

パルサー磁気圏の放射領域拡張に対する光度曲線の系統的研究

木坂 将大 (広島大学)

概要

回転駆動型パルサーの光度曲線の多波長における振る舞いについて、放射領域を拡張させることで説明が可能かどうかについて解析を行った。解析は Takata et al.(2008) のモデルの描像に従った。観測とモデルを比較した結果、個々の波長のピークに対応するコースティクスが存在することを確かめた。また、エネルギーの低い放射は線の放射領域より高い領域にあり、これは Takata et al.(2008) の描像と一致する。今後の線のパルサーに対する X, 可視光領域の深いパルスサーチにより、パルサーの特徴的パラメータと放射領域の関係が明らかになることが期待できる。

1 Introduction

パルサーとは、強い磁場を持ち高速で自転する中性子星である。この中で回転駆動型パルサーは周期が時間とともに増加しており、この回転エネルギーを動力源として放射や粒子加速を行うと考えられているが ([4])、その詳細な過程についてはよくわかっていない。

近年、フェルミ衛星によりガンマ線で検出されたパルサーの数が飛躍的に増加した ([1, 7])。GeV ガンマ線の検出は、曲率放射が起源と仮定するとパルサー磁気圏で電子、陽電子がローレンツ因子で $\sim 10^7$ まで加速されていることを意味する。よって、ガンマ線の観測から粒子の加速領域を制限することが可能である。こうした背景のもとで、ガンマ線の光度曲線の振る舞いをを用いた放射領域の制限が行われている (例えば、[10, 6])。しかし、ガンマ線だけでなく X 線、紫外線などの帯域でもパルスが検出されている天体が存在し、これらは一般にはガンマ線の光度曲線と一致しない (例えば、[9])。よって、多波長の光度曲線の振る舞いを統一的に理解することはパルサー磁気圏の放射領域をより強く制限できる可能性があることを示唆する。

先行研究として、Takata et al.(2008)[8] が Vela パルサーに対して解析を行った結果、X 線のパルスには中性子星へ向かう方向の放射が寄与し、紫外線帯域では粒子の加速領域の外からの放射が支配的であると主張した。フェルミ衛星により多波長でパルスが観測されている天体が増加したため、上のような描像の普遍性を検証することが可能である。そこで本研究では、放射領域を拡張してそれぞれの領域からの放射が形成する光度曲線の振る舞いを調査し、観測との比較を行う。

2 Model description

ここではモデルについて説明を行う。より詳細な記述については Bai & Spitkovsky (2010)[2]、Romani & Wattars et al.(2010)[6]などを参照のこと。

まず磁場 \mathbf{B} は遅延を考慮した双極磁場を仮定する。これは以下の式で表される。

$$\mathbf{B} = -\left[\frac{\vec{\mu}(t_r)}{r^3} + \frac{\dot{\vec{\mu}}(t_r)}{cr^2} + \frac{\ddot{\vec{\mu}}(t_r)}{c^2r}\right] + \hat{\mathbf{r}} \cdot \left[3\frac{\vec{\mu}(t_r)}{r^3} + 3\frac{\dot{\vec{\mu}}(t_r)}{cr^2} + \frac{\ddot{\vec{\mu}}(t_r)}{c^2r}\right], \quad (1)$$

ここで μ は磁気双極モーメント、 $\hat{\mathbf{r}}$ は動径方向の単位ベクトル、 $t_r = t - r/c$ は遅延時間、 c は光

速、 $\dot{\cdot}$ は t での偏微分を表す。この形式は回転する中性子星を見る観測者系でのみ妥当である ([2])。磁気双極モーメントは、中性子星の回転軸を z 軸方向にとり、2つの軸の間の角度を α 、角速度を Ω とすると次の形で書ける。

$$\vec{\mu}(t) = \mu(\sin \alpha \cos \Omega t \hat{x} + \sin \alpha \sin \Omega t \hat{y} + \cos \alpha \hat{z}). \quad (2)$$

次に、放射方向については局所共回転系において磁場に沿った方向とする。また、粒子の運動については Force-Free 条件、

$$\mathbf{E} = (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}/c. \quad (3)$$

が成り立っているとす。ここで \mathbf{E} は電場ベクトルである。観測者系における放射方向を計算するため、 $|\vec{\beta}_0| \rightarrow 1$ とし、さらに観測者系、局所共回転系での速度が以下の形で書けることを使う。

$$\vec{\beta}_0 = \beta_{\parallel}' \hat{\mathbf{B}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}/c, \quad (4)$$

$$\beta_{\parallel}' = -\hat{\mathbf{B}} \cdot (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}/c) + \{[\hat{\mathbf{B}} \cdot (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}/c)]^2 - (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}/c)^2 + 1\}^{1/2} \quad (5)$$

放射効率については、ここでは一様を仮定する。また、放射領域については Takata et al.(2008)[8] に従い、ヌル面から光円柱までの距離 r_{lc} とする。モデルでは外向き、内向き両方の放射を考慮する。

