

広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の  
X線観測による放射機構の研究

広島大学理学部 物理科学科  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室  
B125080 田中 慎之  
主査:水野 恒史 副査:小嶋 康史

平成 27 年 2 月 10 日

## 概要

宇宙からは、宇宙線と呼ばれる相対論的エネルギーを持つ荷電粒子が降り注いでおり、宇宙物理学的に重要な研究テーマの1つである。宇宙線の起源として考えられている天体を多く含む領域が、星生成領域である。有名な星生成領域「はくちょう座 X」方向に、Milagro 望遠鏡が発見し、その後 VERITAS 望遠鏡で追観測された大きく広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 がある。この天体は宇宙線のエネルギー分布に加え、空間分布も調べることができると期待され、重要である。その為、X 線でも追観測が行われ、パルサーやパルサー星雲が存在することが確認されて、粒子加速天体の候補となっているが、広がった TeV ガンマ線の放射機構の解明には未だ至っていない。

そこで本研究では、TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の放射機構の解明を目的とし、広い視野と優れた空間分解能を持つ XMM-Newton 衛星と、低いかつ安定したバックグラウンドで広がった放射への感度が高いすざく衛星の両 X 線衛星の観測結果を用いて議論する。下図は XMM により得られた X 線でのイメージであり、中央にパルサー、その周りにパルサー星雲といくつかの点源が存在することが分かった。このパルサー星雲の広がった X 線放射を定量的に求めるとともに、広がった X 線放射への点源の寄与の評価も行った。その結果、初めて東側パルサー星雲を定量的に評価し、パルサーを挟んで東西とも wabs×powerlaw モデルでフィッティングができ、hard バンド (2–10 keV) で Flux =  $1.5 \times 10^{-12}$  [erg/s/cm<sup>2</sup>] 程度、Photo Index  $\Gamma = 1.9$  程度となり、大体同じフラックス、べき指数であることが分かった。その得られた結果とガンマ線での先行研究の結果を比較し、パルサー星雲領域の電子のエネルギー分布について議論した。その結果、100 TeV あたりでべき指数が 2.5 から 3.1 に変化していることが示唆された。

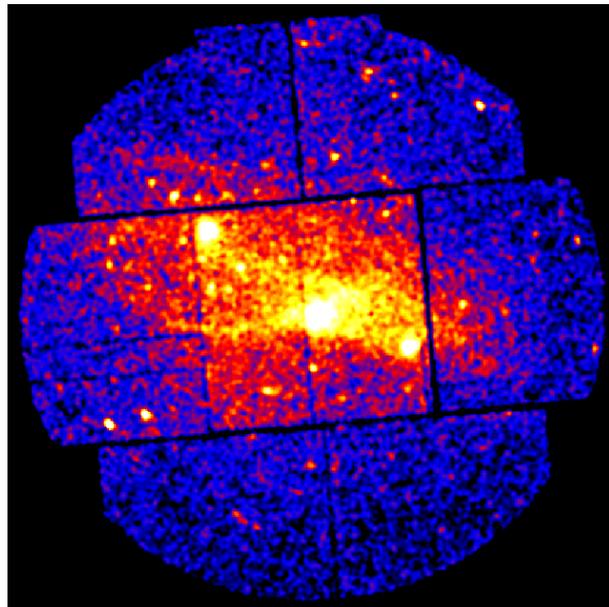


図 1: XMM-Newton によって得られた X 線でのイメージ

# 目次

<b>第 1 章 Introduction</b>	<b>6</b>
1.1 研究背景	6
1.2 研究目的	7
<b>第 2 章 X 線ガンマ線観測と VER J2019+368</b>	<b>8</b>
2.1 X 線・ガンマ線の放射機構	8
2.1.1 シンクロトロン放射	8
2.1.2 逆コンプトン散乱	9
2.2 明るく広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368	10
2.2.1 TeV ガンマ線での先行研究	10
2.2.2 X 線での先行研究	12
<b>第 3 章 観測衛星</b>	<b>17</b>
3.1 XMM-Newton 衛星	17
3.1.1 XMM-Newton 衛星の概要	17
3.1.2 EPIC	19
3.2 すざく衛星	22
3.2.1 すざく衛星の概要	22
3.2.2 XIS	23
3.3 両衛星の観測データを用いる意義	26
<b>第 4 章 XMM-Newton 衛星の解析手法</b>	<b>27</b>
4.1 データ取得過程および FITS ファイル形式	27
4.2 バックグラウンド除去	28
4.3 レスポンスファイル (RMF ファイルと ARF ファイル)	30
4.4 パイプラインプロセス	31
4.5 イベントスクリーニング	32
4.6 イメージ作成	33
4.7 スペクトルデータの作成	34
4.8 XSPEC によるスペクトルフィッティング	36
<b>第 5 章 解析結果と議論</b>	<b>38</b>
5.1 観測データおよび各々の諸元	38
5.2 各領域のイメージ	39

5.3	パルサーおよびパルサー星雲領域の解析 . . . . .	41
5.3.1	点源解析 . . . . .	41
5.3.2	広がった放射の解析 . . . . .	45
5.3.3	広がった X 線放射に対する点源の寄与 . . . . .	47
5.4	点源除去したパルサー星雲 . . . . .	48
5.5	X 線を生成する電子とガンマ線を生成する電子の議論 . . . . .	51
5.6	まとめと今後 . . . . .	51

# 目次

1	XMM-Newton によって得られた X 線でのイメージ	1
1.1	宇宙線のスペクトル [1]	6
2.1	Milagro により得られた強度マップ (上:星生成領域「はくちょう座 X」, 下:MGRO J2019+37)[4]	10
2.2	VERITAS によって得られた MGRO J2019+37 の強度マップ [5]	11
2.3	VER J2019+368 のスペクトル [5]	12
2.4	Chandra 衛星で観測されたパルサー及びパルサー星雲のイメージ [7]	13
2.5	XMM により得られた VER J2019+368 領域のイメージ [8]	13
2.6	すざくで観測された領域 [9]	14
2.7	すざく衛星により得られた各エネルギー帯でのイメージ [9]	15
2.8	パルサー星雲のスペクトル解析した領域 [9]	15
2.9	すざくで得られたパルサー星雲のスペクトル [9]	16
3.1	XMM-Newton 衛星 [10]	17
3.2	XMM-Newton 衛星の軌道 [11]	18
3.3	XMM-Newton 衛星が搭載する X 線望遠鏡 [10]	18
3.4	XMM-Newton 衛星搭載 X 線望遠鏡の各検出器ごとの有効面積 [11]	19
3.5	EPIC 検出器 (MOS1+MOS2+PN) の有効面積 [11]	20
3.6	MOS 検出器の画像 [10]	21
3.7	MOS 検出器の概略図 [11]	21
3.8	pn 検出器の画像 [10]	21
3.9	pn 検出器の概略図 [11]	21
3.10	すざく衛星の外観 [13]	22
3.11	すざく衛星搭載の X 線望遠鏡 [12]	23
3.12	すざく衛星搭載 XIS 検出器の概略図 [12]	23
3.13	すざく衛星搭載 XIS 検出器 [12]	24
3.14	すざく衛星搭載 XIS 検出器の有効面積 [14]	25
3.15	各衛星搭載検出器のバックグラウンド [14]	26
4.1	XSA のバスケット内の画面	27
4.2	FITS ファイルの閲覧例	28
4.3	フレアカット前のカウントレート	29
4.4	フレアカット前のイメージ (左) とフレアカット後のイメージ (右)	29

4.5	点源のバックグラウンド領域指定 (左) と広がった放射のバックグラウンド領域指定 (右) . . .	30
4.6	ARF 内にある有効面積の情報 . . . . .	31
4.7	ライトカーブの一例 . . . . .	33
5.1	今回用いた XMM の観測データの観測領域 . . . . .	38
5.2	イメージ解析により得られた各領域のイメージ (左上:PSR J2021+3651、左中央:G75.2+0.1、 左下:IGR J20188+3647、右上:MGRO J2019+37、右下:WR142)、またこれらのイメージは 見やすくするためスムージングをしている。 . . . . .	40
5.3	PSR J2021+3651 領域の soft バンドイメージ (左) と hard バンドイメージ (右) . . . . .	41
5.4	点源のソース領域とバックグラウンド領域の指定 . . . . .	42
5.5	上:PSR のスペクトル、中央:PS1 のスペクトル、下:PS2 のスペクトル . . . . .	44
5.6	パルサー星雲のソース領域とバックグラウンド領域の指定 . . . . .	45
5.7	上:西側パルサー星雲のスペクトル、下:東側パルサー星雲のスペクトル . . . . .	46
5.8	点源除去したパルサー星雲のソース領域とバックグラウンド領域の指定 . . . . .	49
5.9	上:点源除去した西側パルサー星雲のスペクトル、下:点源除去した東側パルサー星雲のスペ クトル . . . . .	50

# 表 目 次

2.1	MGRO J2019+37 の位置 [3]	11
2.2	VER J2019+368 のスペクトルフィッティング結果 [5]	12
2.3	図 2.5 に用いられた観測データ	14
2.4	各観測領域の諸元 [9]	14
2.5	すざく衛星によるパルサー星雲の観測結果 [9]	16
3.1	EPIC の基本的性能 [11]	20
3.2	すざく衛星搭載 XIS の基本的な性能比較 [12]	25
5.1	今回用いた XMM の観測データ	38
5.2	パルサーおよびパルサー星雲内の明るい点源の各種指定座標	42
5.3	点源解析の結果	43
5.4	パルサー星雲の各種指定座標	47
5.5	パルサー星雲の解析結果	47
5.6	各天体の各エネルギー帯でのパルサー星雲に対する寄与	48
5.7	除去する点源の各種指定座標	49
5.8	点源除去したパルサー星雲の解析結果	51

# 第1章 Introduction

## 1.1 研究背景

宇宙からは非常に高いエネルギーの荷電粒子が地球に降り注いでいて、その高エネルギーの荷電粒子群を「宇宙線」という。宇宙線のスペクトルを以下の図 1.1 に示す。このスペクトルを見ても分かるように、宇宙線は  $E = 10^9 - 10^{20}$  eV という幅広いエネルギー値をもち、そのスペクトルはベキ型で  $E = 10^{15-16}$  eV あたりには第一の折れ曲がり (knee) があり、 $E = 10^{18-19}$  eV あたりには第二の折れ曲がり (ankle) を持つ。宇宙線の最高エネルギー ( $\sim 10^{20}$  eV) は、人類が現在加速器で実現した最高エネルギー ( $\sim 10^{13}$  eV) よりも大きく上回っている。さらにそのエネルギー密度は  $\sim 1$  eV/cm<sup>3</sup> であり、星間光子や星間磁場のエネルギー密度と同程度であり、星間ガスのダイナミクスに磁場を介して影響を与えると考えられることから宇宙物理学的に重要な研究対象となっている。しかしこの宇宙線の起源は、発見以来 100 年が経過しても未だはっきりとは分かっていない。ただし現在、宇宙線の起源として考えられているものがいくつかある。超新星残骸による爆風、パルサー星雲におけるパルサー風、連星系におけるジェット、単独または連星系における大質量星の星風などである。そのような天体における粒子加速の探査には電磁波による観測が必要であり、地球に到来した宇宙線を測る直接探査と相補的な役割を果たす。

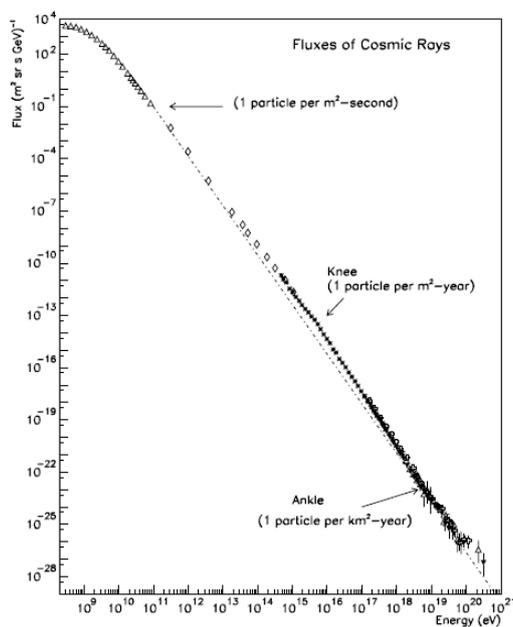


図 1.1: 宇宙線のスペクトル [1]

星生成領域は星生成が活発に行われており、宇宙線起源候補を多く含む。したがって、宇宙線研究において星生成領域の観測は重要な意味をもつ。また、実際の観測においては、宇宙線の種類(陽子・電子)やエネルギー分布を探ることが重要であり、その為には広いエネルギー帯での多波長観測が有効である。また、広がった天体の場合はエネルギー分布に加えて空間分布も調べることができ、宇宙線の加速や伝播の様子をより詳細に調べることができるため、特に重要である。

本論文では、星生成領域「はくちょう座 X」方向に見つかった広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の X 線によるフォローアップ観測とその解析を行う。

## 1.2 研究目的

Milagro 望遠鏡で星生成領域「はくちょう座 X」方向に 1 TeV を超える非常に高いエネルギーで広がった放射が発見された。この放射領域は差し渡し  $1^\circ$  を超えて大きく広がっている。その後空間分解能に優れた VERITAS により TeV 領域で追観測がなされ、いくつかの放射に分解されたが、中心の放射 (VER J2019+368) は点源よりも有意に広がっていた。並行して X 線でも精力的に追観測が行われてきた。しかし、VER J2019+368 の起源は未だ分かっていない。1.1 で述べたように放射機構を特定し、宇宙線のエネルギー分布を知るには多波長観測が有効であり、X 線での追観測および詳細なデータ解析をすることで、TeV ガンマ線源の放射機構に関する議論が可能になる。

そこで本研究では、広い視野で優れた空間分解能をもつ XMM-Newton 衛星と、低バックグラウンドで広がった放射に対して感度の高いすざく衛星の観測結果をあわせて用いることで TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の放射機構を特定することを目的とする。今回用いた観測衛星や対象天体 VER J2019+368、関連する物理プロセスについては 2 章以降で詳しく述べる。

## 第2章 X線ガンマ線観測とVER J2019+368

### 2.1 X線・ガンマ線の放射機構

本論文では、ガンマ線で放射している大きく広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 と、X線における対応天体と考えられるパルサーおよびパルサー星雲を研究対象としている。これらの天体では高いエネルギーを持つ電子が、X線はシンクロトロン放射によって、ガンマ線は逆コンプトン散乱によって生成していると考えられている。そこで、シンクロトロン放射および逆コンプトン散乱について、エネルギー放射率や得られるスペクトルについて述べることにする。

#### 2.1.1 シンクロトロン放射

磁場中を運動する電子が、磁場によるローレンツ力を受け進行方向を曲げられて、加速度運動をするとき電磁波を放射する。この放射をシンクロトロン放射という。宇宙線電子と星間磁場または星の磁場との間で起こる現象である [2]。

磁場のエネルギー密度を  $U_{\text{mag}}$  とすると、シンクロトロン放射による電子のエネルギー損失率は、以下の式 (2.1) のように表せる。

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{sync}} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 U_{\text{mag}} \quad (2.1)$$

ここで、 $\sigma_T$  はトムソン散乱断面積、 $c$  は光速、 $\gamma$  は電子のローレンツ因子である。電子のローレンツ因子とエネルギーの関係は、 $E_e = \gamma m_e c^2$  なので、シンクロトロン放射による電子のエネルギー損失率は、電子のエネルギーの2乗に比例することが分かる。

エネルギー  $E_e$  の電子によるシンクロトロン放射で生成される光子の強度が最大となる振動数  $\nu_{\text{max}}$  は、磁場の大きさを  $B$ 、電子の質量を  $m_e$ 、磁場と電子の速度ベクトルのなす角を  $\theta$  とすると、 $\nu_{\text{max}} = 0.29 \times \frac{3}{2} \gamma^2 \frac{eB}{2\pi m_e} \sin(\theta)$  と表せるので [2]、定数等を代入し変形すると、以下の式 (2.2) のようになる。

$$E_s = h\nu_{\text{max}} \sim 2 \left(\frac{B}{10 \mu\text{G}}\right) \left(\frac{E_e}{100 \text{ TeV}}\right)^2 \sin(\theta) \text{ keV} \quad (2.2)$$

この式から例えば、100 TeV の宇宙線電子が 10  $\mu\text{G}$  の磁場によってシンクロトロン放射をすると、およそ 2 keV の X線が放射されることが分かる。

またシンクロトロン放射により X線を放射する電子のエネルギー分布は、単位を例えば [個/cm<sup>2</sup>/s/keV] とすると、一般にエネルギーのべき関数となり、エネルギーが  $E \sim E + dE$  の間に存在する電子の数は、

$$N(E)dE \propto E^{-p} dE \quad (2.3)$$

と表すことができる。この時、実際に得られるシンクロトロン放射のスペクトルは、各エネルギーの電子の放射スペクトルの重ねあわせである。その重ね合わせたエネルギースペクトルは、単位を例えば [erg/cm<sup>2</sup>/s/Hz]

とすると、やはりエネルギーのべき関数となる。得られるシンクロトロン放射のスペクトル  $F_\nu$  は  $F_\nu \propto \nu^s$  とすると、スペクトルのべき指数  $s$  と電子のエネルギー分布のべき指数  $p$  の関係は、

$$s = \frac{p-1}{2} \quad (2.4)$$

となる。もし、シンクロトロン放射のスペクトル  $F_\nu$  の単位が [個/cm<sup>2</sup>/s/Hz] の場合の関係は、

$$s = \frac{p+1}{2} \quad (2.5)$$

となる。

### 2.1.2 逆コンプトン散乱

高エネルギーの電子が低エネルギーの光子と衝突し、電子から光子へエネルギーが渡される現象を逆コンプトン散乱という。宇宙線のような相対論的エネルギーを持つ電子と星間光子の間で逆コンプトン散乱が起きると、ガンマ線が生成する。

光子のエネルギー密度が  $U_{\text{rad}}$  とすると、逆コンプトン散乱による電子のエネルギー損失率は、以下の式 (2.6) のように表せる。

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{IC}} = \frac{4}{3} \sigma_{\text{T}} c \gamma^2 U_{\text{rad}} \quad (2.6)$$

