

# 高解像度観測による X 線星雲 RCW89 の移動速度の測定

中嶋 英也

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科 河合研究室

学籍番号 05\_17186

2009 年 2 月 27 日

## 要旨

X線星雲 RCW89 はパルサー PSR B1509-58 の北方  $10'$  の位置にある X線星雲である。RCW89 は PSR B 1509-58 の親星の超新星爆発の残骸である MSH 15-52 の一部がパルサーからのジェットによって加熱され輝いていると考えられている。しかし、MSH 15-52 の推定年齢 ( $6700 \sim 21000$  [year]) と PSR B1509-58 の特性年齢 ( $< 1700$  [year]) が矛盾することから、本当に同一超新星起原かどうか問題となっている。

我々は高解像度 X線望遠鏡衛星 Chandra を用いて RCW89 の観測を行なった。本研究では 2004 年と 2008 年の RCW89 の観測結果を比較することで、RCW89 の各 knot の移動を測定した。WCS の補正が達成できなかったために、求められた結果は期待されたものより 1 桁悪い精度だった。しかしながら、RCW89 がパルサーから遠ざかっていることから同一超新星起原であることを見いだした。また、PSR B1509-58 (RCW89) の年齢を  $2340 \pm 1500$  と見積もった。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>5</b>
1.1	パルサー	5
1.2	RCW89	6
<b>第2章</b>	<b>観測装置</b>	<b>9</b>
2.1	X線観測衛星 Chandra	9
2.1.1	ミッション概要	9
2.1.2	打上げと軌道	10
2.1.3	特長	10
2.2	High Resolution Mirror Assembly (HRMA)	10
2.2.1	概要と物理構造	10
2.2.2	Point-Spread Function (PSF)	12
2.3	Advanced CCD Imaging Spectrometer (ACIS)	12
2.3.1	概要	12
2.3.2	オペレーティングモード	13
2.3.3	Telemetry Formats	13
2.3.4	パイルアップ	14
2.3.5	Trailed events	14
2.4	Pointing Control and Aspect Determination System (PCAD)	16
2.4.1	概要	16
2.4.2	Physical configuration	16
2.4.3	性能	17
<b>第3章</b>	<b>RCW89</b>	<b>21</b>
3.1	観測	21
3.2	データリダクション	21
3.3	座標の測定の仕方	22

3.4	WCS の補正 . . . . .	24
3.4.1	パルサーを用いた WCS の補正 . . . . .	24
3.4.2	参照星を用いた補正 . . . . .	26
3.5	knot の移動測定 . . . . .	28
<b>第 4 章</b>	<b>議論</b>	<b>31</b>
4.1	パルサーの座標の測定 . . . . .	31
4.2	WCS 未補正の影響 . . . . .	31
4.3	年齢問題 . . . . .	33
<b>第 5 章</b>	<b>まとめと今後の課題</b>	<b>34</b>
<b>付録 A</b>	<b>計算式</b>	<b>35</b>
A.1	誤差の伝播 . . . . .	35
A.2	系統誤差 . . . . .	36
A.3	重みつき平均 . . . . .	36
<b>付録 B</b>	<b>PSF-fitting 結果</b>	<b>37</b>

# 目 次

1.1	RCW89 の多波長観測結果 . . . . .	6
1.2	Chandra で撮像した PSR B1509-58 の 3 色画像 . . . . .	8
2.1	Chandra 衛星の外形 . . . . .	9
2.2	Chandra の軌道図 . . . . .	11
2.3	HRMA の光学系 . . . . .	11
2.4	HRMA のコマ収差 . . . . .	12
2.5	パイルアップの影響 . . . . .	15
2.6	Trailed image . . . . .	15
2.7	Chandra の各検出器の X 線光源の座標の精度を表わす累積ヒストグラム . . . . .	18
2.8	Chandra の座標精度 . . . . .	18
3.1	Exposure 補正後の画像 . . . . .	23
3.2	2 次元 PSF-fitting . . . . .	25
3.3	参照星の座標の差位 . . . . .	27
3.4	RCW89 の knot の移動 . . . . .	29
4.1	パルサーの座標のずれ . . . . .	32
4.2	ACIS の CCD 配置図 . . . . .	32
4.3	RCW89 3 次元形状概略図 . . . . .	33
B.1	PSF-fitting の結果 knot#A-F (Obs ID 5562 ) . . . . .	37
B.2	PSF-fitting 結果 knot #G-O (Obs ID 5562 ) . . . . .	38
B.3	PSF-fitting 結果 knot #A-H (Obs ID 9138 ) . . . . .	39
B.4	PSF-fitting 結果 knot #I-O (Obs ID 9138 ) . . . . .	40

# 表 目 次

2.1	The HRMA Characteristics . . . . .	19
2.2	ACIS の特徴 . . . . .	20
2.3	PCAD 性能 . . . . .	20
3.1	RCW89 の観測のまとめ . . . . .	21
3.2	PSR B1509-58 の座標 . . . . .	25
3.3	参照星の座標 . . . . .	28
3.4	RCW 89 の knot の位置測定のまとめ . . . . .	30
4.1	WCS が正しい仮定した時の結果 . . . . .	33

# 第1章 はじめに

## 1.1 パルサー

パルサーは規則正しくくりかえす電流パルスを出す天体である。1967年の発見以来現在までに1700個以上が観測されている。パルスの安定した周期が星の回転を表わしていると考えられている。しかし、パルス周期(ミリ秒 *sim* 数秒)から示唆される回転はあまりにも速く、ふつうの星なら遠心力で飛び散ってしまう程である。この遠心力で破壊されない程の重力を持つ星は中性子星だけしかないことから、中性子星だと考えられている。

パルサーのパルス周期はわずかではあるが、時間と共に伸びている。これはブレーキがかかって中性子星の回転が遅くなっていることを示している。電波でパルサーの回転周波数( $\nu$ )を長期に渡り観測すると、以下の導出でパルサーの特性年齢 $\tau_c$ を求められる。

パルス周期の時間発展は次の簡単な微分方程式によって既述できる。

$$\dot{\nu} = -k\nu^n \quad (1.1)$$

ここで、 $n$ はブレーキング定数。式(1.1)を微分して、

$$\ddot{\nu} = \frac{-nk\nu^n}{\nu} \dot{\nu} \quad (1.2)$$

$$\therefore n = \frac{\nu \ddot{\nu}}{\dot{\nu}^2} \quad (1.3)$$

観測結果から $\dot{\nu}, \ddot{\nu}$ を求め代入するとブレーキング定数が求められる。また、式(1.1)をパルサー誕生時から観測時までの定積分をするとパルサーの年齢 $\tau$ が求まる。

$$\tau = \frac{\nu}{(n-1)\dot{\nu}} \left[ 1 - \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^{n-1} \right] \quad (1.4)$$

ここで、 $\nu_0$ はパルサー誕生時の回転周波数。よって、パルサーの年齢が求めれば式(1.4)に代入してパルサーの初期周波数を求めることができる。次に、初期回転速度が十分速い( $\nu_0 \gg \nu$ )と仮定すると、

$$\tau_c = \frac{\nu}{(n-1)\dot{\nu}} \quad (1.5)$$

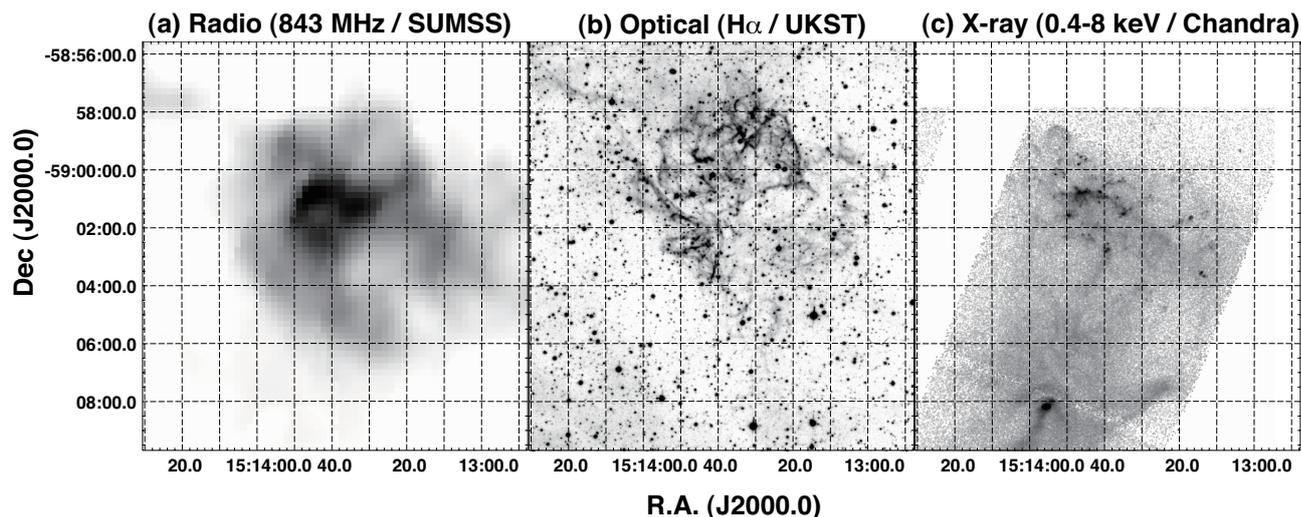


図 1.1: RCW89 の多波長観測結果の比較 (a) SUMSS (Sydney University Molonglo Sky Survey) による 843 MHz の電波観測結果。 (b) UKST (UK Schmidt Telescope) による  $H_{\alpha}$  輝線図。 (c) 0.4-8.0 keV の X 線画像 (Chandra (ObsID:5562)) (Yatsu, 2008)

本研究で取り扱う PSR B1509-58 では  $n = 2.837$ 、特性年齢は 1693 年 (Kaspi et al., 1994) である。

## 1.2 RCW89

X 線星雲 RCW89 は PSR-B1509-58 と 超新星残骸 MSH 15-52 のパルサー - 超新星残骸系に含まれていると思われる HII 領域である。可視光で観測された星雲と電波で観測された MSH 15-52 において明るい部分が良く重なる一方で、全体的な形状は可視と電波において明らかに異っている : 可視では RCW89 はフィラメント構造をしていて (Seward et al., 1983)、電波では馬蹄形に分布したプラズマ群が観測されている (Gaensler et al., 1999) (図 1.1)。ROSAT によって観測された RCW89 の X 線での形状は可視光よりも電波での形状に似ている (Trussoni et al., 1996; Brazier and Becker, 1997)。電波で比熱的放射 (シンクロトロン放射) が観測されていることから高エネルギー電子が  $\sim$  GeV まで加速されていることが分かっている。また ASCA により、パルサーから RCW89 の領域に向けて突き出ている熱制動放射のラインが発見されている (Tamura et al., 1996) (図 1.2 参照)。

RCW89 に関する問題の中でまず解決すべきなのは MSH 15-52 (or RCW89) が PSR B1509-58 と物理的に関係しているかどうかである。この問題は MSH 15-52 の推定年齢

と PSR B1509–58 の特性年齢が矛盾することから生じた。パルサーのスピンダウンから求められたパルサーの特性年齢は 1693 年である (Kaspi et al., 1994)。一方で、Seward et al. (1983) は、最初のエネルギー放出量  $E_0 = 10^{51}$  [erg], 星間物質密度  $n_0 = 1$  [atom cm<sup>-3</sup>] を仮定して、MSH 15–52 の年齢を  $2.1 \times 10^4$  年と見積もった。この推定年齢は  $(n_0/E_0)^{(-\frac{1}{2})}$  に比例する。Seward は  $(n_0/E_0)$  が 100 倍になる可能性として、PSR B1509–58 の親星の超新星爆発が、それ以前の超新星爆発によって星間物質が吹きとばされ、 $n_0$  が非常に小さくなった場所で起きたのではないかと提案した。これは最近の HI 観測により PSR B1509–58 の付近の星間物質が低密度であることが示されたことで支持された (Dubner et al., 2002)。しかしながら、van den Bergh and Kamper (1984) による 6 年間の可視光観測において、超新星残骸とパルサーの関係を示すような、RCW89 の有意な移動はみられなかった。

Yatsu (2008) では上記の問題を解決するために 高解像度 X 線衛星 Chandra を利用した画像解析を行なった。2000 年 と 2004 年 の観測データを比較し、RCW89 の各 knot の移動を測定することで PSR B1509–5 と RCW89 (or MSH 15–52) の物理関係を検証し、移動速度からパルサーの年齢を見積もった。しかし、2000 年のデータは PSR B1509–58 をターゲットにしたものであったために RCW89 は視野の端にあり像がぼやけてしまい、Chandra の性能を十分に活かした高精度の位置決めができなかった。

本研究では、RCW89 をターゲットにした 2004 年と 2008 年のデータを用いて、RCW89 の移動を測定した。knot の速度を先行研究以上に精度良く求めることが目的である。年齢が求めれば式 (1.4) から PSR B1509–58 の初期スピン速度を求めることができる。

