

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 17 日現在

機関番号：18001  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22540287  
 研究課題名（和文）重力子が質量を持つ量子重力理論について

研究課題名（英文）On quantum gravity of massive gravity

研究代表者 小田 一郎 (ODA ICHIRO)  
 琉球大学・理学部・教授  
 研究者番号：40265517

研究成果の概要（和文）：本研究においては、重力を伝える素粒子である重力子に質量を持たせる機構について研究した。アインシュタインの一般相対性理論において、重力子は質量を持たない。しかし、超弦理論や宇宙論からの考察から、重力子が質量を持つ可能性があることが指摘されている。我々は、一般座標対称性を自発的に破ることによって、重力子に質量を持たせることに成功した。この研究は今後、素粒子論や宇宙論の研究において応用されると思う。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have investigated a mechanism to give a mass to the graviton which mediates the gravitational interaction. In the Einstein's general relativity, the graviton has the vanishing mass. However, it has been pointed out by superstring theories and cosmology that the graviton might have the non-vanishing mass. We have succeeded in making the graviton massive via spontaneous symmetry breakdown of general coordinate invariance. Our study would have some applications in elementary particle physics and cosmology in future.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子(理論)

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 現代の素粒子物理学の重要な未解決の問題の一つに、量子重力理論の構成がある。実際、「超弦理論」は現在でも世界的に活発に研究されているが、その最大の理由は超弦理論が繰り込み可能でユニタリーな量子重力

理論を与える理論であるからである。ただ、超弦理論は時空が 10 次元の場合に定義されており、我々の 4 次元時空では本当に無矛盾な量子重力の理論を与えているのかがはっきりしないという欠点がある。従って、直接的に超弦理論に関係しない従来の一般相対

性理論の枠組みで、4次元時空での量子重力の理論を作ることは非常に重要な研究である。最近、3次元時空の場合であるが、重力子が質量を持つ場合でも、力学的な自由度を持ち、繰り込み可能でユニタリーな量子重力理論を構成できることが分かってきた。従ってこれら3次元時空の量子重力理論を詳細に調べ、4次元の量子重力理論を構成するための知識や教訓を得ることは重要である。

(2) 一方、最近、観測的宇宙論の結果から宇宙の膨張に関して驚くべき事実、すなわち宇宙が加速膨張しており、現在は第二のインフレーション期にあるという事が判明した。宇宙に通常のダークマターとバリオン物質だけが存在し、重力が一般相対性理論で記述されると仮定すると、重力は引力だけを働かせるため、宇宙は減速膨張することはあっても加速膨張することはない。現在の宇宙の加速膨張を理論的に説明することは、理論物理学に課された重要な問題の一つになったが、現在の所最も有力な説は、宇宙定数、もしくはそれをスカラー場で置き換えた“第5元素(quintessence)”などの暗黒エネルギーを考え、それによって重力の引力に抗する斥力を与え、宇宙の膨張を説明するというものである。しかし、この暗黒エネルギーの性質や起源については全く分かっていないために、この解答は宇宙の加速膨張という謎を未知の暗黒エネルギーの存在という別の謎に置き換えただけに過ぎないように思える。では、正体の分からない暗黒エネルギーを導入しないで、加速膨張の現象を説明することは可能であろうか？

## 2. 研究の目的

(1) 本研究は、重力子に小さな質量を持たせることによって、重力の効果を長距離スケールで変更させ、加速膨張を説明しようとするものである。実際そのような解が存在するこ

とを、我々は今までの研究で明らかにしてある。ちなみにアインシュタインの一般相対性理論が成り立つという実験的な検証は、距離の大きさを表すと最短では約1mmから最長でも太陽系のスケールまで確かめられているに過ぎず、短距離スケールの素粒子のレベルや銀河以上の長距離スケールでは十分に検証されていないので、長距離スケールで一般相対性理論が変更を受けたとしても現在の実験と観測には全く抵触しない。さらに、超弦理論に出現するT双対性( $R \leftrightarrow 1/R$ )を考慮に入れると、一般相対性理論はプランクスケールで破綻することはすでに分かっているので、双対の関係にある長距離スケールにおいて破綻していても何ら不思議ではないように思われる。

従って、上で述べたマイクロな素粒子の世界での3次元時空での量子重力理論の最近の進展と、マクロな宇宙の世界の加速膨張解の存在は、重力子が小さな質量を持つ可能性があることを示唆している。さらに“重力・ゲージ理論の双対性”から、ト・フーフト(G. 'tHooft)は、超弦理論を量子色力学(QCD)に完全に対応させるためには、QCDのセクターにはスピン2の無質量のテンソル場は存在しないので、一般座標変換の自発的な対称性の破れから重力子は質量を獲得しなければならないと指摘している。

(2) 研究代表者の小田は、研究分担者の前野氏や大学院生の仲宗根君との共同研究を通して、重力子が質量を持つ理論について、色々な視点から研究を進めてきた。例えば、重力子に質量を持たせる「一般座標変換不変性の自発的対称性の破れの機構」において位相的な項の果たす役割を明らかにしたり、ゴーストの凝縮模型との関連を指摘したり、背景場がフリードマン・ロバートソン・ウォーカー(FRW)宇宙模型での加速膨張解の存在を

