

降着型X線パルサーの 軟X線超過と低電離の鉄輝線

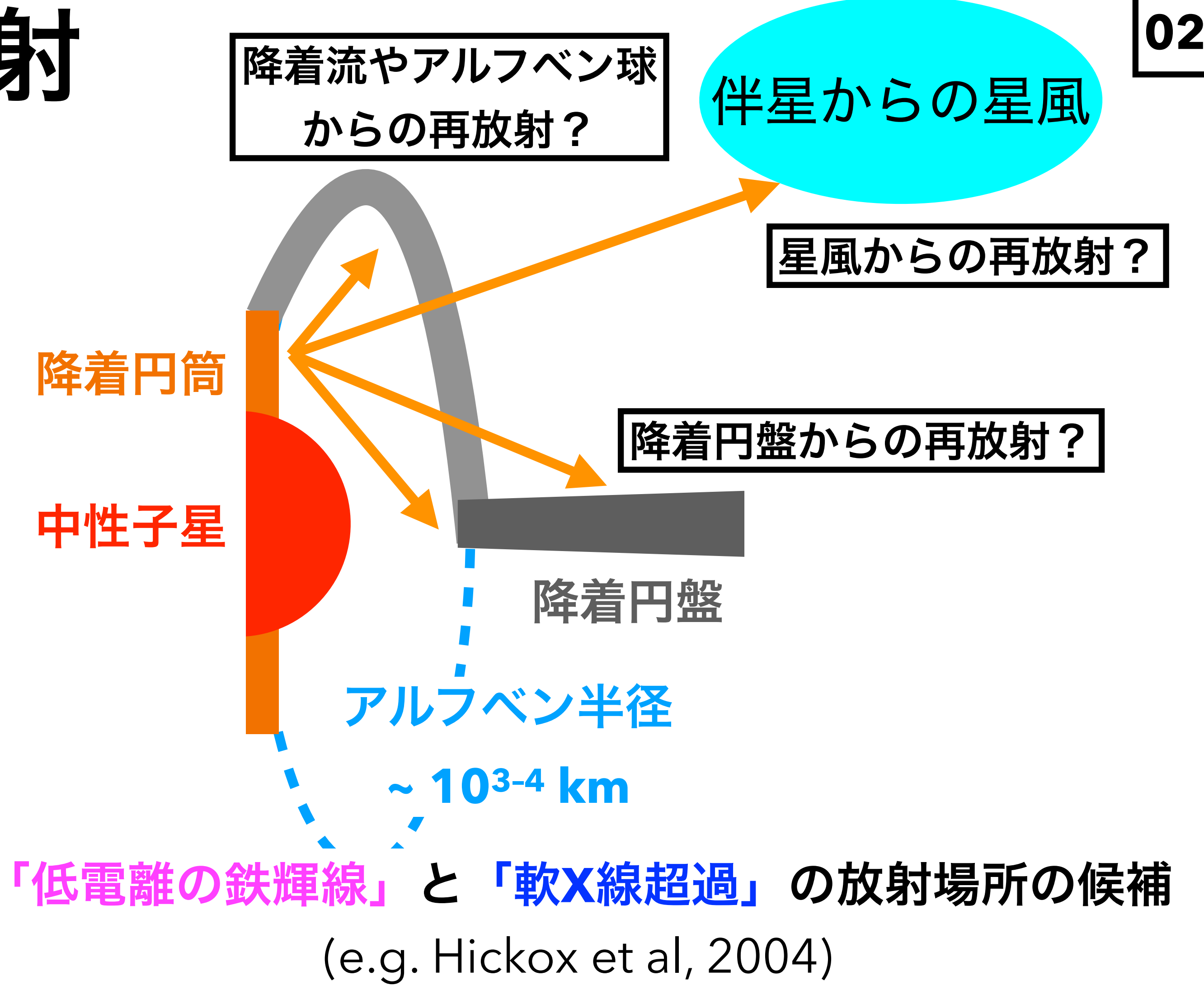
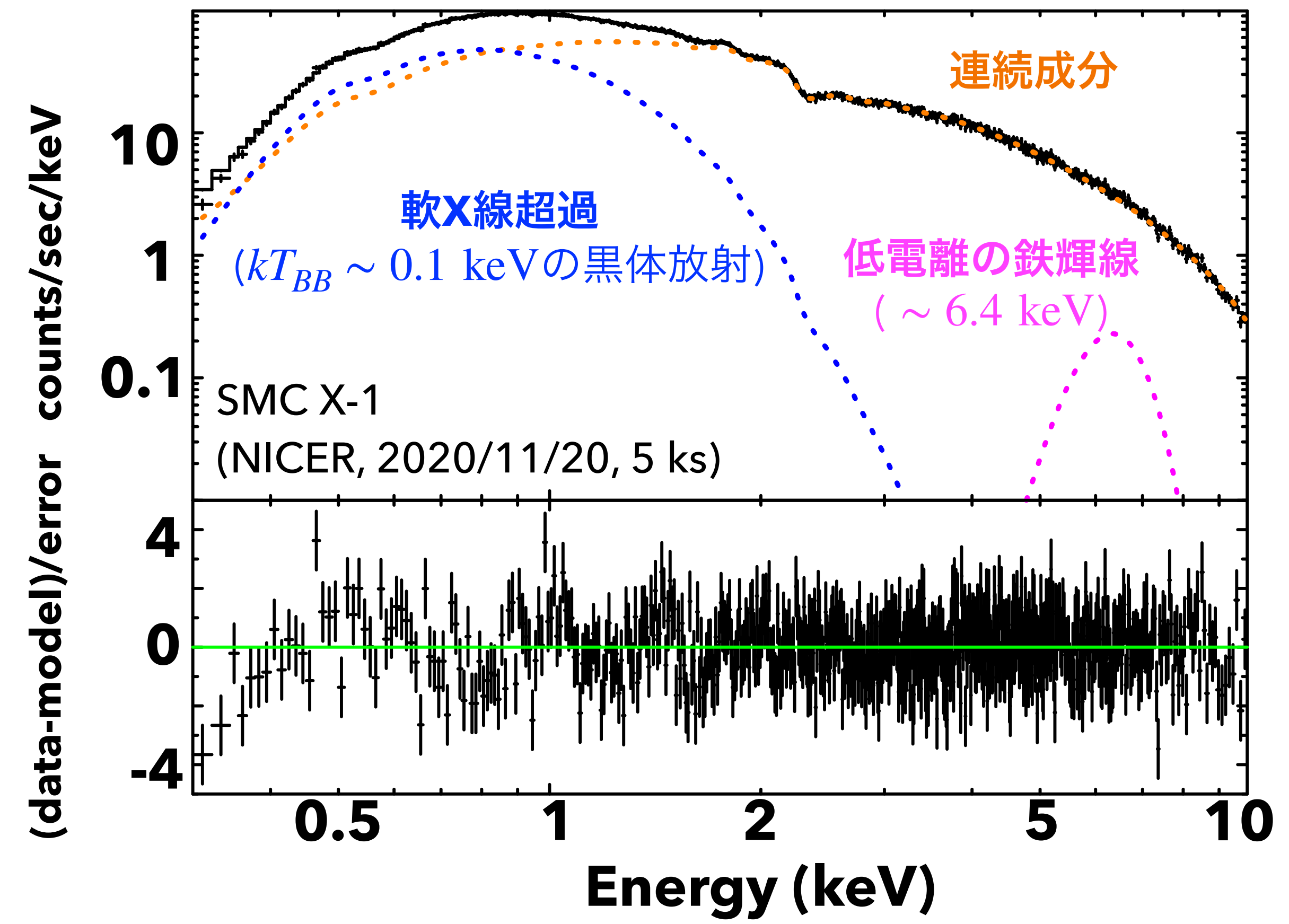
永井悠太郎（京都大学）

