

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月14日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05360

研究課題名(和文) 超強磁場中でのニュートリノ・光子の放出とマグネターの磁場構造の研究

研究課題名(英文) Radiation of Neutrino and Photon in Super Strong Magnetic Field and Magnetic Structure of Magnetars

研究代表者

丸山 智幸 (MARUYAMA, Tomoyuki)

日本大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：50318391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：強磁場中での陽子や電子等のシンクロトロン放出による粒子生成の研究を行った。本研究では、ランダウ準位間遷移を計算することで、従来あまり行われていなかった相対論的量子論の枠組みでの理論研究に成功し、これまで計算が出来なかった観測量の詳細を正確に議論できるようになった。特に、TeVエネルギー領域での量子論計算方法は、我々が世界で初めて確立したものである。この方法で、超強磁場中性子星からの、数百GeVから数TeVのエネルギーを持つ高エネルギー中間子生成、アクシオン生成、ニュートリノ反ニュートリノ対生成の理論計算を行い、高エネルギー宇宙線の発生機構、超強磁場中性子星で特徴的な冷却機構の研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非常に強い磁場を持つ中性子星においては、電子、陽子等の粒子が磁場の力により螺旋運動(シンクロトロン運動)を行い、光子等の粒子を放出(シンクロトロン放射)する。そして、その放出粒子を観測すれば、磁気構造について多くの情報が得られると期待されている。しかしながら、従来の理論計算は半古典論のもので、結果の正確性には疑問がもたれていた。本研究において、我々は相対論的量子論により正確な理論計算法を確立することに成功した。本研究の成果により、中性子星等の構造についてより定量的な詳しい議論が可能となり、天文学以外のシンクロトロン放射に関する理論計算の改良にも貢献するであろう。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have studied particle production from synchrotron radiation of protons and electrons in strong magnetic fields. Here, we have performed the relativistic quantum calculation, which has not been done so much, by considering particle transitions between two Landau levels. Then, we can correctly discuss details of observables which has not been calculated. Particularly, it is the first in the world to establish the approach to calculate particle productions in TeV energy region in the relativistic quantum framework. In actual, we have calculated production of high energy pion, axion and neutrino-antineutrino pair in highly magnetized neutron stars, and have studied generation mechanism of high energy cosmic rays and characteristic cooling mechanism of them.

研究分野：原子核理論

キーワード：強磁場 粒子生成 相対論的量子論 中性子星 冷却過程

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

表面で  $10^{15}\text{G}$ 、内部で  $10^{16}\text{--}10^{18}\text{G}$  という超巨大磁場を持つ中性子星マグネターが発見されて以来、その巨大磁場の起源およびその磁場構造に対して大きな関心が持たれている。このマグネターは通常の中性子星よりも自転周期がかなり長く、X線、ガンマ線等の高エネルギーの光子や多くのニュートリノを放出する事が知られている。そこで、放出ガンマ線やニュートリノを調べることはマグネターの磁場構造を知り、マグネターの超強磁場の起源を探る大きな手段である。しかしながら、このような計算はこれまで、半古典理論の枠組みでのみ行われてきた。我々は、本研究の前段階でシンクロトロン運動からの中間子生成の計算を量子論の枠組みで計算し、従来の半古典理論とは大きく異なる結果を得ていた。従って、中性子星から放射されるガンマ線やニュートリノを観測して、中性子星の磁場構造を知るためには、ランダウ準位間遷移による粒子放出の計算を相対論的量子論によるアプローチで計算する必要があった。

### 2. 研究の目的

- (1) ランダウ準位と異常磁気能率の効果を取り入れることで、相対論的量子論の枠組みでニュートリノ反応や光子放出の厳密な計算により、磁場に対する放射の異方性を明らかにする。
- (2) トロイダル磁場が存在するためのマグネターの構造を調べ、電荷分中性の破れや電子流の存否を明らかにするとともに、マグネターの超強磁場の起源を探索するための情報を得る。
- (3) 本研究で提案する、強磁場中のニュートリノ・反ニュートリノ ( $\nu\bar{\nu}$ ) 対生成のマグネターに対する冷却効果やスピン減速への寄与を明らかにする。
- (4) トロイダル磁場に対するニュートリノ、ガンマ線放出の運動量分布を求め、磁場構造と放射線の関係、さらに自転減速や星の振動等の天体現象への影響を予想する。

