

「すざく」が得た大質量星中性子星連星系における 鉄輝線の光電離の徴候

～鉄輝線が降着流の中のどこから出てきているのか～

東京大学 中澤研究室 修士2年

室田 優紀

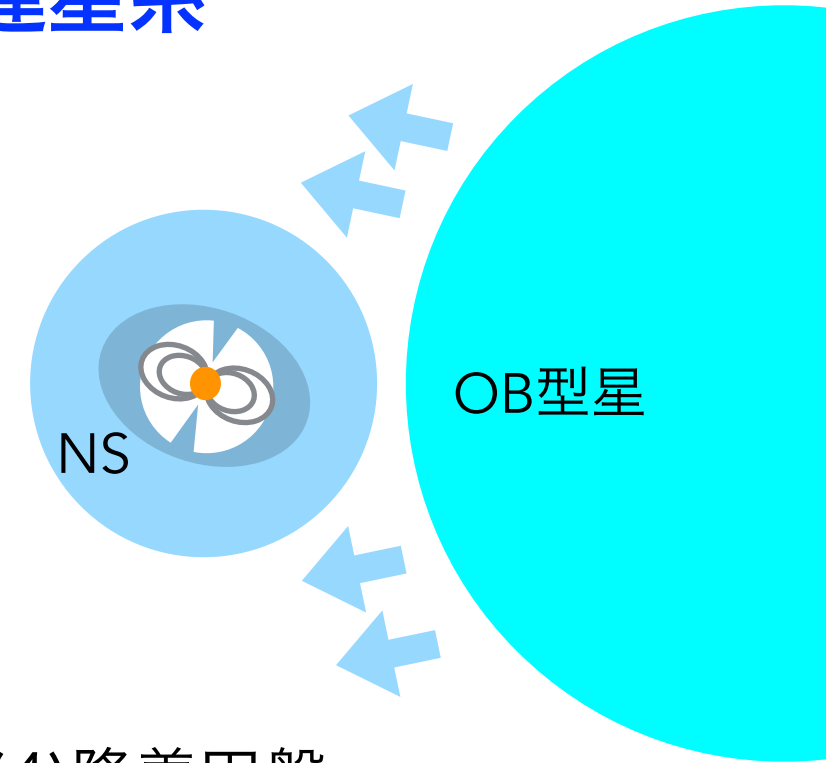
笹野 理、中澤 知洋(東大理)、牧島 一夫(理研)

1. 大質量星中性子星連星系における鉄輝線

降着円盤大研究会

大質量星(OB星)と強磁場(10^{12-13} G)中性子星の連星系

- ▶ おもに星風降着で、中性子星の磁極からX線を放射(パルス)。降着円盤が形成されているかはよくわかっていない。
- ▶ エネルギースペクトルには、磁極からの連続X線に加え、 ~ 6.4 keVに冷たい周辺物質からの蛍光鉄輝線 (Inoue+86, Makishima+86)。その放射源は？
(1) 星風 (2) アルフベン半径に溜まった物質 (3) 主星の表面 (4) 降着円盤
- ▶ 鉄輝線の振る舞いは調べられてきたが「ほぼ中性」と扱われてきた。
⇒ 新たな手がかりとして、光度に伴う電離度の変化。



今回の試み

鉄輝線の光度依存性を調べるため、「すざく」の公開データを解析。

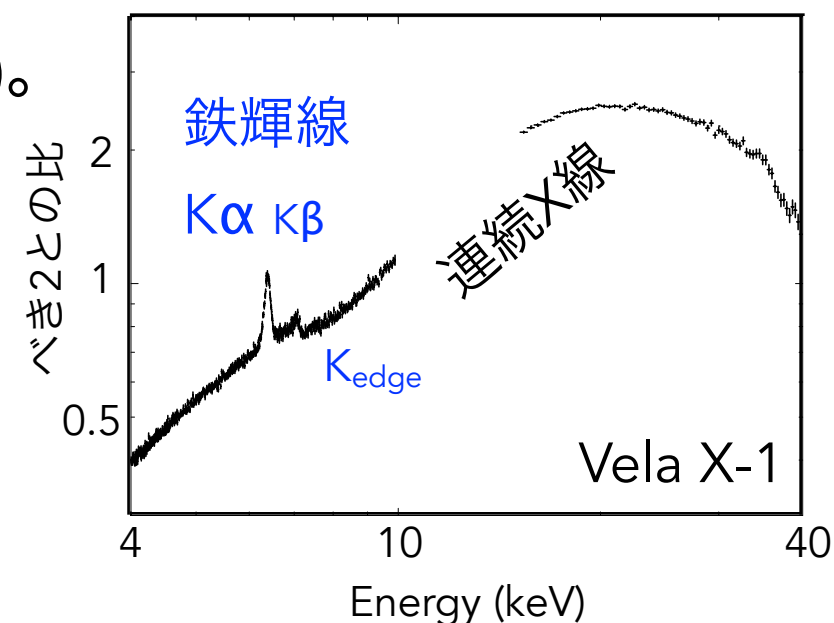
1. 大質量星中性子星連星系における鉄輝線

降着円盤大研究会

大質量星(OB星)と強磁場(10^{12-13} G)中性子星の連星系

▶ おもに星風降着で、中性子星の磁極からX線を放射(パルス)。降着円盤が形成されているかはよくわかっていない。

▶ エネルギースペクトルには、磁極からの連続X線に加え、 ~ 6.4 keVに冷たい周辺物質からの蛍光鉄輝線 (Inoue+86, Makishima+86)。その放射源は？

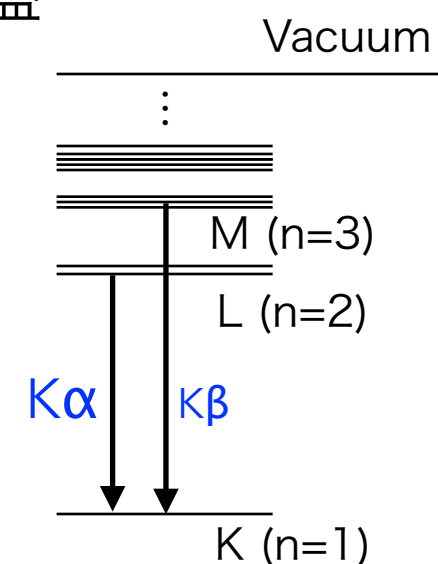


(1) 星風 (2) アルフベン半径に溜まった物質 (3) 主星の表面 (4) 降着円盤

▶ 鉄輝線の振る舞いは調べられてきたが「ほぼ中性」と扱われてきた。
⇒ 新たな手がかりとして、光度に伴う電離度の変化。

今回の試み

鉄輝線の光度依存性を調べるため、「すざく」の公開データを解析。



2. 天体選定

「すざく」の利点

- (1) XISによる ~ 6.4 keVでの優れたエネルギー分解能、正確な較正精度(± 5 eV)。
- (2) 電離に寄与しうる $7.1\text{--}30$ keVの連続成分もHXDによって十分に検出できる。

