

若いパルサー星雲のスペクトル進化

田中 周太

〈大阪大学大学院理学研究科 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1〉

〈青山学院大学院理工学部 〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺5-10-1〉

e-mail: tanaka@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp



パルサー星雲のスペクトルを調べることにより、多くの謎が残されたパルサー周辺で起こる物理現象を探ることができる。一方で、近年ガンマ線観測の発展により多くのパルサー星雲が検出された。本稿では、時間発展を考慮したパルサー星雲のスペクトルに関する研究を紹介する。これまでの多くの研究はパルサー星雲を定常天体として扱ってきたが、時間発展を考慮することでより多くの情報をパルサー星雲から抜き出すことができた。特に、電波から軟ガンマ線領域の放射と高エネルギーガンマ線領域の放射の時間発展の違いや、スペクトル進化モデルを考えることによって初めて得られる、パルサーやその周辺の情報を紹介する。

1. パルサー星雲とは

パルサー星雲とはわれわれの銀河系内に数十個見つかっている天体で、最もよく知られているのは、MessierカタログでM1と標記されるおうし座のかに星雲であろう¹⁾。かに星雲はその名のとおり大きく広がった雲状の天体であり、その中心にはかにパルサーと呼ばれるパルスを発する天体が存在している。10光年程度に広がったかに星雲全体が、中心のかにパルサーから放出された物質によってできたと考えられている²⁾。

パルサー星雲は可視光以外に電波、X線、ガンマ線でも明るく、非熱的放射で輝く天体であることがわかっている。可視光や赤外線では、パルサー星雲全体にわたってフィラメント状の構造が顕著であるが、非熱的放射が卓越する電波、X線、ガンマ線などの波長域では、比較的のっぺりとした模様の少ない天体である。いくつかのパルサー星雲は電波で偏光が観測されており、電波から軟ガンマ線領域では高エネルギーに加速された粒子からのシンクロトロン放射で、より高エネル

ギーのガンマ線では同じ高エネルギー粒子による逆コンプトン散乱で輝いていることがわかっている³⁾。このことからパルサー星雲は図1の左図のような磁場と高エネルギー粒子（電子・陽電子）で構成された雲であることがわかる。そしてその磁場や粒子は中心のパルサーを起源としている。どのようにしてこのような雲を形成しているのかを調べることで、中心のパルサーやその周辺で起こる物理現象を調べることができる。

2. パルサー星雲の形成

まずは中心にあるパルサーの話から始めよう。パルサーとは非常に正確なパルスを発する天体で、それは中性子星の回転が起源である。パルサーの周期は1ミリ秒から10秒程度のものが観測されており、その周期は徐々に伸びている。これはパルサーが回転エネルギーを徐々に失っていることを意味し、その回転光度はかに星雲の中心にいるかにパルサーの場合、太陽光度の10万倍にも達する。回転減速のブレーキとしての役割を果たすものは、パルサー自身のもつ 10^8 テスラも

パルサー星雲

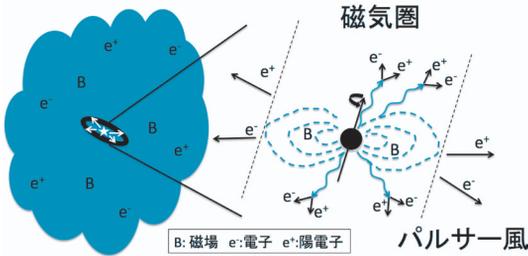


図1 (左) パルサー星雲は、中心パルサー（星印）から供給されるパルサー風（白矢印）が終端衝撃波（黒楕円）で減速されてできる。(右) パルサー付近を拡大したもの。パルサー磁気圏（黒点線内側）では、パルサーの磁場（青点線）と回転による誘導起電力で加速された粒子が、ガンマ線（青波線）を放射して大量の電子・陽電子を生成すると同時にパルス放射を生成している。電子・陽電子は磁気圏に溜まらずに、遠心力によって常時磁気圏から吹き出し、パルサー風（黒矢印）となる。