ここで、 $\sigma_{\text{T}}$  はトムソン散乱断面積、 $c$  は光速、 $\gamma$  は電子のローレンツ因子である。逆コンプトン散乱による電子のエネルギー損失率は、電子のエネルギーの2乗に比例することが分かる。

エネルギー  $E_e$  の電子による逆コンプトン散乱で生成される光子の平均エネルギーは、入射光子の振動数  $\nu_0$  として、 $K = \frac{4}{3} h\nu_0 \gamma^2$  である [2]。ここから定数等を代入し変形すると、以下の式 (2.7) のようになる。

$$K \sim 0.5 \left( \frac{h\nu_0}{1 \text{ meV}} \right) \left( \frac{E_e}{10 \text{ TeV}} \right)^2 \text{ TeV} \quad (2.7)$$

この式から例えば、1 meV のエネルギーを持つ光子と 10 TeV の宇宙線電子が衝突し逆コンプトン散乱を起こすと、およそ 0.5 TeV のガンマ線が放射されることが分かる。

また、逆コンプトン散乱によりガンマ線を放射する電子のエネルギー分布は、例えば単位を [個/cm<sup>2</sup>/s/TeV] とすると、一般にエネルギーのべき関数となり、エネルギーが  $E \sim E + dE$  の間に存在する電子の数は、

$$N(E)dE \propto E^{-p} dE \quad (2.8)$$

と表すことができる。単位を例えば [erg/cm<sup>2</sup>/s/Hz] とすると、実際に得られる逆コンプトン散乱のスペクトルも、やはりエネルギーのべき関数となる。得られる逆コンプトン散乱のスペクトル  $F_\nu$  は  $F_\nu \propto \nu^s$  とすると、スペクトルのべき指数  $s$  と電子のエネルギー分布のべき指数  $p$  の関係は、

$$s = \frac{p-1}{2} \quad (2.9)$$

となり、もし逆コンプトン散乱のスペクトル  $F_\nu$  の単位が [個/cm<sup>2</sup>/s/Hz] の場合の関係は、

$$s = \frac{p+1}{2} \quad (2.10)$$

となる。これは、シンクロトロン放射と同じ関係式であることが分かる。

## 2.2 明るく広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368

VER J2019+368 は、2007 年、星生成領域「はくちょう座 X」方向に見つかった 1 TeV を超える非常に高いエネルギーで、大きく広がってガンマ線放射をしている天体である。この天体はその後、VERITAS や Chandra、XMM-Newton、Suzaku で追観測されてきた。しかし、TeV ガンマ線放射の起源は未だよく分かっていない。この天体は大きく広がっていることから、宇宙線のエネルギー分布に加え、空間分布も調べることができるため、宇宙物理学的に重要な研究対象となっている。次節に、VER J2019+368 に関する過去の研究について詳しく述べる。

### 2.2.1 TeV ガンマ線での先行研究

2007 年に、Milagro が星生成領域「はくちょう座 X」方向に 1 TeV を超える非常に高いエネルギーで大きく広がった放射を発見した [3]。Milagro とは、数 100 GeV 以上のガンマ線を検出する水チェレンコフ検出器で、2001 年から 2008 年まで稼働した。以下の図 2.1 にその発見された広がった TeV ガンマ線放射領域のイメージを示す。また、以下の表 2.1 には、その放射領域の座標を示す。Milagro のイメージの座標系は銀経・銀緯だが、表 2.1 の座標系は赤経・赤緯である。

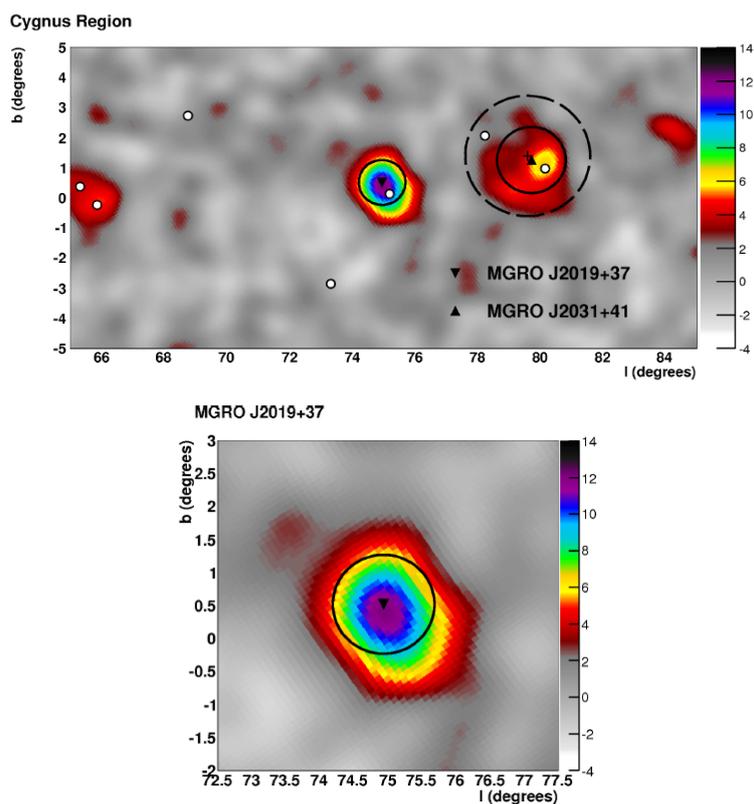


図 2.1: Milagro により得られた強度マップ (上:星生成領域「はくちょう座 X」, 下:MGRO J2019+37)[4]

表 2.1: MGRO J2019+37 の位置 [3]

RA	$304.83 \pm 0.14_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}}$
DEC	$36.83 \pm 0.08_{\text{stat}} \pm 0.25_{\text{sys}}$

Milagro で発見された後、VERITAS 望遠鏡にて追観測が行われた。VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) 望遠鏡とは、アメリカの南アリゾナにある大気チェレンコフ光を観測する TeV ガンマ線望遠鏡である。観測エネルギー帯は 85 GeV から 30 TeV で、直径 12 m の望遠鏡 4 台からなる。この VERITAS によって得られた MGRO J2019+37 の強度マップを図 2.2 に示す。図中の赤が 1 TeV 以上で放射している領域、緑が 0.6 TeV から 1 TeV で放射している領域を示している。また、図 2.2 で見ている領域が図 2.1 の下図の黒色の円の大きさに相当する。

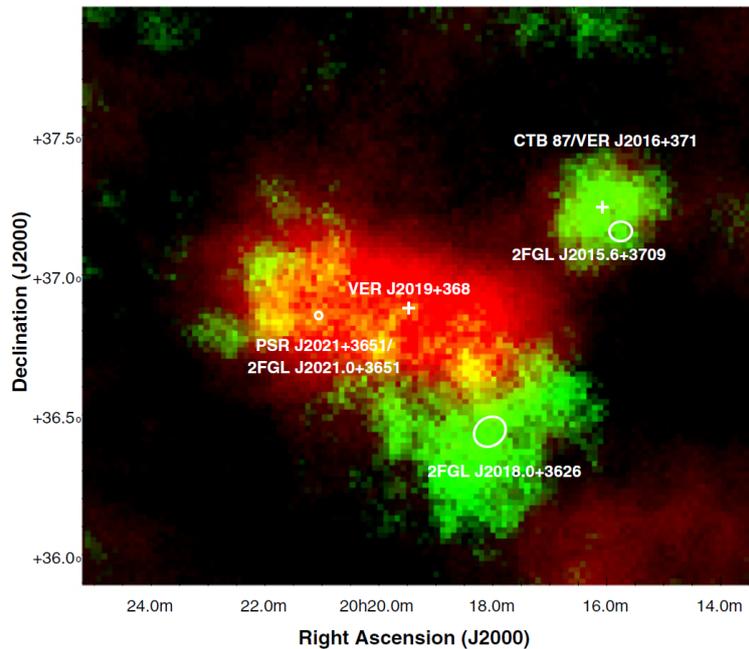


図 2.2: VERITAS によって得られた MGRO J2019+37 の強度マップ [5]

図 2.2 を見て分かるように、MGRO J2019+37 はいくつかのガンマ線放射に分解された。その主放射領域が VER J2019+368 であり、それは有意に広がっている ( $\sim 1^\circ$ ) [5]。この広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 のエネルギースペクトルを以下の図 2.3 に、スペクトルフィッティングの結果を以下の表 2.2 に示す。

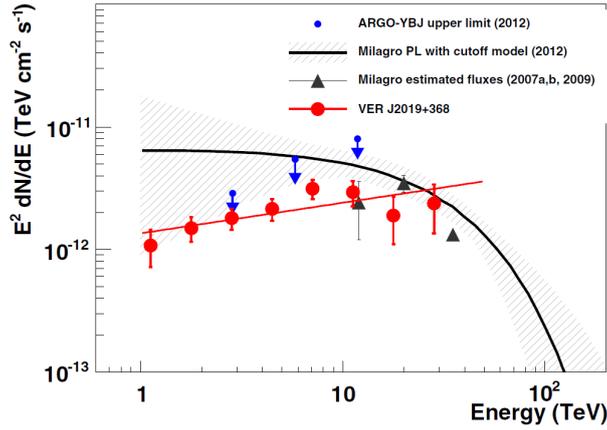


図 2.3: VER J2019+368 のスペクトル [5]

表 2.2: VER J2019+368 のスペクトルフィッティング結果 [5]

model	powerlaw
flux(1–10 TeV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$(6.7 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 1.2_{\text{sys}}) \times 10^{-12}$
Photo Index	$1.75 \pm 0.08_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{sys}}$
$\chi^2/\text{dof}$	5.79/6

これを見ると、 $\Gamma = 1.75$  というハードな高エネルギーで比較的放射が強くなるスペクトルのべき指数が報告されている。2.1 節で述べたように、X 線を主に生成するシンクロトロン放射とガンマ線を主に生成する逆コンプトン散乱で、電子のエネルギー分布のべき指数  $p$  とスペクトルのべき指数  $s$  が同じ  $s = \frac{p+1}{2}$  で表せる。つまり、ガンマ線と X 線では同じ形状のスペクトルが得られる。そこで、ガンマ線がハードなべきを持つということは、X 線でもハードなべきを持ち、検出されることが期待される。その為、X 線での多波長観測が重要となってくる。

### 2.2.2 X 線での先行研究

この星生成領域「はくちょう座 X」は X 線でも精力的に観測が行われてきた。また、VER J2019+368 付近には、パルサー (PSR J2021+3651) の存在が確認されている。2004 年には、Chandra 衛星でパルサー PSR J2021+3651 の周りにパルサー星雲 (G75.2+0.1) が観測された [7]。その時の Chandra 衛星で得られたパルサーおよびパルサー星雲のイメージを以下の図 2.4 に示す。

このパルサー PSR J2021+3651 は、回転周期とエネルギー放射率から推定される特性年齢が  $\tau = 17$  kyr で、エネルギー放射率  $dE/dt = 3.6 \times 10^{36}$  erg/s と、典型的なパルサーと比べて、若くてエネルギー放射率が高いパルサーであることが分かっている。また、Chandra による観測でパルサー星雲が  $\sim 20'' \times 10''$  の広

がりを持つことが報告されている。

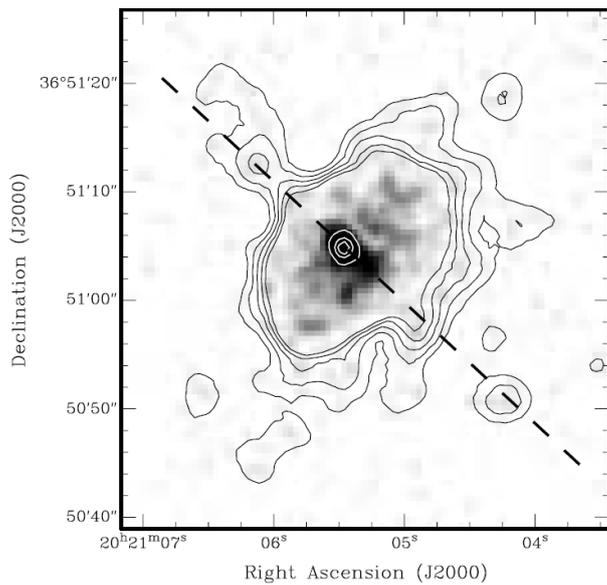


図 2.4: Chandra 衛星で観測されたパルサー及びパルサー星雲のイメージ [7]

その後、XMM-Newton 衛星による観測も行われている。VER J2019+368 領域を XMM-Newton 衛星で観測して得られたイメージを以下の図 2.5 に、ここで用いられた観測データの諸元を以下の表 2.3 に示す。

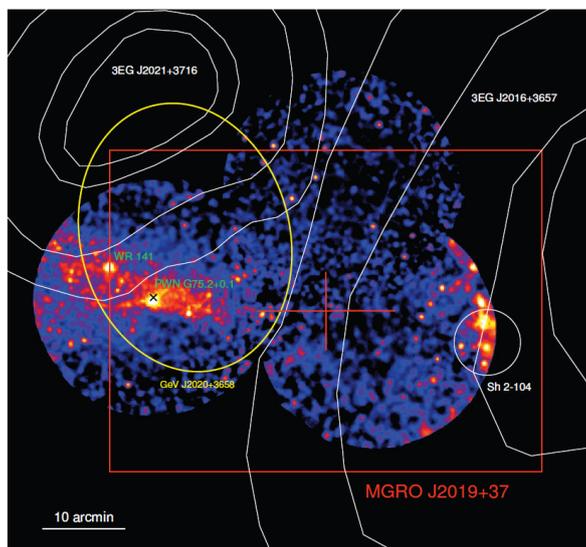


図 2.5: XMM により得られた VER J2019+368 領域のイメージ [8]

表 2.3: 図 2.5 に用いられた観測データ

ObsID	Net exp.[ks]	座標 (RA, DEC)[ °]
0404540101	8.2	(305.2417, 36.86442)
0404540201	11.4	(305.2405, 36.86428)
0510011401	11.7	(304.7333, 36.78481)
0552350101	30.4	(304.7633, 37.09258)

図 2.5 を見ると、VER J2019+368 領域にはパルサー PSR J2021+3651 およびパルサー星雲 G75.2+0.1 以外に X 線で目立った天体がないこと、パルサー星雲は東側が暗く、西側が明るいということが分かる [8]。さらに、Chandra で確認されたパルサー星雲は、XMM で追観測すると分角 ( $\sim 10'$ ) レベルで広がっているのが確認された。しかし、この先行研究 (Zabalza et al. 2010) では、パルサー星雲の flux 値やスペクトルなどの定量的な議論がされていない。その為、XMM-Newton の観測データを用いた定量的な議論が必要となってくる。

また XMM は、第 3 章で述べるようにバックグラウンドが高く、広がった放射の検出や測定は得意ではない。そこで、VER J2019+368 領域は、広がった放射に感度の高いすざく衛星搭載 XIS でも観測が行われてきた。すざく衛星の観測に関する領域とその諸元を以下の図 2.6 および表 2.4 に示す。

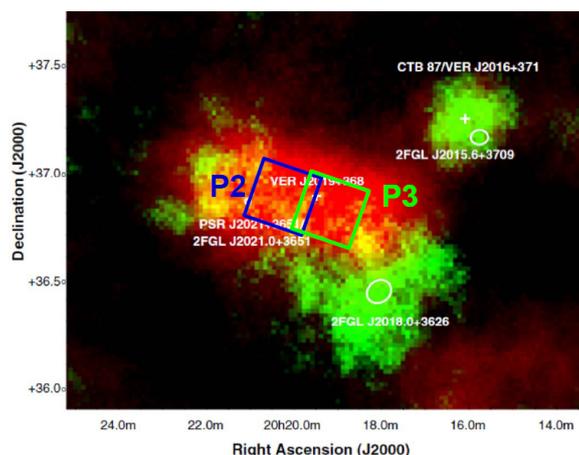


図 2.6: すざくで観測された領域 [9]

表 2.4: 各観測領域の諸元 [9]

Position	RA(deg)	DEC(deg)	Net exp.(ks)
P2	305.07	36.85	35.0
P3	304.80	36.80	35.7

上記の領域 P2 および P3 の各エネルギー帯でのイメージを以下の図 2.7 に示す。また、以下の図 2.8 に示す領域でのパルサー星雲のスペクトルを以下の図 2.9 に示し、フィッティングにより得られた各物理量を以下の表 2.5 に示す。XMM では議論されていなかったパルサー星雲のフラックス値や輝度分布が明らかになった。これで、VER J2019+368 のガンマ線放射と、PWN G75.2+0.1 の X 線放射の関係を定量的に議論することが可能となった。しかし、すざく衛星ではパルサー星雲全体を観測していないことや、空間分解能が悪いため点源の寄与の評価には不向きであることなどの問題点がある。その為、このままでは十分な議論ができない。

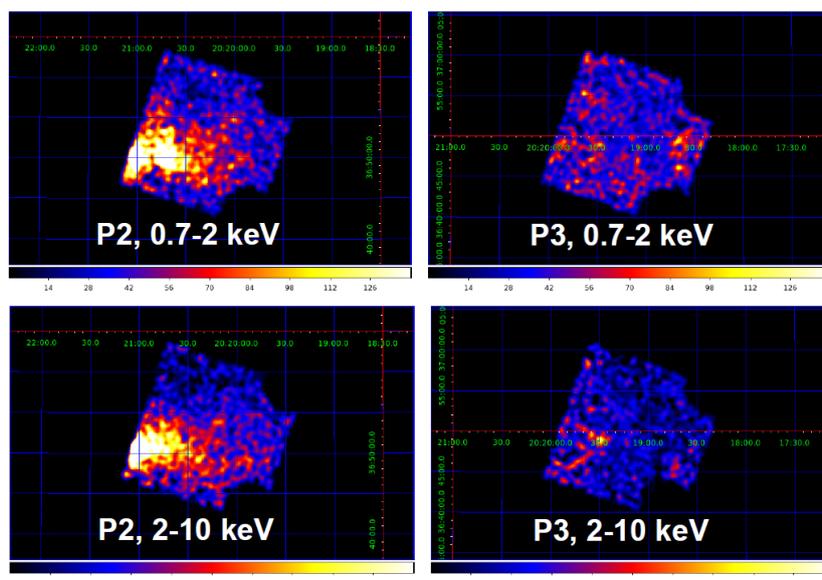


図 2.7: すざく衛星により得られた各エネルギー帯でのイメージ [9]

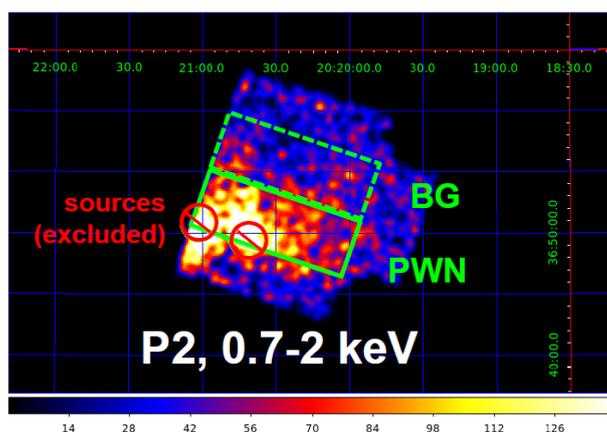


図 2.8: パルサー星雲のスペクトル解析した領域 [9]

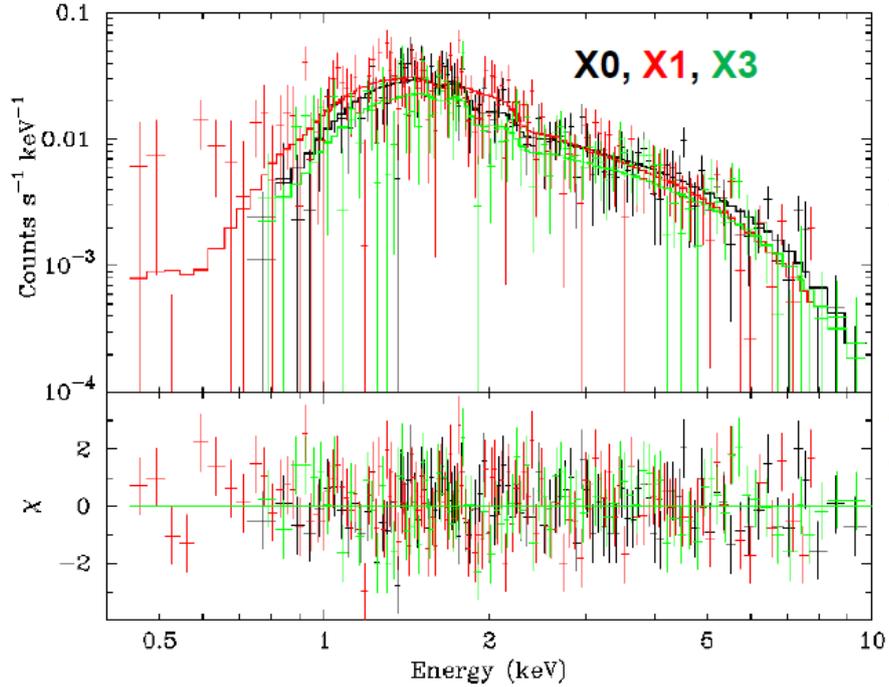


図 2.9: すざくで得られたパルサー星雲のスペクトル [9]

表 2.5: すざく衛星によるパルサー星雲の観測結果 [9]

model	wabs×powerlaw
N(H) [atoms/cm <sup>2</sup> ]	$0.82^{+0.15}_{-0.14} \times 10^{22}$
$\Gamma$	$2.21^{+0.16}_{-0.15}$
I(0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> /sr]	$5.66 \times 10^{-8}$
I(2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> /sr]	$20.3 \times 10^{-8}$
F(0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$31.1 \times 10^{-14}$
F(2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$112 \times 10^{-14}$
$\chi^2/\text{dof}$	316.2/304

このように VER J2019+368 は、X 線でも精力的に観測が行われてきて、パルサー PSR J2021+3651 およびパルサー星雲 G75.2+0.1 が候補天体として考えられている。しかし、VER J2019+368 の放射機構の特定には未だ至っていない。それは前述のように「XMM」「すざく」ともに弱点があるからである。そこで本研究では、XMM のアーカイブデータを用い、「すざく」で測定された広がった放射に対する点源の寄与を評価するとともに、「すざく」の視野ではカバーしていない東側の放射を調べるため、XMM による広がった放射の解析を行う。

## 第3章 観測衛星

### 3.1 XMM-Newton 衛星

#### 3.1.1 XMM-Newton 衛星の概要

XMM-Newton 衛星 (以降 XMM とする) は、1999 年 12 月 10 日に欧州宇宙機関 (ESA) によって打ち上げられたヨーロッパの X 線観測衛星である。その重さは 4 トン、全長 10 m の衛星で X 線観測衛星の中で最大規模の衛星となる。以下の図 3.1 に XMM のイメージ図を示す。

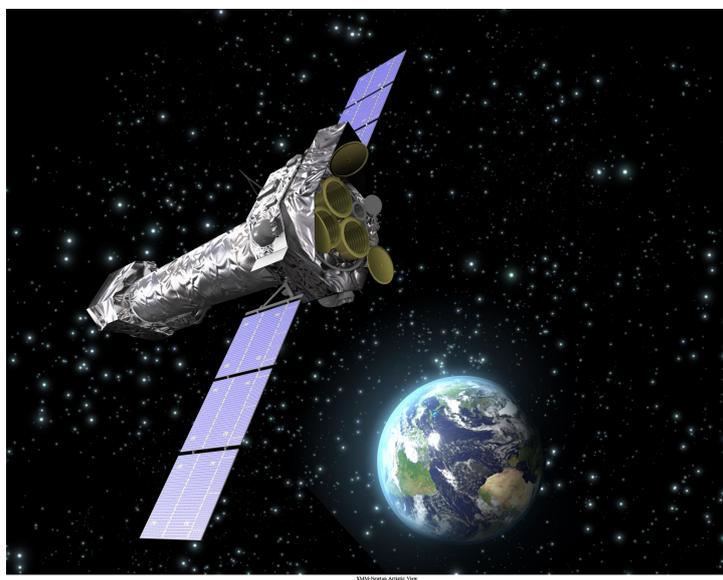


図 3.1: XMM-Newton 衛星 [10]

XMM の姿勢制御は、ソーラーパネルが太陽に対して  $\pm 20$  度以内になるようになっている。XMM の周回軌道は、近点高度 7000 km、遠点高度 114000 km、軌道傾斜角 40 度、軌道周期 48 時間の楕円軌道である。XMM の軌道を以下の図 3.2 に示す。この軌道は、地球によって天体が隠されることがなく連続的に天体観測ができるが、軌道の途中で地球の磁気圏の外へ出ているため、太陽フレアによってバックグラウンドが高いという弱点がある。一方で XMM は大質量 (大面積) のミラーを持つため、後で述べるように有効面積や視野が大きいことや空間分解能がよいという特徴もある。

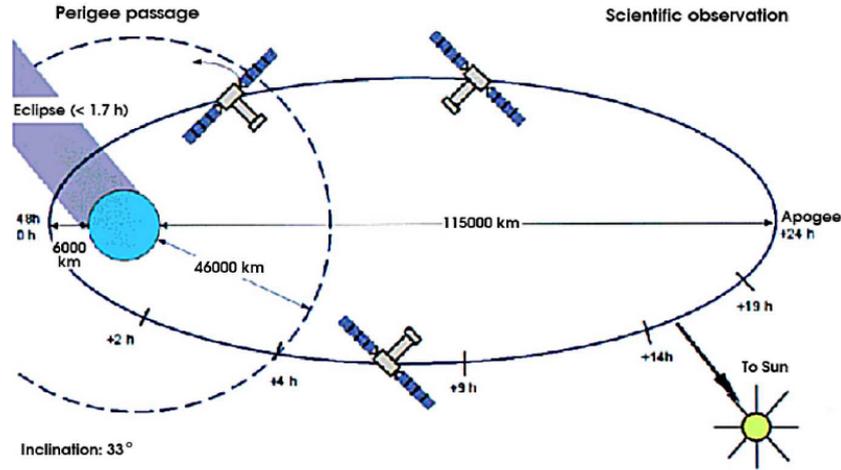


図 3.2: XMM-Newton 衛星の軌道 [11]

この XMM には大きく分けて 3 種類の検出器が搭載されている。それは、EPIC,RGS,OM である。今回解析に用いた検出器はこのうちの EPIC である。EPIC は MOS と PN という 2 種類の CCD 検出器から構成されている X 線 CCD カメラである。この EPIC について詳しくは 3.1.2 節で述べる。

RGS は、反射型の回折格子分光装置 (RGS:Reflection Grating Spectrometer) で、2 keV 以下の X 線に感度を持つ。

OM は、口径 30 cm の可視・紫外望遠鏡 (OM:Optical /UV Monitor Telescope) で、視野は 17 分角四方で、波長帯は 170 nm から 650 nm である。

XMM が搭載している X 線望遠鏡 XRT は、全部で 3 つ搭載されていて、それぞれの望遠鏡の焦点部に EPIC を構成する MOS1,MOS2,PN の 3 つの検出器が設置されている。望遠鏡と EPIC との間に分散器 RGA (RGA:Reflection Grating Arrays) があり、この RGA によって入射 X 線は望遠鏡で反射したあと、44%が EPIC の検出器へ、40%が RGS へ、残り 16%が RGA に吸収される。いずれの望遠鏡も焦点距離が 7.5 m である。X 線望遠鏡の集光の様子を以下の図 3.3 に示す。

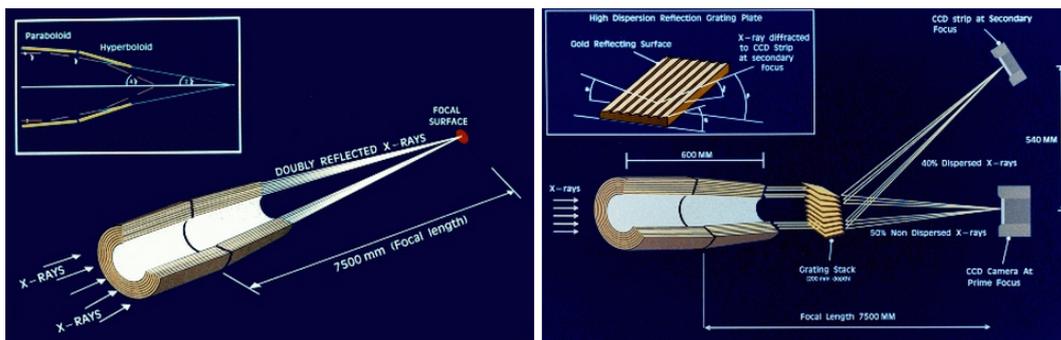


図 3.3: XMM-Newton 衛星が搭載する X 線望遠鏡 [10]

X線は透過力が非常に強いので、ミラーに対してほぼ平行に全反射させる。X線望遠鏡では、この全反射を2回起こし、焦点部にある各検出器に集光する。全反射を起こすミラーは、ニッケルを基盤材質とし、それを金でコーティングされており、放物線型と双曲線型に設置されている。

また、このX線望遠鏡の各検出器あたりの有効面積を以下の図3.4に示す。これを見ても分かるように、低エネルギー帯で有効面積が大きく、エネルギーが高くなるに従って有効面積が小さくなっている。また、2 keVのあたりには、有効面積が大きく減少する箇所がある。これは、ミラーをコーティングしている金のM吸収端に対応するエネルギーであるためである。

これらXMMに搭載されているX線望遠鏡は、広い視野と大きい有効面積、優れた角度分解能を特徴とする。

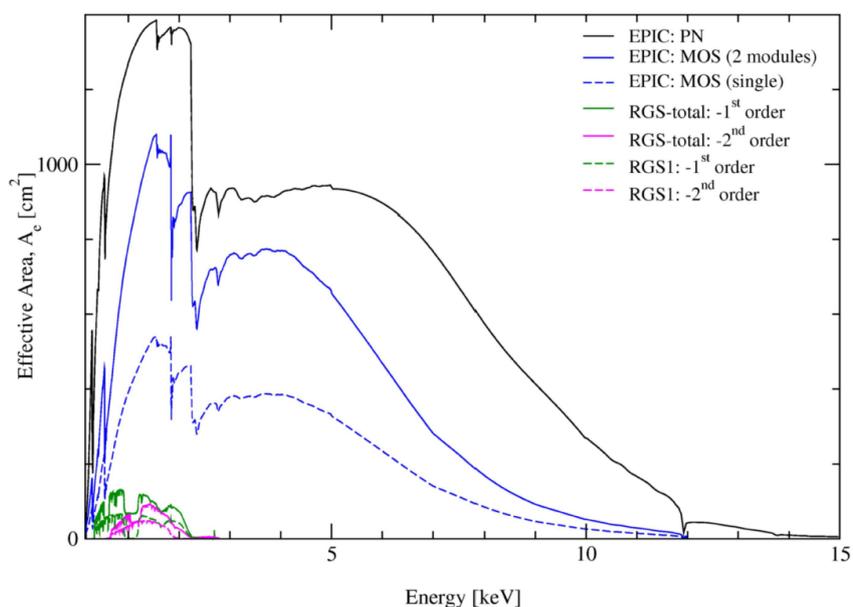


図 3.4: XMM-Newton 衛星搭載 X 線望遠鏡の各検出器ごとの有効面積 [11]

### 3.1.2 EPIC

EPIC(European Photon Imaging Camera) は、XMM-Newton 衛星に搭載されている 0.2 keV から 12 keV の X 線に感度を持つ検出器で、MOS 検出器と PN 検出器の 2 種類が存在する。EPIC は X 線望遠鏡の背後に設置されており、RGS と望遠鏡を共有している。基本的な性能を以下の表 3.1 に示す。さらに、EPIC 検出器の有効面積を以下の図 3.5 に示す。図 3.5 は、MOS1/MOS2/PN 全ての有効面積を合計したものを各フィルターごとに示したものである。

表 3.1: EPIC の基本的性能 [11]

	EPIC MOS	EPIC PN
エネルギー帯	0.15-12 keV	0.15-12 keV
検出感度 <sup>a</sup> [ergs <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> ]	~10 <sup>-14</sup>	~10 <sup>-14</sup>
視野 (直径)	30'	30'
ピクセルサイズ	40 μm(1.1")	150 μm(4.1")
エネルギー分解能@1 keV ΔE/E	~ 7 %	~ 8 %
空間分解能	~10 arcsec	~10 arcsec
有効面積@1 keV[cm <sup>2</sup> ]	~400	~1200

a:0.15 keV–12.0 keV のエネルギー帯

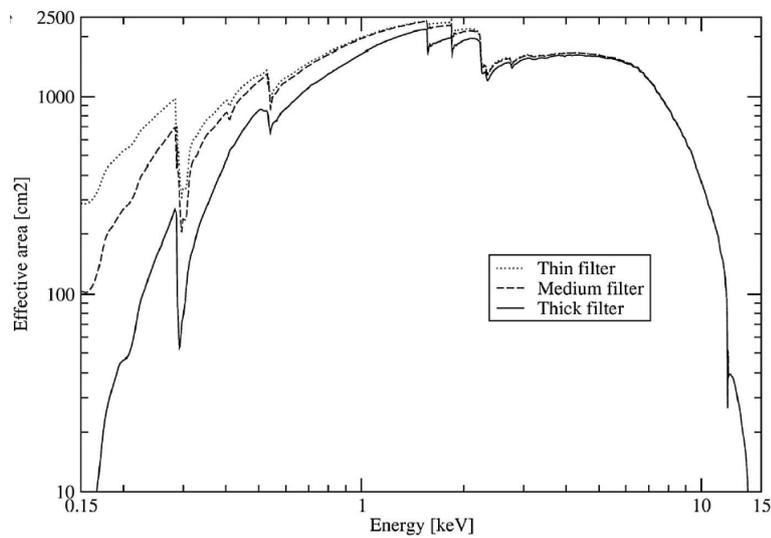
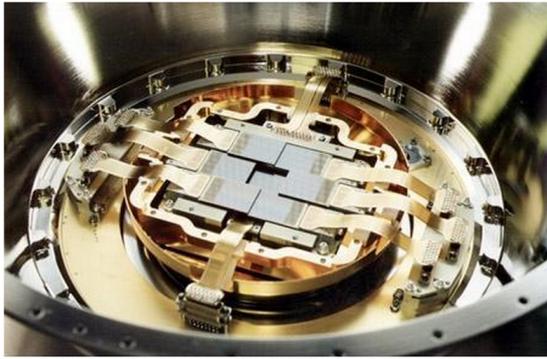


図 3.5: EPIC 検出器 (MOS1+MOS2+PN) の有効面積 [11]

以下で、MOS 検出器と PN 検出器それぞれについて述べることにする。

## MOS 検出器

MOS 検出器は 7 つの表面照射型 CCD から構成されていて、XMM には 2 台の MOS が搭載されている。MOS 検出器を構成する 7 つの CCD は同一平面上にあるわけではない。さらにこの 2 つの MOS 検出器は互いに 90 度回転して設置されている。MOS 検出器を構成する 1 チップの大きさは 600×600 ピクセルで、1 ピクセルの大きさは 40 μm(1.1") である。以下の図 3.6 に MOS 検出器の画像を、図 3.7 に MOS 検出器の概略図を示す [11]。



EPIC-MOS CCDs

図 3.6: MOS 検出器の画像 [10]

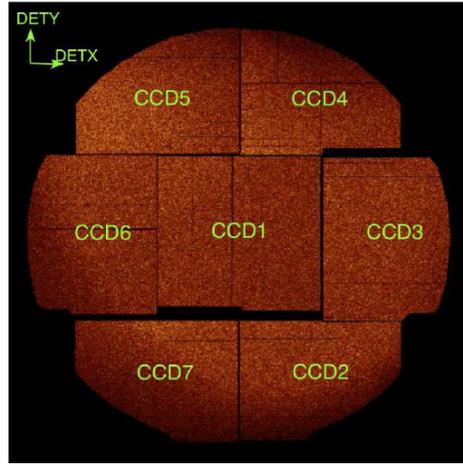


図 3.7: MOS 検出器の概略図 [11]

### PN 検出器

PN 検出器は 12 個の裏面照射型 CCD から構成されている。PN 検出器は MOS 検出器に比べてエネルギー分解能は少し劣るが、信号の読み出しを素早く行える為、時間分解能がよいという特徴を持つ。1 ピクセルの大きさは  $150 \mu\text{m}$  (4.1") である。以下の図 3.8 に PN 検出器の画像を、図 3.9 に PN 検出器の概略図を示す [11]。

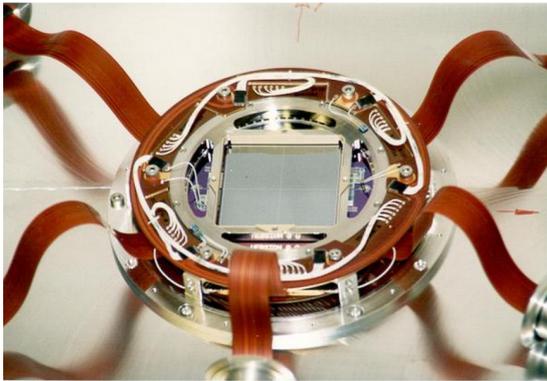


図 3.8: pn 検出器の画像 [10]

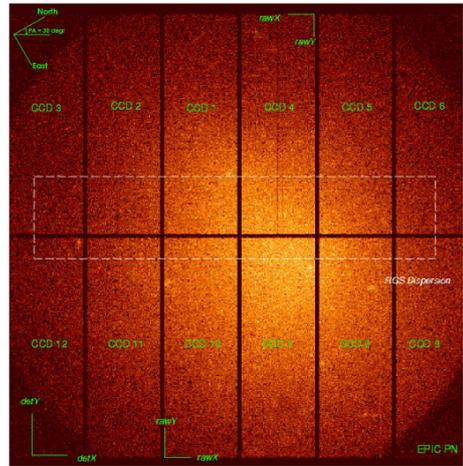


図 3.9: pn 検出器の概略図 [11]

これら XMM 衛星搭載の MOS 検出器と PN 検出器は、後述するすざく衛星搭載 XIS 検出器に比べて、優れた空間分解能と大きい有効面積を持つことが利点である。

## 3.2 すざく衛星

### 3.2.1 すざく衛星の概要

すざく衛星は、2005年7月10日にISAS/JAXAのM-V-6号ロケットにより打ち上げられた日本で5番目のX線天文衛星である。全長6.5m、太陽パネルを広げた幅は5.4m、重量1680kgとこれまでの日本の科学衛星と比べ非常に大型である。衛星の姿勢は、太陽パネルが太陽から30度以内の方向を常に向くように三軸制御されている。観測機器は太陽パネルの軸に垂直に向けられるので、観測可能範囲は太陽から60~120度の範囲に限定される。

すざく衛星の周回軌道は、近点高度250km、遠点高度550km、軌道傾斜角31度の楕円軌道に投入された後、高度約570kmの略円軌道へ最終投入された。すざく衛星は1日に地球を15周する。しかし、鹿児島県の内之浦と通信できるのはこのうち5回で、その為追跡オペレーションは1日5回、約10分ずつ行われる。すざく衛星のイメージを以下の図3.10に示す。

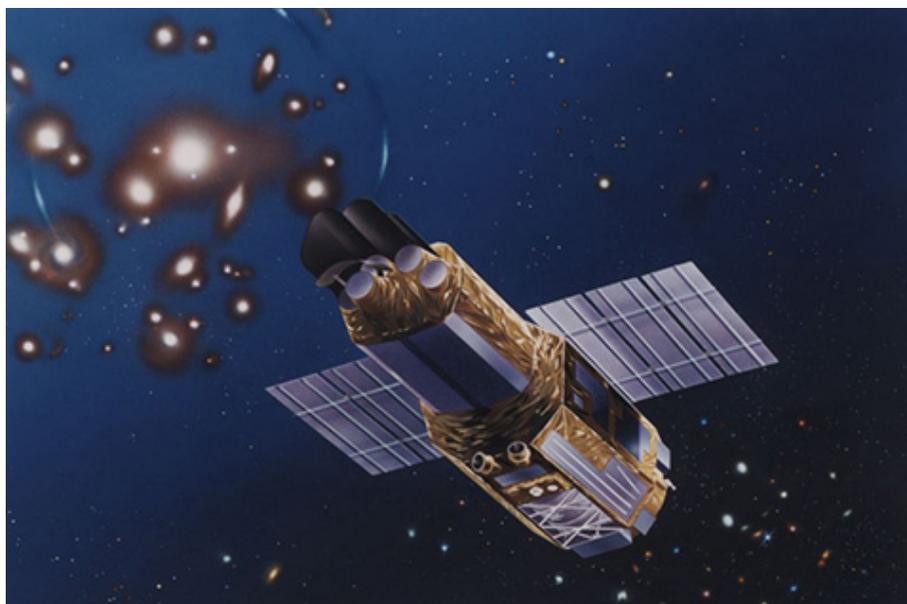


図 3.10: すざく衛星の外観 [13]

すざく衛星には、主に3種類の検出器を搭載している。XIS,HXD,XRSである。今回用いたXIS検出器についての詳細は3.2.2節で述べる。

HXDは、10 keVから700 keVの硬X線を観測する硬X線検出器(HXD:Hard X-ray Detector)である。日本の衛星に数10 keV以上の硬X線帯域に感度を持つ検出器が搭載されるのは、すざく衛星が初めてである。

XRSは、入射したX線のエネルギーを高性能で分光観測をする高分解能X線分光器(XRS:X-ray Spectrometer)である。5台のX線望遠鏡の内の1台の焦点面に設置されており、すざく衛星搭載のXRSは、従来の検出器に比べ一桁も波長分解能がよいものになっている。

すざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡 (XRT) は、日本の 1 つ前の X 線観測衛星「あすか」に搭載されている X 線望遠鏡よりも、一回り大きく有効面積および結像性能がどちらも倍近く改善している。また、すざく衛星搭載の X 線望遠鏡は、軽量であるという特徴もある。これにより、重い検出器を搭載することができるという利点が生まれる。この X 線望遠鏡がすざく衛星には XIS 用 4 台、XRS 用 1 台の計 5 台搭載されている。以下の図 3.11 にすざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡の画像を示す。

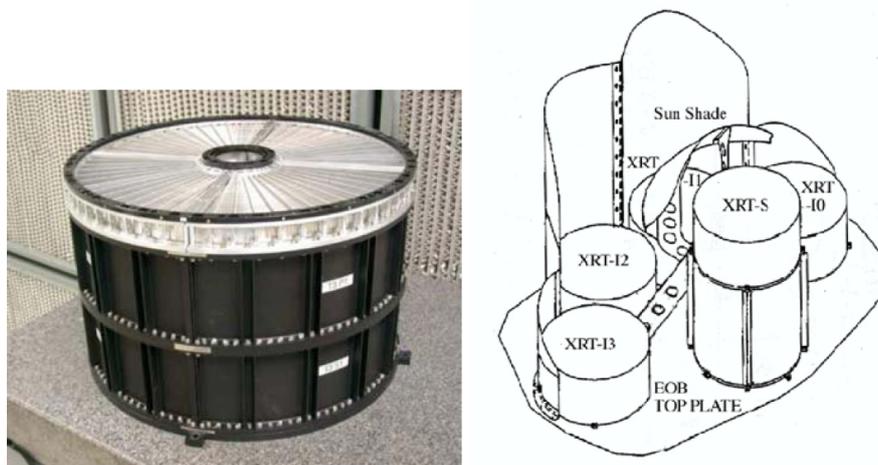


図 3.11: すざく衛星搭載の X 線望遠鏡 [12]

### 3.2.2 XIS

XIS(X-ray Imaging Spectrometer) は、すざく衛星に搭載されている X 線 CCD カメラであり、半導体検出器を 2 次元アレイ状に並べたものである。XIS 検出器の概略図を以下の図 3.12 に示す。図 3.12 において、右側の Imaging 領域で観測・露光を行う。各ピクセルごとの信号を左側の Framestore 領域で読み出す。

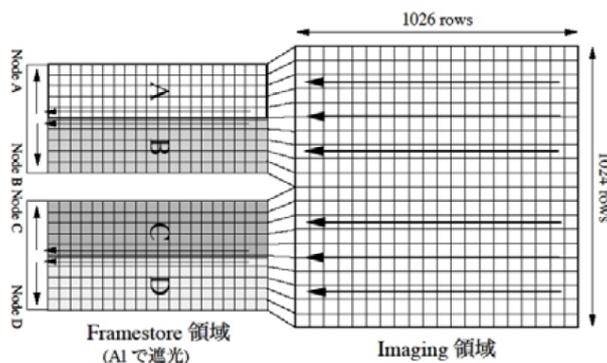


図 3.12: すざく衛星搭載 XIS 検出器の概略図 [12]

XISによるX線の検出原理を以下に述べる(XMMのEPICも同様である)。

CCDにX線が入射すると、ある確率で光電吸収反応が起きる。そこで生じた光電子はエネルギーを失うまでに、次々とSi原子と衝突を繰り返し、電子・正孔対を生成する。生成された電子・正孔対の数は、入射したX線のエネルギー $E$ に比例して、約 $(E/W_{Si})$ 個になる(ここで、 $W_{Si}$ はSiの平均電離エネルギーで、 $\sim 3.65$  eVである)。こうしてできた電子の集まり(一次電子雲)の数(電荷量)を正確に検出することによって、入射X線のエネルギーを正確に求めることができる。また、検出器の位置分解能は画素の大きさ、1ピクセルの大きさで決まり、エネルギー分解能および位置分解能においてXISは、比例計数管より優れている。入射X線は空乏層内で吸収されなければ正確なエネルギーの測定が出来ないため、高エネルギーのX線の検出効率を上げるためには、空乏層は厚くする必要がある[12]。

すざく衛星には計4台搭載されている。このXISは0.5 keVから12 keVのX線を、広い視野での撮像と同時に高精度での分光観測を連続的に行うことが目的である。「あすか」に搭載されたCCDカメラ(SIS)に比べて、空乏層の厚さが2倍になっているので、高エネルギーのX線に対する感度が7 keVで約2倍と向上している。また、CCDの動作温度を-90℃まで下げたことで暗電流の発生を抑え、電荷転送非送率を減少させている[12]。

すざく衛星搭載のXIS4台をそれぞれX0,X1,X2,X3と呼ぶ。また、CCDには表面照射型(FI:Frontside Illuminated)と裏面照射型(BI:Backside Illuminated)の2種類ある。表面照射型CCDではX線を電極側から入射するので、低エネルギーのX線は電極や絶縁層で吸収されてしまうのに対して、裏面照射型CCDではX線を電極の逆側から入射するため低エネルギーのX線に対して高い検出効率を得ることができる。X0,X2,X3の3台がFI-CCD、X1がBI-CCDである。以下の表3.2にXIS検出器の基本的な性能を示す。このすざく衛星搭載XISは、イメージ作成ができると同時に、低高度周回軌道と低温により低バックグラウンドを実現し、広がった放射に対する感度が最もよい検出器である[12]。XIS検出器の有効面積を以下の図3.14に、各衛星に搭載されている検出器のバックグラウンドを以下の図3.15に示す。図3.15を見ると、XIS検出器がChandraのACISや、XMMのMOS/PNに比べて低バックグラウンドになっているの分かる。あすか衛星が低いように見えるが、あすか衛星は有効面積が小さいという欠点があった。

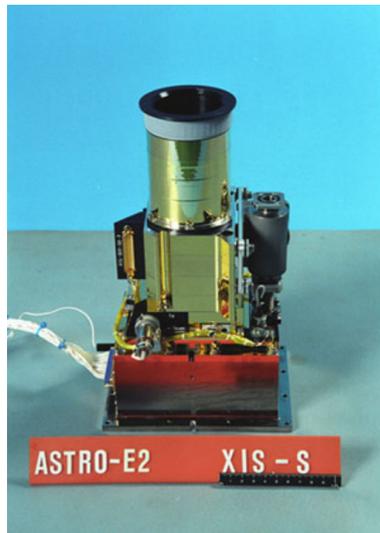


図 3.13: すざく衛星搭載 XIS 検出器 [12]

表 3.2: すざく衛星搭載 XIS の基本的な性能比較 [12]

視野	17.8'×17.8'
エネルギー帯域	0.2 – 12 keV
有効画素数	1024×1024
1 画素のサイズ	24 μm×24 μm
エネルギー分解能	~ 130 eV@6 keV
時間分解能	8 s(Normal mode), 7.8 ms(P-Sum mode)
有効面積 (XRT-I 込み)	340 cm <sup>2</sup> (FI),390 cm <sup>2</sup> (BI)@1.5 keV
	350 cm <sup>2</sup> (FI),100 cm <sup>2</sup> (BI)@8 keV

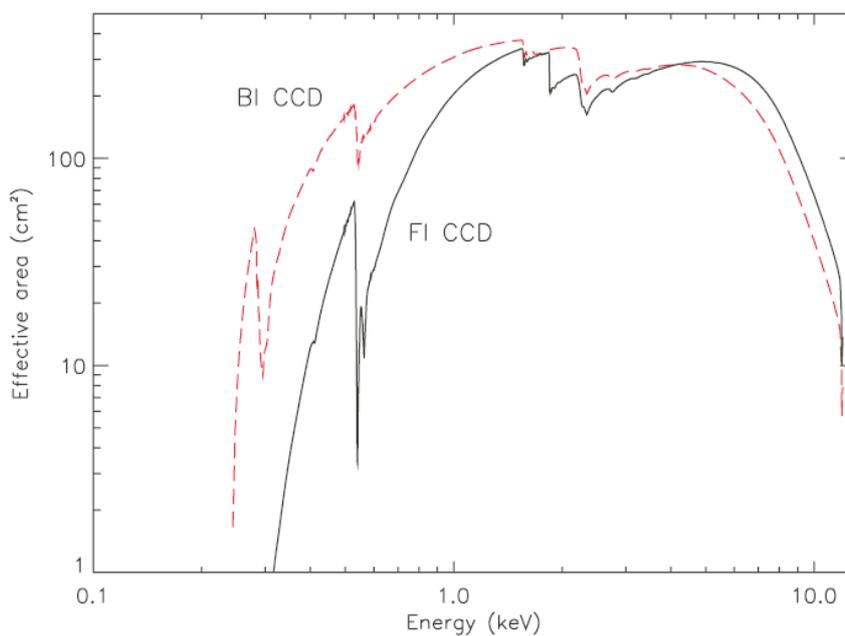


図 3.14: すざく衛星搭載 XIS 検出器の有効面積 [14]

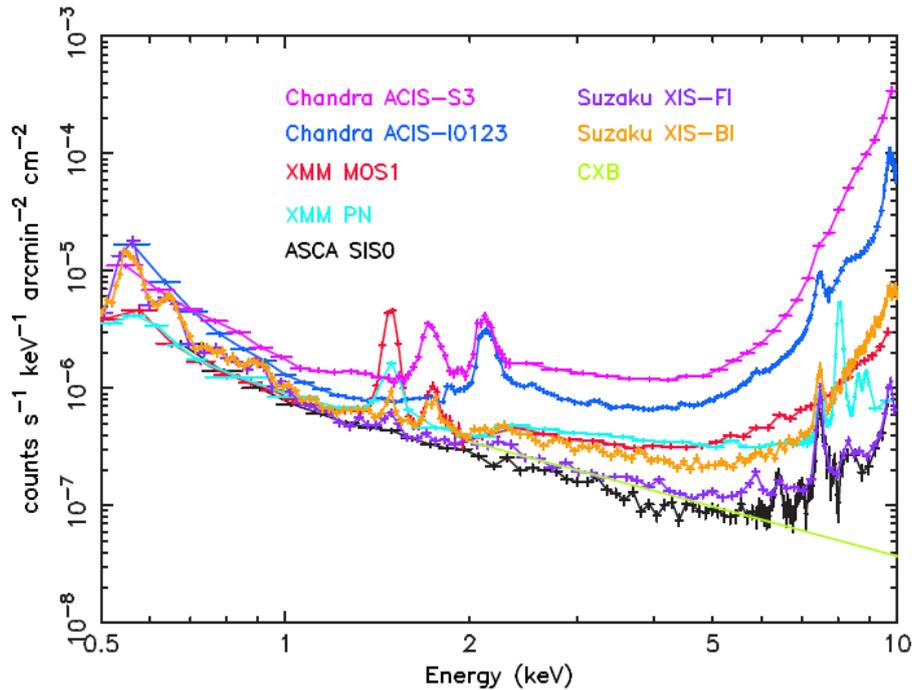


図 3.15: 各衛星搭載検出器のバックグラウンド [14]

### 3.3 両衛星の観測データを用いる意義

本研究では、XMM-Newton 衛星・すざく衛星の両方の観測結果を用いて広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の X 線対応天体を調べ、放射機構について議論する。

XMM-Newton 衛星の EPIC は視野がすざく衛星に比べて大きいので、大きく広がった本研究の対象天体には適している衛星である。XMM は空間分解能もすざく衛星より優れているので、点源の寄与の評価が可能である。また、有効面積においてもすざく衛星より大きいという特徴を持っている。

しかし、XMM-Newton 衛星は、軌道が地球の磁気圏の外に出ることで太陽フレアによる高いバックグラウンドが欠点の 1 つである。一方すざく衛星は、低高度軌道により低く、かつ安定したバックグラウンドを持ち、広がった放射に対して感度が高いという特徴を持っている。したがって、広がった放射の検出や輝度・フラックスの測定は、「すざく」が最も信頼できる。

以上より、両衛星の観測データを組み合わせて用いることで初めて、広がった放射のフラックスや輝度分布を求めることができる。そこで本研究では特に XMM の公開データを自ら解析し、「すざく」で既に報告されている結果とあわせることで、広がった X 線放射に対する点源の寄与の評価や、バルサー星雲のフラックス・輝度を求め、ガンマ線の結果とあわせて議論を行う。

