

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740149

研究課題名(和文) 将来の重力波検出実験で探る初期宇宙物理

研究課題名(英文) Probing the early Universe with future gravitational wave direct detection experiments

研究代表者

黒柳 幸子 (Kuroyanagi, Sachiko)

東京理科大学・理学部・研究員

研究者番号：60456639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円、(間接経費) 480,000円

研究成果の概要(和文)：神岡鉱山で建設中の大型低温重力波望遠鏡KAGRAをはじめ、世界中で重力波の初検出を目指す取り組みが進められようとしている今、宇宙を重力波で検証できる時代は着実に近づいている。本研究では将来の重力波直接検出実験を見据え、宇宙論起源の重力波に関する理論研究を行った。様々な起源の重力波を取り扱いながら、将来観測で検出された場合に宇宙理論に与えられるインパクトを検証した。

研究成果の概要(英文)：There are many ongoing efforts in the world aiming at first detection of gravitational waves, including KAGRA (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) which is under the construction in Kamioka mine. Given the upcoming gravitational wave experiments, this research aimed to provide theoretical prospects for detection of gravitational waves from the early Universe. This research have investigated gravitational waves from several origins, and showed how direct detection experiments can help understanding the physics of the early Universe.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：重力波 初期宇宙理論

1. 研究開始当初の背景

いよいよ建設の始まった大型低温重力波望遠鏡 KAGRA をはじめ、いま世界中で次世代型重力波検出器の準備が進められており、長きに渡って待ち望まれていた重力波の初検出が現実味を帯びてきた。やがては世界中の重力波検出器で構成されるネットワークによって重力波天文学の確立が期待される。さらなる将来に、日本で進められているスペース重力波アンテナ DECIGO 計画が実現すれば、重力波を用いて宇宙論を高精度で検証できる時代がやってくる。

2. 研究の目的

重力波で宇宙を探る上で、その魅力は何と言っても透過性の強さにある。重力波は相互作用が弱く、あらゆるものを透過するため、光が散乱されてしまうような高密度領域で起こる現象を直接とらえることができる。将来の重力波検出実験は、光学観測では探れなかった高密度天体周辺の物理や、晴れ上がり以前の初期宇宙を調べる上でユニークな情報を提供し、宇宙物理学の発展に大きく貢献するはずである。一方で重力波に関する理論研究はモデルの構築に留まることが多く、実際にこれらの重力波実験が理論に対してどのような示唆を与えるのか具体的に議論されたものは少ない。本研究の目的は、高感度の実験で重力波の存在が検証できるようになる時代を迎えようとしている今、観測を意識しながら理論の整備と構築を行うことにある。

3. 研究の方法

重力波検出実験には、比較的高い周波数帯の重力波を測る地上型直接検出実験に加え、低周波の重力波を測る衛星型実験がある。また、重力波は CMB の B モード偏光やパルサータイミング実験といった間接検出実験によっても検証が可能であり、近年実験の発展がめざましい。このような様々な種類の重力波検出は異なる周波数帯で重力波を測ることから、同じ起源の重力波でも独立した情報を提供してくれる。本研究では、様々な起源の宇宙論的重力波を扱いながら、そのような多岐に渡る将来の重力波観測によって宇宙理論に与えられる制限を調べた。その際に、実際の実験の感度デザインを念頭におきながら議論

することで、これまでにない具体的な予言を可能にしている。

4. 研究成果

・宇宙ひも起源の重力波

真空の相転移や超弦理論から予言される 1 次元の位相欠陥「宇宙ひも」は、強い重力波を発するため、将来の重力波実験での検証が期待される。宇宙ひもを予言する高エネルギー理論は多く、その存在を検証することで理論に対する重要な示唆を得ることができる。そこで本研究では、宇宙ひもが放出する重力波バーストを探索することで、宇宙ひもパラメータに与えられる制限を議論した。特筆すべき発見は、同じ重力波検出器による観測でも、我々の近くで放出されバーストとして観測される重力波と、遠くのバーストが多数重なり合っている背景重力波の 2 種を探ることによって、宇宙ひもに関して独立な情報を得ることができる点である。本研究ではこの点を初めて指摘し、これは 2 種の観測量が異なる時代の宇宙ひもの情報を持つことに起因することを突き止めた。また、さらに直接検出実験だけではなく、CMB やパルサータイミング実験などの重力波の間接検出との相補性も調べ、これらの情報を加えることで宇宙ひもパラメータに対してより厳しい制限を与えられることを示した。

