

1 初期宇宙論部門横山研究室

当研究室はこのほど設立10周年を迎えましたが、場の量子論、素粒子物理、一般相対論等の基礎理論を用いて初期宇宙の進化を再現するトップダウン型の研究と、宇宙背景放射等の観測データから出発して初期宇宙の物理に還元するボトムアップ型の研究を並行して行っています。また、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の稼働を控え、重力波データ解析の基礎研究、また重力波を用いた宇宙論の研究を行っています。

1.1 初期宇宙論

高次スカラー揺らぎによるテンソル揺らぎの生成可能性

BICEP2 の観測に動機づけられ、インフレーション中にインフラトン以外のスカラー場の高次摂動効果によって大振幅のテンソル揺らぎを生成する可能性を検討した。その結果、テンソル揺らぎが大きくなる場合には、つねにそれ以上に曲率揺らぎができしまい、うまくいかないことを明らかにした。[3]

超重重力理論におけるトポロジカルインフレーション

近年超重重力理論においてスカラー曲率の高次項を持った理論が取り扱えるようになり、それに基づいたインフレーションモデルも議論されている。ここでは、トポロジカルインフレーションの機構を用いてこのような理論におけるインフレーションの新たな可能性を見出した。[5]

高階の微分を含むスカラー場からの原始ブラックホール

インフレーション宇宙における正準的でない高階の微分を含むスカラー場のダイナミクスを解析した [11]。この場合、スカラー場の値によって場の状態方程式が宇宙定数に対応するものから、堅い物質に対応するものまで連続的に変化することを見出した。また、状態方程式の時間的遷移に伴って、大振幅を持つ曲率揺らぎが一時的に生成することを示した。モ

デルのパラメータによっては、曲率揺らぎから原始ブラックホールが大量に作られ、そのブラックホールのホーキング蒸発によって、宇宙の再加熱が実現されることも明らかにした。また、このシナリオは将来の宇宙重力波干渉計 DECIGO で検出されるレベルの背景重力波を予言することも示した。

Ostrogradsky の定理の拡張

高階微分を含む非縮退なラグランジアンは、必ずゴーストを含むことが知られている。これは、Ostrogradsky の定理として知られている。一方、Euler-Lagrange 方程式が高々3階の微分方程式となるようなラグランジアンは、縮退したラグランジアンであるため、Ostrogradsky の定理は適用できず、ゴーストが存在するかどうかは知られていなかった。論文 [11] では、そのような場合でもゴーストは一般に存在することを示した。

ニューヒッグス・インフレーションモデルにおける自己ユニタリ性と Planck・BICEP2 観測データへの適合性

Germani-Kehagias の提案したニューヒッグス・インフレーションモデルはプランク衛星と BICEP2 の観測データと良く一致することを示した。さらに、ニューヒッグスモデルは負のスペクトル指数スケール依存性を持ち、プランクと BICEP2 のデータ間のテンションを取り除きうる。このモデルは宇宙進化の過程において常にユニタリ性を保っている。インフレーション中に、ヒッグス自己相互作用とヒッグス・重力子相互作用は背景依存する大きなカットオフスケールを持つ。このとき W, Z ボソンは大きな質量を獲得し、脱結合する。もし W, Z ボソンがヒッグス場と非ミニマルに結合すると、それらの有効質量がおおいに減少し、脱結合しない。インフレーション後、ニューヒッグスモデルは繰り込み可能なポテンシャルを有する4次ガリレオンモデルで良く近似される。これはインフレーションがユニタリ性を保ったまま始まりうることを示唆している [17, 45, 46, 47, 98]。

R^2 インフレーション後のパラメタ共振による時空揺らぎの成長

最も単純な重力理論の拡張である R^2 インフレーションモデルが、観測値の中心を指し示している。したがって、このモデルは近年急速に国際的な注目を浴びている。このモデルでのインフレーション後の宇宙再加熱期において、パラメタ共振現象による時空揺らぎの成長について詳細に調べた。その結果、ミンコフスキー時空の場合と異なり、フリードマン宇宙の中では揺らぎがあまり成長せず、局在するようなソリトンは生成されないことを明らかにした [16, 44, 45, 98]。

超重重力 R^2 インフレーション後の再加熱過程

R^2 インフレーションモデルを超重重力理論へと拡張した模型について、宇宙再加熱過程がどのように起こるか調べた。その結果、主なインフラトンの崩壊チャンネルは量子アノマリーによって引き起こされることを明らかにした。さらにはグラビティーノ質量についても許容される範囲を示した [14]。

