

## 投稿

UDON を使った原始星・恒星からの  
X 線フレアの解析

## ～高校での教育利用を目指して～

青嶋広澄、竹澤寛亮、辺城鍾、内山秀樹（静岡大学）

## 1. はじめに

我々は JAXA の X 線天文衛星「すざく」の観測データを用いて、原始星（V773 Tau）・恒星（アルゴル・かじき座 AB 星）の X 線フレアの解析を卒業研究として行った。しかし、コロナ禍のため、大学研究室にあるコンピュータとそのソフトウェアを使用できなかった。そこで、インストールせずにオンライン上で利用可能な Web 解析ツール（UDON2・WebPIMMS）を用いて、各自の自宅で解析を行った。この Web ツールを利用した解析は簡単で、高校生が探究活動や部活動で取り組む題材になり得ると考えた。

そこで本記事では、意欲のある高校生とその指導者、及び、X 線天文データに触れてみたい本会会員の方を読者に想定し、X 線天文学の基礎と UDON2・WebPIMMS を使った解析の方法について解説する。

## 2. X 線天文学と「すざく」衛星

X 線天文学とは、目で見える光（可視光）ではなく、目に見えない高エネルギーの光である X 線で宇宙を調べる学問である。物体はその温度に応じた波長の光（電磁波）を放射する。表面温度数千度の（太陽の様な）普通の恒星は可視光を放射する。しかし、恒星や原始星で起きる、爆発的に強いエネルギーが放出されるフレアという現象では、数千万度に達する超高温のイオン化したガス（プラズマ）が作り出され X 線が放射される。このフレアを始め、ブラックホールや超高密度の中性子星、超新星残骸や銀河・銀河団といった宇宙の高エネルギー現象・高エネルギー天体

を研究するために X 線観測が行われている。

宇宙からの X 線は、地球の大気で吸収されてしまう。そこで X 線を観測するには、大気の影響がない高度へ飛ばした X 線天文衛星が必要となる。「すざく」衛星は日本で 5 番目の X 線天文衛星であり、2005 年に高度 550 km に打ち上げられ、2015 年にその役目を終えた[1]。そのデータは現在、全世界の天文学者が自由に使える様に JAXA の Web サイト DARTS から公開されている。特に「すざく」に搭載された X 線 CCD カメラ XIS のデータは UDON2 という Web ツールでイメージ（X 線擬似カラー写真）、ライトカーブ（X 線強度の時間変化を表す、横軸時間・縦軸 X 線強度のグラフ）、スペクトル（横軸 X 線のエネルギー・縦軸 X 線強度のグラフ）を簡単に作ることができる。

## 3. Web ツールを利用した解析

我々は UDON2 で「すざく」データのライトカーブを作成し、NASA の Web ページで使用可能な WebPIMMS を使い、Flux を計算した。本節では、その手順について説明する。

## 3.1 UDON2

UDON2 を使ったライトカーブ解析について説明する。なお、UDON2 の詳しい使い方は[2]を参照していただきたい。

まず、「suzaku darts」等で Web 検索し、Web ページ「DARTS/Suzaku at ISAS/JAXA」[3]にアクセスする。ページ内で「Public Data List」（図 1）を選択すると、「すざく」が観測した天体のデータを一覧で

きる (図 2)。この中から解析したい天体を探す。例えば、「Target Name」に書かれている天体名で Web 検索を行えば、参考情報を見つめられる (例えば、リストの一番最初にある「E0102-72」は小マゼラン雲にある超新星残骸であることが、Astro Arts の天文ニュース[4]等から分かる)。

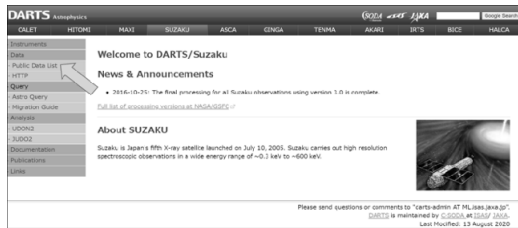


図 1 DARTS/Suzaku [3] Public Data List の位置

Target Name	Observation Date	Observation ID	MA [deg]	DEC [deg]	Area [deg <sup>2</sup> ]	MA [deg]	DEC [deg]	Area [deg <sup>2</sup> ]	UDON2	JUDQ2	Pages
E0102-72	2005/8/11	100001010	16.139	-72.1205	MASTER	XIS			UDON2	JUDQ2	
E0102-72	2005/8/13	100001020	15.9884	-72.0433	MASTER	XIS			UDON2	JUDQ2	Tablet at 5:58 (2008)
N132D	2005/8/13	100002010	81.2794	-69.6524	MASTER	XIS			UDON2	JUDQ2	
N132D	2005/8/15	100002020	81.1356	-69.5961	MASTER	XIS			UDON2	JUDQ2	
N132D	2005/8/15	100002030	81.4173	-69.7177	MASTER	XIS			UDON2	JUDQ2	
N132D	2005/8/15	100002040	81.0865	-69.7023	MASTER	XIS			UDON2	JUDQ2	