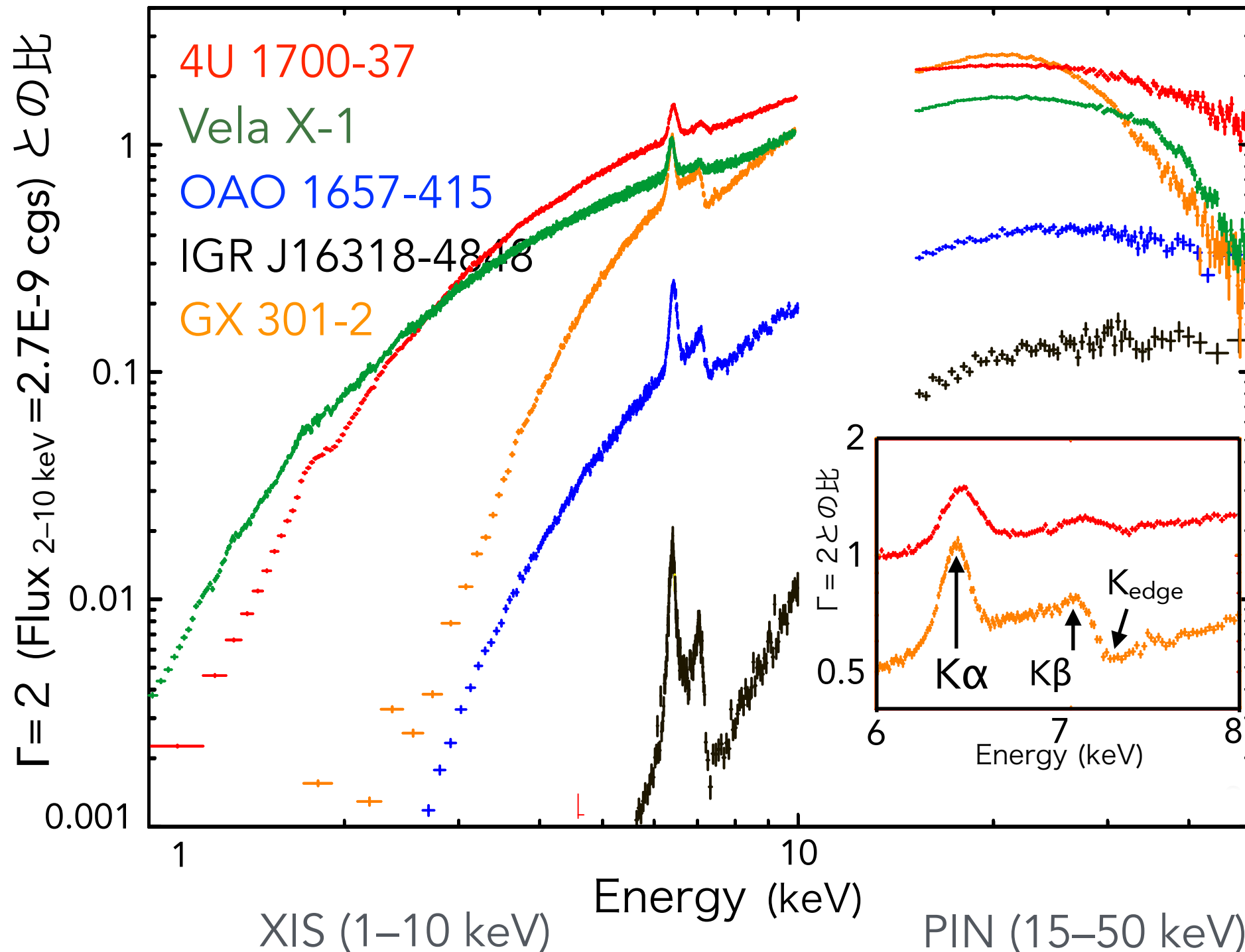
解析天体

~ 6.4 keVに鉄輝線が強く見えており、強度変動が大きい(1–2桁)天体。

天体名	軌道周期	自転周期	磁場強度	光度
4U 1700-37	3.41日	–	$\sim 5 \times 10$	$\sim (3.7\text{--}80) \times 10$
Vela X-1	8.96日	283秒	$\sim 2 \times 10$	$\sim (1.5\text{--}48) \times 10$
OA O 1657-415	10.5日	38秒	–	$\sim (2.3\text{--}17) \times 10$
IGR J16318-4848	2-3日	–	–	$\sim (1.8\text{--}5.1) \times 10$
GX 301-2	41.5日	696秒	$\sim 4 \times 10$	$\sim (3.2\text{--}5.2) \times 10$
Cen X-3	2.09日	4.8秒	$\sim 3.5 \times 10$	$\sim (1.0\text{--}69) \times 10$

3. 全時間平均スペクトル

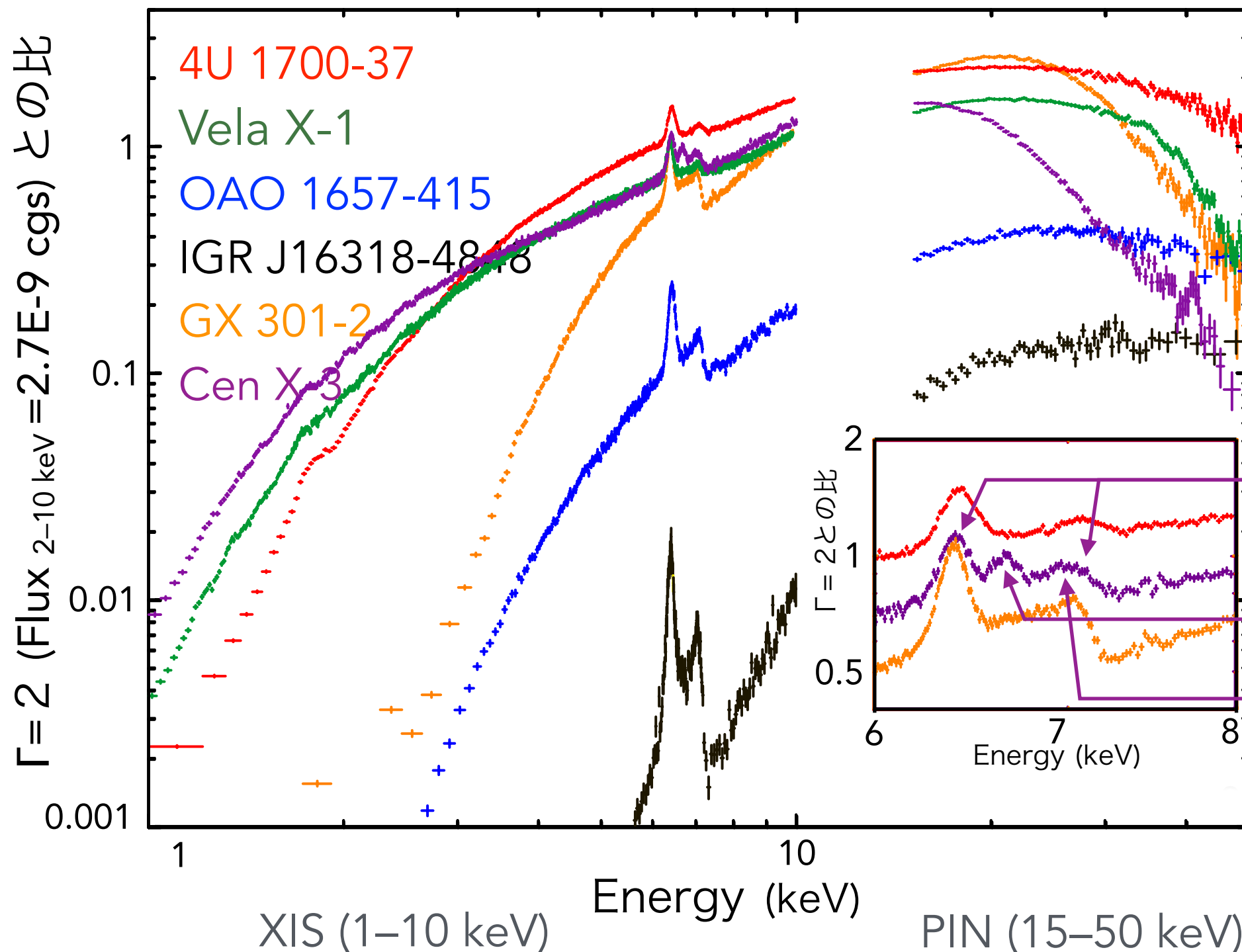
降着円盤大研究会



- 「すざく」のXIS及びHXD PINによって、1–50 keVまで有意に検出。
- X線パルサーの特徴である強い吸収や、ハードなべき成分に加え、強い鉄輝線 ($K\alpha, K\beta$) 及び K_{edge} が、はっきりと見える。

