

# 「すざく」衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS の SCF 効果

立教大学理学研究科

吉田裕貴

## 1. Abstract

すざく衛星搭載 X 線 CCD カメラ XIS が輝線を持つ明るい天体を観測したデータを解析する際に重要となる、Self-Charge-Filling (SCF) 効果について報告する。SCF 効果により、エネルギースペクトルを抽出する領域内の 1 フレーム単位ピクセルあたりのイベント数 (イベント密度) に相関して輝線の中心エネルギーが異なってしまいます。我々はすざくが観測した白鳥座 X-3 のデータから抽出したスペクトルを用いて、SCF 効果を実証すると共にその補正方法を提案する。また、Spaced-row Charge Injection を適用して観測したデータにおける SCF 効果の調査も行った。

## 2. Introduction

軌道上での放射線損傷により、XIS の電荷転送効率 (CTE) は打ち上げ後徐々に劣化し続けている。そこで 2006 年 11 月から、人工的に注入した電荷で先に放射線損傷を埋めて天体の起源の電荷の欠損を防ぐ Spaced-row Charge Injection (SCI) (Fig.1) を実施する事で CTE の劣化を抑えている。

我々は SCI を適用せずに観測した明るい天体のデータを解析し、画像中心付近では、画像周辺よりも同じ輝線の中心エネルギーが高くなる事を発見した。これは先に転送された電荷が放射線損傷を埋め、後から続いて転送される電荷が放射線損傷に捕まらなかったと考えれば説明できる。この天体起源による電荷注入を Self-Charge-Filling (SCF) 効果と名付けた。この SCF 効果のために、輝線の中心エネルギーが、エネルギースペクトルを抽出する領域内のイベント密度によって異なり、見かけ上輝線幅が太くなってしまい、中心エネルギーも信頼出来なくなってしまう。以下では SCF 効果の実証と共に補正方法を示す。

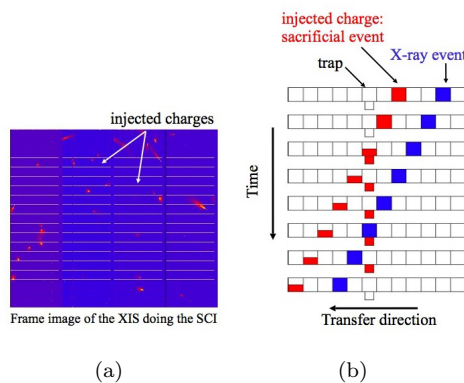


Fig.1 Principle of Spaced-law Charge Injection

## 3. SCF Effect in Cygnus X-3

すざく衛星が観測した白鳥座 X-3 のデータを解析して SCF 効果を実証する。白鳥座 X-3 は、大質量の WR 星と強力な X 線源であるコンパクト星の 4.8 時間の公転周期を持つ連星系である。XIS での観測は、1/4window モードと 0.5s バーストモードを付加して行われた。本観測前にも SCI は実施されていたが、直前に XIS2 に不具合が生じた影響で、本観測時には SCI は適用されなかった。

白鳥座 X-3 は、Fig.2 のように豊富な輝線を持つので、SCF 効果を調べるのに適している。しかし 4.8 時間という短い公転周期の間に強度が大きく変動し、公転位相によって輝線の性質 (中心エネルギーと輝線幅) が変わる可能性がある。そこで解析のときには Fig.3 のように 4.8 時間の公転周期を 5 つに分割して、5 つのデータセットを作成した。

