

広がったTeVガンマ線源 VER J2019+368のX線観測 (2)

2017年9月12日 日本天文学会 秋季年会 @北海道大学

田中 慎之 (広島大学)

水野 恒史、高橋 弘充、勝田 隼一郎 (広島大学)
林 克洋 (名古屋大学)、山崎 了 (青山学院大学)

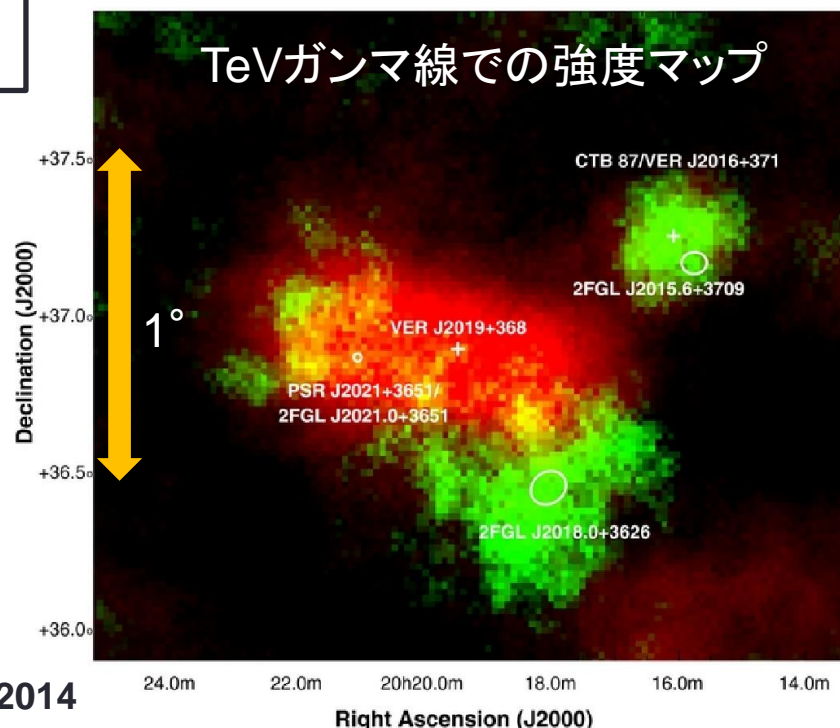
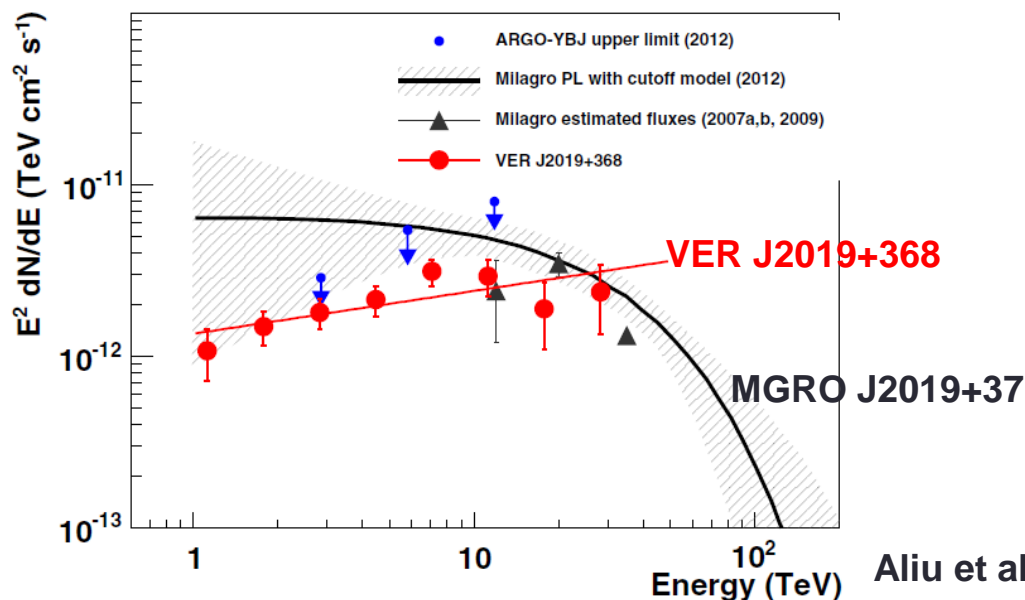
introduction

VER J2019+368の過去の観測 (TeVガンマ線)

- ”はくちょう座X”方向に大きく広がったTeVガンマ線放射が発見された。
- その後、VERITASによる追観測でいくつかの放射に分解され、その主放射領域がVER J2019+368。
- VERITASによる観測が続いており、2017年ICRCで最新の結果が報告された。

放射領域 (2D gauss 1σ) : $0.34^\circ \times 0.13^\circ$
 Flux (1 - 10 TeV) = 7×10^{-12} erg/s/cm²
 ベキ指数 $\Gamma = 1.75 \Rightarrow$ ハードなスペクトル