重力的な宇宙再加熱

プランク天文衛星の CMB 観測により、非ミニマル重力結合を持つインフレーション模型が支持されている。我々はこの結合を持つ一般的な複数場インフレーション模型において、重力相互作用によりユニバーサルに宇宙再加熱が起こることを示した。また、ヒッグス凝縮場が再加熱時に非自明な値を持たば、変調再加熱を引き起こし、非ガウス性密度揺らぎを生成する可能性を指摘した [13, 71]。

宇宙論的揺らぎの離形変換不変性と複数場への拡張

時空揺らぎの離形変換 (disformal transformation) 不変性を宇宙論の枠組みで調べた。スカラー場による離形変換において、等スカラー場曲面上の非線形曲率揺らぎと重力波揺らぎが不変であることを示した。次に空間的勾配展開の下では非線形な揺らぎの時間発展について、特に離形変換の下で二通りの見方ができることを示した。一つ目は物理的な不変性で、もう一つは見かけ上の因果構造の変化である。最後に複数スカラー場による新しいタイプの離形変換について議論した [12]。

初期相関長が長い宇宙ひもが CMB 非等方性に与える影響の研究

初期宇宙の相転移で生成されるひも状の位相欠陥は宇宙ひもと呼ばれ、観測的に初期宇宙を探る上で有用である。中でも近年精密観測が可能になった宇宙マイクロ波背景放射の非等方性に与える影響について多くの研究がなされてきた。これまで研究されてきた宇宙ひもは生成後にスケールリング則を満たすとされ、初期配置にほとんど依存しない予言が可能である。しかし、例えばインフレーション中の相転移で生成される宇宙ひもには初期宇宙ではスケールリング則を適用できず、CMB 非等方性への影響は明らかでない。我々はこのようなシナリオのもとで数値計算を行い、CMB 非等方性に与える寄与を評価した。その結果、小スケールゆらぎの観測により課せられる宇宙ひもパラメータの制限が緩和されることを示し、最新の観測結果の解釈についても考察した。 [23]

高次元時空に埋め込まれた宇宙ひもの振る舞いについて

スーパーストリング理論の重要なプローブとして、高次元時空に存在する宇宙ひもが考えられる。特に、4次元以外の余剰次元方向に巻きついているような場合には、4次元時空から見ると実効的に超伝導電流を持つように見えることが指摘されている。しかし、これをエネルギー運動量テンソルの言葉で取り扱った例はなく、本研究ではその定式化を行った。特異な性質として、宇宙弦の高次元への埋め込み方法がある条件を満たすときにはエネルギー密度は値を持つにも関わらず、張力がゼロになる場合が存在することを見出した [21, 72]。

一般的なスカラー・テンソル理論におけるスクリーニング機構について

これまでホルンデスキー理論と呼ばれる模型が最も一般的なスカラー・テンソル理論だと考えられてきたが、近年になってこの理論にはさらなる一般化が許容されることが明らかとなった。修正重力理論において、観測による重力のテストを満たすことは最低条件として挙げられる。一般的に、スカラー自由度の非線形相互作用によって、スカラー自由度自身が実効的に誘起されなくなる遮蔽機構の存在がこれを保障している。本研究では、一般化された理論が遮蔽機構の適切に働きうるかについて探った。ホルンデスキー理論においては常に遮蔽機構が働くのに対し、一般化された理論においては密度勾配が存在する領域においては一般相対論からのズレの効果が大きくなり、遮蔽機構が部分的に破れるという特異な性質があることを発見した [20, 100]。この振る舞いを用いて一般化された重力理論を制限することが可能になる。実際にこれを星の構造の進化に応用し、これが修正重力に対して鋭敏であることを見出した [18]。

熱的インフレーションにおける熱的揺動効果の研究

超対称性理論のモデルの中には、熱的インフレーションと呼ばれる機構を利用することで矛盾のない宇宙論的帰結を得ることができるものがある。熱的インフレーションは原始インフレーションの後に起こる一時的で短い加速膨張期のこと、flaton と呼ばれるスカラー場によって引き起こされる。それゆえ熱的インフレーションは再加熱後などの熱い宇宙で起こる現象であり、flaton は熱浴中の場との相互作用を通じてそのポテンシャルに有限温度補正を受ける。我々は有限温度効果の揺動効果も取り入れて熱的インフレーションを再考し、その終了が cross over 型の相転移になることを発見した。 [75, 50, 24, 34]

