

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)

大学院学生研究

2016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 (2017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・博士課程後期課程3年次	國分 隆文	印
指導教員	所属・職名	氏名	
	理学部・教授	原田 知広	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	重力波天文学に向けた強重力場をもつ天体の理論的研究		
研究組織 (研究代表者・共同研究者) ※2017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・博士課程後期課程3年次	國分隆文	
	理学研究科・物理学・博士課程後期課程1年次	小川潤	
研究期間	2016年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 500,000円 / (採択金額) 500,000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。)

ガンマ線バーストのような宇宙での高エネルギー現象を説明するための一つのモデルとして、研究代表者は裸の特異点からのエネルギー放出モデルを提案した。
 また共同研究者は、一般相対論を拡張した重力理論において様々な重力波源(ブラックホール・中性子星など)がどのように振る舞うのかについての研究を行った。重力理論を拡張したことにより、強重力場を持つ天体の振る舞いが一般相対論から変更されるため、今後の重力理論を峻別する大きな指針となる可能性が極めて高い。本研究では重力波源の理論的な研究のみを行っており、今後実際に観測によって重力理論を峻別が可能かどうかについて議論を行っていききたい。

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。)

{ 強重力場 } { エネルギー放出 } { 重力理論 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

研究代表者は、2016年度中に次の2つの研究を行った。

1. 裸の特異点からのエネルギー放出モデル (自己相似モデル)

球状対称に分布した塵状物質(ダスト)の重力崩壊は Lemaitre-Tolman-Bondi (LTB) 解で一般に記述される。LTB 解は、一定の正則な初期条件の下で裸の特異性を形成することが知られている。特に、marginally bound な自己相似 LTB 解では、特異点は大局的に裸であることが知られている。

裸の特異点は、完全流体で満たされた時空でさえ形成されることが知られており、これはダストよりも現実的な物質である。したがって、裸の特異点は我々が予想していたよりも自然に宇宙で形成されている可能性がある。私は共同研究者とともに、裸の特異点からエネルギーが放出されるモデルを構築し、そのエネルギーを評価した。裸の特異点から光が発せられたとすると、その中で最も早い光は Cauchy 面を形成する。Cauchy 面の内側の振る舞いは、外側の初期条件からは一意に決まらないため外側からはわからない。

しかし、曲率特異点を除いて時空全体が予測可能であるべきという観点から、Cauchy 面の内部をよく知られた時空に置き換えることによって、(曲率特異点以外は) 予測可能な時空モデルを構築することができる。具体的には2つの自己相似 LTB 解を Cauchy 面で接続することにより可能である。この構築の方法から、特異点からのエネルギーは光的超曲面=光的シェルを持つエネルギーとして計算される。我々は、このシェルの持つエネルギーが裸の特異点からのエネルギーとして解釈できるかどうかについて議論した。その結果、シェルが特異点から外側に膨張するに従って、シェルの持つエネルギーは増加することが分かった。この増加するエネルギー現象についての解釈は、シェルが周囲のダストのエネルギーを吸収しながら外側に広がるのが理由である。

したがって、シェルの持つエネルギーは、少なくともこのモデルでは裸の特異点からの純粋なエネルギーとみなすことはできないことが分かった。

2. 裸の特異点からのエネルギー放出モデル (非自己相似モデル)

上記の研究1に記したように私は共同研究者とともに、裸の特異点からのエネルギーを評価するためのモデルを検討した。上述のモデルでは、放出されるエネルギーは裸の特異点のものと解釈できなかつた。遠方の観測者は、周囲のダストのエネルギーを吸収することによって無限に増加したシェルのエネルギーを観測する。この興味深い特性は、自己相似な時空を用いたことで引き起こされている。

非自己相似の塵が崩壊しても、ある初期条件で裸の特異点が形成されることが知られている。我々はこの事実に焦点を当て、この非自己相似ダスト解を背景に、エネルギー放出モデルを検討した。つまり、裸の特異点からのエネルギーとしてのシェルのエネルギーを観測するために、非自己相似な時空を上記の研究1と同様の方法で接続し、エネルギー放出モデルを構築した。この研究は現在進行中である。

これら一連の研究は、特異点周辺の物理学の理解を深めるだけでなく、ガンマ線バーストのような高エネルギー現象のメカニズムを解明する鍵になる可能性が期待される。

研究成果の概要 つづき

共同研究者は、2016 年度中に以下の内容の研究を行った。

一般相対論は様々な現象について観測・実験により実証され、多くの研究における基礎とされてきた。しかし、近年の観測によって発見された宇宙の加速膨張により一般相対論は綻びを見せ始めている。宇宙の加速膨張を物質場によって説明する 1 つの方法として、ダークエネルギーと呼ばれる圧力が負となる物質の導入が考えられるが、そのような物質の存在を肯定する積極的な根拠は見つかっていない。本研究では、重力理論の検証の基盤を構築することを目標にし、一般相対論を拡張した重力理論において様々な重力波源に関する理論的な研究を行った。

1. クインテッセンス場が満ちた宇宙における中性子星の解の構築

一般相対論を拡張する方法の 1 つとして、ダークエネルギーの代わりにダイナミカルな場を考える方法がある。このような方法の中で、近年までにクインテッセンス場と呼ばれる動的なスカラー場がダークエネルギーの起源となるモデルが良く研究されている。本研究では、このクインテッセンス場が物質と結合するとしたとき、中性子星の内部における一般相対論からの差異を精査した。中性子星由来の重力波が検出されると、中性子星の質量-半径関係や星内部の超高密度物質の状態方程式が分かることが期待されている。クインテッセンスモデルを含めた拡張重力理論において、中性子星内部の構造について理論的に研究し、今後の重力波観測に備える必要がある。

