

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400221

研究課題名(和文) パルサー・マグネター状態遷移から探る粒子加速機構および量子電磁気学効果の研究

研究課題名(英文) Particle Acceleration mechanisms and QED effect through intermittent phenomena in the pulsar magnetosphere

研究代表者

柴田 晋平 (Shinpei, Shibata)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：90187401

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：状態遷移するパルサー磁気圏の極冠における粒子加速プロセスを解明するための基礎的な粒子計算コードを開発することに成功した。とくに、従来正しくなかった境界条件の正しい扱い方を発見し、電流の遷移をシミュレートすることに成功した。PED効果として電子対生成を取り入れる予備的な数値計算にも成功した。

今後につなげるために磁気圏パラメータによるパルサーからのX線光度の変動について調べた。結果、統計的に有意にX線高度と回転パワーが相関していることを示した。

研究成果の概要(英文)：I developed a basic numerical code for Particle-in-simulation for investigating particle acceleration mechanism in the pulsar magnetosphere which transits one current to another current value. In particular, the code enable us to treat properly the boundary condition which can change current density. For the application to the QED effect, I also make experiment for electron-positron pair creation to find a good result. In order to compare the result with observation, I studied the X-ray luminosity and find that a hidden correlation between the X-ray luminosity and the rotation power of the pulsars.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：高エネルギー天文学 X線 ガンマ線 粒子加速機構 中性子星 パルサー マグネター

1. 研究開始当初の背景

10^{12} ガウスあるいはさらに数千倍も強い磁場を持つ中性子星(パルサーやマグネター)が発見され、強磁場の起源と中性子星の形成の問題、超強磁場中の物理現象(量子電磁気学(QED)効果、粒子加速、放射機構)が注目されている。近年、ガンマ線天文学の進歩により、粒子加速機構はかなり理解がすすみ、観測的にはアウターギャップの存在が強く示唆される中、我々は世界で初めて粒子シミュレーションに依ってアウターギャップの存在を証明し、磁気圏での粒子加速機構の基本部分が解明された(Wada & Shibata 2007, Yuki & Shibata 2012)。

より基本的な問題として、電子陽電子対生成や光子分裂などの QED 効果の研究、45 年来の問題であるパルサーの電波の原因、中性子星の強磁場の起源の問題がある。これらの問題のブレークスルーになるかもしれない新しい観測事実が電波観測から得られ注目されている。それは、電波観測で磁気圏の状態遷移が起こりそれにリンクして X 線・ガンマ線放射や粒子加速が変動することが分かったことである。今後の研究動向として電波・X 線の同時観測が重要なる。この観測の動向に呼応した理論的な研究を推進しようというのが本計画のモチベーションである。

[新しい観測事実 2012!] 電波パルスの様子が異なった二つのモードを持ち、それが不規則にモードチェンジする電波パルサーが存在する。その中の一つである PSR B0943+10 を X 線で観測し、光子を丁寧にモードごとに分けて、スペクトルを調べた研究が今年発表された。電波で明るいとき X 線は非熱的で暗く、電波で暗い時は X 線では明るく熱的成分が出現した。これは我々が計画している電子陽電子対生成を含んだ粒子加速の粒子シミュレーションの描像に非常に近い。つまり、電子陽電子対生成と粒子加速、電波放射機構、中性子星の加熱がリンクして放電が起こっている。

このような理論的な予想に対応した新しい観測がさらに二つ見つかって来た。普通の回転駆動型パルサーであったものが急にバーストを起こしマグネターの性質を示し始めた(Kuiper & Hermsen 2009)、あるいは、逆に、マグネターと認識されていた天体が突然電波パルサーになったと言うように(Bernardini et al. 2011)、電波パルサーとマグネターの間を状態遷移する中性子星が見つかっている。これも我々が持つ理論的なシナリオとマッチするものである。つまり、 10^{15} ガウスの超強磁場が光子分裂を促進し、電子陽電子対生成を抑制し、電波放射をコントロールしている。さらなる理論的に説明可能な新しい観測事実として電波放射を数日という時間スケールで ON/OFF するという新種のパルサー(intermittent pulsar)が

発見されそれらのパルサーでは磁気圏の粒子加速領域を流れる電流が実際に流れたり切れたりしていることが分かった。(Krammer 2008, Comlo et al 2011 他多数) さらに、理論研究ではわれわれの粒子シミュレーションで示されたアウターギャップでの加速が再現されないと主張する研究が発表され、新たな課題となった。両者の主張の違いは、磁気圏内の QED 効果によっておこる電子陽電子対生成の取り扱いによると予想される。したがって、正しい、電子陽電子対生成の取り扱い方法に関する研究が必要になったこともこの課題の必要となった背景にある。

2. 研究の目的

100 兆ガウスを上回る超強磁場中の粒子加速機構と電磁波放射機構を、唯一の実験場である中性子星の磁気圏を舞台に研究する。特に、最近発見された磁気圏の状態遷移現象を利用して、これまで未解決だった光子分裂などの量子電磁気学効果(QED)の役割および X 線・ガンマ線の放射機構を明らかにすることを目的とする。その手法として、パルサー磁気圏での粒子加速を第一原理から世界で初めて証明した私たちの粒子シミュレーションを発展させ、時間変動を追える計算を実施する。後述するように、この結果は、中性子星の磁場(マグネター)の起源と中性子星の形成の問題、ブラックホールでの粒子加速機構など隣接分野へ大きな貢献をすることができる。

また、このような理論と観測とを比較するには観測データのコンパイルとその統計的性質の検討が必要である。

[何をどこまで明らかにするか] 中性子星磁気圏の粒子加速と電磁波放射を、磁力管内での電子陽電子対生成による放電現象としてとらえ、その時間変動を粒子シミュレーションの手法を用いて解明する。急速に進む観測事実の説明を徹底して行う。

これまでの研究により以下の事が示唆されている。磁気圏内はプラズマが非常に欠乏しており、容易に沿磁力線電場が発生する環境にある。電場が発生し粒子が加速されると中性子星の起電力はとて大きいのでガンマ線が放射される。放射されたガンマ線は強磁場のため磁氣的な対生成を起こして、大量のプラズマを供給しそのなかで電波が増幅され電波パルサーが観測される事になる。このようなプロセスを数値シミュレーションで再現するがそのなかに、QED 効果、非定常性を入れて研究する必要がある。

3. 研究の方法

本研究では、電場発生→電子陽電子対生成開始(電波放射)→電子陽電子対プラズマによる電場のスクリーン→対生成の停止(電波の

停止)→電場の発生、というサイクルがどのような条件でどのような変動を示すかを粒子シミュレーションで明らかにする。

1次元、2次元軸対象のPICシミュレーションによって、電子陽電子対放電の性質を調べる。ここで、対生成プロセスは光子分裂やバーストによる外部光子の変動など現実的なパルサーやマグネターの状況を再現するようにシミュレーションする(QED 効果部分)。積極的に電波・X線・ガンマ線の同時観測結果と比較し、実証的に粒子加速と電子陽電子対生成の関係を明らかにする。観測との比較を重視する。QED効果はモンテカルロシミュレーションを行いPICとリンクさせる。

最近の観測の進歩により高感度のX線・線のパルスのスペクトルやパルス波形にかんする研究がたくさんなされた。しかも、継続的な観測によりその時間変動の事実も明らかになっている。ただし、電波に比べX線・線の時間変動の観測はまだすくない。

本研究ではこれまでの観測データを集積しパルサーパラメータとX線・線の観測データベースを構築する。また、それを解析するための統計解析ソフトをマルコフ過程シミュレータを新たに作成する。

研究計画上の3つのポイント

1. 1次元、2次元(軸対象)のPICシミュレーションに依る電子陽電子対放電のシミュレーション
2. 電波、X線ガンマ線による観測に関する情報収集、共同研究
3. 量子電磁気学的なシミュレーションとの連携

研究目的を達成するためには、上記3つの項目を実施しなければならない。

(1. について)まず、粒子加速と電子陽電子対の生成を解く事のできる粒子シミュレーションコードの開発と計算の実施。コード開発はこれまで加藤恒彦氏の協力を得てPICコードの開発をおこなっていた。本計画ではこの研究テーマに興味を持つ木坂将太氏(宇宙線研究所)の協力を得ておこなう。なお、このプロジェクトには当大学院博士過程前期の学生1名および東北文教大学の犬野寛氏が参加する事が決まっている(共同研究実績 Ohno, Takizawa & Shibata 2001 他2件)。

(2. について) 本研究には対応する、電波およびX線の観測の最新結果との比較が非常に大切である。このため観測的にマグネターや電波パルサーの研究をここなっているチームとの連携が欠かせない。これまでにマグネターの研究を共に行ってきた榎戸輝揚氏(理研/NASA)(共同研究実績:Enoto et al 2019 他1件)およびD. Manchester(CSIRO)氏(共同研究実績:Takahashi et al 2001 他2件)の協力を得る。特に、オーストラリアの研究者とはこれまででも親密な関係にある。

(3. について)シミュレーションの中に、超強磁場中の光子分裂や共鳴散乱のQED効果を入れる事が重要であるが、このテーマでこれまで共同研究を行っている高田順平氏(香港大学)と共同で、この効果をPICコードと連結させる作業を行う。(共同研究実績:Takata, Shibata & Enoto 2012, Takata, Cheng & Shibata 他5件)