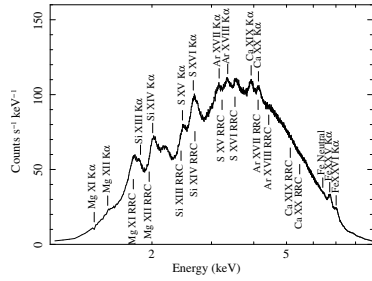


Fig.2 白鳥座 X-3 のエネルギースペクトル

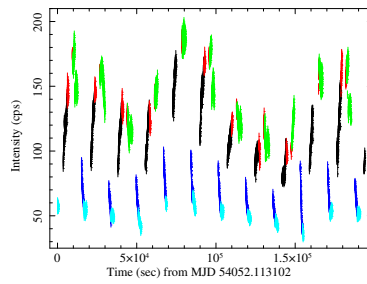


Fig.3 白鳥座 X-3 のライトカーブ

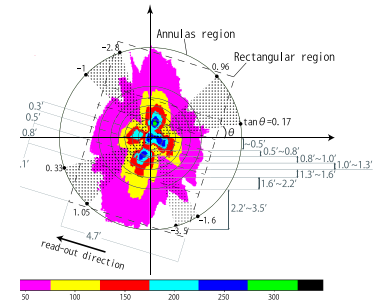


Fig.4 白鳥座 X-3 のイメージとエネルギースペクトルの抽出領域

5つのデータセット毎に、Fig.4のような7つの円環領域 (Fig.4中の実線) からエネルギースペクトルを抽出して、各輝線の中心エネルギーを求めた。そのうち FeXXV K $\alpha$  線の中心エネルギーを縦軸とし、横軸をイベント密度 (Events/exposure/pixel) としたグラフを Fig.5 に示した。我々は輝線の中心エネルギーがイベント密度と相関して、最大約 50eV 異なる事を確認した。これは SCF 効果を予期させる結果であった。電荷占有時間がフレーム転送時間 (~24ms) よりも十分に長ければ、SCF 効果は局所的なイベント密度よりも、転送方向に沿った全体のイベント密度に依存するはずである。そこで Fig.4 のような転送方向に沿って長い辺を持つ矩形領域 (Fig.4中の点線) で中心エネルギーとイベント密度の相関を調べた。しかしわずかな相関しか見られなかった。これは電荷占有時間はフレーム転送時間よりも短く、トラップを埋めたすぐ後に転送される電荷だけが SCF 効果を受ける事を意味している。

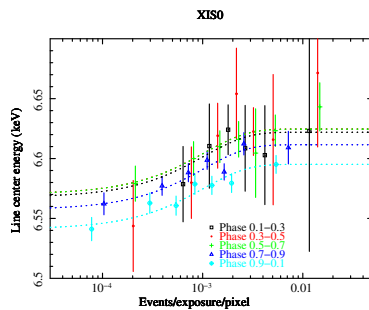


Fig.5 円環領域におけるイベント密度と FeXXV K $\alpha$  線の中心エネルギーの関係

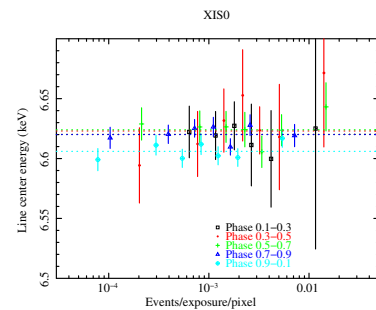


Fig.6 Eq.1 による補正後のイベント密度と FeXXV K $\alpha$  線の中心エネルギーの関係

#### 4. Correction Method

SCF 効果は確率過程であることを考慮して、イベント密度が高い極限での真のエネルギー  $E_t$ 、低い極限でのエネルギー  $E_0$ 、SCF 効果の強さを表す  $\varepsilon$  の3つの変数を用いて、検出したエネルギー  $E$  が Eq.1 で表されると仮定する。ここで  $x$  はイベント密度を表す。データセットごとに  $E_t$  は異なってもよいが、 $\varepsilon$  と  $(E_t - E_0)/E_0 = C$  は同じ値になると仮定する。

$$E = E_0 + (E_t - E_0)(1 - \exp(-\varepsilon x)) \quad (1)$$

まず検出器ごとにイベント密度の広い範囲を覆っている (0.3-0.5) と (0.5-0.7) の位相を用いて  $\varepsilon$  と  $C$  を決めたところ、どれも誤差の範囲内で一致していた。そこで  $\varepsilon$  と  $C$  の平均値を用いてデータセットごとにフィッティングし  $E_t$  (図5中の点線) を求め、各点を補正したものを図5に示した。補正した結果、エネルギーの違いを約 20eV 以下にまで抑えることに成功した。SCF 効果を補正しても、エネルギーゲインの絶対値は決定できない。そこで較正線源である  $^{55}\text{Fe}$  のイベントで  $\varepsilon$  と  $C$  を使って  $E_t$  を求めた。最終的に、 $E_t = 5.895\text{keV}$  となるように、XIS0,3 のゲインを変更した。XIS1 は補正後の XIS0,3 と比較して矛盾しなかったため、ゲインは変更しなかった。