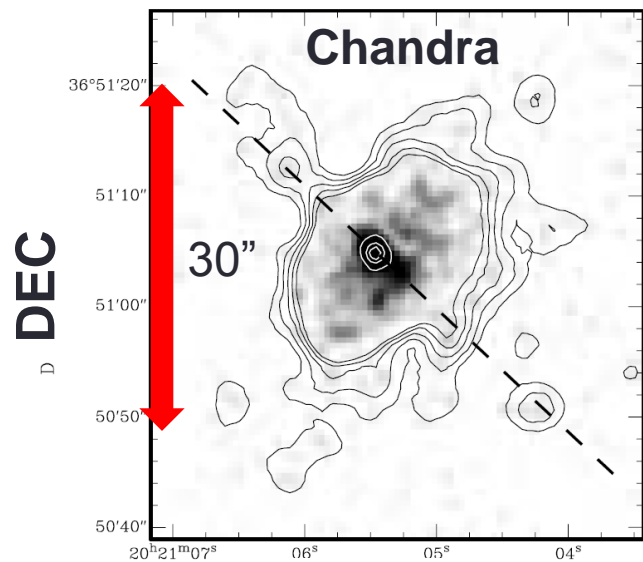
1 TeV < E
 0.6 TeV < E < 1 TeV



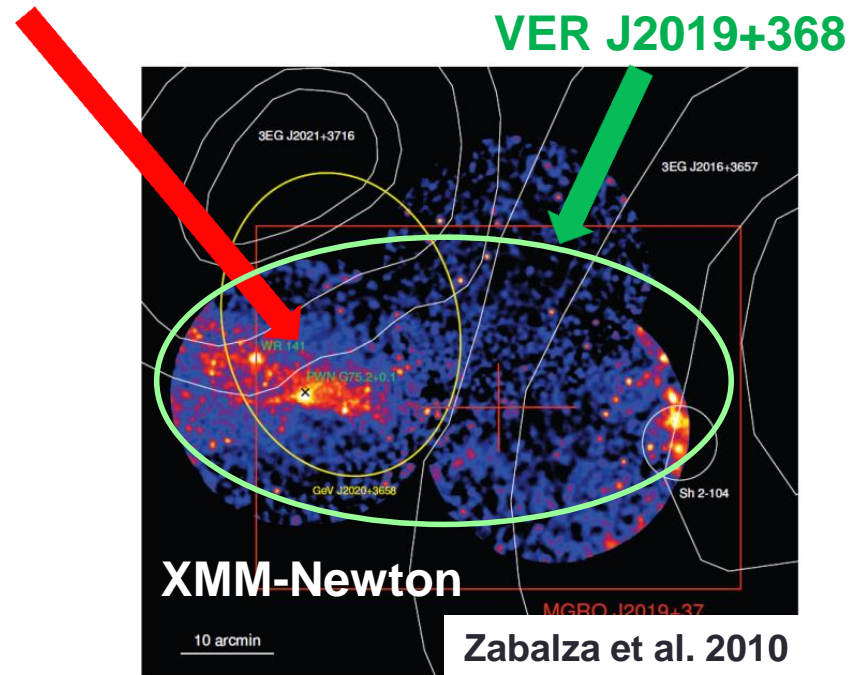
introduction

VER J2019+368の過去の観測 (その他の波長)

- Chandra / XMM (X線)による観測から、VER J2019+368の放射領域内に **パルサー PSR J2021+3651** と **そのまわりに東西10分角程度に広がるパルサー星雲** を発見。
 - ・ パルサー PSR J2021+3651 特性年齢 : 17.2 kyr (電波による観測から)
- VER J2019+368のX線対応天体として、**PSR J2021+3651とその周りに広がるパルサー星雲**が最も有力。
- ただし、X線帯域の定量的議論が不十分という問題点があった。



Hessels et al. 2004 RA



Zabalza et al. 2010

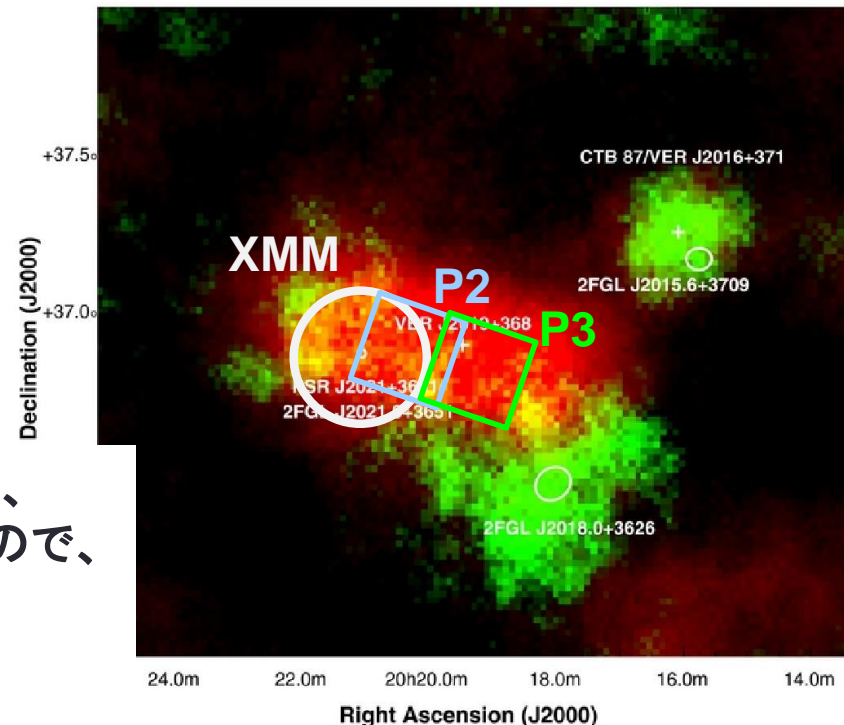
introduction

本研究の目的

広い視野で優れた空間分解能を持つXMM-Newtonと、広がった放射に対して感度の高いSuzakuを用いることで、TeVガンマ線源VER J2019+368の放射機構について議論し、パルサー星雲での宇宙線(電子)のエネルギー分布や磁場を推定すること。

○ 今回用いた観測データ

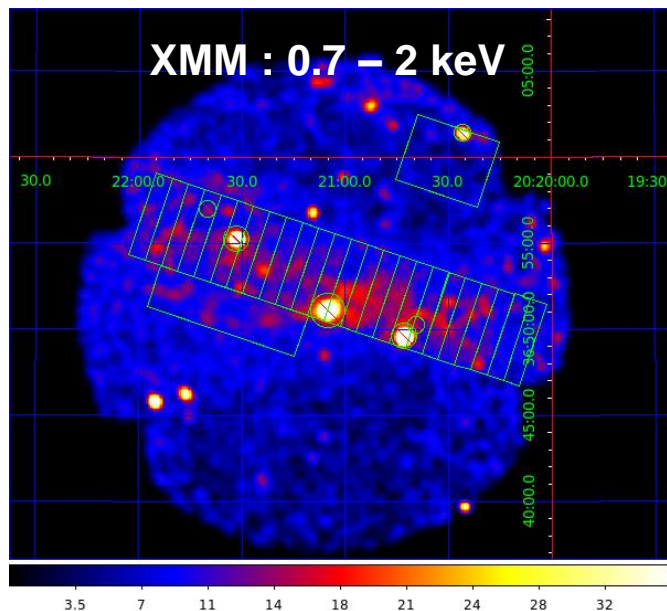
観測領域	RA [deg]	DEC [deg]	Net exp. [ks]
P2 (Suzaku)	305.06	36.87	35.0
P3 (Suzaku)	304.79	36.83	35.7
XMM	305.27	36.85	83.4



