

## 2. 【現在までの研究状況】(図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください。様式の変更・追加は不可(以下同様))

- ① これまでの研究の背景、問題点、解決方策、研究目的、研究方法、特色と独創的な点について当該分野の重要文献を挙げて記述してください。
- ② 申請者のこれまでの研究経過及び得られた結果について整理し、①で記載したことと関連づけて説明してください。その際、博士課程在学中の研究内容が分かるように記載してください。申請内容ファイルの「4. 【研究遂行能力】」欄に記載した論文、学会発表等を引用する場合には、同欄の番号を記載するとともに、申請者が担当した部分を明らかにして記述してください。

本研究のテーマは、**重力波の偏極モード探査による重力理論検証**である。

### ① 【研究の背景、問題点】

アインシュタインの一般相対性理論は、時空を四次元ローレンツ多様体として記述する非線形で動的な重力理論である。一般相対性理論は弱い重力場での実験的・観測的検証を通して、現在基本的な重力理論として広く受け入れられている。しかしその一方で、宇宙加速膨張の説明や量子論と重力理論の統合などを果たすべく、多くの拡張された重力理論が提案されている [a]。そのため、**非線形効果のより効く強重力場での重力理論検証が必要**とされている。

2015 年のアメリカの重力波望遠鏡 LIGO による重力波初観測によって、重力波を用いた重力理論検証が可能となった [b]。ブラックホールなどの**コンパクト連星合体からの重力波の偏極モード探査によって、重力理論を強重力場で検証できる** [c]。重力波は時空の歪みが波として伝わる現象である。光が偏光自由度を持つように重力波も偏極モードという自由度を持ち、図 1 のように自由質点に異なる作用を及ぼす。一般相対性理論で許される二つのテンソルモードに加えて、拡張重力理論では四つの非テンソル(ベクトル、スカラー)モードが許される。したがって、コンパクト連星合体という強重力場・動的な系からの重力波信号に含まれる偏極モードを分離することで、重力の性質に迫ることができる。

これまでのコンパクト連星合体からの重力波を用いた検証 [d,e] では、テンソル、ベクトル、スカラーモードが別々に探査されてきた。しかし、図 2 のように実際の拡張重力理論では、重力波はテンソル・非テンソルモードの混合になっているため、このような**純粋な偏極モード探査では現実の拡張重力理論を検証することはできない** [f]。

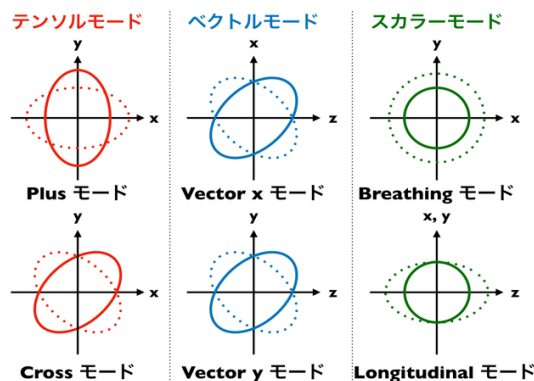


図 1. z 方向に伝播する各偏極モードによる自由質点の運動

### 【解決方策、研究目的、研究方法】

混合した偏極モードを、適切にパラメータ化した波形モデルを用いて探査することで、より現実的な重力理論や重力現象の検証が可能となる。そこで、**コンパクト連星合体からの重力波の混合偏極モードモデルを構築し、その構造を解析することで偏極モード分離可能性を解明**するのが研究目的であった。以下が研究方法の詳細である。

#### ・ 混合偏極モードモデルの構築

拡張重力理論におけるコンパクト連星合体からの重力波形には、重力理論に依存する波形要素と依存しない波形要素がある。連星公転面の視線方向に対する傾きを表す軌道傾斜角依存性などの、重力理論に依存しない波形要素を反映させた混合偏極モードモデルを構築した。

#### ・ フィッシャー行列やベイズ推定による観測シミュレーション

フィッシャー行列は対数尤度関数の微分で構成される行列で、その逆行列はパラメータの測定誤差を与える [g]。また、ベイズ推定はベイズの定理に従いパラメータの事後確率を推定する手法である [h]。フィッシャー行列やベイズ推定によって、構築した混合偏極モードモデルの観測シミュレーションを行い、偏極モードの分離可能性や波形モデルが観測結果に与える影響等を調べた。

### 【特色と独創的な点】

重力理論の物理的自由度である重力波の偏極モードを探査することで、強重力場での重力理論を直接検証できるという点が特色である。軌道傾斜角依存性などの重力理論に依らない波形要素に着眼し、世界で初めてコンパクト連星合体からの重力波の混合偏極モードモデルを構築することで、現実の拡張重力理論における偏極モード分離可能性を系統的に明らかにした点が独創的である。

Theory	Plus	Cross	Vector x	Vector y	Breathing	Longitudinal
General Relativity	✓	✓				
Kaluza-Klein theory	✓	✓	✓	✓	✓	
Brans-Dicke theory	✓	✓			✓	✓
f(R) theory	✓	✓			✓	✓
Bimetric theory	✓	✓	✓	✓	✓	✓