図 2 DARTS/Suzaku [3] Public Data List での UDON2 の位置

解析したい天体を選んだら、「UDON2」をクリックする (図 2)。すると、対象天体のイメージが表示される。X 線は目では見えないので、X 線のエネルギーに応じて擬似的にカラー表示したものである事に注意する。ライトカーブを作成したい天体をマウスでドラッグし、円で囲む。「Submit」をクリックすると、図 3 のようなライトカーブのデータを得られる。ライトカーブは横軸が時間 (単位 s) である。縦軸は Count rate (カウントレート、単位 count s<sup>-1</sup>) と呼ばれる X 線強度の指標である。図 3 はペルセウス座のアルゴル (Algol, Observation ID 401093010) の例であるが、観測開始から 50 k (キロ) 秒ほど

で急激に増光 (フレア) していることが分かる。周期的にデータが欠けているのは主に、「すぎく」が約 90 分で地球を周回しており地球によって天体が隠されてしまう、または、地球上空で宇宙線が強い領域 (南大西洋異常帯) を「すぎく」が通過しその間は観測を停止しているなどのためである。マウスカーソルを使うと、ライトカーブの値を読み取ることができる。また、「The original FITS and QDP files are here.」をクリックすると tar.gz 形式で圧縮されたファイルをダウンロードできる。解凍すると、「...-lc.qdp」というファイルがある。こちらにアスキー形式の数値データでライトカーブが保存されているので、マイクロソフト Excel 等で読み込み、詳細な解析もできる。

この他にも UDON2 ではスペクトルを表示できるが、今回は割愛する。

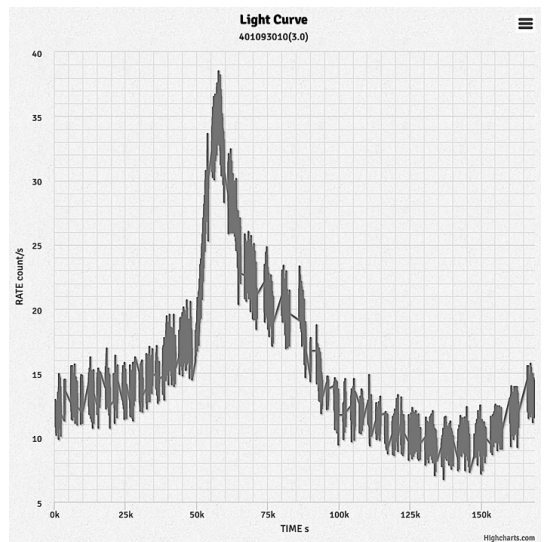


図 3 DARTS/Suzaku [3]UDON2 で作成したアルゴルの X 線ライトカーブ

### 3.2 WebPIMMS

UDON2 で得たライトカーブの縦軸は Count rate だが、天体の物理的な情報を得るには、

Flux (フラックス。単位時間単位面積に天体からやってくる X 線のエネルギー。見かけの明るさに対応。) に換算する必要がある。そこで NASA の Web ツール WebPIMMS[5] を使用する。「WebPIMMS」で Web 検索すると図 4 のようなページに行ける。Count rate から Flux への変換は、実際にはスペクトルの形状をはじめ、色々なことを考慮する必要がある。しかし、今回は「星間吸収を無視した光子指数 2 のべき乗のスペクトル」で大まかに近似し、Flux に変換する。なので、今回得られる値は、せいぜい桁程度しか正しくないことに注意する必要がある。図 4 について、点線で囲ったところに、以下の様に必要な値等を入力する。

The screenshot shows the WebPIMMS interface with the following input fields highlighted by a dashed box:

- Convert From:** Flux
- Into:** ASCA
- Input Energy Range (low-high):** 0.2-12 keV
- Output Energy Range (low-high):** 0.2-12 keV
- Source Flux / Count Rate:** 1.0
- Model of Source:** Power Law
- Photon Index:** 2.0
- CHANDRA:** Checked

図 4 WebPIMMS [5] 画面と入力箇所

- Convert From : 「SUZAKU/XIS FI Count Rate」を選択
- Into : 「FLUX」を選択
- Input Energy Range, Output Energy Range : 「0.2-12」と入力し「keV」を選択
- Source Flux / Count Rate : UDON2 で読み

取った Count rate を入力

- Galactic nH : 「0」と入力
- Redshift, Intrinsic nH : 「none」のままにしておく
- Model of Source : 「Power Law」を選択
- Photon Index : 「2」と入力
- CHANDRA : 空白のまま