原始ブラックホールで探る初期宇宙

大振幅の密度ゆらぎが初期宇宙に存在していたとして、それが自己重力によって崩壊すると、原始ブラックホール (Primordial black hole, PBH) が形成され得る。ある種のインフレーションモデルでは、大振幅の曲率ゆらぎが生成され PBH が形成される。PBH の存在量を理論的に計算すれば、観測的な制限と比較することで、インフレーションモデルに対する知見が得られる。そこで、PBH の存在量を预言するために PBH 形成過程を数値シミュレーションで調べることが必要となる。短波長の大振幅ゆらぎが長波長の大振幅ゆらぎの上存在している場合、まず短波長ゆらぎがホライズンに入った直後に重力崩壊を起こし PBH を形成し、その後長波長ゆらぎがホライズンに入った直後に重力崩壊を起こし、小さい PBH を巻き込みながら大質量の PBH が形成する。この PBH 二重形成を初めて数値的に調べ、さらに、短波長ゆらぎが長波長ゆらぎによる PBH 形成にどのような影響を与えるかについても調べ、短波長ゆらぎは長波長ゆらぎの PBH 形成を促進することを明らかにした [27]。

インフレーション中に生成された曲率ゆらぎは超ホライズンスケールに引き伸ばされ、その後の放射優勢期などに再びホライズンの中に入る。ゆらぎが超ホライズンスケールにある間は、アインシュタイン方程式を近似的に解くことでゆらぎの時間発展を調べられる。この近似解を様々な座標条件に一般化し、さらに長波長ゆらぎ中に存在する短波長ゆらぎによる PBH 形成条件を議論した [28]。

また、インフレーション理論では様々な波長の重力波が生成されると预言されるが、そのうち短波長の重力波の振幅が大きいと、重力波の二次の効果により密度ゆらぎが生成する。密度ゆらぎの振幅が十分大きくと PBH が形成する。しかし PBH は観測的に見つかっていないので、PBH が大量に形成してしまうほど大振幅の短波長重力波は棄却されることになる。このような考察から得られるインフレーション起源の短波長重力波への制限は、ビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景放射から得られる制限よりも厳しいことを明らかにした [76, 77, 53, 54, 51, 52]。

超巨大ブラックホールの起源としての原始ブラックホール

比較的初期の宇宙に超巨大ブラックホールが存在したことが、高赤方偏移のクエーサーの観測から強く示唆されている。観測されたような初期宇宙までにどのように巨大なブラックホールが形成したのかはよくわかっていない。初期宇宙の超巨大ブラックホールの起源の候補として、PBH がある。しかし、初期ゆらぎがガウス統計に従うという仮定のもとでは、超巨大ブラックホールを説明するほど多くの PBH が初期宇宙で形成した場合には、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルが観測と矛盾するほどプランク分布から大きくずれてしまうことを指摘した。また、PBH 形成には多数の小質量暗黒物質ハローの形成も

付随し、それらのハローを構成する暗黒物質粒子の対消滅から観測と矛盾する程の強度の宇宙線が飛来する可能性がある。これらの考察から超巨大ブラックホールの起源としての PBH が強く制限される可能性があることを示した [26, 33]。

一般化ガリレオン理論における場の変位と整合性

初期宇宙のインフレーションは重力波の生成を预言するが、これが宇宙マイクロ波背景放射において観測されるためにはインフレーションを引き起こすインフラトンの場の値の変位がプランクスケールを超えていなければならない。本研究では、インフレーションの最も一般的な枠組みである一般化ガリレオン理論において、観測可能な重力波を生成しながら場の値の変位を小さくすることができることを示した。また、それがどのような物理的に状況において意味を持つのかを理論の強結合領域を求めることにより明らかにし、それを実現するようなモデルを考えた際に量子補正等の効果により内部整合性が壊されないかについて研究を進めた [55, 56, 57, 78, 101]。

$f(R)$ 重力理論におけるダークエネルギーの状態方程式の研究

$f(R)$ 重力理論は一般相対論の最も簡単な一般化の一つであり、太陽系など局所スケールの実験からの制限を満たしつつ現在の宇宙の加速膨張を説明することができる。この理論をダークエネルギーモデルと見なすと、実効的な状態方程式パラメータ w は一般相対論の場合の -1 からずれる。このずれの大きさに制限を与えることは、モデルの峻別を行う手がかりの一つになる。先行研究 P. Brax et al. (2008) では、局所スケールの情報から w が実質的に -1 になるモデルしか許されないという主張を行った。しかし w が宇宙の背景量であることを考えると、局所的な情報のみから制限がつくことは物理的に極めて不自然である。本研究では、先行研究では考慮されていなかった、系の時間依存性を取り入れて場の方程式を再解析した。また、構成した解が $w \neq -1$ の場合にも観測的制限を満たし得ることを示し、先行研究による制限が誤りであることを明らかにした。[32]