### 3. 研究の方法

- (1) 強磁場中でのニュートリノ・反ニュートリノ  $\nu\bar{\nu}$  対やその他の粒子の生成率の計算のための表式を導出し、数値計算の実行を行う。遷移行列はランダウ順位に従い不連続な状態間の1体遷移として求める。
- (2) マグネター中心部からのニュートリノ放出の寄与を評価するため、直接過程 (DU) の反応率、および同じ遷移行列をもつニュートリノの非弾性反応とその逆反応の断面積の表式を導出し数値計算を行う。そして、ニュートリノ放出の磁場に対する異方性を明らかにする。
- (3) 軟ガンマ線の放出を議論するために、核子からの中間子を經由しない直接過程の計算が必要であるので、韓国崇実大の千氏のグループで同時に光子の生成率の計算を行う。
- (4) マグネター赤道面内にトーラス状のトロイダル磁場が存在する可能性を議論、トロイダル磁場を仮定したときの放出ニュートリノおよび光子の運動量分布の計算し、磁場との関係を探求する。

### 4. 研究成果

- (1) 強磁場中での陽子や電子等のシンクロトロン放出による粒子生成について、ランダウ準位間遷移を取り入れ、相対論的量子論の枠組みで計算を実行することで、理論的研究を遂行した。そして、以下のような成果を得ることができた

従来では理論計算が実行できなかった  $\text{TeV}$  エネルギー領域での中間子生成の計算方法を世界で初めて確立。これも従来では計算できなかった、生成粒子の反応後の運動量分布を求めることに成功した。

アクシオン生成に関してランダウ準位や異常磁気能率等の効果を取り入れた相対論的量子力学の計算を行った。ランダウ準位間のエネルギー差が温度より大きく、低温近似を行うことが出来ないため、近似無しでの計算を実行する必要があった。このような計算は多くの困難があるため実行されたことが無かった。

同じ方法を  $\nu\bar{\nu}$  対生成に応用し、これまで考えられていたのと異なる、強磁場中性子星特有の冷却過程の研究を行った。これまで中性子星の冷却過程として主に考えられていたのは、中性子がベータ崩壊を行って反ニュートリノを放出する Direct Urca と、中性子の他にもう一つの粒子が関わる Modified Urca であり、その放出エネルギーは温度に対して、前者が6乗、後者が8乗に比例するものであった。これに対して、強磁場中での陽子や電子からの  $\nu\bar{\nu}$  対生成では、温度の2乗程度と変化が非常に小さく、従来よりも大きな効果が期待され、中性子星の冷却過程の再考の必要性を示すものであった。ただし、当初、非常に大きい効果を示す結果を得ていたが、計算精度を上げる努力を続けたところ、最終的に期待したほどの結果は得られなかった。しかし、今回のようなランダウ準位を含む量子論的に正確な理論計算は世界で初めてであり、今後の継続的発展が期待されるものである。中性子がベータ崩壊を行って反ニュートリノを放出する Direct Urca の超強磁場中での計算を行った。磁場の無い場合では、陽子密度が中性子密度の  $1/8$  よりも大きい必要があり、近年の現実的状態方程式計算ではこの条件を満たさない可能性が高まっていた。しかし、磁場中では磁場から運動量が供給され、この条件を必要とせず、従来からの計算結果から大きな変更が期待される。現在、テスト計算の段階ではあるが、大きな効果が得られそうであるとの感触を得ている。

- (2) 東京大学の牧島氏は、中性子星の歳差運動の解析から、通常の軸性磁場以外に、内部にドーナツ状の磁場、トロイダル磁場が存在する可能性を指摘した。我々は電子の磁気相互作用等を含む理論計算を行い、トロイダル磁場が発生する機構に関する研究を行い、現在論文を執筆中である。
- (3) 近年、進行方向に軌道角運動量を持つ光、光渦が世界的に注目を浴びている。そして、ガンマ線領域の光子渦を生成する実験が国内国外で計画されている。そこで、コンプトン散乱による観測による渦ガンマ線を同定する方法を示し、論文発表を行った。さらに、電子のランダウ準位間遷移により放出された光子が渦光子になっている可能性が高いことが分かったので、現在研究を進めているところである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

