

2019年度 冬学期 特別実験II
Chandra X線観測衛星の画像解析による
PSR B1509-58からのジェット移動測定

東京大学理学部物理学科4年

05-181512 大島由佳

2020年1月31日 提出

目次

1	要旨	2
2	はじめに	2
3	観測	3
4	結果	6
4.1	CIAO を用いたイメージ画像の作成	6
4.2	Optical Flow によるジェットの変動方向の推定	7
4.3	シフト差分法によるジェットの変動の見込み角の測定	8
5	考察	11
6	結論	13

1 要旨

強い磁場を持ち回転する中性子星をパルサーという。パルサーが放出する電波パルスの周期は通常一定であるが、周期が変化する現象も見つかっている。パルサーの歳差運動の観測することで、その原因を解明できる可能性があると考えられている。本研究では、パルサー PSR B1509-58 の歳差運動を調べることを目的として、Chandra X 線観測衛星による 3 つの観測の画像解析を行い、パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットの見込み角を測定した。CIAO を用いてイメージ画像を作成し、Optical Flow を用いてジェットの移動方向の推定を行った。北側ジェット、南側ジェットともに、Optical Flow を用いてジェットの移動方向の推定を行うことに成功した。その後、シフト差分法によりジェットの移動の見込み角を求めた。北側ジェットについては、2000 年から 4 年後に 3.10 ± 0.02 arcsec、17 年後に 4.05 ± 0.06 arcsec 移動したことがわかった。しかし、南側ジェットは移動の見込み角を定量的に求めることはできなかった。北側ジェットの移動から、パルサー PSR B1509-58 の歳差運動が示唆された。

2 はじめに

中性子星は、中性子が非常に密に集まってできている天体で、大きな原子核のようなものである。重い星の最後の重力崩壊型超新星爆発によって形成される [1]。中性子の中には、強い磁場を持ち回転するものがあり、これをパルサーと呼ぶ。パルサーは、回転エネルギーを消費して電波パルスを放出する。1967 年、ベル (J. Bell) とヒューイッシュ (A. Hewish) によってパルサーが発見された [2]。パルサーは、基本的に規則正しく電波パルスを放出する。しかし、パルス周期が突然速くなり、その後ゆっくり元の値に戻っていく現象も見つかっており、この原因は内部の超流体と外殻の通常物質の相互作用だと考えられている [1]。歳差運動が観測されているパルサーが複数存在し [3,4]、歳差運動の観測から超流体の振る舞いや性質を知ることができる [1]。

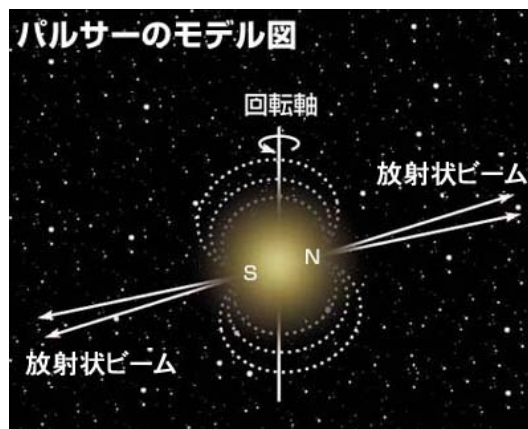


図 2.1: パルサーのモデル図。磁極と中性子星の回転軸にずれがあるため、地球から見ると回転にともなって磁極が見えかくれし、周期的に電波パルスが観測される。 ([5] より)

本研究の目的は、パルサー PSR B1509-58 の歳差運動を調べることである。そのために、パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットを Chandra X 線観測衛星で観測し、複数の観測による画像からシフト差分法を用いてジェットの移動を測定した。また、移動方向の推定に、[6] などで用いられているがまだ

前例の少ない Optical Flow を利用した。

本論文の構成は次のようになっている。3章では、PC環境と用いたソフト、観測データの選択について述べた。4章では、ジェットの移動方向の推定を行った後に移動の見込み角を定量的に測定した。5章では、ジェットの移動速度を算出し、歳差運動の妥当性を考察した。

3 観測

本章では、PC環境と用いたソフト、観測データの選択について述べる。

本研究に用いたPCのOSはWindows10である。このPCに以下のソフトをインストールして解析に使用した。

- Oracle VM VirtualBox 6.1
- Ubuntu 18.04
- CIAO 4.11
- Python 3.7.1
- Microsoft Excel 2016
- gnuplot 5.0 patchlevel 7

Oracle VM VirtualBoxとUbuntuは、Linuxの動作環境を作るためにインストールした。CIAOは[7]よりインストールした。その際、メモリが15GB必要であることに注意し、Ubuntuのメモリを40GBに増設した。また、Pythonインストール後に、コマンドプロンプトで

```
> pip install opencv-python
```

と入力し、opencv-pythonをインストールした。

本研究では、Chandra X線観測衛星の観測によるアーカイブデータを用いた。Windows10へのデータのダウンロードは[8]より行った。

図3.2からわかるように、観測時期に関係なく、検出器ACIS-Iで観測されたデータは、パルサーPSR B1509-58が小さな点に見えるように撮像されていた。一方、ACIS-Sで観測されたデータは、パルサーPSR B1509-58が広がって撮像されていた。ACIS-SはACIS-Iに比べて低エネルギー側の感度が良いことから、カウント値が大きくなる傾向にある。パルサーPSR B1509-58からの光子が周囲のピクセルに漏れ出したために検出器によって撮像の違いが生じたと考えられる。また、周囲のピクセルへのカウントの漏れを表す関数PSF(point spread function)は、光子の入射エネルギーと入射角度に依存する[9]。図3.2のパルサーの広がり様子は、図3.3の入射角度が9.6 arcminの画像によく似ていることから、ACIS-Sへの入射角度が大きかったことも理由として考えられる。なお、パルサーPSR B1509-58は、赤経(RA, α) 15 h 13 m 55.52 s、赤緯(Dec, δ) $-59^{\circ} 08' 08.8''$ に位置しており[10]、ds9の領域タブから十