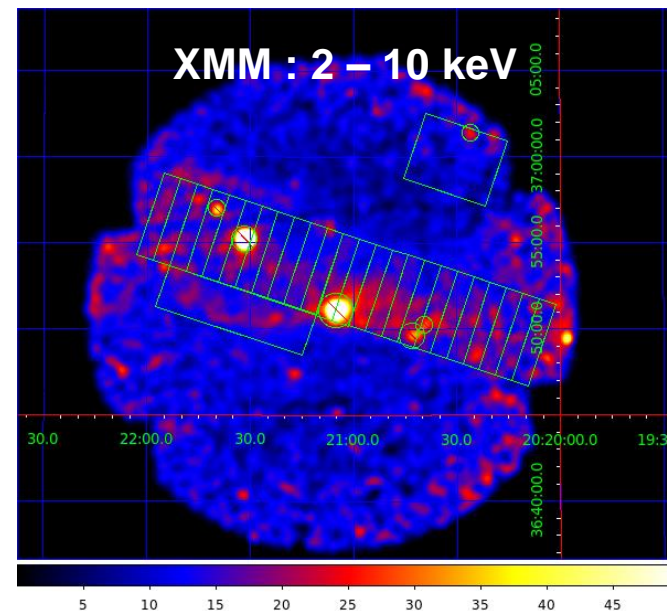
- 以前(2016年秋季年会)はXMMの解析において、BGの見積もりが不十分などの問題点があったので、広がった天体をより精度よく解析できるESASを用いて解析のupgradeを行った。

XMMの解析

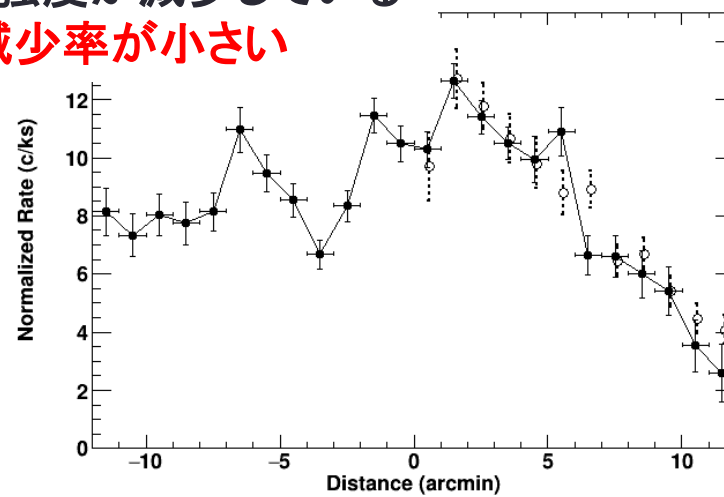
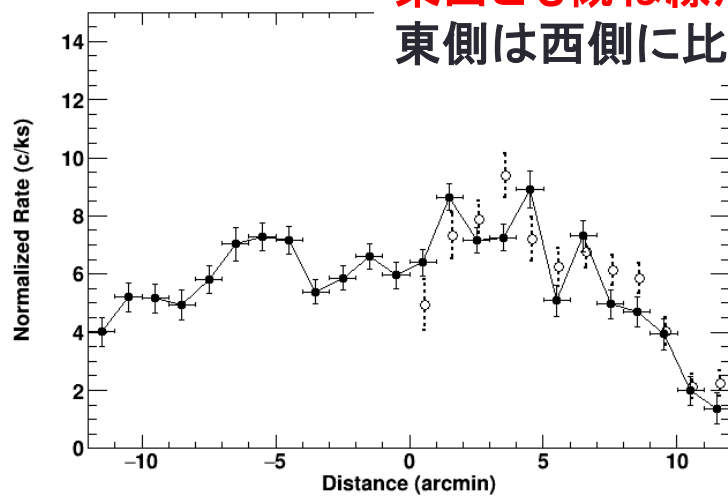
強度マップと輝度分布



NXB除去、vignetting補正済



東西とも概ね線形に強度が減少している
東側は西側に比べ減少率が小さい



XMMの解析

スペクトル解析

- ・ 領域 : PWN (5' × 12'), Arc (2.5' × 9'), BG (4' × 5')
- ・ 得られた輝度分布を仮定したARFを使用
- ・ CXBなどのBG成分をモデル化
- ・ 各々の領域とBG領域のスペクトルを同時フィット

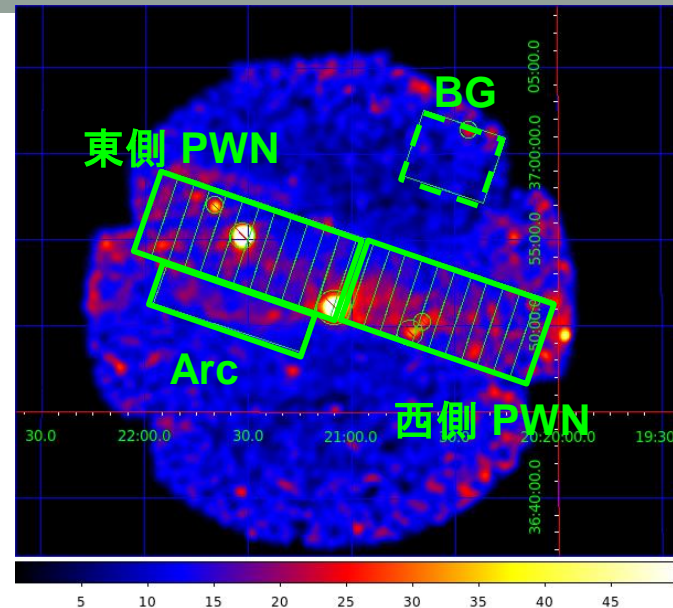
東西とも $wabs \times powerlaw$ でフィットでき、似たスペクトルをしていることが分かった。

⇒ 東西とも同じエネルギー分布をした電子によるシンクロトン放射

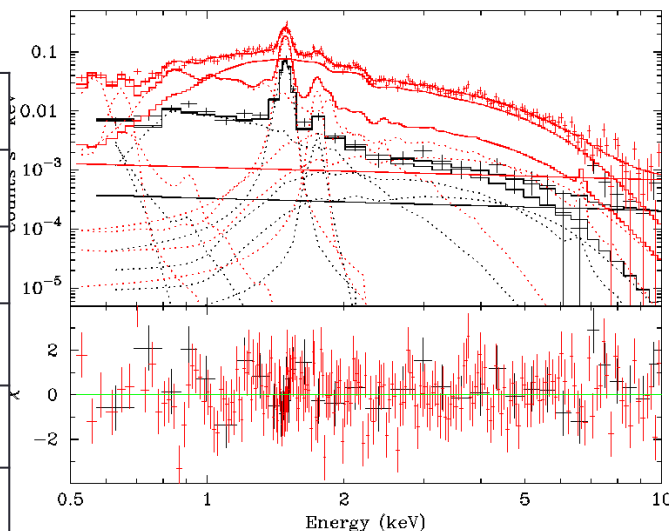
領域ごとのベキ指数の有意な変化も見られなかった。

a : ($\times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$) b : ($\times 10^{-13} \text{ erg/s/cm}^2$)

	東側	西側	Arc
$N(H)^a$	7.5 ± 0.9	8.1 ± 1.0	9.3 ± 1.5
Γ	2.03 ± 0.10	2.10 ± 0.12	2.13 ± 0.18
$Flux_{0.5-2 \text{ keV}}^b$	$5.01^{+0.25}_{-0.26}$	$4.77^{+0.22}_{-0.30}$	$1.66^{+0.12}_{-0.13}$
$Flux_{2-10 \text{ keV}}^b$	$20.4^{+1.1}_{-1.3}$	$19.3^{+0.9}_{-1.5}$	$7.31^{+0.67}_{-0.79}$
χ^2/dof	304.4/244	271.8/225	138.8/116



西側パルサー星雲のスペクトル



多波長スペクトルに基づく磁場の推定

○仮定

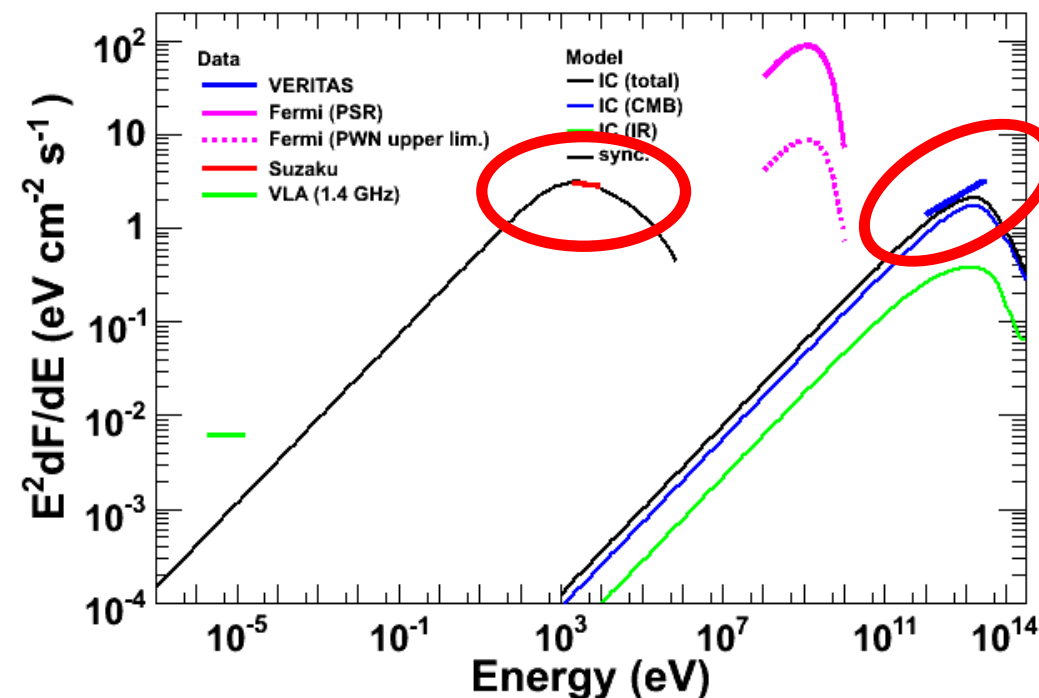
- ・ パルサーからの一様な注入
- ・ パルサーの特性年齢 (17.2 kyr)
- ・ 一様な磁場 (3uG)

○計算

- ・ ブレイクエネルギー $E_{bk} = 80 \text{ TeV}$
- ・ シンクロトン放射
- ・ 逆コンプトン散乱

TeVガンマ線放射の80%

⇒ X線パルサー星雲はTeVガンマ線源の主なX線対応天体



○上記の仮定の下で

- ・ 磁場を 3 uGより大きくする
⇒ 電子のBreak エネルギー小
⇒ TeVガンマ線がsingle PLであることに矛盾
- ・ 磁場を 2.5 uGより小さくする
⇒ モデルが観測を超えてしまう(TeV)
⇒ 磁場は3 uG程度となる

他の天体との比較

HESS J1825-137 / PSR J1826-1334 と比較

TeVガンマ線源	P, dP/dt, Bs (G)	特性年齢, スピンドウン光度	Flux (2-10 keV), Γ_x	Flux (1-10 TeV), Γ_γ
VER J2019+368	104 ms, 9.6e-14, 3.2e12	17.2 kyr, 3.4e36 erg/s	~ 6e-12 erg/s/cm ² , ~ 2.05	7e-12 erg/s/cm ² , ~ 1.75
HESS J1825-137	101 ms, 7.5e-14, 2.8e12	21.4 kyr, 2.8e36 erg/s	~ 4.5e-12 erg/s/cm ² , ~ 2	~ 51e-12 erg/s/cm ² , ~ 2.4