榎戸輝揚、内田裕之、鶴剛（京都大学）

～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2023

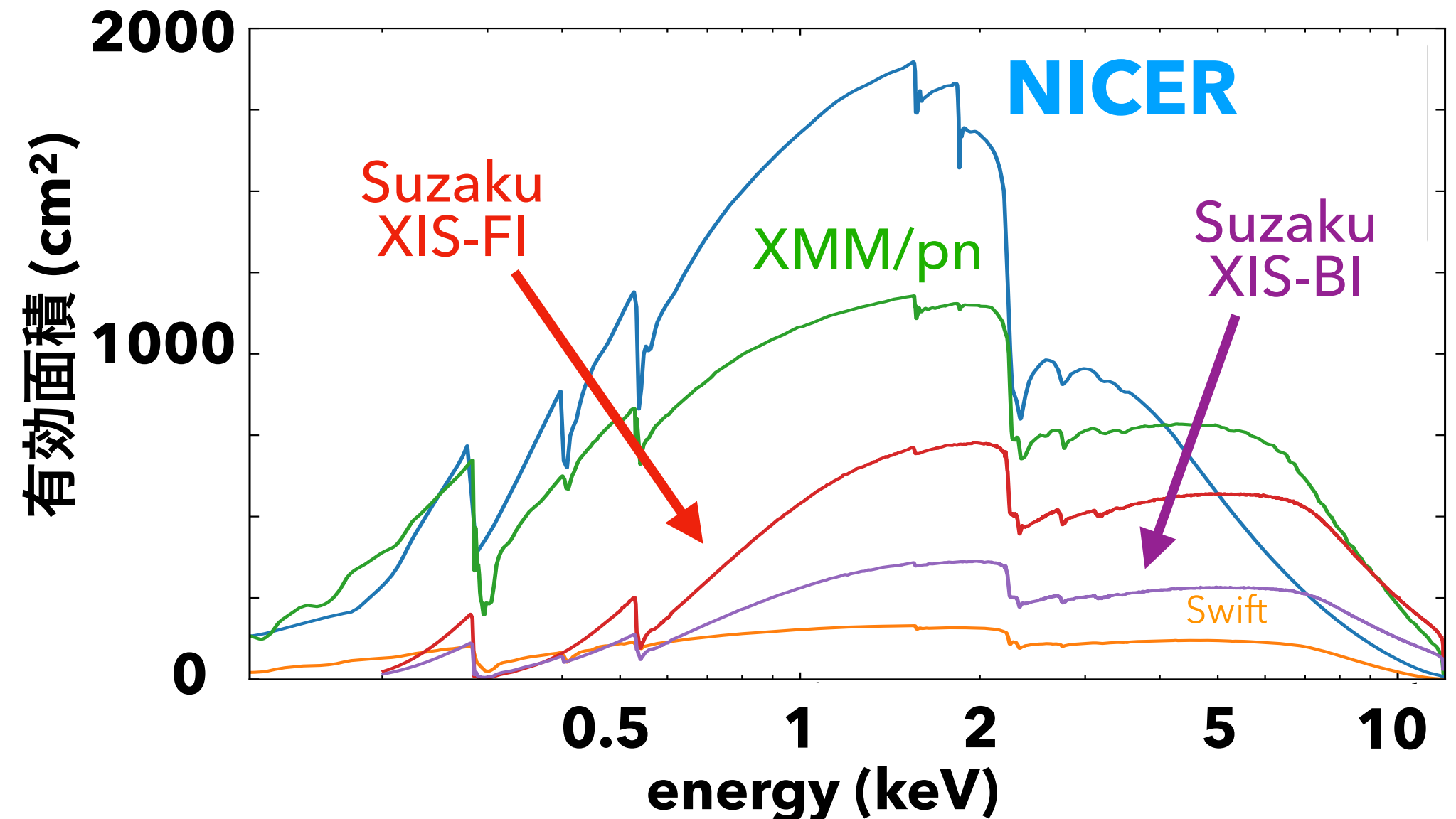
2023年9月7日

降着型パルサーのX線放射

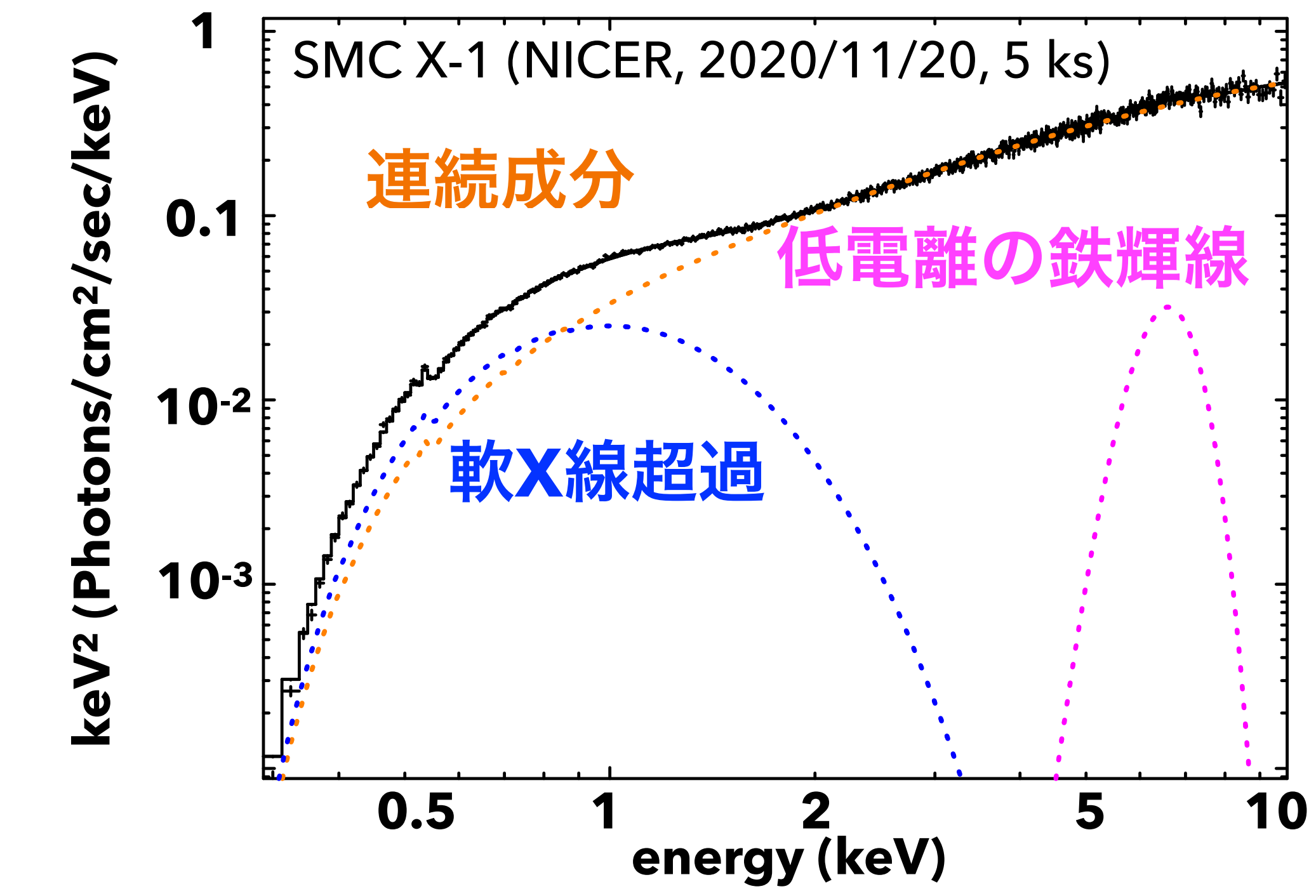


- 降着型パルサーのX線スペクトルには降着円筒からの「連続成分」に加え、多くの天体で「低電離の鉄輝線」が検出され、いくつかの天体で「軟X線超過」も報告
- 「低電離の鉄輝線」と「軟X線超過」の放射場所は未解明
→ 系統的なスペクトル解析によって、これらの放射場所が同一であるかなどについて検証

本研究で解析したターゲット天体



- 観測装置
 - NICER (解析したエネルギー: 0.3-10 keV)
 - **1.5 keV付近で大きな有効面積**
 - **軟X線超過**を観測するのに最適
 - Suzaku/XIS (0.5-1.75, 1.85-10 keV)
 - 多くのX線パルサーを観測
(cf. 笹野, 博士論文, 2014年度, 鉄輝線を系統解析)
 - XMM-Newton/mos (0.2-10 keV)
 - マゼラン雲のX線パルサーを多数観測



- 解析した天体: **鉄輝線**が確認できる27天体
 - NICERで観測されたHMXBとLMXB 22天体
 - SMC X-1, Cen X-3, Her X-1, Vela X-1など
 - Suzaku/XIS で観測のHMXB 3天体を追加
 - LMC X-4, 1A1118-61, KS 1947+300
 - XMM-Newton/mos で観測のHMXB 2天体を追加
 - RX J0059.2-7138, IGR J01572-7259

スペクトル解析の例: SMC X-1 など3天体

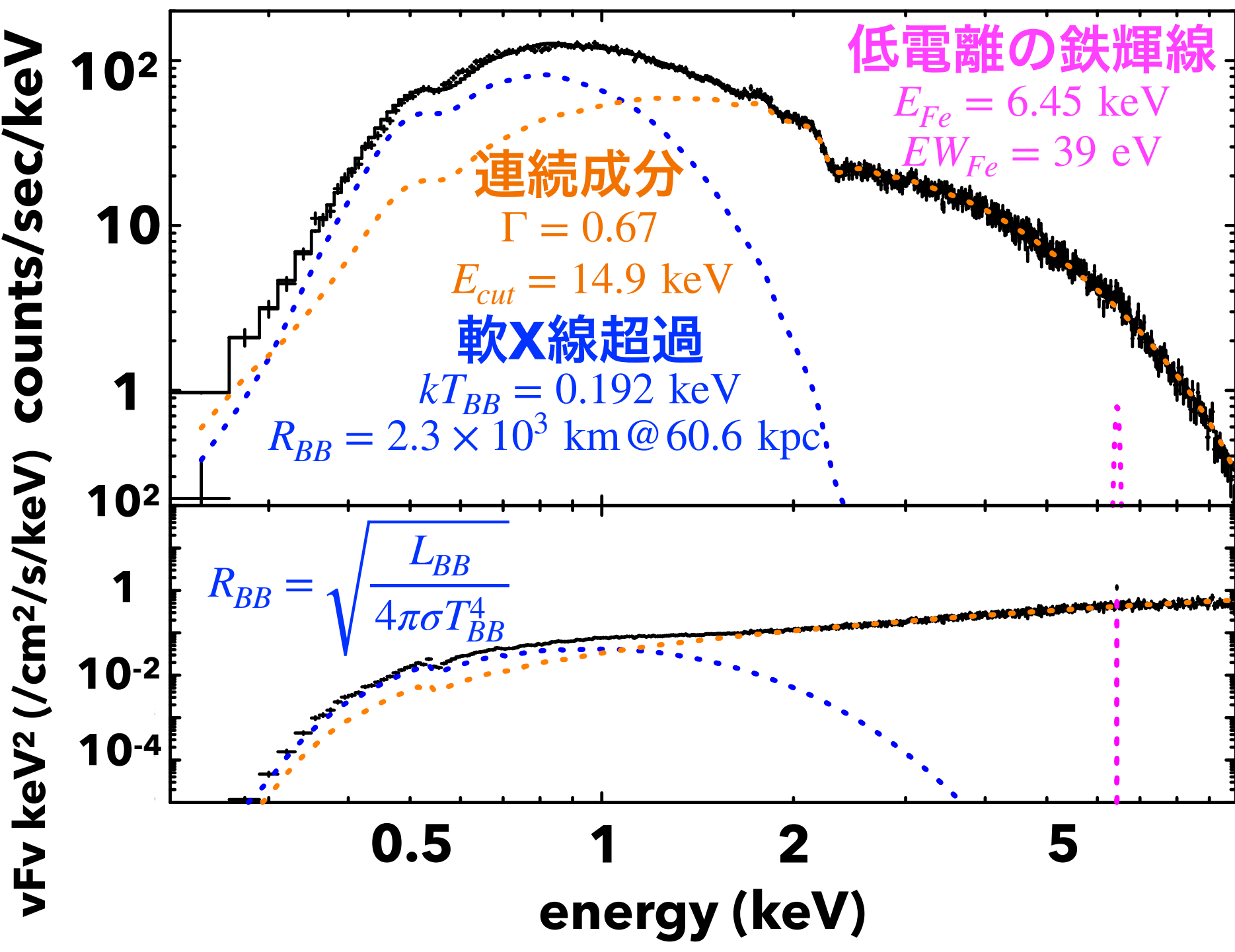
モデル: 吸収 × (連続成分 + 軟X線超過 + 低電離の鉄輝線)