計算機資源については1次元、2次元計算では研究室のワークステーションおよび大学内の情報基盤センターの並列計算機で十分な結果を出すことができる。しかし、非常に多くのパラメータで放電現象の変化を見る事になると予想されるので、その場合と、後半で3次元計算を行う場合は国立天文台等共同利用の計算機を使う予定である。

研究費は従って、PCの一回の更新(院生用を含めて2台)とそれ以外は研究打合せ、情報収集のための旅費である。特に最新の観測情報収集は競争が激しくなるとおもわれるテーマなので重視したい。協力研究者である榎戸氏、高田氏はいずれも海外であるので旅費等を確保して研究打合せの機会を確保したい。

4. 研究成果

以下のような成果を得た:

(1)斜め回転を含んだ一般のパルサーの極冠の電磁場・プラズマを扱うための定式化をおこなった。これは従来より発展させ、磁化軸と回転軸が斜めの場合も取り扱える定式化を行った点がユニークである。これまでパラメータとして磁力線に沿った電流を与えてしまうことにしていたが、電流が変動する場合の定式化を初めて提出した。これによって、状態遷移する磁気圏のシミュレーションをするための基本方程式を得ることができた。

(2)パルサーの極冠のプラズマの運動するための粒子コードの開発(1次元)を行った。ゴールドライク・ジュシアン電流より小さい電流があるときは空間的に振動する電流が一般解として知られているが同時に、トラップされたプラズマを含む定常電流の解があることを示した。(柴田他、日本天文学会2014春の年会)つまり、同じ電流に対してことなつた二つの状態が存在することが分かった。これは、磁気圏の状態遷移と深く関わっていると予想される。

シミュレーションコードは電磁動力学1次元コードでありパルサーのポラーキャップに発生した電子・陽電子流を扱うことができる。また電磁波の放射も扱うことができる。パーティクル・イン・セル(PIC)法を用いた。電磁場はカエル跳び法によってマクスウェル方程式を積分する。磁気圏の状態遷移は外部磁気圏から電磁波の形で伝播し、それが中性子星表面に到達した時、表面からの粒子の放出量のコントロールが起こり、それが

外部磁気圏に伝播していく。このようなプロセスを初めてシミュレーションすることができた。

(3)極冠のプラズマを粒子コードで扱うための境界条件の与え方が従来の研究のものは間違っていたことを初めて示した。そのため極冠の電流の時間変動は非常に滑らかに起こる。従来の研究では乱流や加熱が起こることされていたがそれは計算上の誤りで、実際には電流変化によってプラズマの加熱が起こらないことがわかった。

この事実に関しては論文投稿時にレフリーの理解が得られない状況となっており残念である。

(4)計算結果を観測を比較するための準備として、パルサーからのX線の光度と回転パワーの相関関係を検討した。従来は相関があるものの統計的に有意ではないとされてきた。しかし、見る角度による変化分に相当する幅を考慮して統計モデルを再構築したところ、表向きは見えなかった隠れた相関があることを示すことができた(Shibata et al. 2017)。この結果によるとX線光度 L_x は回転パワー L_{rot} に比例しており、 $\log L_x/L_{rot} = -2.7$ であることがしめされた。従来、X線光度と回転パワーの依存性について異なった結果がでているのはサンプルの選び方によることも示した。また、見る角度によって生じる分散と同じ分布をもつ別の分散要因があることをしめした。それは、パルサー星雲のX線光度の示す分散と磁気圏放射の示す分散が相関を持っていることから示された。

この結果はまた、新しい理論的課題を今、提出している。つまり、パルサーからのX線光度をコントロールする要因と同じ要因がパルサー風の性質をコントロールし、その結果としてパルサー風のX線光度をコントロールすることになっていることが明らかになったのである。翻って考えてみると、パルサーからの磁気圏X線の原因はまだ特定されていない。パルサー星雲の粒子加速機構も特定されていない。この問題についての大きなヒントを与えたのである。

現在、改めてX線を放射機構を検討する研究を始めた。とくに、強磁場中の共鳴コンプトン散乱やQED効果によるシンクロトロン放射効率の変化、講師分裂などが重要になっている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

(1) S. Shibata, E. Watanabe, Y. Yatsu, T. Enoto and A. Bamba, "X-ray and Rotational Luminosity Correlation and Magnetic Heating of the Radio Pulsars", *Astrophys. J.*, 査読有り, Vol. 833, 2016 10, pp. 59-73, doi:10.3847/1538-4357/833/1/59

(2) Enoto T., Shibata S., Kitaguchi T., Suwa Y., Uchide T., Nishioka H., Kisaka S., Makishima K., "Magnetar broadband X-ray spectra correlated with magnetic fields: Suzaku archive of SGRs and AXPs combined with Nustar, Swift and RXTE.", *ApJ Suppl.*, 査読有り, 印刷中, 2017

(3) Yoichi YATSU, Jun KATAOKA, Yosuke TAKAHASHI, Yutaro TACHIBANA, Nobuyuki KAWAI, Shimpei SHIBATA, Sean PIKE, Taketoshi YOSHII, Makoto Arimoto, Yoshihiko SAITO, Takeshi NAKAMORI, Kazuhiro SEKIGUCHI, Daisuke KURODA, Kenshi YANAGISAWA, Hidekazu HANAYAMA, Makoto WATANABE, Ko HAMAMOTO, Hikaru NAKAO8, Akihito OZAKI8, Kentaro MOTOHARA9, Masahiro KONISHI, Ken TATEUCHI, Noriyuki MATSUNAGA, Tomoki MOROKUMA, Takahiro NAGAYAMA, Katsuhiko MURATA, Hiroshi AKITAYA, Michitoshi YOSHIDA, Gamal B. Ali1, A. Essam Mohamed, Mizuki Isoga, Akira ARAI, Hidenori TAKAHASHI, Osamu HASHIMOTO, Ryo MIYANOSHITA, Toshihiro OMODAKA, Jun TAKAHASHI, Noritaka TOKIMASA, Kentaro MATSUDA, Shin-ichiro OKUMURA, Kota NISHIYAMA, Seitaro URAKAWA, Daisaku NOGAMI, and on behalf of OISTER team, "Multi-wavelength observations of the black widow pulsar 2FGL J2339.6-0532 with OISTER and Suzaku", *Astrophys. J.*, 査読有り, vol. 802, 2015, pp. 84-95p DOI: 10.1088/0004-637X/802/2/84

(4) Yasuda T., Iwakiri W.B., Tashiro M. S., Terada Y., Kouzu T., Enoto T., Nakagawa Y.E., Bamba A., Shibata S., Makishima K., and The Suzaku-WAM team, "Sub-MeV Band Observation of a Hard Burst from AXP 1E 1547.0-5408 with the Suzaku Wide-band All-sky Monitor", *Pub.Aast. Soc. J.*, 査読有り, vol. 67, 2015, pp. 41-53, DOI: 10.1093/pasj/psv011

[学会発表](計20件)

(1)柴田晋平, 「中性子星の理論的研究の課題と展望」高エネルギー宇宙物理連絡会 2017 03 10 名古屋大学東山キャンパス(愛知県、名古屋市)

(2)柴田晋平, 「電波パルサーのX線光度を決定する要因について」日本天文学会秋の年会、2016 09 16 愛媛大学(愛媛県、松山市)

(3) Shibata S. "X-ray and rotational

luminosity correlation and magnetic heating of the radio pulsars”
Workshop on “The Physics of the Pulsar Magnetosphere” 2016.6.8 Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, (USA)

(4) 柴田晋平, 「パルサーからのX線放射と中性子星の種族」青山学院大学談話会 2016.02.18 青山学院大学(神奈川県、相模原市)

(5) 柴田晋平, 「中性子星の種族とX線放射について」中性子星研究会 2015 12 24 京都大学(京都府、京都市)

(6) 柴田晋平, 2016 09 08 パルサー磁気圏の多様性/パルサー星雲 中性子星勉強会@蔵王主催(山形市、蔵王温泉)

(7) 柴田晋平, 「Topics from Pulsar Electrodynamics Riken symposium, Comprehensive Studies of Neutron Star 2015 11 24 理科学研究所(埼玉県和光市)

(8) 柴田晋平, 2015 11 25 高エネルギー宇宙物理研究会 2015 「散逸性(マグネター様)磁場を持つ電波パルサーの探査と中性子星の種族」味わいの宿ときわや(静岡県沼津市)

(9) S. Shibata, Topics from Pulsar Electrodynamics (Comprehensive Studies of Neutron Stars (RIKEN Symposium) invited talk 理化 2015 11 24, 学研究所、仁科ホール(埼玉県和光市)

(10) チャンドラ衛星を用いた中性子星の活動性磁場の探査 渡邊瑛里、柴田晋平(山形大学)、谷津陽一(東京工業大)、榎戸輝揚(京都大学) 日本天文学会、秋の年会 2015.9.10(兵庫県、甲南大学)

他 10 件

〔図書〕(計 1 件)

Shibata S., "The structure of the pulsar magnetosphere via particle simulation with GRAPE", 査読有, 2013, 分担執筆 "Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years", 編者 J. van Leeuwen (ed.), IAU Symposium 291, pp. 279-282, doi: 10.1017/S1743921312023861

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://astr-www.kj.yamagata-u.ac.jp/~shibata/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 晋平 (Shinpei Shibata)

山形大学・理学部・教授

研究者番号: 90187401

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

高田 順平 (Junpei Takata)