の磁場である。強磁場と高速回転により生じる誘導起電力は、パルサーの磁気圏中の荷電粒子を加速し、電磁カスケードにより大量の電子・陽電子を生成する（図1の右図）。パルサー磁気圏で生成された磁化した電子・陽電子プラズマが遠心力で飛び出し、パルサー風となる^{4), 5)}。かにパルサーから観測されるパルスの光度が回転光度の数%程度であることから、回転光度のほとんどはパルサー風として失っていることがわかる。

パルサー星雲とはパルサー風が周囲の物質（超新星残骸や星間物質）にせき止められてできた雲であり、パルサー風の終端衝撃波で加速された高エネルギー粒子とパルサー風によって運ばれた磁場で構成されている⁶⁾。観測的にも、図1の左図のように、パルサーを取り囲む楕円形のリング構造（インナーリング）がいくつかのパルサー星雲で見つかっており、これがパルサー風の終端衝撃波と考えられている。また、パルサー星雲が超新星残骸にせき止められてできた雲であるなら、その外側に超新星残骸の兆候があるはずである。実際に、可視光や赤外線でも観測されるフィラメント

構造からは重元素からの輝線が観測され、その起源はパルサー誕生時の超新星の残骸であると考えられている¹⁾。

パルサー星雲の中でもかに星雲のように比較的丸い形状のものは若いパルサー星雲と考えられ、力学的には超新星残骸の影響をそれほど受けていない。そのようなパルサー星雲の多くは、パルス周期とその変化率から見積もられる中心パルサーの年齢が1,000年から10,000年程度と若い。一方で、中心パルサーの年齢が大きなパルサー星雲は大きく変形している。これは、超新星残骸の逆行衝撃波がパルサー星雲と衝突したことによると考えられている⁷⁾。われわれは、力学的な性質がよくわかっている若いパルサー星雲についての研究を行った。

3. パルサー星雲の進化

パルサー星雲外縁の固有運動やフィラメント構造の輝線幅から、若いパルサー星雲は典型的に時速1,000キロメートルほどで、ほぼ等速で膨張していることがわかっている。パルサー星雲の膨張によって、プラズマは徐々に冷えて、磁場の大きさは小さくなる。その一方で、パルサー星雲にはパルサーの回転エネルギーが相対論的高温の磁化プラズマとして常に供給されており、パルサー星雲は時々刻々と姿を変えている。

パルサー星雲の緩やかな時間進化を表す直接的な証拠として、パルサー星雲の光度進化が挙げられる。かに星雲の電波領域の放射は1年で0.17%程度の減光⁹⁾、可視光の放射は1年で0.24%程度の減光が観測されている¹⁰⁾。3C58というパルサー星雲についても電波領域での減光が示唆されている¹¹⁾。また、異なるパルサー星雲間の比較になるが、パルサー星雲の年齢が大きいものほど、X線とガンマ線の光度比が小さくなっていくという観測的示唆もある¹²⁾。

以上のように、パルサー星雲は緩やかに時間発展する天体であると認識されている。しかし過去

の研究において、パルサー星雲は時間発展しない定常天体として扱われてきた。そこで、われわれは若いパルサー星雲のスペクトル進化モデルを構築した。以下では、そのモデルをいくつかのパルサー星雲へ適用した結果について紹介する。

4. 若いパルサー星雲のスペクトル進化

ここまでにも何度か登場したが、観測的にも理論的にも最もよく研究されているパルサー星雲はかに星雲である。かに星雲は、電波から高エネルギーガンマ線にわたり現在までに人類が観測を試みたほぼすべての波長域の電磁波で観測されているだけでなく、パルサーの年齢や回転進化、パルサー星雲の膨張速度や地球からの距離などがよくわかっている。つまり、新しいモデルを構築し適用するにあたってこれほど適した天体はない。われわれは、かにパルサーの回転進化やかに星雲の断熱膨張、放射による冷却を考慮してスペクトル進化を計算した。図2が計算された現在のかに星雲のスペクトルである¹³⁾。図2のように現在のスペクトルを再現した研究はいくつかあるが、われ

われの計算結果では前章で言及した電波や可視光領域で観測されている現在の減光率の観測結果も説明できている。これはスペクトルの進化を考慮したことによる新しい結果である。