## 5. Result

図6に3つの検出器を足し合わせた、位相0.5-0.7におけるFe-K $\alpha$ 線周辺のエネルギースペクトルを示す。補正の前後で輝線が細く鋭くなったことがわかる (Fig.7)。また、中性鉄輝線をはっきりと確認できる。但し3つの検出器を足し合わせるために、補正前のスペクトルにも $^{55}\text{Fe}$ のイベントによるゲイン補正のみを施している。ガウス関数でフィッティングして求めた補正前後での各輝線の幅を Fig.8 に示す。ほとんどの輝線で幅が細くなっており、特に鉄のK殻輝線で顕著に変化が見られた。

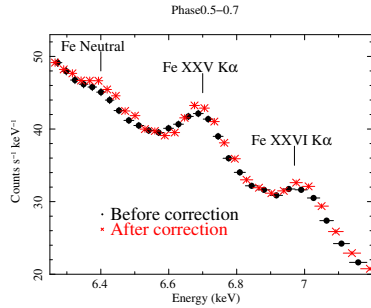


Fig.7 3つの検出器を足し合わせた鉄輝線付近のスペクトル, Phase=0.5-0.7, 黒:補正前, 赤:補正後

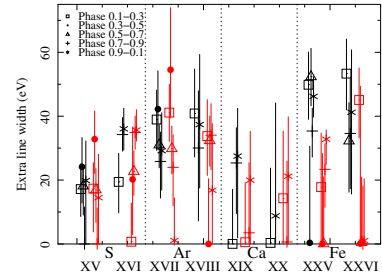


Fig.8 各位相のフィッティングにより定めた補正前後での各輝線幅, 黒:補正前, 赤:補正後

## 6. SCF Effect with SCI

2010年10月にすぎく衛星はSCIを適用してGX1+4を観測した。XIS0,XIS3には6keV相当、XIS1には2keV相当の電荷を注入していた。このSCIを実施した観測データにおいてもSCF効果の調査を行ったところ、白鳥座X-3と同様に、イベント密度に相関して輝線の中心エネルギーが異なる事が確認出来た。GX1+4の6.4keV付近の鉄の特性輝線の中心エネルギーを縦軸とし、横軸にイベント密度としたグラフを Fig.10 に示す。特にすぎく衛星がGX1+4を観測した2010年10月当時、CTEの劣化がXIS0,XIS3よりも劣化していたXIS1において最大約30eVのエネルギーが異なる。SCIを適用して観測したデータであるため、白鳥座X-3よりも輝線の中心エネルギーのずれが小さいと考えるのが自然である。またこのエネルギーのずれはSCF効果によると考えられるので、補正にはEq.1の補正関数を用いる。

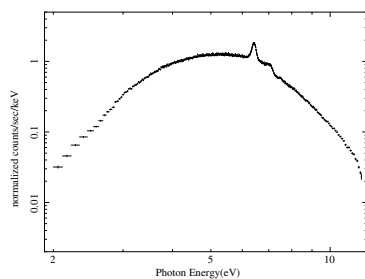


Fig.9 SCIを適用して観測したGX1+4の平均的なエネルギースペクトル

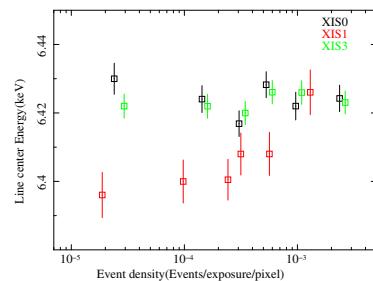


Fig.10 SCIを適用して観測したデータにおけるイベント密度とFeの輝線の中心エネルギーの関係

## 参考文献

- [1] Todoroki, S. et al. 2012, PASJ, accept
- [2] K, Gendreau., et al.(A Technique to Measure Trap Characteristics in CCDs Using X-rays)