原始磁場形成理論における Schwinger 効果の影響

GeV/TeV 領域のガンマ線の観測によって、銀河間の領域にも非常に弱い磁場が存在する可能性 (A. Neronov, I. Vovk, Science, 328, 73 (2010)) が示唆されている。現在のところ、大スケールの宇宙磁場の起源は明らかにされていないが、インフレーション中の電磁場の量子論的なゆらぎから、大スケール磁場の種となる磁場を生成するという試みが以前よりなされてきた。このような原始磁場形成理論においては、磁場ではなく電場ばかりが生成してしまうと

いう状況が広く生じることが知られており、このことは、インフレーション原始磁場形成理論の困難の一つであるとされてきた。しかし、これまでの議論では、QED にもとづく荷電粒子から電磁場へのバックリアクションは考慮されてこなかった。強い背景電場の存在下では、Schwinger 効果として知られる荷電粒子対生成が顕著になり、電磁場自身へのバックリアクションをもたらし、強い電場は安定に存在できないため、原始磁場形成理論における困難を克服できる可能性があることに着目した。この可能性を探るため、de Sitter 時空上でのスカラー QED を考え、一様な背景電場から誘起される電流の期待値の評価を行った。本研究では、4 次の断熱正則化を行うことで、このような非物理的な振る舞いが取り除けることを示した。また、この正則化のもとで、インフレーション中に安定に存在できる一様な背景電場の強さに上限を与え、荷電粒子の質量が小さい場合には、強い制限になりうることを示した。[36, 82]

1.2 観測的宇宙論

シルク減衰で探る小スケールゆらぎ

初期宇宙においては、バリオンと光子は強く結合しているため、一体となって音響振動している。このバリオン・光子流体のゆらぎは、シルク減衰と呼ばれる効果で減衰する。減衰すると、もともと音響振動が持っていた振動エネルギーによって、宇宙全体の温度がわずかに上昇する（音響再加熱）。ビッグバン元素合成以降の音響再加熱により、光子の数密度は増えるがバリオンの数密度は増えないため、バリオン・光子比は減ることになる。一方で、バリオン・光子比は、ビッグバン元素合成の時期と光子の最終散乱の時期で、それぞれ軽元素量の存在量と宇宙マイクロ波背景放射の非等方性の観測から独立に決められている。そのため、音響再加熱によるバリオン・光子比の減少分には上限がある、すなわち初期ゆらぎのシルク減衰による減衰分には上限がある。このような考察から、従来よりも小スケールの初期ゆらぎをはじめて制限した [25]。

CMB 重力レンズ効果を用いた重力波の観測可能性

重力波は弱重力レンズ効果を通じてカールモードと呼ばれる回転モードを誘起することが知られており、CMB マップにその痕跡が残っていると考えられる。本研究では将来の精密な CMB 観測計画について、特に原始重力波の振幅および幕における無矛盾関係を確認するために必要なノイズレベルについて着目し、議論を行った。その結果、スカラー・テンソル比が現在知られる上限より十分小さい値だった場合、次世代計画では無矛盾条件を確かめることは難しいが、その一方で重力波が誘起するカールモードについては 3σ 以上で観測できることを見出した [19]。また、将来観測においては、再結合後に生成される重力波についても制限しうることを指摘した。

銀河探査における原始非ガウス性の観測可能性

本研究では宇宙大規模構造の将来観測として、Square Kilometre Array (SKA) に着目した。特に、宇宙大規模構造観測を用いた初期宇宙の重要なプローブとしての原始揺らぎの非ガウス性の観測可能性について探査した。その結果、SKA 単独においても CMB では到達できないような精度での探査が可能であることを見出した。また、SKA 単独だけでなく Euclid 衛星に代表される同時期に観測が行われる計画との同時解析を行うことでどの程度、宇宙論パラメータの制限について性能が向上するのかについて議論を行った。その結果、協働することでさらなる精度の向上が見込めることを指摘した [21, 48, 49, 90, 73, 74]。