図 2. 各重力理論で許される偏極モード

(現在までの研究状況の続き)

## ② 【これまでの研究経過及び得られた結果】

これまでに主に以下の偏極モード分離可能性に関する研究に取り組み、これらを達成してきた。申請者は下記(I)~(IV)の成果に対して、問題設定、理論計算から解析、考察に至るまでの全てを行った。(III)、(IV)については、結果が得られたため、現在論文執筆を進めている。

### (I) 現代地上重力波望遠鏡による偏極モード分離可能性

図3のように、重力波が軌道傾斜角に対してどのように放射されるかを表す重力波放射パターンは系の幾何によって定まる。四重極式を用いて導出した重力波放射パターンなどの重力理論に依らない波形要素を持つ、コンパクト連星合体からの混合偏極モードモデルを初めて構築した。構成した波形モデルを用いてフィッシャー行列を計算し、図4のように非テンソルモード振幅への感度を推定することで、現代地上重力波望遠鏡による偏極モード分離可能性を分析した。**コンパクト連星合体の偏極モード分離には原則的に偏極モード数分の地上重力波検出器が必要**となることなど、**強重力場検証に必要な条件を初めて明らかに**した(4. 研究遂行能力[1,8,9])。

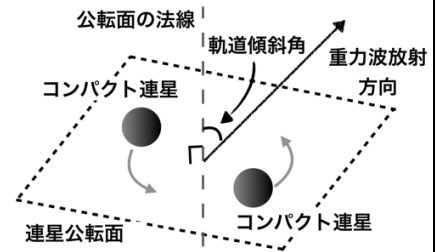


図3. 重力波放射パターン

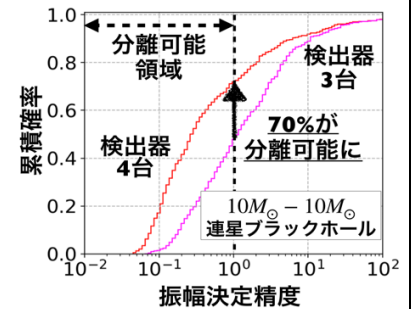


図4. スカラーモード振幅決定精度の累積確率

### (II) 次世代地上重力波望遠鏡による偏極モード検証の展望(博士課程)

次世代の地上重力波望遠鏡は優れた低周波感度を持つため、地球の自転の影響を考慮する必要がある。定常位相近似によって地球自転の効果を反映した混合偏極モードモデルのパラメータ推定によって、次世代地上重力波望遠鏡による偏極モード検証の展望を調査した。その結果、次世代地上重力波望遠鏡では図5のように、**地球自転の効果のために検出器台数以上の混合偏極モードの検証が可能になることを示した**。また、LIGO らの観測から明らかにされたコンパクト連星の合体率と星形成率を用いて生成した連星分布から、パルサーPSR B1913+16からのスカラーモード振幅に対する**弱い重力場での制限( $\leq 1 \times 10^{-3}$ )と同程度の精度での検証が強重力場で新たに可能になることを示した**(4. 研究遂行能力[2,11])。

### (III) LIGO らの解析の再検討(博士課程)

LIGO らの実データ解析 [d,e]は、検出器の応答関数をテンソル、ベクトル、スカラーモードと置換することで、どの種類の偏極モードが純粋に信号をよく再現するかを調べるというものであった。しかし、実際には応答関数だけでなく重力理論に依らない軌道傾斜角依存性も考慮する必要がある。GW170814 や GW170817 の純粋な偏極モード探査を、軌道傾斜角依存性を考慮して再解析した。その結果、**重力波放射パターンがベイズ推定結果に影響を与えるものの、依然としてテンソルモードが支配的であることを示した**。

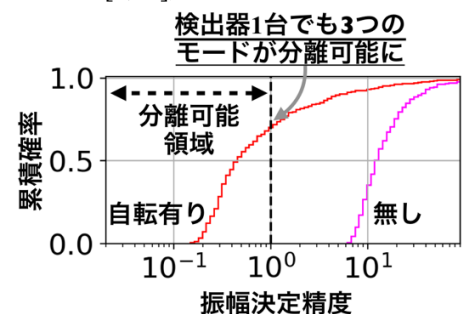


図5. 地球自転の有無によるスカラーモード振幅決定精度の変化

### (IV) スカラーテンソル偏極モードへの観測的制限(博士課程)

テンソルモードとスカラーモードで構成された混合偏極モードモデルの分離可能性を、ベイズ推定によって精査した。そして実際に実データをベイズ推定することで、図6のように初めて付加的な**スカラーモードの振幅への制限を GW170814 と GW170817 に対して与えた**。しかし、当時はイタリアの検出器の雑音レベルが高いうえに、重力理論に依存する波形要素を考慮していないことで検証感度が拡張重力理論に最適化されておらず、あくまで一般相対性理論における位相進化を仮定したスカラーモードに対する予備的な制限となっている。

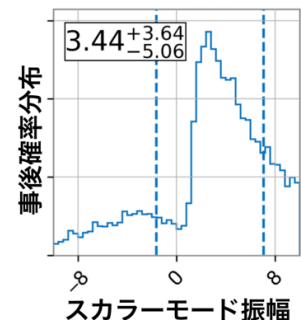


図6. GW170814 のスカラーモード振幅に対する事後確率分布

[a] C. M. Will, Living Rev. Relativ. **9**, 3 (2006).