T.Maruyama, T.Hayakawa, T.Kajino, “Compton Scattering of  $\gamma$ -Ray Vortex with Laguerre Gaussian Wave Function”, Sci. Repts. 9, #51 (2018). 査読有

森川祐, 山本樹, 島田美帆, 下村浩一郎, 河村成肇, 山崎高幸, 牧村俊助, 野村大輔, 川島祥孝, 早川岳人, 丸山智幸, 三島賢二,  
「ILC の多角的活用の可能性」, 加速器, 15 巻, 132 - 138 (2018). 査読無

丸山智幸, 「光渦」, 原子核研究, 63 巻, 90 - 91 (2018). 査読有

T.Maruyama, E.Nakano, K.Yanase and N.Yoshinaga, “Spin polarized phases in strongly interacting matter: Interplay between axial-vector and tensor mean fields”, Phys. Rev. D 97, 114014 (2018). 査読有

T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, “Cooling Process of Magnetars with nu nubar-Pair and Axion Emissions in Relativistic Quantum Approach”, JPS Conference Proceedings 20, #011004 (2018). 査読有

T.Maruyama, A.B.Balantekinc, M.K.Cheoun, T.Kajino and G.J.Mathews, “Axion production from Landau quantization in the strong magnetic field of magnetars”, Phys. Lett. B 779, 160 - 165 (2018). 査読有

T.Maruyama, T.Tatsumi, “Spontaneous spin polarization due to tensor self-energies in quark matter”, Phys. Rev. D 96, #096016 (2017). 査読有

T.Sasaki, T.Kajino, T.Takiwaki, J.Hidaka, T.Maruyama, Y.Pehlivan and B.Balantekin, “Collective Neutrino Flavor Oscillations And Supernova Nucleosynthesis in Proton-rich Gas Flows”, Proceedings of Science, INPC/2016, #232 (2017). 査読有

T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, “Asymmetric Neutrino Emissions in Strongly Magnetized Matter In Relativistic Quantum Approach”, Proc. of Science, INPC/2016, #252 (2017). 査読有

T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, “Pion Production via Proton Synchrotron Radiation in Strong Magnetic Fields”, JPS Conference Proceedings 14, #020615 (2017). 査読有

T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun, G.J.Mathews, “Pion Production via Proton Synchrotron Radiation in Strong Magnetic Fields in Relativistic Field Theory: Scaling Relations and Angular Distributions”, Phys. Lett. B757, 125 - 129 (2016). 査読有

〔学会発表〕(計 34 件)

丸山智幸, 「原始中性子星からのニュートリノ放出に対する強磁場の影響が引き起こす天体現象」日本物理学会年会, 2019 年/3 月 14 - 17 日 (九州大学伊都キャンパス)

丸山智幸, 早川岳人, 梶野敏隆, 「相対論的量子論による強磁場中でのシンクロトロン運動する電子からのガンマ線渦放射の研究」

日本物理学会年会, 2019年3月14 - 17日 (九州大学伊都キャンパス)

T.Maruyama, “Gamma Vortex”, Hadrons and Dense Matter Physics, 2019年2月22日 (崇実大学, 韓国)

丸山智幸, 「相対論的電子線による電子シンクロトロン放射での光渦発生」, 研究会「光・物質・生命・宇宙におけるキラリティ」, 2018年12月15日 (奈良女子大学)

T.Miyatsu, M.K.Cheoun, C.Ishizuka, K.Kim, T.Maruyama, K.Saito, “The role of Fock terms on nuclear symmetry energy and its slope parameter in a relativistic framework”, 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions, 2018年12月4日 (ソニックシティホール)