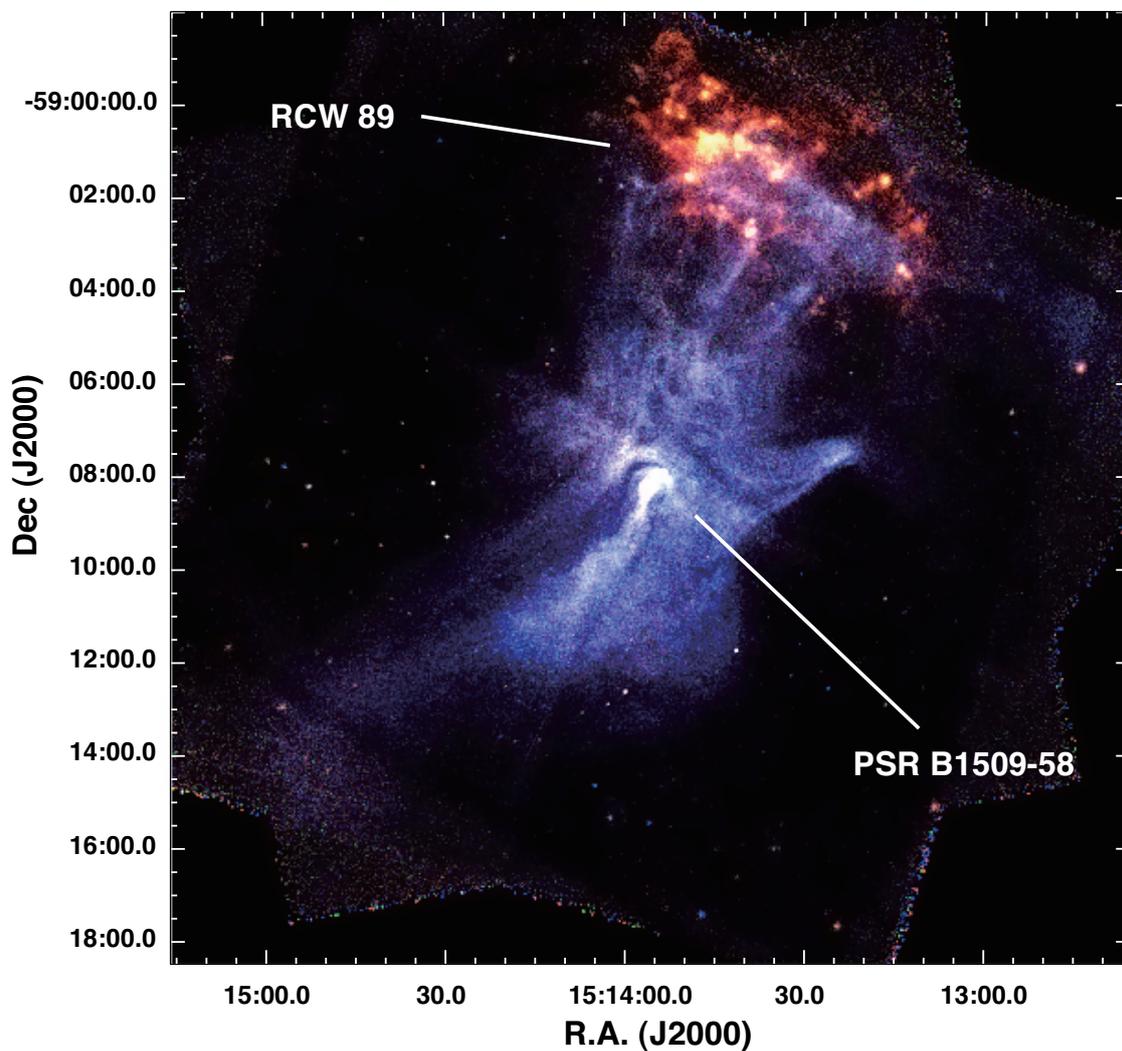


図 1.2: Chandra で撮像した PSR B1509-58 の画像。色はエネルギーバンド毎に、0.4–1.5 keV (赤)、1.5–2.0 keV (緑)、2.0–8.0 keV (青)。パルサーから南北に明るいジェットが伸びている。北側のジェットの終端にあるのが RCW89 である。(Yatsu, 2008)

## 第2章 観測装置

本研究ではX線観測衛星 Chandra を利用している。Chandra は0.5" 以下というかつてない高分解能を持ち、RCW89の移動速度の測定を可能にした。ここでは、簡潔に衛星全体を紹介し、本研究に関わる、HRMA (High Resolution Mirror Assembly), ACIS (Advanced CCD Imaging Spectrometer), 天体の座標 (WCS:World Coordinate System) の決め方について詳細に説明する。

### 2.1 X線観測衛星 Chandra

#### 2.1.1 ミッション概要

Chandra は高分解能 X 線望遠鏡と、高度な撮像器と分光器の組み合わせが一体になったものである。Chandra は NASA の 4 つの重要な観測衛星の中で X 線を担当している。他の 3 つの観測衛星とは、ハッブル宇宙望遠鏡、コンプトンガンマ線観測衛星、スピッツァー宇宙望遠鏡である。図は Chandra の概略図である。

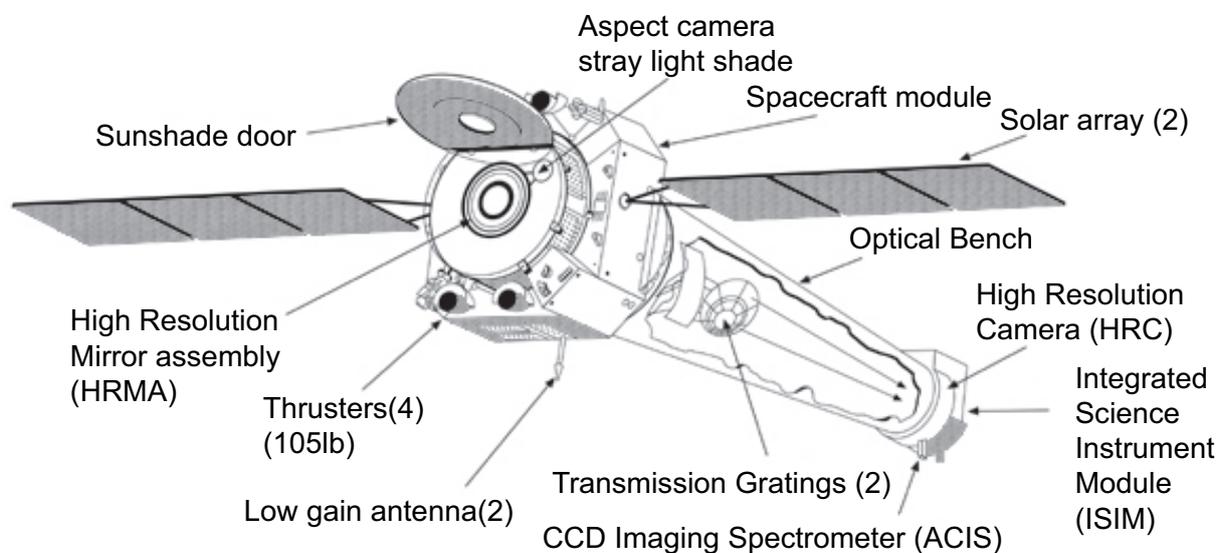


図 2.1: Chandra 衛星の概略図 (Chandra X-ray Center / NGST)

## 2.1.2 打上げと軌道

この衛星は 1994 年 7 月 23 日に NASA のスペースシャトル Columbia 号によって打上げに成功した。Chandra の軌道は高い楕円率の楕円であり、時間が経つにつれ変化する。2008 年冬の時点では遠地点の高さは  $\sim 132,200$  km、近地点の高さは  $\sim 16,700$  km である。打上げの後から遠地点と近地点は互いに近づいて来ていて、丁度ターニングポイントを過ぎたところである (最小の離心率)。今後 4 年間に渡って遠地点と近地点は再び離れていく (平均速度 数千 km/year)。この軌道のためはかなり能率的な観測が可能となっている。なぜなら、衛星が多く時間を電離帯より上側で過ごし ( $\sim 75\%$ )、63.5 時間という長い軌道周期から長時間の連続観測 ( $\sim 160$  ksec) が可能であるからである。

## 2.1.3 特長

Chandra は前の X 線天文学ミッションに比べ、空間分解能と分光分解能において一桁上の能力を持つように設計されている。HRMA は PSF (point spread function) の直径の半値幅が  $0.5''$  以下の像を作る。低エネルギー透過型回折格子 (LETG) と高エネルギー透過型回折格子 (HETG) は 2 つで、 $\leq 0.1 \sim 10$  keV のエネルギーバンド幅において良いエネルギー分解能を持つ。本研究ではこれらの回折格子は利用しない。

# 2.2 High Resolution Mirror Assembly (HRMA)

## 2.2.1 概要と物理構造

Chandra X 線望遠鏡は 4 組の同心の薄い斜入射鏡 (Wolter Type-I) である HRMA (High Resolution Mirror Assembly) から構成されている。図 2.3 は HRMA の概要図である。各組の前部は放物面鏡 ( $P_n$ ) であり、後部は双曲面鏡 ( $H_n$ ) である。計 8 枚の鏡は、クロムの層を結合した物質の表面をイリジウムで研磨し、コーティングされた Zerodur 硝子を使用して作られている。鏡の中心軸方向からの環状のビームがこれらの鏡に入射すると、放物面鏡と双曲面鏡に反射され、最終的に HRMA の 10m 後方の焦点に結像される。鏡の直径は 0.65 m (内側)  $\sim$  1.23 m (外側)、HRMA 全体の質量は 1484 kg である。これらの重要な HRMA の特性を表 2.1 にまとめる。

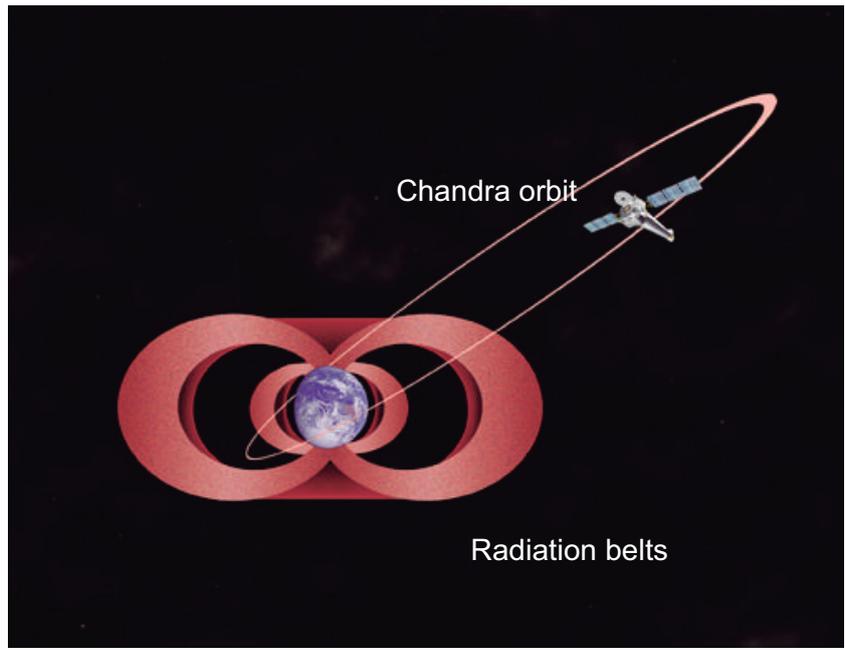


図 2.2: Chandra の軌道。内側と外側の電離帯も示す。Chandra の軌道の遠地点は 2008 年 12 月の時点で ~ 132,200 km である。(Chandra X-ray Center / M., Weiss)

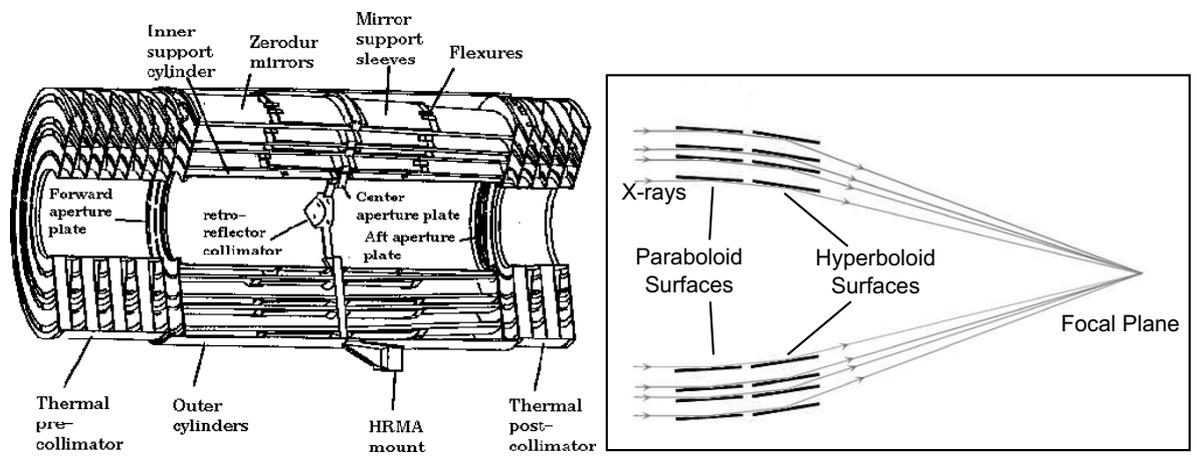


図 2.3: 左 —HRMA の 4 組の入れ子になった鏡と関連構造の様子 右 —X 線の反射の略図 (Chandra X-ray Center)