・Massive gravity 理論の下でのインフレーション起源重力波

重力修正理論のうちの一つである Massive gravity 理論の下では、重力波の方程式が質量項を持つため、重力波の膨張宇宙での振る舞いが通常の場合と異なる。本研究ではこの理論の下でのインフレーション起源重力波の振る舞いを調べ、質量項の影響が重力波スペクトル中にピークとして特定の周波数に現れることを明らかにした。そこで、将来の重力波検出実験を使ってこのピークを検出することで massive gravity 理論の検証が可能であるかを議論した。

・インフレーション起源重力波の直接検出による宇宙の熱史に対する制限

インフレーション起源の重力波には直接検出の周波数帯のスペクトルに、インフレーション後に物質を生成し宇宙を熱い火の玉状態にする「再加熱」に関する情報

が含まれている可能性が指摘されている。再加熱に関してはいまのところほとんど観測的情報がないが、宇宙の誕生直後の現象の背景にある超弦理論や素粒子物理についての知見を得るためには再加熱の情報非常に重要である。本研究では将来の重力波検出実験でインフレーション起源重力波が検出できた場合の再加熱温度の決定精度を調べ、再加熱を重力波実験で探れる可能性を定量的評価の下で議論した。また、再加熱後にエントロピー生成が起こるようなモデルへの制限について調べた。

・重力波実験を用いたダークマター探索

重力波直接検出実験の主なターゲットの一つに連星系が放出する重力波がある。そこで質量比の大きい連星系の片方のブラックホール周辺にダークマターが密に分布する場合に、ダークマターが作る重力ポテンシャルが重力波波形にどのように影響するかを調べた。その結果、将来実験で十分検証可能であること、さらにダークマターの密度分布を探るのに役立つことを明らかにした。

・最新のCMB観測データを用いた初期宇宙モデルに対する制限

2013年3月に公開されたPlanck衛星の最新のデータに基づき、CMB観測による初期重力波に対する厳しい制限を用いながらインフレーションモデルの制限を行った。まず、単一スカラー場でインフレーションを引き起こすモデルに関して、運動方程式が高階微分を含まない範囲で最も一般的な形の単一スカラー場理論であるHorndeski理論を用いることで、Planckのデータ解析チームが扱っていないモデルも含めた網羅的な検証を可能にした。また、インフレーション期の重力の振る舞いが異なるブレーンワールドモデルと非可換時空の影響下でのモデルへの制限にも取り組み、多くのモデルが観測的に棄却されることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

黒柳幸子, 宮本幸一, 関口豊和, 高橋慶太郎, Joseph Silk, “ Forecast constraints on cosmic string parameters from gravitational wave direct detection experiments ”, Physical Review

D, American Physical Society, 86 巻 2 号, 023503 pp.1-15, 2012年, 査読有

A. Emir Gumrukcuoglu, **黒柳幸子**, Chunshan Lin, 向山信治, 棚橋典大, “ Gravitational wave signal from massive gravity ”, Classical and Quantum Gravity, IOP Publishing, 29 巻, 23 号, 235026, pp. 1-29, 2012年, 査読有

黒柳幸子, 宮本幸一, 関口豊和, 高橋慶太郎, Joseph Silk, “ Forecast constraints on cosmic strings from future CMB, pulsar timing, and gravitational wave direct detection experiments ”, Physical Review D, American Physical Society, 87 巻 2 号, 023522 pp.1-19, 2012年, 査読有

黒柳幸子, Christophe Ringeval, 高橋智, “ Early Universe Tomography with CMB and Gravitational Waves ”, Physical Review D, American Physical Society, 87 巻 8 号, 083502, pp.1-14, 2013年, 査読有

枝和成, 伊藤洋介, **黒柳幸子**, Joseph Silk, “ A new probe of dark matter properties: gravitational waves from an intermediate mass black hole embedded in a dark matter mini-spike ”, Physical Review Letters, American Physical Society, 110 巻 22 号, 221101 pp.1-5, 2013年, 査読有

辻川信二, 大橋純子, **黒柳幸子**, Antonio De Felice, “ Planck constraints on single-field inflation ”, Physical Review D, American Physical Society, 88 巻 2 号, 023529 pp.1-21, 2013年, 査読有

Gianluca Calcagni, **黒柳幸子**, 大橋純子, 辻川信二, “ Strong Planck constraints on braneworld and non-commutative inflation ”, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, IOP Publishing and SISSA, 3 巻 052 号, pp. 1-23, 2014年, 査読有

〔学会発表〕(計1件)

平松尚志, **黒柳幸子**, 横山順一, 「グローバル相転移起源の重力波に対する初期宇宙の状態方程式の影響」, 日本物理学会

第 68 回年次大会, 26pBB-2, 広島大学,
2013 年 3 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒柳 幸子 (KUROYANAGI, Sachiko)

東京理科大学第二部物理学科

ポスドクトラル研究員

研究者番号: 60456639

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし