

# IXPE衛星でみた パルサー星雲



渡邊

水野

郡司

渡邊 瑛里<sup>1</sup>・水野 恒史<sup>2</sup>・郡司 修一<sup>1</sup>

〈<sup>1</sup>山形大学理学部 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12〉

〈<sup>2</sup>広島大学宇宙科学センター 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: <sup>1</sup> eri\_watanabe@sci.kj.yamagata-u.ac.jp, <sup>2</sup> mizuno@astro.hiroshima-u.ac.jp, <sup>1</sup> gunji@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

世界で初めてのX線偏光撮像衛星 Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) が2021年12月9日に打ち上げられた。これにより、電波や可視光では当たり前だった偏光観測がX線でも可能となり、パルサー星雲の中心付近における磁場構造を可視化できるようになってきた。IXPE衛星ではこれまでに、全部で5つのパルサー星雲を観測し、従来の理論的な予想を後押しする結果を得る一方で、予想を超える驚くべき結果も得ている。そして一見するとそれぞれの結果は大変個性的だ。本稿では、その中でも「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」の結果を中心にIXPE衛星の観測結果について報告する。

## パルサー星雲をX線偏光観測する意義

パルサーは強い磁場をもつ中性子星が高速回転している天体で、太陽よりも8倍以上重い星が重力崩壊型超新星爆発を起こした時に誕生する。そして、その周辺部に存在するのがパルサー星雲である。パルサー星雲は、パルサー風（電子や陽電子などによってできているパルサーから吹いてくる風）からエネルギーをもらって輝いており、現在私たちの銀河系内に数十個見つかっている。本記事では、その中でもIXPE衛星が観測した「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」という2つのパルサー星雲に注目する。

パルサー星雲は電波からガンマ線に至るまで様々なエネルギーの電磁波を放射している天体である（図1）。図を見るとわかるように、X線は、電波や可視光と比べ、パルサー星雲のより中心付

近の領域から放射されている。非常に空間分解能が高いX線天文衛星Chandraが取得した「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」を図2に示す。それぞれ特徴的な円弧構造とジェット構造を持っていることがわかる。青白く光っている部分は、荷電粒子が星雲内の磁場に絡みつくことで起こるシンクロトロン放射（図3）によってX線が生み出されている部分である。このように磁場はパルサー星雲の主要素でありながら、地磁気を思い起こすとわかるように「見る」ことができない。そのため磁場がどのような形状で星雲内に存在しているかは解き明かすことが難しかった。

しかし2021年12月に、私たちはついに星雲内の磁場形状をX線観測から導く手段を得た。それがIXPE衛星である。IXPE衛星を使い、シンクロトロン放射で生み出されたX線の偏光情報を取得することで、磁場形状を知ることが可能となっ

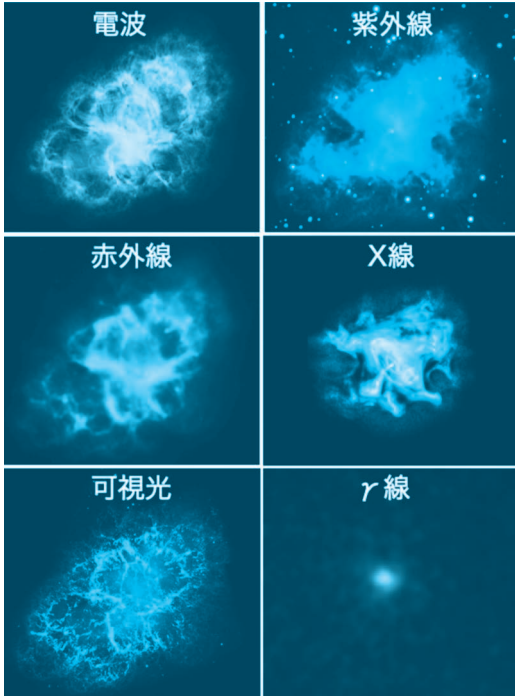


図1 さまざまな波長で見た「かにパルサー星雲」。図の空間的なスケールは揃っており、X線が電波や可視光と比べてより小さな範囲から放射されていることがわかる。電波 (VLA/NRAO/AUI/NSF), 赤外線 (NASA/Spitzer/JPL-Caltech), 可視光 (NASA/ESA/Hubble (STScI)), 紫外線 (XMM-Newton/ESA), X線 (NASA/Chandra/CXC), ガンマ線 (NASA/DOE/Fermi LAT/R. Buehler)