発見したり、3次元量子重力理論でもその重要性を考察したりなどしてきた。

我々は本研究によって、3次元量子重力理論に伴う未解決の問題に挑戦したいと思っている。すでに小田は、3次元アインシュタイン重力理論に、曲率テンソルやリッチテンソルの2乗の項のある適当な組み合わせを加えた重力理論は、パリティ不変で有質量の重力子の状態を物理的な力学的なモードとして持ち、かつ繰り込み可能でユニタリーな量子重力理論であることを初めて証明した。これは低次元量子重力理論の無矛盾性を初めて証明する画期的な研究だと自負している。実は3次元時空では、物理的かつ力学的な自由度として有質量の重力子を持つ理論としてもう一つの理論が存在することが知られており、それは「位相的な有質量重力理論(Topologically massive gravity)」と呼ばれている。しかし、この理論ではユニタリー性は証明されてはいるものの、繰り込み可能性についてはまだ証明されていない。本研究でこの理論の繰り込み可能性も証明したい。実はこれら2つの理論は一つの重要な共通点を持っている。それは作用の中の一般相対性理論を表すアインシュタイン・ヒルベルト項を除けば、共形変換(Conformal transformation)に対して不変になっているということである。今のところ、この対称性の意味は良く分かっていないが、4次元量子重力理論を構成する際にも重要な教訓を与えてくれるのではないかと考えているので、4次元の共形不変な量子重力理論についての研究も進めてみたい。

(3) 次に、理論の応用として、重力子が小さな質量を持つ場合の元素合成や宇宙の構造形成などに与える物理的な影響を定性的に分析し、さらに定量的にも数値計算し、重力子の質量の上限を決めたいと思っている。研究分担者の瓜生氏は宇宙物理が専門であり、

また数値的相対性理論の権威でもあるので瓜生氏の協力を得て、この方面の研究を発展させていきたいと思っている。

### 3. 研究の方法

(1) まず3次元時空の量子重力の詳細を明らかにしたい。20世紀の中ごろから現在まで約半世紀以上にも渡って、アインシュタインの一般相対性理論と量子力学を統一した「量子重力理論」を構成しようとする研究が続けられてきた。特に約25年前に超弦理論が登場したとき、その目的が達せられたように思われた。だが超弦理論は確かに無矛盾な量子重力を自然な形で含んでいるように思われるが、10次元時空で定式化されていて、その非摂動的な情報を取り入れる方法がわからないために、4次元時空にコンパクト化した場合、本当に無矛盾な量子重力を与えているのかが良く分からない。この状況を避けるために、我々は低次元のアインシュタインの一般相対性理論から出発し、これに修正を加えて、無矛盾な量子重力の理論を構成して行くという方法に沿って着実に研究を進めたい。実際、現在までに計量テンソルの高階の微分項を持つ理論については、確かに無矛盾な3次元の量子重力理論を与えるということが証明されている。しかし、もう一つの3次元時空の修正を受けた一般相対性理論、「位相的な有質量重力理論」については、ユニタリーで力学的な重力子の物理的なモードを持つことが知られているが、まだその繰り込み可能性の証明は与えられてはいない。以前の研究で用いたコンフォーマルモードの正則化のテクニックを用いて、この理論の繰り込み可能性の完全な証明を与えたい。

(2) もしこの研究が計画通りに進展しなかった場合は、3次元重力に関するもっと具体的な問題に取り組んで、上記の問題を解決するための手掛りを得たいと思っている。具体的

には、上記 2 つの 3 次元量子重力理論においても 4 次元重力の一般相対性理論に存在するブラックホール解と類似のブラックホール解が存在することがすでに知られている。ここで面白いことは、力学的な有質量の重力子の存在とブラックホール解の存在が共存しないことである。なぜなら有質量の重力子が存在するためには、作用中のアインシュタイン・ヒルベルト項の前の係数の符号は負でなければならないが、ブラックホール解が存在するためには正でなければならないからである。では、決して力学的な重力子とブラックホール解は共存しないのか？最近の研究によって、アインシュタイン・ヒルベルト項の前の係数の符号が負の理論から始めると、理論に存在する 2 つのパラメータが特別な場合、局所ゲージ対称性が拡張されて、力学的な重力子が純ゲージ自由度になり、重力子とブラックホール解は共存することが分かってきた。発想を逆転させ、アインシュタイン・ヒルベルト項の前の係数の符号が正の理論から始めると、この場合も局所ゲージ対称性が拡張されて、今度はブラックホール解が純ゲージ自由度になり、重力子とブラックホール解は共存するはずである。この方面の研究を行いたいと思っている。

#### 4. 研究成果

(1) 本研究においては、重力子が質量を持つ重力理論について詳細に調べた。従来の重力理論としては、アインシュタインの一般相対性理論が有名であるが、このアインシュタインの理論では、重力を伝える素粒子である重力子は質量を持たないために、重力は無遠方まで作用を及ぼす。しかし、我々の理論では、重力子が非常に小さな質量を持つために、重力の作用する距離は有限となる。この性質を使って、現在の加速膨張する宇宙が理論的に説明できるかを考えた。