## 第4章 XMM-Newton衛星の解析手法

この章では、本論文で行った XMM-Newton 衛星の解析手法について述べる。

### 4.1 データ取得過程および FITS ファイル形式

#### データ取得過程

今回は、XSA(XMM-Newton Science Archive) が公開しているデータを用いて解析を行った。まず、XSA でアカウントを作成しログインした。その後、VER J2019+368 の領域を観測しているデータを検索した。そこで出てきた観測データをバスケットの中に入れた。その後、バスケット内を開いたら、上部にある Global Download Level にチェックを入れ'ODF PPS' にし、さらに下部にある Retrieve data format は TAR.GZ にした後、Submit ボタンでダウンロードを行った。以下の図 4.1 に XSA のバスケット内の画面の例を示す。

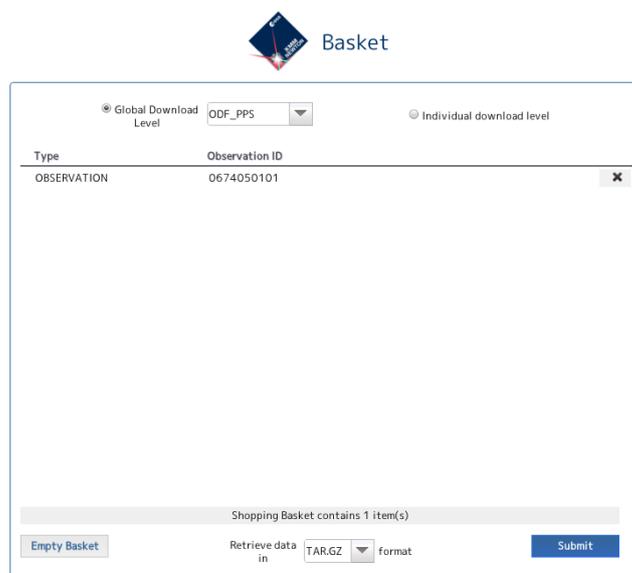


図 4.1: XSA のバスケット内の画面

#### FITS ファイル形式

今回用いた観測データは、FITS(Flexible Image Transport System) 形式 [15] で保存されている。FITS 形式は、天文業界では広く世界で使用されている形式で、ヘッダー部とテーブル部からなるファイルであ

る。ヘッダーには、観測日時や検出器などのファイルに関する情報が記載されている。テーブルには、エネルギーや検出位置座標などの各種観測結果のデータがバイナリ形式で記載されている。この FITS ファイルは、fv というソフトを用いて中身を参照することができる。その様子を以下の図 4.2 に示す。

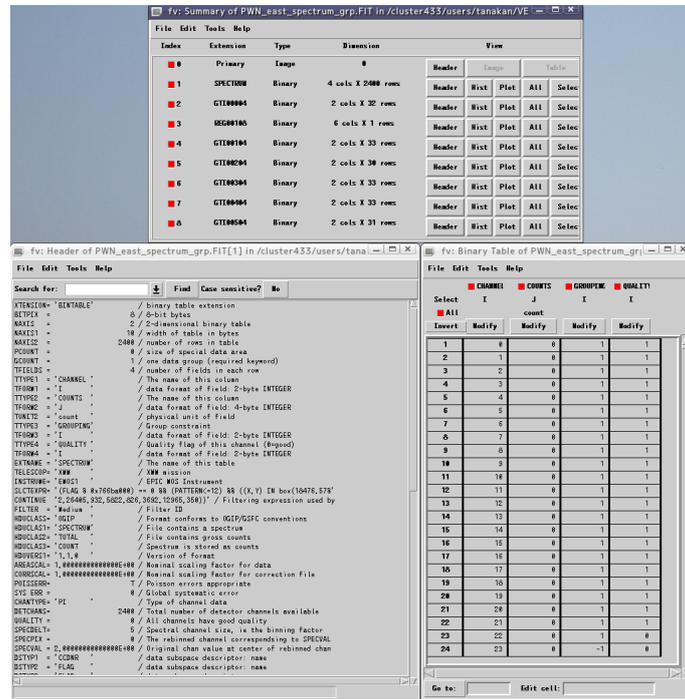


図 4.2: FITS ファイルの閲覧例

## 4.2 バックグラウンド除去

ここでは、XMM のデータ解析を行う上で重要なバックグラウンド除去について述べる。

### フレアカット

3.1 節で述べたように、XMM-Newton 衛星の軌道は一部、地球の磁気圏から出ているため、太陽からの太陽フレアなどのバックグラウンドが大きい時間帯がある。その太陽フレアによってカウントレートが、非常に大きくなっている間はバックグラウンドが多すぎて解析には適していない。そこで、太陽フレアの影響が出ている期間を、カウントレートにスレッシュホールドを設けることでカットする操作が必要であり、それをフレアカットという。フレアカットは、イベントスクリーニングの過程で行う。以下の図 4.3 にカウントレートの様子を、図 4.4 に、本研究で研究対象とする PSR J2021+3651 領域のフレアカットする前と後のイメージの違いを示す。図 4.3 を見ると、ところどころにカウントレートが急激に上昇している期間がある。この時、太陽フレアを受けている。また、図 4.4 を見ると、太陽フレアをカットしない場合とカットした場合では、明らかに違いがあるのが分かる。フレアカットしない場合は、全体的にイベントが増えている

様子がみてとれる。ただし、このフレアカットのみでフレア成分を完全に除去することは容易ではないことは留意すべきである。

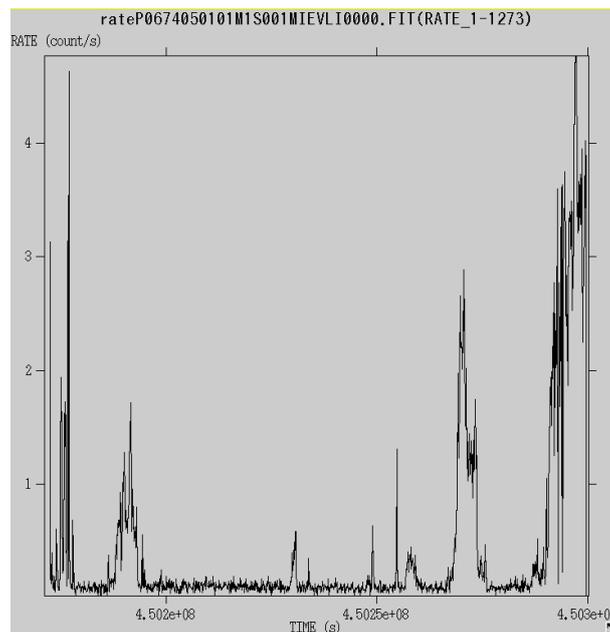


図 4.3: フレアカット前のカウントレート

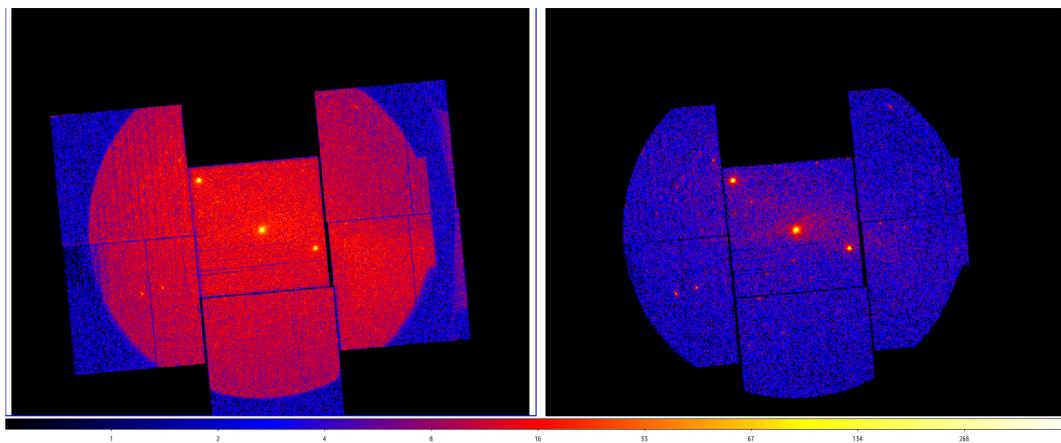


図 4.4: フレアカット前のイメージ (左) とフレアカット後のイメージ (右)

#### バックグラウンド領域の指定

今回の解析では、イメージ上でソース領域とバックグラウンド領域を指定して行った。バックグラウンド領域は、点源の場合はドーナツ状に、広がった放射の場合はソース領域のすぐ隣の領域を指定した。これ

は視野の端などの全く別の領域を指定すると、バックグラウンドを過小評価してしまう恐れがあるからである。以下の図 4.5 にバックグラウンド領域の指定の様子を示す。実線で囲まれた範囲がソース天体の領域で、点線で囲まれた範囲がバックグラウンド領域を示している。

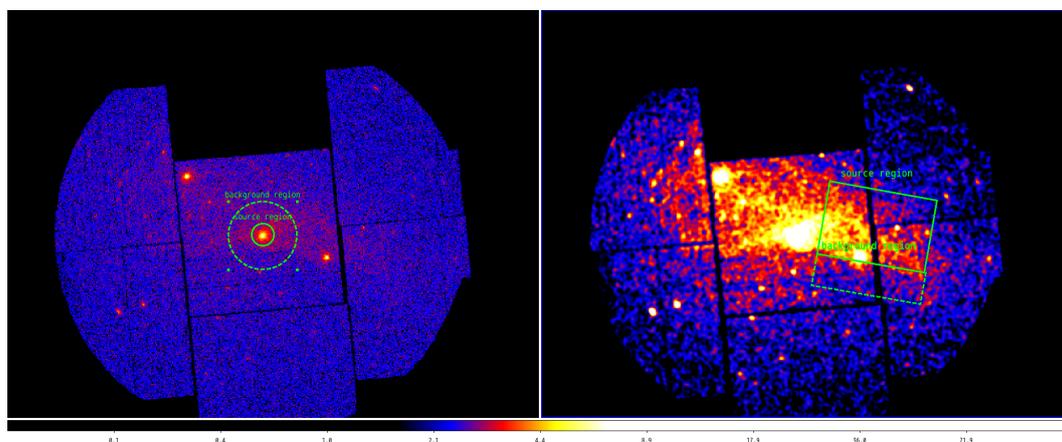


図 4.5: 点源のバックグラウンド領域指定 (左) と広がった放射のバックグラウンド領域指定 (右)

#### その他のバックグラウンド

その他のバックグラウンドとして、私達のいる銀河面からの放射 (GRXE:Galactic Ridge X-ray Emission) や全天から一様にやってくる宇宙背景 X 線放射 (CXB:Cosmic X-ray Background)、検出器を構成する元素の蛍光 X 線によるノイズがある。これらは後に述べるスペクトルデータ作成時の 'backscale' コマンドでソース領域とバックグラウンド領域をスケールした後、XSPEC でスペクトル作成する際に差し引く。

### 4.3 レスポンスファイル (RMF ファイルと ARF ファイル)

解析を行う上で、レスポンスファイルというファイルが重要になってくる。これらは、エネルギーと検出器で記録した信号波高値の関係や、有効面積等の情報を記録したもので、スペクトルのフィッティングやフラックスの計算などにおいて用いる。以下に RMF および ARF について述べる。

#### RMF(Redistribution Matrix File)

RMF とは、X 線のエネルギーと CCD から得られる電気信号の波高値を対応させる行列が書き込まれたものである。同じエネルギーの入射 X 線に対して検出器から読み出される信号には、CCD ピクセルの位置依存性がある。そこで、各ピクセルごとに信号のゲインやエネルギー分解能を考慮する必要がある。このようにして X 線のエネルギーと CCD から読み出される信号の波高値の関連付けを書き込んだものが、RMF ファイルである。この RMF ファイルは、後に述べる SAS のタスクである 'rmfgen' によって生成される。

[16]

## ARF(Ancillary Response File)

ARFとは、各エネルギーごとに検出器の有効面積を書き込んだものである。検出器の有効面積は、指定した領域の位置や大きさによって異なる。またフィルターや量子効率によっても異なるため、それらをすべて考慮した実効的な有効面積がARFには書き込まれている。以下の図4.6にARFファイルの中に書き込まれている有効面積を表したグラフを示す。有効面積は、指定した領域の位置や大きさによって異なるので、広がった天体の解析において特に注意すべきファイルである。このARFファイルも後に述べるSASのタスクである'arfgen'によって生成される[17]。

arfgen コマンドで広がった天体のARFファイルを作成する際、最も重要になるのが、detmaptype というパラメータである。これは、検出器において天体の広がり方を定めるものである。本研究で行う広がった天体の解析では、detmaptype=flat として解析を行った。flat は、指定した領域内で強度が一樣(領域の外では0)として計算を行うというものである[17]。その為、今回の広がった天体の解析をした結果、スペクトルフィッティングを行うソフトウェアXSPECから出力されるフラックスの値は、指定領域内で積分したフラックスとなる。もし輝度を求めたい場合は、指定領域を見込む立体角で割れば求められる。

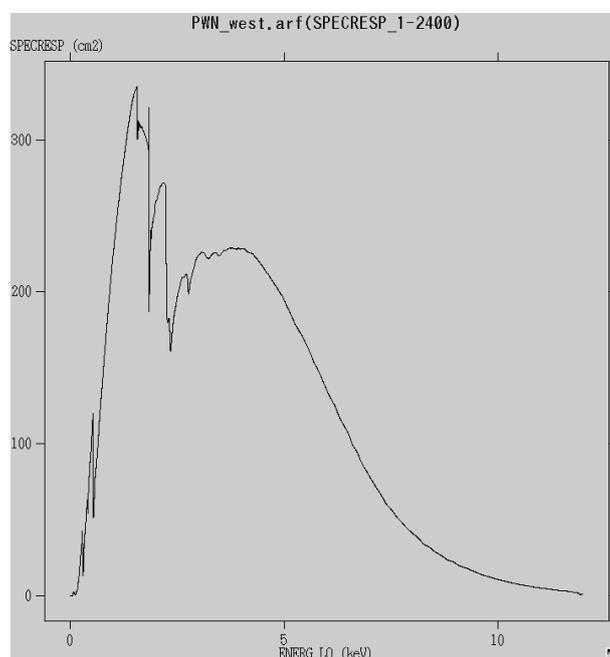


図 4.6: ARF 内にある有効面積の情報

## 4.4 パイプラインプロセス

XSA からダウンロードしたデータはそのままでは使えない。イベントファイルというファイルを作成する必要がある。その作業がパイプラインプロセスである。イベントファイルとは、何時何分に検出器に X 線が入射し、どこでどれだけのエネルギーを落としたかなどの情報が書かれているファイルである。まず、

ダウンロードしたファイルを自分の好きな場所に保存したら、作業用ディレクトリを作り、そこに移動する。作業は基本的に作業用ディレクトリで行う。そこで使う実際のコマンドを以下に示す。[18]

```
>setenv SAS_ODF ../ (環境変数 SAS_ODF の設定)
>cifbuild (calibration ファイル ccf.cif の作成)
>setenv SAS_CCF ./ (ccf.cif へのパスを SAS_CCF という環境変数で指定)
>odfingest odmdir=$SAS_ODF outdir=$SAS_ODF (ODF の内容をまとめたファイル (.SAS) ができる)
>emchain (MOS 用のイベントファイルが生成する)
>epchain runbackground=N keepintermediate=raw withoutoftime=Y (PN 用 OTE ファイルの生成)
>epchain runatthkgen=N runepframes=N runbadpixfind=N runbadpix=N (PN 用通常ファイルの生成)
```

これで、解析に必要なイベントファイル (~EVLI~.FIT) が作成できた。

## 4.5 イベントスクリーニング

前節でイベントファイルを作成した。しかし、このままでは太陽フレアの影響により、解析には適さない。そこで、イベントファイルを解析に使える状態にする作業がイベントスクリーニングである。具体的なコマンドは以下ようになる。以降出てくる  $\{\text{name}\}$  の部分には、実際に用いるイベントファイルの名前を入力する。[18]

```
>evselect table=${name}.FIT withrateset=Y rateset=rate${name}.FIT maketimecolumn=Y \
timebinsize=100 makeratecolumn=Y expression='Selection_Expression'
(ライトカーブを作成)
ここで、Selection_Expression は、
MOS 用...#XMMEA_EM && (PI>10000) && (PATTERN==0)
PN 用...#XMMEA_EP && (PI>10000 && PI<12000) && (PATTERN==0)
であり、PI は X 線のエネルギー、PATTERN はイベントのタイプを表す。その上でライトカーブを作成する。
>dspplot table=rate${name}.FIT x=TIME y=RATE (ライトカーブの表示)
```

以下の図 4.7 にライトカーブの一例を示す。ここでは、太陽フレアであると判定するために、XMM の有効面積が小さくなる 10 keV 以上でライトカーブを作成している。フレアカットは以下のようにする。

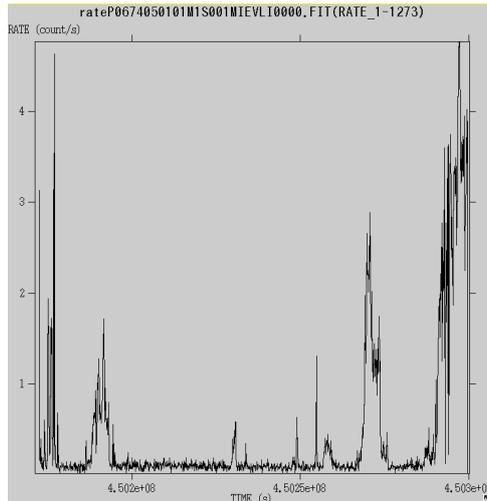


図 4.7: ライトカーブの一例

```
>tabgtigen table=rate${name}.FIT expression='RATE_Expression' gtiset=${name}gti.FIT
(スレッシュホールドを設定してフレアカット)
```

ここで、RATE\_Expression は以下の ESA が発表する推奨値を用いる。

MOS 用...RATE<=0.35

PN 用...RATE<=0.4

その後、フレアカットしたイベントファイルを作成する。

```
>evselect table=${name}.FIT withfilteredset=Y filteredset=${name}clean.FIT \
destruct=Y keepfilteroutput=T expression='Selection_Expression'
(フレアカット後の clean ファイルの生成)
```

