

論文内容の要旨

An X-Ray Study of the Pulsar Wind Nebulae

Discovered in the Very High Energy Gamma-Ray Band

(超高エネルギーガンマ線で発見されたパルサー星雲の
X線による研究)

穴田 貴康

はじめに

宇宙線は宇宙空間を飛び交う高エネルギー放射線である。1912年にHessが気球実験により宇宙線を発見して以来、その加速機構、加速現場については未だ議論が続いている。銀河系内の加速現場としては超新星残骸において形成される強い衝撃波が有力な候補であると考えられ、knee ($\sim 10^{15.5}\text{eV}$) 以下のエネルギーの宇宙線が説明できるのではないかと考えられているが、まだ明確にはなっていない。宇宙線の加速源の探索には超高エネルギー(VHE)ガンマ線 ($> 100\text{ GeV}$) の観測が有効である。相対論的な速度にまで加速された陽子は周辺の原子核と衝突して中性パイ中間子を作り、その崩壊時にVHEガンマ線を放射する。一方相対論的電子は宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱し、VHEガンマ線を生成する。このような背景があり、VHEガンマ線の観測は近年急激に進んだ。

2004年以降、ナミビアにあるH.E.S.S.チェレンコフ望遠鏡によりVHEガンマ線帯域の銀河面探査が継続して行われている(図1: Aharonian et al. 2005, *Science*, 307, 1938; Aharonian et al. 2006, *ApJ*, 636 777)。その結果、銀河面近傍に沿って多数のガンマ線天体が発見された。その数は現在までにおよそ40個に上る。驚くことに、それらのうち大部分は他波長での対応天体が存在せず、精力的な探査が継続して行われている。そのうち16天体については放射源の近くにパルサーまたはパルサー星雲が見つかっているため、粒子加速現場としてパルサー星雲が近年世界の注目を集めている。VHEガンマ線帯の放射が高エネルギー電子によるマイクロ波背景放射の逆コンプトン散乱だとすると、加速された電子からはシンクロトロン放射によって電波から硬X線の電磁波が放射される。X線では銀河系全体が見渡せるため、VHEガンマ線未同定天体としてのパルサー星雲の観測にはX線が非常に有効である。パルサー星

雲での粒子加速機構を明らかにするには系統的な解析が必要であるが、現状は個々の天体の解析にとどまっている。そこで我々は、そのガンマ線放射がパルサー星雲起源ではないかと思われる未同定天体について、その対応候補天体を X 線観測データを用いて系統的に調べることによりパルサー星雲の総合的な性質を明らかにした。このような研究は世界で初めてである。

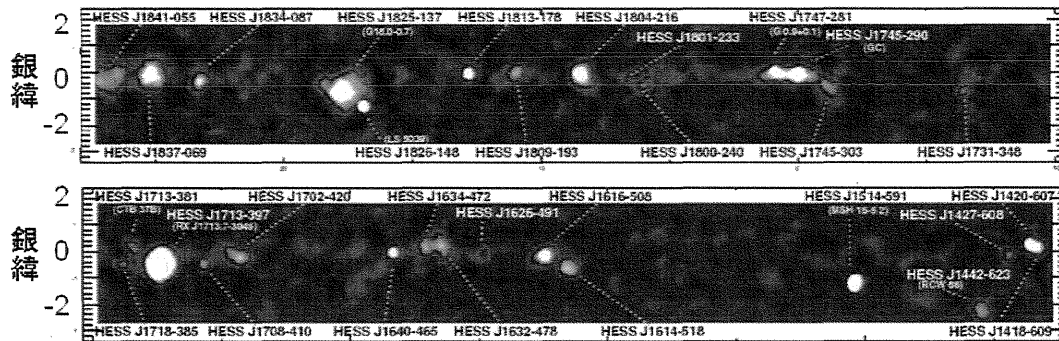


図 1: H.E.S.S.望遠鏡による銀河面探査で得られた TeV ガンマ線帯 (1 – 10 TeV) のイメージ。上段は銀経 $-10^{\circ} - 30^{\circ}$ 、下段は銀経 $310^{\circ} - 350^{\circ}$ 。