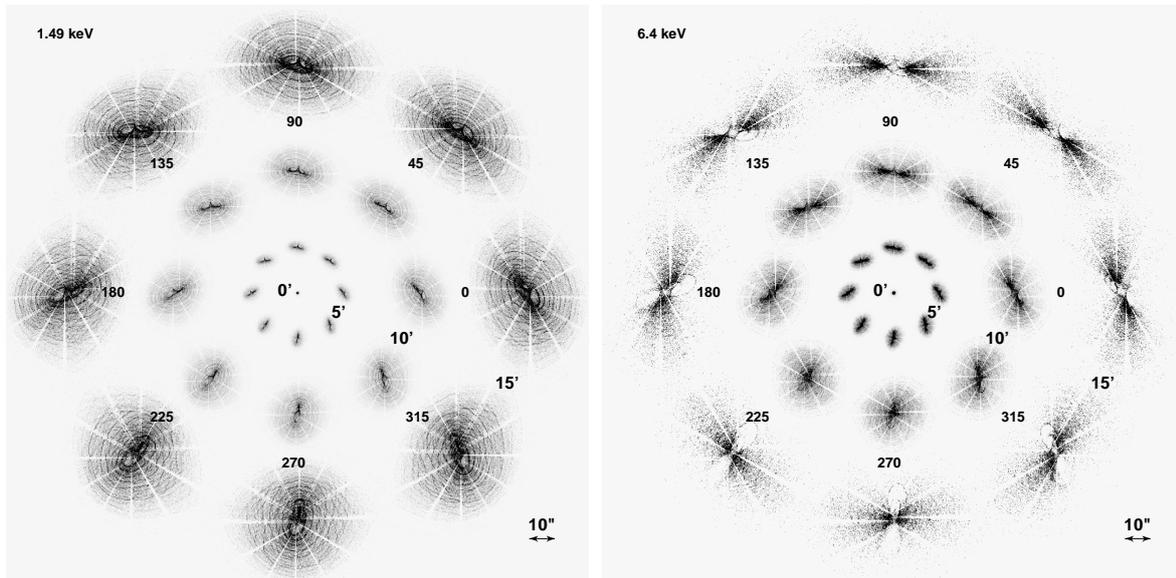


図 2.4: 1.49 keV (左)、6.4 keV (右) での PSF の歪み方のシミュレーション結果。視野の中心から様々な方向に 5', 10', 15' 離れた点光源の PSF の歪み方を示している。PSF の中心からのびる筋は支柱等の影である。PSF の大きさは全て同じスケールで表現している。10', 15' の PSF は構造が見えるようにするために明るくしている。

## 2.2.2 Point-Spread Function (PSF)

HRMA の最も重要な特長は空間分解能である。一般的に空間分解能は PSF (Point-Spread Function) を用いて定義される。PSF とは、全体のエネルギーのうちのある割合を含む円の半径で表わされる。HRMA の PSF の形状は収差の効果によって劇的に歪んでしまう。PSF の歪みは可視望遠鏡のコマ収差のように、光軸からのずれと方位角の両方に依存する。図 (2.4) は 1.49 keV と 6.4 keV での光軸からのずれ具合と方位角による、点光源の PSF の歪み具合を示している。

## 2.3 Advanced CCD Imaging Spectrometer (ACIS)

### 2.3.1 概要

Chandra は High Resolution Camera (HRC) と ACIS の 2 つの検出器を持っているが、本研究では ACIS も用いて撮像したデータを解析した。ACIS は高分解能な撮像と分光能力を併せ持つ、空間分解能分光器である。ACIS は分光能力を上げるために、High Energy Transmission Grating (HETG) か Low Energy Transmission Grating (LETG) を合わせ

てつかうことも可能である。ACIS の性能を表 (2.2) にまとめる。

### 2.3.2 オペレーティングモード

ACIS は様々なオペレーティングモードを用意している。ここでは、本研究で用いたオペレーティングモードを簡単に紹介する。

#### Timed Exposure Mode

Timed Exposure とは事前に決めた時間 CCD がデータを積分することを意味する。その時間が経つと、 $1024 \times 1024$  の活性領域に溜まった電荷はすばやく (41 ms) 貯蔵領域に移され、その後読みだされる。画像観測では必ず Timed Exposure Mode が使用される。

#### Full Frames / Sub-arrays

データを取得する CCD の領域を制限することができる。このオペレーションモードによってフルフレームで観測するよりも読みだし時間を短くできるので、結果、フレーム時間を短くできる。フレーム時間の短縮によって、パイルアップイベントを減らせるので、パルサーのように明るい光源を撮像するときには有用である。フレームタイムは 0.1 sec 刻みで 0.2 ~ 10 sec の間で撰ぶことができる。1つのチップで観測した場合、フレームタイムを 0.3 sec まで減らすことができる。

### 2.3.3 Telemetry Formats

ACIS には多くのテレメトリーフォーマットが用意されている。フォーマットを指定すると情報の型式が決定される。イベント毎の bit 数は選択したモードとフォーマットによって決まる。そして、イベント毎の bit 数によってテレメトリーがサチュレーションを起こすカウントレートが決まる。データフォーマットは以下のものから選択する。

- **Faint**— Faint フォーマットはイベントの検出器上での位置、到達時刻、イベントの強度、と隣接する  $3 \times 3$  のピクセル (Grade 評価するため) のデータを含んでいる。バイアスマップは地上にデータを降ろす前に分割される。
- **Very Faint**— Very Faint フォーマットはイベントの検出器上での位置、到達時刻、イベントの強度、と隣接する  $5 \times 5$  のピクセルの内容のデータを含んでいる。

バイアスマップは地上にデータを降ろす前に分割される。Grade 評価は  $3 \times 3$  のピクセルで行なわれる。このフォーマットはサチュレーションとパイルアップを防ぐために、低カウントレートの光源のみに初期処理の後に特別なバックグラウンド除去を必要とする。

- Graded— Graded フォーマットはイベントの検出器上の位置、イベントの強度、到達時刻、そしてイベント Grade のデータを含んでいる。

### 2.3.4 パイルアップ

パイルアップは同じフレームタイムの間に2個以上のX線フォトンがCCDの同じ場所に当たると起こる。HRMAは高分解能を誇るため、パイルアップは明るい光源を観測する際に深刻な問題となる。基本的な影響は以下のものがある。

- エネルギースペクトルの変型 — 各イベントのエネルギーはフォトンの合計になる。
- 実際よりもカウントレートが低くなる — 2個以上のフォトンをもつイベントを1個と数えてしまう。

図(2.5)はパイルアップによるPSFの変化を説明している。

### 2.3.5 Trailed events

電荷を活性領域から貯蔵領域に運ぶ過程で、電荷を隣の列に移すのに  $40 \mu\text{sec}$  かかる。各 CCD はフレームタイムだけでなく、この  $40 \mu\text{sec}$  の間も露光しているために、読みだし方向の同じ列にある他のピクセルのイベントと間違えてしまうことがある。図(2.6)は非常に明るい光源を撮像した例である。Trailed events は直接の露光よりも明るくなるので、はっきりと目で確認できる。Trailed images は “read out artifact” や “out-of-time images” とも呼ばれる。

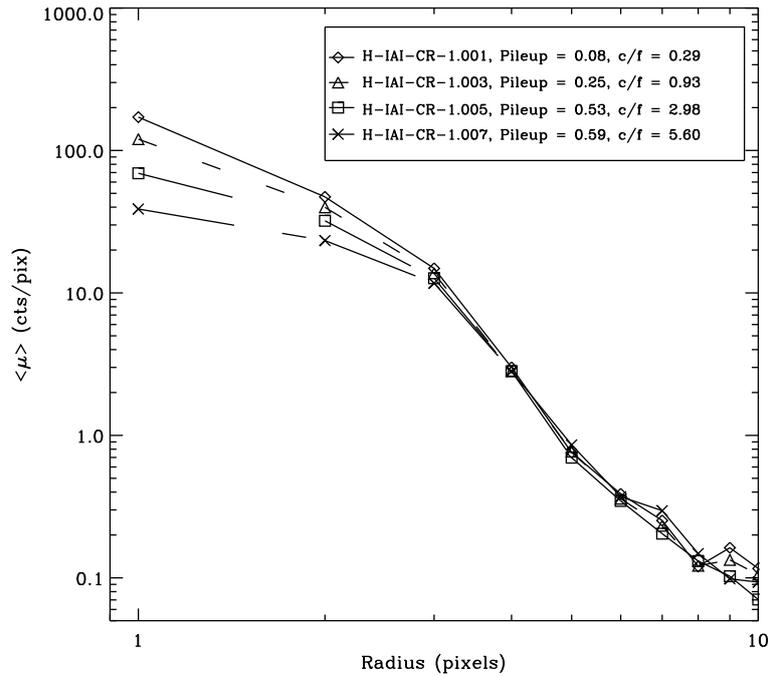


図 2.5: パイルアップの PSF への影響を图示している。これらのデータは XRCF での地上キャリブレーションによって得られた。“c/f” とは CCD フレーム毎のカウントレート。“pileup fraction” とは 2 個以上のフォトンと同時に検出したイベント数と全てのイベント数との比である。(Chandra X-ray Center)

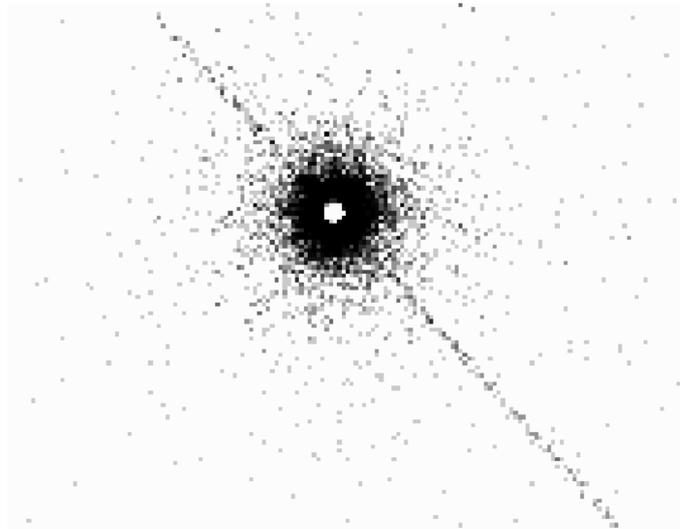


図 2.6: 強い X 線源の Trailed image。像の中心はパイルアップによって暗くなっている。中心でのイベントの多くは Grade が悪かったために取り除かれている。trail と読みだし方向は平行である。(Chandra X-ray Center)

## 2.4 Pointing Control and Aspect Determination System (PCAD)

### 2.4.1 概要

観測衛星を対象天体天体に向けたり、姿勢のを安定に保ったり、観測衛星がどこを向いているのかを調べるセンサー — 姿勢制御系を PCAD (Pointing Control and Aspect Determination System) と呼ぶ。Chandra の検出器は基本的に単一光子検出器であるため、正確な衛星の指向方向の履歴は X 線画像を再構成するのに十分である。

### 2.4.2 Physical configuration

PCAD 系の主な構成要素には以下のものがある。

- Aspect camera assembly (ACA) — 11.2cm 可視望遠鏡、迷光避け、2 つの CCD 検出器 (メイン、冗長系)、2 セットの電子機器。
- Inertial reference units (IRU) — 2 つの IRU を持ち、それぞれが 2 つの 2 軸ジャイロスコープを持つ。
- Fiducial light assembly (FLA) — 各科学検出器の近くに LED を搭載している。この LED の光は FTS を経て ACA に結像される。
- Fiducial transfer system (FTS) — 円錐状の光を真直にし、HRMA の真中に設置された retroreflector collimator を経て ACA と潜望鏡に送る。
- Coarse sun sensor (CSS) — 全天をカバーする太陽位置測定センサー。
- Fine sun sensor (FSS) — 50° の視野と 2° の制度をもつ太陽位置測定センサー。
- Earth sensor assembly (ESA) — 円錐走査センサー。軌道に入るミッションフェーズにて使用された。
- Reaction wheel assembly (RWA) — 衛星の姿勢制御用に 6 個のモーメントムホイールをもつ。
- Momentum unloading propulsion system (MUPS) — 液体燃料推進機。