[b] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 221101 (2016).

[c] D. M. Eardley *et al.*, Phys. Rev. Lett. **30**, 884 (1973).

[d] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 141101 (2017).

[e] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **123**, 011102 (2019).

[f] A. Nishizawa *et al.*, Phys. Rev. D **79**, 082002 (2009).

[g] C. Cutler and É. E. Flanagan, Phys. Rev. D **49**, 2658 (1994).

[h] J. Veitch *et al.*, Phys. Rev. D **91**, 042003 (2015).

### 3. 【これからの研究計画】

#### (1) 研究の背景

これからの研究計画の背景、問題点、解決すべき点、着想に至った経緯等について参考文献を挙げて記入してください。

##### 【研究計画の背景と問題点】

コンパクト連星合体からの重力波混合偏極モードの分離可能性を検討してきたので、これからは実際に**拡張重力理論に最適化した重力波偏極モード探査によって重力理論を検証する**(p7, 図 10 参照)。

現在の混合偏極モードモデルは重力理論に依存する波形要素が不完全である。非テンソルモードに対しても一般相対性理論で予測されるテンソルモードと同じ波形を仮定している。一般的に同じ波形のモードを区別するのは難しいため、原理的な分離可能性を議論する上でこの仮定は保守的で十分である。しかし、**拡張重力理論は付加的な偏極モードの存在だけでなく、波形の補正も要求する** [i,j,k]。拡張重力理論において付加的な偏極モードの存在と波形の補正は関係するため、**波形の補正効果なしの偏極モード探査では波形補正を受けた偏極モードを効率的に分離・抽出できず、最適な感度で適切に重力理論を検証できない**。

##### 【解決すべき点、着想に至った経緯】

さらに種々の重力理論が予測するように、2. 【現在までの研究状況】②(III)の結果はテンソルモードが非テンソルモードに対して支配的であることを示唆している。したがって、波形補正を考慮することで偏極モード探査感度を拡張重力理論に最適化し、微弱な非テンソルモードを高感度で探査する必要がある。**偏極モード探査の感度最適化が重要課題**となっている。そこで、**混合偏極モードモデルに波形補正をパラメータ化して導入する**という着想に至った。これはテンソルモードの波形補正を評価する重力理論検証 [l] を非テンソルモードまで拡充し一般化したものである。また、統計的に検証精度を向上させるために複数波源からの情報を重ね合わせる手法 [m,n] の最適化にも、波形補正を導入した枠組みは不可欠である。

[i] N. Yunes and F. Pretorius, Phys. Rev. D **80**, 122003 (2009). [j] N. Cornish *et al.*, Phys. Rev. D **84**, 062003 (2011).

[k] K. Chatziioannou *et al.*, Phys. Rev. D **86**, 022004 (2012). [l] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. D **100**, 104036 (2019).

[m] H. Yang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 161101 (2017). [n] S. Roy *et al.*, LIGO-DCC No. P1900257 (2019).

#### (2) 研究目的・内容 (図表を含めてもよいので、わかりやすく記述してください)

- ① 研究目的、研究方法、研究内容について記述してください。
- ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、具体的に記入してください。
- ③ 共同研究の場合には、申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ④ 研究計画の期間中に異なった研究機関（外国の研究機関等を含む）において研究に従事することを予定している場合はその旨を記載してください。

##### ① 【研究目的、研究方法、研究内容】

本研究の目的は、**コンパクト連星合体からの重力波偏極モード探査による強重力場での重力理論検証**である。非線形領域での重力現象を、重力理論の自由度である重力波偏極モードの探査によって解明する。

波形補正のパラメータ化によって、拡張重力理論に最適化した混合偏極モード探査を実現する。重力波形の振幅と位相は、連星の軌道速度で展開できる。拡張重力理論における重力波形は、一般相対性理論での展開係数に各理論に応じた補正が加わった形となる。よって、図 7 のようにこの補正をパラメータとして導入することで、様々な拡張重力理論における重力波形を同時に表現できる。それぞれの偏極モードを適切に**パラメータ化した混合偏極モードモデルによって、種々の重力理論に幅を持たせた偏極モード探査が可能**となる。最適化した混合偏極モード探査によって、**拡張重力理論における非テンソルモードに初めて観測的制限を与える**。

一般相対性理論における波形  
パラメータ化された波形

$$\tilde{h}_{\text{ppE}}(f) = \tilde{h}_{\text{GR}}(f) \underbrace{\{1 + \alpha(\pi M f)^{a/3}\}}_{\text{振幅補正}} \underbrace{e^{2i\beta(\pi M f)^{b/3}}}_{\text{位相補正}}$$

