

立教大学学術推進特別重点資金（立教 S F R）
大学院生研究
2014年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学	研究科	物理学	専攻
研究代表者 (2015年3月現在 のものを記入)	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・博士後期課程・1年		矢嶋耕治		印
指導教員	所属・職名		氏名		
	理学部・准教授		小林努		印
自然・人文・社会の別	自然 ・ 人文 ・ 社会		個人・共同の別	個人 ・ 共同 2名	
研究課題	重力波で探る初期宇宙と強重力場の物理				
研究組織 (2015年3月現在 のものを記入)	在籍研究科・専攻・学年		氏名		
	理学研究科・物理学専攻・ 博士後期課程1年		矢嶋耕治		
	理学研究科・物理学専攻・ 博士後期課程1年		國分隆文		
研究期間	2014 年度				
研究経費	(支出金額)		500000円 / (採択金額)		500000円

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

初期宇宙と強重力場において、特定の重力理論を用いて解析し、理論についての理解を深めることを目的とした。アインシュタインにより提唱された一般相対性理論は太陽系での様々な観測テストをパスしており、重力理論として広く受け入れられている。しかし、この理論では宇宙の始まりやブラックホールの中心などを説明することができない。重力理論を修正したときに、初期宇宙で生成される重力波や密度ゆらぎの性質がどうなるのかを調べた。また、ブラックホールやワームホールといった強重力場について摂動を加え、それがどのように成長あるいは減衰するかを解析し、安定性を調べた。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

[初期宇宙] [ブラックホール・ワームホール] [重力波]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

重力理論として広く受け入れられている一般相対性理論を修正したときに、初期宇宙で生成される重力波や密度ゆらぎの性質がどうなるのかを調べた。また、ブラックホールやワームホールといった強重力場について摂動を加え、それがどのように成長あるいは減衰するかを解析し、安定性を調べた。

初期宇宙については、修正重力理論のうちの一つの具体的なモデルを用いて解析した。このモデルのもとでインフレーションという初期宇宙に起こったとされる急激な加速膨張の間に生成される重力波を計算し、一般相対性理論のもとでできる重力波と比較した。今回用いた理論の重力波のパワースペクトルは、一般相対性理論のものと明らかに異なる波数依存性を持っていることがわかった。すなわち観測によってこの違いをとらえることができれば、今回用いた修正重力理論が一般相対性理論と比べて、よりよく初期宇宙を記述できるか否かがわかる。

また、今回の修正重力理論では密度ゆらぎについては一般相対性理論と同じ予言をすることがわかった。インフレーションにも数々のモデルが提唱されているが、そのうち最もシンプルなモデルは、一つのスカラー場のポテンシャルエネルギーによって宇宙の加速膨張を引き起こすというものである。この最もシンプルな初期宇宙モデルでは、重力波のパワースペクトルと密度ゆらぎとの比(テンソル-スカラー比)と重力波のスペクトルの波数依存性の間に整合性関係という関係が広く一般的に成り立つことが知られている。今回我々が用いたモデルではこの関係が波数によっては破れる可能性が示唆された。すなわち量子効果として量子補正を加えた重力理論では、インフレーションにおける整合性関係が破れる可能性があるということをも主張するものである。

また今回のモデルでは重力波のパワースペクトルを一般相対性理論のものよりも下げることがわかった。これにより、すでに宇宙背景放射の精密観測によって棄却されたインフレーションモデルをもう一度観測データの範囲にもってこることが可能である。

初期宇宙で生成されたゆらぎが現在までにどのように成長してきたかを知るためにはボルツマン方程式を解く必要がある。しかし、ボルツマン方程式を解析的に扱うには限度がある。つまり、手で計算できるのはほんの一部で、広い範囲で理論的予測をするためには、コンピュータを用いて数値計算をする必要がある。この目的のための数値計算コードのうち有名なものに CAMB というものがある。また、これに代わるものとして近年活発に開発がなされてきたのが CLASS というコードである。2014年、このコードを開発したグループが日本で講習会を開いた。これに参加し、この数値計算コードを使うことが可能になった。修正重力理論に応用するためにはこのコードの中身を書き換える必要がある。自分が用いたモデルに適用するためにコードを書き換え、数値シミュレーションをすることで最新の観測と比較することが現在の課題である。

