

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：53601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03934

研究課題名(和文) PCクラスタを用いた光度と位相変化に伴う中性子星のサイクロトロン線の研究

研究課題名(英文) Study of variations of cyclotron lines in neutron stars with luminosity and pulse phase using PC cluster.

研究代表者

西村 治 (Nishimura, Osamu)

長野工業高等専門学校・情報エレクトロニクス系・教授

研究者番号：10259864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：中性子星のサイクロトロン吸収線のエネルギーが光度変化によって変化するモデルの構築し、シミュレーションを行った。Vela X-1では、基本波の吸収線構造が非常に浅い特徴や吸収線のエネルギーは光度が上がると一旦減少してから増加する傾向が見られる。ここでは、重力レンズ効果により吸収線が2重に形成されることについて調べ、重力レンズ効果により形成されている吸収線と考えることができることを示した。この場合、Vela X-1は今まで見積もられていた磁場の強さの5倍の強さになることがわかった。A0535+262でも同様のシミュレーションを行い、10の13乗ガウスにも及ぶ超強磁場中性子星であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙において最も強い磁場を持つ天体の中性子星の磁場強度を直接測定できる唯一の方法であるサイクロトロン吸収線のエネルギーについて、シミュレーションを行った。中性子星の磁極付近で形成される降着円柱内での降着ガスによるドップラー効果と重力による光の曲がる効果を考慮することによって、観測結果と一致する新たな結果を得ることができた。これにより今まで見積もられていた磁場の強度よりも5倍程度強い磁場を持つ可能性について示唆することができた。今後のより詳細な観測データにより、この結果が正しいかがより明確になると予想される。

研究成果の概要(英文)：I compute cyclotron absorption line in neutron stars numerically, building a model that is able to reproduce a variation of the observed energy of absorption line with luminosity. In Vela X-1, the energy of the absorption line tends to decrease once and then increase with increasing luminosity. I examined double absorption features are formed via gravitational light bending. As a result, I found that the absorption line is likely to be formed via gravitational light bending. That suggests that in Vela X-1 the magnetic field strength becomes 5 times stronger than the value that the energy of the absorption line has implied. I also tried calculating absorption lines in A0535+262. In this object, the characteristics similar to Vela X-1 can be explained by the same model. Thus, the two absorption lines in A0535+262 can be formed by gravitational light bending. Therefore, my simulations suggest that A0535+262 is an object having a superstrong magnetic field over the 13 power of 10.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線パルサー 中性子星 サイクロトロン線 磁場

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 降着 X 線パルサーは、連星系の伴星からのガス降着による重力エネルギーの解放により X 線を放射しており、磁気軸と回転軸がずれていることからパルス波として観測される。この現象は、地球の極付近で太陽風により発光するオーロラと類似している。中性子星でも磁極付近にガスが降着し、降着円柱が形成されて、X 線が放射される。従って、X 線放射領域である降着円柱の構造を理解することは降着 X 線パルサーの放射メカニズムを考える上で重要な課題となる。しかし、この円柱の幾何学的構造は降着の仕方により、複雑な構造になる可能性があり、いまだよくわかっていない。これを調べる手がかりを与えるのが吸収線の構造である。

(2) 吸収線は降着円柱内でサイクロトロン共鳴散乱により形成され、吸収線の特徴は磁場の強度だけでなく降着円柱の幾何学的構造やプラズマの物理状態により変化する。加えて、今回着目するガス運動が効く場合は吸収線の特徴は大きく変化することから、ガス運動を調べる上でも重要な手段となる。こうして、吸収線の構造やその変化から降着円柱の構造だけでなくプラズマの物理的特徴や運動がどのように変化しているかを調べることができる。

### 2. 研究の目的

(1) 近年、吸収線のエネルギーや構造の変化はパルス位相で変化するのに加え、光度変化によっても変化することがわかってきた。しかし、どちらの変化もまだ十分に説明できていない。本研究では降着物質の運動を考慮することによってこれらの現象を調べ、統一的な解釈ができるようになることを目的とする。

(2) 吸収線形成領域では連続成分形成領域とは異なった降着物質の運動をしている点に着目し、世界初となる二次元での強磁場中の吸収線の計算を行う。これにより、二次元構造を考えることで今まで無視されてきたビームパターン変化に伴う降着物質運動の変化を調べることを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究の二次元モデルでは、降着物質の運動が無視できない領域を考える。この場合、上方から高速で降り注いでくる電子との散乱のために下方への散乱確率が高くなり、散乱の対称性は破れる。従って、本研究を遂行するために、降着物質の速度の影響を考慮しやすいモンテカルロコードへ改良を行ってきた。また、このモンテカルロ法を用いた大規模な計算を実行するために、並列計算を実行するコードへ改良する。