モデルパラメーターとしては、幾何学に起因する傾き角 α 、見込み角 ζ の他に、高さのパラメーター R_0 を導入する。これは磁力線が星を貫く位置を特徴づけ、ポラーキャップの半径で規格化された値である。これまでの研究では、ほとんどが単一の波長での光度曲線の振る舞いの再現を目的としているため、このパラメーターは導入されていない。しかし、本研究は多波長の振る舞いを同時に説明することを目的とするため、波長ごとに振る舞いの違うパルサーについてはある単一の R_0 だけでなく、これをパラメーターとして拡張する必要がある。

以上の仮定を採用してモデルパラメーターを指定することで光度曲線が描け、ピークの数、周期におけるピークの位置、電波とのずれが得られる。ここで電波は磁極から放射されることを仮定する。

3 Results

比較を行うサンプルについては、(1) 電波、 X 線とその他の波長で非熱的成分のパルスが検出されており、(2) 幾何学的パラメーター (α, ζ) に対して制限が得られているものとする。結果の妥当性の基準については、計算結果にコースティクスがあるものの観測ではピークが存在しないことについては放射効率を一定とした仮定が正しくない可能性があるが、逆に観測されているピークの位置にコースティクスがない場合は妥当でないとみなす。

6 天体について比較を行った結果、すべてにおいてそれぞれの波長で観測されるピークの位置に対応するコースティクスの存在が確認できた。また、Takata et al. (2008)[8] の描像と同じく、 X 線は外向きの放射のみで再現できるものの X 線は内向きを考慮せねばならず、また可視光については X 線の放射領域より高い領域からの放射がつくるコースティクスを導入する必要がある。

4 Discussions

観測結果と計算結果との比較を行った結果、モデルは観測結果を再現できることがわかった。しかし、この結果は一般的にデッドゾーンと呼ばれる領域からの放射を考慮しなければならない。しかし、この領域はあくまで粒子が共回転する場合の回転速度が光速以下であるという領域にすぎず、本当に電場加速が起きていないかどうかは自明ではない。実際、最近行われたパルサー磁気圏に関する粒子シミュレーションでは、より小さいデッドゾーンの形成を示唆している ([11])。

ただし我々の結果は磁場構造に依存することが避けられない。Force-Free 条件のもとでのパルサー磁気圏についてのシミュレーションの結果 (例えば、[3, 5]) では、磁場構造は双極型よりも開いた構造をしている。よって、光円柱付近でわずかに磁場構造が変化することで、厳密な双極磁場では内側にあり、実際には外側にある磁力線からの放射を見ている可能性がある。

また、個々のパルサーに対して加速領域の高さとパルサーの特性年齢、スピンドアウン光度、傾き角などのパラメーターとの関係について調査を行ったが、6 天体というサンプルの少なさから、明らかな相関関係は得られなかった。今後、線パルサーに対して X 線、可視光でのパルスサーチによりサンプル数が増加すれば、相関関係が明らかになる可能性があり、これは磁気圏構造への重要な制限となりうる。

5 Conclusions

本研究では、パルサー磁気圏からの放射領域を拡張することにより、多波長の光度曲線の振る舞いが説明可能かについて調査を行った。その結果、Takata et al. (2008)[8] で主張された Vela パルサーの多波長の光度曲線を説明するモデルの描像は、他のパルサーに対しても適応可能であることを示した。ただし、一般的なデッドゾーンよりも内側の領域からの放射を考慮せねばならず、このことは本当にデッドゾーンが一般的なものより小さいのか、磁場構造が双極磁場からずれていることからきているのかはわからない。今後、線パルサーに対して X 線、可視光でのパルスサーチでサンプルが増加することで磁気圏構造への制限が期待できる。

参考文献

- [1] Abdo, A. A., et al. 2010, *ApJS*, 187, 460
- [2] Bai, X.-N., & Spitkovsky, A. 2010 *ApJ*, 715, 1270
- [3] Contopoulos, I., Kazanas, D., & Fendt, C., 1999, *ApJ*, 511, 351
- [4] Goldreich, P., & Julian, W. H. 1969, *ApJ*, 157, 869
- [5] Ogura, J., & Kojima, Y., 2003, *Prog. Theor. Phys.*, 109, 619
- [6] Romani, R. W., & Watters, K. P. 2010, *ApJ*, 714, 810
- [7] Saz Parkinson, P. M., et al. 2010, *ApJ*, submitted (arXiv:1006.2134)
- [8] Takata, J., Chang, H.-K., & Shibata, S. 2008, *MNRAS*, 386, 748
- [9] Thompson, D. J. 2004, in *Cosmic Gamma Ray Sources*, ed. K. S. Cheng & G. E. Romero (Dordrecht: Kluwer), 149

- [10] Venter, C., Harding, A. K., & Guillemot, L. 2009, *ApJ*, 707, 800
- [11] Wada, T., & Shibata, S. 2007, *MNRAS*, 376, 1460