3. 全時間平均スペクトル

降着円盤大研究会



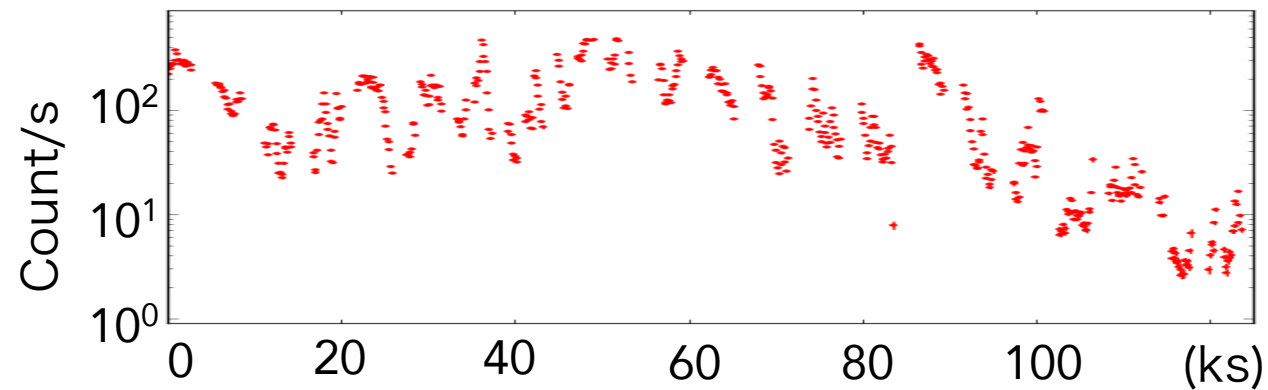
- ・「すざく」のXIS及びHXD PINによって、1–50 keVまで有意に検出。
- ・Cen X-3 は光度が高く
中性 : $\sim 6.4 \text{ keV}$
+ $\sim 7.05 \text{ keV}$
He-like : $\sim 6.7 \text{ keV}$
H-like : $\sim 6.9 \text{ keV}$
と、3本輝線が見える。
 $\sim 6.4 \text{ keV}$ に着目。