たのだ。偏光とは文字通り“光の偏り”を示す言葉で、偏光角と偏光度という2つの物理量で表されることが多い。偏光角とは、通常、天体からくる電磁波の電場が振動する方向を、空を見上げたときの北を0度として東向きが正になるように測った角度である。一方偏光度は、天体からやってくる電磁波が、どれくらいの割合で同じ偏光角を持っているかを表している。偏光度が高いほど天体からやってくる電磁波の偏光角が揃っていることになる。では、なぜ天体の各位置におけるX線の偏光情報が磁場形状の取得につながるのだろうか？それは、シンクロトロン放射で生み出され

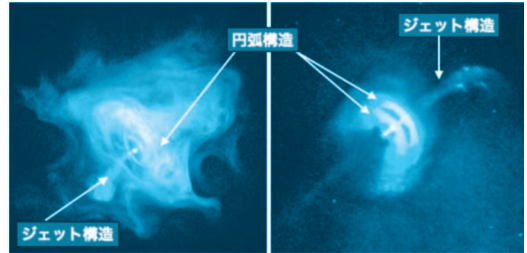


図2 X線天文衛星 Chandra で観測した「かにパルサー星雲」(左図: NASA/CXC/SAO) と「ペラパルサー星雲」(右図: NASA/CXC/University of Toronto/M.Durant et al.) の様子。

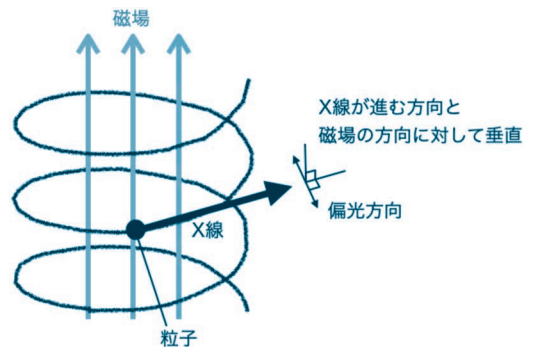


図3 シンクロトロン放射の概念図。磁場に荷電粒子が絡みつくことによってX線が生成され、その偏光角は磁場に対して垂直な方向になる。

たX線の偏光方向が磁場の方向に対して垂直になることが理論から知られているためである(図3)。その関係を用いれば、X線観測で得られた天体の各位置の偏光角を磁場の方向に焼き直すことができるのだ。そして偏光度の情報も交えると、磁場の乱れ具合も知ることができる。もしある位置の磁場形状が乱れていれば、その位置からやってくる電磁波はさまざまな偏光角を持つため、偏光度は下がるはずである。この効果は“デполяриゼーション”と呼ばれる。偏光から磁場情報を再構成することは他の波長でも可能だが、X線は図1でも確認したように「星雲のより中心付近で加速されたばかりの若い電子」のいる場所の磁場情報を伝えてくれる。

理論的には、パルサー星雲の磁場はパルサー風

によって運ばれてきたものだと考えられている。パルサー風の磁場は、パルサー磁気圏がパルサーと共に回転していることからパルサーの回転軸に巻き付くような、赤道面に平行な磁場（トロイダル磁場）が支配的になっている。よって、パルサー星雲の磁場もトロイダル磁場が支配的になっているだろうと予測されていた。X線の偏光情報からパルサー星雲の磁場形状を得ることができれば、これらの理論的な見解とあわせてパルサー星雲に対する理解を大きく進めることができる。

## 2つのパルサー星雲の先行研究

「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」は、今回行われたIXPE衛星の観測によって初めて星雲内における位置ごとのX線偏光情報を取得するに至った。しかしこれまで、IXPE衛星と同等なエネルギー帯域において、全く偏光観測が行われていなかったわけではない。特に「かにパルサー星雲」は、全天の中で最も明るいパルサー星雲であったことからX線偏光観測が昔から試みられてきた。

「かにパルサー星雲」のX線偏光観測の歴史は1970年代にはじまった。最初の成果をもたらしたのは、1971年に打ち上げられた観測ロケット「アエロビー350」を使った観測である。このロケットは2種類の異なるX線偏光計を搭載していた。その結果得られた「かにパルサー星雲」の平均X線偏光度は約15.4%で偏光角は約156度であった。この観測結果によって「かにパルサー星雲」のX線はシンクロトロン放射によるものであるという確証が得られたのである [1]。しかし、この結果は星雲の中心に存在する「かにパルサー」による影響は取り除かれていない。加えて、偏光度と偏光角のエラーは大きく、エネルギーバンドも正確に定まっていないという欠点もあった。

