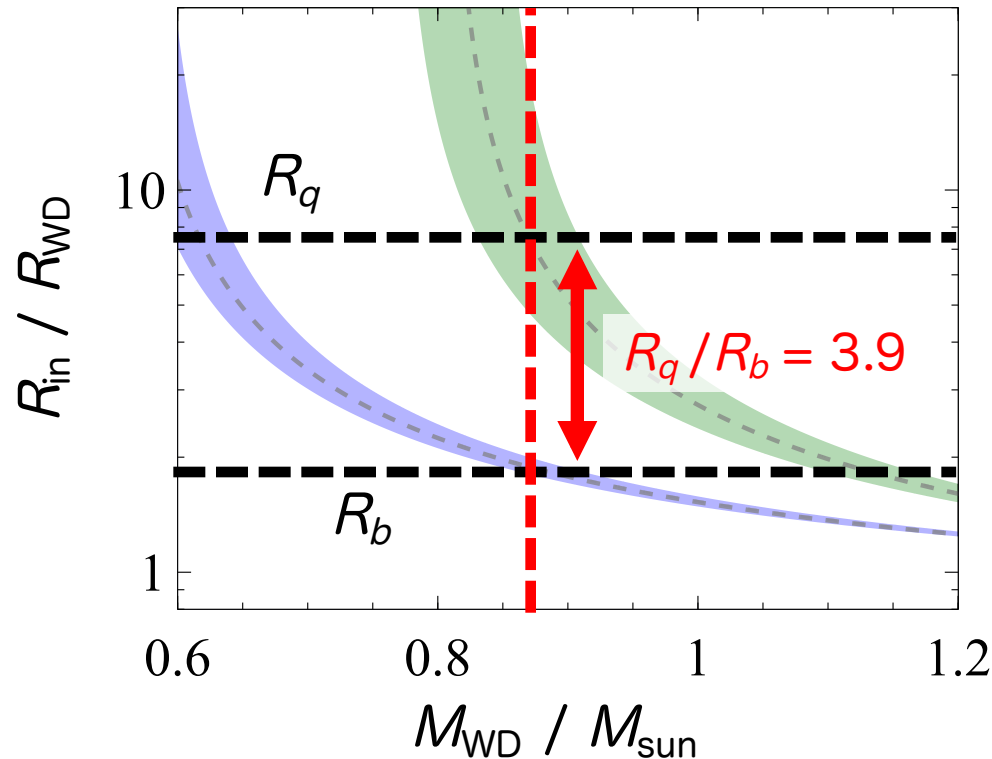
$$F_x \propto M_{\text{WD}} \dot{M} (1 - R_{\text{WD}}/R_{\text{in}})$$

+

$$T_s \propto M_{\text{WD}} (1 - R_{\text{WD}}/R_{\text{in}})$$

Alfven半径の関係式 (Ghosh & Lamb 1979) より

$$\frac{R_q}{R_b} = \left(\frac{\dot{M}_q}{\dot{M}_b} \right)^{-2/7} = \left(\frac{F_q \cdot T_q^{-1}}{F_b \cdot T_b^{-1}} \right)^{-2/7}$$