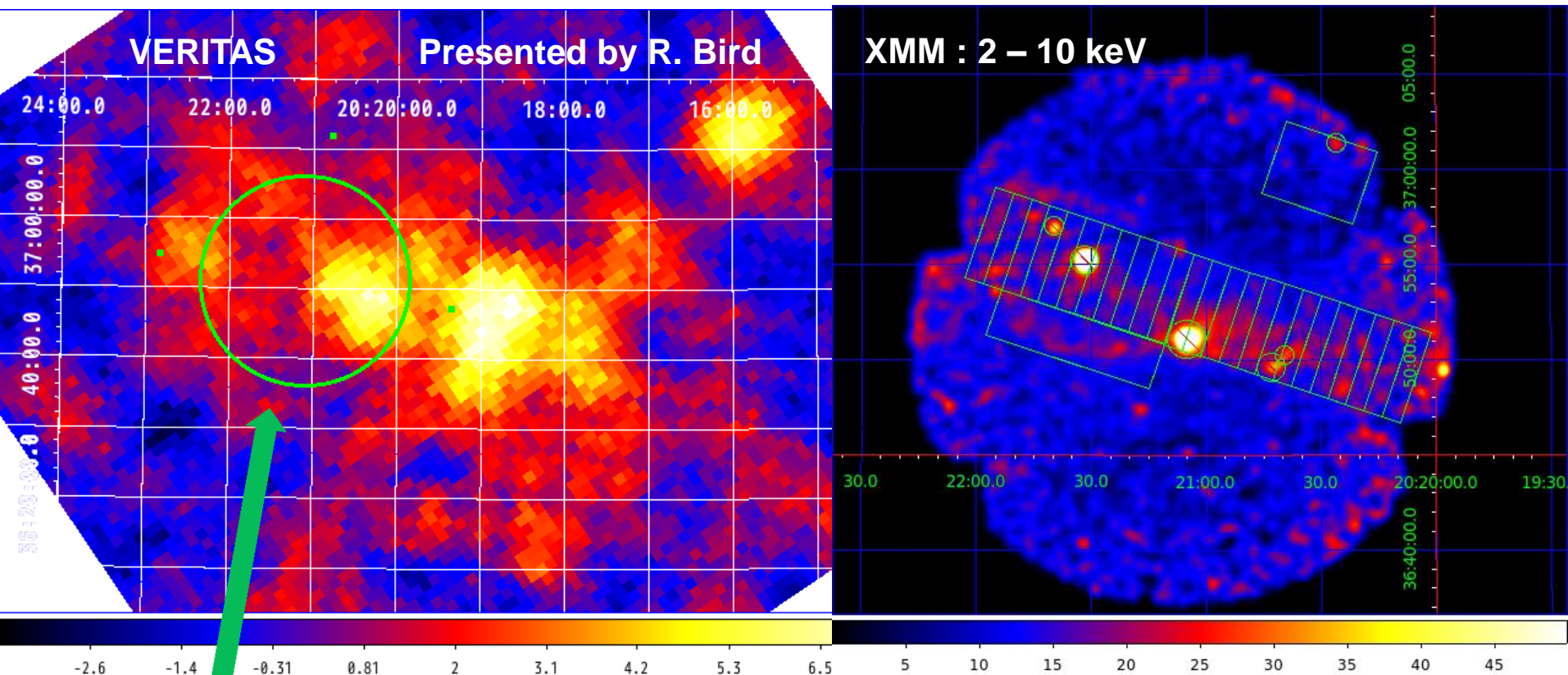
今回のVER J2019+368は、

- ・ガンマ線のスペクトルがハードなベキをしていること
- ・X線とガンマ線のフラックス比が '1' に近いこと

⇒ 磁場が弱い / パルサーの実年齢が若いことが示唆される。

VERITASによる最新の報告

2017年 ICRCにおいて発表されたVERITAS観測の最新の結果



最新の観測結果では、
VER J2019+368の中には、**2つの hot spot がある**ことが分かった。

まとめと今後

- VER J2019+368は”はくちょう座X”方向に見つかった大きく広がったTeVガンマ線源である。
- SuzakuとXMMの観測データを解析したところ、パルサー星雲は東西で似た輝度分布・スペクトルをしていて、ベキ指数の有意な変化も見られなかった。
⇒ 東西とも同じエネルギー分布をした電子によるシンクロトロン放射
- 一様な磁場(3 uG)に、パルサーの特性年齢(17.2 kyr)の間、パルサーからの一様な注入があると仮定すると、
 - ・ パルサー星雲がTeVガンマ線放射の約80%を説明できる。
⇒ X線パルサー星雲はTeVガンマ線源の主なX線対応天体と考えられる。
 - ・ 磁場は 3 uG 程度となる。
- HESS J1825-137と比較すると、VER J2019+368は 磁場が弱い / パルサーの年齢が若い ことが示唆される。
- 2017年のICRCでVERITASの最新の観測結果が報告され、2つのhot spotがあることが分かった。
- 今後は、VERITASの最新の観測結果と合わせた議論が必要となる。

参考文献

○Abdo+12, ApJ 753, 159

○Aliu+14, ApJ 788, 78

○www.snipview.com

○www.jaxa.jp

○Mitsuda et al. 2007

○Hessels +04, ApJ 612, 389

○Zabalza +10, J. of Mod. Phys. D.19, 811

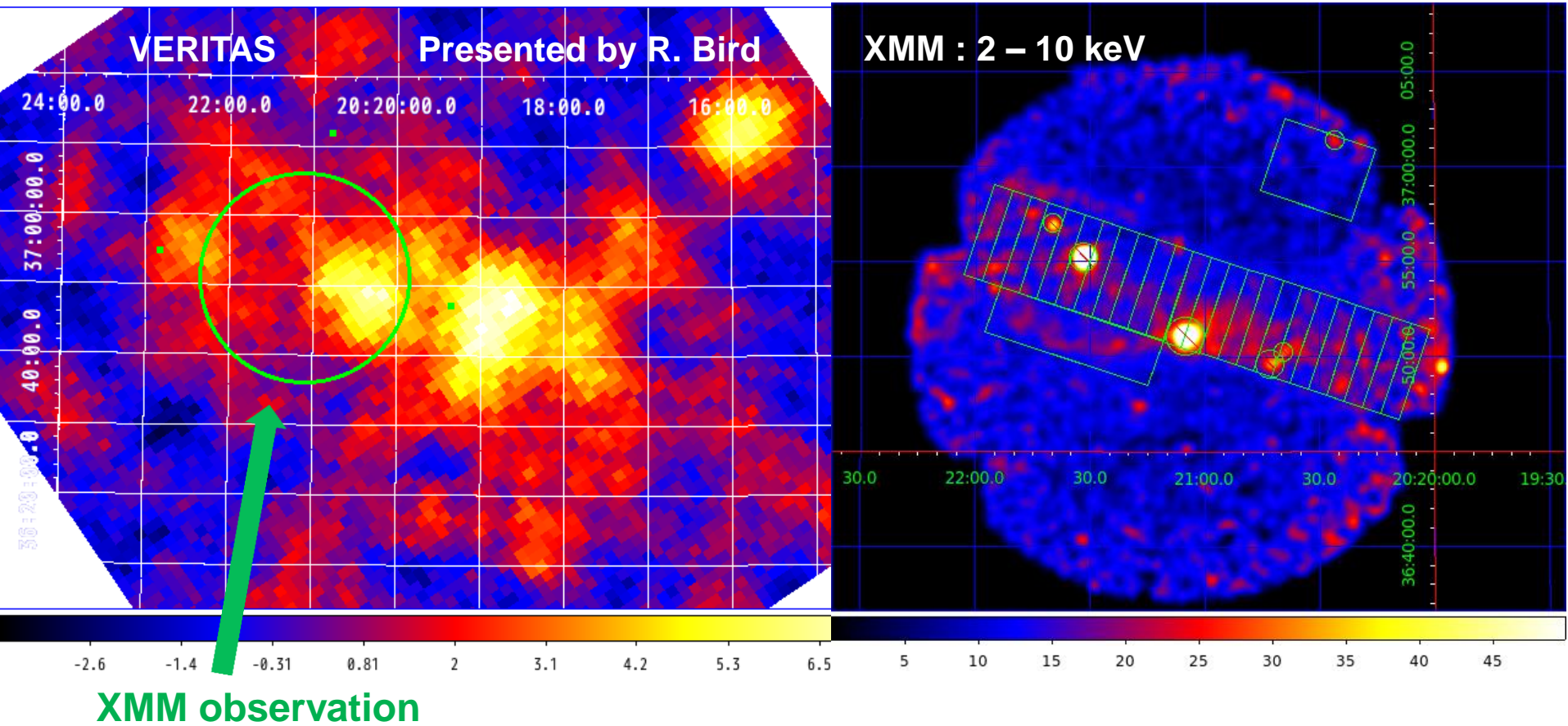
○Ong et al. 2013, Proc. 33rd ICRC Conf.(arXiv:1307.5003)