T.Maruyama, E.Nakano, K.Yanase, N.Yoshinaga, “Spin polarized phases in quark matter: interplay between axial-vector and tensor mean field”, 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, 2018年11月13 - 17日 (つくば国際会議場)

T.Maruyama, T.Tatsumi, “Spontaneous spin polarization due to tensor selfenergies in quark matter in NJL model field”, 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, 2018年11月13 - 17日 (つくば国際会議場)

T.Maruyama, T.Hayakawa, T.Kajino, “Compton Scattering of Gamma-Ray Vortex”, 5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of APS and JPS, 2018年9月14 - 17日 (Hilton Waikoloa Village, アメリカ)

T.Maruyama, E.Nakano, K.Yanase, N.Yoshinaga, “Spin Polarized Phases in Quark Matter: Interplay between Axial-vector and Tensor Mean Fields”, 5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of APS and JPS, 2018年9月14 - 17日 (Hilton Waikoloa Village, アメリカ)

T.Miyatsu, M.K.Cheoun, C.Ishizuka, K.Kim, T.Maruyama, K.Saito, “The role of Fock terms on nuclear symmetry energy in a relativistic framework”. 8th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2018), 2018年9月10 - 13日 (Hanwha Resort, 韓国)

丸山智幸, 「ガンマ線渦の物理」, 日本物理学会, 2018年3月22 - 25日 (東京理科大学, 野田キャンパス)

宮津剛志, M.K.Cheoun, 石塚知香子, K.Kim, 丸山智幸, 齋藤晃一, 「相対論的枠組みにおける物質計算と Fock 項の効果」, 日本物理学会, 2018年3月22 - 25日 (東京理科大学, 野田キャンパス)

大西直毅, 丸山智幸, 「マグネターのカイラル非対称モデル VII」, 日本物理学会, 2018年3月22 - 25日 (東京理科大学, 野田キャンパス)

丸山智幸, 早川岳人, 梶野敏隆, 「ガンマ線渦と電子のコンプトン散乱」, 「宇宙における渦光」研究会, 2018年1月26日 (国立天文大)

T.Maruyama, T.Kajino, A.B.Balantekin, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, “Particle production from synchrotron radiation in magnetar in relativistic quantum approach”, Impact of Exotic Nuclear Structure on Explosive Nucleosynthesis, 2017年11月23 - 24日 (北京航空航天大学, 中国)

宮津剛志, Cheoun Myung-Ki, 石塚知香子, Kim Kyungsik, 丸山智幸, 齋藤晃一, 「相対論的 Hartree-Fock 計算による対称エネルギーの密度と運動量依存性」, 日本物理学会, 2017年09月12 - 15日 (宇都宮大学, 峰キャンパス)

大西直毅, 丸山智幸, 「マグネターのカイラル非対称モデル VI」, 日本物理学会, 2017年09月12 - 15日 (宇都宮大学, 峰キャンパス)

丸山智幸, 梶野敏隆, 千明起, G.T.Mathew ,  
「強磁場でのニュートリノ反ニュートリノ対生成とマグネター冷却」,  
日本物理学会, 2017年09月12 - 15日12日(宇都宮大学, 峰キャンパス)

丸山智幸, 早川岳人, 梶野敏隆, 「渦ガンマ線によるコンプトン散乱」  
日本物理学会, 2017年09月12 - 15日12日(宇都宮大学, 峰キャンパス)

T.Maruyama, T.Kajino, A.B.Balantekin, M.K.Cheoun and G.J./Mathews ,  
“ $\nu$ - $\bar{\nu}$  pair and axion productions in strong magnetic field in relativistic quantum  
approach and cooling of magnetars”, International Symposium on Origin of Matter and  
Evolution of Galaxies , 2017年6月/27 - 30日 (Hotel ICC, Daejeon , 韓国)