超高エネルギーガンマ線で発見されたパルサー星雲の X 線観測による系統的な解析

我々は H.E.S.S.望遠鏡による銀河面探査で見つかった VHE ガンマ線天体のうち、対応天体がパルサー星雲と考えられている 16 天体に着目した。VHE ガンマ線源とパルサー星雲の関係を調べるには、個々のパルサー星雲の性質も詳細に調べる必要がある。そこで、そのうち 2 天体 (HESS J1837-069, HESS J1809-193) については「すざく」で新たに観測を行い、詳細な解析を行った。他の 14 天体についてはチャンドラやニュートン等のアーカイブデータを解析した。また、比較として VHE ガンマ線が有意に検出されていないパルサー星雲を 10 天体解析した。

解析の一例として、我々が「すざく」で新たに観測した HESS J1837-069 の X 線イメージを図 2 に示す。TeV 放射領域内に明るい X 線源 (AX J1838.0-0655) があることがわかる。この天体は数年に渡り X 線の光度やスペクトルの形に変化がなく、さらにパルサーの証明である X 線パルスが検出された。この天体がパルサー星雲であることを初めて明確に示した (Anada et al. 2008, arXiv:0810.3745)。

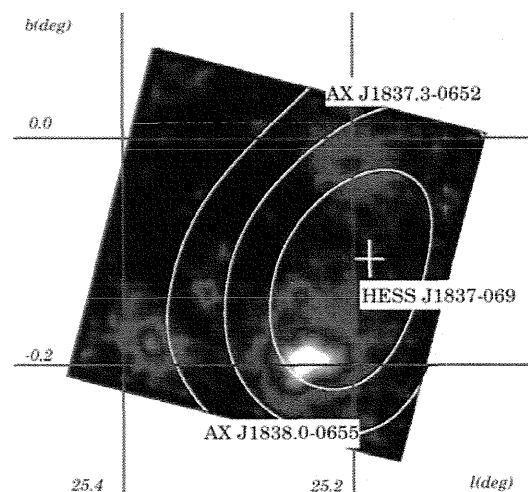


図 2: 「すざく」による HESS J1837-069 周辺の X 線イメージ (0.4-10 keV)。黄色の等高線は H.E.S.S.望遠鏡による excess map、十字は HESS 天体の重心を表している。

次に、VHE ガンマ線で発見されたパルサー星雲の特徴を調べるため、パルサー星雲を特徴づける物理量 (パルサーの spin-down luminosity、X 線スペクトルのベキ) を H.E.S.S.望遠鏡で検出されていないパルサー星雲のそれと比較した。その結果、両者の間には統計的に有意な差が見られなかった。また、パルサーの年齢と X 線の光度の相関にも違いがないことが分かった。更に、VHE ガンマ線放射の重心とパルサー位置のオフセットからパルサーの kick velocity を見積もったところ、電波観測から決定された

平均の kick velocity と大差ないことがわかった。これらの観測事実から、H.E.S.S.望遠鏡で検出されたパルサー星雲は、検出されていないパルサー星雲と物理学的な特徴に違いのない普通のパルサー星雲であることが分かった。

我々は非熱的 X 線放射の空間的な広がりを系統的に求めるため、パルサー周辺の 2 keV 以上のイメージを作り、パルサーを含む領域の表面輝度の断面図を描いた。パルサー星雲からの放射はパルサー本体と薄く広がったパルサー星雲の 2 成分ある。「すざく」のイメージは明るいパルサーからの X 線が望遠鏡の角度応答により半径 1 分角程度に広がってしまう。パルサー本体からの X 線の影響を除くため、パルサーから半径 1 分角の X 線は無視した。「すざく」と手法を揃えるため、空間分解能に優れたチャンドラ、ニュートンに関しても同じ幅の領域を無視した。裾の薄く広がった成分をガウシアンでフィッティングし、その幅の 3σ をパルサー星雲の広がりとして定義した。

求めた X 線の広がりを HESS チームの論文から引用した VHE ガンマ線の広がりと比較した。VHE ガンマ線の広がりとの系統誤差はまだきちんと評価されていないものの、X 線の広がりよりも VHE ガンマ線の広がりの方が大きいという傾向が見られた (図 3)。また、パルサーの年齢に対する放射領域の広がりをプロットすると、非熱的 X 線の放射領域も VHE ガンマ線の放射領域も、パルサーの年齢とともに 100 kyr 近くまで広がっていくことが判明した (図 4)。パルサー星雲の X 線放射域のサイズがパルサーの年齢に

