

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14708

研究課題名（和文）中性子星観測によるアクシオン暗黒物質の間接検出に向けた理論研究

研究課題名（英文）Theoretical study towards the indirect detection of the axion dark matter by the observation of neutron star

研究代表者

北嶋 直弥 (Naoya, Kitajima)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：50737955

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では我々の宇宙に存在する暗黒物質の有力候補の一つである新粒子アクシオンに着目し、宇宙に点在する中性子星を用いた間接検出に向けた理論的解析を行なった。特に、中性子星近傍のアクシオンと電磁場との微弱な相互作用に着目し、系の発展を数値的に追うためのシミュレーション開発を行なった。開発した数値コードは初期宇宙におけるアクシオンとゲージ場との共鳴現象にも応用され、ダークフォトン暗黒物質生成や重力波生成の新たな可能性も指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでの観測データにより、現在の我々の宇宙は正体不明の暗黒物質で満たされていることが明らかにされており、その正体解明は我々の住む宇宙の起源の解明と密接に結びついている。また、暗黒物質は未知の素粒子であるという説が有力であることから、暗黒物質の検出は素粒子の新理論発見につながる。本研究成果は、暗黒物質の一つの有力な理論モデルについて宇宙の観測対象への示唆を与えたという意味で、既存の理論と将来観測の間の橋渡しを担う。

研究成果の概要（英文）：In this research project, I have focused on a hypothetical particle “axion” as one of the plausible candidates for the dark matter in our Universe and performed theoretical analysis towards the possibility of indirect detection of the axion with the observation of the neutron star. Particularly focusing on the tiny interaction of the axion with the electromagnetic fields around the neutron star, I have developed numerical simulation code to follow the dynamics of the system.

This code has also been applied for the analysis of resonance phenomena of the axion and gauge fields in the early Universe and consequently we have pointed out a new possibility of the production of the dark photon dark matter and gravitational waves.

研究分野：宇宙論

キーワード：暗黒物質 アクシオン

1. 研究開始当初の背景

これまでの様々な宇宙観測は、現在の我々の宇宙は正体不明の暗黒物質で満たされていることを明らかにし、暗黒物質の正体解明は現代の自然科学における最重要課題の一つとなっている。アクシオンは素粒子標準模型における「強い相互作用における CP 対称性(荷電共役変換と空間座標反転を同時に行う変換に対する対称性)の破れの問題」を解決する機構において自然に予言される仮想粒子であり、暗黒物質の有力な候補となっている。

アクシオンは一般に電磁場と極めて弱い相互作用をしており、これを利用したアクシオン直接検出実験が米国の ADMX グループや韓国の IBS/CAPP グループを中心に世界各国で進められている。主な実験方法としては空洞共振器に強磁場をかけたものが挙げられるが、十分な検出感度を得るためには数十テスラの非常に強い磁場が必要であるなど、技術的な障害も多い。一方、アクシオンと電磁場との相互作用は宇宙空間においても重要である。中でも宇宙空間に点在する中性子星は非常に強い磁場を伴うコンパクトかつ超高密度な天体であり、地上実験では実現できない極端に強い磁場によって天然のアクシオン検出器として働く可能性を秘めている。故に、中性子星磁気圏におけるアクシオンと電磁場の相互作用を詳細に解析し、アクシオンによる特異な電波放射の強度を定量的に見積もることは、将来の電波望遠鏡による観測可能性を議論する上で重要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、宇宙の暗黒物質の有力候補であるアクシオンに着目し、中性子星の電波観測によるアクシオン暗黒物質の間接検出に向けた理論的基盤構築が目的である。そのため、アクシオンと電磁場の相互作用系のダイナミクスを詳細に解析し、アクシオンから発せられる特異な電波放射の強度を定量的に算出するための数値シミュレーション開発が第一の目的である。さらに、開発したコードを初期宇宙におけるアクシオンとダークフォトンの相互作用系の解析に応用することも目的の一つである。特に、アクシオンによるダークフォトンの共鳴的生成の結果、ダークフォトンが暗黒物質として振る舞うかどうか、及び、重力波が放出されるかどうかを考察し、ダークフォトンの存在量や、重力波のスペクトルを定量的に評価する。最終的には、近い将来、観測を開始する大型電波望遠鏡 SKA によってアクシオン起源の電波が検出可能かどうか、また、SKA のパルサータイミング観測によって重力波が観測可能かどうかを明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法

