学　位　審　査　報　告　書

（ふりがな） 氏　　名	やぎ　　けんと 八木　絢外
学位（専攻分野）	博　　士　（　理　学　）
学位記番号	理　　博　　第　　号
学位授与の日付	平成　　年　　月　　日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学　専攻
（学位論文題目） Probing Alternative Theories of Gravity with Binary Gravitational Waves （連星からの重力波を用いた修正重力理論の検証）	
論文調査委員	（主査）　中村卓史　教授 青山秀明　教授 田中貴浩　教授

理　学　研　究　科

（ 続紙 １ ）

京都大学	博士（理学）	氏名	八木　絢外
論文題目	Probing Alternative Theories of Gravity with Binary Gravitational Waves （連星からの重力波を用いた修正重力理論の検証）		

（論文内容の要旨）

現在、重力波直接検出に向けて、重力波干渉計の感度向上への取り組みが世界的に進められている。日本においても LCGT 計画が始まり、重力波による新しい物理の展開に対する期待が高まっている。最も重要な重力波源としては、中性子星やブラックホール等のコンパクト天体から成る連星が挙げられる。これらの連星は重力波放出による反作用で軌道半径を縮め、やがて合体する。観測的にわかっている連星の合体までにかかる時間から、そのような中性子星連星の合体イベントの頻度が計算されており、次世代重力波干渉計の感度であれば、年間に数イベントは確実に検出されると考えられている。このような連星合体イベントの重力波観測からは多くの天体物理学、核物理学的に興味深い情報が得られると予想されるが、それに加えて、強重力の場合に一般相対論がはじめて高い精度で検証されるという大きな意味を持つ。このような重力理論の検証という観点からは、将来の宇宙重力波干渉計を用いると、地面振動によるノイズを避けることで低振動数側に感度を持つために、より興味深い制限を与えることができる。

申請者は、このような宇宙重力波干渉計を用いた重力理論の検証を系統的に進めた。近年、ダークエネルギーやダークマターに代わって観測されている宇宙の膨張則を説明する目的で様々な重力理論の修正が考案されている。本論文では典型的な重力理論の修正として、(i)スカラーテンソル理論、(ii) 質量を持った重力子、(iii)余剰次元効果によるＢＨ質量の喪失を取り上げ、それぞれに対してこれまでの太陽系での精密な重力観測などからどれだけ重力理論の修正に対する制限が得られているかをレビューしたのち、将来の重力波観測がどのくらい新たな制限ができるかを明らかにした。その際、自転や連星軌道の離心率の影響を取り入れたモンテカルロシミュレーションによる解析をおこない、より現実的な制限を得たという点と、DECIGO や BBO と呼ばれる 0.1Hz 帯に高い感度を持つ宇宙重力波干渉計によって得られる制限も含めた総合的な解析をおこなった点が特筆すべき点である。特に自転の効果は重力波波形に対してパラメータ間の縮退を引き起こすため重力理論の制限を緩めてしまうと考えられていたが、歳差運動の影響を考慮することで縮退が解け、重力理論に対する制限がそれほど弱くならないということを明らかにした。結果として、スカラーテンソル理論の場合には更に低周波側に感度の高い LISA による制限が強く、現在得られている太陽系の観測から得られている制限より４ケタ程度厳しい制限をつけることが可能なことを明らかにした。重力子が質量を持つ場合については DECIGO や BBO がより有効で、こちらも現在の制限よりも４ケタ程度厳しい制限がつけられる。ブラックホールの蒸発速度に関しては、Randall-Sundrum によって提唱されたブレーンワールドモデルを仮定すると余剰次元のサイズと蒸発速度が関係するのだが、実験室での重力の精密測定から得られる余剰次元のサイズに対する制限に対して、４０倍程度強い制限をつけることが可能であることを明らかにした。

これらの重力理論の修正が検証可能であるためには、連星が周りの環境の効果を受けて擾乱されないことが必要である。銀河内の典型的なガス分布を用いてガス降着によって生じる降着円盤による角運動量輸送が、このような重力理論の検証の妨げにならないかについても評価をおこない、そのような心配はほとんど不要であるということも示した。

（続紙 ２ ）

（論文審査の結果の要旨）

近年、重力波観測に向けた技術の進歩は目覚ましく、重力波天文学の幕開けは近いと言える。重力波観測から得られる情報の中でも、基礎物理の進展に大きな寄与を果たすものの一つに重力理論の観測的検証という側面がある。ブラックホールや中性子星といったコンパクト星からなる連星の合体は、合体直前を除けば、ほぼ２体の質点の運動であり、理想的な物理系である。そのため、重力波放出に反作用を受けた軌道の進化を理論的に予測し、重力波の波形を高い精度で推定することが可能であり、重力理論の検証に最適な系であると考えられている。申請者は、この重力波観測による重力理論の検証というテーマに対して、将来の重力波観測がどれだけの意味を持ち得るのかを論じてある。

申請者は、(i)スカラーテンソル理論、(ii) 質量を持った重力子、(iii)余剰次元効果によるＢＨ質量の喪失、といった代表的な重力理論の修正の可能性に焦点を当て、フィッシャー解析によって重力理論の修正が、どの程度まで検出可能であるかを明らかにしている。このような重力理論に対する修正を重力波観測からどれだけ制限できるかという議論自体は新しいものではないが、本論文では、様々な点でこれまでの研究よりも発展した部分があると言える。まず、連星の軌道に関しては円軌道に限る等の理想化をおこなわず、自転の効果や軌道離心率の影響をきちんと考慮に入れている。重力波の波形として見たとき、自転の効果は重力理論の修正の効果と縮退するため、一般には自転の効果を取り入れると重力理論の修正に対する感度を下げることになると思われる。しかし、自転がある場合には自転軸が歳差する影響が重力波波形に現れ、その効果をきちんと解析に取り入れれば、重力理論の修正に対する感度はそれほど下がらないということを申請者は明らかにしている。また、軌道離心率の影響もパラメータ間の縮退を招くが、スカラーテンソル理論の場合のように、場合によってはそのことが重力理論の修正に対する制限にほとんど影響しないような場合もあることを指摘した点も新しい。また、これまでの研究では余り議論されていなかった DECIGO や BBO といった 0.1Hz 帯での重力波観測計画が、重力理論の検証という側面からどれだけの意義を持つのかを明らかにした点も評価できる。DECIGO/BBO は主目的が宇宙重力波背景放射の直接観測であり、そのような感度を達成するためには赤方偏移が 1 を大きく超えた遠方の連星からの重力波も全て観測可能である感度が必要となる。そのため、非常にたくさんの連星が検出されると期待されるが、そのような大量のデータを統計的に扱うことによって、重力理論の制限に対してより強い制限をつけることができる点を指摘している点も高く評価できる。

さらに、このような重力理論の検証をおこなうためには連星が環境による外乱を受けていない必要がある。これまで、銀河中心の巨大ブラックホールと太陽質量程度の天体からなる連星のような質量比が大きな連星に関して環境の効果に関する議論はあった。しかし、重力理論の検証という観点からは太陽質量程度の２つの天体からなる連星も重要である。そのような連星に関しても高い確率で外乱の効果は無視できるであろうという評価を与えている点が評価できる。また、たとえ大きな外乱を受けた連星が存在したとしても、その割合が小さいため、重力理論の修正の効果のような全ての連星に普遍的にはたらく効果とは十分区別が可能であるという結論を得ている。

以上のように、十分に学術的意味の明らかな成果を多数含んだ本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認められるものである。

また、平成 24 年１月 16 日　主論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。