ここで、Selection\_Expression は、以下を用いる。

MOS 用...#XMMEA\_EM && gti(\${name}gti.FIT,TIME) && (PI>150)

PN 用...#XMMEA\_EP && gti(\${name}gti.FIT,TIME) && (PI>150)

ここでのセレクションにおいて、PI が 0.15 keV 以上でかけているのは、XMM 搭載 XRT の感度が 0.15 keV 以上であるためである。これで、解析に使える状態となった clean ファイルが作成できた。

## 4.6 イメージ作成

まずは、イメージの作成を行う。イメージの作成は先程作成した clean ファイルを入力ファイルとする。その結果、\${name}image.FIT が出力される。MOS については、\${name}のファイルを用いる。PN は PI ファイルと OO ファイルの 2 種類を用いるので、以降出てくる \${piname} は通常の PN のイベントファイルの名前を、\${ooname} は out of time の PN のイベントファイルの名前を表す。出力ファイル名を指定する \${oname} は適当なソース名を入力する [18]。

MOS の場合

```
>evselect table=${name}clean.FIT imagebinning=binSize \
imageset=${name}image.FIT withimageset=yes xcolumn=X ycolumn=Y \
ximagebinsize=80 yimagebinsize=80
>imgdisplay withimagefile=true imagefile=${name}image.FIT (イメージの表示)
```

PN の場合

```
>evselect table=${pname}clean.FIT imagebinning=binSize imageset=${pname}image.FIT \
withimageset=yes xcolumn=X ycolumn=Y ximagebinsize=80 yimagebinsize=80
>evselect table=${oaname}clean.FIT imagebinning=binSize imageset=${oaname}image.FIT \
withimageset=yes xcolumn=X ycolumn=Y ximagebinsize=80 yimagebinsize=80
>farith ${oaname}image.FIT 0.063 ${oaname}image_rescaled.FIT MUL
>farith ${pname}image.FIT ${oaname}image_rescaled.FIT ${oname}image_clean.FIT SUB
```

また、エネルギー帯を指定したイメージを作りたい場合は、上の evselect のコマンドを以下に変更することできる。[18]

```
>evselect table=${name}clean.FIT imagebinning=binSize \
imageset=${name}image.FIT withimageset=yes xcolumn=X ycolumn=Y \
ximagebinsize=22 yimagebinsize=22 filtertype=expression \
expression='Selection_Expression'
```

ここで、Selection\_Expression は、

例) 2 keV - 10 keV の場合、enemin=2000,enemax=10000 なので、  
(FLAG==0) && (PI in [2000:10000]) となる。

さらに、MOS1/MOS2/PN のイメージを重ねて 1 つのイメージにしたい場合は、以下のコマンドによって作成できる。[18]

```
>mosaic imagesets='(重ねたいイメージファイルを羅列)' mosaicedset=merged_image.FIT
```

## 4.7 スペクトルデータの作成

次に、天体のスペクトルを作成するためにスペクトルファイルを作成する。まず、ソース天体の領域を指定する。ここで入力ファイルは、\${name}clean.FIT で、出力ファイルは\${sname}source\_spectrum.FIT である。以降出てくる \${sname} は、ソース天体の名前を入力する。また、入力座標は全て物理座標と呼ばれる座標値を用いる。[18]

```
>evselect table=${name}clean.FIT withspectrumset=yes \
spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT energycolumn=PI spectralbinsize=60\
withspecranges=yes specchannelmin=0 specchannelmax=11999 expression='Expression'
```

ここで、Expression は

主に点源の解析で用いる円形の場合

```
MOS用...#XMMEA_EM && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN circle({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{半径}))
```

PN 用...#XMMEA\_EP && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN circle({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{半径}))

主に広がった天体で用いる長方形の場合

MOS 用...#XMMEA\_EM && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN box({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{RA 方向の半分の長さ},{DEC 方向の半分の長さ},{回転角}))

PN 用...#XMMEA\_EP && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN box({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{RA 方向の半分の長さ},{DEC 方向の半分の長さ},{回転角}))

となる。また PN の場合は以下を追加する。PN 検出器には、ノーマルファイル (PI) と out of time ファイル (OO) がある。この 2 種類のファイルを用いて、PI ファイルからスケールした OO ファイルのデータを差し引く必要があるためである。

```
>fparkey value=CTS_OOT fitsfile=${sname}oot_spectrum.FIT+1 keyword=TTYPE2
>faddcol infile=${sname}source_spectrum.FIT+1 colfile=${sname}oot_spectrum.FIT+1 \
colname=CTS_OOT
>fcalc clobber=yes infile=${sname}source_spectrum.FIT+1 \
outfile=${sname}source_spectrum.FIT clname=CTS_OOT expr=CTS_OOT*0.063
>fcalc clobber=yes infile=${sname}source_spectrum.FIT+1 \
outfile=${sname}source_spectrum.FIT clname=COUNTS expr=COUNTS-CTS_OOT
```

次に、バックグラウンド領域の指定を行う。

```
>evselect table=${name}clean.FIT withspectrumset=yes \
spectrumset=${sname}background_spectrum.FIT energycolumn=PI spectralbinsize=60\
withspecranges=yes specchannelmin=0 specchannelmax=11999 expression='Expression'
```

ここで、Expression は

主に点源の解析で用いる円形の場合

MOS 用...#XMMEA\_EM && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN annulus({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{内半径},{外半径}))

PN 用...#XMMEA\_EP && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN annulus({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{内半径},{外半径}))

主に広がった天体で用いる長方形の場合

MOS 用...#XMMEA\_EM && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN box({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{RA 方向の半分の長さ},{DEC 方向の半分の長さ},{回転角}))

PN 用...#XMMEA\_EP && (PATTERN<=12) && ((X,Y) IN box({中心の座標 RA},{中心の座標 DEC},{RA 方向の半分の長さ},{DEC 方向の半分の長さ},{回転角}))

である。先ほどと同じ理由で PN の場合は以下を追加する。

```
>fparkey value=CTS_OOT fitsfile=${sname}oot_background_spectrum.FIT+1 keyword=TTYPE2
>faddcol infile=${sname}background_spectrum.FIT+1 \
colfile=${sname}oot_background_spectrum.FIT+1 colname=CTS_OOT
>fcalc clobber=yes infile=${sname}background_spectrum.FIT+1 \
outfile=${sname}background_spectrum.FIT clname=CTS_OOT expr=CTS_OOT*0.063
>fcalc clobber=yes infile=${sname}background_spectrum.FIT+1 \
```

```
outfile=${sname}background_spectrum.FIT clname=COUNTS expr=COUNTS-CTS_00T
```

ソース領域とバックグラウンド領域の指定ができれば、次はソース領域とバックグラウンド領域のスケールを合わせる計算が必要がある。この計算は以下の `backscale` コマンドで行う。[18]

```
>backscale spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT badpixlocation=${name}clean.FIT
>backscale spectrumset=${sname}background_spectrum.FIT badpixlocation=${name}clean.FIT
```

次に、4.3 節で述べたようなレスポンスファイルを作成する。[18]

#### RMF の生成

ここでの入力ファイルは、`${sname}source_spectrum.FIT` で、出力ファイルは、`${sname}.rmf` である。

点源の場合

```
>rmfgen spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT rmfset=${sname}.rmf
```

広がった天体の場合

```
>rmfgen spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT rmfset=${sname}.rmf detmaptype=flat
```

#### ARF の生成

ここでの入力ファイルは、`${sname}source_spectrum.FIT` と `${sname}.rmf`、`${name}clean.FIT` で、出力ファイルは、`${sname}.arf` である。

点源の場合

```
>arfgen spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT arfset=${sname}.arf withrmfset=yes \
rmfset=${sname}.rmf badpixlocation=${name}clean.FIT detmaptype=psf
```

広がった天体の場合

```
>arfgen spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT arfset=${sname}.arf withrmfset=yes \
rmfset=${sname}.rmf badpixlocation=${name}clean.FIT detmaptype=flat extendedsource=yes
```

最後に、生成した各ファイルをまとめる。[18]

```
>specgroup spectrumset=${sname}source_spectrum.FIT mincounts=25 oversample=3 \
rmfset=${sname}.rmf arfset=${sname}.arf backgndset=${sname}background_spectrum.FIT \
groupedset=${sname}_spectrum_grp.FIT
```

## 4.8 XSPEC によるスペクトルフィッティング

スペクトルフィッティングは、XSPEC というソフトを用いて行う。XSPEC 内で基本的に用いるコマンドを以下に示す。[18]

```
>xspec
XSPEC>data 1 ${sname}_spectrum_grp.FIT (スペクトルデータの読み込み)
XSPEC>backgrnd 1 ${sname}background_spectrum.FIT (バックグラウンドデータの読み込み)
XSPEC>response 1 ${sname}.rmf (RMF の読み込み)
XSPEC>arf 1 ${sname}.FIT (ARF の読み込み)
```

```
XSPEC>cpd /xs (プロットウィンドウを作成)
XSPEC>setpl ene (横軸をエネルギーにセット)
XSPEC>ignore bad (bad pixel を無視する)
XSPEC>ignore **0.5 10.** (0.5 keV 以下と 10 keV 以上を無視する)
XSPEC>pl ld (縦軸 log スケールでプロット)
XSPEC>model wabs*powerlaw (wabs*powerlaw というモデルを設定)
XSPEC>fit (フィッティング)
XSPEC>pl ld delc (縦軸 log スケールでプロット、 をプロット)
また、flux 値を知りたい場合は以下の flux コマンドを用いる。
XSPEC>flux 2. 10.
```

この場合、2 keV から 10 keV の積分フラックス値が出力される。

以上が XMM-Newton 衛星の解析手法である。この手法に基づいて解析を行った結果を 5 章でまとめる。

## 第5章 解析結果と議論

### 5.1 観測データおよび各々の諸元

本研究では、広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 を対象としているので、XMM でもこの領域を観測しているデータを用いた。XMM の解析を行うにあたり、使用した観測データを以下の表 5.1 にまとめる。また、各観測が VER J2019+368 のどの領域を観測しているかを以下の図 5.1 に示す。XMM のデータは各観測に対象天体の名称がつけられており、表 5.1 の観測名称とはこのことである。

表 5.1: 今回用いた XMM の観測データ

観測名称	観測回数	観測時間 [ks]	座標 (RA,DEC)[deg]
PSR J2021+3651	1	127	(305.27, 36.85)
WR142	2	61,20	(305.43, 37.38)
MGRO J2019+37	1	48	(304.79, 37.08)
IGR J20188+3647	1	16	(304.70, 36.79)
G75.2+0.1	2	34,30	(305.27, 36.85)

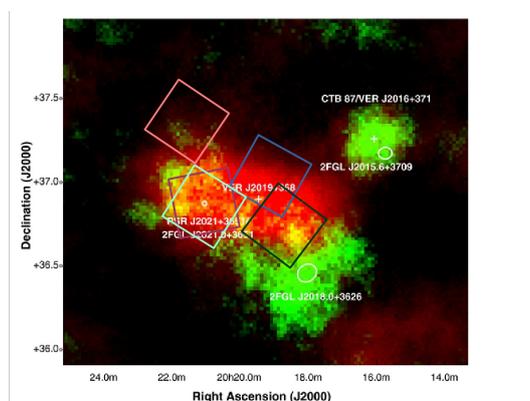


図 5.1: 今回用いた XMM の観測データの観測領域

図 5.1 にある各四角が各観測領域を示し、左上 (北東) から順に WR142(ピンク色)、PSR J2021+3651(えんじ色)、G75.2+0.1(水色)、MGRO J2019+37(青色)、IGR J20188+3647(緑色) に対応する。図 5.1 を見ても分かるように、PSR J2021+3651 と G75.2+0.1 は同じ領域を観測している。

## 5.2 各領域のイメージ

これらの観測データについて、各領域のイメージ解析を行った。まずは、イベントスクリーニング後のイメージを作成した。作成した各領域のイメージを図 5.2 に示す。複数回観測されている領域については観測時間が長いデータのみを載せている。

図 5.2 を見ると、PSR J2021+3651 領域と G75.2+0.1 領域、WR142 領域では X 線放射が検出されている。特に、PSR J2021+3651 領域と G75.2+0.1 領域では、中央にパルサー、その周りにパルサー星雲があるのが確認できる。その他にも、いくつかの点源が存在するのが分かる。しかし、MGRO J2019+37 領域と IGR J20188+3647 領域では、目立った X 線放射が検出されなかった。

次に、目立った X 線放射が確認された PSR J2021+3651 領域について、soft バンド (0.2 – 2 keV) と hard バンド (2 – 10 keV) にエネルギー帯を分けたイメージを以下の図 5.3 に示す。図 5.3 は図 5.2 と違い、スムージングを行っていない。また、G75.2+0.1 領域については PSR J2021+3651 領域と観測領域が同じであること、WR142 領域については VER J2019+368 の放射領域から外れていることから、ここでは PSR J2021+3651 領域のみを載せる。図 5.3 を見ると、soft バンドでは中央の PSR J2021+3651 を含め 3 つの明るい点源が存在するが、そのうち南西に位置するものは hard バンドではほとんど X 線放射していないことが分かる。次に、パルサーおよびパルサー星雲領域の解析結果についてまとめる。

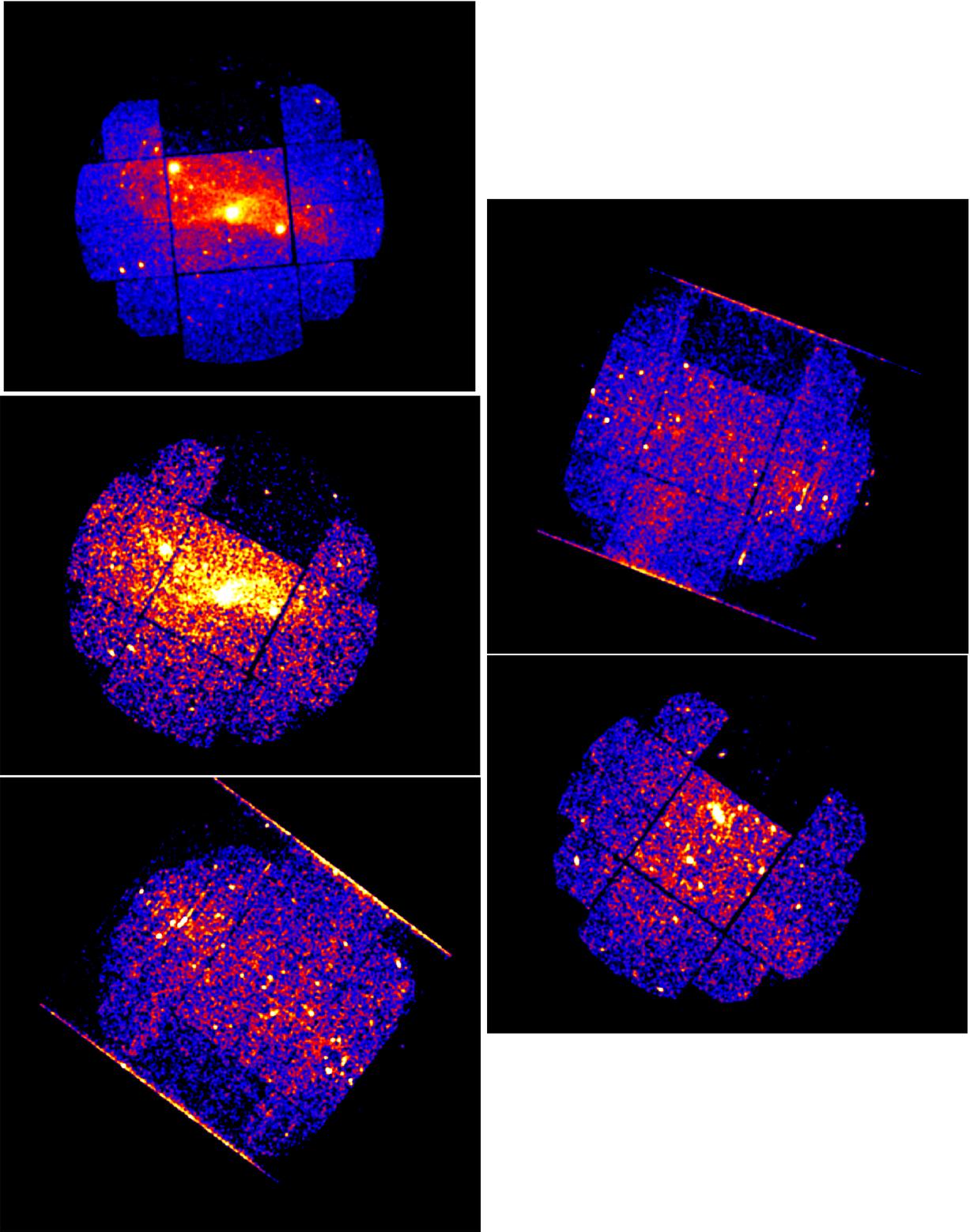


図 5.2: イメージ解析により得られた各領域のイメージ (左上:PSR J2021+3651、左中央:G75.2+0.1、左下:IGR J20188+3647、右上:MGRO J2019+37、右下:WR142)、またこれらのイメージは見やすくするためスムージングをしている。

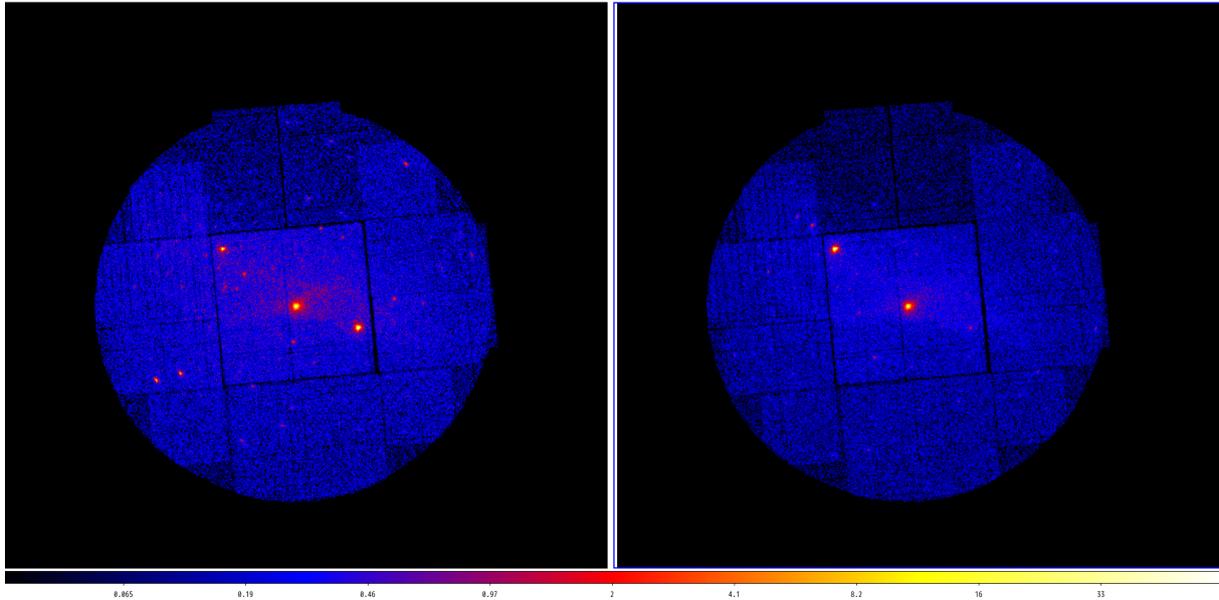


図 5.3: PSR J2021+3651 領域の soft バンドイメージ (左) と hard バンドイメージ (右)

### 5.3 パルサーおよびパルサー星雲領域の解析

先ほどのイメージ解析の結果、有意に X 線で広がった放射がある PSR J2021+3651 領域のパルサー星雲の解析、および点源の寄与を評価するためパルサー星雲内の明るい点源の解析を行うこととした。PSR J2021+3651 およびその周辺は複数回観測が行われているが、観測時間が一番長いデータ (PSR J2021+3651) を用いる。また、MOS1 は CCD チップが 1 つ欠けているため今回の解析に使わないことにした。さらに、PN は Small Window Mode と呼ばれる狭い範囲を観測するモードになっており、パルサーのみを観測しているため今回は使わないことにした。よって、今回は MOS2 のみ解析をする。以下にその解析結果を述べていく。

#### 5.3.1 点源解析

点源の解析は、パルサー PSR J2021+3651 およびパルサー星雲内にある 2 つの明るい点源を行った。そのパルサー星雲内にある点源それぞれを PS1, PS2 とする。各点源の各種指定座標を以下の表 5.2 に示し、その様子を図 5.4 に示す。図 5.4 において、各実線円内がソース領域、実線円と点線円の間がバックグラウンド領域である。スペクトルフィットは、PSR は  $wabs \times powerlaw$ 、PS1 と PS2 は  $wabs \times (powerlaw + vapec)$  で行い、その結果を表 5.3 に、各スペクトルを図 5.5 に示す。

表 5.2: パルサーおよびパルサー星雲内の明るい点源の各種指定座標

PSR	
ソース領域中心座標 (RA,DEC)	(20h21m04.48s, +36d51'07.9")
内半径 [arcmin]	0.92
外半径 [arcmin]	1.67
PS1	
ソース領域中心座標 (RA,DEC)	(20h20m42.51s, +36d49'32.8")
内半径 [arcmin]	0.75
外半径 [arcmin]	1.33
PS2	
ソース領域中心座標 (RA,DEC)	(20h21m31.30s, +36d55'12.3")
内半径 [arcmin]	0.92
外半径 [arcmin]	1.5

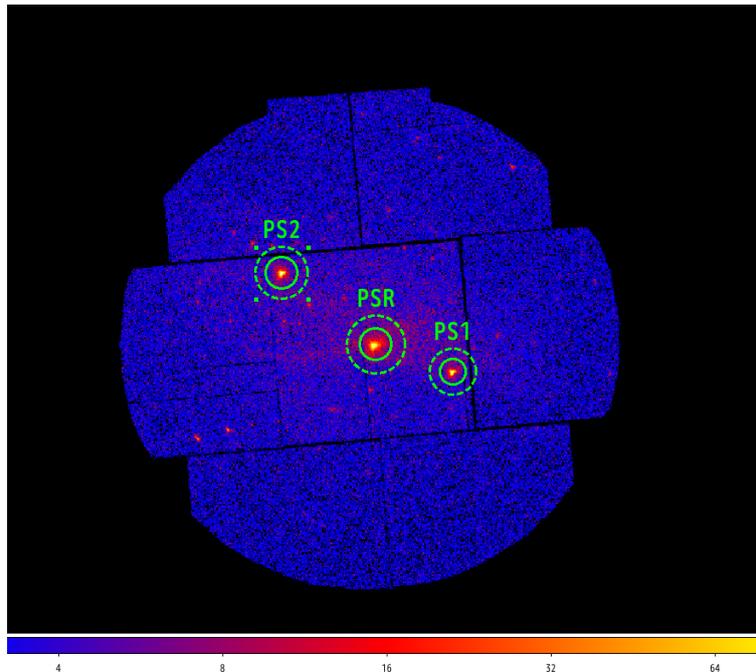


図 5.4: 点源のソース領域とバックグラウンド領域の指定

表 5.3: 点源解析の結果

	PSR	PS1	PS2
N(H) [ $\times 10^{22}$ atoms/cm <sup>2</sup> ]	0.44 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.06</sub>	0.56 <sup>+0.03</sup> <sub>-0.03</sub>	3.2 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.4</sub>
$\Gamma$	1.45 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.09</sub>	9.5 <sup>+1.7</sup> <sub>-1.7</sub>	1.7 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.7</sub>
kT [keV]		0.96 <sup>+0.09</sup> <sub>-0.07</sub>	2.6 <sup>+0.8</sup> <sub>-0.4</sub>
flux (0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$1.39 \times 10^{-13}$	$1.55 \times 10^{-13}$	$4.9 \times 10^{-14}$
flux (2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$8.1 \times 10^{-13}$	$1.6 \times 10^{-14}$	$9.7 \times 10^{-13}$
$\chi^2/\text{dof}$	61.22/59	47.60/33	88.99/53

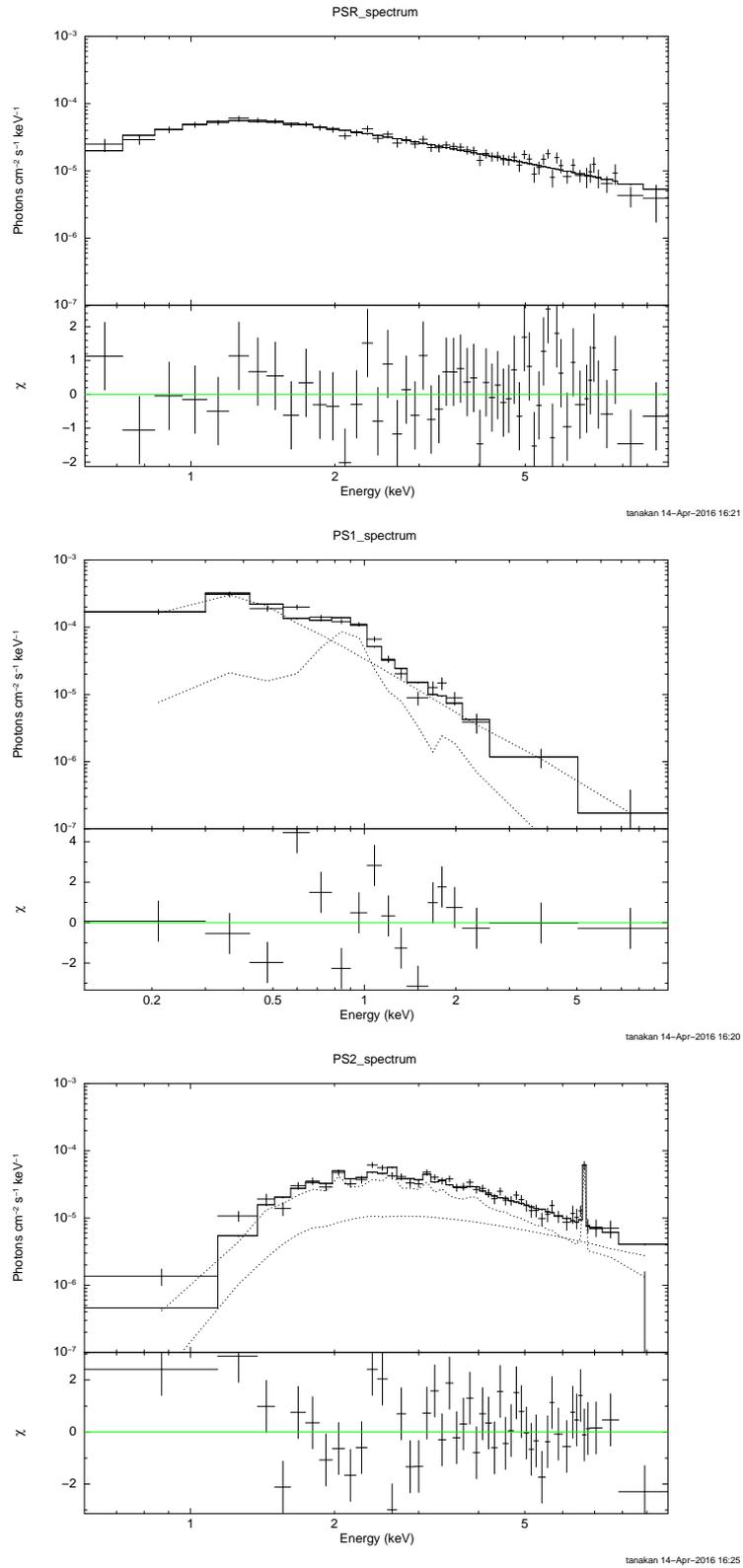


図 5.5: 上:PSR のスペクトル、中央:PS1 のスペクトル、下:PS2 のスペクトル

### 5.3.2 広がった放射の解析

次いで、広がった X 線放射であるパルサー星雲の解析結果について述べる。今回の解析では、パルサーを挟んで東西のパルサー星雲を覆うようにソース領域指定を行った。また、バックグラウンド領域についてはソースのフラックスの過小評価を避けるため、ソース領域のすぐ隣の領域とした。手順を確認しながら進めるため、まず点源の除去は行わず解析をした。その様子を以下の図 5.6 に示す。実線が各ソース領域で、点線が各バックグラウンド領域である。また、領域の大きさは東西でそろえてある。その具体的な座標値を表 5.4 に示す。

解析の結果得られたスペクトルを図 5.7 に、`wabs×powerlaw` でモデルフィッティングを行った結果を表 5.5 に示す。

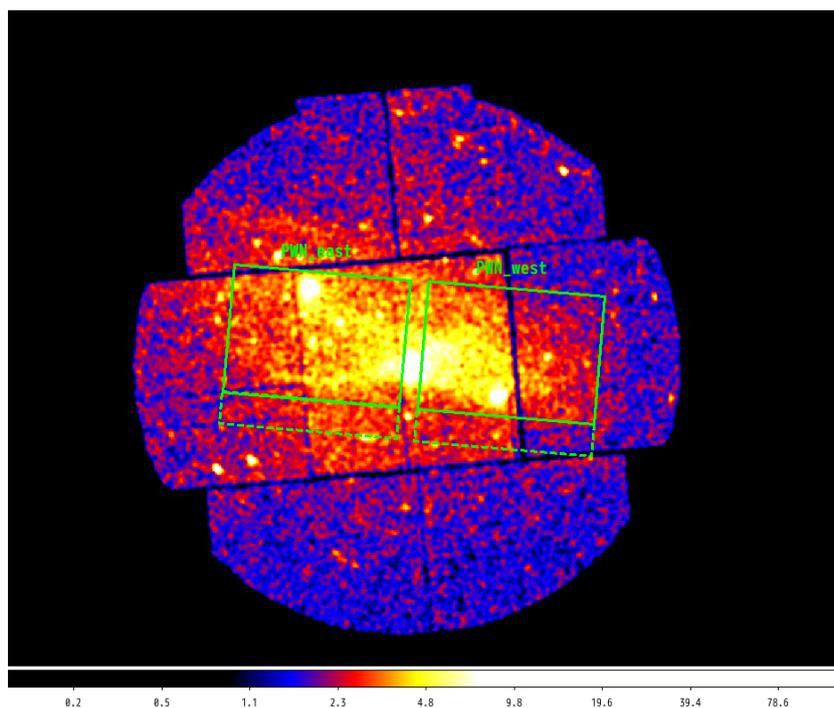
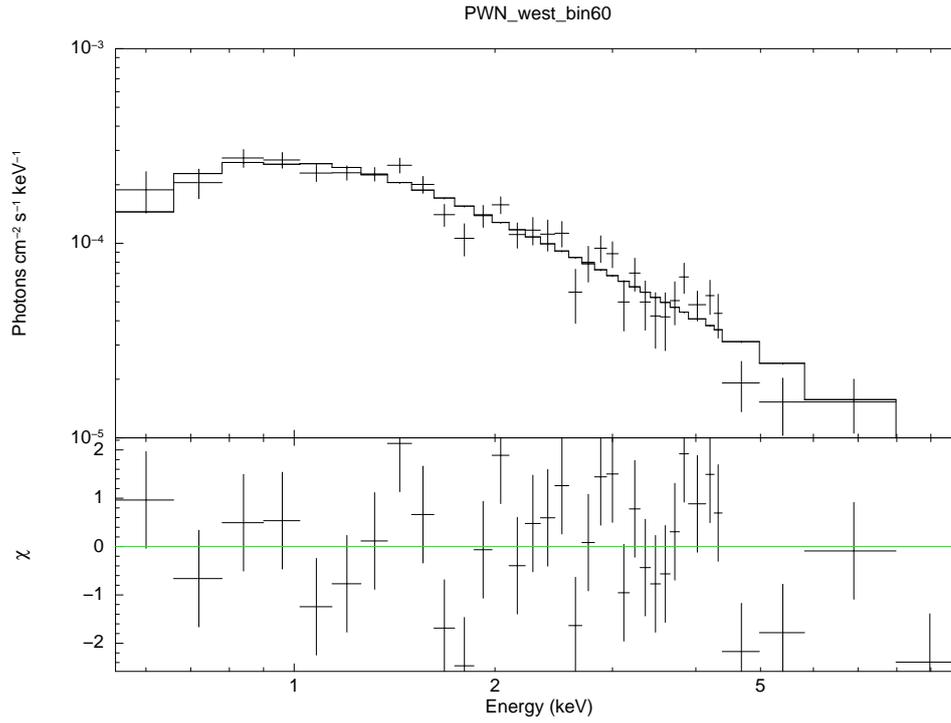
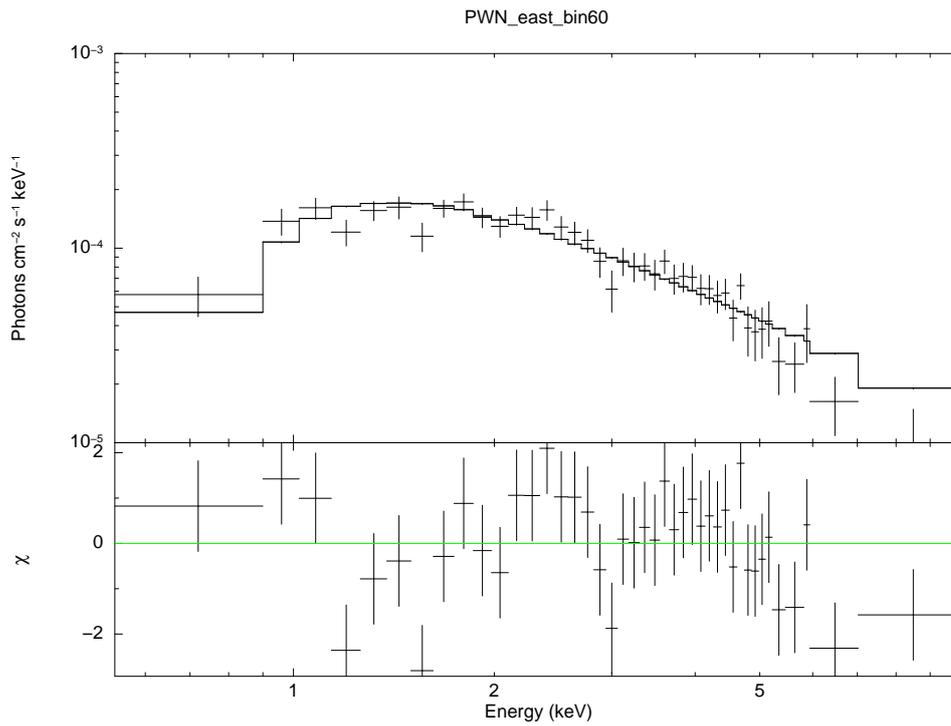


図 5.6: パルサー星雲のソース領域とバックグラウンド領域の指定



tanakan 14-Apr-2016 14:21



tanakan 14-Apr-2016 14:23

図 5.7: 上:西側パルサー星雲のスペクトル、下:東側パルサー星雲のスペクトル

表 5.4: パルサー星雲の各種指定座標

西側	
ソース領域中心座標 (RA,DEC)	(20h20m39.024s, +36d51'49.42")
ソース領域の幅 [arcmin]	(9.17, 6.67)
ソース領域の回転角 [deg]	355
BG 領域中心座標 (RA,DEC)	(20h20m41.125s, +36d47'39.44")
BG 領域の幅 [arcmin]	(9.17, 1.67)
BG 領域の回転角度 [deg]	355
東側	
ソース領域中心座標 (RA,DEC)	(20h21m29.823s, +36d52'44.33")
ソース領域の幅 [arcmin]	(9.17, 6.67)
ソース領域の回転角 [deg]	355
BG 領域中心座標 (RA,DEC)	(20h21m31.545s, +36d48'34.87")
BG 領域の幅 [arcmin]	(9.17, 1.67)
BG 領域の回転角度 [deg]	355