4. ライトカーブ

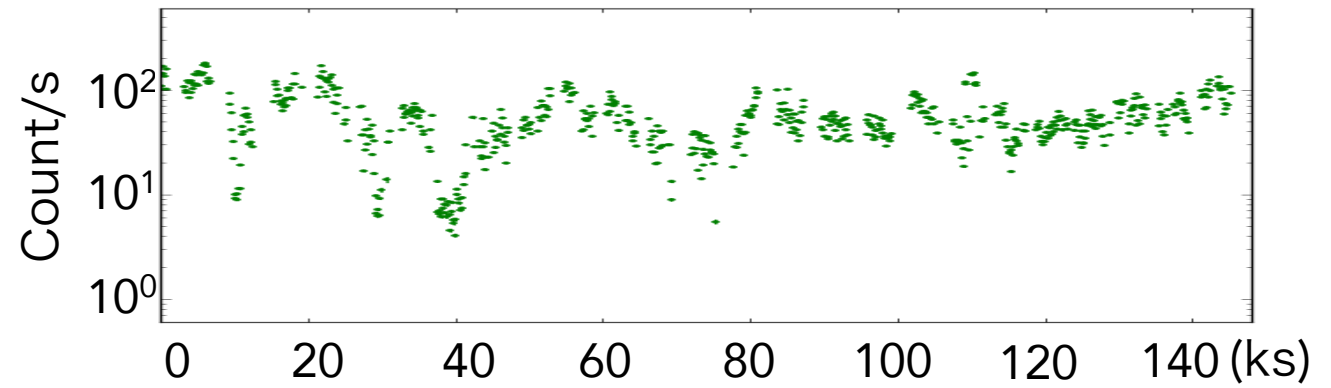
XIS 1-10 keV、1 bin = 128 s

降着円盤大研究会

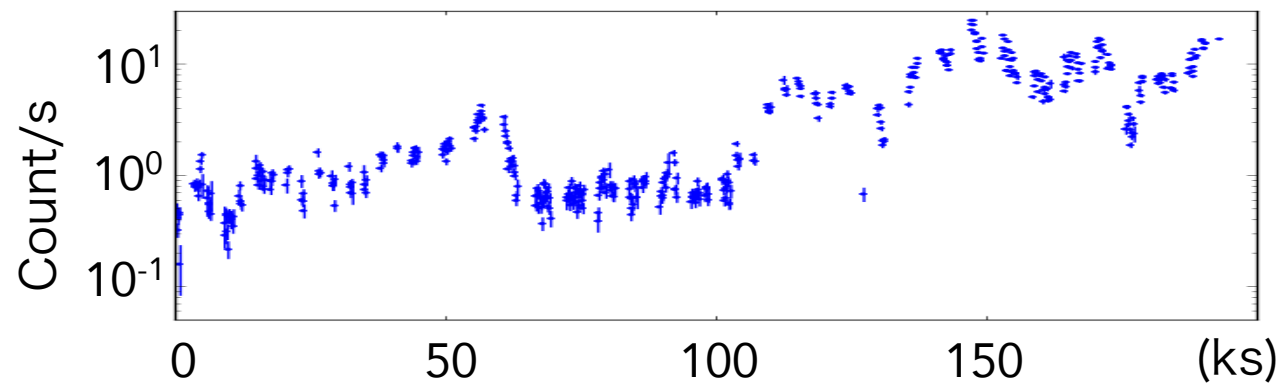
4U 1700-37



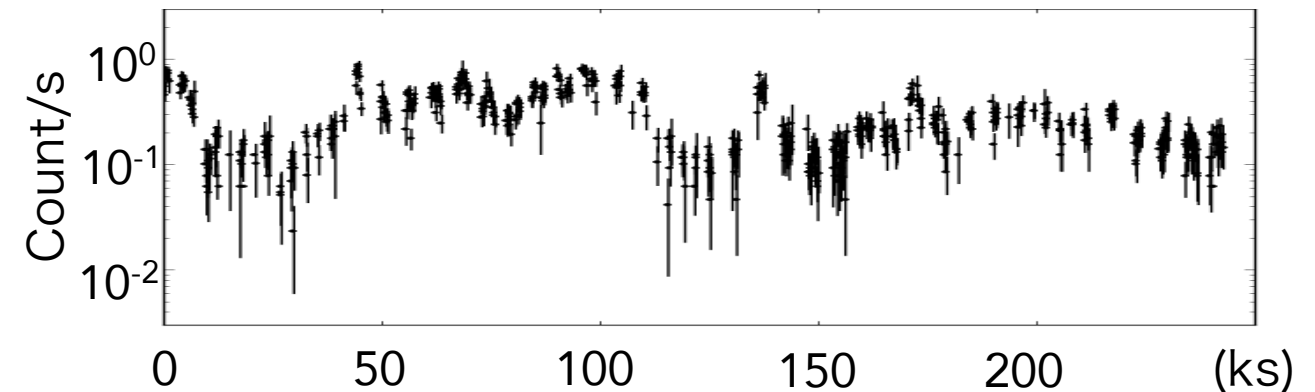
Vela X-1



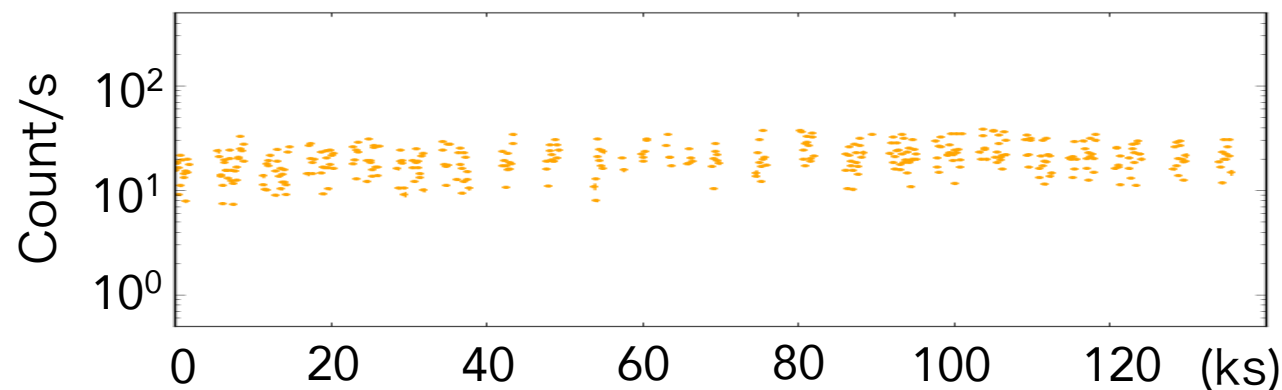
OA0 1657-415



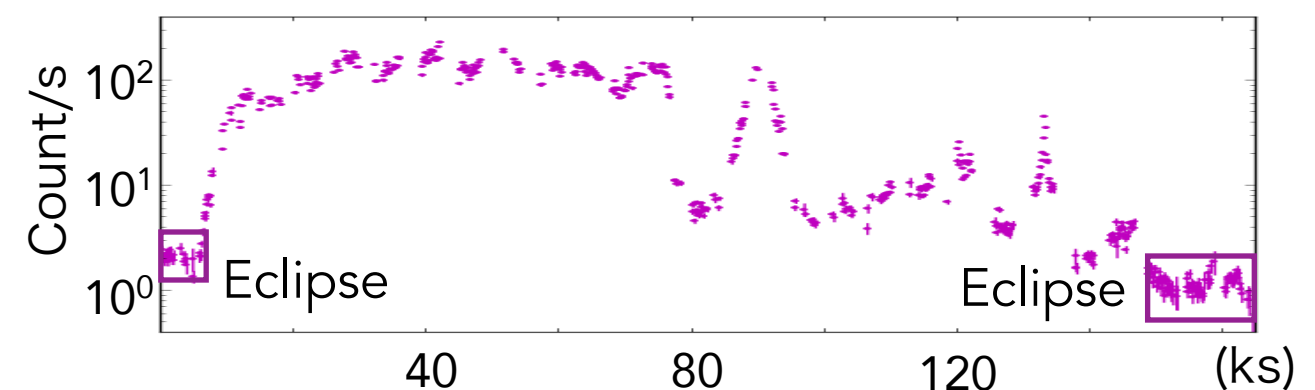
IGR J16318-4848



GX 301-2



Cen X-3



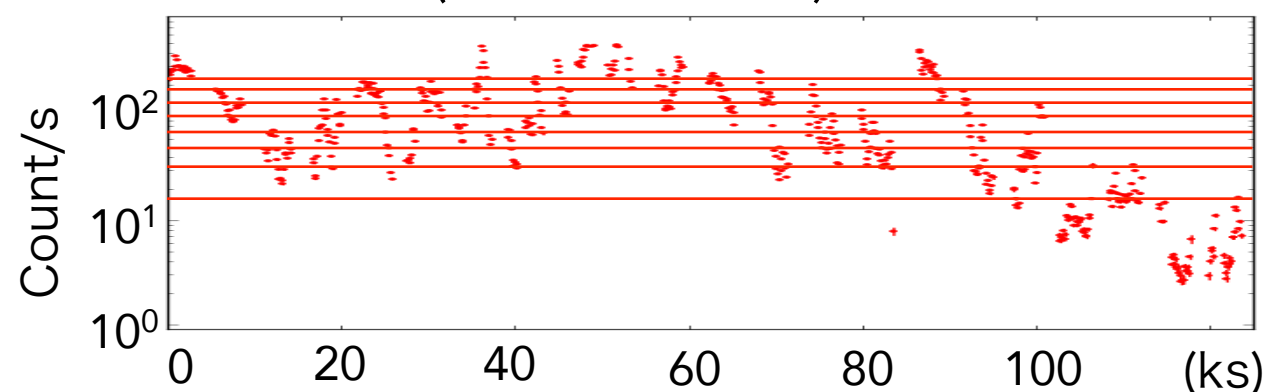
それぞれ変動が見えており、 $\sim(100-1000)$ sのフレアが見られる。

4. ライトカーブ

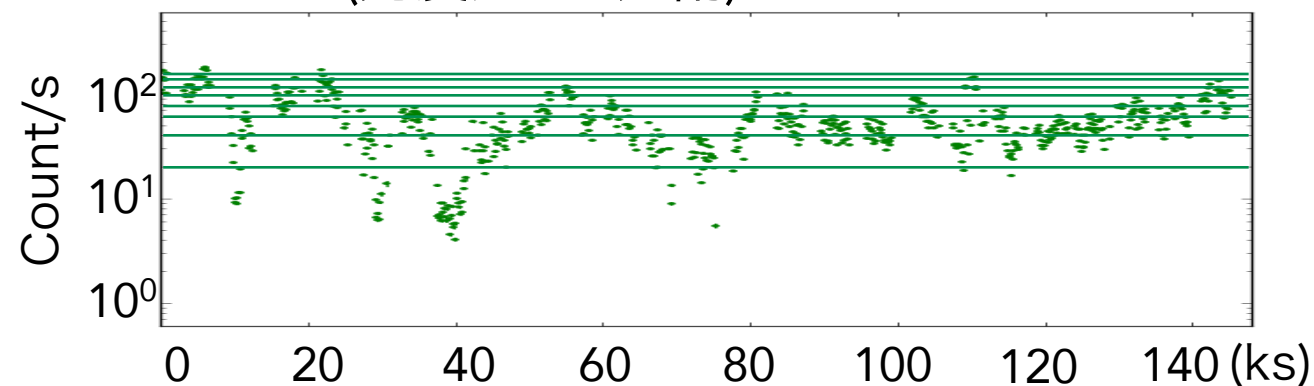
XIS 1–10 keV、1 bin = 128 s

降着円盤大研究会

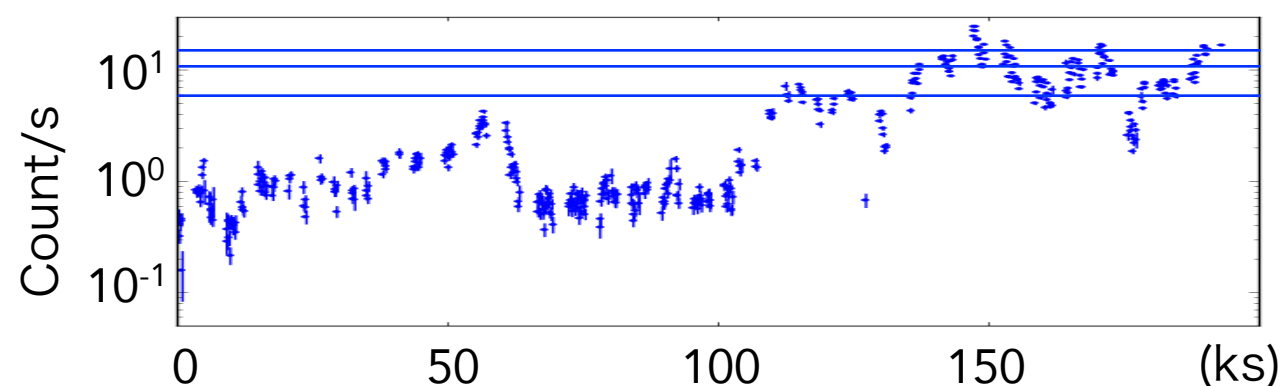
4U 1700-37 (光度別に9分割)



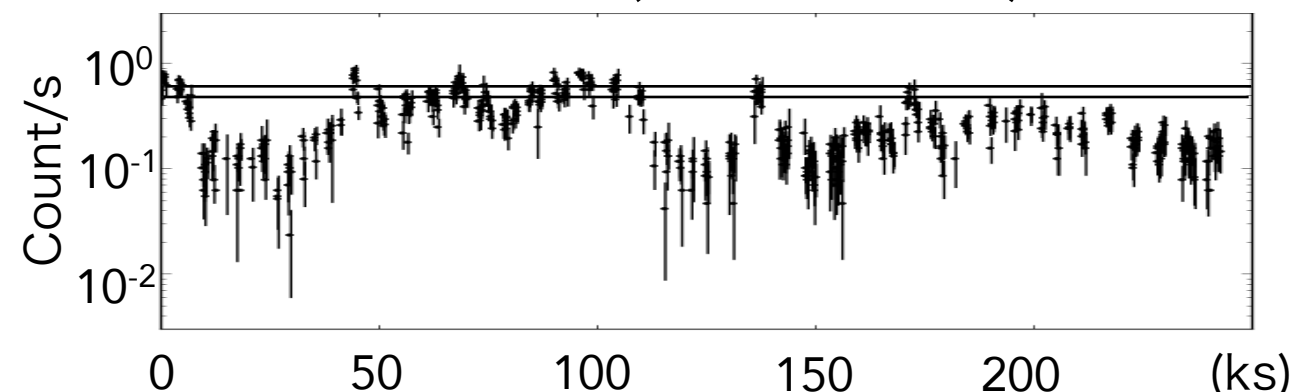
Vela X-1 (光度別に8分割)



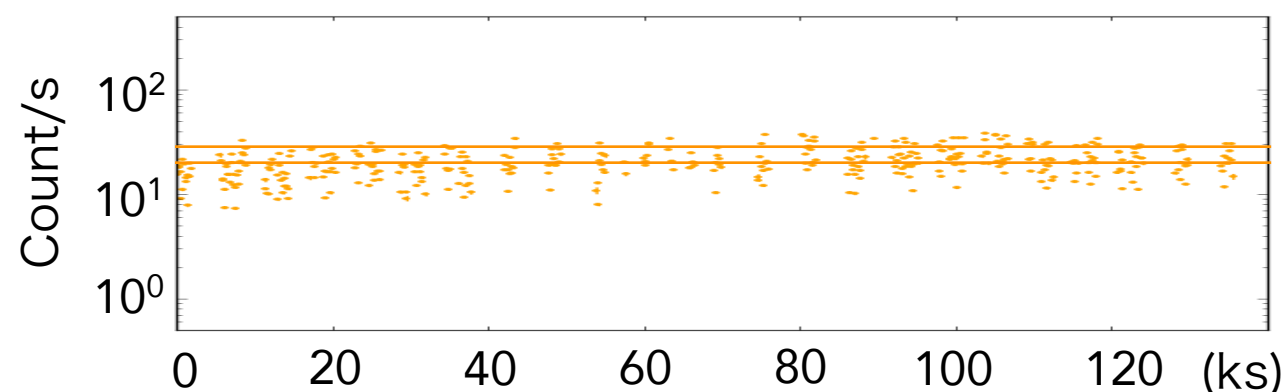
OA0 1657-415 (光度別に4分割)



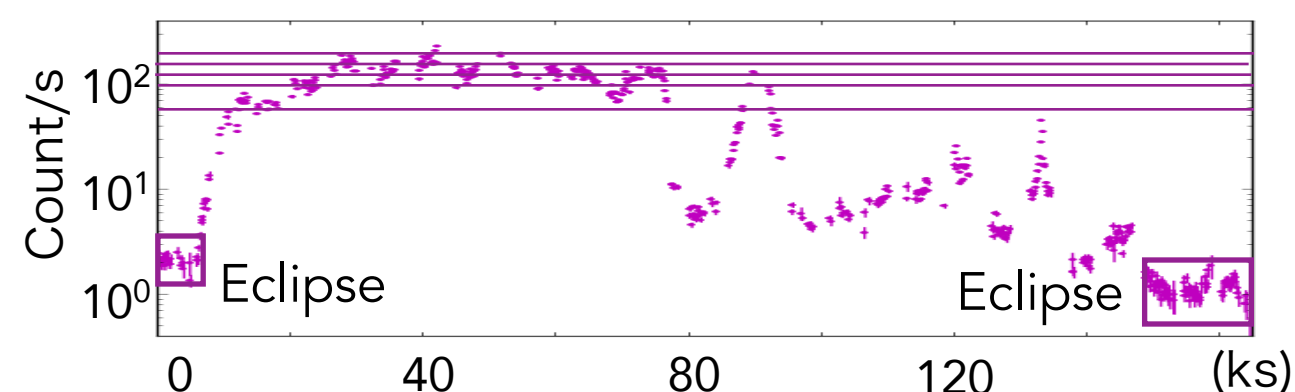
IGR J16318-4848 (光度別に3分割)



GX 301-2 (光度別に3分割)



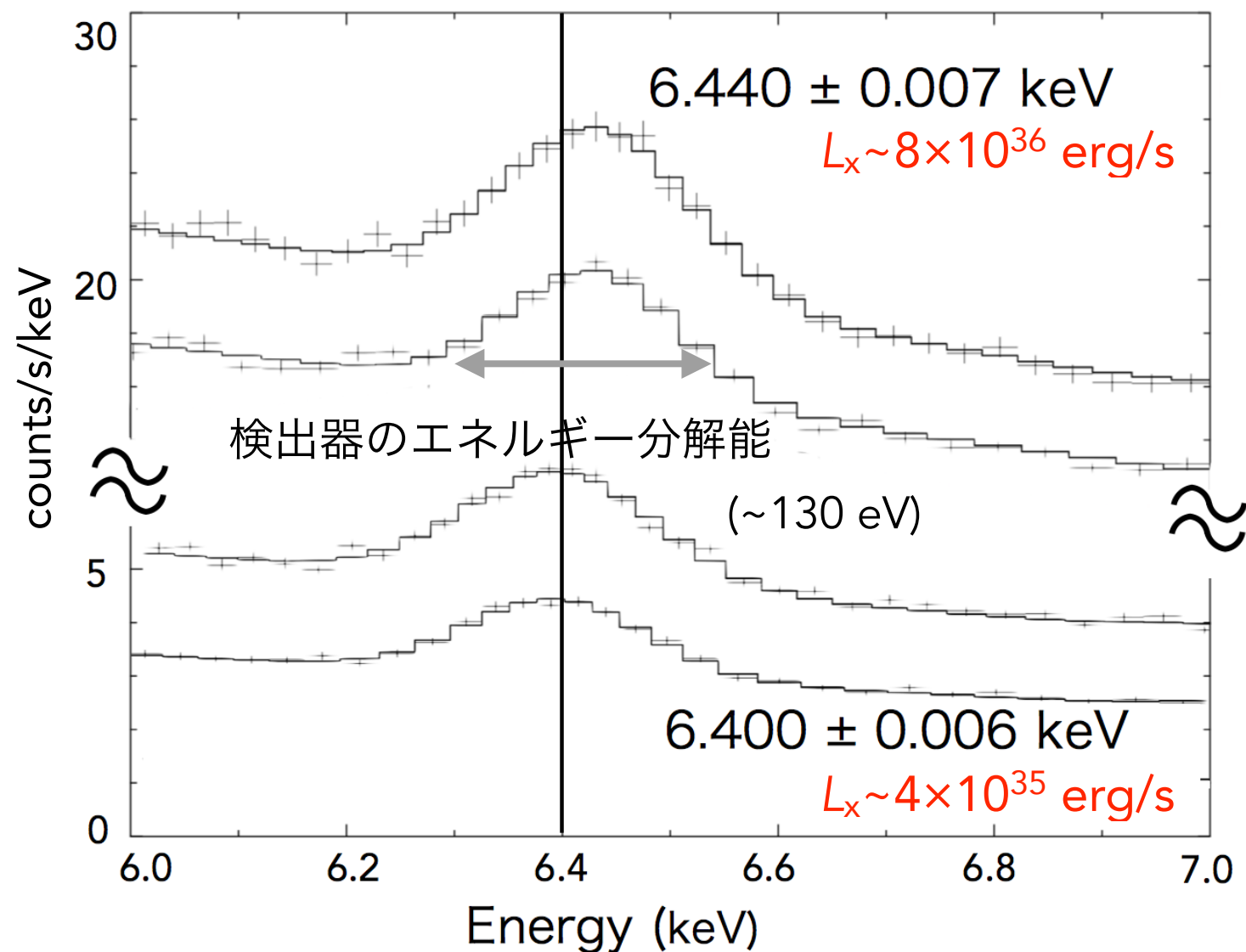
Cen X-3 (光度別に6分割)