かに星雲では年齢などのほとんどの性質が既知であるが、モデルからは注目すべき一つの性質が得られる。それは、パルサーから注入される磁化プラズマの磁場のエネルギーとプラズマのエネルギーの比である。この比は、パルサー風の磁化率に相当する量で30年近く前から磁化率問題として議論されている。パルサーの磁気圏から吹くパルサー風はほぼ光速で吹く流れであるが、パルサー星雲の膨張速度は100分の1以下の時速1,000キロメートル程度である。これだけの減速を実現するには、パルサー風の磁化率が非常に小さい必要があり、パルサー風は粒子のエネルギーが磁場のエネルギーよりも100倍以上大きくないといけない⁸⁾。われわれのモデルから得られる磁化率は、この膨張速度に関する議論とは全く独立に、電波からガンマ線にわたるスペクトルを説明するために得たものであるが、同程度の非常に小さい磁化率を要請する。

われわれはかに星雲以外の若いパルサー星雲についても同じスペクトル進化モデルで、注入される磁気プラズマの磁化率などを調べた。図3はG21.5-0.9とG0.9+0.1という二つのパルサー星雲の現在のスペクトルとスペクトルの進化を表している¹⁴⁾。現在のスペクトル(図3の(a)と(b))は、前節で述べた磁化率がかに星雲と同程度の値のときに再現される。これは、ここに挙げた以外の若いパルサー星雲にも同様の性質で、パルサー風の磁化率が非常に小さいことは若いパルサー星雲のもつ普遍的な性質であることがわかった。一方、スペクトルの時間発展(図3の(c)と(d))については天体によって様相が異なる。G21.5-0.9ではガンマ線は増光するのに対してG0.9+0.1では減光している。これは、G21.5-0.9の中心パルサーが回転エネルギーを失う時間(回転減速時

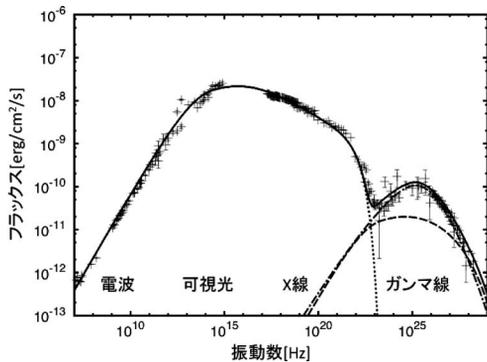


図2 現在のかに星雲のスペクトル。考慮したすべての放射過程の和(黒線)で電波からガンマ線にわたる観測値(十字)を説明できている。電波からX線領域が主にシンクロトロン放射、ガンマ線領域は主にシンクロトロン(SYN)光子を逆コンプトン散乱したものによって説明される。宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の逆コンプトン散乱は観測されるガンマ線にあまり寄与しない。

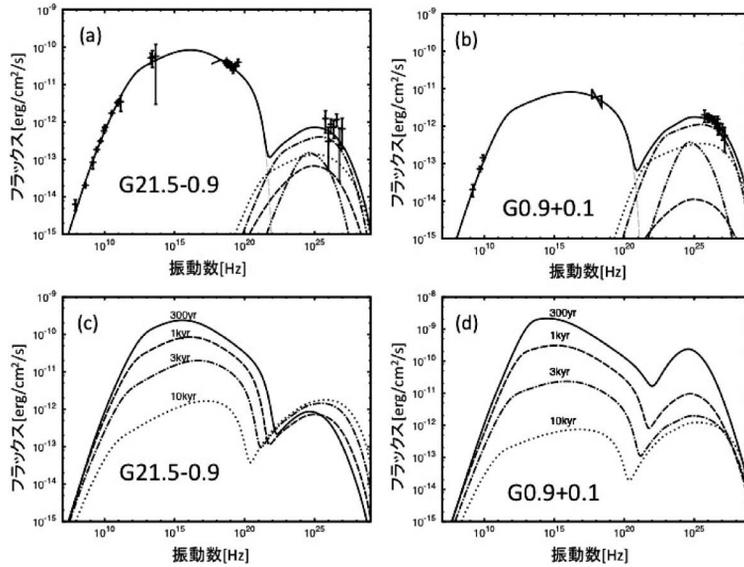


図3 二つのパルサー星雲G21.5-0.9とG0.9+0.1の現在のスペクトルとスペクトルの進化。(a)と(b)は現在のスペクトルで観測データ(十字)とともに計算結果(実線)が示されている。ガンマ線領域の複数の点線は、複数のガンマ線放射機構それぞれの寄与を表す。(c)と(d)はそれぞれのパルサー星雲の年齢が300年(実線)から10,000年(点線)のときのスペクトルを表す。(c)と(d)では、ガンマ線領域でフラックスの進化の仕方が違う(本文参照)。