- 本観測では $R_q/R_b = 3.9 \pm 0.5$

- T_s が得られたときの R_{in} と M_{WD} の関係をプロット

- $R_q/R_b = 3.9$ を満たす M_{WD} を探す

質量推定手法の改良

円盤内縁からWD表面までの重力解放へ修正

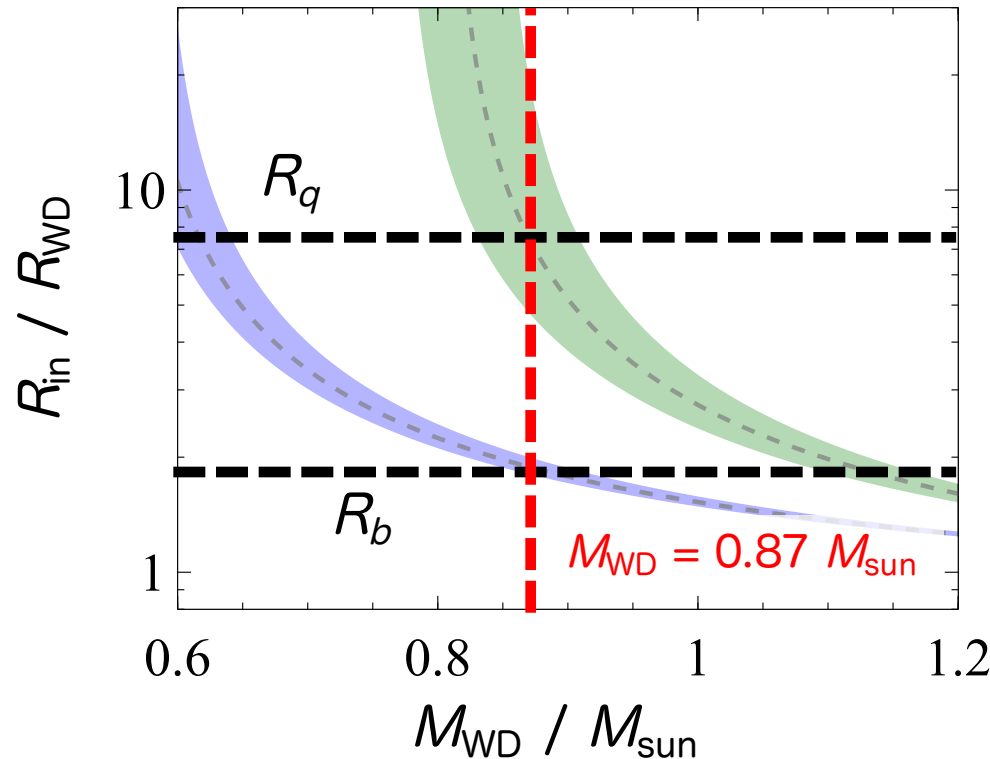
$$F_x \propto M_{WD} \dot{M} (1 - R_{WD}/R_{in})$$

+

$$T_s \propto M_{WD} (1 - R_{WD}/R_{in})$$

Alfven半径の関係式 (Ghosh & Lamb 1979) より

$$\frac{R_q}{R_b} = \left(\frac{\dot{M}_q}{\dot{M}_b} \right)^{-2/7} = \left(\frac{F_q \cdot T_q^{-1}}{F_b \cdot T_b^{-1}} \right)^{-2/7}$$



- 本観測では $R_q/R_b = 3.9 \pm 0.5$

- T_s が得られたときの R_{in} と M_{WD} の関係をプロット

- $R_q/R_b = 3.9$ を満たす M_{WD} を探す

WDの推定質量:

$$M_{WD} = 0.87 \pm 0.05 M_{sun}$$

降着円盤の内縁半径 R_{in} :

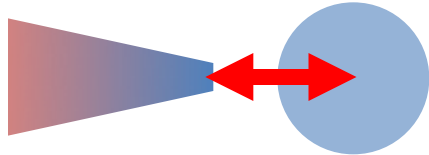
$$R_b \sim 1.9 R_{WD}$$

$$R_q \sim 7.4 R_{WD}$$

考察

2つの観測で衝撃波温度が異なり、内縁半径が変化した

$$T_s \sim 19.7 \text{ keV}$$



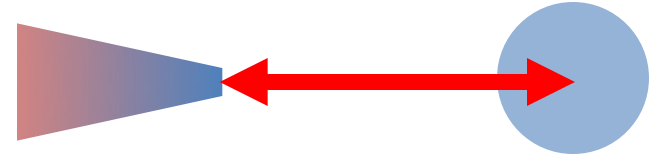
$$R_{in} \sim 1.9 R_{WD}$$

outburst

~1.8倍

~3.9倍

$$T_s \sim 36.2 \text{ keV}$$



$$R_{in} \sim 7.4 R_{WD}$$

quiescence

理論式 $R_{in} \propto \dot{M}^{-2/7} B^{4/7}$ の不定性により質量に7%の系統誤差

推定質量： $M_{WD} = 0.87 \pm 0.08 M_{sun}$

(系統誤差+統計誤差)

半径： $R_{WD} = 6600 \pm 600 \text{ km}$

(質量-半径関係を援用)

- 可視光観測の下限値とコンシステント

($M_{WD} > 0.78 M_{sun}$: Reinsch 1993 など)

- 過去のX線観測は R_{in} を無視したため質量を過小評価していたことを確認

($M_{WD} = 0.59 \pm 0.05 M_{sun}$: Suleimanov+2005)

まとめ

- 矮新星 GK Persei を2015年3月のoutburstと9月のquiescenceにNuSTARで観測した。
- outburst の 3-50 keV フラックスはquiescenceに比べて23倍の大きさであった。
- 質量降着率の増加による降着円盤内縁の移動を反映し、outburstでの衝撃波温度はquiescenceの約半分であった。
- 内縁半径の比 $R_q/R_b = 3.9 \pm 0.5$ を用いた新たな質量推定手法から $M_{WD} = 0.87 \pm 0.08 M_{\text{sun}}$ と求めた。
- 推定質量は可視光観測による下限値とコンシステント。内縁半径を加味することで光度変動が起きる系においてX線観測でより正確な白色矮星質量の推定が可能となった。