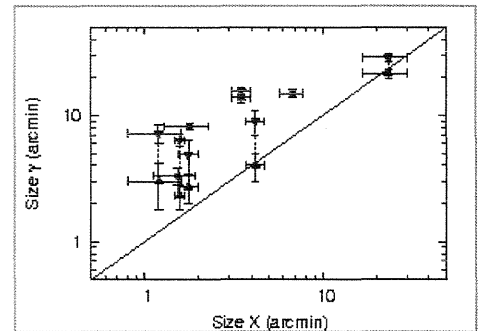


図 3 : X 線放射領域 (2–10 keV) の典型的な大きさと VHE ガンマ線 (1–10 TeV) のその相関図。常に後者の方が大きくなっている。

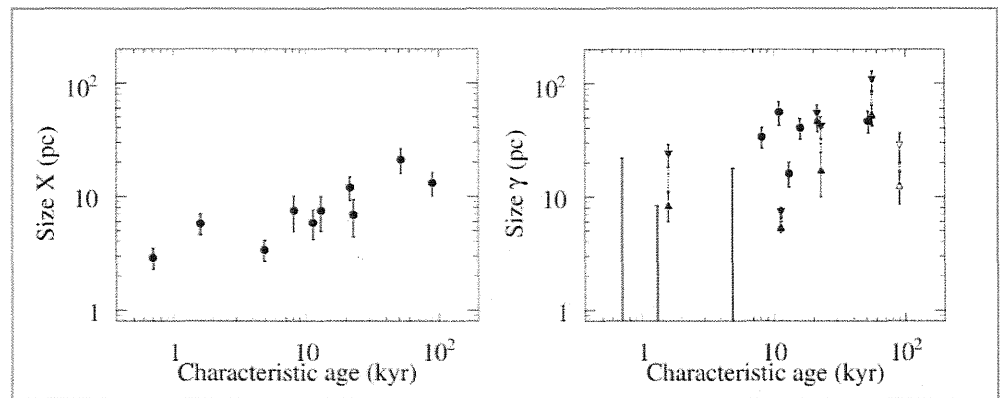


図 4 : パルサーの年齢に対する X 線放射領域の広がり (左) と VHE ガンマ線放射領域の広がり (右) の相関図。

このように依存していることを明らかにしたのは本研究が初めてである。

パルサー星雲の非熱的放射の広がりの解釈

パルサーからは電子、陽電子対から成る相対論的速度のパルサー風が噴き出している。パルサー風による圧力が外圧と釣り合う場所に衝撃波が生じる。その衝撃波面を **termination shock** と呼ぶ。VHE ガンマ線や X 線を放射する高エネルギー粒子はその衝撃波面で加速されると考えられている。加速された粒子は、徐々に加速域から離れていくが、そのプロセスには 2 通りある。乱流磁場による拡散と移流による流れである。広がりスケールを Δ とすると、前者は $\Delta \sim (Kt)^{1/2}$ 、後者は $\Delta \sim V_{adv}t$ で表わせる。ここで K は拡散係数、 V_{adv} は移流速度、 t は加速後の経過時間である。

電子がシンクロトロン放射によりエネルギーを失うタイムスケールは $\tau_{loss} = 124 (E_e / 1 \text{ TeV})^{-1} (B / 10 \mu\text{G})^{-2}$

kyrである。ここで、 E_e は電子のエネルギー、 B は磁場である。宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱し、1 TeVのVHEガンマ線を生成するのに必要な電子の平均エネルギーは約 20 TeV、一方シンクロトロン放射により 2 keVのX線を放射するのに必要な電子の平均エネルギーは $100 \times (B/10 \mu\text{G})^{1/2}$ TeVである。従ってガンマ線を放出している電子よりもX線を放出している電子の方がエネルギーが高く、寿命 τ_{loss} が前者は数十 kyrのオーダーであるのに対し、後者は数kyrでエネルギーを失ってしまう。本研究で対象としたパルサーの年齢は 10 kyrを超えたものが多い。すなわちガンマ線はパルサーが若い頃に加速された電子による放射を、X線は比較的最近加速された電子による放射を見ていることになる。これは、パルサー星雲のX線の光度はパルサーが年をとるにつれ減衰していく一方で、TeVガンマ線の光度はパルサーの年齢に依らずほぼ一定であるという観測事実とも consistentである (Mattana et al. 2008, arXiv:0811.0327)。