字を選択し、座標を入力することによって確認できる。本研究では、同じ検出器で観測したデータを用いた方が良く、ジェットの移動の測定に影響が少ないと考えられることから、ACIS-Iで観測されたデータを用いることにした。

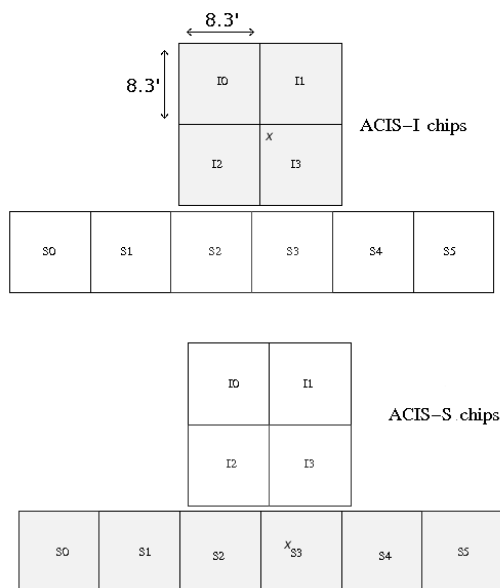


図 3.1: Chandra X 線観測衛星の検出器の名称 ([11] より)

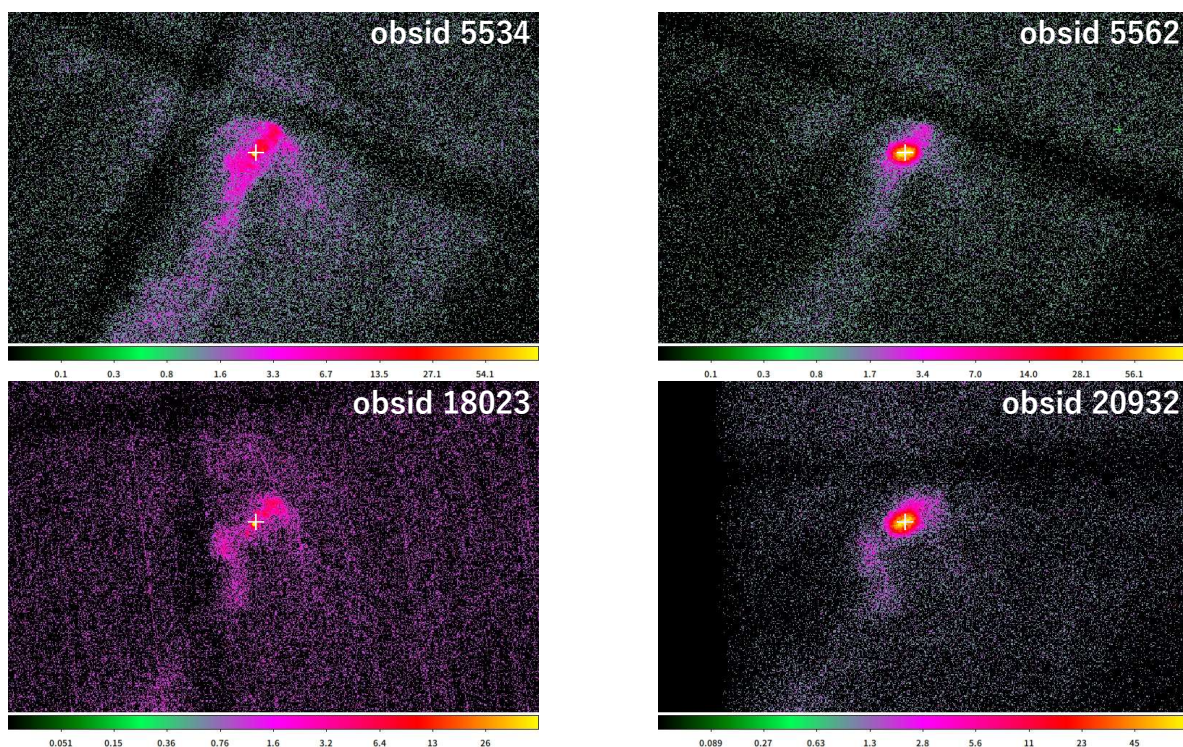


図 3.2: パルサー PSR B1509-58 の画像の検出器による広がりの違い。対数スケール、ビンまとも 1、色 a で表示した。パルサー PSR B1509-58 の位置を白い十字で示した。左上: obsid 5534。検出器は ACIS-I、観測は 2004 年。右上: obsid 5562。検出器は ACIS-S、観測は 2004 年。左下: obsid 18023。検出器は ACIS-I、観測は 2017 年。右下: obsid 20932。検出器は ACIS-S、観測は 2018 年。

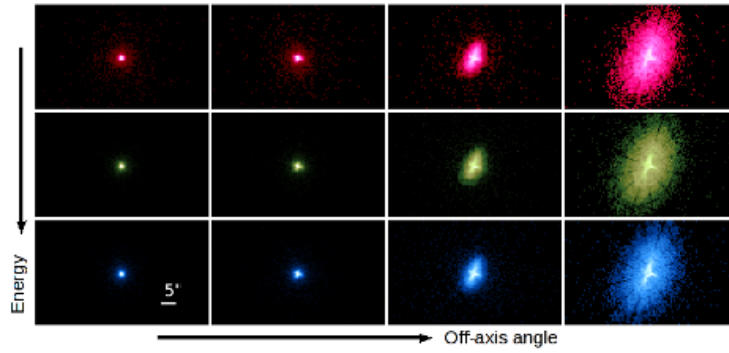


図 3.3: 入射エネルギーと入射角度による PSF の形と大きさの違い。エネルギーは上から、0.92 keV, 1.56 keV, 3.8 keV。入射角度は左から、0 arcmin, 2.4 arcmin, 4.7 arcmin, 9.6 arcmin。 ([9] より)