次に大きな成果をもたらしたのは1975年に打ち上げられたOSO-8衛星である。この衛星は「かにパルサー星雲」から「かにパルサー」の影響を取り除き、星雲本体の偏光度と偏光角を初めて検出した。観測は2.6 keV<sup>\*1</sup>と5.2 keVの2つのエネルギーで行われ、2.6 keVでは偏光度が約19.2%、偏光角が約156.4度、5.2 keVでは偏光度が約19.5%、偏光角が約152.6度という結果を得た [2]。これは、最初に行われたロケット実験の結果と矛盾がない結果である。その後2016年にはPolar-Lightという小型の人工衛星（キューブサット）によって「かにパルサー星雲」のX線偏光観測がなされた。OSO-8衛星とは若干異なる3.0–4.5 keVのエネルギー帯域での観測であったが、3 $\sigma$ エラーの範囲内でOSO-8衛星と矛盾のない結果を得ている [3]。しかしこれらの観測結果はどれも特定のエネルギーにおける「かにパルサー星雲」全体の平均偏光度と偏光角を得ているにすぎず、星雲内における位置ごとの偏光情報は取得できていなかった。これでは星雲内の空間的な磁場形状を把握することはできない。2021年にIXPE衛星が打ち上がり、これが世界で初めて可能となったのである。

## 「かにパルサー星雲」の観測結果

ここからは、IXPE衛星の観測結果をお伝えしよう。IXPE衛星は2–8 keVのX線に感度を持ち、過去の観測よりも広いエネルギー帯域での偏光観測が可能となっている。「かにパルサー星雲」の最初の観測は、2022年2月21日から22日までと、同年3月7日から8日までの合計2回行われた。有効観測時間は約91 ksであった。その後も断続的に観測は行われているが、この記事では上記2つの観測によって得られた結果を報告する。なお星雲の中心に存在する「かにパルサー」についても興味深い結果が得られている。これについては

\*1 1 keVは1,000電子ボルト (eV) に相当する。電子ボルトは電子に1 Vの電圧をかけると得られるエネルギーの量

来月号以降にIXPE特集記事として掲載予定の理論の記事を参照されたい。

IXPE衛星の観測の結果得られた星雲全体の平均偏光度は約20.2%、偏光角は約145.6度であった [4]。これは、先ほど紹介した先行研究に対して大きな矛盾はない結果である。そして図4に、IXPE衛星の最大の特徴である「かにパルサー星雲」の位置ごとの偏光度、そして偏光角から得られた磁場形状の結果を示す。

上図がX線強度に白線でIXPE衛星から得られた磁場形状を重ねたものである。各場所に見られる黒線は電波観測から得られた磁場形状である。この電波の磁場形状については、「ペラパルサー星雲」の章で触れる。そして下図が偏光度を表している。

まずは、上図の磁場形状に注目してみよう。図を見ると大きく2つの特徴があることがわかる。1つ目の特徴は、パルサー星雲のジェット構造を軸として見立てたときに、磁場がその軸に対称的な形状になっていることである。図4中の水色の点線が、図2のX線イメージにおけるジェット構造を軸に見立てたときの線である。そして2つ目の特徴は、磁場が図2のX線イメージで明るい円弧構造に沿った形状になっていることである。もし私たちが「かにパルサー星雲」を図5の右図の様にジェット軸の方向から眺めることができたならば、図2の円弧構造はドーナツ状の構造として見え、さらに磁場はパルサーのジェット軸に対して垂直に存在していることになる。これは理論的な予測と大きな矛盾はない結果である。

次に図4(下)の偏光度に注目してみよう。色が青から黒になるほど偏光度が高いことを表している。図を見ると偏光度は空間的に均一になっておらず、低いところと高いところがあることがわかる。まずは、偏光度が低いところに注目してみよう。偏光度が特に低くなっている場所では一体