このことから、X線を放射するような高エネルギーの電子はシンクロトロン放射により急速にエネルギーを失い、長い時間をかけて広がれないため、空間的な広がりが抑えられていると考えられる。これにより VHE ガンマ線のサイズよりも X線のサイズの方が小さいことが説明できる。ところが X線放射領域は電子の寿命である数 kyr よりはるかに長い時間 (~100 kyr) 広がり続けており、このシナリオに矛盾する。

時間とともにX線放射域が広がり続けるということは、拡散もしくは移流の度合いが時間とともに変わるということ、つまり **termination shock**の性質が変わることを意味する。これを反映させるため、拡散係数 K と移流速度 V_{adv} に時間変化を仮定した。拡散係数は $K = \xi r_g c / 3$ と書ける。ここで ξ は磁場の乱流度の逆数 $(B/\delta B)^2$ 、 r_g は粒子のジャイロ半径である。一方移流速度は $V_{\text{adv}} \rightarrow (\sigma/1 + \sigma)c$ ($r \rightarrow \infty$)と書ける (Kennel & Coroniti, 1984, ApJ, 283, 694)。ここで σ は粒子の巨視的な運動エネルギーの流れに対する磁気流体のエネルギーフラックスの比を表わす。この ξ と σ は、年齢の若いCrabではそれぞれの値が 1、0.003 と求められている。この値を初期値として ξ と σ の時間発展を調べた。その結果、観測データを説明するには、 ξ もしくは σ (あるいは両方) が時間とともに大きくなり、~100 kyrでは各々~200、~0.03 になっていないといけないことが明らかになった。パルサーの年齢とともに ξ もしくは σ が増大することは、以下のように解釈できる。パルサーの年齢とともにパルサー風の勢いが弱まり、乱流度が小さくなる、すなわち ξ は大きくなる。一方パルサー風の勢いが弱まると粒子の巨視的な運動エネルギーは小さくなり、 σ が大きくなると考えられる。この結果を図示すると図5のようになる。このようなパルサー星雲の進化を観測的に示した研究は世界でも類を見ない、全く新しいものである。

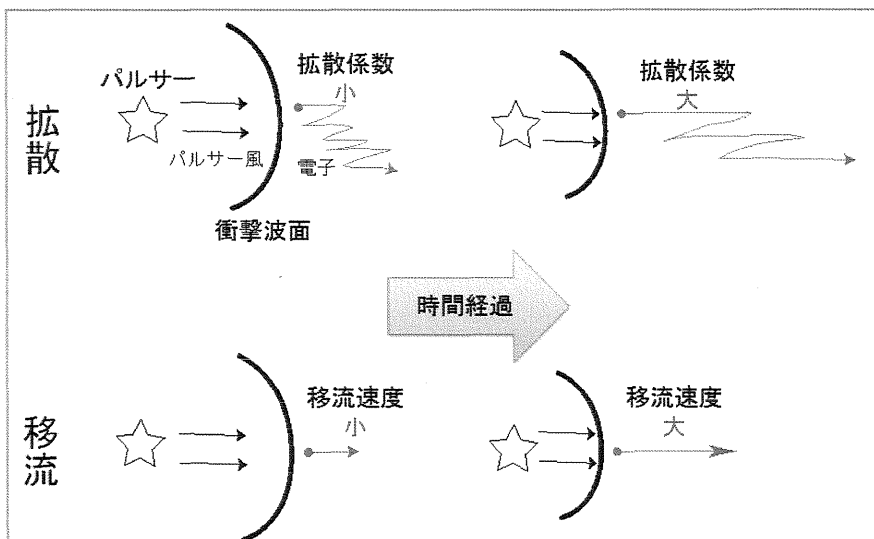


図5:パルサー星雲の進化のシナリオ。上図はパルサーの年齢とともに拡散係数が大きくなっていくことを示し、下図は移流速度が大きくなっていくことを示している。両者のどちらか、あるいは両方がパルサー星雲で起きていると考えられる。