この理論では、クインテッセンス場と物質の結合度合いを表すパラメータが存在する。宇宙の加速膨張を説明しつつ、太陽系近傍でのテストをパスできるパラメータ領域内で、重力場の方程式を数値的に解くことを目標として計算を行った。このとき、中性子星内部の状態方程式は、原子核物理や数値相対論でよく調べられている状態方程式を採用している。一般相対論で許される中性子星の上限質量よりも、重くなるのか軽くなるのかについて議論したのち、論文としてまとめ投稿予定である。

2. スクリーニング機構を持つ重力理論における物質をまとったブラックホールの研究

一般相対論において、ブラックホールは質量・電荷・角運動量の 3 つの観測量(毛に例えられる)によって完全に特徴づけられるという無毛定理が成立することが知られている。重力を記述するテンソル場にスカラー場の自由度を追加したスカラー・テンソル理論においても、ブラックホールはスカラー場の非一定な配位(スカラー場の毛)を許さないという無毛定理が成立する。しかし、現実に存在するブラックホールの周りに物質が存在しているため、物質とスカラー場が結合する場合、ブラックホール近傍の観測からスカラー場の存在が明らかになる可能性がある。

本研究では、スクリーニング機構を有するスカラー・テンソル理論に着目した。拡張重力理論は、宇宙の長距離スケールでは一般相対論から拡張されるが、太陽系スケールではその拡張が抑制されることで一般相対論と同じふるまいを回復する。この機構をスクリーニング機構と呼ぶ。強い重力を持ったブラックホール近傍に対称性の低い物質源が存在するとしたとき、スクリーニング機構を有した拡張重力理論がどのように振る舞うのかを調べた。

まず、ブラックホール近傍では、その周りの物質とスカラー場が時空を曲げる効果はほとんど無視できるものと近似した。次に、スカラー場の時間変化は現在のハッブル時間スケールであるため、ブラックホール近傍ではスカラー場は近似的に静的な場と取り扱えるとした。さらに、物質が持つ自己重力に対してブラックホールの持つ重力が十分大きいことから、物質の自己重力を無視できるものと仮定した。このような近似と仮定のもとで、ブラックホール近傍に球・球殻・ディスク状の物質を配置し、スカラー場の運動方程式を数値的に解いた。

本研究の結果によると、一般的にはスカラー場と物質が結合することで第 5 の力がブラックホールの周囲に伝播するが、スクリーニング機構を持つ理論の場合だと伝播が抑制されることが分かった。また、第 5 の力の強さが物質の配置の仕方に依存して変化するが、ブラックホールのもつ重力に比べて第 5 の力は大変小さいことが分かった。これより、ブラックホール近傍の観測によってスクリーニング理論を有するスカラー・テンソル理論の一般相対論からの差異を議論するのは大変難しいということが判明した。現在、結果を精査している段階であり近日中に論文としてまとめ投稿予定である。

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)

④ 学会発表、セミナー発表

海外発表

●Hiromu Ogawa, “Instability of hairy black holes in shift-symmetric scalar-tensor theories,” 『Collaborative Conference on Gravitational Wave』, Jeju, Korea, May 2017.(招待講演、発表予定)

●Takafumi Kokubu, Hideki Maeda, Tomohiro Harada, “Does the Gauss-Bonnet term stabilize wormholes?,” 『21st International Conference on General Relativity and Gravitation』, Columbia University, USA, July 2016.

●Hiromu Ogawa, “Instability of hairy black holes in shift-symmetric scalar-tensor theories,” 『21st International Conference on General Relativity and Gravitation (GR21)』, New York City, Columbia University, July 2016.

国内発表

●小川潤, 小林努, 平松尚志, “Vainshtein mechanism in Schwarzschild spacetime with disk-like matter,” 『2017年春季大会 物理学会』, 17pK41-11, 大阪大学、大阪府、2017年3月.

●國分隆文, Sanjay Jhingan, 原田知広, “ブラックホール候補天体からのエネルギー放出モデル”, 『ブラックホール磁気圏研究会』, 南紀白浜、和歌山、2017年3月.

●國分隆文, “Stability of Wormholes with Singular Hypersurfaces in Einstein and Gauss-Bonnet theories of gravity”, 大阪市立大学、大阪、2017年2月.

●國分隆文, “Stability of Wormholes with Singular Hypersurfaces in Einstein and Gauss-Bonnet theories of gravity”, 名古屋大学、名古屋、2017年1月.

●國分隆文, Sanjay Jhingan, 原田知広, “裸の特異点からのエネルギー放出モデル”, 『第18回特異点研究会』立教大学、東京、2016年12月.

●Hiromu Ogawa, Teruaki Suyama, Shuichiro Yokoyama, “Can a quintessence field affect the internal structure of neutron stars?” 『The workshop on General Relativity and Gravitation in Japan(JGRG26)』, Osaka City University, Osaka, Oct 2016.

●小川潤, 横山修一郎, 須山輝明, “物質と結合するクインテッセンス場が与える中性子星への影響,” 『2016年秋季大会 物理学会』, 21aSQ-13, 宮崎大学、宮崎県、2016年9月.