tbabs $E^{-\Gamma}$ or $E^{-\Gamma} \exp(E/E_{cut})$ $kT_{BB} \sim 0.1$ keVの黒体放射 ~ 6.4 keVのGaussian

典型的なフラックス (吸収補正済, 0.2-10 keV) $F_{cont} \sim 10^{-9}$ erg sec $^{-1}$ $F_{BB} \sim 10^{-10}$ erg sec $^{-1}$ $F_{Fe} \sim 10^{-11}$ erg sec $^{-1}$

SMC X-1

(NICER, 2021/6/6, 1.6 ks)



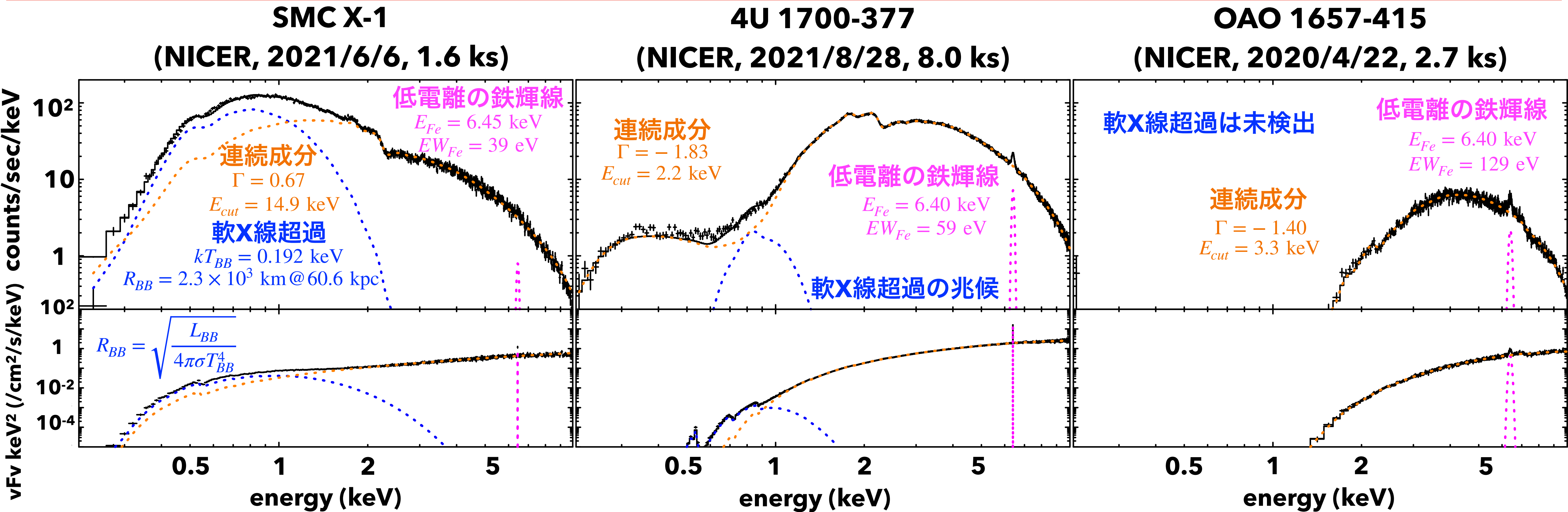
$N_H = 2.44(4) \times 10^{21}$ cm 2

スペクトル解析の例: SMC X-1 など3天体

モデル: 吸収 × (連続成分 + 軟X線超過 + 低電離の鉄輝線)

tbabs $E^{-\Gamma}$ or $E^{-\Gamma} \exp(E/E_{cut})$ $kT_{BB} \sim 0.1$ keVの黒体放射 ~ 6.4 keVのGaussian

典型的なフラックス (吸収補正済, 0.2-10 keV) $F_{cont} \sim 10^{-9}$ erg sec $^{-1}$ $F_{BB} \sim 10^{-10}$ erg sec $^{-1}$ $F_{Fe} \sim 10^{-11}$ erg sec $^{-1}$