- Reaction control system (RCS) — 衛星の姿勢制御様推進機

CSS, FSS, ESA は通常科学観測には用いられない。ACA に不測の事態が起きたときには CSS と FSS のデータを用いる。

### 2.4.3 性能

PCAD の性能と要求された性能を表 (2.3) にまとめる。どの場合でも要求された水準をクリアしている。

Chandra データの位置測定精度を測定した<sup>1</sup>。測定された系統誤差を取り除いた結果が図 (2.7) である。位置測定について用いた中で最も総合的なデータは ASIS-I を用いた、オリオン大星雲の 900ksec の観測によるものである。COCP (Chandra Orion Ultradeep Project) のメンバーが親切にも、1300 の X 線光源の 2MASS カタログとのオフセットと光軸からの距離のリストを提供した<sup>2</sup>。図 (2.8) の左図は光軸からのずれとオフセットの散布図である。右図は光軸からのずれ具合ごとのオフセットの割合を示す累積ヒストグラムである。光軸上 ( $0 - 2'$ ) では 90% の光源のオフセットは  $0.22''$  以下に収まっている。

---

<sup>1</sup>この過程は [http://cxc.harvard.edu/ciao/threads/arcsec\\_correction](http://cxc.harvard.edu/ciao/threads/arcsec_correction) にて詳細に書かれている。

<sup>2</sup>全詳細データは” Getman et al. 2005, ApJS, 160, 319” にある。上の解析では 50 カウント以上の 1152 ソースだけ用いた。

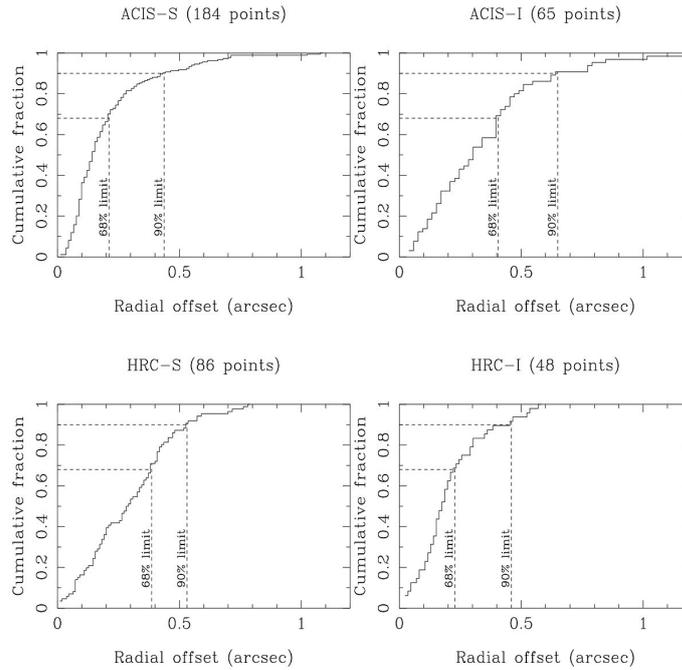


図 2.7: 各検出器の X 線光源の座標の精度を表わす累積ヒストグラム。"Radial offset" は Tycho-2 カタログの可視光での座標と Chandra での座標の距離である。(Chandra X-ray Center)

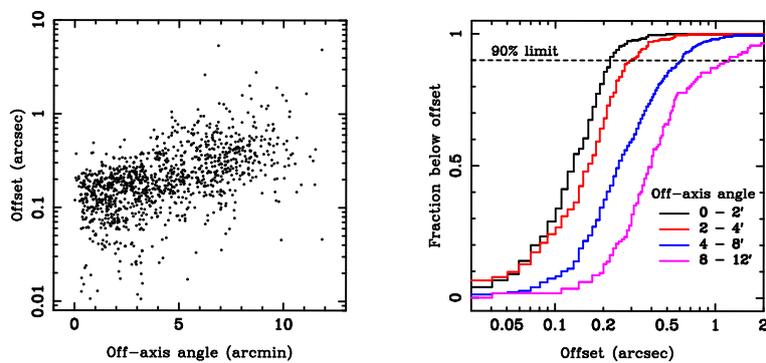


図 2.8: 左 — “ultra-deep ACIS-I Orion observation” で観測された光源のオフセット [arcsec] と光軸からのずれ [arcmin] の散布図。右 — オフセットの累積ヒストグラム。(Chandra X-ray Center)

表 2.1: Chandra HRMA Characteristics

Optics	Wolter Type-I
Mirror coating	Iridium (330 Å, nominal)
Mirror outer diameters (1, 3, 4, 6)	1.23, 0.99, 0.87, 0.65 m
Mirror lengths (Pn or Hn)	84 cm
Total length (pre- to post-collimator)	276 cm
Unobscured clear aperture	1145 cm <sup>2</sup>
HRMA mass	1484 kg
Focal length	10.070 ± 0.003 m
Plate scale	48.82 ± 0.02 μ m arcsec <sup>-1</sup>
PSF FWHM (with detector)	0.5
Effective area	800 cm <sup>2</sup> @ 0.25 keV 400 cm <sup>2</sup> @ 5.0 keV 100 cm <sup>2</sup> @ 8.0 keV
Ghost-free field of view	30' diameter

表 2.2: ACIS の特徴

Focal plane arrays	I-array (4 CCDs in 2x2) S-array (6 CCDs in 1x6)
CCD format	1024 × 1024 pixels
Pixel size	23.985 μm (0.49200.0001 arcsec)
Array size	16.9 × 16.9 arcmin (ACIS-I) 8.3 × 50.6 arcmin (ACIS-S)
On-axis effective Area	110 cm <sup>2</sup> @ 0.5 keV (FI) 600 <sup>2</sup> cm @ 1.5 keV (FI) 40 <sup>2</sup> cm @ 8.0 keV (FI)
FI Quantum efficiency	> 80% @ 3.0~6.5 keV > 30% @ 0.7 ~ 11.0 keV
BI Quantum efficiency	> 80% @ 0.8 ~5.5 keV > 30% @ 0.4~ 10.0 keV
System noise	< 2 electrons (rms) per pixel
Pulse-height encoding	12 bits/pixel
Event threshold	FI: 38 ADU ( 150-350 eV) BI: 20 ADU ( 150-220 eV)
Minimum row readout time	2.8 ms (CC-mode)
Nominal frame time	3.2 sec (full frame)
Frame transfer time	40 μsec (per row)
Detector operating temperature	- 90 ~- 120 °C

表 2.3: PCAD の要求される性能と実際の性能

Description	Requirement	Actual
Celestial location	1.0" (RMS radius)	0.4"
Imaging reconstruction	0.5" (RMS diameter)	0.3"
Absolute celestial pointing	30.0" (99.0%, radial)	3.0"
PCAD 10sec pointing stability	0.12" (95% RMS)	0.038" (pitch) 0.042" (yaw)

## 第3章 RCW89

### 3.1 観測

RCW89 付近 は Chandra によって何度か観測されている。過去に本研究と同様の手法で、2000 年と 2004 年のデータが解析されている (Yatsu, 2008)。2000 年のデータでは RCW89 が視野の端にあったために像がぼやけてしまい、座標の不確定性が大きかった。本研究では RCW89 を視野の中心に置いた 2004 年と 2008 年のデータを用いることで、先行研究よりも高い精度の結果を求める。2004 年のデータの露光時間は  $\sim 30$  ks, 2008 年のデータでは  $\sim 60$  ks である。ともに ACIS-S によって観測された。観測データは表 3.1 にまとめる。

表 3.1: RCW89 の観測のまとめ

ObsID#	Coordinate <sup>a</sup> (J2000.0)	Date	Detector	Mode <sup>b</sup>	Exposure (s)	PI
5562	$15^h 13^m 34^s.20 -59^\circ 01' 58''.0$	2004/12/31	ACIS-S	VFaint	29960	Yatsu
9138	$15^h 13^m 34^s.20 -59^\circ 01' 58''.0$	2008/06/22	ACIS-S	VFaint	59740	Yatsu
0754	$15^h 13^m 55^s.60 -59^\circ 08' 08''.9$	2000/08/14	ACIS-I	Faint	19280	Kaspi

<sup>a</sup> 照準点の座標

<sup>b</sup> Telemetry format (§3)

### 3.2 データリダクション

観測衛星のシステムを管理し、環境情報を用いてデータリダクションすることにより、Chandra の性能を十分に発揮させることができる。この作業により、バックグラウンドを減少し、エネルギー分解能と空間分解能が向上する。解析データは全て同じ手順でリダ

ククションした。

CXC (Cgandra X-ray Center) は Chandra の観測データの標準解析ツールとして、データ解析ソフトウェアパッケージである CIAO (Chandra Interactive Analysis of Observations) と、キャリブレーションデータベース CALDB を配付している。本研究では CIAO version 4.0、CALDB version 3.4.5 を利用している。

我々は、CXC によって推奨された使用説明に従ってリダクションを行なった。本研究で使用したデータは VFAINT モードで観測されているので “Clean ACIS Background in VFAINT Mode”<sup>1</sup> を適用した。リダクションの行程は以下の通りである。

- ACIS CTI (Charge Transfer Inefficiency) とゲインの時間依存性の補正
- grade/status フィルタリング
- GTI (Good Time Intervals) フィルタリング
- Exposure 補正

CTI は CCD の読み出しの時に電荷を隣のピクセルに移す際に、一部を失ってしまう現象である。grade は  $3 \times 3$  の pixel に注目して、スプリットの仕方によって 1 イベント毎に振り分けられる数字である。grade からノイズイベントを除去している。GTI は CCD 毎の観測開始時刻と終了時刻をまとめた表であり、観測時間外の不必要な情報を除去するのに用いられる。Exposure 補正とは鏡や検出器の不完全さ及び、それらのエネルギーと位置の依存性を CCD 毎に補正する作業である。全工程を終えた画像が図 3.1 である。

### 3.3 座標の測定の仕方

本研究では knot の移動を調べるために 1 pixel ( $0''.492$ ) 以下の精密な座標を測定する必要がある。今回、対象の光源の位置を求めるのに Sherpa in the Ciao 3.4 (Freeman et al., 2001) を用いた。Sherpa は PSF を畳み込みカーネルとした 2 次元画像解析を行なうことで、1 arcsec 以下の誤差で位置を計算することができる。カーネルの PSF は CALDB 中の PSF 辞書から作成した。

図 3.2 は Sherpa を用いた解析の結果を図示したものである。PSF の fitting parameter には以下のものがある。光源は楕円形状を仮定している。

- バックグラウンドの明るさ

<sup>1</sup><http://cxc.harvard.edu/ciao/threads/aciscleanvf/>

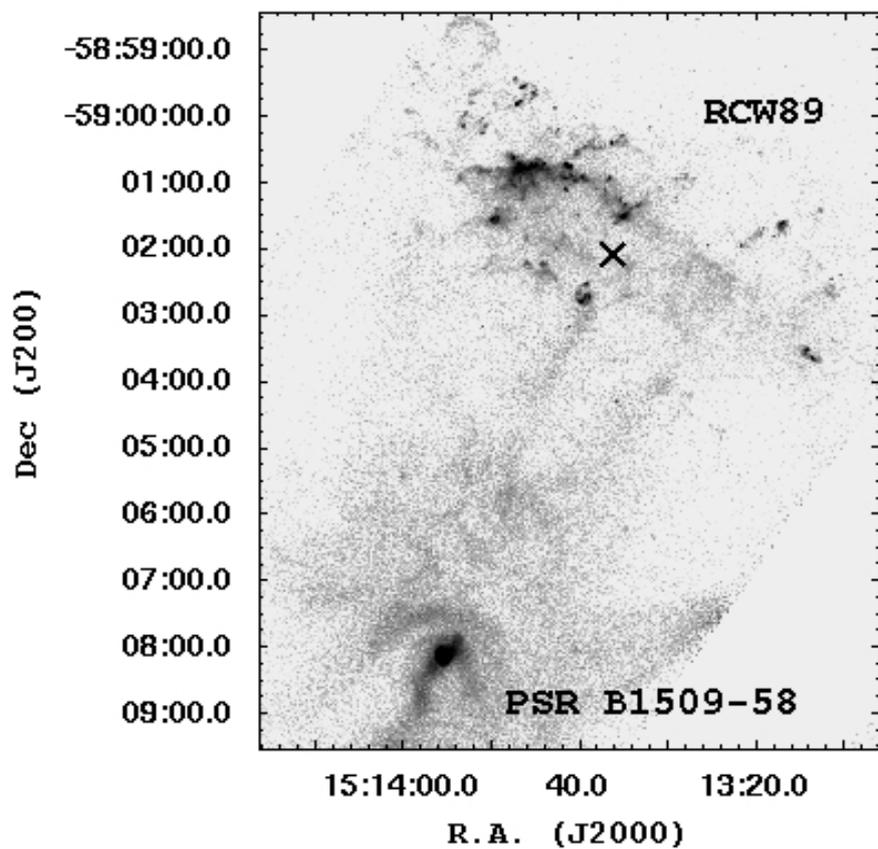


図 3.1: Chandra で撮像した PSR B1509-58 と RCW89 (0.4-8.0 keV, ID=9138)。x 印は視野の中心を示す。 $\sigma=2$  [pixel] のガウシアンでスムーズし, log scale で表わした。