1.3 重力波

DECIGO による宇宙再加熱史の決定精度

CMB の B モード変更の観測によってインフレーションのエネルギースケールが確定すると、DECIGO によってインフレーション後の再加熱温度をどの程度決定できるかを計算できることになる。ここでは、フィッシャーマトリックスを用いてそれを計算し、測定可能な再加熱温度の範囲を求めた。[4]

ねじれアンテナの方向決定精度

ねじれ振り子型重力波検出器 (TOrtion Bar Antenna: TOBA) は、現在主流となっているレーザー干渉計型重力波検出器とは異なる原理によって重力波を検出する。従来の検出器が 1 台の検出器ごとに 1 つの独立な出力を持つのに対して、1 台の TOBA は、3 つの独立な出力を持ち、これによって重力波の偏極を求めることができる。このことを利用して、枝、正田、伊藤、安東は論文 [7, 38, 39, 69] において TOBA は 1 台のみでバースト性の重力波であっても、その方向を決定することができることを示した。

ダークマター探査

Zhao, Silk, Bertone らは中間質量ブラックホールがダークマターミニハローをまとっている可能性が指摘した (Zhao & Silk, Phys. Rev. Lett. 95, 011301 (2005); Bertone et al., Phys. Rev. D 72, 103517 (2005))。星質量のコンパクト星が中間質量ブラックホールに捕獲されると、重力波を放射しながら、次第に中間質量ブラックホールに近づいていき、最終的には両者は合体する。欧州宇宙機関の evolved Laser Interferometric Space Antenna は中間質量ブラックホールと星質量ブラックホールからなる連星からの重力波を検出できる。枝、伊藤、黒柳、Silk は論文 [8, 92] において中間質量ブラックホールの周囲に存在するダークマターミニハローを検出し、さらにそ

の動径方向の分布の様子を研究することができることを示した。

単独パルサーの質量決定

中性子星は原子核密度を超える超高密度物質をその内部に含む天体であり、その状態方程式は未だよくわかっていない。中性子星が持ちうる最大の質量は、中性子星の状態方程式に依存するため、多くの中性子星の質量を観測によって決定することによって原子核物理学に寄与することができる。中性子星の質量は、現状では連星系において精度良く決定されており、単独の中性子星の質量を決定したという報告は、中性子星大気モデルを介した一例があるのみである。小野、枝、伊藤は論文 [9, 41, 94] において、アインシュタイン望遠鏡を用いれば単独パルサーの質量を決定できることを示した。ここで用いた方法は、パルサーからの重力波が自身のクーロンの重力場によって位相ずれを起こすことを利用したものであり、我々が指摘するまで全く気づかれていなかった効果である。宇宙線研究所大橋研究室の小野氏はこの研究を修士論文としてまとめ、修士号を取得した。

重力波データ解析における非ガウスノイズ

重力波検出器に作用するノイズがガウス統計に従う場合は、線形マッチフィルター法が S/N 比が最大になるような量を与える。しかし、一般に重力波検出器には非ガウスノイズが働くので、その影響を正しく取り入れることが効率的な信号検出には重要である。本研究では、さまざまな非ガウスノイズに対して Locally optimal statistic を定式化した。非ガウス性が弱い場合にはエッジワース展開によって、強い場合には新規開発したガウシアンマッピングの方法によってこれを行い、 t 分布の場合に厳密解と比較した。その結果後者は非ガウス性の強い場合も適用可能であることが示された [6]。

データ解析システムの構築

伊藤は、国内外の KAGRA 重力波データ解析メンバーが利用するデータ解析開発システムを構築し、運用を始めた [67, 40, 70]。バージョン管理システムに git、issue tracking システムに redmine、Continuous Integration ツールに jenkins を導入した。Jenkins においては、nightly build とコード片重複検出ツール、静的解析ツール (cppcheck)、自動文書生成ツール doxygen を導入した。2015 年 12 月の iKAGRA 観測 run に備えて、RAID6 の 80TB (4TB*24 slots, 2slots はホットスワップ) データ保存サーバーを導入した。また、GPGPU による高速化の可能性を検討したところ、現状の実装ではたかだか 2~3 倍程度の高速化しか望めず、GPGPU の導入コストを考えると、残念ながら費用対効果の面では採用に否定的な結果が得られた。