(2) ビームパターンの変化を考慮して、光度が変化した時の吸収線のエネルギーと構造の変化を計算する。このような方法により観測されている光度変化に伴う吸収線のエネルギーと構造の変化の原因を解明する。観測では、一回転の中の位相ごとのスペクトルも解析されている天体がある。そこで、重力により光が曲がる効果を考慮し、2つの磁極からの放射の重ね合わせを計算する。

### 4. 研究成果

(1) 吸収線が光度変化に伴ってどのようにエネルギーや吸収線構造が変化する可能性があるかのシミュレーションを行った。この問題を解明するために、輻射輸送の効果から降着円柱の壁付近では輻射圧が減少するためガス運動の減速が弱くなることに注目した。これにより吸収線形成がこの壁付近の領域で主に起こることから、二次元で考えることで今まで行われてきたシミュレーション結果とは異なる特徴が現れることがわかった。また観測結果では、光度が上がるとともに吸収線のエネルギーが増加する場合と減少する場合があり、この2つの場合を同時に矛盾なく説明できる理論モデルはまだ無く、このモデルの構築が重要な課題となっている。本研究では、光度変化にともなう二次元での降着円柱内の幾何学変化とガスの運動の変化を考慮することで、吸収線のエネルギーが増加する場合と減少する場合を再現することが可能となった。また、エネルギーだけでなく、吸収線の幅や深さの変化についても概ね再現することができ、観測に合うモデルを構築することができた。

(2) 降着円柱の壁付近で、ガス運動の減速が弱くなる効果に加えて、連続成分の放射の異方性と重力により光の経路は曲げられる効果も考慮して計算を行った。この計算結果から、2つの基本波の吸収線構造が作られる場合があることがわかった。ただし、エネルギーの低い側に現れる基本波の吸収線は非常に浅いことが多い。その結果、多くの天体で観測では確認できない可能性があることが予想される。従って、2つの基本波が見える場合と見えない場合で吸収線のエネルギーの変化が異なった性質を示すことが起こりうる。その結果、同じ事が起こっているにもかかわらず、振る舞いの異なる天体が現れることが理論的シミュレーションにより示すことができた。

(3) (2)では、GX304-1 などの比較的低い光度で起こる光度が上がるるとともに吸収線のエネルギーも増加する現象について計算を行っていた。そこで次に、Vela X-1 の観測の基本波で見られるような大変浅い吸収線構造について、シミュレーションを行うことで特徴を調べた。観測では、光度が上がるとともに吸収線のエネルギーがほとんど変化しない天体や一旦エネルギーが減少する天体もあり、どのような原因で天体によって異なった振る舞いをするかについて、まだ統一的な説明ができる理論的なモデルがない。Vela X-1 では、基本波の吸収線構造が非常に浅い特徴だけでなく、吸収線のエネルギーは光度が上がると一旦減少してから増加する傾向が見られることから、本研究のモデルにより、シミュレーションを試みた。低エネルギー側の浅い吸収線を調べるには、エネルギー分解能が高い 25keV 付近に吸収線が現れる Vela X-1 が非常に適した天体であり、重力レンズ効果により吸収線が 2 重に形成されている可能性について調べた。図 1 に示されたシミュレーションの結果は Vela X-1 の観測の特徴とよく一致することがわかった。ここでは、吸収線のエネルギーが光度の増加に伴い一旦減少後、増加する特徴と位相ごとのスペクトルで基本波と第一高調波のエネルギー比が 2 から大きくずれる特徴をよく再現することができた。この結果から Vela X-1 のスペクトルの特徴が重力レンズ効果により形成されている吸収線と考えることが良さそうであることがわかった。この場合、Vela X-1 は今まで見積もられていた磁場の強さの 5 倍の強さになることがわかった。また、これにより GX304-1 と Vela X-1 では光度変化に伴う吸収線のエネルギー変化が異なる振る舞いをしているがそれは単に 2 つの基本波のうちの高いエネルギーの方の吸収線のみを GX304-1 では見ていたにすぎないといえることがわかった。図 2 で示されているように Vela X-1 の 2nd line (第一高調波) の変化は GX304-1 とよく一致しており、GX304-1 では、1st line (基本波) が浅すぎて確認できないと考えると 2 つの天体の振る舞いが上手く説明できる。

(4) (3)での計算を A0535+262 という Vela X-1 の 2 倍の吸収線のエネルギーを持つ天体での吸収線の特徴も同様にシミュレーションを行った。ここでも図 3 のように Vela X-1 と同様の特徴を再現することができ、重力レンズ効果により吸収線が 2 重に形成されている可能性がある。その場合、A0535+262 は 10 の 13 乗ガウスにも及ぶ超強磁場中性子星であるということになることがわかった。また、中国の X 線天文衛星 Insight-HXMT によって 100keV 以上に及ぶ高エネルギーまで観測されたデータを用いて、GX301-2 についても本研究のモデルを用いてスペクトルフィッティングを行ったところ、シミュレーションの結果と上手く合った。この結果から GX301-2 についても吸収線のエネルギーから見積もられる磁場よりも強い磁場を持っている可能性が示唆された。

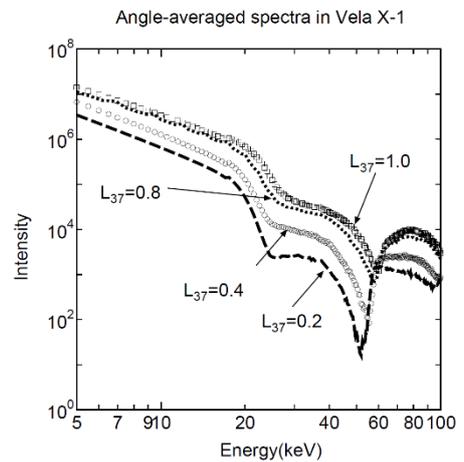


図 1 VelaX-1 のスペクトル

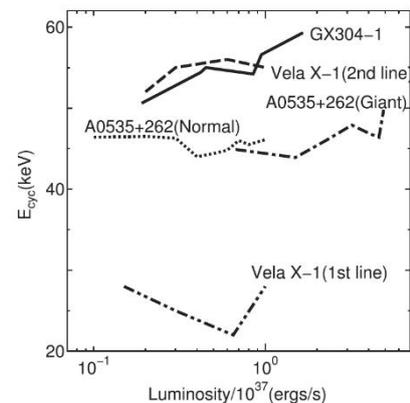


Fig. 11. Trends of variation of observed  $E_{cyc}$  as a function of luminosity for GX 304-1, A0535+262 and Vela X-1. Error bars are ignored. The solid line denotes  $E_{cyc}$  of the fundamental line in GX 304-1 (Malacaria et al. 2015). Dashed and double-dot-dashed lines denote  $E_{cyc}$  of the second harmonic and the fundamental line in Vela X-1 (Fürst et al. 2014), respectively. Dotted and dot-dashed lines denote  $E_{cyc}$  of the fundamental line for normal outbursts (Ballhausen et al. 2017) and a giant outburst Sartore et al. (2015) in A0535+262, respectively.

図 2 光度と吸収線のエネルギー

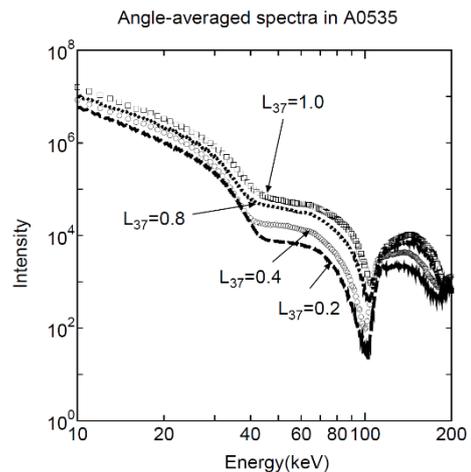


図 3 A0535+262 のスペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 X. Chen, W. Wang, Y. M. Tang, Y. Z. Ding, Y. L. Tuo, A. A. Mushtukov, O. Nishimura, S. N. Zhang, M. Y. Ge, L. M. Song, F. J. Lu, S. Zhang, J. L. Qu	4. 巻 919
2. 論文標題 Relation of Cyclotron Resonant Energy and Luminosity in a Strongly Magnetized Neutron Star GRO J1008-57 Observed by Insight-HXMT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 33-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1268	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwakiri Wataru B., Pottschmidt Katja, Falkner Sebastian, Hemphill Paul B., F?rst Felix, Nishimura Osamu, Schwarm Fritz-Walter, Wolff Michael T., Marcu-Cheatham Diana M., Chakrabarty Deepto, Tomsick John A., Wilson-Hodge Colleen A., Bissinger K?hnel Matthias, Terada Yukikatsu, Enoto Teruaki, Wilms J?rn	4. 巻 878
2. 論文標題 Spectral and Timing Analysis of the Accretion-powered Pulsar 4U 1626?67 Observed with Suzaku and NuSTAR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 121 ~ 137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1f87	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimura Osamu	4. 巻 71
2. 論文標題 Influence of bulk motion of an infalling plasma in line-forming region on cyclotron line in accreting X-ray pulsars	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishimura Osamu	4. 巻 74
2. 論文標題 Variations in energy of cyclotron lines with double structures formed in a line-forming region with bulk motion in accreting X-ray pulsars	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 961 ~ 973
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西村 治
2. 発表標題 中性子星のサイクロトロン線へのバルクモーションの影響
3. 学会等名 「～中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ 2021」
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------