ACIS-I で観測されたデータは表 3.1 の 8 つである。変化を見つけやすいと考えられるため、観測時期が離れた 3 つのデータを選ぶことにした。観測時期が 2003 年から 2005 年の 6 つのデータの中から代表して obsid 5534 を選び、obsid 754, 5534, 18023 の 3 つについて解析を行うことにした。

表 3.1: ACIS-I で観測されたデータ

obsid	name	time	detector	exposure [s]	pi
754	G320.4-1.2	2000-08-14 13:31:48	ACIS-I	19280	Kaspi
3834	PSR B1509-58	2003-04-21 17:00:25	ACIS-I	9590	Gaensler
4384	PSR B1509-58	2003-04-28 06:05:29	ACIS-I	10020	Gaensler
5534	PSR B1509-58	2004-12-28 10:26:36	ACIS-I	50130	Slane
5535	PSR B1509-58	2005-02-07 15:15:07	ACIS-I	43130	Slane
6116	PSR B1509-58	2005-04-29 03:40:54	ACIS-I	47650	Slane
6117	PSR B1509-58	2005-10-18 00:11:37	ACIS-I	46140	Slane
18023	PSR B1509-58	2017-02-02 23:18:20	ACIS-I	18560	Xue

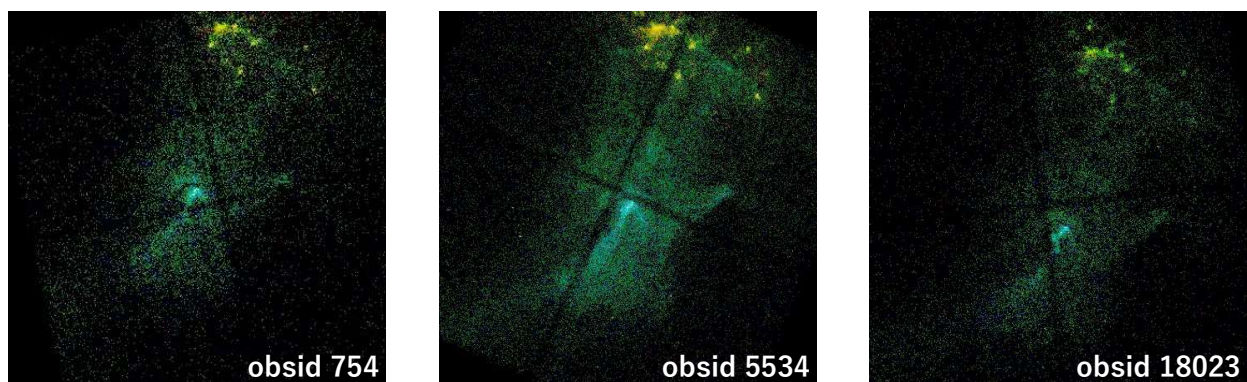


図 3.4: 観測データの RGB 画像。0.3-1 keV を赤、1-3 keV を緑、3-8 keV を青とし、対数スケール、ビンまとめ 2 で表示した。左から、obsid 754, 5534, 18023。

4 結果

4.1 CIAO を用いたイメージ画像の作成

本節では、CIAO を用いて 4.2 節、4.3 節で解析するイメージ画像の作成を行った。

まず、データのダウンロードと座標合わせを行った。Ubuntu 18.04 上で CIAO 4.11 を起動し、端末のコマンドラインに

```
> download_chandra_obsid 754
```

などと入力し、obsid 754, 5534, 18023 の観測データをダウンロードした。

以下のように入力し [12]、obsid 754 を基準とする座標に obsid 5534 を再投影し、座標を合わせた。

```
> chandra_repro 754,5534 outdir=  
> punlearn reproject_obs  
> reproject_obs 754,5534 merged_754_5534 / refcoord=754/repro/acisf00754_repro_evt2.fits
```

同様に、obsid 754 を基準とする座標に obsid 18023 を再投影した。

次に、イメージ画像作成と画像演算を行った。ダウンロード直後のイベントデータには、すべてのピクセルに対し、いつ、何 keV のエネルギーの光子が入ってきたかが記録されている。イメージ画像とは、「いつ」の情報を削除し、各ピクセルに対して何 keV のエネルギーの光子が合計で何個入ってきたかが記録されているデータのことである。CIAO では、画像同士の演算はイメージ画像に対してしか行えないため、イベントデータからイメージ画像の作成を行う必要がある。

イメージ画像の作成は、次のコマンドで行う [13]。

```
> dmcoppy "input.fits[energy=2000:8000][bin x=3700:4700:0.5,y=3800:4500:0.5]" output.fits option=image
```

このコマンドでは、イベントデータ input.fits から、エネルギー 2-8 keV、x 座標 3700-4700、y 座標 3800-4500、ビンまとめ 0.5 のイメージ画像 output.fits を作成することができる。本当にイメージ画像ができているか、prism コマンドで確認することができる。

画像同士の演算は、次のコマンドで行う [14]。

```
> dmimgcalc infile=input.fits infile2=none op=add out=output.fits weight=a
```

このコマンドでは、イメージ画像 input.fits に weight の値 a をかけたイメージ画像 output.fits を作成することができる。なお、infile2 に none ではなく 2 つ目のイメージ画像のデータ名を入れると、2 つの画像を元に演算を行うことができる。op を add(足し算)ではなく sub(引き算)にすることや、weight2 を

用いることもできる。

dmcopy と dmimgcalc コマンドを用いて、4.2 節で使用するイメージ画像の作成を行った。obsid 754, 5534, 18023 について、エネルギー 2-8 keV、x 座標 3700-4700、y 座標 3800-4500、ビンまとめ 0.5 のイメージ画像を作成した。その後、obsid 5534, 18023 のイメージ画像を infile とし、カウント値に exposure の比をかける補正を行った。表 3.1 より、obsid 754 と obsid 5534 の exposure の比は $19280/50130 = 0.385$ 、obsid 754 と obsid 18023 の exposure の比は $19280/18560 = 1.039$ である。これらの値を a に入れて画像の演算を行った。