どんなことが起きているのだろうか？もし磁場が図5の白線で示されているような形状であると仮定した場合、偏光度が低い部分は、私たちの位置

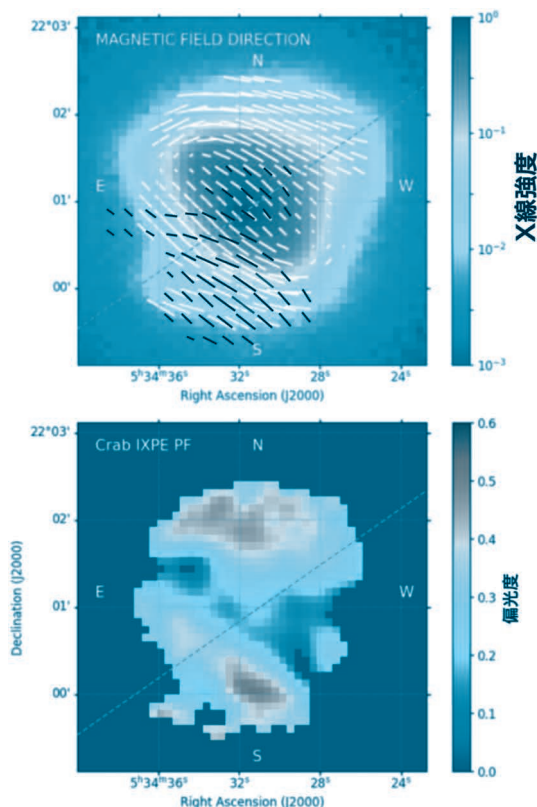


図4 IXPE衛星のデータから得られた「かにパルサー星雲」の磁場形状(上図)と偏光度(下図)。図はarXiv:2207.05573\*2に掲載されたものに加筆して作成。Accept版は [4] を参照されたい。上図のカラーバーはX線強度を表し、白い線はIXPE衛星から得られた磁場形状を表す(長いほど偏光度が高い)。黒い線は電波観測(IRAMのXPOLを用いた90 GHzにおける観測 [5])から得られた磁場形状である。[5]で報告されている偏光角の主要箇所を90度回転させ、大まかな磁場形状として黒線に加筆している。下図のカラーバーは偏光度を表している。色が青から黒になるほど、強度および偏光度が高い。両方の図にある水色の点線はジェット構造の軸を表している。図2と見比べるとわかりやすい。

\*2 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.05573>



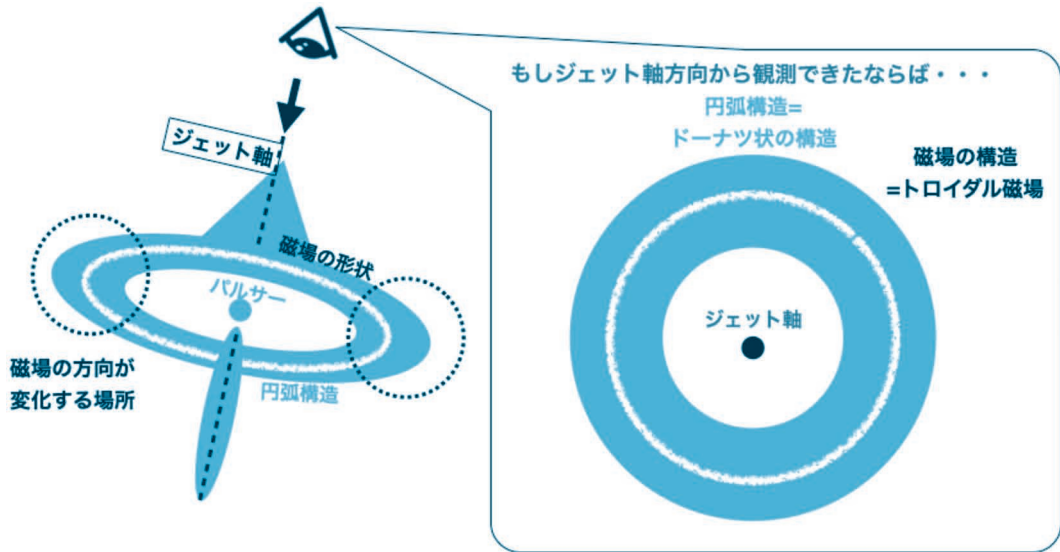


図5 「かにパルサー星雲」における磁場形状の模式図。水色が星雲の概形，白線が磁場形状，黒点線がジェット軸を表している。

から見たときに（図5の左図に示されているように）、磁場の方向が急激に変化する部分に相当する。つまりこの部分では、荷電粒子が様々な方向の磁場に巻き付いてシンクロトロン放射を起し、様々な偏光角を持つX線を生み出すことになる。すると結果的に、最初にご紹介した“デполяリゼーション”が起こり偏光度が下がることが予測できる。この「かにパルサー星雲」におけるデполяリゼーションは、2007年に中村・柴田によって理論予測がなされている [6]。星雲の円弧構造に注目した彼らの計算は、もし円弧構造の磁場のうち60%が乱れた磁場であるとしたら、過去のOSO-8衛星で得られた結果をよく再現するというものであった。この乱れた磁場の強さは、IXPE衛星の詳細なデータ解析 [7] でも確かめられた。もちろん、パルサー星雲の外側にはパルサー誕生時に起こった超新星爆発の残骸も残されており、それらの影響によって偏光度が低下している可能性もある。特に星雲の南西側には可視光によって超新星残骸のフィラメントの存在が確かめられており、磁場の向き（ひいては偏光度）に影響を与えている可能性がある。今後これらの点

において詳しい検証が行われていこう。

次に偏光度が高くなっている部分に注目してみよう。これらの部分の偏光度は約50%にも達している。驚くべき点は、IXPE衛星の結果と図2で示したChandra衛星の画像を照らし合わせると、X線放射強度がそれほど大きくないところで偏光度が高くなっている点である。この結果は、理論ではまったく予想されていなかったものであり、その場所で偏光度が高くなっている原因は不明である。もしかすると「かにパルサー星雲」内部の磁場の乱れ方が空間的に不均一になっている（まるで斑模様のように、磁場が乱れている部分と揃っている部分が空間的に存在する）ことにより、部分的に偶然偏光度が高くなっているのかもしれない。あるいは、ジェットの磁場形状がその周りとは異なることで、それらが重なる部分だけ偏光度が低下し、構造が重なっていない一部分があたかも高偏光度であるかのように目立って見えているのかもしれない。実際、不定性は大きいものの、ジェット構造の部分で偏光が異なっている兆候が [7] で報告されている。今後IXPE衛星でより深く観測することによって、ジェット部の偏光

を有意に検出できれば、高偏光度の理由もわかるかもしれない。

## 「ベラパルサー星雲」の観測結果

IXPE衛星による「ベラパルサー星雲」の観測は、2022年4月5日から15日までと、同年4月21日から30日までの合計2回行われた。有効観測時間は約860 ksであった。観測の結果得られた星雲全体の平均偏光度はなんと約44.6%、偏光角は約 $-50.0$ 度であった [8]。この偏光度は「かにパルサー星雲」に対して2倍以上も高い値である。「ベラパルサー星雲」を観測する前は、「かにパルサー星雲」と同程度の偏光度が予想されていただけに、初めてIXPE衛星のチーム内で解析結果が共有されたときは大変な衝撃が走った。

次に「ベラパルサー星雲」の位置ごとの偏光度と偏光角から得られた磁場形状を図6に示す。図中の白線に着目してほしい。この白線の向きは磁場の向きを、その長さは偏光度の大きさを反映している。各場所に見える黒線は、電波観測によって得られた磁場構造を表す。また、カラーバーはX線強度を示し、中心に見える黒線のコントラストは、Chandra衛星の観測から得られたX線放射強度のコントラストを示す。図2で見た「ベラパルサー星雲」の特徴的な2重の円弧構造が黒線で記されているのがわかる。最初に磁場の向きに注目してみよう。「かにパルサー星雲」の時と同様にジェット構造の向きを軸に見立てる(図6の灰色の点線)と、「ベラパルサー星雲」の磁場形状も軸に対して対称になっていることがわかる。そして、やはり円弧構造に沿った磁場形状となっている。さらに「ベラパルサー星雲」の場合、この磁場形状が電波の偏光観測から導かれた磁場形状と非常に近くなっている点も面白い。図6と図4(上)に黒線と白線で記されている両星雲の電波とX線の磁場形状を比較すると、「かにパルサー星雲」のそ

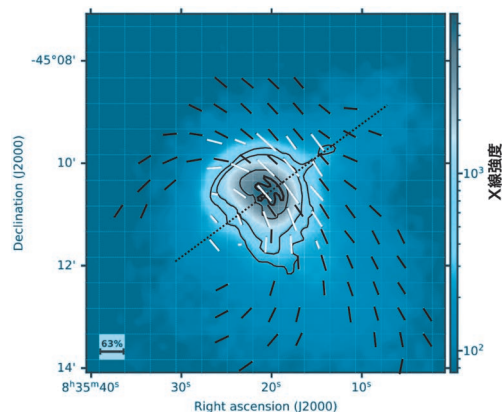


図6 IXPE衛星のデータから得られた「ベラパルサー星雲」の磁場形状と偏光度。図はarXiv:2303.12437\*<sup>3</sup>に掲載されたものに加筆して作成。Accept版は [8] を参照されたい。カラーバーはX線の強度を表し、白線の向きが磁場の向き、白線の長さが偏光度を表している。白線の長さが長いほど偏光度が高い。また、黒線は電波観測(ATCAを用いた5 GHzにおける観測)によって得られた磁場形状を表している [9]。そして、ジェット軸のおおよその向きを黒の点線で加筆している。

れは「ベラパルサー星雲」のそれに比べ綺麗に一致していない傾向がみられる(観測周波数帯が完全に一致していない点に注意が必要ではあるが)。今のところ「ベラパルサー星雲」のX線と電波の磁場形状がほぼ同じになる理由は不明である。しかし、図1で確認した通り、電波は視線方向で見た時にX線に比べパルサー星雲のより広い範囲(つまり奥行き方向で手前側や向こう側を含んだ領域)からやってくるのに対し、X線はパルサー星雲の中でもより活動的なコアの部分からやってくることを考えれば、星雲の内側から外側の領域にかけての空間的な磁場の構造が「かにパルサー星雲」とは異なっているのだろうと思われる。

次に偏光度に注目してみよう。図では一見わかりにくいですが、位置ごとの数値を細かく精査すると

\*<sup>3</sup> <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.12437>

「ベラパルサー星雲」においても円弧構造の端の辺りで「かにパルサー星雲」と同様にデポラリゼーションが起きている兆候が見て取れる。そして何よりも驚くべきことは、局所的に偏光度が60%以上になっている領域が存在することである。「かにパルサー星雲」にも局所的に偏光度が高くなっている部分はあったが、「ベラパルサー星雲」の解析から得られた値は、シンクロトロン放射の理論式から算出される最大偏光度約66-72%に近い値である。このように理論的最大値に非常に近い高偏光度や「かにパルサー星雲」よりも2倍以上高い平均偏光度を出すためには「ベラパルサー星雲」の磁場は乱れがなく非常に綺麗に揃っている必要がある。このような結果は誰も予想していなかっただけに、大変な驚きであった。

## 2つの観測から見えてきたこと

ここからは、パルサー星雲の偏光度と偏光角の特徴を掴むために、2つの観測結果における共通点と相違点を整理する。そして相違点はなぜ生まれるのかを考えてみたい。

共通点は以下の通りである。

1. ジェット軸に対して磁場形状は対称的になっている。
2. 磁場の向きは円弧構造に沿っており、ジェット軸に垂直なトロイダル磁場となっている。
3. 円弧構造の端の部分はデポラリゼーションが起きている。またはその兆候が見える。
4. 局所的に高い偏光度が出ている。

次に相違点について整理する。相違点は以下の通りである。

1. 「ベラパルサー星雲」の平均偏光度は「かにパルサー星雲」の2倍以上になっている（しかも部分的にはシンクロトロン放射の理論から導き出される最大偏光度に近い）。これは「ベラパルサー星雲」の磁場形状が「かにパルサー星雲」に比べ、乱れた磁場が少なく非

常に綺麗に揃っていることを示している。

2. 「かにパルサー星雲」の偏光度は「ベラパルサー星雲」の結果に比べて対称性が低く、星雲の北側と南側に偏光度が高い領域がある。
3. 「ベラパルサー星雲」の磁場形状は電波領域から導き出された磁場形状とほぼ同等になっている。「かにパルサー星雲」の場合、「ベラパルサー星雲」ほど綺麗に一致していない傾向がみられる。

これら相違点を生んでいる原因は一体何だろうか？真っ先に思い浮かぶのは、「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」の中心にあるパルサー年齢の違いである。「かにパルサー」の年齢は1,300年ほどであるのに対し、「ベラパルサー」の年齢は11,000年程度となっており、10倍程度の差がある。「かにパルサー星雲」のように若い時期にあった磁場の乱れが、時間の経過とともに散逸されて少なくなり、やがて年を重ねた「ベラパルサー星雲」のように綺麗に揃った磁場が残るのかもしれない。この可能性はさらに例数を増やすことで紐解かれる可能性がある。IXPE衛星は他にMSH15-52（パルサーの特性年齢が約1700年）、B0540-69（特性年齢が約1700年）、G21.5（特性年齢が約4800年）の3つのパルサー星雲を観測している。もしこれらの星雲の偏光度がパルサーの年齢に対して単調増加になっていれば、パルサーの年齢が偏光度の違いに効いている可能性がある。さらに、パルサー年齢の違いによりパルサー星雲に影響を与えそうな要素が2つある。1つ目は超新星残骸の状態である。パルサーの年齢が異なるということは、超新星残骸の状態も異なることを意味する。超新星残骸は、最初の超新星爆発で生じた爆風が外部の物質にほとんど妨害されずに自由に広がっていく“自由膨張期”が数百年続いた後で、外部の星間物質と衝突することで膨張が徐々に遅くなる状態（断熱膨張期）が1万年程続く。従って年齢が10倍異なる「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」は超新星残