光度別にスペクトルを作成し、~6.4 keV鉄輝線の中心エネルギーの変化を追った。

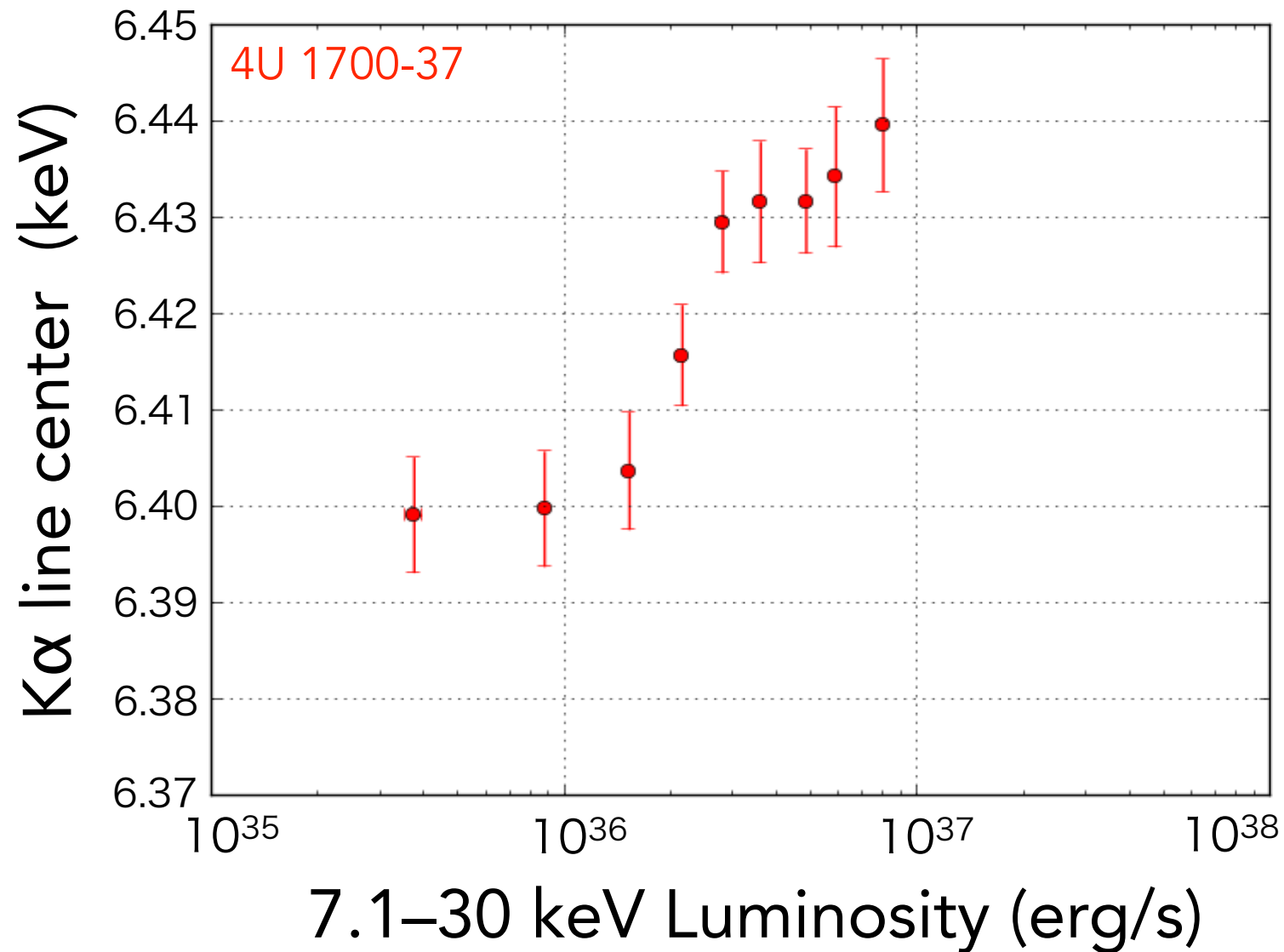
5. 鉄輝線の光度依存性

4U 1700-37の光度別スペクトル (光度別に9分割したうちの4つを重ねている)