以上の数値を入力した上で「Estimate Count rate」をクリックすると、Flux (単位  $\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) を求められる。エネルギーと面積の単位として  $\text{ergs}$  と  $\text{cm}^2$  を使っているので注意する。  $1 \text{ ergs} = 1 \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-2} = 10^{-7} \text{ J}$  である。また、天体の物理的な情報としては、Flux と天体までの距離から計算される Luminosity (ルミノシティ、光度。単位時間当たり天体が発する X 線のエネルギー。単位  $\text{ergs s}^{-1}$ 。絶対的な明るさに対応。) も重要となる (Flux と Luminosity の関係は、例えば[6]の 7.2 節を参考のこと)。加えて、ライトカーブのグラフ上での面積から、フレアの総 X 線エネルギーも見積もることができる。

アルゴルの場合、フレア中の平均カウントレートを約  $30 \text{ count s}^{-1}$  と見積もり (図 3 参照)、WebPIMMS を使った変換を行うと、Flux として  $8 \times 10^{-10} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  が得られた。これは、先行研究[7]でのアルゴルのフレア中の Flux である約  $2 \times 10^{-10} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  と桁では一致する。また、アルゴルまでの距離を 90 光年とし、ライトカーブ上のフレアの形状を三角形 (高さは平常時からフレアピーク時のカウントレートの増加で約  $20 \text{ count s}^{-1}$ 、底辺はフレア継続時間で約  $4 \times 10^4$  秒間) に近似し、X 線フレアの総エネルギーを約  $4 \times 10^{37} \text{ erg} = 4 \times 10^{30} \text{ J}$  と見積もった。

#### 4. 高校での教育利用の可能性

上記の様に Web ツールにて、恒星フレアに限らない様々な天体の「すざく」のライトカーブを調べ、X 線での Luminosity やエネルギーを見積もることができる。高校生が探究活動や部活動

で取り組む場合、このデータの具体的な扱い方は様々ありえる。興味に応じて自由に考えると面白いが、アイデアの例を示す。

- 様々な天体でライトカーブの形状を比較し、それらの違いがどの様に生じているのかを考察してみる。例えば、アルゴルのライトカーブ(図3)の様な急激な増光は何らかの爆発的な現象が起きている事が、周期的に変動するライトカーブは天体の公転や自転に起因している事が考えられる。
- 得られた天体の Luminosity やエネルギーを、全世界で1年間に使われる電力量、太陽の Luminosity、太陽のフレアのエネルギー、地球の重力結合エネルギーの大きさ(地球をバラバラにしてしまうのに十分なエネルギー。例えば[8]の4-2を参照。)等と比較して、天体现象のスケールを掴んでみる。また、天体そのものの重力エネルギーの大きさ等と比較し、エネルギー源を考察してみる。

我々自身は卒業研究として、得られたフレアの継続時間と総 X 線エネルギーから、磁気リコネクション領域の磁場の強さと、そのサイズを見積もることを試みた。この内容自体は本稿の目的を超えるため割愛するが、その経験からもアイデア次第で様々な探究を行えると考えている。

## 5. 最後に

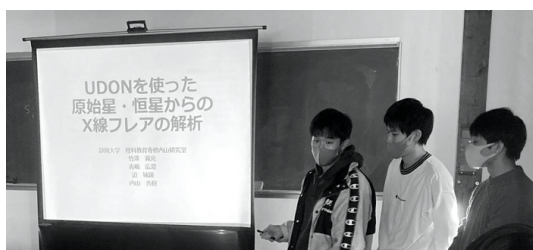
本記事は、2020年度日本天文教育普及研究会中部支部会での発表に基づく。発表の際にコメントをいただいた皆様、本記事の内容を確認いただいた磯貝拓史氏・河津茉奈氏、コメントをいただいた編集委員の中野英之氏に感謝する。

## 文 献

- [1] ISAS/JAXA, 「すぎく」 ページ,  
<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/others/suzaku.html> (2021年6月9日最終閲覧)
- [2] ISAS/JAXA, 「UDON2 ページ」,

<https://darts.isas.jaxa.jp/astro/udon2/about.html.ja> (2021年6月9日最終閲覧)

- [3] ISAS/JAXA, 「DARTS/Suzaku」,  
<https://darts.isas.jaxa.jp/astro/suzaku/>  
 (2021年6月9日最終閲覧)
- [4] Astro Arts, 「天文ニュース 超新星残骸 E0102-72 の X 線・可視光・電波の合成画像」,  
<https://www.astroarts.co.jp/news/2000/04/11chandra/index-j.shtml>  
 (2021年6月9日最終閲覧)
- [5] NASA/GSFC, 「WebPIMMS」,  
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/w3pimms/w3pimms.pl> (2021年6月9日最終閲覧)
- [6] 福江純・沢武文・高橋真聡 編 (2020) 『極・宇宙を解く: 現代天文学演習』, 恒星社厚生閣.
- [7] Xue-Juan Yang et al. (2011) 'XMM-Newton observation of the eclipsing binary Algol', *Research in Astron. Astrophys*, **11(4)**: 457-470.
- [8] R.ゼックスル・H.ゼックスル (1985) 『白色矮星とブラックホール』(岡村浩・黒田正明訳), 培風館.



青嶋広澄(左)  
 竹澤寛亮(右)  
 辺城鍾(中央)  
 内山秀樹