骸のサイズおよび減速の度合いが大きく異なるであろう。特に「かにパルサー星雲」は超新星残骸に特徴的な円輪状の高温プラズマ放射が未検出で、爆発のエネルギーが小さかったと考えられている [10]。これが超新星残骸の状態、ひいては磁場の状態の違いを生んでいるのかもしれない。2つ目はパルサー星雲にエネルギーを供給しているパルサー風である。パルサー年齢に応じてパルサー風の状態も変化していくであろう。実際、パルサー風の大本のエネルギー源である「中性子星の回転エネルギー」（スピンドアウン光度と呼ばれる）は、若い「かにパルサー星雲」の方が100倍近く大きく [11]、磁場の状態が異なっても不思議ではない。さらに、パルサー風自身はパルサーの回転軸と磁化軸のなす角によって吹き方が変化する。回転軸と磁化軸は一般的にはずれており、そのためパルサー風の磁場が反転するストライプドウィンドという状態のパルサー風になる(図7)。この反平行磁場は、図7の赤道部分では散逸し [12, 13]、より高緯度部分では散逸を免れ

た磁場が残存すると推測されている。そして、この残存磁場がパルサー星雲の磁場の形成に関係していると考えられている。散逸が起きる場所および形成される磁場の形状に定説はないが、[14]などで示唆される両パルサーの軸のなす角の違いが、星雲の磁場状態の違いを生んでいるのかもしれない。そして、回転軸と磁化軸のなす角自体も、約100万年から1000万年というタイムスケールで小さくなる方向に変化する兆候も示されている [15]。かにパルサーとベラパルサーの年齢の違いを考えると、なす角の変化はあまり効かないかもしれないが、これらパルサー本体のジオメトリとその経年変化はパルサー星雲の磁場の状態を考える上で無視できない点であろう。このような複雑な状況を反映するパルサー風は、さらに超新星残骸の中に存在する星からばら撒かれた噴出物と相互作用を起こす。これによってパルサー星雲内の磁場の乱れ方が影響を受けているのかもしれない。

そのほかにも、パルサー星雲を取り囲む星間物

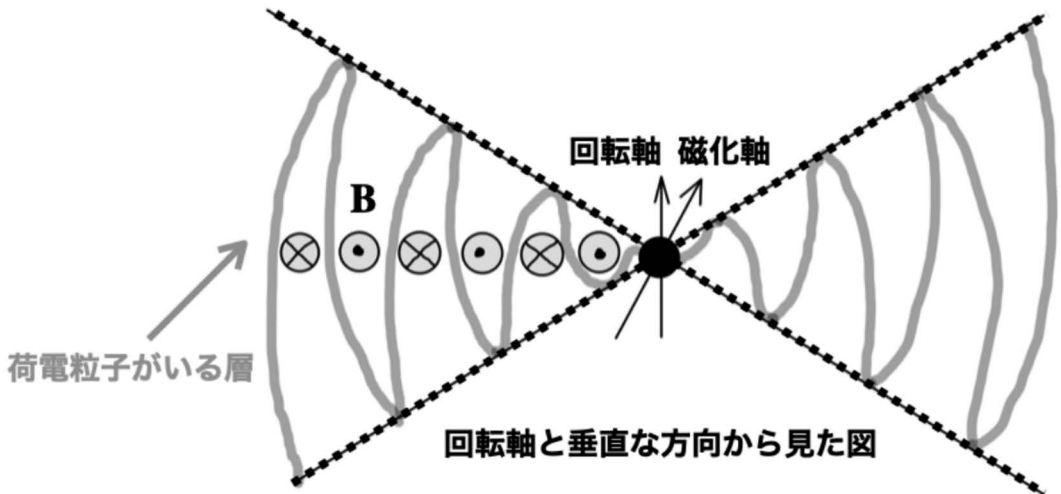


図7 ストライプドウィンドの模式図。パルサーの回転軸と垂直な方向からパルサー風を見た図になっている。左図の中心の黒い円はパルサーを表している。黒い2本の矢印はそれぞれ回転軸と磁化軸を表している。「B」は磁場を表している。回転軸と磁化軸のなす角が存在する状態でパルサーが回転すると、まるで回転するスプリンクラーの水が螺旋状に流れるように磁力線が後ろに流され、周期的に磁場が反転するような構造のパルサー風になる。[16]に掲載された図を参考に作成している。