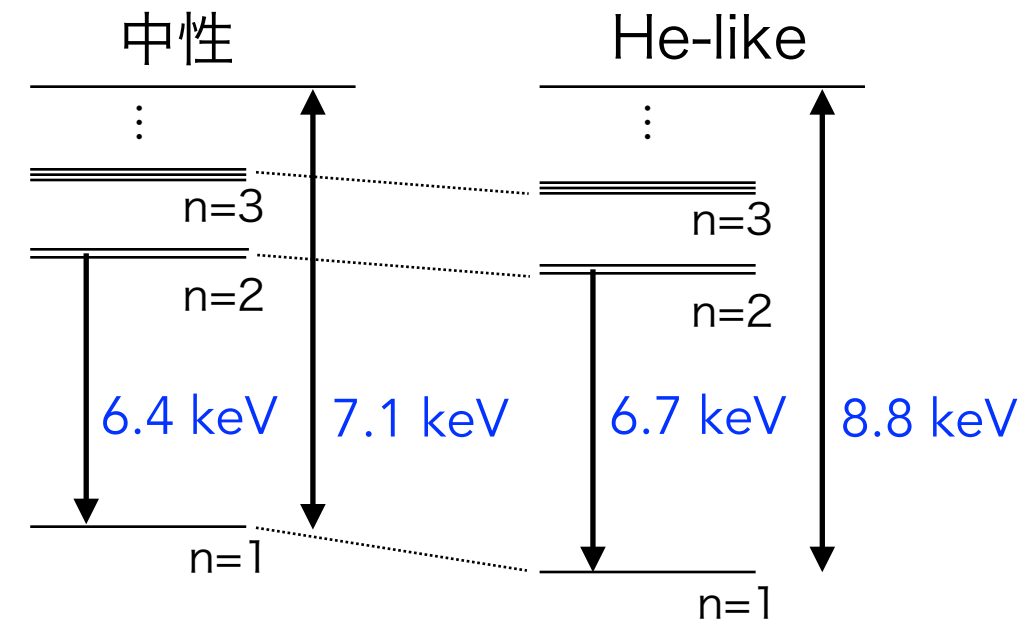


- 4U1700-37 では光度が増すにつれ、鉄K α 輝線の中心値が上昇しているように見える。
→光電離の徴候。

5. 鉄輝線の光度依存性

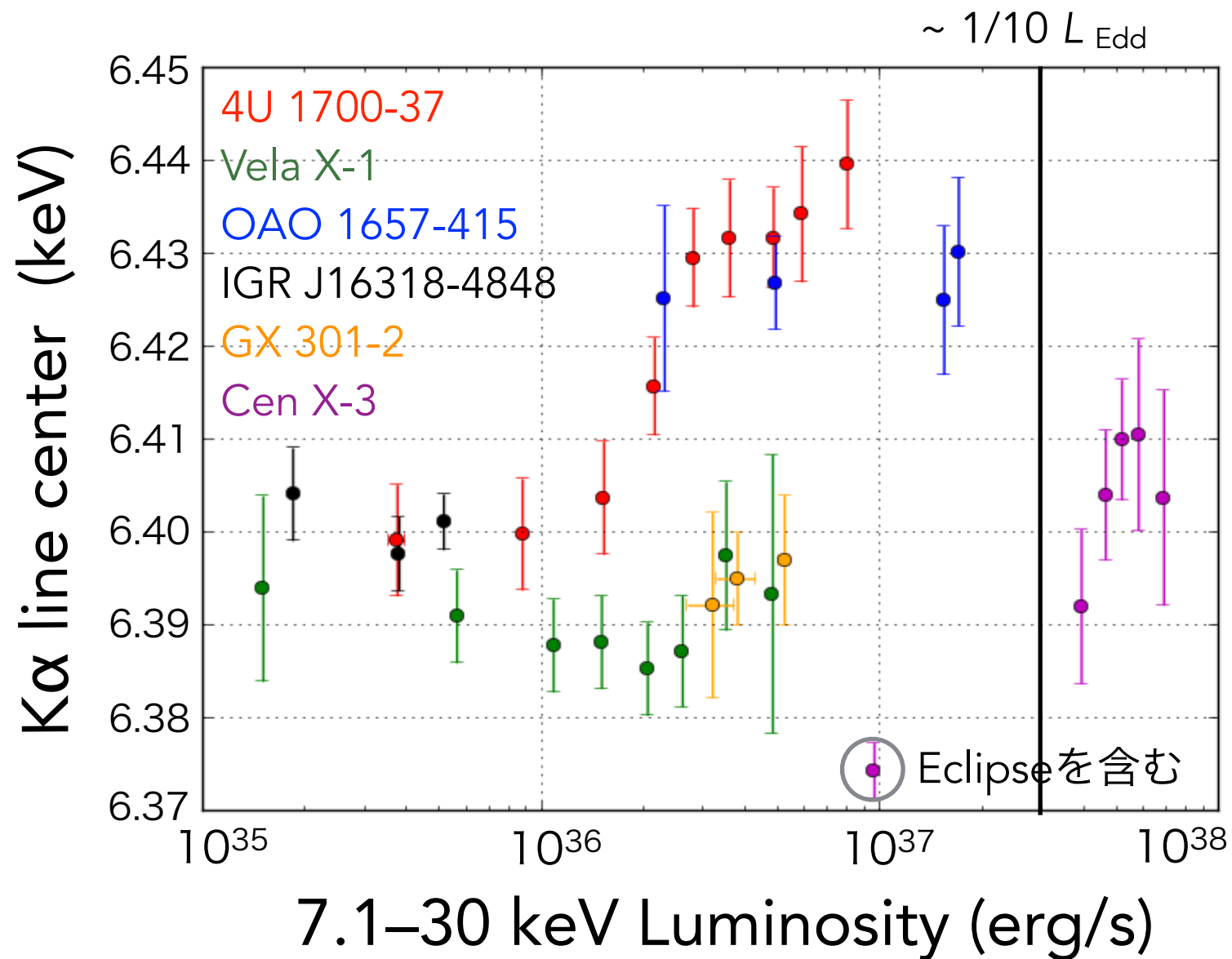


- 4U1700-37 では光度が増すにつれ、鉄Kα輝線を中心値が上昇しているように見える。
→光電離の徴候。



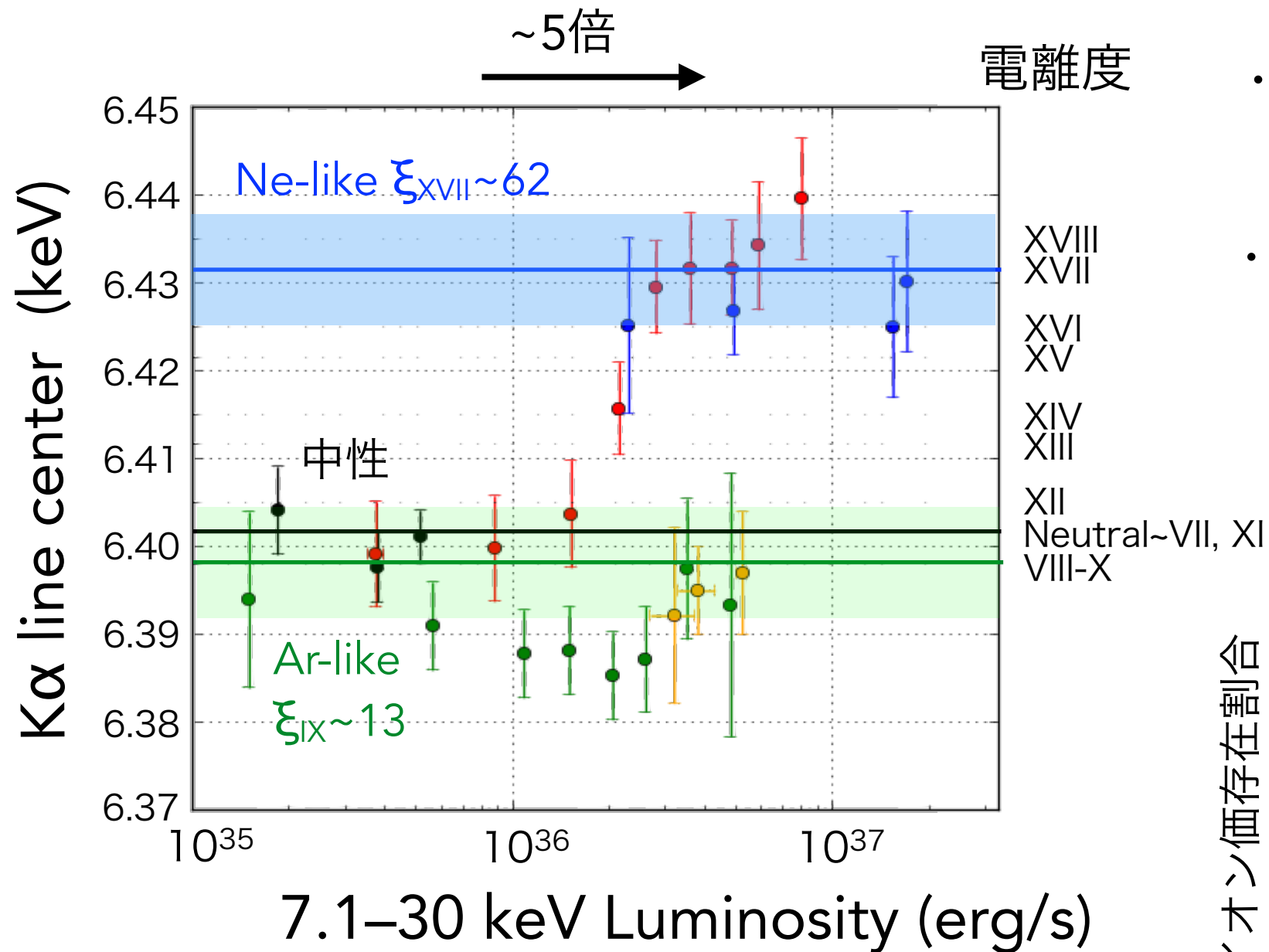
電離が進むと外殻電子の
静電遮蔽効果が減る。

5. 鉄輝線の光度依存性



- 中心エネルギーに光度依存性が見られるのは4U 1700-37だけだが、他天体も光電離と考えて矛盾しない。
- Cen X-3は光度が高いが、6.4 keV成分には電離が見られない。
Eddington 光度比 > 0.1
→おもに降着円盤起源？

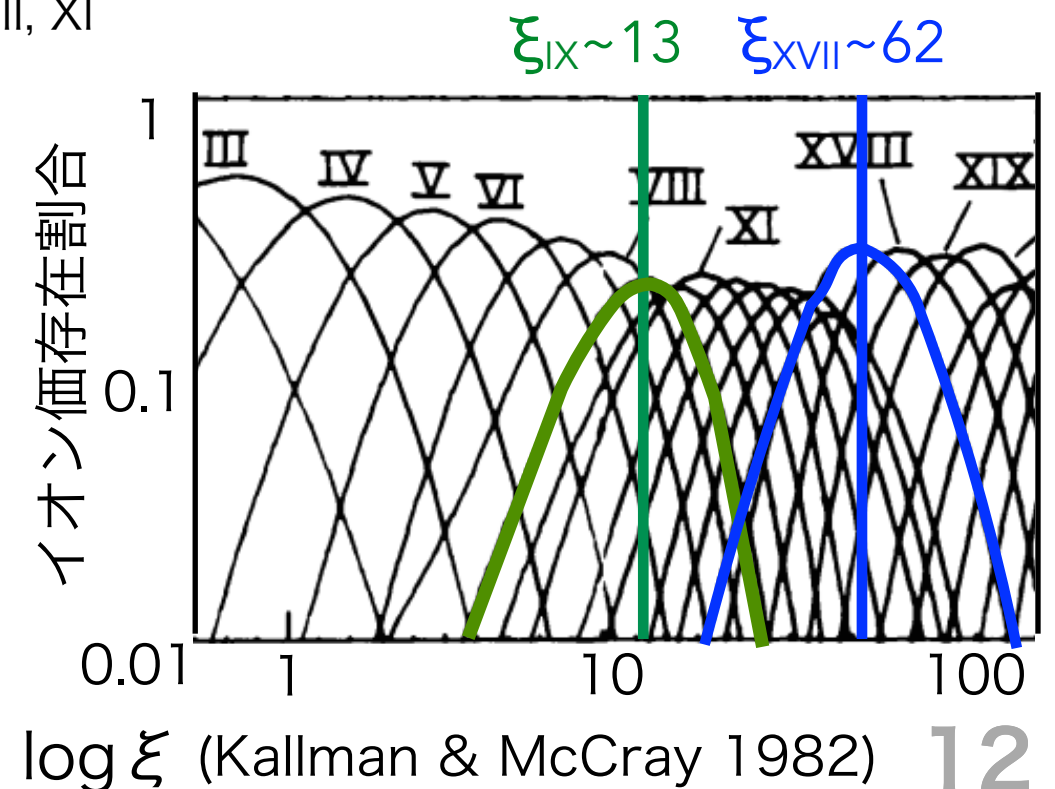
5. 鉄輝線の光度依存性



鉄輝線の中心エネルギーの変化は、
光電離で説明できる。

- ・ 中性から電離して Ne-like で安定となる様子が見られる。
- ・ どこまで電離が進んでいるかの指標：電離パラメータ $\xi = \frac{L}{nr^2}$