○2016年春の物理学会 T. Mizuno et al.

「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 (2)

Recent report of VERITAS observation

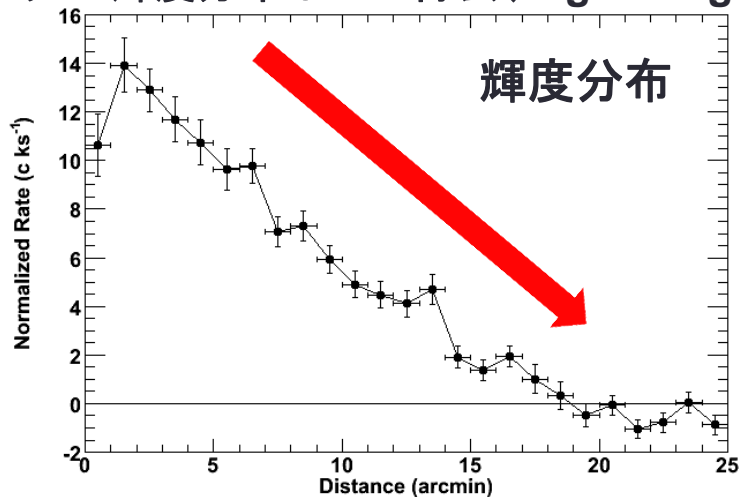
In 2017,
the recent results of VERITAS observation were reported at ICRC.



In this report, we can find that there are two hot spots in VER J 2019+368.

Suzakuの解析

強度マップ・輝度分布はNXB除去、vignetting補正済



概ね線形に強度が減少している。

西側パルサー星雲の広がり : $15' \times 10'$

○ このパルサー星雲のX線放射 (0-15') を wabs × powerlaw でスペクトルフィットした。

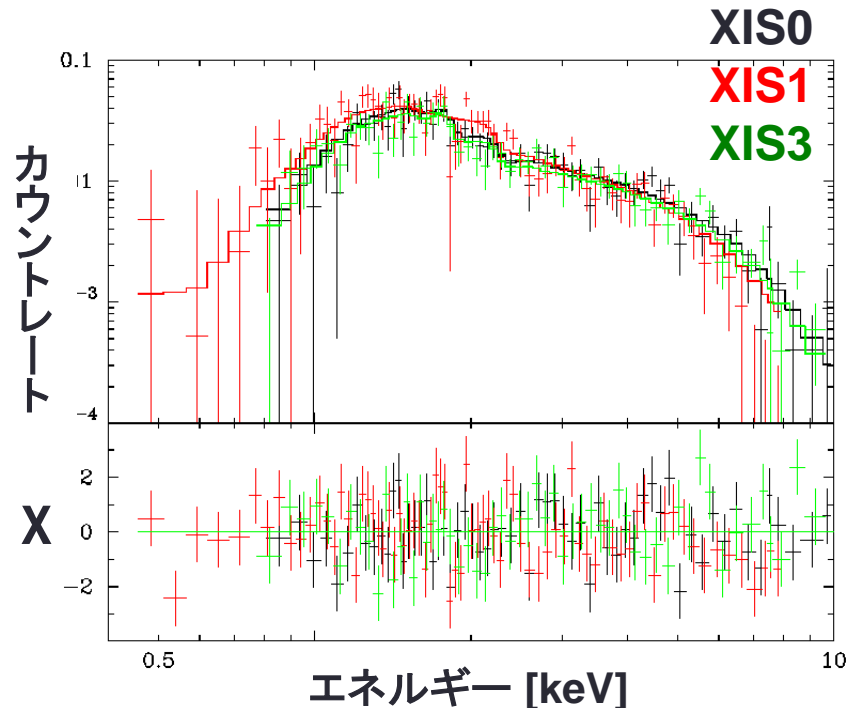
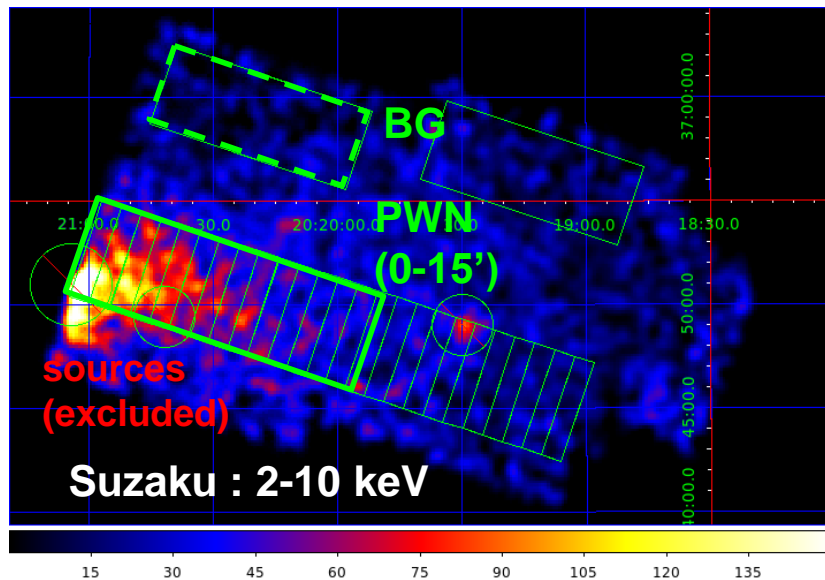
$$N(H) = 8.2 (\pm 1.2) \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$$

$$\Gamma = 2.05 (\pm 0.12)$$

$$\text{Flux}(0.5-2 \text{ keV}) = 6.04 \times 10^{-13} \text{ erg/s/cm}^2$$

$$\text{Flux}(2-10 \text{ keV}) = 26.1 \times 10^{-13} \text{ erg/s/cm}^2$$

$$\text{chi}^2/\text{dof} = 211/188$$



XMMの解析

○ 今回は、BGの差し引きなどが正しくないという問題点があったので、ESASを用いて解析のupgradeを行った。

解析手法

○ 強度マップ

- ・ カウントマップではなく、NXBを差し引き、vignetting補正をした強度マップを作成した。その際、3 keV以上のentireFOVのスペクトルからSoft Protonの寄与を評価して差し引いた。