同様に、4.3 節で使用するイメージ画像の作成を行った。obsid 754, 5534, 18023 について、エネルギー 2-8 keV、x 座標 3700-4700、y 座標 3800-4500、ビンまとめ 1 のイメージ画像を作成した。

4.2 Optical Flow によるジェットの移動方向の推定

本節では、オープンソースのライブラリ OpenCV の物体追跡分野 Optical Flow を用いて、パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットの移動方向の推定を行った。

まず、Optical Flow に用いる動画の作成を行った。4.1 節で作成したビンまとめ 0.5 のイメージ画像を ds9 で画像を開き、対数スケール、ガウシアンスムージング Radius1、Sigma0.5 で表示して、jpeg で保存した。この jpeg 画像を Ubuntu 18.04 から Windows10 にコピーした後、obsid 754, 18023 の画像を順番に数秒ずつ表示させる動画を作成した。

続いて、Optical Flow による移動方向の推定を行った。[15] の OpenCV における Lucas-Kanade 法のソースコードの

```
cap = cv2.VideoCapture('slow.flv')
```

の `slow.flv` の部分を `作成した動画の絶対パス \\ 動画名` と書き換え、コマンドプロンプトで Python のソースコードを実行し、Optical Flow を用いてジェットの移動方向の推定を行った。

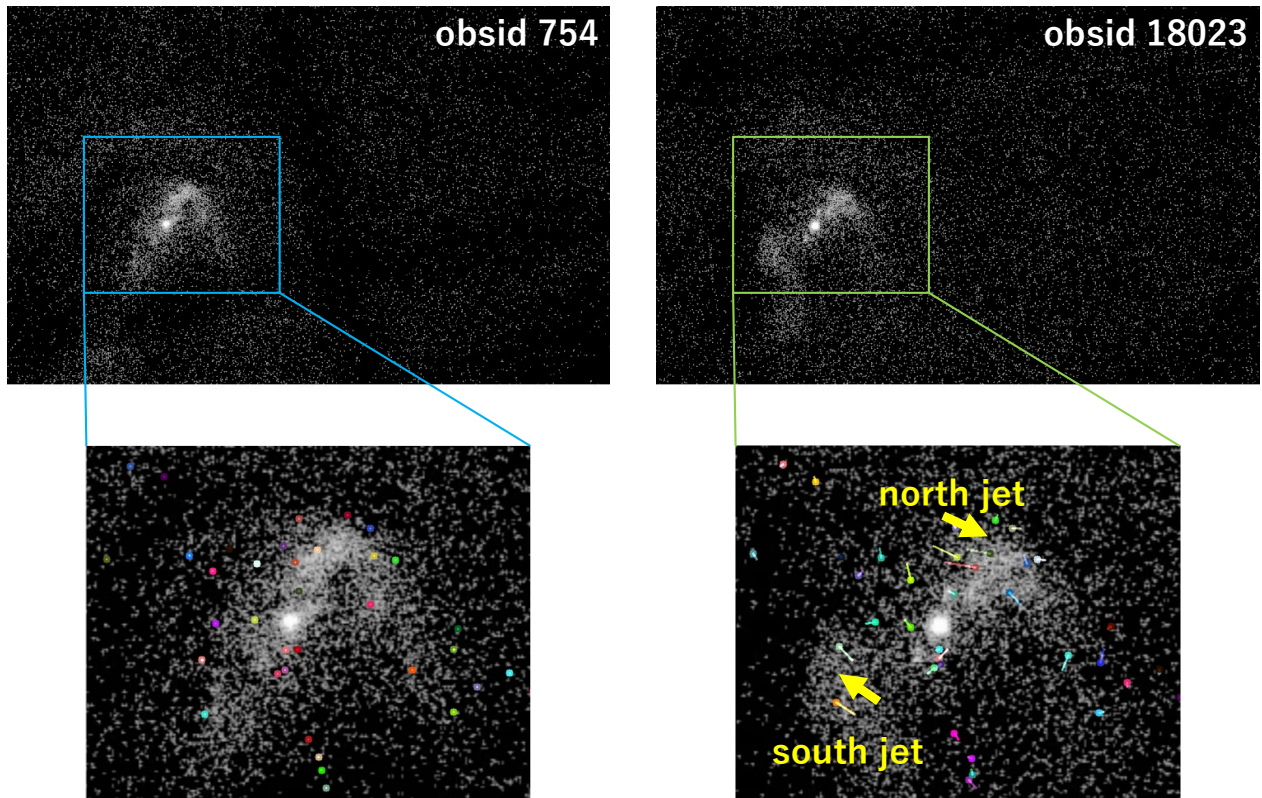


図 4.1: 上: 動画作成に用いたイメージ画像。エネルギー 2-8 keV、x 座標 3700-4700、y 座標 3800-4500、ピンまとも 0.5 でイメージ画像を作成した後、対数スケール、ガウシアンスムージング Radius1、Sigma0.5 で表示し、jpeg で保存した。下: Optical Flow によるジェット移動方向の推定結果 (黄色の矢印)。左が動画前半の obsid 745、右が動画後半の obsid 18023。

図 4.1 より、北側ジェットは南西 (右下) 方向に、南側ジェットは北東 (左上) 方向に移動していると推定された。

4.3 シフト差分法によるジェットの移動の見込み角の測定

本節では、パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットが、4.2 節で推定された方向に移動しているか確かめ、移動していた場合には移動を定量的に測定するために、シフト差分法を用いてジェットの移動の見込み角を測定した。

4.1 節で作成したピンまとも 1 のイメージ画像を Ubuntu 18.04 から Windows10 にコピーした。それらの画像を ds9 で開いて、4.2 節の移動方向に平行にカウント値の断面図を作成した。カウント値が 10 を超えるように、領域を線分から矩形に変更した。誤差については後ほど述べる。矩形領域は図 4.2、カウント値は図 4.3 の通りである。