間)が4,000年程度と長い一方で、G0.9+0.1の中心パルサーが1,000年弱と短いことによる。パルサーからの回転エネルギーの供給が止まると、ガンマ線光度は膨張に伴う断熱冷却が効いて穏やかに減光する。一方で、電波からX線にわたるシンクロトン放射の成分がG21.5-0.9もG0.9+0.1も共に減光するのは、パルサー星雲内の磁場エネルギーの「密度」がパルサー星雲の膨張によって小さくなり続けるためである。パルサー星雲内の全磁場のエネルギーは、パルサーからの供給によって増加していることを述べておく。

最後に、もう一つ重要な性質として、G21.5-0.9もG0.9+0.1もX線領域での減光率に比べてガンマ線の減光率が小さいという性質がある。これは、どのパルサー星雲も年齢を重ねると、X線での検出がガンマ線でのそれに比べて困難になるということである。このような性質をもつ年老いたパルサー星雲がTeVガンマ線未同定天体として観測される可能性がある。

5. 若いパルサー星雲を伴うパルサーの性質

パルサー星雲の時間発展とは別に、若いパルサー星雲の中でもガンマ線が検出されるものとされないものがある。このガンマ線領域でのパルサー星雲の検出可能性は、中心パルサーの回転光度や年齢と明らかな相関が見られない。そこで、パルサー星雲のスペクトル進化のモデルを用いて、ガンマ線で検出されたパルサー星雲(以後、ガンマ線パルサー星雲)とガンマ線パルサー星雲でないものを比較した。図4は中心パルサーからこれまでに注入されたエネルギーとパルサー星雲付近の赤外線背景放射のエネルギー密度について相関を取ったものである、若いパルサー星雲のガンマ線検出可能性がこの二つの量と相関しているのがわかる¹⁵⁾。赤外線背景放射は銀河内のダストによるもので、銀河中心に向かうほど大きく、銀河面から離れるほど小さい。かに星雲を除くパ

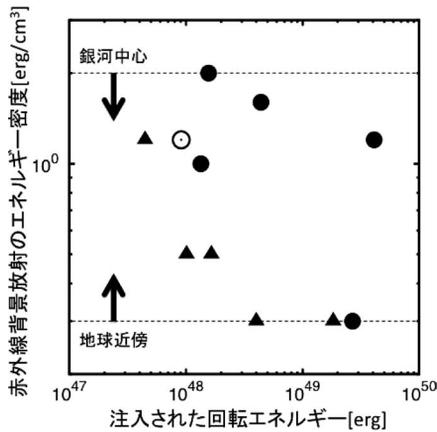


図4 ガンマ線で検出されたパルサー星雲（黒丸）と検出されなかったパルサー星雲（三角）について、中心パルサーからこれまでに注入されたエネルギーとパルサー星雲付近の赤外線背景放射のエネルギー密度について相関を取ったもの。右上に向かってガンマ線が検出されたパルサー星雲が、左下に向かってガンマ線が検出されなかったパルサー星雲が分布している。白丸は特別な振る舞いをするガンマ線パルサー星雲 Kes 75（本文もしくは、図5参照）である。

パルサー星雲は、ガンマ線放射機構として、この赤外線背景放射をたたき上げる逆コンプトン散乱が優勢であり、その光度は赤外線背景放射のエネルギー密度に比例する。パルサー星雲の形成された場所に依存する赤外線背景放射は別にして、若いパルサー星雲がガンマ線パルサー星雲であるかどうかは、中心パルサーの性質の違いが重要である可能性を図4は示唆している。