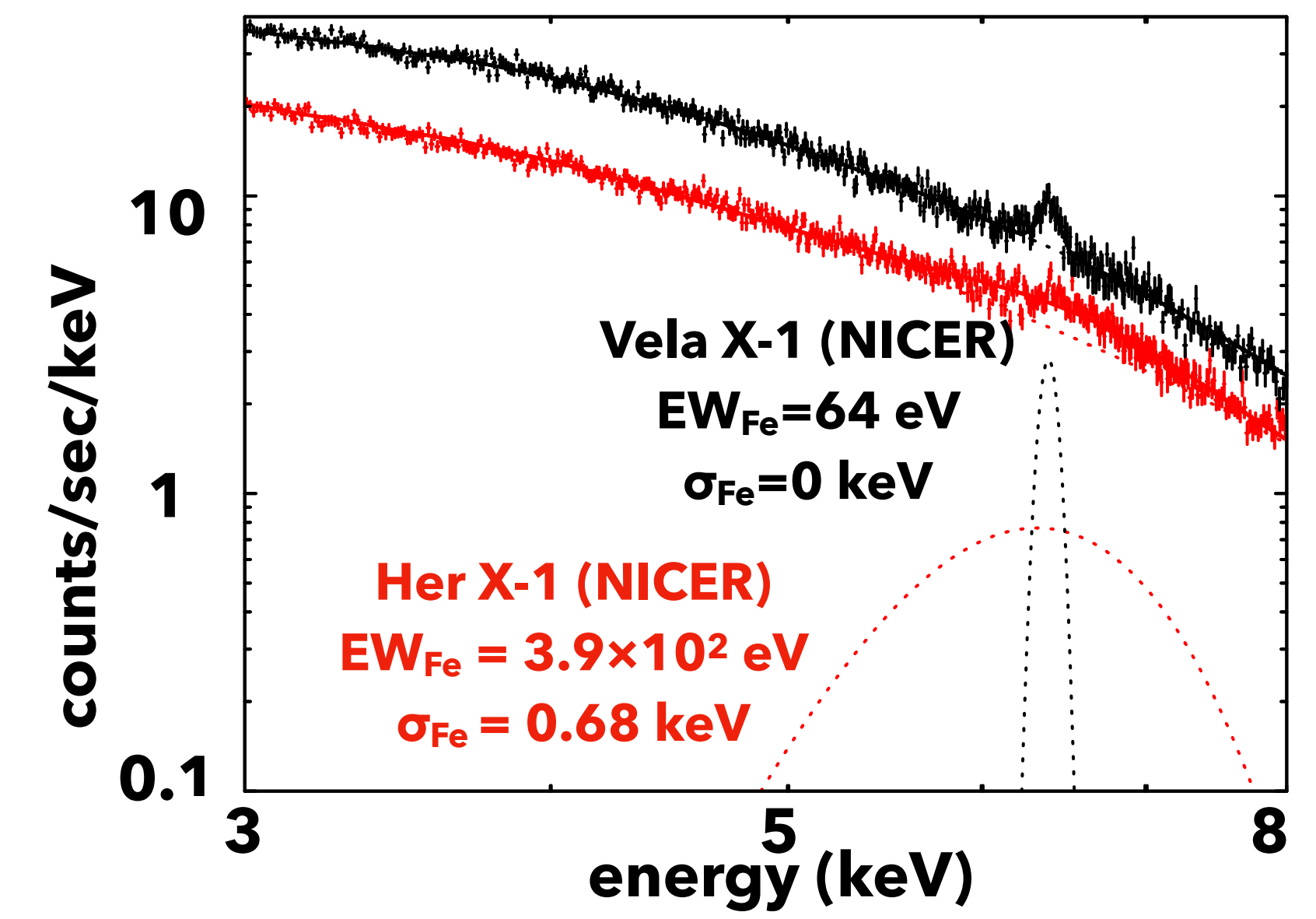
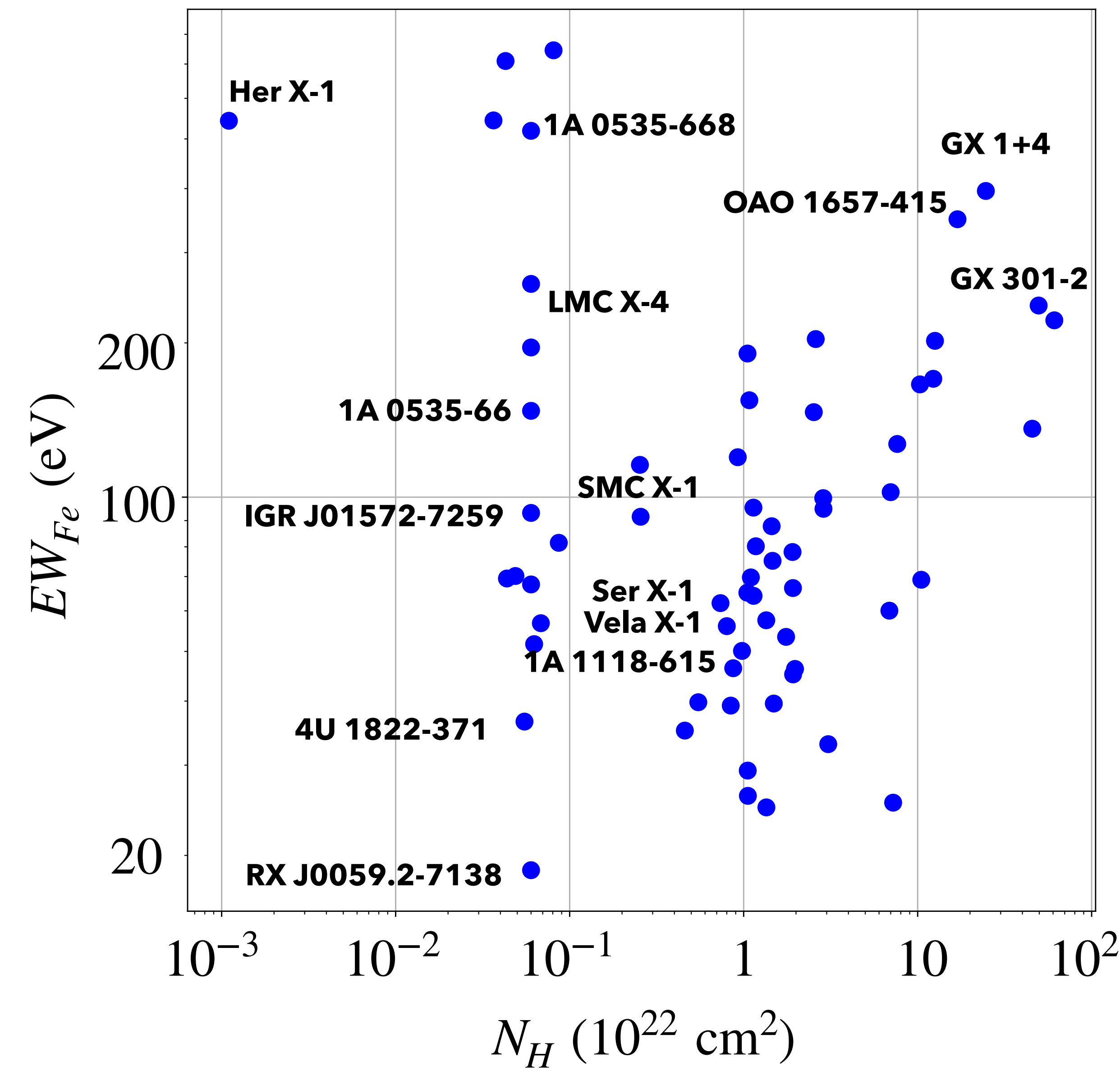
$N_H = 2.44(4) \times 10^{21}$ cm 2

$N_H = 1.94(1) \times 10^{22}$ cm 2

$N_H = 1.15(9) \times 10^{23}$ cm 2

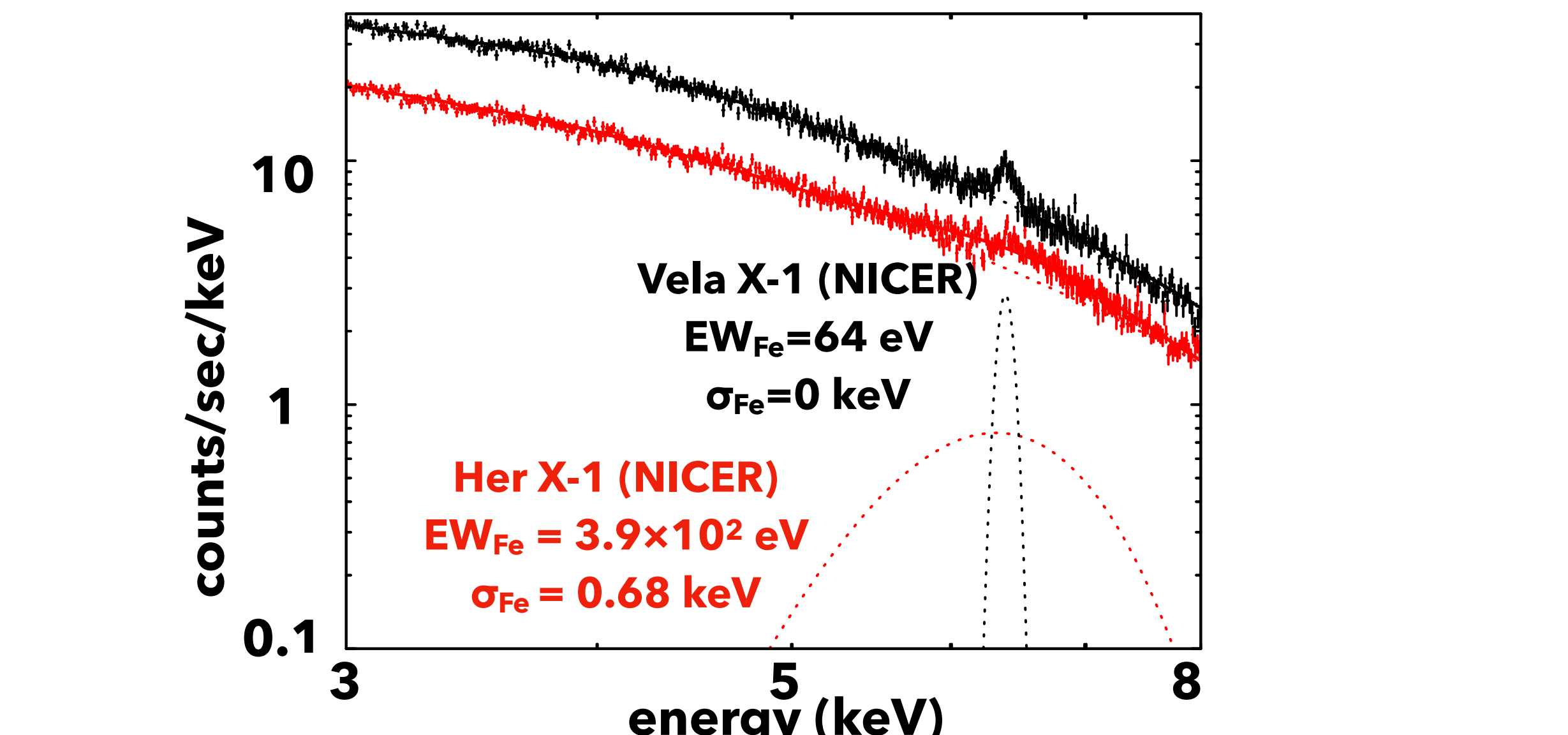
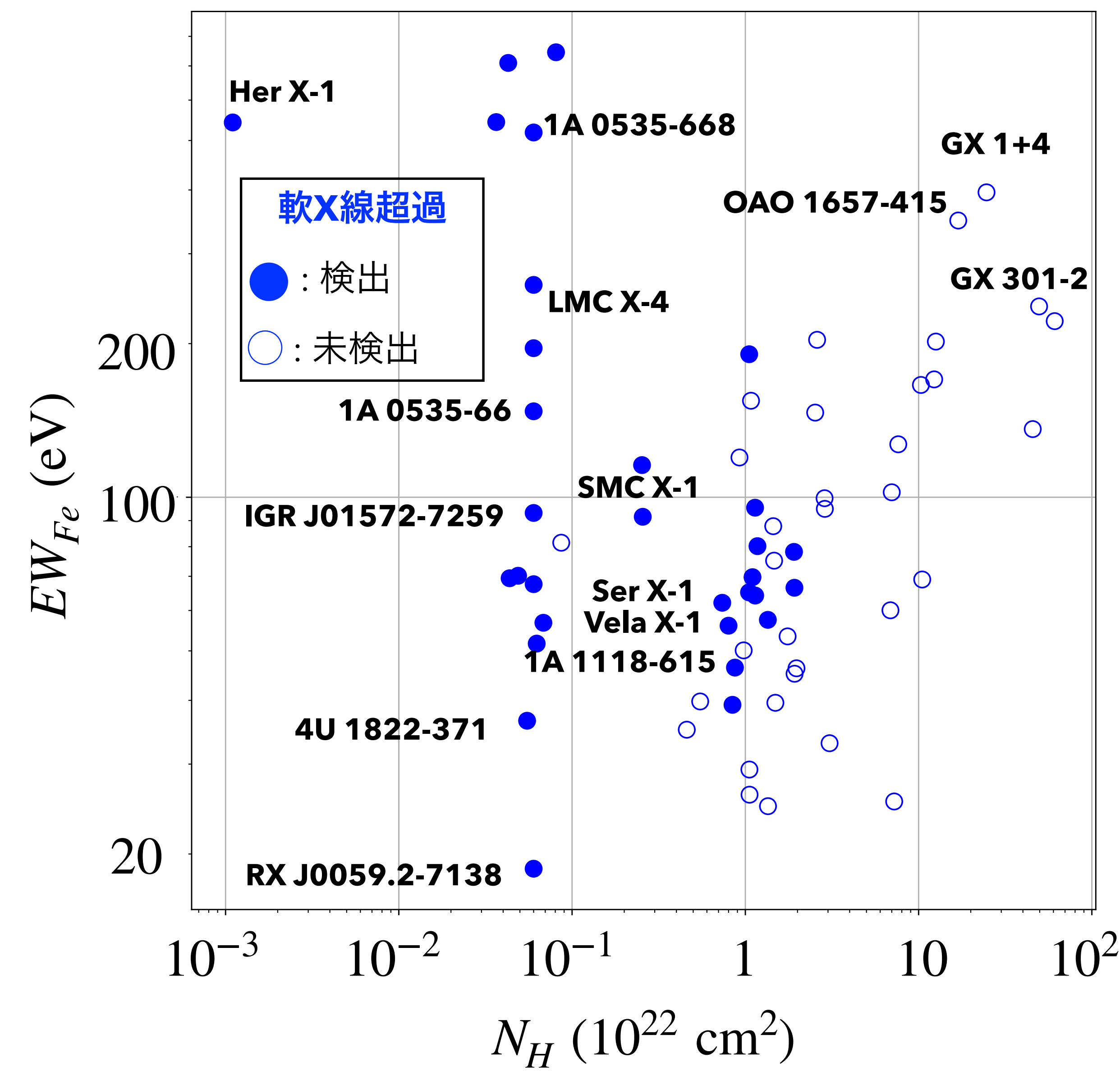
吸収量: 小 大

吸収量に対する低電離の鉄輝線と軟X線超過



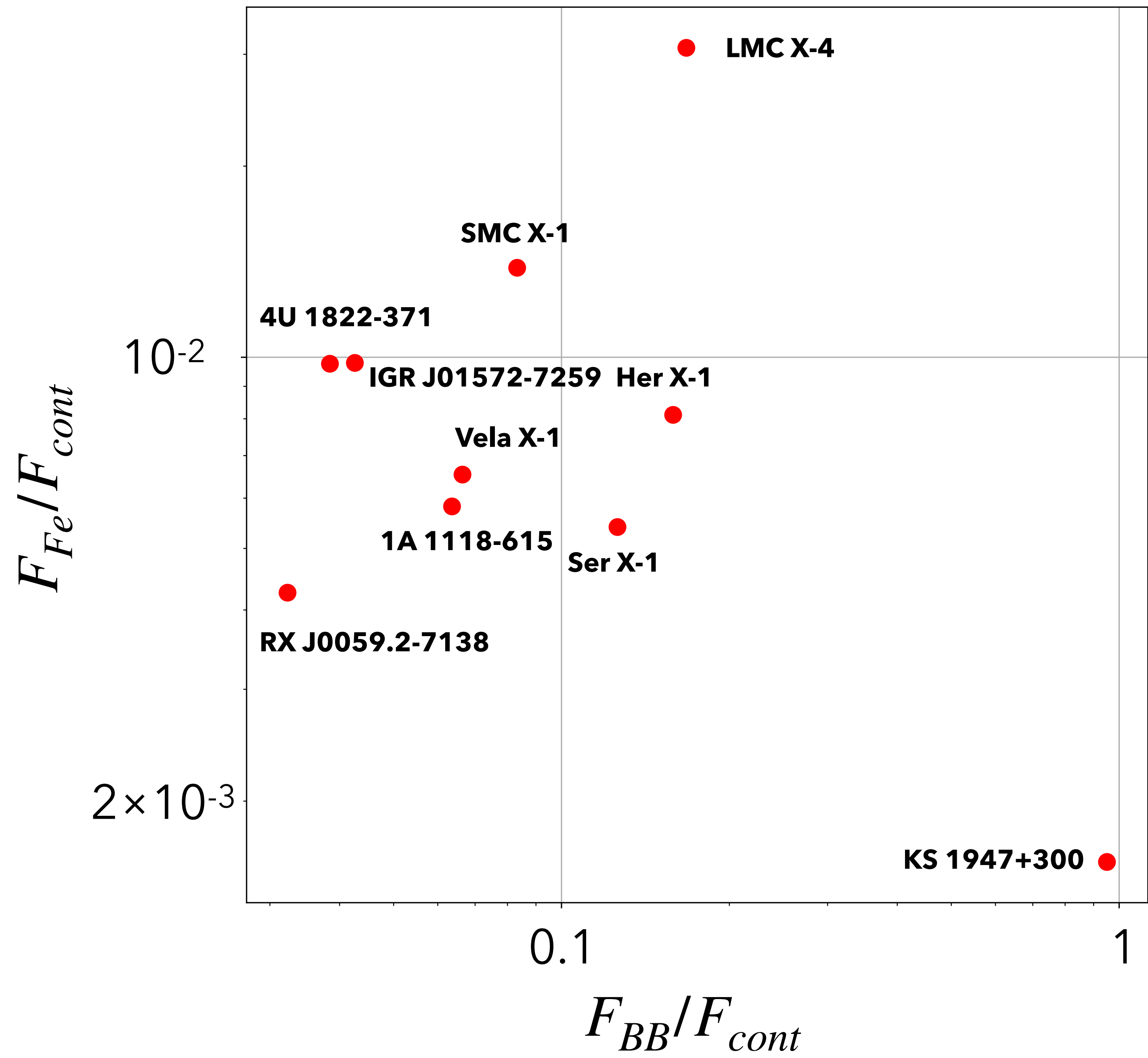
- 低電離の鉄輝線 (~ 6.4 keV) を26天体で確認
 - 等価幅 EW_{Fe} : $\sim 20-500$ eV
 - N_H と EW_{Fe} には一部を除きゆるやかな正の相関
 - てんま衛星以降の観測と一致
(Makishima et al, 1986)

吸収量に対する低電離の鉄輝線と軟X線超過



- 低電離の鉄輝線 (~6.4 keV) を26天体で確認
 - 等価幅 EW_{Fe} : ~20-500 eV
 - N_H と EW_{Fe} には一部を除きゆるやかな正の相関
 - てんま衛星以降の観測と一致 (Makishima et al, 1986)
- 軟X線超過は吸収量が多いと検出できない
 - $N_H \lesssim 1.0 \times 10^{22} / \text{cm}^2$ の天体のうち, 11天体で検出

連続成分に対するフラックス比



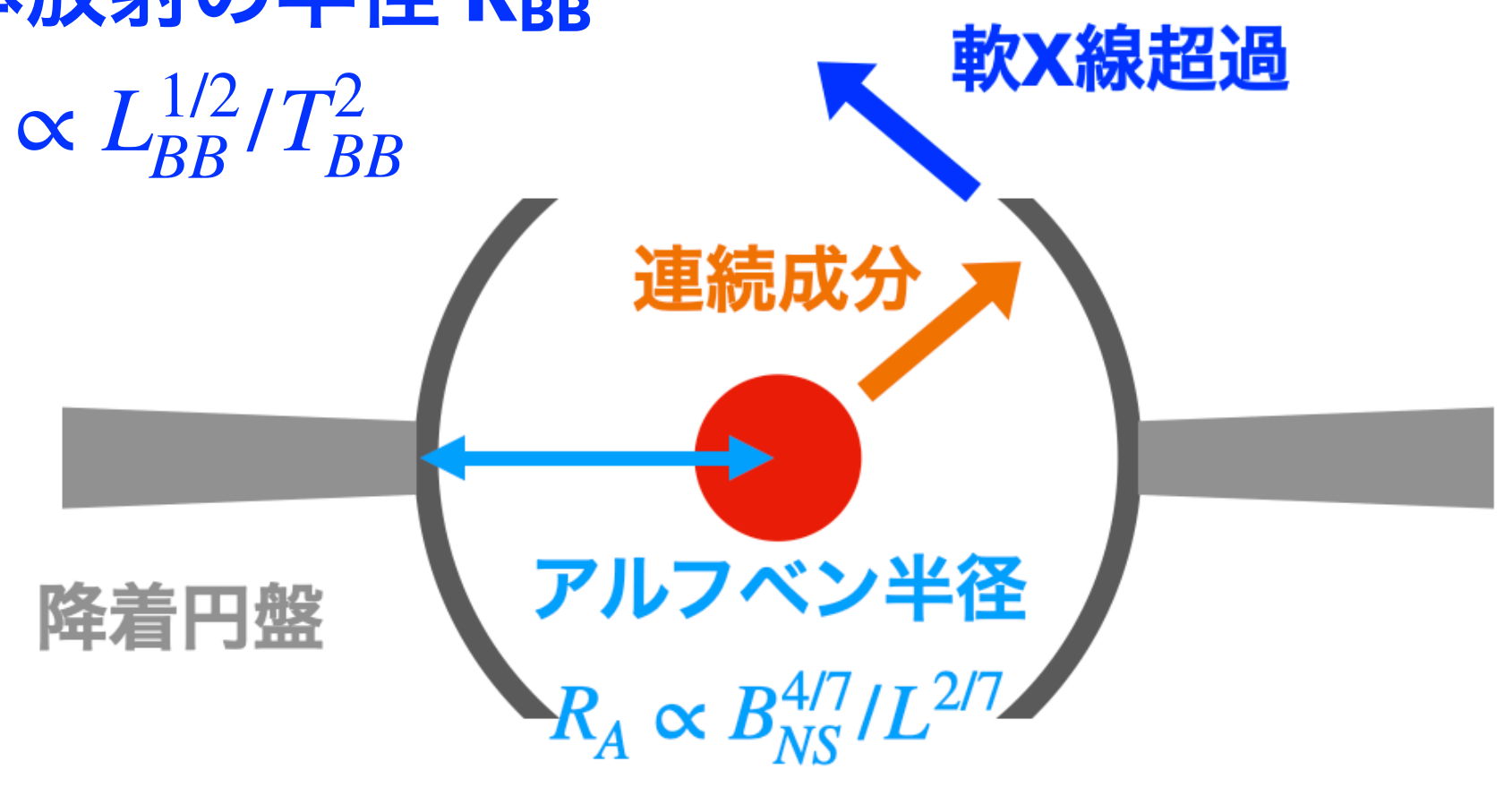
- 多くの天体では,
 - $F_{BB}/F_{cont} \sim 5 - 15\%$
 - $F_{Fe}/F_{cont} \sim 0.5 - 1.5\%$