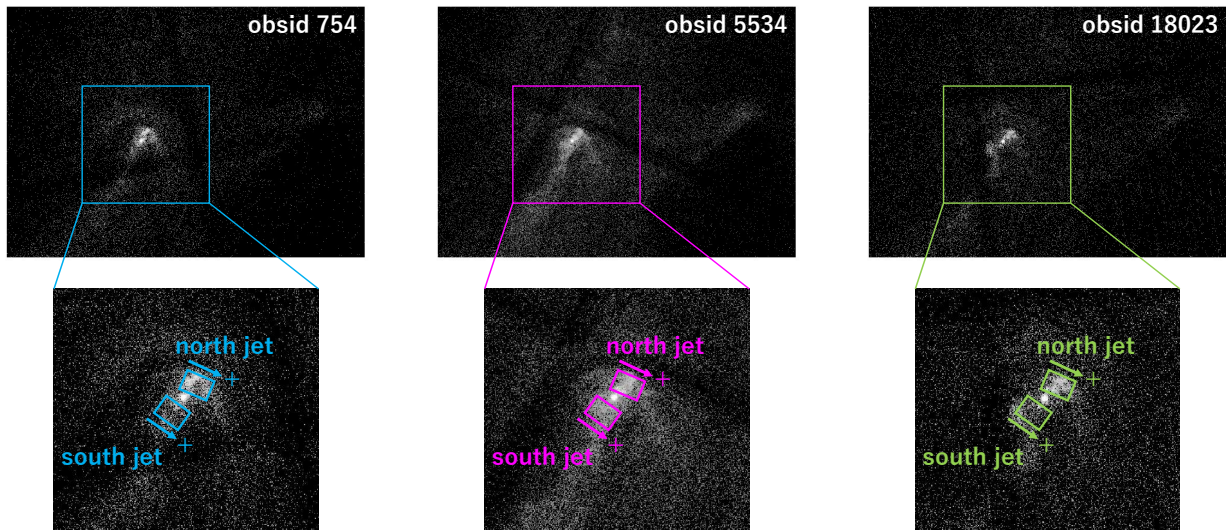


図 4.2: 上: 測光に用いたイメージ画像。エネルギー 2-8 keV、x 座標 3700-4700、y 座標 3800-4500、ビンまとめ 1 でイメージ画像を作成した。対数スケールで表示している。下: 測光した矩形領域。矢印の向き (南西、図中では右下) を正としてカウント値の断面図を作成した。左から、obsid 754, 5534, 18023。

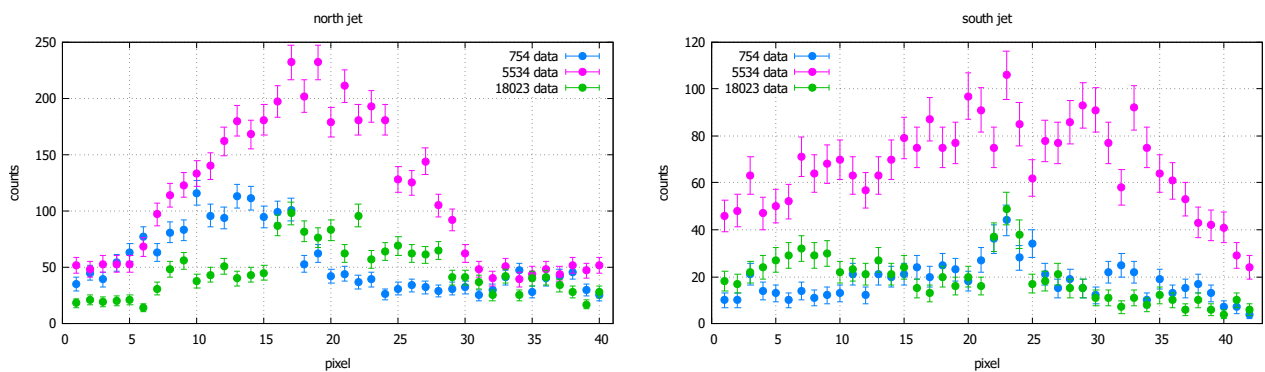


図 4.3: 矩形領域のカウント値。左が北側ジェット、右が南側ジェット。

Excel でシフト差分法の計算を行った。まず、obsid 754, 5534, 18023 の北側ジェット、南側ジェットそれぞれについて、カウント値の合計を算出した。obsid 5534, 18023 のカウント値について、カウント値の合計が obsid 754 と等しくなるように規格化した。具体的な値は表 4.1 の通りである。

表 4.1: カウント値の規格化に用いた値

obsid 北/南	カウント値の合計	obsid 754 との比
754 北	2211	-
5534 北	4554	0.49
18023 北	1869	1.18
754 南	758	-
5534 南	2825	0.27
18023 南	788	0.96

ピクセルを正または負の方向に 1 ずつずらしながら、obsid 5534, 18023 の規格化したカウント値から

obsid 754 のカウント値を差し引いた。gnuplot を用いて、定数関数で誤差を考慮したフィッティングを行い、reduced chi-square を求めた。フィッティングを行った一例は図 4.4 と図 4.5 の通りである。

カウント値の誤差と誤差伝搬測について述べる。obsid 754 のピクセル i のカウント値を n_i^{754} 、obsid 5534 のピクセル j のカウント値を n_j^{5534} とおく。図 4.3 の誤差棒はカウント値の平方根でつけた。

$$\Delta n_i^{754} = \sqrt{n_i^{754}} \quad (4.1)$$

矩形領域のカウント値の合計を

$$S^{754} = \sum_{i=1}^{40} n_i^{754} \quad (4.2)$$

などおくと、obsid 5534 の規格化したカウント値から obsid 754 のカウント値を差し引いた値は

$$n_k^{5534-754} = \frac{S^{754}}{S^{5534}} n_j^{5534} - n_i^{754} \quad (4.3)$$

となる。ここで、 i と j は異なる整数でもよく、ピクセルをどちらの方向にいくつずらしたかによって変化する。 $n_k^{5534-754}$ の誤差は、誤差伝搬測を用いて

$$\Delta n_k^{5534-754} = \sqrt{\left(\frac{S^{754}}{S^{5534}}\right)^2 (\Delta n_j^{5534})^2 + (\Delta n_i^{754})^2} \quad (4.4)$$