パルサー星雲の進化を追うことは、中心パルサーの回転周期の時間発展を追うことも兼ねている。進化をさかのぼることでパルサーが初期にもつ回転エネルギーやブレーキの役割を果たす磁場のエネルギーを知ることができるからである。中性子の縮退圧で支えられている中性子星は半径や質量が核物理によってほとんど決まっている¹⁶⁾ので、パルサーの性質を特徴づける量はここで求まる初期の回転エネルギーと磁場エネルギーと言える。図5は、若いパルサー星雲の中心パルサー

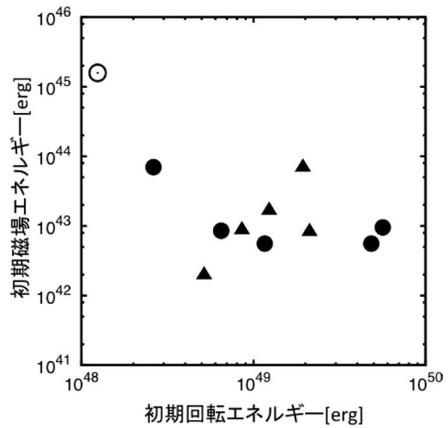


図5 若いパルサー星雲の初期回転エネルギーと初期磁場のエネルギー。左上の Kes 75 の中心パルサー（白丸）を除いて、ガンマ線で検出されたパルサー星雲の中心パルサー（黒丸）と検出されなかったパルサー星雲の中心パルサー（三角）で特徴的な傾向がない。

について、初期回転エネルギーに対しての初期磁場のエネルギーの値を示したものである¹⁵⁾。図5の左上にある白丸は、マグネター（磁場が大きいために不定期にバーストを起こすなどの特徴的な振る舞いをするパルサーの種族）のような振る舞いが観測されているパルサーで Kes 75 というガンマ線パルサー星雲の中心パルサーである。観測的にも明らかに特異な Kes 75 の中心パルサーを除くと、図5は、若いパルサー星雲のガンマ線検出可能性が中心パルサーの性質によらないことを示している。一方で、若いパルサー星雲を伴うパルサーの間でも初期回転エネルギーや磁場エネルギーは共に2桁程度の分散がある。また、パルサーの初期周期は、短いものでも数十ミリ秒であり、誕生時からミリ秒パルサーとなるものは存在しないことがわかった。この結果は、パルサー星雲の時間発展を調べて初めてわかったことであると強調しておく。時々刻々と変化する現時刻での周期や回転光度のみでは、パルサーを特徴づけることができないからである。パルサーの個性（初期の回転や磁場のエネルギー）に関する研究は、これまでは、2,000個に及ぶパルサーを統計的に

調べることで行われてきた。パルサー星雲のスペクトル進化に関するわれわれの研究は、個々のパルサーの個性を調べることができる数少ない方法の一つである。

6. まとめと今後の展望

われわれは中心のパルサーの年齢が1,000年から10,000年程度の若いパルサー星雲のスペクトル進化を考え、いくつかのパルサー星雲の現在の観測スペクトルを説明するとともに、パルサー星雲スペクトルの時間発展を調べた。われわれのスペクトル進化モデルは、かに星雲で観測される電波や可視光領域における減光率も説明でき、「時間進化」を正しく取り入れていることを確認した。現在の観測スペクトルを説明するためには、パルサー風として供給されるエネルギーの磁化率が非常に小さい必要があり、それは若いパルサー星雲について普遍的なものであることがわかった。

スペクトル進化の観点からは、中心パルサーの回転減速時間の違いによって年齢1,000年を過ぎてもガンマ線光度が増加するものがあることがわかった。また、X線光度はガンマ線光度に比べて急激に減少していくことから、TeVガンマ線未同定天体という種族の候補として年老いたパルサー星雲が多くを占める可能性を示唆している。われわれの計算によると、現在の回転光度が小さなパルサーを中心にもっていても、そのパルサー星雲の中にはそれまでに供給されたエネルギーを多く蓄えている可能性があるため、年齢が大きいパルサー星雲はX線よりもガンマ線のほうが相対的に明るくなりうる。過去のいくつかの研究で高エネルギー粒子の放射冷却が重要としたもの¹⁷⁾があるが、この描像は常にパルサーから粒子の注入をされるパルサー星雲の場合とは異なる。ただし、われわれのスペクトル進化のモデルは年齢が10,000年程度の若いパルサー星雲（球状でほぼ等速で膨張するパルサー星雲）にしか適用できないため、それ以降のパルサー星雲の変形