フラックスは、吸収補正済で0.2-10 keV

アルフベン半径との比較

- 黒体放射の半径 R_{BB}

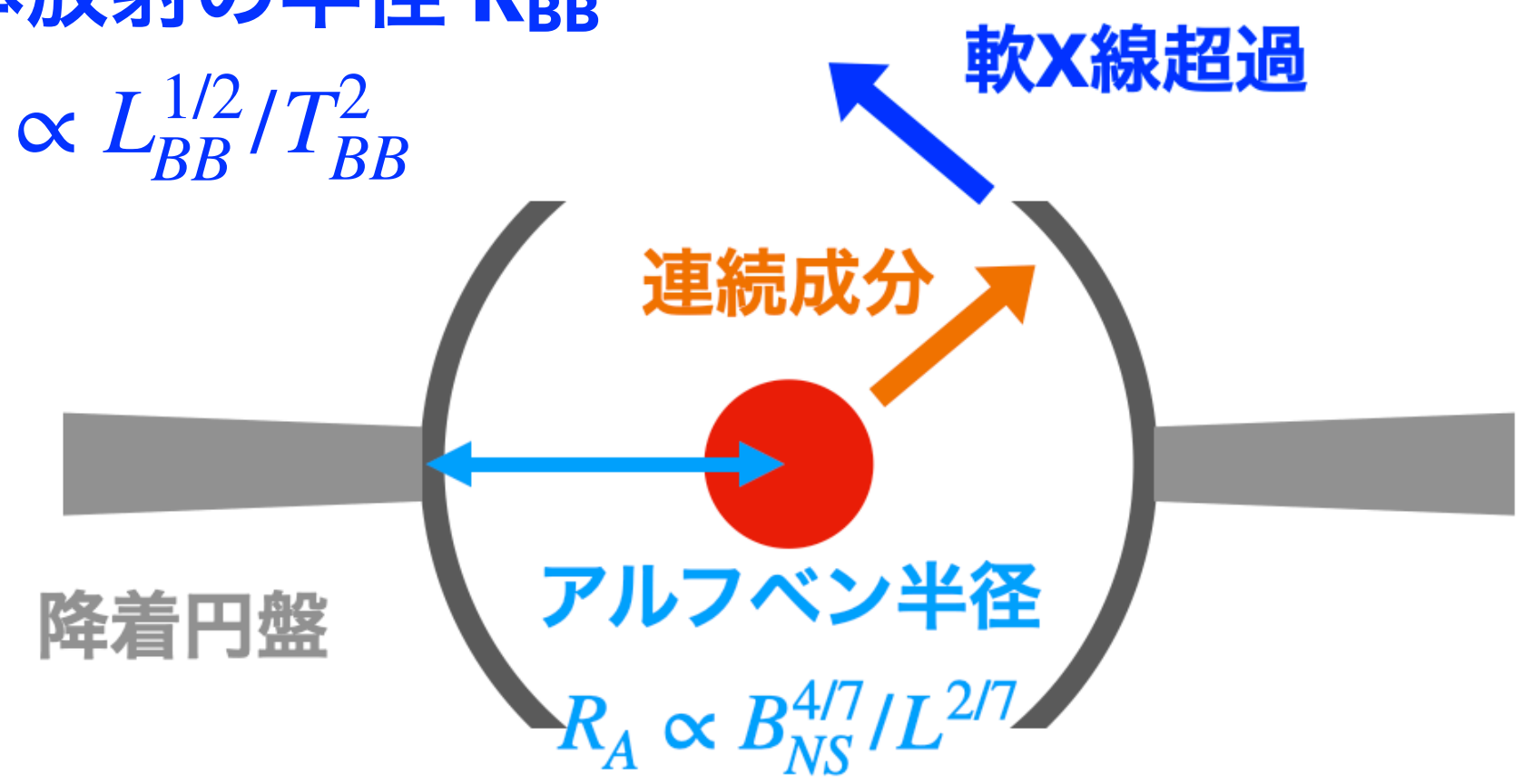
$$R_{BB} \propto L_{BB}^{1/2} / T_{BB}^2$$



アルフベン半径との比較

- 黒体放射の半径 R_{BB}

$$R_{BB} \propto L_{BB}^{1/2} / T_{BB}^2$$



- 鉄輝線の輝線幅から求めた半径 R_{Fe}

- 輝線の幅を運動学的な要因のみと仮定

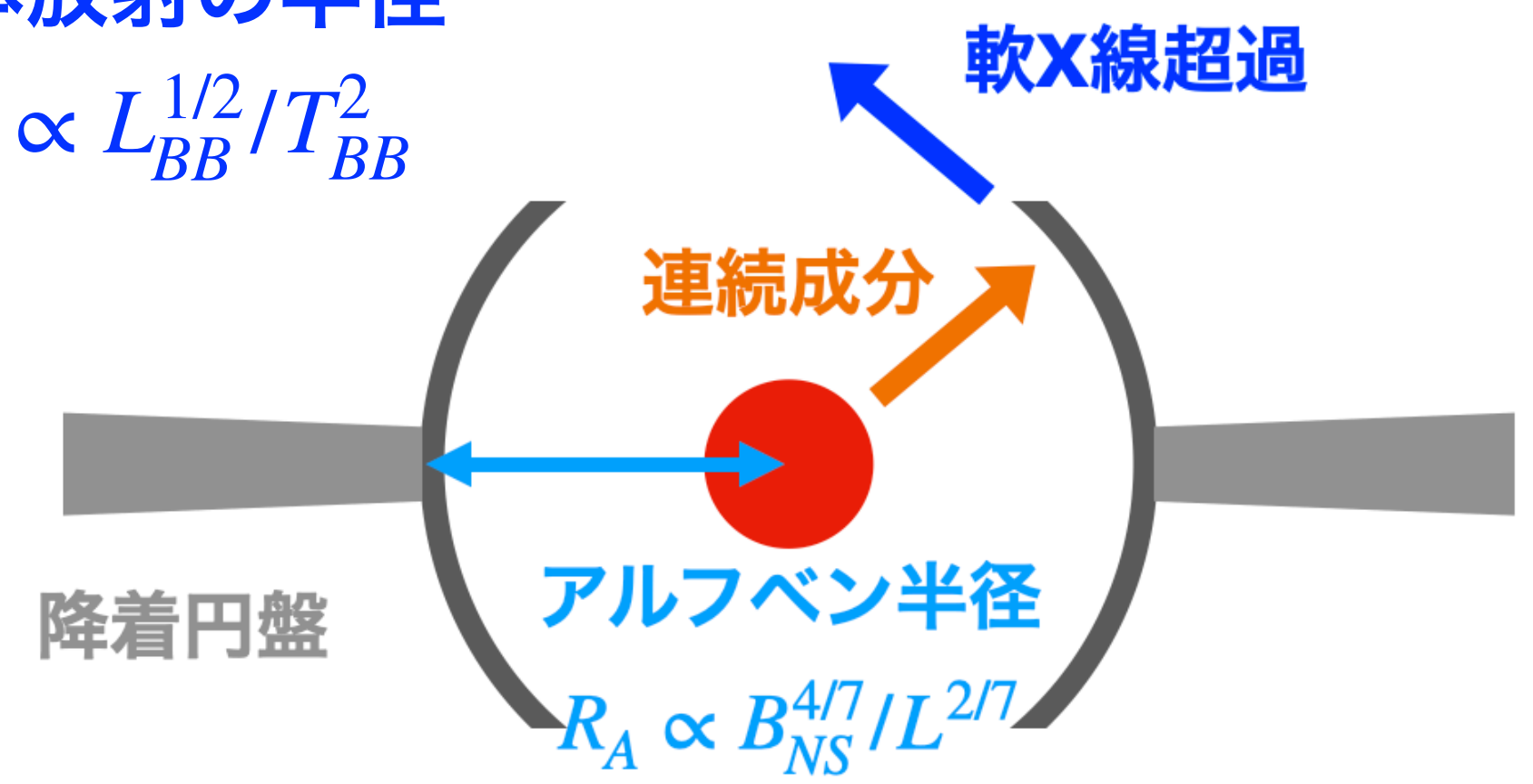
- ドップラー速度 $v_D \sim \frac{c}{2E_{Fe}} \sigma_{Fe} =: v_{Fe}$

- v_{Fe} でのケプラー回転の半径 $R_{Fe} := \frac{GM_{NS}}{v_{Fe}^2}$

アルフベン半径との比較

● 黒体放射の半径

$$R_{BB} \propto L_{BB}^{1/2} / T_{BB}^2$$

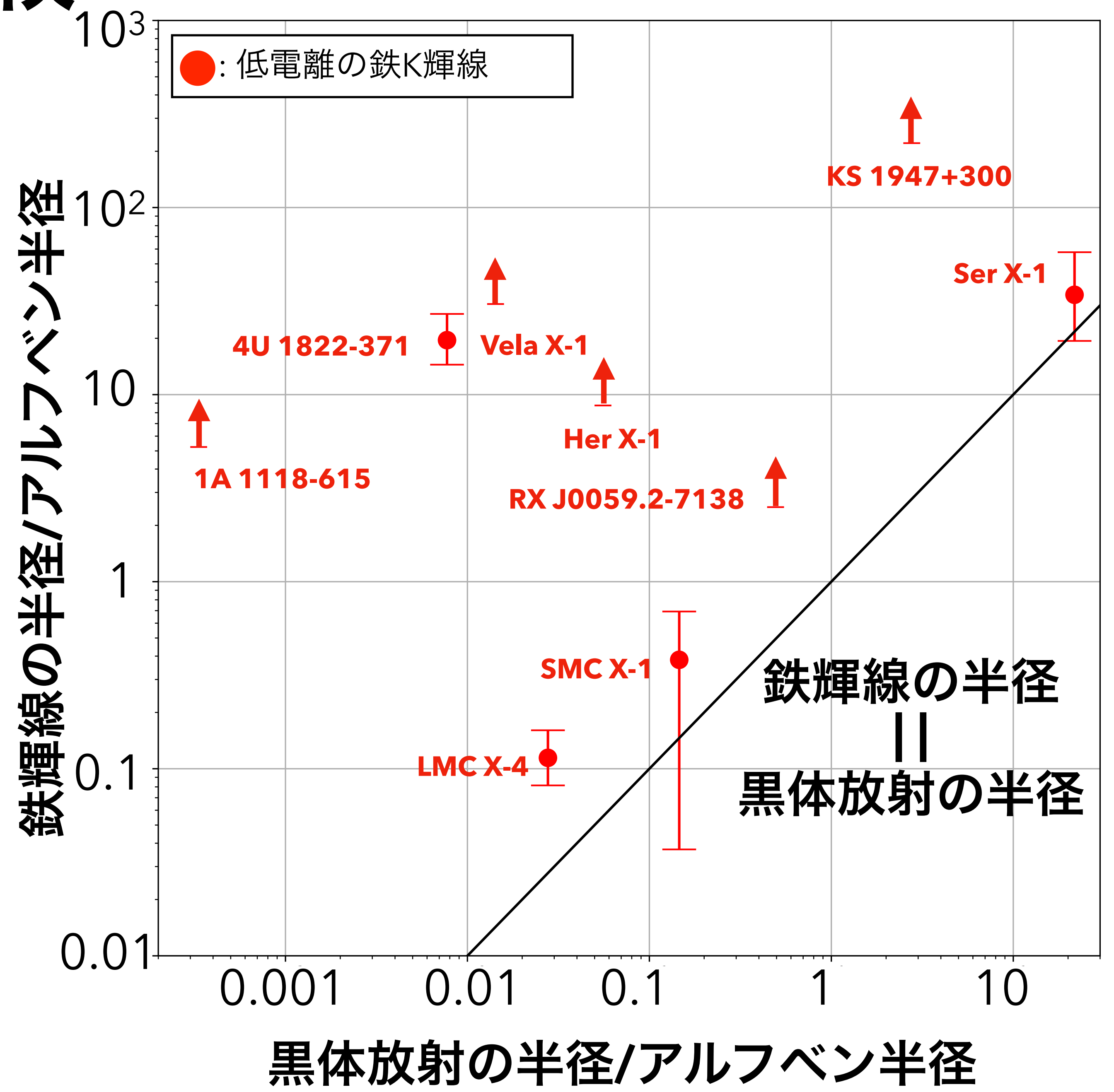


● 鉄輝線の輝線幅から求めた半径 R_{Fe}

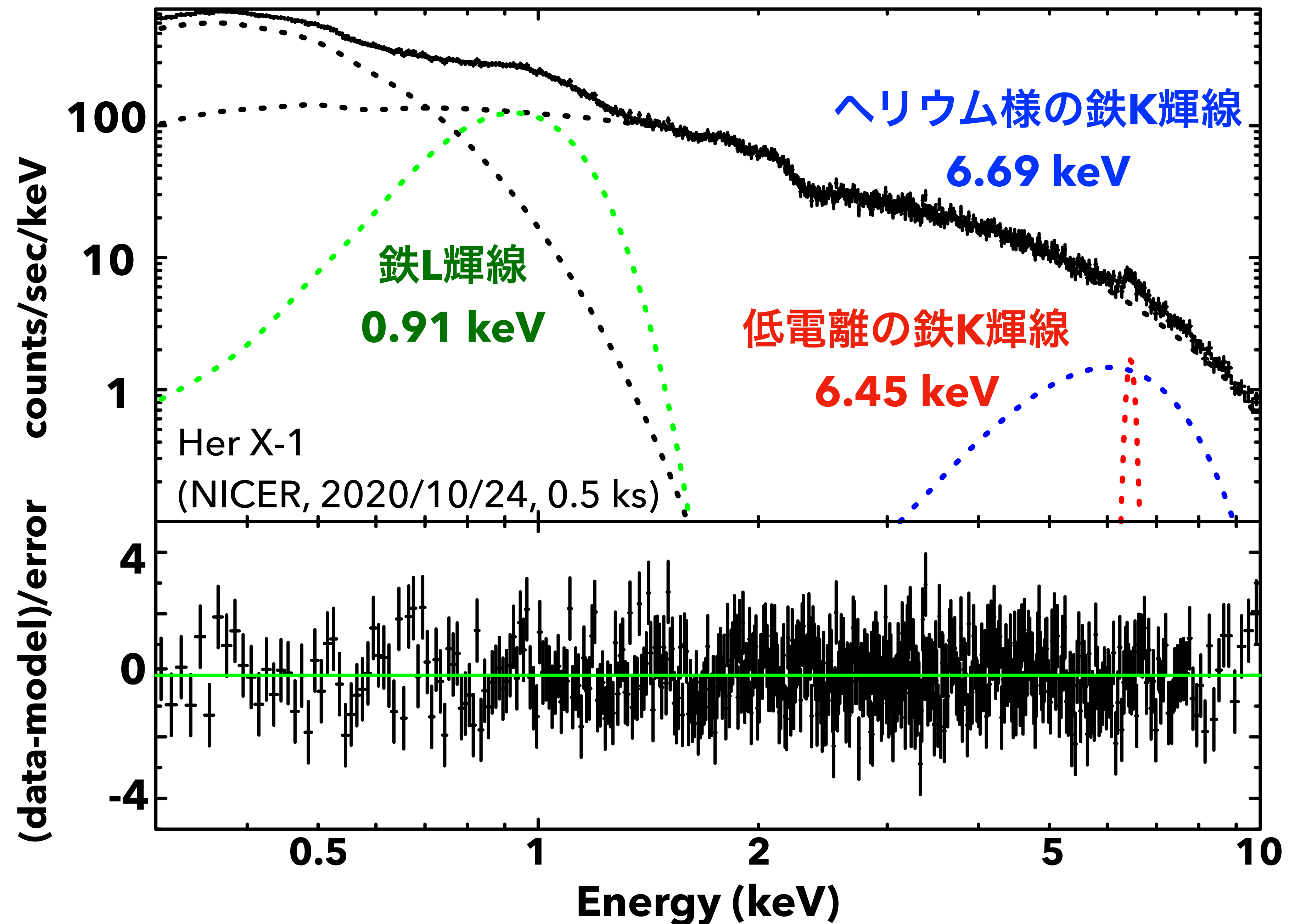
● 輝線の幅を運動学的な要因のみと仮定

● ドップラー速度 $v_D \sim \frac{c}{2E_{Fe}} \sigma_{Fe} =: v_{Fe}$

● v_{Fe} でのケプラー回転の半径 $R_{Fe} := \frac{GM_{NS}}{v_{Fe}^2}$



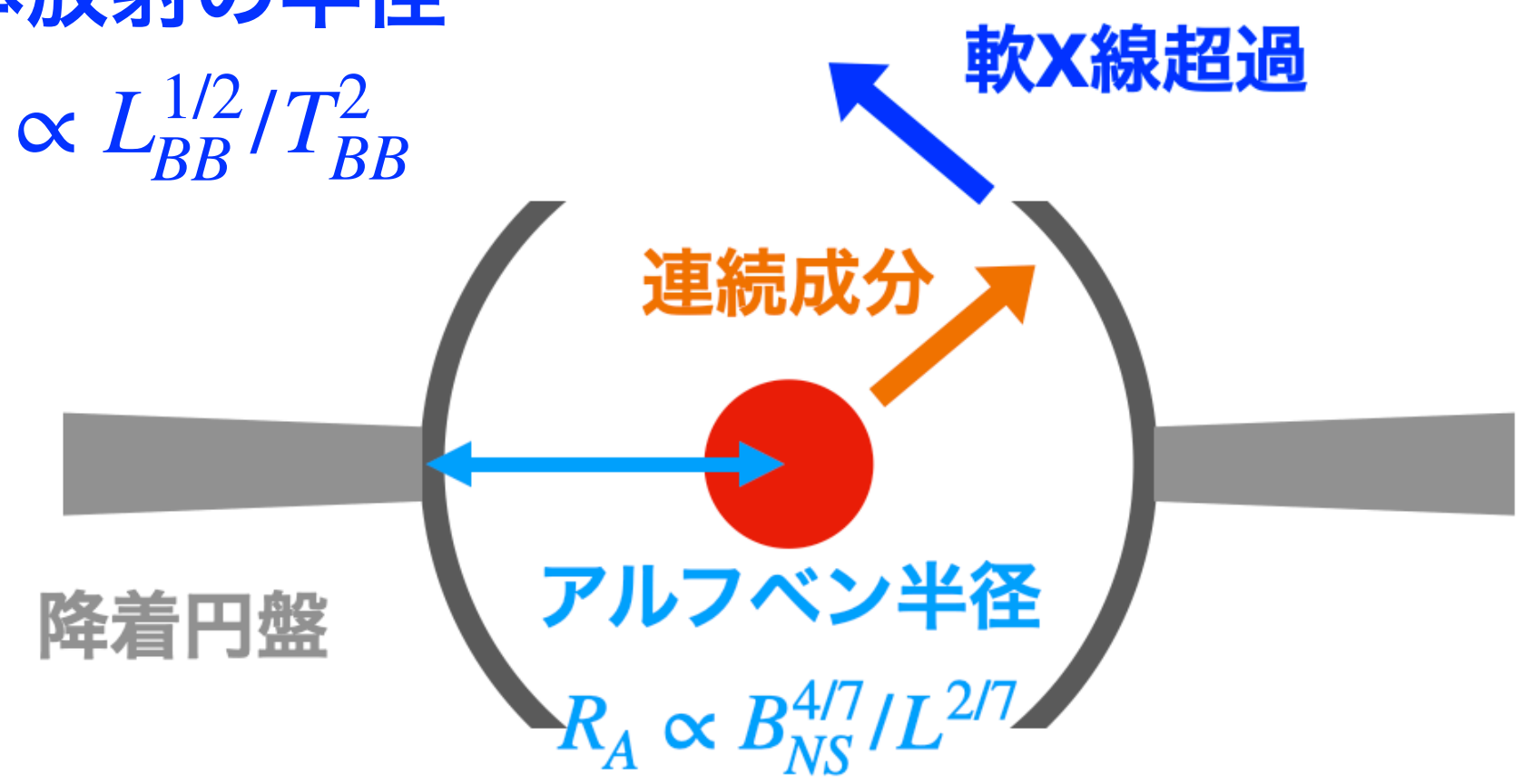
降着型パルサー Her X-1の鉄輝線



アルフベン半径との比較

● 黒体放射の半径

$$R_{BB} \propto L_{BB}^{1/2} / T_{BB}^2$$



● 鉄輝線の輝線幅から求めた半径 R_{Fe}

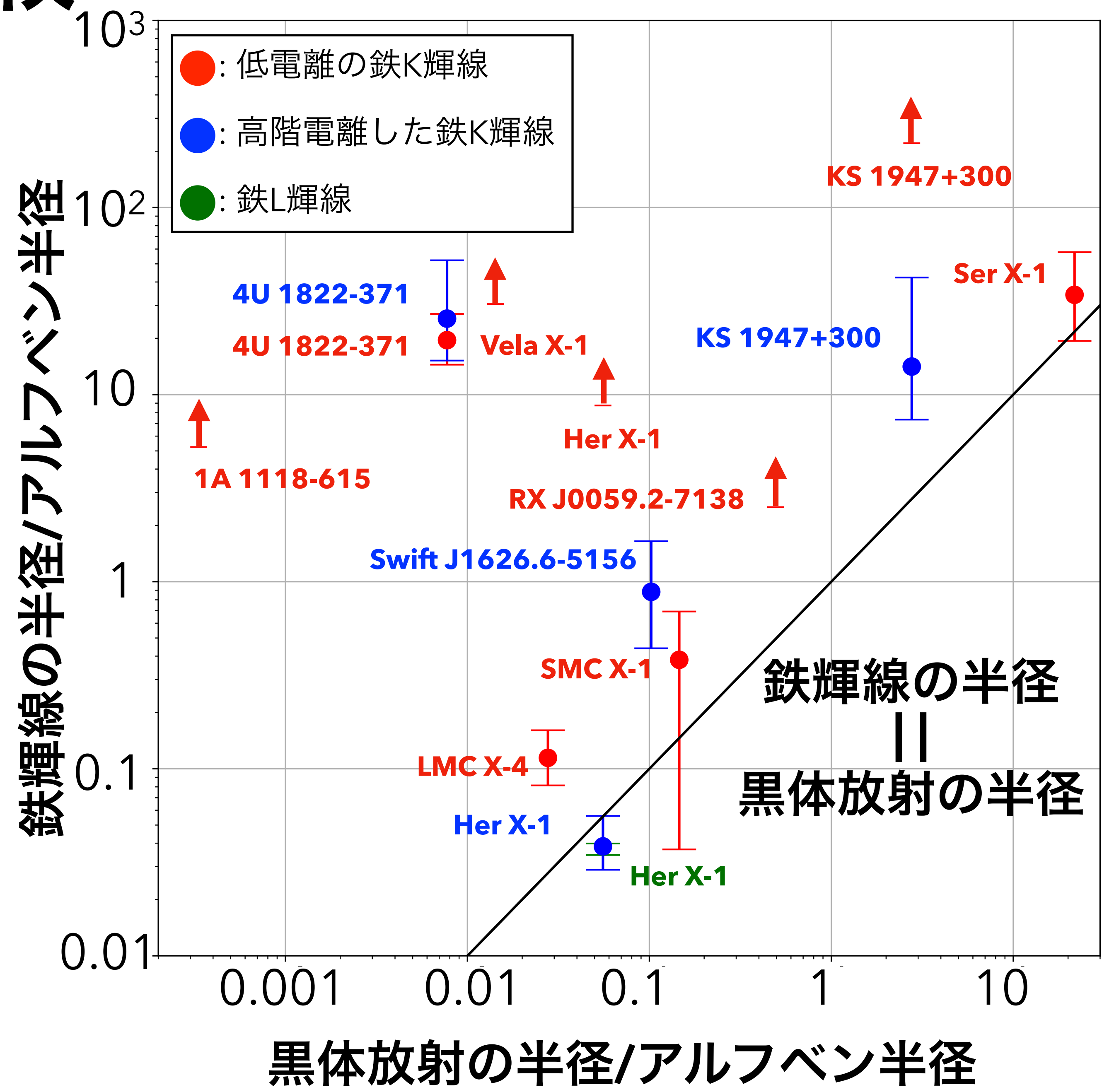
● 輝線の幅を運動学的な要因のみと仮定

- ドップラー速度 $v_D \sim \frac{c}{2E_{Fe}} \sigma_{Fe} =: v_{Fe}$