(2) また、我々の理論において、ユニタリー性を破る、つまり量子力学の確率解釈を台無しにするゴースト場がないことも示した。さらに、有質量の重力子の理論から出発して、スムーズな無質量極限が取れることも示した。ただ残念なことに、厳密解としてブラックホール解が存在することや強結合の領域の有無については調べることはできなかった。

(3) 一応ミクロな素粒子物理学の分野で有質量の重力子の理論を構成できたので、この理論をマクロな宇宙物理学の分野に応用することを考えた。我々の理論では、重力子が質量をもつために、アインシュタインの一般相対性理論（この理論では重力子は質量を持たない）に比べて、確かに長距離領域で変更を受けることを示した。さらにこの変更のために、従来の暗黒物質の存在を仮定しなくとも、現在の加速膨張する宇宙を理論的に説明できることも示した。

しかし、我々の理論を使って、インフレーションを説明することが出来なかった。このために宇宙初期の軽い元素の元素合成の問題も解決できなかった。よって、我々のモデルにも暗黒物質を少し加えることで、インフレーションや宇宙初期の軽い元素の元素合成の問題を解決することを試みた。ただ残念なことに、PC の計算の能力の問題もあり、最終的な結論を得るには至らなかった。これらは今後の研究の課題だと思っている。

#### 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 15 件)

① “Subluminal OPERA neutrinos”, Ichiro Oda, International Journal of Modern Physics A 27 (2012) 1250033, 査

読有.

② “Compact Object CALculator ---- COCAL : A new code for equilibriums and quasiequilibrium initial data of compact objects” , Koji Uryu and Antonios Tsokaros, Physical Review D 83 (2012) 064014, 査読有.

③ “New code for equilibriums and quasiequilibrium initial data of compact objects. II. Convergence tests and comparisons of binary black hole initial data”, Antonios Tsokaros, Koji Uryu and Philippe Grandclement, Physical Review D 86 (2012) 104001, 査読有.

④ “Free differential algebra and pure spinor action in IIB superstring sigma models”, Ichiro Oda and Mario Tonin, Journal of High Energy Physics 1106 (2011) 123, 査読有.

⑤ “Magnetohydrodynamics in stationary and axisymmetric spacetimes: a fully covariant approach”, Eric Gourgoulhon, Charalampos Markakis, Koji Uryu and Yoshiharu Eriguchi, Physical Review D 83 (2011) 104007, 査読有.

⑥ “Higgs mechanism for gravitons”, Ichiro Oda, Modern Physics Letters A 25 (2010) 2411-2421, 査読有.

⑦ “Remarks on Higgs mechanism for gravitons”, Ichiro Oda, Physics Letters B 690 (2010) 322-327, 査読有.

⑧ “Thermodynamics of magnetized binary compact objects ”, Koji Uryu, Eric Gourgoulhon and Charalampos Markakis, Physical Review D 82 (2010) 104054, 査読有.

[学会発表] (計 6 件)

① Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, Charalampos Markakis and Yoshiharu Eriguchi, “磁場を持つ相対論的回転星の数値解” , ハドロン物質の諸相と状態方程式—中性子星の観測に照らして—研究会, August 31, 2012, YITP, Kyoto University, Kyoto, Japan

② Ichiro Oda, “Remarks on Two Gamma Ray Lines from the Inner Galaxy”, COSMO 2012, September 10-14, Beijing, China

③ Ichiro Oda and Mario Tonin, “Free differential algebra and pure spinor action in IIB superstring sigma models”, XVII European Workshop on String Theory 2011, September 5-9, Padua University, Italy

④ Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, Charalampos Markakis and Yoshiharu Eriguchi, “磁場を持つ高密度天体の定常解計算のための定式化と数値解法” , 次世代スーパーコンピュータによる爆発的天体現象の研究, January 31-February 2, 2011, University of the Ryukyus, Okinawa, Japan

⑤ Koji Uryu, Eric Gourgoulhon and Charalampos Markakis, “Magnetized binary black holes and neutron stars in equilibrium”, 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20), September 21-25, 2010, YITP, Kyoto University, Kyoto, Japan.

[図書] (計 5 件)

① 「よくわかる初等力学」, 前野昌弘, 東京図書, 2013, 403 ページ, ISBN-10: 4489021496

② 「よくわかる量子力学」, 前野昌弘, 東京図書, 2011, 369 ページ, ISBN-10: 4489020961

③ 「よくわかる電磁気学」, 前野昌弘, 東京図書, 2010, 322 ページ, ISBN-10: 4489020716

研究者番号 : 30222285

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小田 一郎 (ODA ICHIRO)  
琉球大学・理学部・教授  
研究者番号 : 40265517

### (2) 研究分担者

瓜生 康史 (URYU KOJI)  
琉球大学・理学部・教授  
研究者番号 : 40457693  
前野 昌弘 (MAENO MASAHIRO)  
琉球大学・理学部・准教授