によってはX線に対するガンマ線の光度がどう進化するのかわからない。これに関しては、超新星残骸の逆行衝撃波でパルサー星雲が収縮するなどの過程を取り入れた研究が必要である¹⁸⁾。

われわれは、パルサー星雲のスペクトル進化から中心パルサーの性質についても調べた。パルサー星雲の年齢からパルサーの初期の回転エネルギーや磁場のエネルギーを知ることができたため、パルサー元来の個性を調べることができた。このように元来の個性が調べられているパルサーは2,000個を数えるパルサーのうちのほんの一握りであるが、パルサー星雲のスペクトル進化を調べることは、個性を調べるのに非常に優れた手段の一つである。

これまでのパルサー星雲に関する研究はすべてパルサー星雲全体からの光度を説明するものであった。しかし、パルサー星雲とは雲状に「広がった」天体であり、実際に空間分解されたスペクトルの観測も行われている¹⁹⁾。空間構造を考慮したパルサー星雲のモデルからは、高エネルギー粒子の伝播などさらに多くの物理現象を調べることが可能である²⁰⁾。

謝辞

本稿の内容は大阪大学の高原文郎教授との共同研究であり、筆者の大阪大学理学研究科における博士論文の内容をもとにしています。また、本研究は日本学術振興会の援助を受けていました。

参考文献

- 1) Hester J. J., 2008, ARA&A 46, 127
- 2) Gaensler B. M., Slane P. O., 2006, ARA&A 44, 17
- 3) Atoyan A. M., Aharonian F. A., 1996, MNRAS 278, 525
- 4) Goldreich P., Julian W. H., 1969, ApJ 157, 869
- 5) Ruderman M. A., Sutherland P. G., 1975, ApJ 196, 51
- 6) Rees M. J., Gunn J. E., 1974, MNRAS 167, 1
- 7) Blondin J. M., Chevalier R. A., Frierson D. M., 2001, ApJ 563, 806
- 8) Kennel C. F., Coroniti F. V., 1984, ApJ 283, 694
- 9) Aller H. D., Reynolds S. P., 1985, ApJL 293, L73
- 10) Vinyaikin E. N., 2007, Astron. Rep. 51, 570
- 11) Weiland J. L., et al., 2011, ApJS 192, 19
- 12) Mattana F., et al., 2009, ApJ 694, 12
- 13) Tanaka S. J., Takahara F., 2010, ApJ 715, 1248
- 14) Tanaka S. J., Takahara F., 2011, ApJ 741, 40
- 15) Tanaka S. J., Takahara F., 2012 submitted to MNRAS.
- 16) Lattimer J. M., Prakash M., 2001, ApJ 550, 426
- 17) de Jager, O. C., Djannati-Ataï A., 2008, in *Neutron Stars and Pulsars: 40 Years after Their Discovery*, ed. W. Becker (Berlin: Springer)
- 18) Gelfand J. D., Slane P. O., Zhang W., 2009, ApJ 703, 2051
- 19) Bietenholz M. F., et al., 1997, ApJ 490, 291
- 20) Tanaka S. J., 2012, submitted to Proc. of Electro-magnetic Radiation from Pulsars and Magnetars (ASPCS).

A Spectral Evolution of Young Pulsar Wind Nebulae

Shuta TANAKA

Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Department of Physics and Mathematics, Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5258, Japan

Abstract: Studying the emission mechanism of Pulsar Wind Nebulae (PWNe) is important because the emitting plasma inside a PWN has gone through many physical processes on extreme conditions, which cannot be experimented on the Earth. We study a broadband spectrum of PWNe taking into account an evolution of them. The spectral evolution of PWNe shows that the flux ratio of TeV γ -rays to X-rays increases with time, which implies that old PWNe are faint in X-rays, but not in TeV γ -rays. We also find that the magnetization of the plasma injected from a central pulsars and spin-down evolution of a central pulsar.