本研究では主に計算機を用いた数値シミュレーションによる研究手法を採用し、特にアクシオンと電磁場の相互作用を解析するための 3 次元格子シミュレーションコードの独自開発を根幹として、研究を進めるという方法を採用した。現実的なセットアップで解析を行うためには大規模なシミュレーションが必要とされるため、効率的な計算を行うための並列計算技法をふんだんに取り入れたコード開発を行なった。特に最新の GPU を取り入れたヘテロジニアスな計算環境を積極的に利用したコード開発を進めてきた。完成したコードは Toy Model を用いてテストシミュレーションを繰り返し、信頼性のチェックを入念に経た後、実際の問題の解析に用いた。研究成果を広く発信することを念頭に置いた、シミュレーション結果の可視化も重要視し、特に宇宙における暗黒物質の進化や、電波放射の過程などのアニメーション作成に力を入れた。本研究課題を通じて開発、改良を続けてきた、格子シミュレーション計算、出力結果のデータ解析、及びシミュレーションの可視化のための一連の数値コードは世界的に見てもアドバンテージを持っており、後の研究にも大いに役立てることができる。

4. 研究成果

(1) 本研究課題を進める上で、その根幹を成す中性子星近傍におけるアクシオン電磁気学の数値シミュレーション開発を行った。まず、回転する中性子星周りの磁場分布を磁気双極子モデルで近似し、そこでのプラズマ密度として Goldreich-Julian モデルを採用した単純化したセットアップの下でシミュレーションのコード開発を進めた。同時に自身のコンピュータで試験的なシミュレーションを実行し、初期の結果として、コヒーレント振動しているアクシオン暗黒物質が中性子星まわりの磁場によって電磁波に変換される現象が起こることを確認した(図 1)。さ

らにアクシオンがマクスウェル分布に従いランダム運動している場合や中性子星の磁気双極子モーメントの向きと回転軸の向きがずれている場合に対応する、時間変化する外部磁場を考慮した場合の格子シミュレーションも同様に行い、どのようなシグナルが得られるかを計算した。

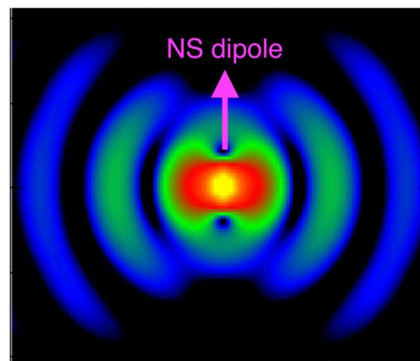


図1 中性子星磁気圏のアクシオンによる電波放射

(2) 開発したアクシオンと電磁場の相互作用系を解析するシミュレーションコードを初期宇宙におけるアクシオンとダークフォトンの共鳴現象に応用した。特にダークフォトンが暗黒物質として振る舞うことを想定し、現在の宇宙における残存量を定量的に評価した。結果として、このシナリオにおいて共鳴的に生成されたダークフォトンが現在の暗黒物質を説明可能であることを初めて指摘した(図2)。この研究成果は世界的にも評価され、論文(引用文献[1])の引用数は現時点で130 (inspirehep.net)を超えている。

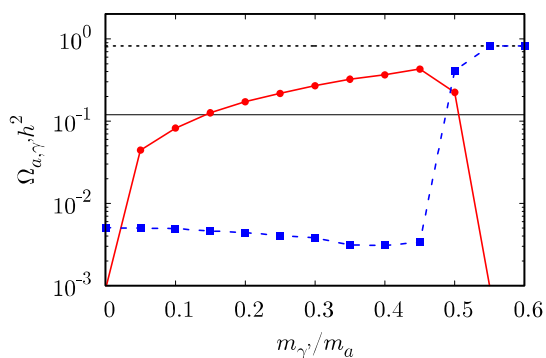


図2 ダークフォトン(赤)とアクシオン(青)の残存量

(3) アクシオンと電磁場の相互作用系を解析する数値計算コードの別の応用として、宇宙初期におけるアクシオンとゲージ場との共鳴現象に起因する重力波生成に関する解析を行なった。特に共鳴現象が飽和した後の系の非線形発展を数値的に解き、生成される重力波の強度及びスペクトルを定量的に評価した(引用文献[2])。その結果、中性子星の電波観測の主要ターゲットの一つであるパルサータイミング測定によって検出可能なnHzの周波数帯で高強度の重力波が生成されることを明らかにし、近い将来に科学観測を開始するSKAでアクシオン暗黒物質が検証可能であることを初めて指摘した(図3)。さらに、詳細な解析により、重力波の円偏極モードを計算し、アクシオン暗黒物質特有のシグナルとして、円偏極した重力波が予言されることも初めて明らかにした。この結果は次世代の重力波観測における円偏極測定的重要性を指摘するものである。