重力理論に依るパラメータ:  $(\alpha, a, \beta, b)$

Theory	$\alpha$	$a$	$\beta$	$b$
General Relativity	0	-	0	-
Brans-Dicke theory	$-\frac{5}{96} \frac{S^2}{\omega_{\text{BD}}} \eta^{2/5}$	-2	$-\frac{5}{7168} \frac{S^2}{\omega_{\text{BD}}} \eta^{2/5}$	-7
Massive graviton	0	-	$-\frac{\pi^2 D_{\text{M}}}{2\lambda_g^2(1+z)}$	-3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

図 7. 拡張重力理論における重力波形と波形のパラメータ化

##### ② 【計画と、何をどこまで明らかにしようとするのか】

本研究の目的達成のための手段として、(i) 「**パラメータ化された混合偏極モードモデルによる最適化**」、(ii) 「**複数イベント重ね合わせにおける最適化**」の二段階を経る。以下に詳細を述べる。

(i) まず、各偏極モードの振幅と位相の展開係数を適切にパラメータ化して波形補正の効果を導入し、**重力理論に依存する波形要素も含めた一般的な混合偏極モードモデルを構築**する。どの次数の展開係数に



(研究目的・内容の続き)

こういったパラメータを導入するべきかといったパラメータ化の手続きは、具体的な重力理論での重力波形をもとに決定される。非テンソルモードに対しては、スカラーテンソル理論というスカラー場を加えた理論と bimetric 理論という二つの計量を扱う理論のみを足掛かりにしたパラメータ化が報告されている [k]。ベクトルテンソル理論と TeVeS や Einstein-Aether 理論などのスカラーベクトルテンソル理論といったベクトル場を加えた理論についても、コンパクト連星合体からの重力波信号を計算し、非テンソルモードの放射によるハミルトニアンと放射反作用の補正を考慮することで、同様に重力波形をパラメータ化できる。こうして混合偏極モードモデルをスカラー場やベクトル場を持つ広範な拡張重力理論の範囲でパラメータ化する。このパラメータ化した混合偏極モードモデルで実際に観測された重力波イベントをベイズ推定することで、**拡張重力理論の枠組みで混合偏極モードモデルを初探査**する。

(ii) 非テンソルモードの振幅はテンソルモードに比べてさらに小さい。単一の重力波による検証精度には限度があるので、**複数の重力波源の偏極モード探査結果を統計的に結合することで検証精度を向上**させていく必要がある。そこで、図 8 のように複数源からの重力波信号を適当にスケールさせ重ね合わせることで実効的に信号を増幅させる。理想的には検証精度を信号数の平方根に従って改善させることができるが、重ね合わせの最適化には拡張重力理論における重力波の位相進化を考慮したスケールが必要である。そのために、(i) で構成した波形補正効果を含む波形モデルに従って信号を整形し、複数の重力波信号を重ね合わせる。2. 【現在までの研究状況】②(II)より、次の観測期間で $O(10^3)$ のイベント検出が期待されている。よって、この複数イベント重ね合わせによって単一源の約 30 倍の検証精度を実現し、パルサー PSR B1913+16 による**弱重力場での制限に迫る振幅決定精度 $\sim 3 \times 10^{-3}$ での検証を初めて強重力場で実施**する。

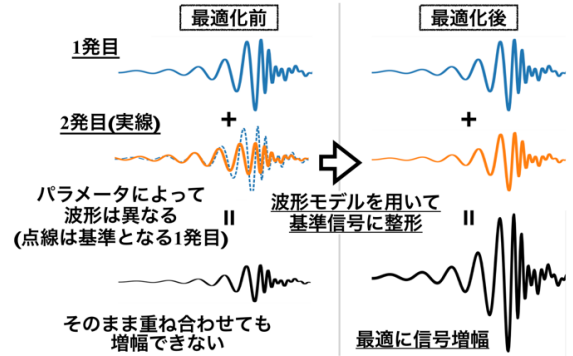


図 8. 信号重ね合わせのイメージ

### (3) 研究の特色・独創的な点

次の項目について記載してください。

- ① これまでの先行研究等があれば、それらと比較して、本研究の特色、着眼点、独創的な点
- ② 国内外の関連する研究の中での当該研究の位置づけ、意義
- ③ 本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し

#### ① 【本研究の特色、着眼点、独創的な点】

本研究はコンパクト連星合体からの重力波の混合偏極モード探査によって重力理論を強重力場で高精度検証するものである。一般相対性理論は太陽系実験や連星パルサー観測によって、弱い重力場で高精度に検証されている。しかし、一般相対性理論は非線形で動的な理論であるため、非線形効果のより効く強重力場での動的な検証が重要である。**コンパクト連星合体という強重力場・動的な系からの重力波の偏極モード探査によって、重力理論を強重力場で動的に検証**できるのが本研究の特色である。

拡張重力理論はテンソルモードと非テンソルモードの混合を予言する。しかし、これまでのコンパクト連星合体からの重力波偏極モード探査は、それぞれの偏極モードを独立に探査する人工的なものであった。そこで、拡張重力理論における付加的な偏極モードと波形補正の両者を反映した一般的な混合偏極モードモデルによって、**現実の拡張重力理論の偏極モード探査を初めて実現**する。その際、重力波形のパラメータ化や複数イベントの重ね合わせによって、**偏極モード探査を拡張重力理論に最適化し高感度化**するという点が独創的である。

#### ② 【本研究の位置づけ、意義】

本研究は、**重力波の混合偏極モード探査によって、重力理論における非線形現象を解明**するという点で極めて独自性の高い位置づけである。重力波の偏極モード探査は本研究以外にも、アメリカのグループ LIGO らによって進められている。ところが、**コンパクト連星合体という強重力場で動的な現象からの重力波を、現実の拡張重力理論の枠組みで検証する試みは本研究の他に無い**。バースト重力波などと異なりコンパクト連星合体からの重力波偏極モード探査では、連星パラ

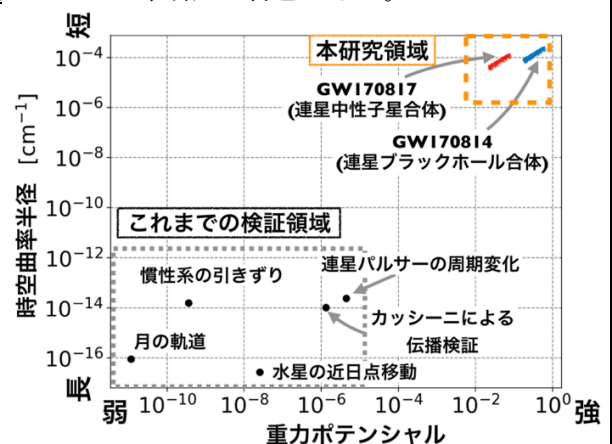


図 9. これまで重力理論が検証された重力場領域

(研究の特色・独創的な点の続き)

メータを適切に考慮した波形モデルが必要なことに逸早く着眼し、世界に先駆けて混合偏極モードモデルを構築・分析した私の研究を除いて観測的・解析的研究が存在しない。

図9は様々な重力理論検証が行われた重力場領域を表している。左下は太陽系実験や連星パルサー観測によって高精度検証されている弱い重力場領域である。本研究は重力波観測によって近年検証が可能になった右上の非線形**強重力場領域を、偏極モード探査感度の最適化によって開拓**する。また、本研究で得られる全ての偏極モードを考慮した重力波解析は、一般相対性理論を超えた計量重力理論における最も一般的な枠組みであり、偏極モード探査のみならず**世界中で行われている重力波による重力理論検証を内包**する。さらに、重力波生成ではスクリーニング機構が働きほとんど波形補正を起こさないが、不均一な銀河場などによる非線形効果によって伝播中に非テンソルモードが励起されるといった、**偏極モード探査だからこそ観測可能な未知の重力非線形現象や宇宙構造の検証・解明**も可能にする。

以上のことから、偏極モード探査において主導的な本研究は、**強重力場・非線形領域での重力理論検証という新たな研究領域を切り開く**という重大な意義を持つ。

### ③【本研究が完成したとき予想されるインパクト及び将来の見通し】

本研究の完成は、**強重力場時空の解明**を意味する。一般相対性理論を超えた偏極モードの発見は、重力理論の付加的な自由度の存在やゲージ対称性の破れを意味し、**重力理論や宇宙論などの現代物理学にブレイクスルーをもたらす**ことができる。本研究によって得られた偏極モードに対する制限は、宇宙加速膨張の説明や量子論と重力理論の統合といった理論的研究に観測的な知見を与える。さらに、波形の補正では発見が難しい、重力波生成の機構や不均一場による偏極モード変換といった未知の重力の非線形現象も探求できる。昨今の重力波望遠鏡の性能向上やネットワークの拡大は、より多自由度で高精度な偏極モード探査を保証する(4. 研究遂行能力[1,2])。本研究は**コンパクト連星合体からの重力波偏極モード探査という比類ない手法で、理論的にも観測的にも強重力場時空という未踏領域に強い衝撃を与える**ものと言える。

### (4) 研究計画

申請時点から採用までの準備状況を踏まえ、研究計画について記載してください。

図10が本研究の全体像である。具体的には図11のように各年の研究を計画する。以下に詳細を述べる。

(申請時点から採用までの準備)

**複数イベント重ね合わせにおける最適化の原理検証**等によって準備を進める。

- ・まず、2.【現在までの研究状況】②(III), (IV)の成果をそれぞれ論文投稿する。これにより、感度最適化前の観測的制限を GW170814 と GW170817 に対して与え、予備的な混合偏極モードの初探査等を報告する。
- ・次に複数イベント重ね合わせの原理検証を行う。偏極モード探査は重力波高次モード解析において報告されている重ね合わせ手法 [n]に形式的に帰着でき、原理的には重ね合わせ可能であることをすでに確認している。一般相対性理論の位相進化を仮定し、生成した信号を重ね合わせることで検証精度の向上を確認する。
- ・これまでに観測された重力波の重ね合わせによって、感度最適化前の統計的な観測的制限を与える。
- ・混合偏極モードの分離可能性と重ね合わせ原理検証などの探査の展望について博士論文を執筆する。

(1年目)

**パラメータ化された混合偏極モードモデルを構築・実装**する。

- ・スカラーテンソル理論と二種類の bimetric 理論をもとにしたパラメータ化はすでに報告されている [k]。
- ・本研究ではさらに、ベクトルテンソル理論やスカラーベクトルテンソル理論のパラメータ化を初めて行う。これを上のパラメータ化と融合することで、より多くの拡張重力理論をカバーする枠組みを構築する。
- ・ベクトル場を加えた理論においても、各理論のラグランジアンを変分して得た場の方方程式を摂動展開することで、各偏極モードと重力波信号の表式を計算でき、基準となるパラメータ化された波形が得られる。
- ・しかし、重力波形を周波数領域に変換する際に、非テンソルモード放射によるエネルギーの補正を考慮

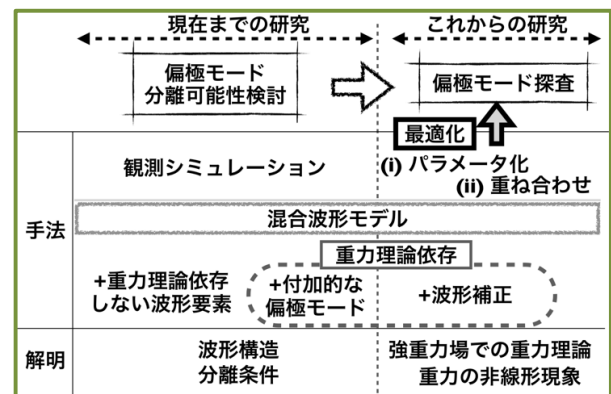


図10. 研究全体像



(研究計画の続き)

する必要がある。これはハミルトニアンと放射反作用の冪補正をパラメータ化して導入することで可能となる。こうして、波形補正をパラメータ化した周波数領域での重力波形が得られる。

・この重力波形を混合偏極モード探査のベイズ推定コードに実装する。このような付加的なパラメータの導入は、2.【現在までの研究状況】②(IV)ですでに一部実装した経験があり、達成可能である。

(2年目)

**パラメータ化された混合偏極モードモデルによる偏極モード探査**を行う。

・観測された重力波をパラメータ化された混合偏極モードモデルでベイズ推定することで、偏極モード探査を拡張重力理論に最適化し、強重力場で重力理論を検証する。2.【現在までの研究状況】②(I)より、この段階で振幅決定精度 $\sim 10^{-1}$ での強重力場における観測的制限を与えることが可能である。

・エクストラサクセスとして、偏極モード変換などの未知の重力非線形現象についてもモデリングし、解析結果を焼きなやすことで観測的な制限を与える。

・パラメータ化された混合偏極モードモデルと偏極モード探査について論文執筆・投稿する。

(3年目)

**複数イベント重ね合わせにおける最適化**を行う。

・採用までに検証した重ね合わせによる検証精度向上を拡張重力理論に最適化する。具体的には、2年目に構築したパラメータ化された重力波形に従って整形した信号を重ね合わせることで検証精度を向上させる。

・2年目から3年目にかけて、4台検出器での観測(通称O4)が計画されており、期待されるイベント数は $O(10^3)$ である。よって、これらを用いた重ね合わせ探査によって、振幅決定精度 $\sim 3 \times 10^{-3}$ での検証が達成可能である。

・複数イベント重ね合わせにおける最適化と実解析について論文執筆・投稿する。

	採用まで	1年目	2年目	3年目
準備	混合偏極モード試験探査(未最適化)			
	重ね合わせ原理検証			
(I)		混合偏極モードパラメータ化		
			ベイズ推定実装	
		混合偏極モード探査(最適化)		
(II)			他の非線形現象探査	
			重ね合わせ最適化試験	
				重ね合わせ実解析

図 11. 年次計画

## (5) 受入研究室の選定理由

採用後の受入研究室を選定した理由について、次の項目を含めて記載してください。

① 受入研究室を知ることとなったきっかけ、及び、採用後の研究実施についての打合せ状況

② 申請の研究課題を遂行するうえで、当該受入研究室で研究することのメリット、新たな発展・展開

※ 個人的に行う研究で、指導的研究者を中心とするグループが想定されない分野では、「研究室」を「研究者」と読み替えて記載してください。

### ① 【きっかけ、及び打合せ状況】

京都大学天体核研究室は、重力・宇宙論・天体物理学を中心に幅広く宇宙の理論的研究を行っている研究室である。受入研究者の田中教授は日本の重力波望遠鏡 KAGRA のコラボレーションメンバーであり、研究室メンバーらと重力波を用いた理論的研究を行っている。KAGRA における活動や交流が受入研究室を知ることとなった。採用後の研究実施についての打合せはすでに行っている。これから採用までの期間についても、重力理論検証についての議論を重ね、研究課題遂行に向けて最大限の準備をする予定である。

### ② 【受入研究室で研究することのメリット、新たな発展・展開】

受入研究者の田中教授は新学術領域研究における「重力波データ解析による重力理論の検証」の代表者であり、受入研究室は重力波や重力理論の理論研究の一大拠点である。一方、私はコンパクト連星合体からの重力波偏極モード探査解析を主導してきた。本研究において、拡張重力理論の理論的な知見は、波形モデルの構築や解析結果を解釈する上で必須のものである。したがって、私の全ての偏極モードを含む極めて一般的な重力波解析と、受入研究室の重力理論の理論的な研究は、重力波を用いた強重力場での重力理論検証において互いに相補的であると言える。受入研究室で研究することで、重力波解析と重力の理論的研究の融合が、強重力場での重力の性質という未開拓領域の探求に相乗効果をもたらすことが期待される。また、重力相対論実験などの様々な分野での私のこれまでの実験経験と受入研究室の理論研究が結びつくことで、宇宙・基礎物理学の課題に迫る新たな実験提案を生むなどの発展も考えられる。

申請者登録名 武田 紘樹

## (6) 人権の保護及び法令等の遵守への対応

本欄には、研究計画を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究など法令等に基づく手続が必要な研究が含まれている場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続の状況も具体的に記述してください。

なお、該当しない場合には、その旨記述してください。

本研究は上記のような人権の保護及び法令等の遵守への対応を必要とする研究に該当しない。

4.【研究遂行能力】研究を遂行する能力について、これまでの研究活動をふまえて述べてください。これまでの研究活動については、網羅的に記載するのではなく、研究課題の実行可能性を説明する上で、その根拠となる文献等の主要なものを適宜引用して述べてください。本項目の作成に当たっては、当該文献等を同定するに十分な情報を記載してください。

具体的には、以下(1)～(6)に留意してください。

(1) 学術雑誌等（紀要・論文集等も含む）に発表した論文、著書（査読の有無を明らかにしてください。査読のある場合、採録決定済のものに限ります。）著者、題名、掲載誌名、発行所、巻号、pp 開始頁－最終頁、発行年を記載してください。

(2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説

(3) 国際会議における発表（口頭・ポスターの別、査読の有無を明らかにしてください）

著者、題名、発表した学会名、論文等の番号、場所、月・年を記載してください。（発表予定のものは除く。ただし、発表申し込みが受理されたものは記載してもよい。）

(4) 国内学会・シンポジウム等における発表

(3)と同様に記載してください。

(5) 特許等（申請中、公開中、取得を明らかにしてください。ただし、申請中のもので詳細を記述できない場合は概要のみ記載してください。）

(6) その他（受賞歴等）

私はこれまで高い専門的素養と分野横断的視野の二つを有するべく、「理論」や「実験」に固執せず積極的な姿勢を取り続けてきた。物理学の深化に必要な研究課題を自ら設定し、問題を構造的に把握することによって構築した仮説を、適切な解析・実験技術の習得と活用によって検討・評価することで、**物性・高エネルギー・光学・重力波天文学などの様々な分野で多岐にわたる研究課題を遂行してきた。**

学部時代には、研究室配属は通常学部4年次からだったが、2年次の冬から特別に高エネルギー系の研究室に配属させて頂いた。そこではXMASSなどの宇宙素粒子実験の検出器の主要部分に用いられる、液体キセノンシンチレータに関する実験を行った。基本特性である液体キセノン中のレイリー散乱長を外部光源を用いて測定する**新手法を自ら提案**した。問題設定、研究計画、理論計算から実際の測定・解析の全てを行い、アインシュタインによって与えられたレイリー散乱長の波長依存性を実験的に再現する結果を得て**新手法の有用性を示した** [12]。**卒業時には在学時の研究と学業成績が評価され表彰を受けた** [15]。

修士課程では、光リング共振器を用いて光子のローレンツ不変性を検証する実験に主に取り組んだ。感度を制限していた要因である信号変調のための回転台振動雑音の低減を研究課題とし、**上部支持を伴わない回転機構の導入と入射光学系・共振器部が一体となった世界初のモノリシック光学系の開発を達成した**。振動感度低減という課題を回転系と光学系の問題に細分化し、それぞれの問題に対して独自の工夫を施すことで実現した。研究計画、設計と開発、評価までを全て行い、成果を修士論文として纏め上げ、学会において発表した [14]。現在ローレンツ不変性の長期探索の準備のため、装置の最終調整をしている。本研究課題でリーディング大学院コース生と日本学術振興会特別研究員として採択されている [16,17]。

修士2年の冬に、重力波検出器ネットワークの拡大が偏極モード検証に与える影響について定性的な理解しか存在しないことに気づいた。そこで、重力波望遠鏡KAGRAのコラボレーションメンバーを巻き込んで、**コンパクト連星からの重力波偏極モード検証の研究課題に取り組み、2.【現在までの研究状況】②で述べたような様々な成果を主体的に挙げた** [1,2,8,9,11]。

また、重力波望遠鏡KAGRAにおける研究活動にも、KAGRAのコラボレーションメンバーとして積極的に参加した。重力波望遠鏡の建設と理解に貢献するために、**他のメンバーとの能動的な議論を通して重力波望遠鏡の感度最適化や非平衡下での熱雑音の理論的な計算など数々の研究を達成してきた** [3,4,5,7,18]。さらに、他の研究者の論文や学会発表を通して抱いた疑問も追求するよう努め、コミュニティ外の研究者らと共同で超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッション提案 [13]やIa型超新星爆発起源の候補としての連星白色矮星合体観測 [6,10]などの、**独自性の高い研究も主体的に成し遂げている**。

このように、これまでの研究活動は、私が**問題認識・仮説構築・結果検証の科学的手法に従い計画的かつ着実に研究課題を遂行できる**ことを示すものである。また、**様々な分野で培ってきた知見や能力を活用**するだけに留まらず、ベイズ推定やモノリシック光学系アラインメントなどの研究課題遂行に必要な先進的な能力・技術の習得にも努めてきた。さらに、自らコミュニティ外の専門家らと課題を共有し複数の領域を跨ぐ共同研究を成し遂げるなど、**研究遂行のために研究の幅を広げる行動もとることができる**。以上のようなこれまでの研究活動を踏まえ、**既得の素養の活用と未得の素養の体得によって研究課題を実行する高い研究遂行能力を有している**と自負している。

申請者登録名 武田 紘樹



(研究遂行能力の続き)

## 【主要な研究成果等】

### (1) 学術雑誌等に発表した論文、著書

(査読あり)

- [1] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, and Kazuhiro Hayama, “Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences”, *Physical Review D*, American Physical Society, **98**, 022008 (2018).
- [2] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, and Kazuhiro Hayama, "Prospects for gravitational-wave polarization tests from compact binary mergers with future ground-based detectors", *Physical Review D*, American Physical Society, **100**, 042001 (2019).
- [3] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, and Masaki Ando, “Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector”, *Physical Review D*, American Physical Society, **97**, 122003 (2018).
- [4] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, and Stefan W. Ballmer, “Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions”, *Physical Review D*, American Physical Society, **97**, 102001 (2018).
- [5] KAGRA Collaboration (Tomotada Akutsu, ..., Hiroki Takeda, ... *et al.*), "First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA", *Classical and Quantum Gravity*, IOP Publishing, **36**, 165008 (2019).

他5報

(査読なし)

- [6] Tomoya Kinugawa, Hiroki Takeda, Hiroya Yamaguchi, “Probe for Type Ia supernova progenitor in decihertz gravitational wave astronomy”, arXiv:1910.01063 (2019).

他4報

### (2) 学術雑誌等又は商業誌における解説、総説

- [7] KAGRA Collaboration (Tomotada Akutsu, ..., Hiroki Takeda, ... *et al.*), "KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector", *Nature Astronomy*, Nature Publishing Group, **3**, pp 35–40 (2019).

### (3) 国際会議における発表

(口頭、査読なし)

- [8] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, and Kazuhiro Hayama, "Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences", The 15th Marcel Grossmann Meeting, Rome, Italy, July 2018.
- [9] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, and Kazuhiro Hayama, “Parameter estimation with inspiral waveforms of compact binary coalescences including nontensorial gravitational waves polarizations”, 19th KAGRA face-to-face meeting, Osaka, Japan, May 2018.

他2報

(口頭、査読なし、招待講演、受理)

- [10] Hiroki Takeda, Tomoya Kinugawa, Hiroya Yamaguchi, “Binary white dwarf merger as Type Ia supernova progenitor in decihertz gravitational wave astronomy”, Mondello Workshop 2020 Frontier Research in Astrophysics – IV, Palermo, Italy, June 2021.

(ポスター、査読なし)

- [11] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, and Kazuhiro Hayama, “Prospects for gravitational-wave polarization test from compact binary coalescences with next-generation detectors” 22nd International Conference on General Relativity and Gravitation, 13th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Valencia, Spain, July 2019.

### (4) 国内学会・シンポジウム等における発表

- [12] 武田紘樹, 中村正吾, 小野隼人, 日野陽太, 八木大介, 笠見勝祐, 斎藤究, 佐々木慎一, 俵裕子, 春山富義, 三原智, 「液体キセノン中の散乱長の測定-1」, 日本物理学会2016年秋季大会, 24aSG-5, 宮崎大学, 2016年9月.
- [13] 武田紘樹, 道村 唯太, 長野 晃士, 五十里 哲, 「超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッションの提案」, 超小型衛星利用シンポジウム, 東京大学, 2019年3月.
- [14] 武田紘樹, 千代田 大樹, 道村 唯太, 安東 正樹: 「光リング共振器を用いたLorentz不変性検証(5)」, 日本物理学会2019年秋季大会, 20aT11-7, 山形大学, 2019年9月.

他7報

### (6) その他

- [15] 平成27年度 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科物理工学EP成績優秀賞・同窓会優秀賞.
- [16] 平成28年度 フォトンサイエンスリーディング大学院(ALPS)コース生 採択.
- [17] 平成30年度 日本学術振興会特別研究員(DC1) 採択.
- [18] 令和2年度 KAGRA Scientific Congress 学生代表.