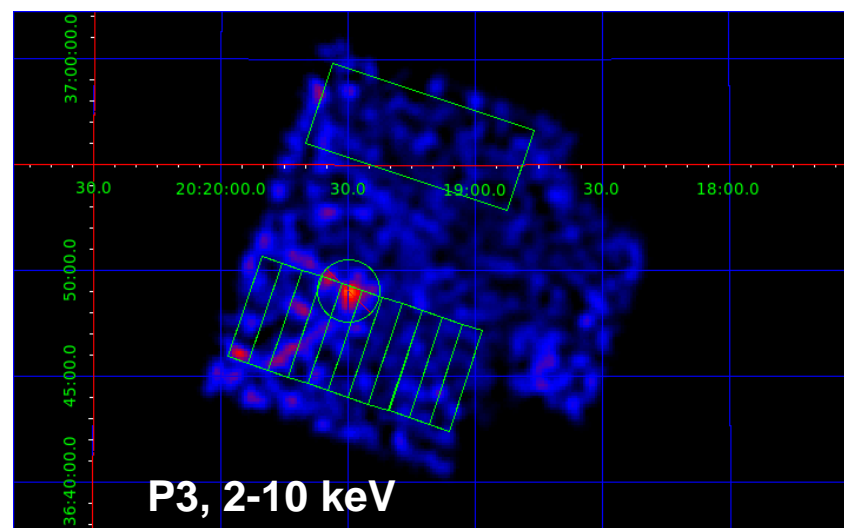
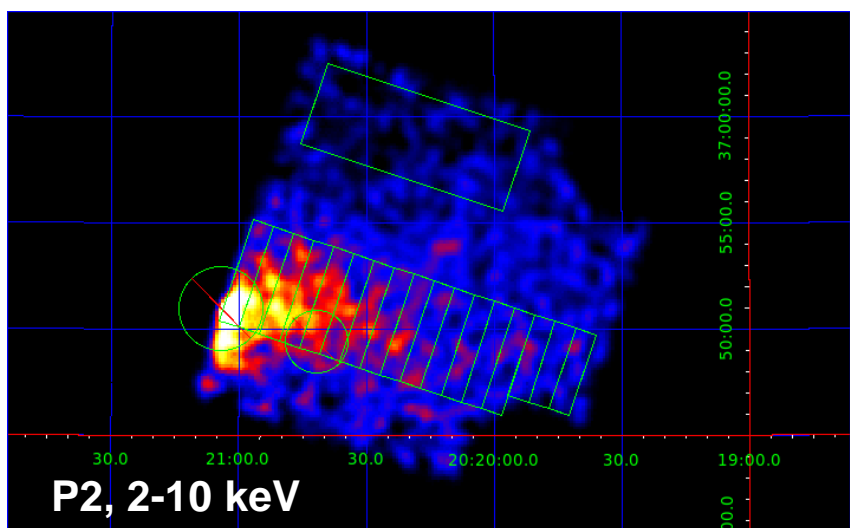
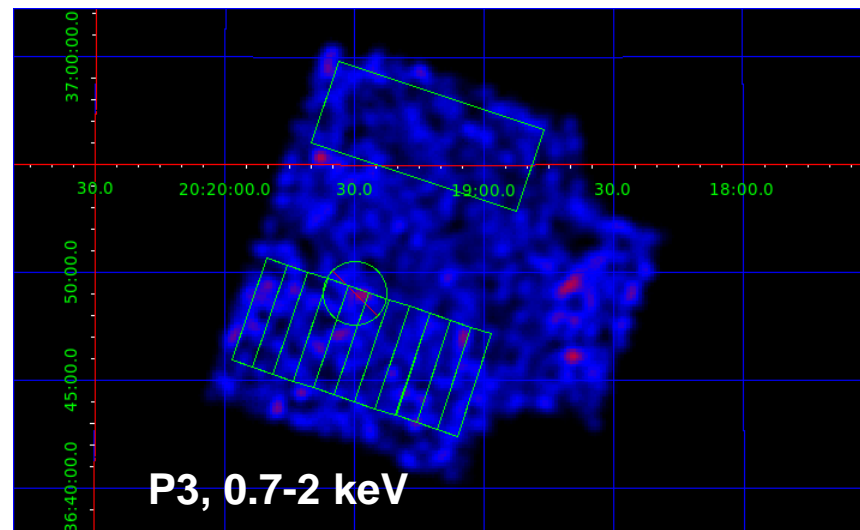
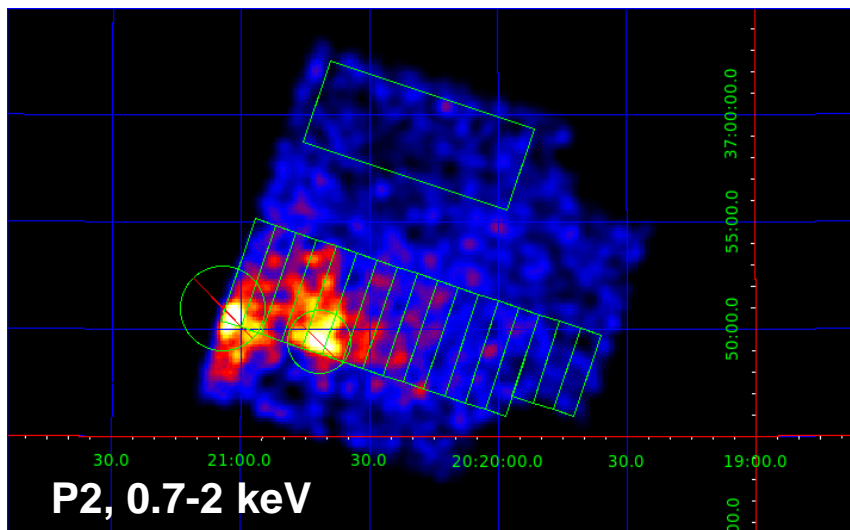
○ 輝度分布(カウントレートプロファイル)