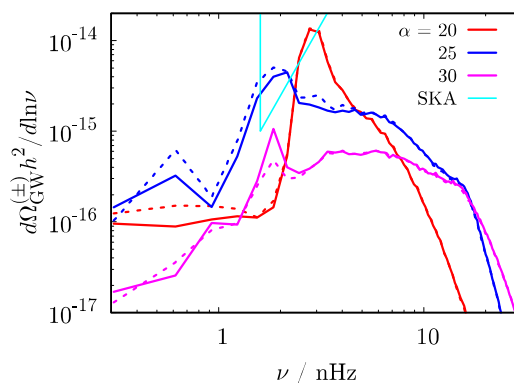


図3 重力波の強度スペクトル

以上に記した研究成果は「ダークマターの懇談会2019」(2019年7月)、「第8回観測的宇宙論ワークショップ」(2019年12月)、「若手による重力・宇宙論研究会」(2021年3月)において招待講演として発表を行った。また、国際研究会「JGRG29」において研究成果を発表した際、Outstanding presentation award Gold Prizeを受賞した。

引用文献

[1] Prateek Agrawal, Naoya Kitajima, Matthew Reece, Toyokazu Sekiguchi, Fuminobu Takahashi “Relic Abundance of Dark Photon Dark Matter” Phys. Lett. B801 (2020) 135136

[2] Naoya Kitajima, Jiro Soda, Yuko Urakawa “Nano-Hz Gravitational Wave Signature from Axion Dark Matter” Phys. Rev. Lett. 126(2021)12, 121301

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kitajima Naoya, Soda Jiro, Urakawa Yuko | 4. 巻 126 |
| 2. 論文標題 Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 121301 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.126.121301 | 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 Fukunaga Hayato, Kitajima Naoya, Urakawa Yuko | 4. 巻 2021 |
| 2. 論文標題 Can axion clumps be formed in a pre-inflationary scenario? | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics | 6. 最初と最後の頁 015 ~ 015 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2021/02/015 | 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 Kitajima Naoya, Takahashi Fuminobu | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Primordial black holes from QCD axion bubbles | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics | 6. 最初と最後の頁 060 ~ 060 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2020/11/060 | 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 Agrawal Prateek, Kitajima Naoya, Reece Matthew, Sekiguchi Toyokazu, Takahashi Fuminobu | 4. 巻 801 |
| 2. 論文標題 Relic abundance of dark photon dark matter | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters B | 6. 最初と最後の頁 135136 ~ 135136 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2019.135136 | 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 該当する |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kitajima Naoya, Tada Yuichiro, Takahashi Fuminobu | 4. 巻 800 |
| 2. 論文標題 Stochastic inflation with an extremely large number of e-folds | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters B | 6. 最初と最後の頁 135097 ~ 135097 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135097 | 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 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Fukunaga Hayato, Kitajima Naoya, Urakawa Yuko | 4. 巻 2019 |
| 2. 論文標題 Efficient self-resonance instability from axions | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics | 6. 最初と最後の頁 055 ~ 055 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/06/055 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 重力波で探るアクシオン宇宙 |
| 3. 学会等名 若手による重力・宇宙論研究会2021 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 アクシオン暗黒物質のnHz重力波シグナル |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 Primordial Black Holes from QCD Axion Bubbles |
| 3. 学会等名 Online JGRG workshop 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 アクシオン暗黒物質のnHz重力波シグナル |
| 3. 学会等名 第9回観測的宇宙論ワークショップ |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 Primordial Black Holes from QCD Axion Bubbles |
| 3. 学会等名 The 14th International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 アクシオンの宇宙論と検出実験 |
| 3. 学会等名 第8回観測的宇宙論ワークショップ(招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 Gravitational waves from axionic gauge field production |
| 3. 学会等名 JGRG29 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 AXION理論 |
| 3. 学会等名 ダークマターの懇談会2019 (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 北嶋直弥 |
| 2. 発表標題 Gravitational wave forest from axions |
| 3. 学会等名 Axion Cosmology (国際学会) |
| 4. 発表年 2019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 |
|-------|-----------------------------|---|----|
| 研究協力者 | 門田 健司 (Kadota Kenji) | 国科大杭州高等研究院・School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences・Senior faculty scientist | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|