となる。obsid 18023 についても同様である。

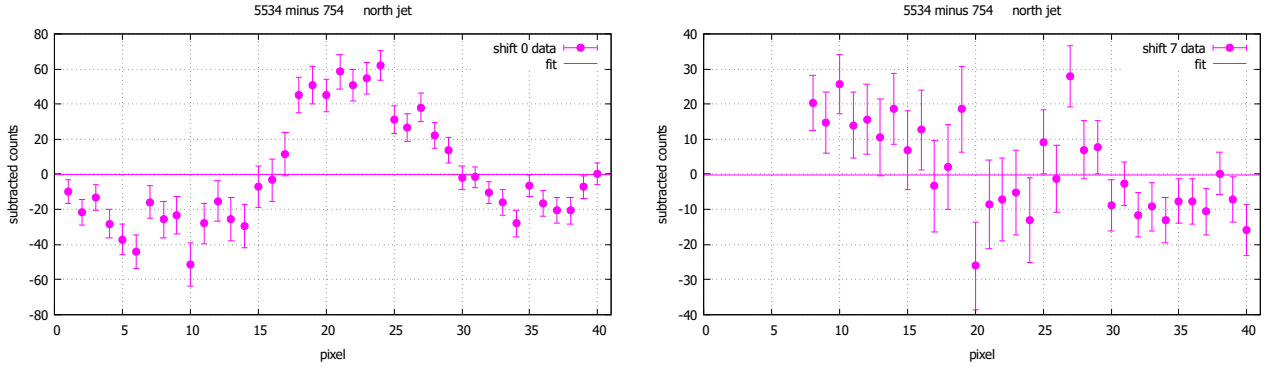


図 4.4: 北側ジェットについて、obsid 5534 の規格化したカウント値から obsid 754 のカウント値を差し引き、定数関数でフィッティングした一例。左がシフト 0 ピクセル、右がシフト + 7 ピクセル。

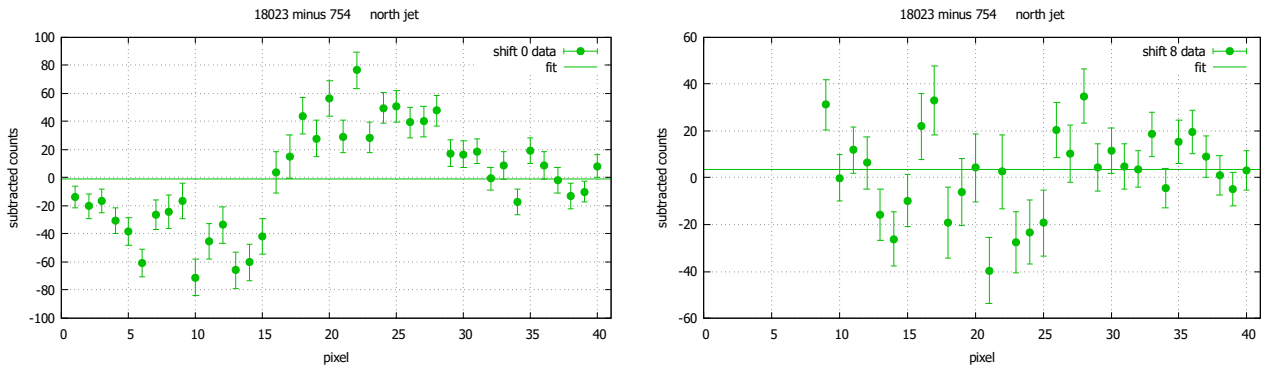


図 4.5: 北側ジェットについて、obsid 18023 の規格化したカウント値から obsid 754 のカウント値を差し引き、定数関数でフィッティングした一例。左がシフト 0 ピクセル、右がシフト + 8 ピクセル。

次に、シフトに対する reduced chi-square の変化をプロットした。結果は図 4.6 の通りである。北側ジェットについては、二次関数

$$f(x) = a [\text{pixel}^{-2}] (x - b [\text{pixel}])^2 + c \quad (4.5)$$

とみなせる範囲において gnuplot でフィッティングを行った。 $a [\text{pixel}^{-2}]$, $b [\text{pixel}]$, c の値は表 4.2 のように求まった。南側ジェットは、シフトに対する reduced chi-square の変化が不規則であり、二次関数でフィッティングすることができないために定量的に扱うことができなかった。

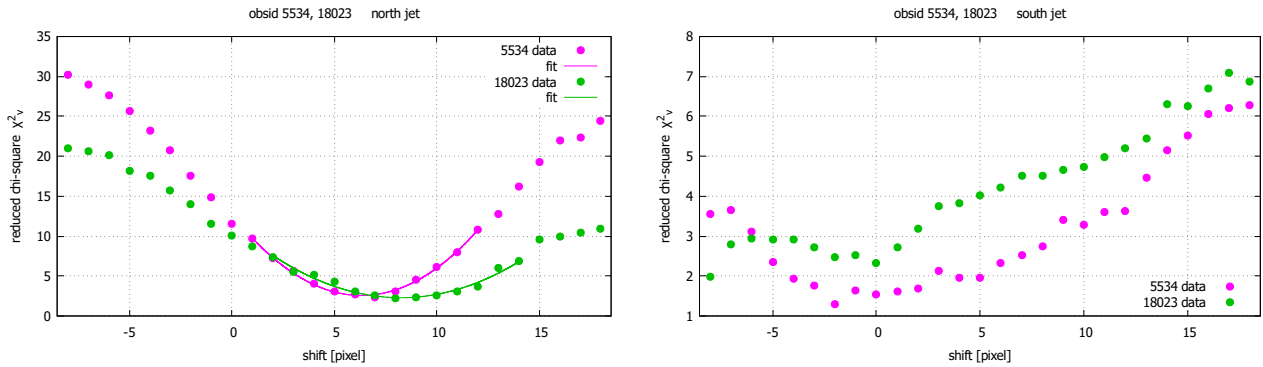


図 4.6: シフトに対する reduced chi-square の変化。左が北側ジェット、右が南側ジェット。北側ジェットについては、二次関数とみなせる範囲においてフィッティングを行った。