- ②① 丸山智幸, 早川岳人, 梶野敏隆, 「渦ガンマ線によるコンプトン散乱」,  
第1回光渦研究会, 2017年5月26 - 27日 (岡崎コンファレンスセンター)
- ②② 丸山智幸, 梶野敏隆, 千明起, G.T.Mathew , 「マグネターからの新たな冷却過程」  
日本物理学会, 2017年3月17 - 20日(大阪大学 豊中キャンパス)
- ②③ 大西直毅, 丸山智幸, 「マグネターのカイラル非対称モデル V」,  
日本物理学会, 2017年3月17 - 20日(大阪大学 豊中キャンパス)
- ②④ T.Maruyama, T.Kajino, A.B.Balantekin, M.K.Cheoun and G.J./Mathews,  
“Cooling Process of Magnetars with  $\nu\bar{\nu}$ -Pair and Axion Emissions in Relativistic  
Quantum approach”,  
Quarks and Compact Stars 2017, 2017年02月19 - 20日(京都大学, 北白川キャンパス)
- ②⑤ T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J./Mathews, “New Cooling Process of  
Magnetars with  $\nu\bar{\nu}$ -pair Emissions in Relativistic Quantum Approach”,  
International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016),  
2016年11月/21 - 22日,(東北大学, 青葉山キャンパス)
- ②⑥ 丸山智幸, 梶野敏隆, 千明起, G.T.Mathew ,  
「相対論的量子力学アプローチによる強磁場中性子星での高エネルギー粒子生成の研究」  
日本物理学会, 2016年9月21日(水) - 24日(土)(宮崎大学 木花キャンパス)
- ②⑦ 大西直毅, 丸山智幸, 「マグネターのカイラル非対称モデル」,  
日本物理学会, 2016年9月21日(水) - 24日(土)(宮崎大学 木花キャンパス)
- ②⑧ 佐々木宏和, 梶野敏貴, 滝脇知也, 丸山智幸, Y. Pehlivan, A.B. Balantekin ,  
「重力崩壊型超新星におけるニュートリノ集団振動と元素合成への応用」,  
日本物理学会, 2016年9月21日(水) - 24日(土)(宮崎大学 木花キャンパス)
- ②⑨ T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J./Mathews, “Asymmetric Neutrino  
Emissions in Strongly Magnetized Matter in Relativistic Quantum Approach”,  
International Nuclear Physics Conference,  
2016年9月11 - 16日 (Adelaide Convention Centre , オーストラリア)
- ③⑩ T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, “Pion Production in TeV Energy  
Region under Strong Magnetic Fields in Relativistic Quantum Approach” ,  
International Nuclear Physics Conference,  
2016年9月11 - 16日 (Adelaide Convention Centre , オーストラリア)
- ③⑪ H.Sasaki, T.Kajino, T.Takiwaki, J.Hidaka, T.Maruyama, Y.Pehlivan and B.Balantekin,  
“Collective Neutrino Flavor Oscillations And Supernova Nucleosynthesis in Proton-rich  
Gas Flows”, International Nuclear Physics Conference,  
2016年9月11 - 16日 (Adelaide Convention Centre , オーストラリア)
- ③⑫ T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, “Proton Synchrotron Radiation  
in TeV Energy Region under Strong Magnetic Field in Quantum Approach”,  
2nd NAOJ-ECT\* Workshop on Many Riddles About Core-Collapse Supernovae:1 Bethe  
and Beyond , 2016年6月27日 - 29日(国立天文台)

- ③③ T.Maruyama, T.Kajino, M.K.Cheoun and G.J.Mathews, "Pion Production from Proton Synchrotron Radiation in Strong Magnetic Fields", 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos XIV , 2016 年 6 月 20 日 - 24 日 (新潟コンベンションセンター)
- ③④ T.Maruyama, "Pion Production via Proton Synchrotron Radiation in Strong Magnetic Fields in Relativistic Quantum Approach", The 4th DTA Symposium "Compact stars and gravitational wave astronomy" , 2016 年 5 月 13 日 - 14 日 (国立天文大)

〔その他〕

ホームページ等

<http://hp.brs.nihon-u.ac.jp/~tomo/kenkyuu/tomo.htm>

## 6 . 研究組織

### (1) 研究協力者

研究協力者氏名：大西直毅

ローマ字氏名：OHNISHI, Naoki

研究協力者氏名：千明起

ローマ字氏名：CHEOUN, Fyong-ki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。