質の分布など外的環境が関係している可能性もある。今後IXPE衛星で観測されるパルサー星雲が増え、加えて理論計算と比べながら検証することで、原因を紐解いていくことが期待される。

## まとめと今後の展望

2021年12月9日に打ち上がったIXPE衛星によって、私たちは今まで手にすることができなかったX線の空間的な偏光情報を取得できるようになった。これはパルサー星雲内の磁場形状を解き明かす鍵である。今回記載した「かにパルサー星雲」と「ベラパルサー星雲」の観測結果は、従来の予想と大きく異なり、まったく新たな発想を必要とする結果を与えた。現在もIXPE衛星による観測は続いており、例数を増やしたり、同一天体でもデータが蓄積されることで新たな結果が導き出されてくるだろう。X線帯域における空間分解した偏光観測は、IXPE衛星で幕を開けたばかりであり、2027年には中国とイタリア主導のenhanced X-ray Timing and Polarimetry mission (eXTP) が打ち上がる予定である。この衛星はIXPE衛星のエネルギー帯域と同等の2-10 keV帯域でX線偏光観測を行うことができる。有効面積が大きな望遠鏡が搭載される予定であり、短い時間でX線をたくさん集めることができるため、サンプル数をさらに増やし、またIXPE衛星では偏光度や偏光角の値が上限値になってしまった部分を明らかにしてくれるだろう。今後もX線の偏光観測の躍進に目が離せない。

## 謝辞

この場を借りて、研究打ち合わせを通して活発な議論を交わして下さった山形大学の柴田さん、東北文教大学の犬野さんをはじめ、この原稿に携わって下さったみなさんに感謝申し上げます。また、IXPE衛星を用いたパルサー星雲の研究は、科学研究費助成事業（課題番号：22K14068, 23H01186, 19H00696）による支援を受けています。

## 参考文献

- [1] Novick, R., et al., 1972, ApJ, 174, L1
- [2] Weisskopf, M. C., et al., 1978, ApJ, 220, L117
- [3] Feng, H., et al., 2020, Nat. Astron., 4, 511
- [4] Bucciantini, N., et al., 2023, Nat. Astron., 7, 602
- [5] Aumont, J., et al., 2010, A&A, 514, A70
- [6] Nakamura, Y., & Shibata, S., 2007, MNRAS, 381, 1489
- [7] Mizuno, T., et al., 2023, PASJ, 75, 1298
- [8] Xie, F., et al., 2022, Nature, 612, 658
- [9] Dodson, R., et al., 2003, MNRAS, 343, 116
- [10] Tsujimoto, M., & Mori, K., 2019, 天文月報, 354
- [11] Aharonian, F. A., et al., 1997, MNRAS, 291, 162
- [12] Cerutti, B., & Philippov, A. A., 2017, A&A, 607, A134
- [13] Sironi, L., & Spitkovsky, A., 2011, ApJ, 741, 39
- [14] Harding, A. K., et al., 2021, ApJ, 923, 194
- [15] Young, M. D. T., et al., 2010, MNRAS, 402, 1317
- [16] Mochol, I., 2017, Astrophys. Space Sci. Library, 446, 135

## IXPE View of the Pulsar Wind Nebulae

Eri WATANABE<sup>1</sup>, Tsunefumi MIZUNO<sup>2</sup> and Shuichi GUNJI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa-cho, Yamagata, Yamagata 990-8560, Japan

<sup>2</sup>Space Science Center, Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE), the first X-ray polarimetry imaging satellite, was launched on December 9, 2021. IXPE satellite has made it possible to conduct X-ray polarization observations, allowing for the visualization of magnetic field structures near the centers of pulsar nebulae. To date, the IXPE satellite has observed five pulsar nebulae. This paper reports IXPE's observations of pulsar wind nebulae, particularly results about two famous objects: the Crab Pulsar Nebula and the Vela Pulsar Nebula.