- v_{Fe} でのケプラー回転の半径 $R_{Fe} := \frac{GM_{NS}}{v_{Fe}^2}$

● 鉄輝線の広がっている ($\gtrsim 0.1$ keV) 天体 (Her X-1, SMC X-1など)

- 鉄輝線はアルフベン半径付近からの放射
- 軟X線超過も被覆率を考えると
同じ領域からの放射であると考えて矛盾ない

- 鉄輝線が狭い天体 (Vela X-1など)
 - 鉄輝線はアルフベン半径より遠方で発生



まとめ・今後の展望

- NICERとSuzaku, XMM-Newtonで観測された鉄輝線が確認できる降着型パルサー27天体で系統的なスペクトル解析を行い, $N_H \lesssim 1.0 \times 10^{22} \text{ cm}^2$ の天体のうち, 11天体で軟X線超過を検出
- F_{BB}/F_{cont} と F_{Fe}/F_{cont} は多くの天体間で同様な値を取ることを確認
 - $F_{BB}/F_{cont} \sim 5 - 15 \%$
 - $F_{Fe}/F_{cont} \sim 0.5 - 1.5 \%$
- 広がった鉄輝線を持つ天体 (SMC X-1, LMC X-4, Her X-1など) で軟X線超過と鉄輝線の両者がアルフベン半径付近で放射されていると示唆する結果を得た. 輝線幅の小さな天体では, 鉄輝線はアルフベン半径よりも外側で放射されていると考えられるが, 放射場所の特定にはパルス位相に分割した解析などを実施したい