- 画像上での x 座標
- 画像上での y 座標
- 光源の大きさ
- 光源の楕円率
- 光源の長軸の傾き
- 光源の明るさ

2004 年と 2008 年のデータの解析において同一の knot の位置を求める際には、まず、観測時間が長く統計の良い 2008 年のデータにおいて fitting する。次に、2004 年のデータを解析する際には光源の大きさ、楕円率、長軸の傾きの 3 つの parameter の値を、上で求めた値に固定して fitting をすることで位置を求めた。

### 3.4 WCS の補正

本研究では 2004 年と 2008 年間の各 knot の座標の差を求める。そのために、2 つのデータに書きこまれている座標系 (= WCS : World Coordinate System) が高い精度で一致している必要がある。*Chandra* のデータは既知のオフセットを補正することにより、光軸から  $2'$  以内の天体において誤差  $\sim 0.2$  arcsec という高精度に WCS が書きこまれている。(1  $\sigma$ )(§2.4)。ここでは、WCS の精度をさらに高めることを試みた。WCS の補正方法として下記の 2 つの方法を試みたが、どちらも正確な補正をすることができなかった。

#### 3.4.1 パルサーを用いた WCS の補正

WCS を合わせる際には 2 つのデータのパルサーの座標が一致するように片方のデータの WCS をずらし、その後、パルサーから離れた参照星の座標が一致するようにパルサーを中心に wcs を回転させるという手順で、補正を試みた。パルサーが過去の研究から移動していないことが確認されていることと (Kaspi et al., 1994; Gaensler et al., 2002)、パルサーが画像上で最も明るいために位置を精度良く決められると考えたことから、この補正方法を選んだ。実際に求められた補正前の WCS 上でのパルサーの座標と、過去に X 線と電波により観測された座標を 図 (3.2) に記す。尚、今回測定したデータ (Obs ID = 5562, 9138) の座標の誤差には WCS の誤りからくる系統誤差は含まれていない。

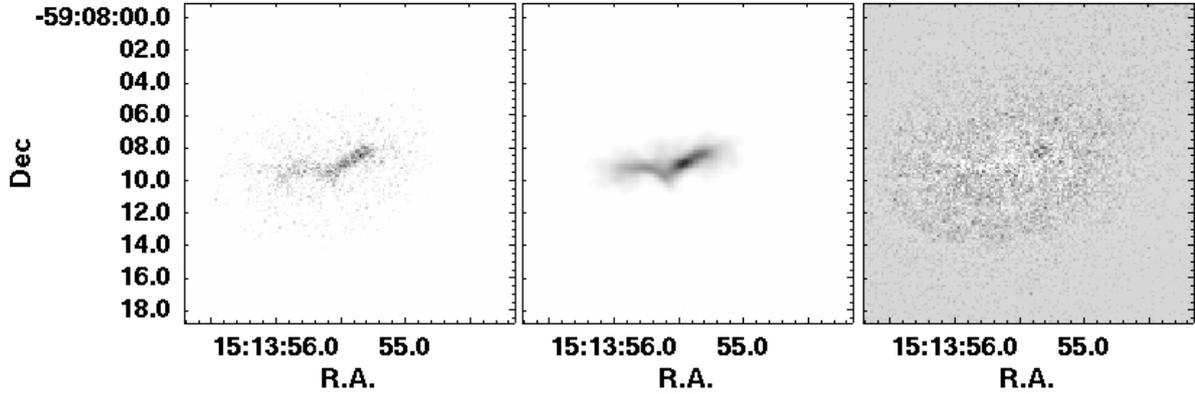


図 3.2: Sherpa を用いての解析結果 (PSR B1509-58 ObsID=5562 の場合)。左 — 観測された像。中 — シミュレートした PSF。右 — 差分。パルサーは点光源 ( $r = 0.025pixel$  の円) として fitting した。視野の中心から 6 arcmin 程度離れているので像がぼやけている。差分をみると、像のぼやけ方が良くシミュレートされているのがわかる。

表 3.2: PSR B1509-58 の座標

Obs ID、参考文献	観測年	観測波長	R.A. (J2000)	Dec (J2000)
5562	2004	X 線	$15^h 13^m 55^s .450 \pm 0^s .01$	$-59^\circ 08' 08'' .90 \pm 0'' .01$
9138	2008	X 線	$15^h 13^m 55^s .614 \pm 0^s .01$	$-59^\circ 08' 08'' .09 \pm 0'' .01$
Gaensler et al. (2002)	2000	X 線	$15^h 13^m 55^s .64 \pm 0^s .03$	$-59^\circ 08' 09'' .2 \pm 0'' .5$
Gaensler et al. (1999)	1995~1997	電波	$15^h 13^m 55^s .61 \pm 0^s .02$	$-59^\circ 08' 08'' .67 \pm 0'' .26$

測定したパルサーの座標が文献値と  $0''.5 \sim 1''$  ずれている。光軸から離れた天体でも WCS のずれは  $0''.5$  (90% limit) であるので (Chandra X-ray Center)、測定された値は、ずれすぎである。パルサーの座標が正確に求められなかったので、この手順による WCS の補正は断念する。パルサーの座標が正確に求められなかったことについては §4.1 にて考察する。

### 3.4.2 参照星を用いた補正

まず、RCW89 以外の参照星を用いた WCS の補正を試みた。用いた参照星は U0300\_23161450 (15:13:30.312,  $-58:55:07.54$ ), U0300\_23165096 (15:13:36.686,  $-58:56:12.26$ ), U0300\_23166719 (15:13:39.403,  $-58:57:53.93$ ) (USNO カタログ) である。ここでは順に R\_A, R\_B, R\_C と名付ける。これらの天体は可視光観測 (DSS : Digital Sky Survey) において、1980 ~ 1997 年の間に移動していないことが確認されている。

上述の参照星以外にも可視天体のカタログには載っていないが、WCS の補正に使用できる十分遠くの X 線天体が考えられる。そこで、視野の中に写っている点光源について座標の測定を行なった。15 個の点光源について測定を試みたが、Obs ID 5562, 9138 の両方で座標が求められた点源は 1 つ (R\_D) だけだった。その他の点光源は暗すぎて、座標を PSF-fitting で測定することができなかった。

測定された座標が表 (3.3) である。参照星の座標を用いて WCS を書き変えるには少なくとも 3 天体の正確な座標が必要である。しかし、用いた 4 天体のうち 3 天体の座標の誤差が  $\geq 0''.5$  であり、WCS の補正をするには大きすぎた。これは、光軸からはずれてたことによって、像がぼやけたことと、暗い天体だったことが原因である。参照星の座標のずれと、測定を試みた点光源をまとめたものが、図 (3.3) である。

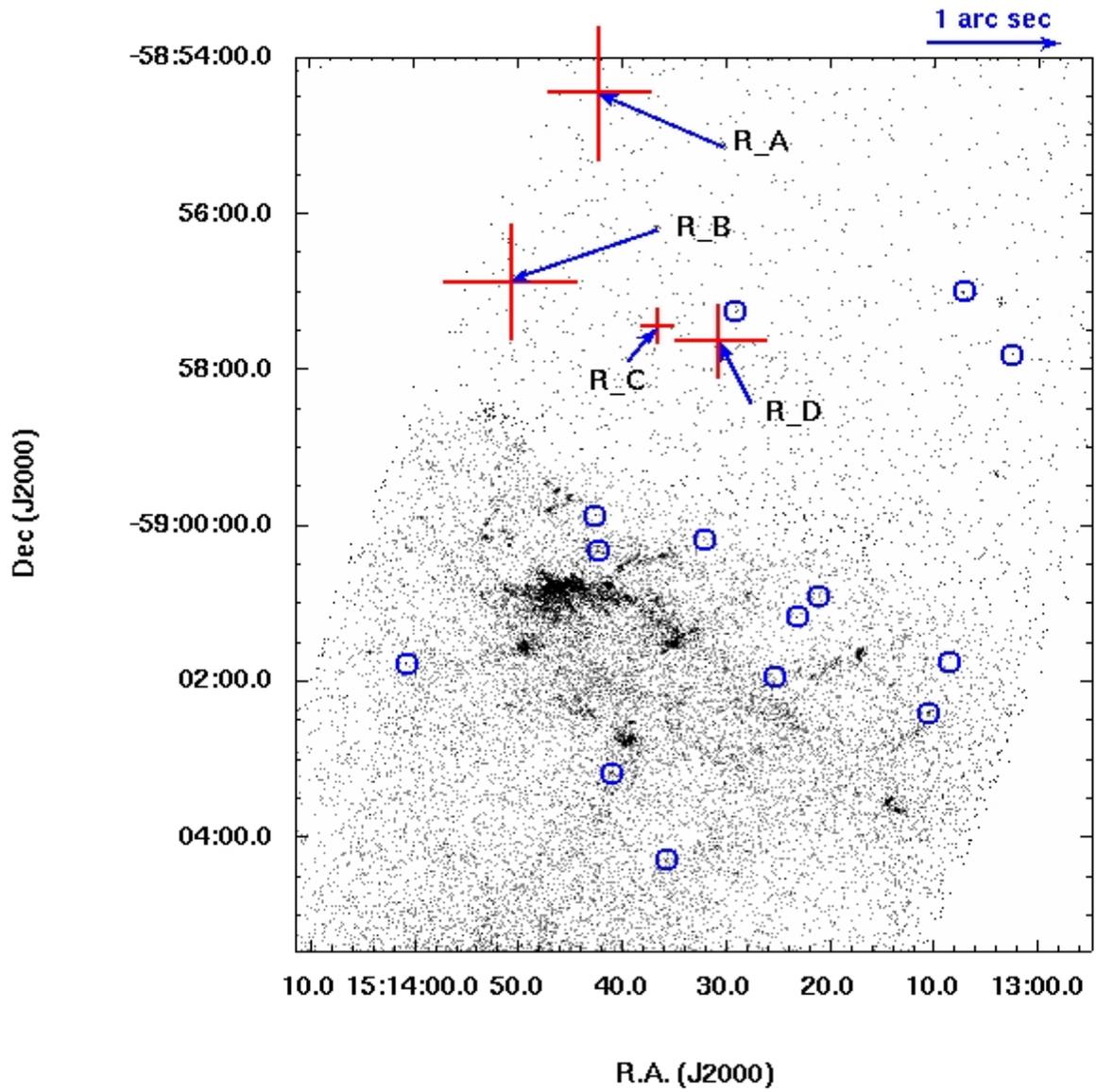


図 3.3: Obs ID 5562、9138 間での参照星の座標の差を 50 倍にしてベクトルとした。同じ縮尺で  $1\sigma$  の誤差を十字で示した。また、座標を求めようとした点源を丸印で示す。

表 3.3: 参照星の座標

参照星	Obs ID	R.A. (J2000)	$1\sigma$ error	Dec (J2000)	$1\sigma$ error
R.A	5562	$15^h 13^m 30^s.261$	$\pm 0''.65$	$-58^\circ 55' 09''.00$	$\pm 0''.96$
	9138	$15^h 13^m 30^s.505$	$\pm 0''.43$	$-58^\circ 55' 08''.16$	$\pm 0''.40$
R.B	5562	$15^h 13^m 36^s.583$	$\pm 0''.43$	$-58^\circ 56' 13''.18$	$\pm 0''.48$
	9138	$15^h 13^m 36^s.868$	$\pm 0''.90$	$-58^\circ 56' 14''.00$	$\pm 0''.76$
R.C	5562	$15^h 13^m 39^s.405$	$\pm 0''.21$	$-58^\circ 57' 53''.87$	$\pm 0''.21$
	9138	$15^h 13^m 39^s.347$	$\pm 0''.15$	$-58^\circ 57' 53''.34$	$\pm 0''.19$
R.D	5562	$15^h 13^m 27^s.611$	$\pm 0''.49$	$-58^\circ 58' 26''.88$	$\pm 0''.56$
	9138	$15^h 13^m 27^s.672$	$\pm 0''.48$	$-58^\circ 58' 25''.89$	$\pm 0''.18$

### 3.5 knot の移動測定

WCS の補正ができなかったので以降の解析には WCS 不確定性として系統誤差  $0.2''$  (Chandra X-ray Center) を加える。本研究では RCW89 の 15 個の knot について 3.5 年間の移動を調べた。Obs ID 5562, 9138 それぞれの画像で各 knot の座標 (R.A. Dec) を測定し、その差を各 knot の移動量とした。各 knot のパルサーからの放射方向への移動を表 (3.4) にまとめた。平均速度の放射方向成分を求めた結果  $0.15 \pm 0.08$  [arcsec/year] であった。これから RCW89 の移動速度は  $3700 \pm 2000(d/5.2kpc)$  [km/s] であった。各 knot の移動を 50 倍のベクトルとして表わしたのが 図 (3.4) である。同時に  $1\sigma$  の誤差を十字で示した。