電離度の異なる鉄イオンの相対的割合



6. 議論

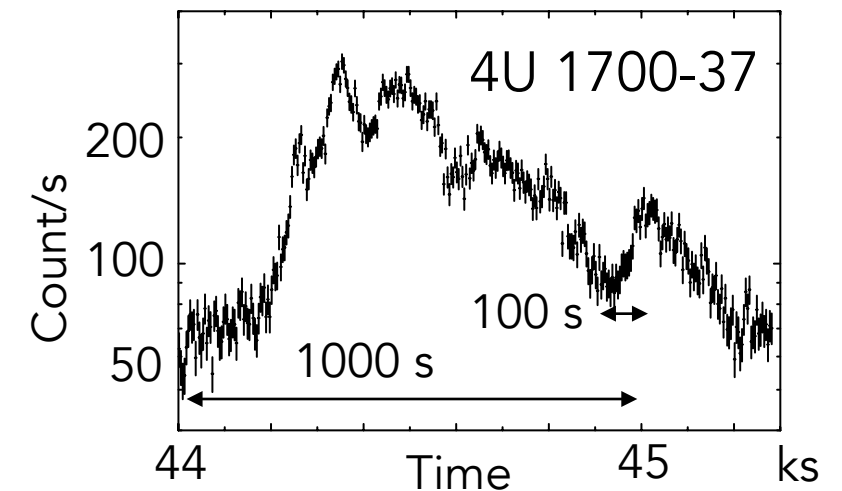
電離度の変化の理由は？

- ・ 明るいときほど ξ が大きくなるのは、光電離が進んでいる証拠。
- ・ しかし、降着物質の幾何が一定だと、 $L \propto n$ なので ξ は一定で光電離は進まない。
- ・ L と n が連動しない機構が必要。

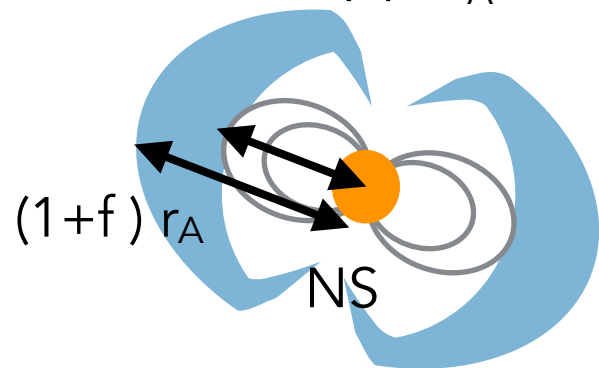
$$\xi = \frac{L}{nr^2}$$

光電離が進む現象の解釈

- (1) 非一様な星風 $\rightarrow$ 一般に ξ が大きくなりすぎる。
- (2) アルフベン半径に大量な物質が滞留し、そのごく一部が突発的に降着することで L が変化？ (Shakura+2013)



アルフベン半径 r_A



$r = r_A$ から $(1+f)r_A$ の球殻が、立体角 Ω を覆っているとして、フレア1個分の質量を蓄えると密度は $n \sim 1.3 \times 10^{14} / (f \Omega)$ 個/cm³

Ne-like の鉄輝線の ξ から求まる密度

$$n = \frac{L}{\xi r^2} = 3.3 \times 10^{17} \text{ 個/cm}^3 \quad (r \sim r_A \sim 4.4 \times 10^8 \text{ cm})$$

$\Rightarrow$ アルフベン半径の周りの高密度な物質でも説明できる。

6. 議論

電離度の変化の理由は？

- ・ 明るいときほどとが大きくなるのは、光電離が進んでいる証拠。
- ・ しかし、降着物質の幾何が一定だと、 $L \propto n$ なのでとが一定で光電離は進まない。
- ・ L と n が連動しない機構が必要。

$$\xi = \frac{L}{nr^2}$$

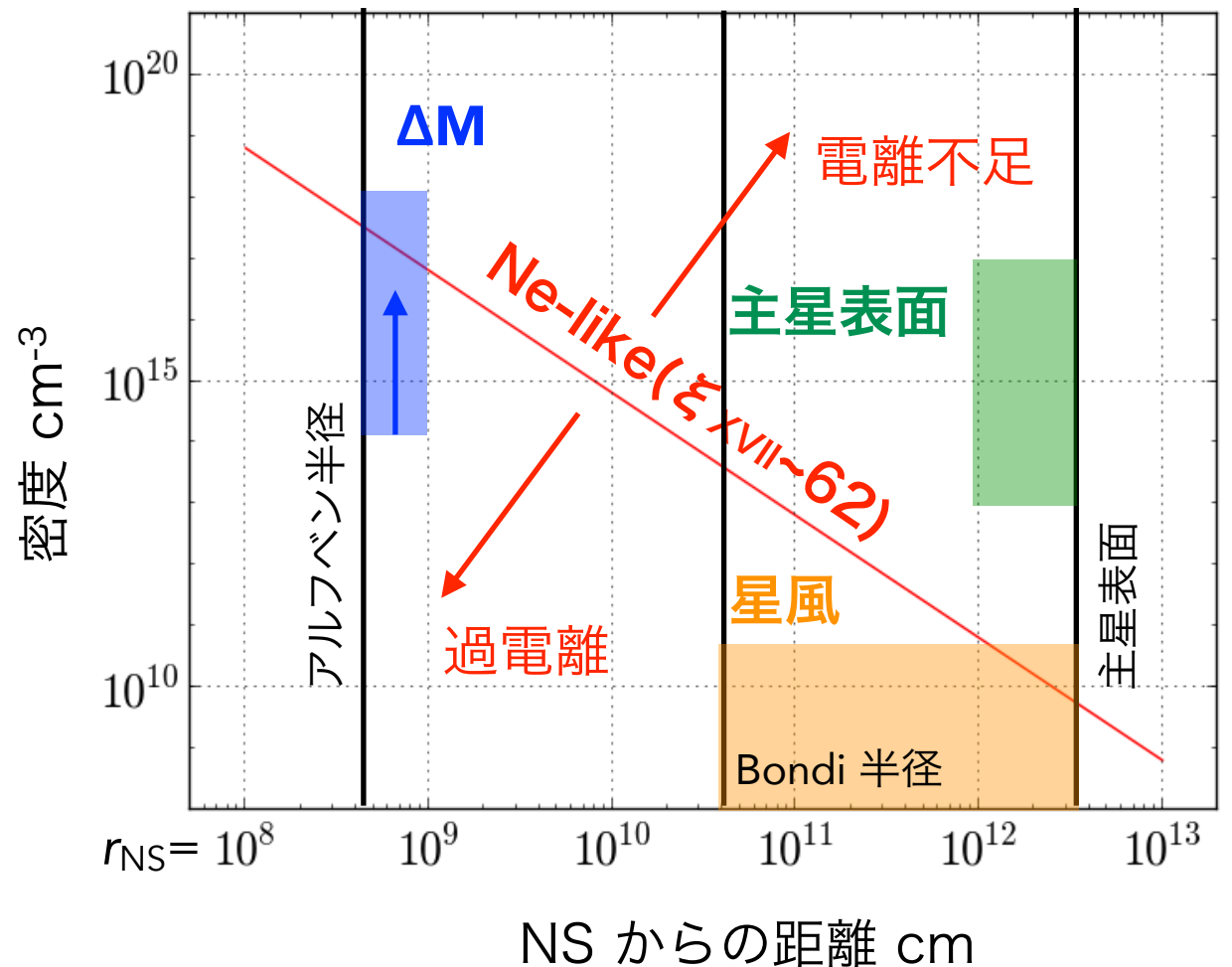
光電離が進む現象の解釈

~6.4 keV鉄輝線の発生場所のまとめ(右図)。

発生場所をさらに絞り込むには？

→ASTRO-Hで鉄輝線のドップラーを測る。

- ・ 星風ならば、星風速度での広がり。
- ・ アルフベン半径付近の物質ならば、共回転速度でのWピーク。



- 大質量星中性子星連星系 4U1700-37、Vela X-1、OAO1657-415、IGR J16318-4848、GX 301-3、Cen X-3の「すざく」公開データを解析した。
- 4U 1700-37は、X線光度が大きくなると、 $K\alpha$ 鉄輝線が高エネルギー側にシフトしてNe-like(~ 6.4315 keV)で安定となる様子が見られた。
- 他のX線パルサーでも、光度に対する鉄輝線エネルギーの関係は、4U 1700-37のものと矛盾しない。→ほぼ共通に、蛍光鉄輝線の発生体に光電離が働く。
- アルフベン半径に滞留した物質が、中性鉄輝線の発生源の1つとして考えられる。
- 濃い星風(ex.GX301-2)や降着円盤(ex.Cen X-3)からの寄与も十分にありうる。