表 4.2: フィッティングで求まった $a [\text{pixel}^{-2}]$, $b [\text{pixel}]$, c の値

obsid 北/南	$a [\text{pixel}^{-2}]$	$b [\text{pixel}]$	c
5534 北	0.254 ± 0.006	6.32 ± 0.03	2.56 ± 0.09
18023 北	0.136 ± 0.009	8.24 ± 0.11	2.29 ± 0.17

$b [\text{pixel}]$ のピクセルの移動を見込み角に変換すると、表 4.3 のようになる。

表 4.3: $b [\text{pixel}]$ から算出したジェットの移動の見込み角

obsid 北/南	見込み角 [arcsec]
5534 北	3.10 ± 0.02
18023 北	4.05 ± 0.06

5 考察

本章では、パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットの移動速度を算出する。移動速度の妥当性について考察した後、本研究の目的である歳差運動の可能性について述べる。

パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットの移動距離、および移動速度を算出する。

地球と PSR B1509-58 のジェット的位置関係を図 5.1 のようにおく。電波と X 線による観測から、地球と PSR B1509-58 の距離は

$$l = 5.2 \pm 1.4 \text{ kpc} \quad (5.1)$$

であると求められている [16]。これと表 4.3 で求めたジェットの移動の見込み角 θ を用いて、ジェットの移動距離は

$$d = l \tan \theta \approx l\theta \quad (5.2)$$

と求められる。ジェットの移動距離の誤差については、誤差伝搬測を用いて

$$\Delta d = \sqrt{l^2(\Delta\theta)^2 + \theta^2(\Delta l)^2} \quad (5.3)$$

となる。ジェットの移動速度は、移動距離を観測の経過時間で割ることで求めることができる。算出したそれぞれの値は表 5.1 の通りである。

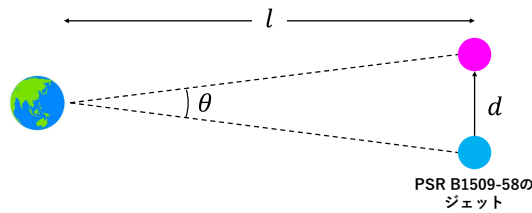


図 5.1: ジェットの移動距離の算出方法

表 5.1: ジェットの移動距離と移動速度

obsid 北/南	移動距離 [pc]	移動速度 [m/s]
5534 北	0.078 ± 0.034	$(17.5 \pm 7.5) \times 10^6$
18023 北	0.10 ± 0.03	$(6.1 \pm 1.6) \times 10^6$

ジェットの移動速度の妥当性について考察する。パルサー PSR B1509-58 からのジェットが、パルサーから遠ざかる方向に $0.2c = 6 \times 10^7 \text{ m/s}$ より速く移動しているという先行研究がある [17]。また、超新星残骸の外殻が $1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$ より速い速度で膨張していることも知られている [18]。移動方向が異なるものの、表 5.1 のジェットの移動速度と同程度であり、本研究で算出したジェットの移動速度は妥当であると考えられる。

パルサー PSR B1509-58 が歳差運動している可能性について考察する。表 5.1 より、北側ジェットについて、obsid 754 から obsid 5534 までの移動速度より、obsid 754 から obsid 18023 までの移動速度の方が有意に小さいことがわかる。地球から観測した移動速度が一定でないことから、パルサー PSR B1509-58 から噴出するジェットが図 5.2 のように歳差運動している可能性が考えられる。

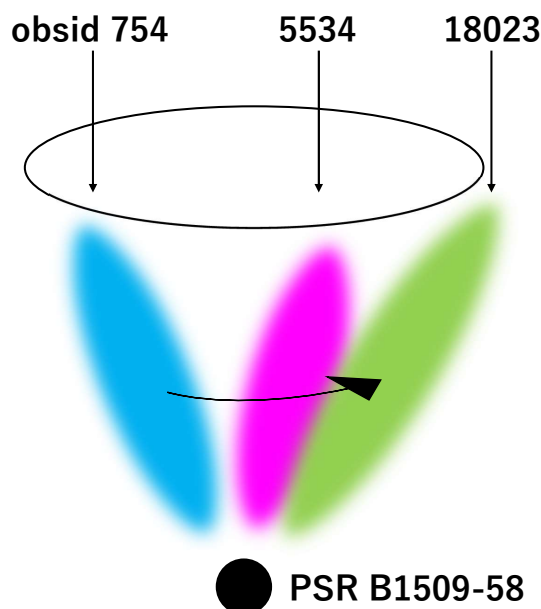


図 5.2: ジェットの歳差運動

図 4.3 より、南側ジェットの本明さは、北側ジェットの半分程度であり、移動を測定するために十分な明さであったと考えられる。図 4.6 より、南側ジェットの reduced chi-square の最小値は大まかな目分量で -3 pixel から 3 pixel にあり、表 4.2 で求めた北側ジェットの 6 pixel から 9 pixel とは大きく異なる。北側ジェットよりも有意に小さい速度でジェットが移動している可能性が高い。歳差運動しているならば、南側ジェットが北側ジェットと反対方向に同程度の速度で移動しているのが自然である。よって、パルサー PSR B1509-58 からの北側ジェットの移動が歳差運動によるものではない可能性も考えられる。

一方で、南側ジェットを歪めるような構造物がある可能性も考えられる。北側は 3 観測ともパルサーから直線的にジェットが噴き出していたが、図 4.3 から読み取れるように、南側ジェットの形は観測ごとに変化しているように見受けられた。パルサー PSR B1509-58 は歳差運動しているが、南側ジェットを歪めるような構造物があるために、ジェットの移動を定量的に測定できなかった可能性も考えられる。

今後は、パルサー PSR B1509-58 が歳差運動を行っているのかについて、より強固な確証を得るための研究が必要である。北側ジェットについては、さらに年数が経過した後に追観測を行い、ジェットの移動距離および速度を算出したい。南側ジェットについては、さらなる解析を行い、ジェットの移動速度の上限値を最優先に求めたい。

6 結論

Chandra X 線観測衛星のデータの画像解析を行い、パルサー PSR B1509-58 から噴き出すジェットの移動について調べた。obsid 754 (2000 年観測)、obsid 5534 (2004 年観測)、obsid 18023 (2017 年観測) の 3 つのデータについて、CIAO を用いてイメージ画像を作成した。イメージ画像から動画を作成し、Optical Flow を用いてパルサー PSR B1509-58 から噴き出す北側と南側のジェットの移動方向を推定した。推定した移動方向に平行に断面図をとり、シフト差分法によりジェットの移動の見込み角を測定した。北側ジェットは、obsid 754 を始点として、obsid 5534 では 3.10 ± 0.02 arcsec、obsid 18023 では

4.05 ± 0.06 arcsec 移動した。一方、南側ジェットの変位を定量的に求めることはできなかった。

謝辞

本研究では、馬場彩准教授と小高裕和助教に大変お世話になりました。深く感謝いたします。

馬場彩准教授には、興味深い研究テーマを与えていただきました。最初にたくさんのアイデアが書いてあるノートを見せていただき、改めて尊敬の念を抱きました。お忙しい中、私たち4年生に週1回時間を割いてくださり、観測衛星の基礎、ソフトの使い方、誤差の取り扱いや論文執筆の注意点まで、すべて丁寧に教えていただきました。先生の優しい人柄のため、思うように解析が進まないときにも、それを正直に伝えることができました。また、そのときに的確なアドバイスをくださったために、無事にジェットの移動を見つけるという結果を出すことができました。

小高裕和助教には、PCの環境設定について教えていただきました。Ubuntuのインストール、Optical Flowの環境設定がうまくいかないときにアドバイスをいただき、解析の準備を整えることができました。

本研究を通して、衛星で観測した時点では研究は始まったとも言えない段階であり、着眼点や解析手法に研究者の個性が現れ、それが天文学の研究のおもしろいところだと感じました。半年間、楽しく研究を進めることができました。特別実験でこのような経験をできたことを嬉しく思います。

参考文献

- [1] 小山勝二, 嶺重慎編: 『ブラックホールと高エネルギー現象 シリーズ現代の天文学 第8巻』 (日本評論社, 2007.6) p.9-23.
- [2] A. Hewish, S. J. Bell, J. D. H. Pilkington, P. F. Scott and R. A. Collins: Nature, volume 224, page 472 (1969).
Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source
- [3] Bennett Link and Richard I. Epstein: The Astrophysical Journal, Volume 556, Number 1, 2001.
Precession Interpretation of the Isolated Pulsar PSR B1828-11
- [4] Martin Durant, Oleg Kargaltsev, George G. Pavlov, Julia Kropotina, and Kseniya Levenfish: The Astrophysical Journal, Volume 763, Number 2, 2013 January 10.
The Helical Jet Of The Vela Pulsar
- [5] JAXA 宇宙情報センター / SPACE INFORMATION CENTER : パルサー
<http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/pulsar.html>
- [6] Toshiaki Sato, Satoru Katsuda, Mikio Morii, Aya Bamba, John P. Hughes, Yoshitomo Maeda, Manabu Ishida, and Federico Fraschetti: The Astrophysical Journal, 853:46 (13pp), 2018 January 20.
X-Ray Measurements of the Particle Acceleration Properties at Inward Shocks in Cassiopeia A
- [7] Downloading CIAO - CIAO 4.12 - Chandra
<https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/download/>
- [8] NASA High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC) Archive
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>
- [9] Welcome to PSF Central - CIAO 4.12 - Chandra
https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/PSFs/psf_central.html
- [10] Photo Album :: PSR B1509-58 :: April 3, 2009 - Chandra
<https://chandra.harvard.edu/photo/2009/b1509/>
- [11] ACIS Information Page - Chandra X-ray Center
<https://cxc.harvard.edu/cal/Acis/>
- [12] Merging Data from Multiple Imaging Observations - CIAO 4.12
<https://cxc.harvard.edu/ciao/threads/combine/>
- [13] Ahelp: dmcopyp - CIAO 4.12 - Chandra
<https://cxc.cfa.harvard.edu/ciao/ahelp/dmcopyp.html>
- [14] Ahelp: dmimgcalc - CIAO 4.12 - Chandra
<http://cxc.harvard.edu/ciao/ahelp/dmimgcalc.html>

- [15] オプティカルフロー (Optical Flow) — OpenCV-Python Tutorials 1 documentation
http://labs.eecs.tottori-u.ac.jp/sd/Member/oyamada/OpenCV/html/py_tutorials/py_video/py_lucas_kanade
- [16] Gaensler B. M., Brazier K. T. S., Manchester R. N., Johnston S. and Green, A. J.: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 305, Issue 3, pp. 724-736.
SNR G320.4-01.2 and PSR B1509-58: new radio observations of a complex interacting system
- [17] Y. Yatsu, N. Kawai, J. Kataoka, T. Kotani, K. Tamura and W. Brinkmann: The Astrophysical Journal, Volume 631, Number 1
Chandra Observation of the Interaction between the Hot Plasma Nebula RCW 89 and the Pulsar Jet of PSR B1509-58
- [18] B. M. Gaensler, J. Arons, V. M. Kaspi, M. J. Pivovarov, N. Kawai, K. Tamura: The Astrophysical Journal, vol 569, 2002 April 20.
Chandra imaging of the X-ray nebula powered by pulsar B1509-58