研究成果の概要 つづき

ワームホールのような特殊な構造を持つ時空は Einstein 方程式の解として理論的に、現在までに複数個見つかっている。ワームホールは、最初のブラックホールが Einstein 方程式の解として理論的に発見された年と同じ年に、すでにその理論的存在が示唆されている。それほど歴史の古い理論的天体であるが、直接的観測はもちろん、ブラックホールのように、観測による間接的な存在証明もされていない。観測されない理由が、ワームホールが存在しないからなのかもしくは何らかの理由により観測することが難しいからなのかは分からない。いまのところ、理論的には存在しないという証明はされていない。

2つの時空を繋ぎ、かつ事象の地平面がない時空を「通行可能なワームホール」という。2つの時空を繋ぐ境界部分は「ノド」と呼ばれる。普通、ノドの部分にそのエネルギー密度が負となるような「エキゾチックな物質」がなければならない。

2つの静的球対称時空を用意して、「事象の地平面より大きな半径で囲まれた時空」を取り除いた時空を繋げると、これは通行可能なワームホールになっている。このようなワームホールは shell ワームホールと呼ばれる。

ある天体が実際に宇宙に存在しうるのか、あるいはすぐに崩壊してしまうかは、理論的に調べることができる。机の上に立てた鉛筆は、少し刺激が加わると崩れてしまう。天体が安定に存在するかどうか知るには、それを少し揺らしてみても崩れてしまわないか調べれば良い。

本研究では、shell ワームホールがどのような性質を持てば崩れないで安定なのか明らかにした。

本研究では次のことをおこなった。まず、4次元を含む一般次元での球対称・平面对称・双曲対称な shell ワームホールを構成する定式化をした。静的球対称・平面对称・双曲対称・時空で、かつ電荷と宇宙項のある時空を考えた。我々はエキゾチック物質として negative tension brane を用いた。この物質はある意味とてもシンプルな、理想的な物質である。これは他のエキゾチック物質よりも安定性の面でアドバンテージがある。例えば代表的なワームホール時空としての Ellis 時空にはエキゾチック物質として、それ自身が不安定である物質が使われている。よって Ellis 時空は不安定である。我々の用いた物質にそのような不安定性はないので、このアイデアは安定なワームホール解を得るという目的のためには有用である。

研究から分かったことは、一般的に電荷と負の宇宙項の両方の存在がワームホール安定化のために本質的であるということである。ただし、球対称時空で、かつ電荷の量が十分多い場合には宇宙項を必要とせずに安定となれることがわかった。また、双曲対称時空では、宇宙のみで、電荷を必要とせずに安定解が存在することがわかった。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

研究論文

- [1] Takafumi Kokubu, Tomohiro Harada " Negative tension branes as Stable Thin Shell Wormholes" , arXiv:1411.5454 (2014)
- [2] Kohji Yajima, Tsutomu Kobayashi "Gravitational waves from slow-roll inflation in Lorentz-violating Weyl gravity" , in preparation.

国際会議における発表

- [1] Kohji Yajima, Tsutomu Kobayashi "Gravitational waves from slow-roll inflation in Lorentz-violating Weyl gravity" The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), November 10-14, 2014, Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU), the University of Tokyo, Chiba, Japan
- [2] Takafumi Kokubu, Tomohiro Harada " Negative tension branes as Stable Thin Shell Wormholes" , The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), November 10-14, 2014, Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU), the University of Tokyo, Chiba, Japan

国内研究会における発表

- [1] 矢嶋 耕治 , 小林 努 " Gravitational waves from slow-roll inflation in Lorentz-violating Weyl gravity" , 日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学、2014 年 9 月
- [2] 國分隆文、原田知広," 薄い殻でできたワームホールの球対称摂動に対する安定性の、状態方程式依存性について"、日本物理学会 2014 年秋季大会、佐賀大学、2014 年 9 月
- [3] 國分隆文、原田知広," Negative tension branes as Stable Thin Shell Wormholes"、第 16 回特異点研究会、名古屋大学、2015 年 1 月
- [4] 國分隆文、原田知広," Negative tension branes as Stable Thin Shell Wormholes"、日本物理学会 第 70 回年次大会、早稲田大学、2015 年 3 月