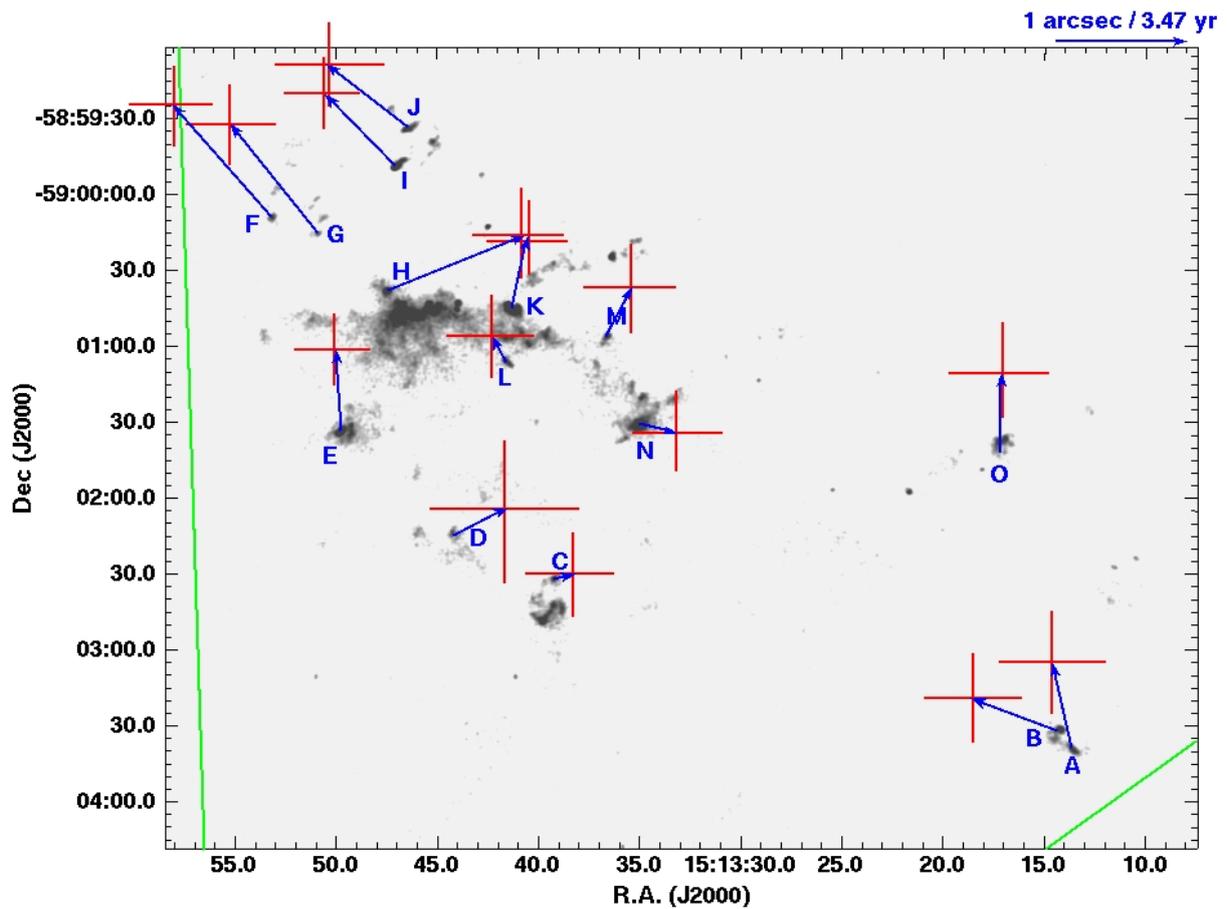


図 3.4: RCW89 の knot のそれぞれの移動の様子を表わしたベクトル図。誤差を十字で示した。移動量と誤差は 50 倍してある。誤差は WCS の不確定性由来の系統誤差を含んでいる。図の中を縦断している直線は PSR B1509-58 からの放射方向を示している。

表 3.4: knot の位置測定のとめ

knot-# <sup>a</sup>	R.A.	座標 (J2000.0)	Dec	距離 <sup>b</sup> (arcmin)	放射方向の速度 (arcsec yr <sup>-1</sup> )	移動時間 <sup>c</sup> (yr)
A.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 13 <sup>s</sup> .622	-59°03'38".90		7'.01	0".09 ± 0".12	4500 ± 5680
B.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 14 <sup>s</sup> .326	-59°03'31".71		7'.02	-0".10 ± 0".11	-4330 ± 4700
C.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 39 <sup>s</sup> .207	-59°02'32".01		5'.98	0".03 ± 0".10	13500 ± 50000
D.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 44 <sup>s</sup> .185	-59°02'14".54		6'.07	0".09 ± 0".16	4050 ± 7300
E.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 49 <sup>s</sup> .721	-59°01'33".29		6'.62	0".18 ± 0".08	2150 ± 970
F.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup> .149	-59°00'08".82		7'.99	0".25 ± 0".09	1910 ± 700
G.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 50 <sup>s</sup> .886	-59°00'15".20		7'.70	0".23 ± 0".09	2030 ± 800
H.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 47 <sup>s</sup> .441	-59°00'38".00		7'.57	0".17 ± 0".10	2750 ± 1700
I.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 47 <sup>s</sup> .045	-58°59'48".68		8'.39	0".14 ± 0".08	3490 ± 2000
J.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> .416	-58°59'33".64		8'.65	0".12 ± 0".10	4350 ± 3570
K.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup> .349	-59°00'44".96		7'.61	0".17 ± 0".09	2680 ± 1340
L.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup> .567	-59°01'06".55		7'.25	0".05 ± 0".09	8300 ± 15000
M.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup> .640	-59°00'56".03		7'.60	0".13 ± 0".10	3590 ± 2900
N.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 34 <sup>s</sup> .996	-59°01'30".76		7'.13	0".01 ± 0".09	34000 ± 260000
O.....	15 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 17 <sup>s</sup> .195	-59°01'37".55		8'.17	0".15 ± 0".11	3220 ± 2340
平均...					0".15 ± 0".08	2340 ± 1500

Note— 誤差は 1  $\sigma$ 。WCS の不確定性による誤差を含む。 <sup>a</sup> 図 3.4 で定義した knot。

<sup>b</sup> PSR B1509-58 と各 knot の距離。

<sup>c</sup> 距離を放射方向の速度で割って求めた移動時間

## 第4章 議論

### 4.1 パルサーの座標の測定

パルサーの座標が正確に測定できなかったことについて考察する。パルサーの座標が文献値からどの方向にどれだけずれているかを示したのが図(4.1)である。Obs ID 5562 に注目すると、ACIS の CCD 配置図(図 4.2) と見くらべ、CCD の読み出し方向に大きく座標がずれていることがわかる。本研究で用いたデータは RCW89 の座標を正確に測定するために、VFaint モード (§2.3.3) を採用している。そのため、カウントレートの高いパルサーではパイルアップ (§2.3.4) や Trailing events (§2.3.5) が起きてしまう。これらによって画像に、読み出し方向にそって線が引かれたり、中心部のカウントが実際よりも少く観測される。結果、パルサーの重心がずれてしまい、正しく座標を測定できなかったのではないかと考えられる。

しかし、同じく VFaint モードで観測された Obs ID 9138 では読み出し方向にそった座標のずれは見られない。Trailing events 以外に原因があるか、もしくは Trailing events はそれほど関係ないのかもしれない。

### 4.2 WCS 未補正の影響

表 3.4 に示した結果の不確定性の大部分は WCS の不確定性によるものである。なぜならば、PSF-fitting の不確定性は多くの knot について測定し、重みつき平均をとることで小さく出来るのに対し、WCS の不確定性は小さくすることが出来ないからである。

今回の解析に用いたデータの WCS が完全に正しいと仮定した際の解析結果は表(4.1)となる。WCS の補正を正確に行なうことが出来れば不確定性が 1 桁小さくなることが期待される。

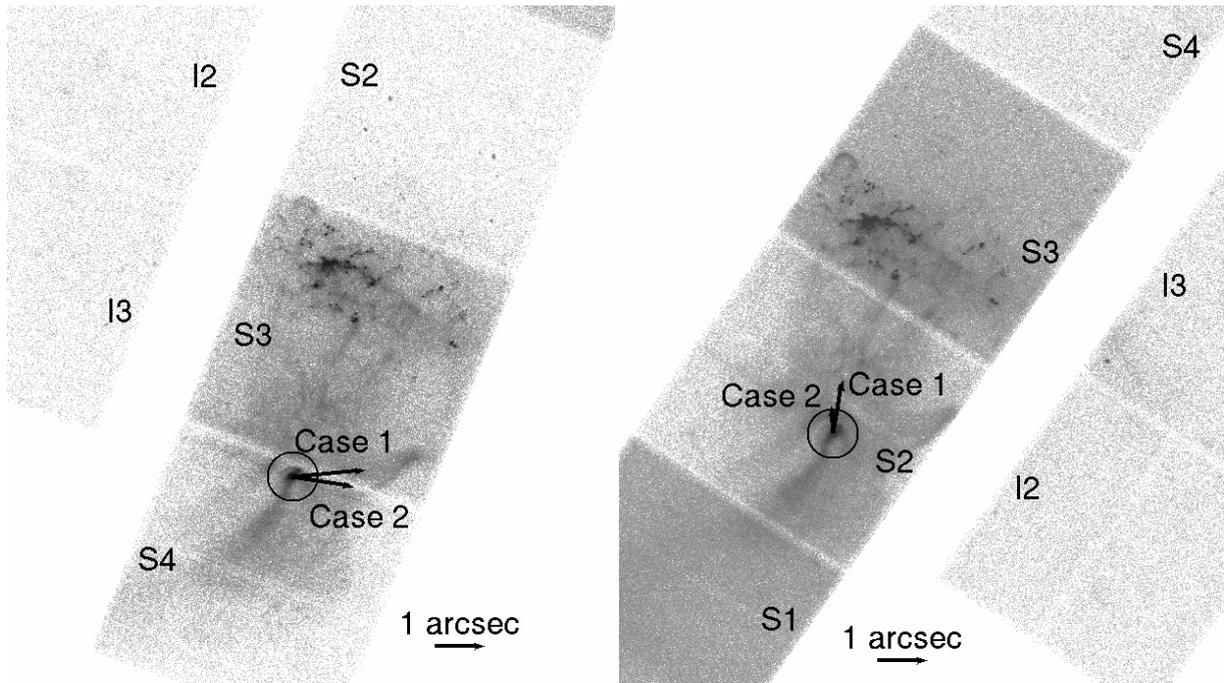


図 4.1: 左 — Obs ID 5562。右 — Obs ID 9138。文献値から測定された座標へのベクトルを 100 倍にした。Case1 : Gaensler et al. (2002) の文献値と比較。Case2 : Gaensler et al. (1999) の文献値と比較。円はベクトルと同じ縮尺で半径  $0.5''$  (光軸からずれた際の WCS の精度 ( $1\sigma$ )) を表す。S1 ~ S4, I2, I3 は CCD chip の名称。撮像した季節が半年ずれているために、太陽角制限から太陽パネルと視野の方向の関係が変わり視野がほぼ  $180^\circ$  回転している。

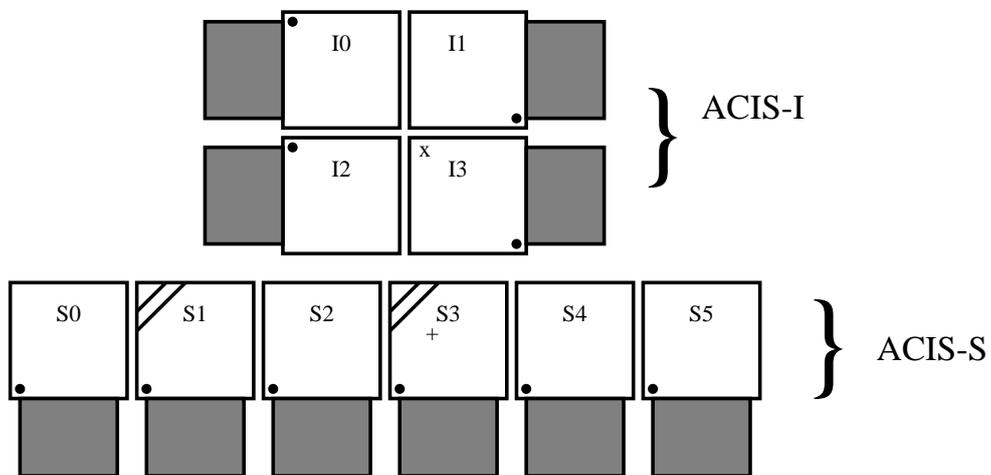


図 4.2: ACIS の CCD 配置図。色を付けた部分は CCD 読み出し装置。(Chandra X-ray Center)

表 4.1: WCS が正しいと仮定した時の結果

放射方向の速度 ( $\text{arcsec yr}^{-1}$ )	$0''.152 \pm 0''.008$
移動時間 ( $\text{year}$ )	$2336 \pm 122$

### 4.3 年齢問題

WCS の補正が出来なかったために不確定性が大きい結果となっているが、図 (3.4) の中でパルサーからの距離が比較的遠い knot (E,F,G,H,I,J,K,O) に注目すると、PSR B 1509–58 から遠退く方向に有意に移動していることが分る。これは RCW89 と PSR B 1509–58 が同一超新星起原であることを支持している。パルサーからの距離が比較的近い knot (A, B, C, D, L, N) において、有意な移動が見られないことは、Yatsu et al. (2005) で行なわれた RCW89 の 3 次元形状解析の結果から説明できる。我々が見ている RCW89 は球殻形状をしたまま球の中心から放射方向に遠退いているので、画像上で比較的近い knot は速度の視線方向成分が大きいため画像解析をした際に移動が少く測定されるのである (図 4.3)。

2340 ± 1500 年という移動時間は PSR B 1509–58 の特性年齢と矛盾しない結果である。

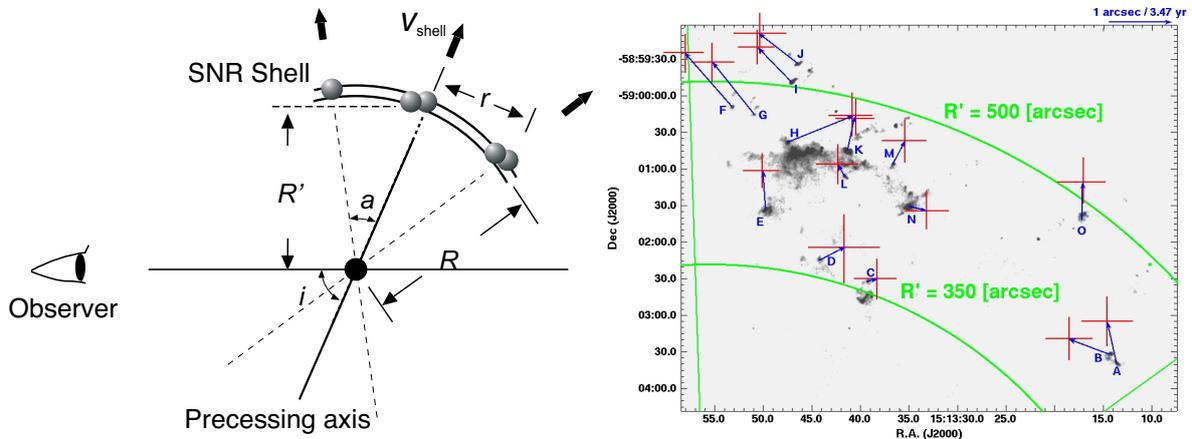


図 4.3: 左— RCW89 の 3 次元形状の概略図 (Yatsu, 2008)。右— knot の移動量のベクトル図 (図 3.4)。RCW89 は球殻形状のまま球の中心から放射状に遠のいている。R' が大きいと、視線方向と knot の移動方向がなす角が垂直に近くなり見た目の移動量が大きくなる。

## 第5章 まとめと今後の課題

WCS 補正ができなかったために期待された精度の結果がでなかった。しかし、RCW89 と PSR B 1509–58 が同一超新星起原であることを肯定するような相関を見いだした。1桁精度の良い解析結果を得るために、WCS 補正を達成しなければならない。精度良く RCW89 の年齢が求められると、式 (1.4) から PSR B1509-58 の初期スピン速度を計算することが出来る。

# 付録A 計算式

## A.1 誤差の伝播

まず、各 knot のパルサーから放射方向への移動量  $dr$  を求める。PSF-fitting の結果求められる値は Obs ID 5562 での座標  $(\alpha RA, \alpha DEC[deg])$  とそれぞれの誤差  $\alpha\sigma_{dx}, \alpha\sigma_{dy}[arcsec]$ 、Obs ID 9186 での座標  $(\beta RA, \beta DEC[deg])$  とそれぞれの誤差  $\beta\sigma_{dx}, \beta\sigma_{dy}[arcsec]$  である。

x 軸、y 軸の変化量  $dx, dy [arcsec]$  を求める。RA 軸、Dec 軸 はそれぞれ画像上の x 軸、y 軸と対応していると考える。( $dx, dy \ll 1$ )

$$dx = -(\beta RA - \alpha RA) \times \cos(\alpha DEC) \times 3600 \quad [arcsec] \quad (A.1)$$

$$dy = (\beta Dec - \alpha DEC) \times 3600 \quad [arcsec] \quad (A.2)$$

$$\sigma_{dx} = \sqrt{\alpha\sigma_{dx}^2 + \beta\sigma_{dx}^2} \quad [arcsec] \quad (A.3)$$

$$\sigma_{dy} = \sqrt{\alpha\sigma_{dy}^2 + \beta\sigma_{dy}^2} \quad [arcsec] \quad (A.4)$$

x 軸とパルサーから knot を結ぶ線分とのなす角を  $\theta$  とする。各 knot のパルサーから放射方向への移動量  $dr$  は

$$dr = \cos\theta dx + \sin\theta dy \quad [arcsec] \quad (A.5)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\tan^2\theta + 1}} \times (dx + dy \tan\theta) \quad [arcsec] \quad (A.6)$$

$$\sigma_{dr} = \sqrt{\frac{1}{\tan^2\theta + 1}} \times \{\sigma_{dx}^2 + (\sigma_{dy} \tan\theta)^2\} \quad [arcsec] \quad (A.7)$$

放射方向への速度  $v [arcsec year^{-1}]$  は、観測間隔を  $year [year]$  とすると。

$$v = dr \div year \quad [arcsec year^{-1}] \quad (A.8)$$

$$\sigma_v = \sigma_{dr} \div year \quad [arcsec year^{-1}] \quad (A.9)$$

RCW89 の推定年齢  $AGE [year]$  は、パルサー - knot 間の距離を  $DIS [arcsec]$  とすると。

$$AGE = DIS \div v \quad [year] \quad (A.10)$$

$$\sigma_{AGE} = \frac{\sigma_v \times DIS}{v^2} \quad [year] \quad (A.11)$$

## A.2 系統誤差

本研究では WCS の不確定性 ( $\sigma_{WCS}$ ) を系統誤差として取り扱った。系統誤差を含んだ誤差を  $\sigma'$  とする。

$$\sigma'_v = \sqrt{\sigma_v^2 + 2 \times \sigma_{WCS}^2} \quad [\text{arcsec year}^{-1}] \quad (\text{A.12})$$

$$\sigma'_{AGE} = \frac{\sigma_v \times DIS}{v^2} \quad [\text{year}] \quad (\text{A.13})$$

## A.3 重みつき平均

RCW89 のパルサーからの放射方向への速度と年齢の最尤推定値を求める。WCS の不確定性による系統誤差は重みつき平均によって小さくならない誤差なので、重みつき平均を行なった後に加える。knot # を  $i$  とすると。

$$v_{MLE} = \frac{\sum_i v_i / \sigma_{v_i}^2}{1 / \sigma_{v_i}^2} \quad (\text{A.14})$$

$$AGE_{MLE} = \frac{\sum_i AGE_i / \sigma_{AGE_i}^2}{1 / \sigma_{AGE_i}^2} \quad (\text{A.15})$$

## 付録B PSF-fitting 結果

RCW89 の knot の位置測定の際の PSF-fitting の結果を示す。knot の名前は図 (3.4) で定義したものである。

Obs ID 5562

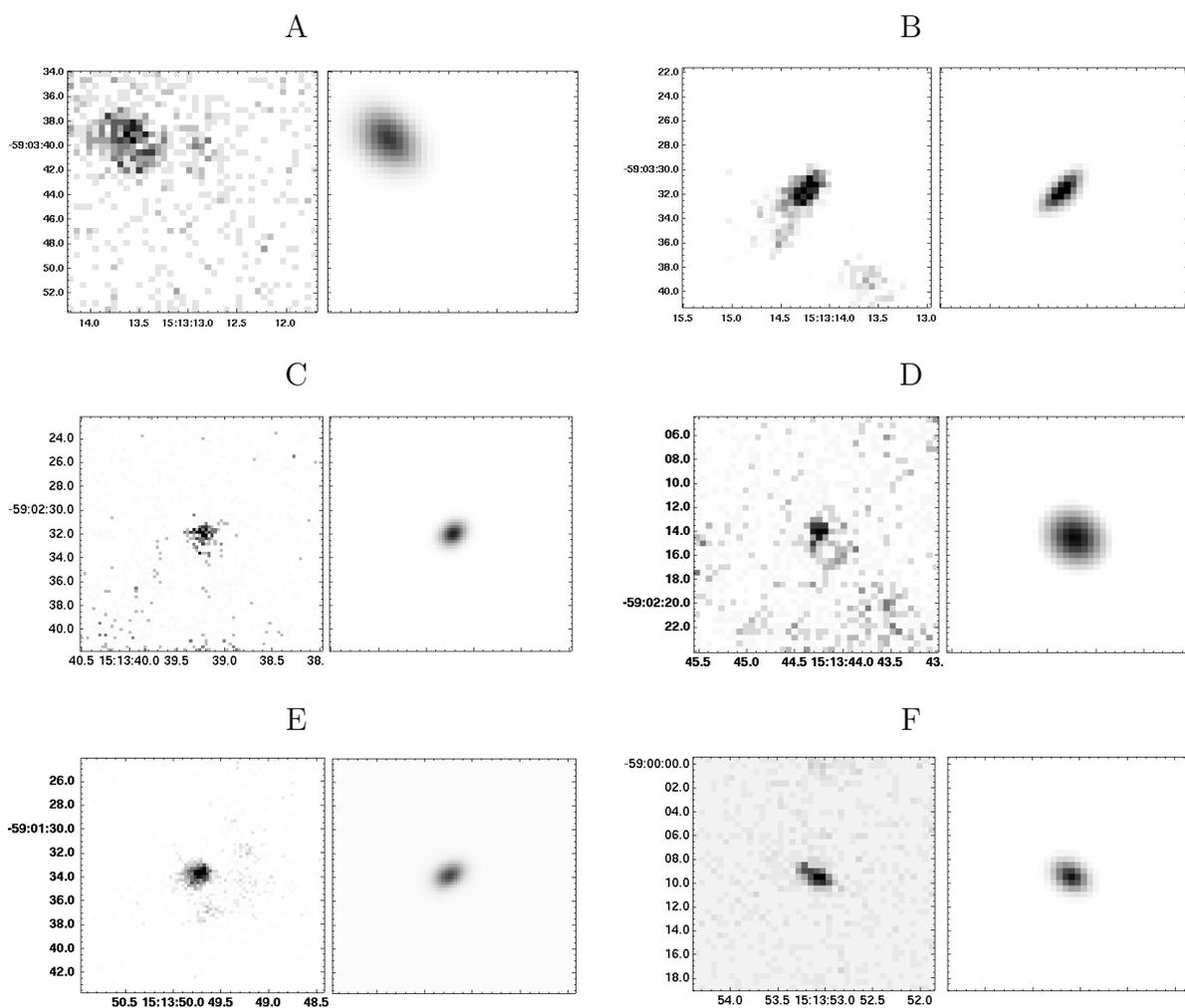


図 B.1: PSF-fitting の結果 (Obs ID 5562 A-F)。各組において、左 — 観測された像。右 — シミュレートした PSF。

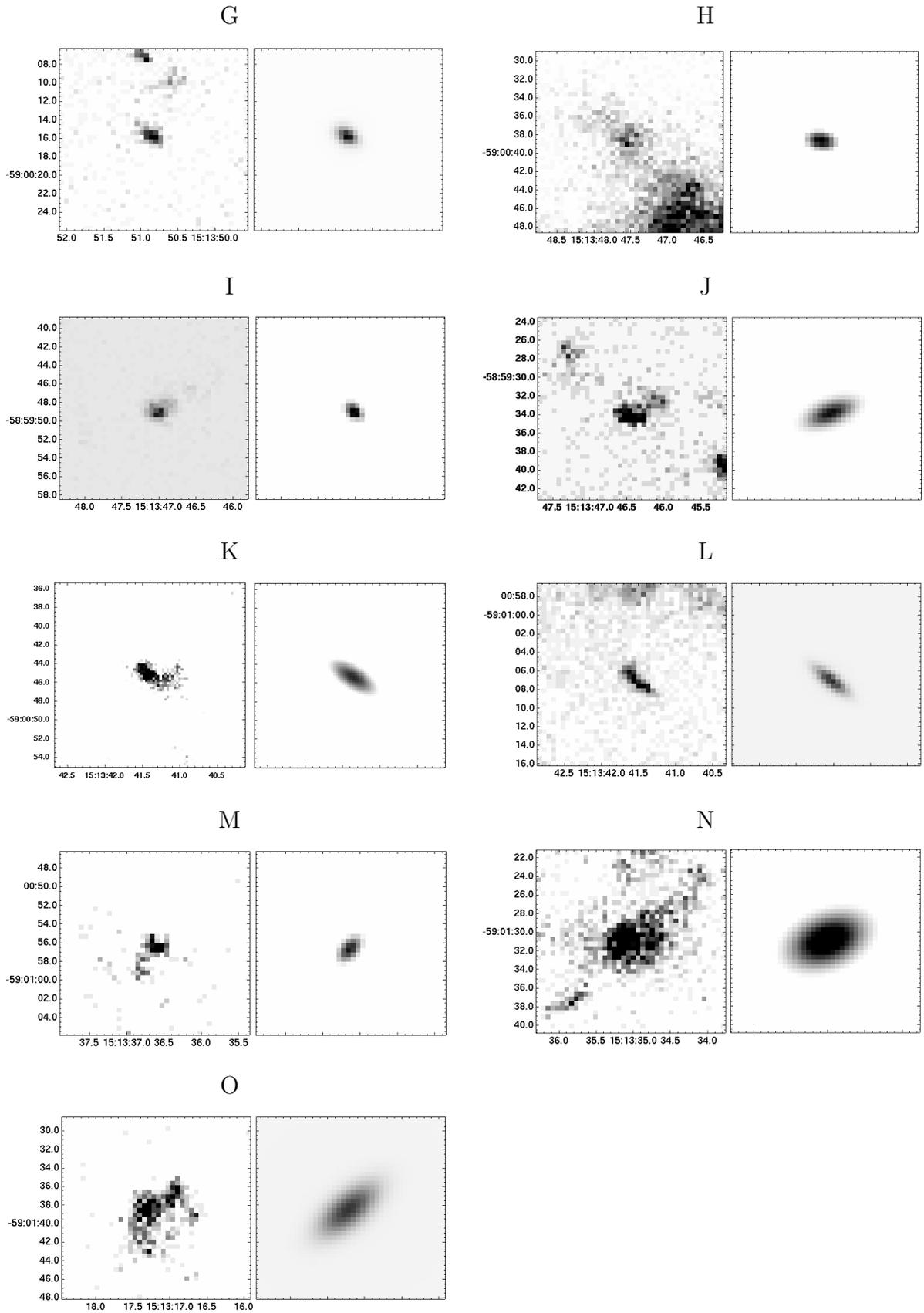


図 B.2: PSF-fitting の結果 (Obs ID 5562 G-O)。各組において、左 — 観測された像。右 — シミュレートした PSF。

## Obs ID 9138

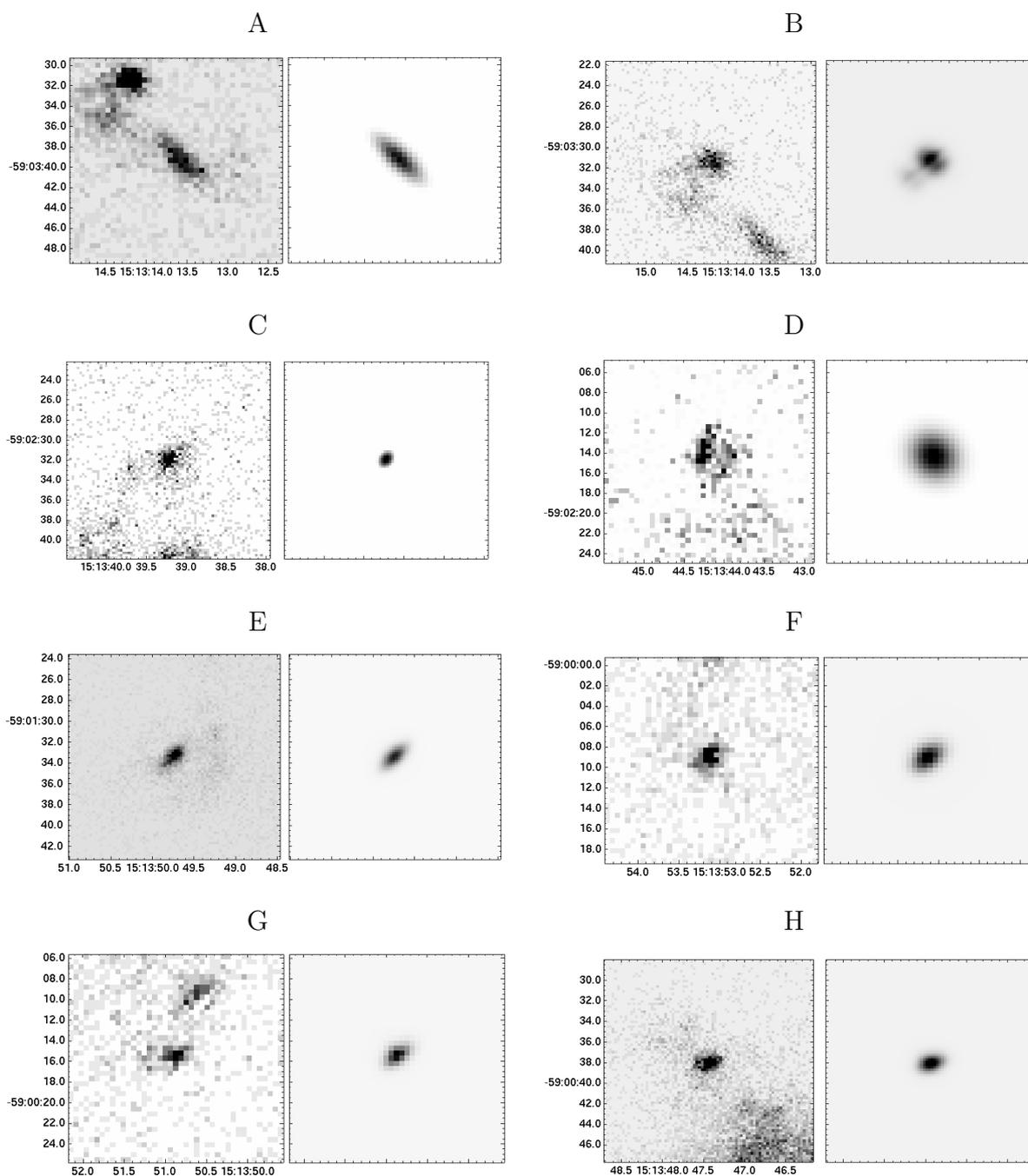


図 B.3: PSF-fitting の結果 (Obs ID 9138 A-H)。各組において、左 — 観測された像。右 — シミュレートした PSF。

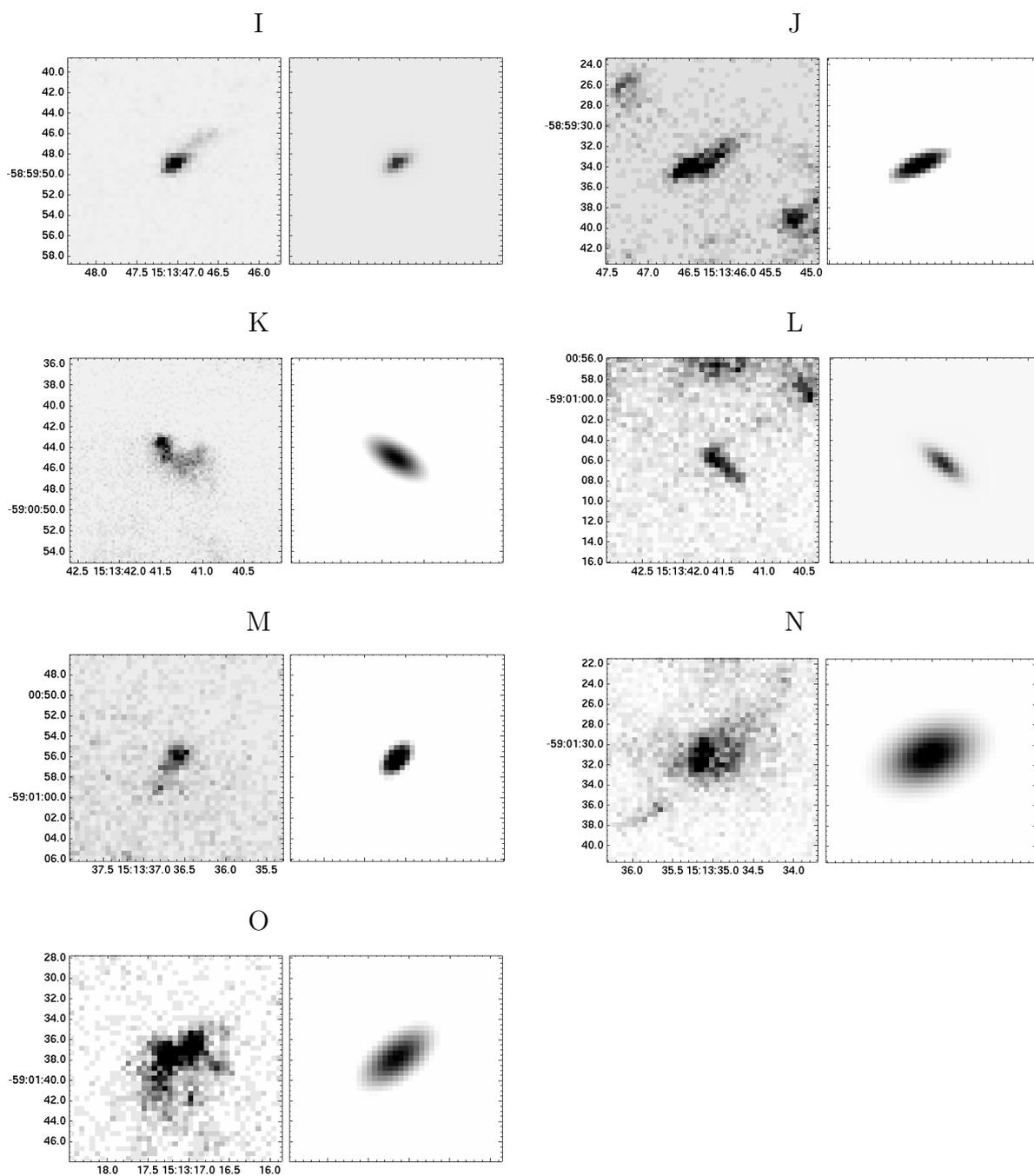


図 B.4: PSF-fitting の結果 (Obs ID 9138 I-O)。各組において、左 — 観測された像。右 — シミュレートした PSF。

## 参考文献

- Brazier, K. T. S. and Becker, W.: 1997, *MNRAS* **284**, 335
- Chandra X-ray Center, *The Chandra Proposers' Observatory Guide*,  
<http://cxc.harvard.edu/proposer/POG/html/>
- Chandra X-ray Center / M., Weiss, *Illustration of Chandra's Orbit*,  
<http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/orbit/>
- Chandra X-ray Center / NGST, *View labeled sketches of the CXO*,  
<http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/craftIllustrations.html>
- Dubner, G. M., Gaensler, B. M., Giacani, E. B., Goss, W. M., and Green, A. J.: 2002,  
*AJ* **123**, 337
- Freeman, P., Doe, S., and Siemiginowska, A.: 2001, in J.-L. Starck and F. D. Murtagh  
(eds.), *Proc. SPIE Vol. 4477, p. 76-87, Astronomical Data Analysis, Jean-Luc Starck;  
Fionn D. Murtagh; Eds.*, pp 76–87
- Gaensler, B. M., Arons, J., Kaspi, V. M., Pivovarov, M. J., Kawai, N., and Tamura, K.:  
2002, *ApJ* **569**, 878
- Gaensler, B. M., Brazier, K. T. S., Manchester, R. N., Johnston, S., and Green, A. J.:  
1999, *MNRAS* **305**, 724
- Kaspi, V. M., Manchester, R. N., Siegelman, B., Johnston, S., and Lyne, A. G.: 1994, *ApJ*  
**422**, L83
- Seward, F. D., Harnden, Jr., F. R., Murdin, P., and Clark, D. H.: 1983, *ApJ* **267**, 698
- Tamura, K., Kawai, N., Yoshida, A., and Brinkmann, W.: 1996, *PASJ* **48**, L33
- Trussoni, E., Massaglia, S., Caucino, S., Brinkmann, W., and Aschenbach, B.: 1996, *A&A*  
**306**, 581

van den Bergh, S. and Kamper, K. W.: 1984, *ApJ* **280**, L51

Yatsu, Y.: 2008, *Ph.D. thesis*, Tokyuu Institute of Technology

Yatsu, Y., Kawai, N., Kataoka, J., Kotani, T., Tamura, K., and Brinkmann, W.: 2005, *ApJ* **631**, 312

# 謝辞

本研究にあたっては、非常に多くの方々にお世話になりました。指導教官の河合先生には、毎週のミーティングやゼミにおいて、天文学の面白さを教えて頂きました。解析につまづいた際には非常にありがたいアドバイスを頂き、通を開くことが出来ました。片岡さんにはその後ろ姿から、研究の厳しさと、研究に真摯に向き合うことの大切さを教えて頂きました。

谷津さんには研究テーマを授けて頂いた上に、お忙しい中大学まで来て、解析方法等を教えて頂きました。中森さんには私が考えられないような様々な視点からの考えなどを話し手頂き、大変勉強になりました。森井さんはまだ短いおつき合いですが、ちょっとした質問にも親切に教えて頂きました。

同じ明野望遠鏡チームの下川辺さんにはメールの書き方から計算機の管理まで非常に多くのことを教えて頂きました。工藤さんには夜遅くの GRB の解析の際に付きっきりで面倒を見て頂きました。森さんに研究にきてまだ間もない頃から Linux のつかい方や解析の仕方等、基礎をみっちり教えて頂きました。

また、有元さんをはじめ、河合研究室の皆様には4月から大変に可愛がって頂き、楽しく無事に研究室生活を過ごすことが出来ました。

最後に、本研究を支えて下さった全ての皆様にお礼を申し上げたいと思います。