表 5.5: パルサー星雲の解析結果

	西側	東側
N(H) ( $\times 10^{22}$ atoms/cm <sup>2</sup> )	$0.30^{+0.07}_{-0.07}$	$0.63^{+0.14}_{-0.12}$
$\Gamma$	$1.83^{+0.16}_{-0.15}$	$1.58^{+0.15}_{-0.15}$
norm	$5.3^{+0.9}_{-0.8} \times 10^{-4}$	$5.6^{+1.3}_{-1.0} \times 10^{-4}$
flux (0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$5.93 \times 10^{-13}$	$4.21 \times 10^{-13}$
flux (2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$1.72 \times 10^{-12}$	$2.60 \times 10^{-12}$
Intensity (0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> /sr]	$1.15 \times 10^{-7}$	$8.14 \times 10^{-8}$
Intensity (2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> /sr]	$3.33 \times 10^{-7}$	$5.07 \times 10^{-7}$
$\chi^2/\text{dof}$	99.70/69	85.01/69

VER J2019+368 領域内に X 線で広がった放射は、パルサー星雲 G75.2+0.1 のみ検出された。さらに、東西のパルサー星雲のスペクトル作成を行い、フラックスや輝度を求めた。その結果、点源を除去する前の状態で西側の方がべき指数がやや大きいこと、soft バンドのフラックスが大きいこと、逆に東側は hard バンドのフラックスがやや大きいことなどが分かった。次節では、広がった X 線放射であるパルサー星雲に対する点源の寄与の評価を行う。

### 5.3.3 広がった X 線放射に対する点源の寄与

ここでは、広がった X 線放射であるパルサー星雲に対する点源の寄与について議論する。点源の寄与を評価するにあたり、パルサー星雲への寄与を評価する点源を選定した。その手法として、XSA が公開して

いるソースリストを活用した。このリストは自動解析で作られたものであり、パルサー星雲のような広がった放射がある場合は点源でないものもリストに含まれてしまうため人間による確認が必要である。そこで、このリスト内でフラックス値が大きい順番に並べてイメージを目視し、パルサー星雲の上に点源として認識できるか確認していった。その結果、5.3.1 節で述べた 2 天体のみで十分であることが分かった。以上より、2 天体について寄与の評価を行う。

2 天体について各エネルギー帯でのフラックス値で寄与を評価した結果を以下の表 5.6 にまとめる。

表 5.6: 各天体の各エネルギー帯でのパルサー星雲に対する寄与

点源	エネルギー帯	寄与
PS1	soft (0.5–2 keV) band	26.1 %
	hard (2–10 keV) band	0.9 %
PS2	soft (0.5–2 keV) band	11.5 %
	hard (2–10 keV) band	37.2 %

この結果から、PS1(USNO-B1.0 1268-0448692)[19] は、soft バンドへの寄与が約 1/4 程度あることが分かった。また、PS2(WR141) は、hard バンドへの寄与が約 1/3 と分かった。つまり、この両者のみをパルサー星雲の放射を議論する上で考慮する必要があり、その他の点源は無視できることが言える。その為、次節では上記の 2 つの点源を除去した場合のパルサー星雲について解析を行い、結果をまとめる。

## 5.4 点源除去したパルサー星雲

ここでは、明るい点源を除去した広がった X 線放射であるパルサー星雲の解析結果について述べる。今回の解析の領域指定の様子を以下の図 5.8 に示す。実線が各ソース領域で、点線が各バックグラウンド領域である。また、赤斜線部は点源として除去する領域である。さらに、除去する領域の座標を以下の表 5.7 に示す。表 5.7 に示す座標を表 5.4 の領域から抜く。

今回の解析では、フィッティングモデルは `wabs×powerlaw` に設定してフィッティングを行った。パルサーの西と東それぞれで結果をまとめる。得られたスペクトルを図 5.9 に、フィッティングした結果を表 5.8 に示す。

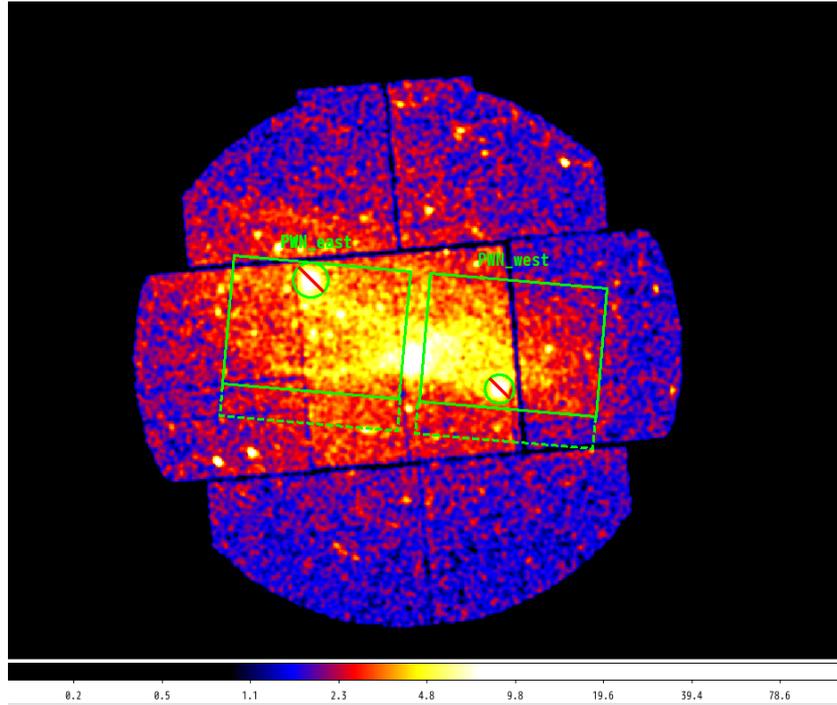
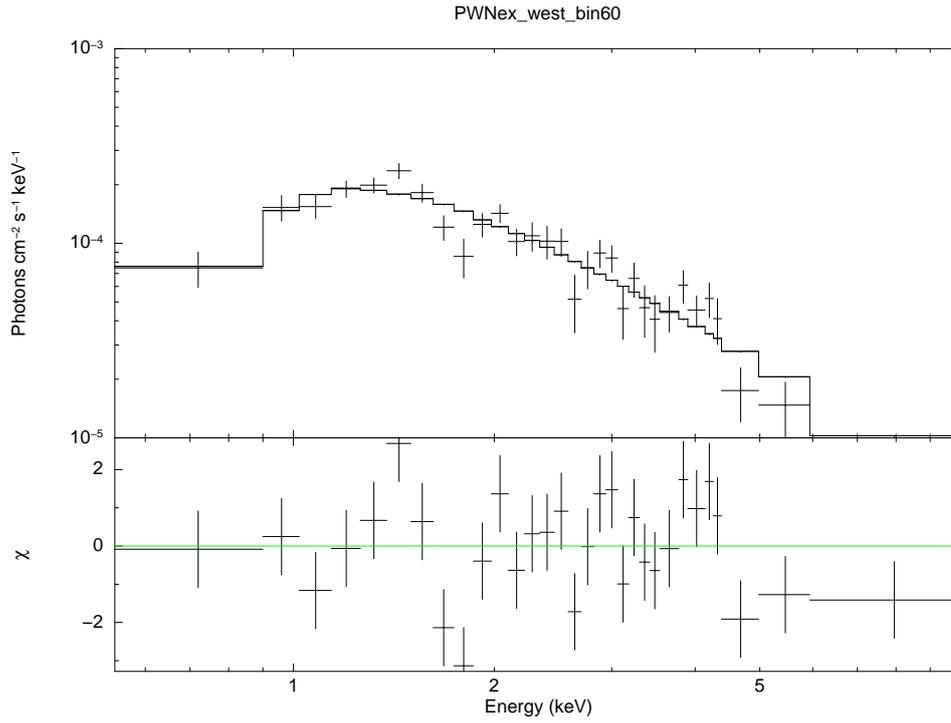


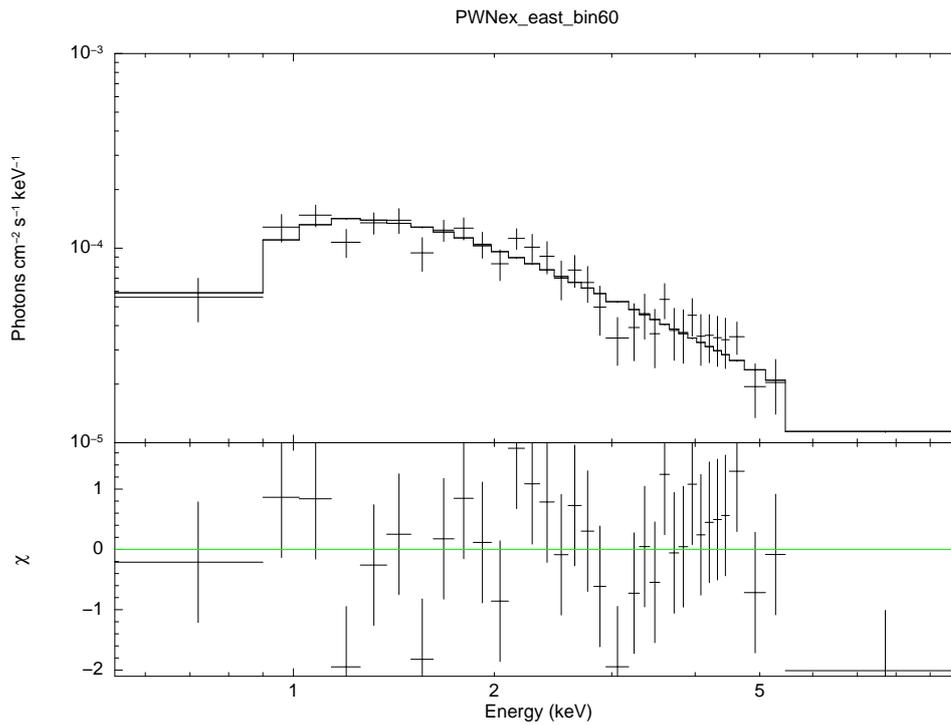
図 5.8: 点源除去したパルサー星雲のソース領域とバックグラウンド領域の指定

表 5.7: 除去する点源の各種指定座標

西側	
除去する点源の中心座標 (RA,DEC)	(20h20m42.510s, +36d49'32.75")
除去する点源の半径 [arcmin]	0.75
東側	
除去する点源の中心座標 (RA,DEC)	(20h21m31.298s, +36d55'12.25")
除去する点源の半径 [arcmin]	0.92



tanakan 14-Apr-2016 14:26



tanakan 14-Apr-2016 14:27

図 5.9: 上:点源除去した西側パルサー星雲のスペクトル、下:点源除去した東側パルサー星雲のスペクトル

表 5.8: 点源除去したパルサー星雲の解析結果

	西側	東側
N(H) ( $\times 10^{22}$ atoms/cm <sup>2</sup> )	0.58 <sup>+0.12</sup> <sub>-0.11</sub>	0.53 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.12</sub>
$\Gamma$	2.04 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.19</sub>	1.81 <sup>+0.21</sup> <sub>-0.19</sub>
flux (0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$4.50 \times 10^{-13}$	$3.41 \times 10^{-13}$
flux (2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> ]	$1.52 \times 10^{-12}$	$1.42 \times 10^{-12}$
Intensity (0.5–2 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> /sr]	$8.96 \times 10^{-8}$	$6.89 \times 10^{-8}$
Intensity (2–10 keV) [erg/s/cm <sup>2</sup> /sr]	$3.03 \times 10^{-7}$	$2.87 \times 10^{-7}$
$\chi^2/\text{dof}$	99.65/69	69.10/69

これらの結果から、点源を除去しないときのフラックス値を比べると西側では約 20%、東側の hard バンドでは約 40%程度減少したのが分かる。また、点源除去した結果、hard バンドでのパルサー星雲のフラックスが、東西とも  $1.5 \times 10^{-12}$  [erg/s/cm<sup>2</sup>] 程度で同じであることが分かった。

## 5.5 X 線を生成する電子とガンマ線を生成する電子の議論

ここでは、第 2 章で述べた放射過程を仮定し、解析から得られた結果より X 線を生成する電子とガンマ線を生成する電子について考える。

今回観測した X 線が、宇宙線電子が星間磁場を受けてシンクロトロン放射をしたと仮定し、そのエネルギー帯を 1 keV–10 keV、磁場を典型的な星間磁場である  $3 \mu\text{G}$  とすると、式 2.2 よりそれに対応する電子のエネルギーが計算でき、その範囲はおおよそ  $E = 10^{14} - 4 \times 10^{14}$  eV となる。このときの電子のエネルギー分布のべき指数  $p$  は西側パルサー星雲の結果を用いると、式 2.5 より  $p = 3.1$  と求まる。

次にガンマ線について考える。先行研究 [5] で報告されているガンマ線のエネルギー帯は 1 TeV–30 TeV であり、このガンマ線がパルサーによって加速された電子が宇宙マイクロ波背景放射 (CMB 光子) と逆コンプトン散乱することで発生すると仮定すると、式 2.7 よりそれに対応する電子のエネルギーが計算でき、その範囲はおおよそ  $E = 2 \times 10^{13} - 10^{14}$  eV となる。このときの電子のエネルギー分布のべき指数  $p$  は先行研究 [5] の結果を用いると、式 2.10 より  $p = 2.5$  と求まる。

以上より、X 線を生成する電子のエネルギー帯とガンマ線を生成する電子のエネルギー帯は、ほぼ隣っており各々 100 TeV 以上、100 TeV 以下となる。そのそれぞれの領域のエネルギー分布のべき指数を考えると、低エネルギー側で 2.5、高エネルギー側で 3.1 と変化しているらしいことが分かった。つまりパルサー PSR J2021+3651 の西側パルサー星雲領域の電子のエネルギー分布が  $E = 10^{14}$  eV あたりでソフトになっていることが示唆された。

## 5.6 まとめと今後

本研究では、広がった TeV ガンマ線源 VER J2019+368 の放射機構の特定を目的とし、主に XMM 衛星の観測データを用いて PSR J2021+3651 領域の点源およびパルサー星雲の解析を行った。

XMM の観測データより、イメージを作成したところ PSR J2021+3651 の領域にパルサー星雲 PWN

G75.2+0.1 の存在が確認された。その他、MGRO J2019+37 や IGR J20188+3647 領域には目立った X 線放射が見られなかった。

存在が確認されたパルサー星雲について東西でスペクトル解析をし、東西で初めてフラックス・輝度が得られた。その結果、パルサーを挟んで東西で大体同じフラックスであることが分かった。また、得られた光子のスペクトルのべき指数から電子のエネルギー分布が、 $E = 10^{14}$  eV 付近でソフトになっていることが示唆された。

今後は、XMM から得られた結果をすざく衛星の観測結果と比較し、両衛星の結果と電波やガンマ線の結果をあわせて用いて、TeV ガンマ線を生成する粒子のエネルギー分布の議論を行う必要がある。また、パルサー星雲の放射は VER J2019+368 の中心に届いているが、それでもガンマ線の放射領域よりも小さいという問題点もある。これについても今後、考察しなければならない。

# 謝辞

本論文の作成にあたって、ご協力いただいた皆様に感謝いたします。まず指導教員である水野先生に感謝いたします。教育実習のため約1ヶ月遅れでスタートした卒業研究で、さらに天体の解析をやったこともない私に、いつも丁寧な指導・アドバイスをしていただきました。論文執筆においても、何度も同じミスを繰り返してしまい申し訳ありませんでした。PSRとJの間、VERとJの間、数値と単位の間を空けることはかなり意識するようになりました。多々ご迷惑をお掛けしましたが、最先端の研究テーマに携わる機会を用意して頂いたことを非常に感謝します。また、深沢先生をはじめとする研究室の先生方にも、研究面で多数の指導・アドバイスして頂き、ありがとうございました。小部屋の皆様には、研究室で研究に関するアドバイスや、時には楽しい会話など楽しく研究できる環境を作っていただきありがとうございました。4年生にも感謝します。内田君はいろんなことを教えてもらいました。宮岡君には初めXMMの解析環境を整えていただきました。戸田君には毎日夕食に付き合ってくださいました。森君さらには助教の大野さんとは、夏から毎週テニスをして、いい運動をすることができました。その他本論文にご協力いただいた方に改めて感謝したいと思います。

## 関連図書

- [1] *The Energy Spectra And Anisotropies of Cosmic rays*, S.P.SWORDY 2001, Space Science Reviews Volume 99, p85
- [2] *High Energy Astrophysics*, M.S.Longair 1994, 2nd Edition, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- [3] Abdo et al. 2007, ApJ 658, L33
- [4] Abdo et al. 2012, ApJ 753, 159
- [5] Aliu et al. 2014, ApJ 788, 78
- [6] VERITAS HP  
  
<http://veritas.sao.arizona.edu/>
- [7] Hessels et al. 2004, ApJ 612, 389
- [8] Zabalza et al. 2010, Int. J. of Mod. Phys. D19, 811
- [9] 水野 恒史, 日本物理学会 2015 秋「すざくによる広がった TeV ガンマ線放射 VER J2019+368 の X 線観測」
- [10] 欧州宇宙機関 (ESA) の HP  
  
[http://xmm.esac.esa.int/external/xmm\\_user\\_support/documentation/technical/](http://xmm.esac.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/technical/)
- [11] XMM-Newton Users Handbook Issue2.13  
  
[http://xmm.esac.esa.int/external/xmm\\_user\\_support/documentation/uhb/index.html](http://xmm.esac.esa.int/external/xmm_user_support/documentation/uhb/index.html)
- [12] 「すざく」ファーストステップガイド 第 4.0.3 版  
  
[http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep\\_web/fstep.html](http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/fstep.html)
- [13] 「すざく」ホームページ  
  
<http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/>
- [14] Mitsuda et al. 2007, PASJ, 59, S1

[15] W.D.Pence et al. 2010, A&A 524, A42

[16] SAS rmfgen マニュアル

<http://xmm.esac.esa.int/sas/current/doc/rmfgen/>

[17] SAS arfgen マニュアル

<http://xmm.esac.esa.int/sas/current/doc/arfgen/>

[18] SAS Threads

<http://xmm.esac.esa.int/sas/current/documentation/threads/>

[19] Etten et al. 2008, ApJ 680, 1417