- ・ パルサーの位置から5' × 1'の短冊状領域ごとのカウントレートを調べた。その際、Soft Proton成分とX線BG成分を別々のスケールファクターでスケールさせて差し引いた。

○ スペクトル解析

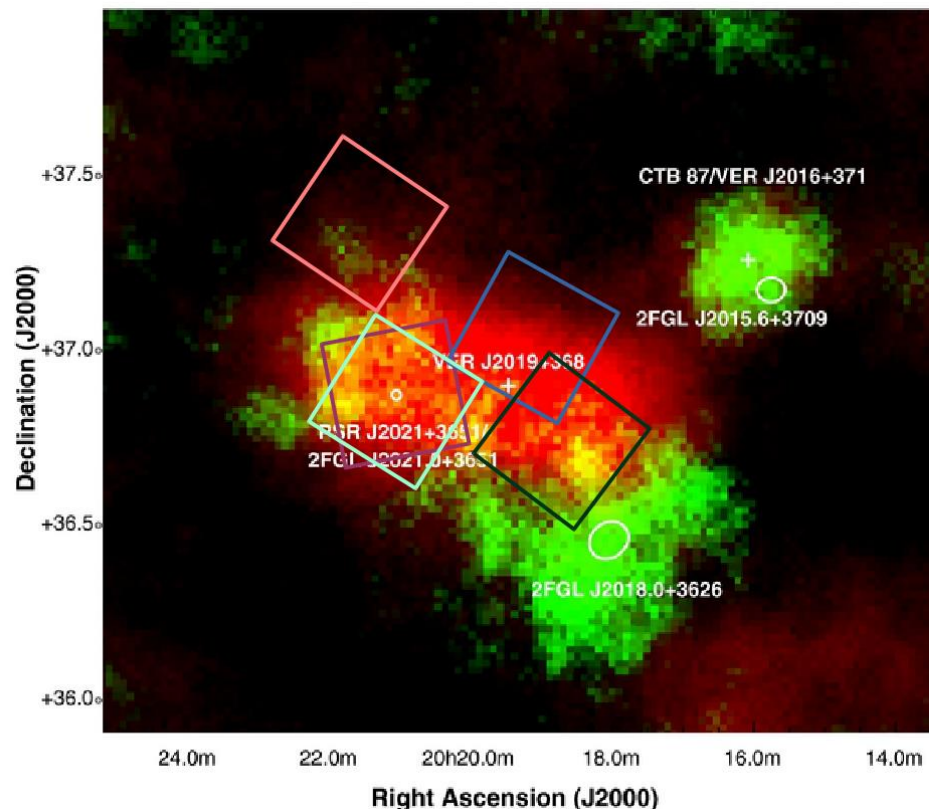
- ・ QPBのモデルスペクトルを作成し、それをXSPEC上で差し引いた。
- ・ フィットモデルにSoft ProtonやCXB、GRXEなどの成分を入れてBG(PWN以外)成分もモデル化した。
- ・ BG領域との同時フィットを行った。

Suzakuによる観測 (イメージ)



XMMによる観測

イメージ



今回用いるXMM-Newtonの観測データ

観測領域	観測回数	観測時間 [ks]
PSR J2021+3651	1	127
WR142	2	61 , 20
MGRO J2019+37	1	48
IGR J20188+3647	1	16
G75.2+0.1	2	34 , 30

定性的議論

TeVガンマ線とX線のフラックス比

X線をシンクロトン放射と仮定
 ガンマ線を逆コンプトン散乱と仮定

X線とガンマ線のフラックス比

$$\frac{F_\gamma(1 - 10 \text{ TeV})}{F_X(2 - 10 \text{ keV})} = \frac{U_{\text{rad}}}{U_{\text{mag}}} = \frac{6.7 \times 10^{-12}}{6.0 \times 10^{-12}} \sim 1.1$$

ガンマ線とX線のフラックス比が**同程度** $\Rightarrow U_{\text{mag}}$ と U_{rad} の比が**同程度**

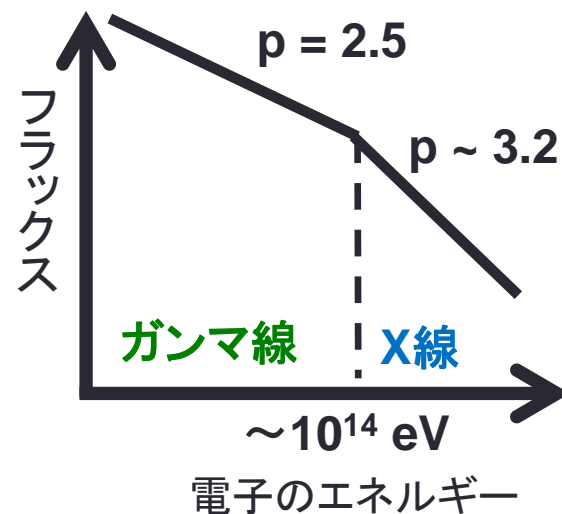
これは、 $U_{\text{mag}}(B = 3\mu\text{G}) = 0.22 \text{ eV/cm}^3$

$U_{\text{rad}}(\text{CMB}) = 0.25 \text{ eV/cm}^3$ と考えても矛盾しない

電子のエネルギー分布

- ① 一様な注入と特性年齢、一様な磁場を仮定したときの
 ブレイクエネルギー $E_b \sim 80 \text{ TeV}$
 - ② 1-10 keV のX線と、1-10 TeVのガンマ線を作り出す
 電子のエネルギーの境界 $E_b \sim 100 \text{ TeV}$
- ①と②で似た値が得られている。

100 TeV前後で電子のエネルギー分布に折れ曲がりがあることを示唆



目次

▪ <u>Introduction</u>	<u>3P</u>
VER J2019+368の過去の観測 研究目的と観測データの諸元	
▪ <u>Suzaku / XMMの解析</u>	<u>3P</u>
Suzakuの解析 (イメージ / スペクトル) XMMの解析 (イメージ / スペクトル)	
▪ <u>議論</u>	<u>3P</u>
他波長スペクトル 他のTeVガンマ線源との比較 VERITASの最新の観測結果	
▪ <u>まとめと今後</u>	<u>1P</u>
	<u>計 10P</u>