多出力ねじれ振り子型重力波検出器によるパラメータ推定精度の向上

ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) は低周波数帯の観測を目的とする地上重力波検出器である。TOBA は二本の直交する棒状のテストマスから構成され、重力波入射により引き起こされる検出器平面上の二本のマスの角度変動から重力波信号が読み取られる。従来の TOBA では、検出器平面上のテストマスの運動のみを監視していた。この場合、重力波に対して不感の方向を持つほか、一台では重力波の波形パラメータを決定できないという欠点が存在していた。このような問題を解決するために、検出器平面と直交する平面上の角度変動を取り入れ独立信号を増やした多出力型のアンテナ構成を新たに考案した。そして、その多出力型 TOBA の性能をフィッシャー解析を用いて評価した。その結果、多出力型 TOBA はあらゆる方向からの重力波に対して感度を持ち、イベント検出率は従来の TOBA に比べて約 1.7 倍向上することを明らかにした。さらに、IMBH 連星からのインスパイラル重力波に対するパラメータ推定精度は約 1 桁以上向上することを示した [2, 29, 79, 60, 80, 58]。

ブラックホール周囲に存在するダークマターの重力波への影響

近年、中間質量ブラックホール (IMBH) の周囲にはダークマター (DM) が存在すると指摘されている。昨年度に引き続き、BH 周囲に存在する DM のインスパイラル重力波への影響を見積もるために、DM 分布として最も簡単なモデルである単一のべき乗則に従う球対称密度分布を仮定した。そして、このような分布の DM に覆われた連星系からのインスパイラル重力波波形を、重力ポテンシャルのほかに新たに DM とコンパクト星との重力的な摩擦の影響を取り入れて導出した。こうして得られた波形を真の波形と見なして、従来から用いられてきた DM の影響を含まない波形との相関を取り、重力波信号の検出可能性について検討をした。この結果、DM スパイクのように高密度の DM 領域が形成する場合には、重力波の位相部分は DM により強い修正を受けられることを見出し、理論波形に DM 効果を取り入れなければ、IMBH からの重力波は検出されないことを示した。また、重力波波形が DM 分布に強く依存することに着目し、重力波波形が保有する DM 分布の決定精度を調べ、IMBH の近傍で高密度な DM 領域が形成している場合、例えば、Zhao and Silk [Phys. Rev. Lett. 95, 011301 (2005)] で提案されているモデルの場合には、信号対雑音比が 10 であるような重力波を検出したとき、IMBH 近傍の DM 分布の傾きが 5×10^{-6} の精度で得られることを示した [30, 61]。

重力波を用いた孤立中性子星の質量推定法の提唱

高速回転する非軸対称な中性子星 (NS) は、一般に四重極モードと呼ばれる回転周波数の二倍の周波数を持つ重力波を放射する。しかし、NS の角運動量軸と慣性主軸が一致しない場合、NS は角運動量軸を中心とした自由歳差運動を行い、四重極モードに加えて歳差モードと呼ばれる回転周波数と同一の周波数を有する重力波を放射する。さらに、近年では、NS が内部に超流動コアを含むモデルのもとで、たとえ電磁波観測で歳差運動による信号の変調が観測されなかったとしても、NS から放たれる重力波は歳差運動する NS と同様に、回転周波数の 1 倍と 2 倍の 2 つのモードを持つことが示唆されている。そこで、このような 2 つのモードを持つ NS からの重力波に焦点を当て、重力波観測による NS の質量推定法を新たに提案した。NS から放射される重力波の位相は、NS のなす重力ポテンシャルにより引き伸ばされ、結果として生じる位相シフトは、NS の質量と周波数、NS までの距離に依存している。したがって、2 つのモードの位相の差をとることで、原理的には、NS の質量情報を検出器の出力データ中から抜き取ることができる。モンテカルロシミュレーションを用いることで、Einstein Telescope のような第三世代の重力波検出器での観測では、歳差角が一様に分布しているという仮定のもとで、1kpc 離れた扁平率が 10^{-6} である孤立 NS の約半数を、その質量の 20% 程度の精度で推定できることを示した [31, 59]。

重力波データ解析スクール

昨年に引き続き、東京大学ビッグバンセンターにおいて 2014 年 4 月 18 日 (金)、19 日 (土) に重力波データ解析スクールを開催し、約 60 名の参加者を得ることができた。本スクールでは、ビッグバンセンターの横山順一教授、京都大学基礎物理学研究所の柴田教授、宇宙線研究所の川村静児教授らの講義と、データ解析チームによる演習を組み合わせたプログラムを持ち、アンケートによると、参加者した学部学生は、重力波データ解析と重力波による天文学への興味を新たにすることがわかった。本スクールのホームページ URL は以下の通りである。<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/workshops/jgwdas201404>。また、2014 年 11 月 23 日 (日)、24 日 (月) には大阪大学においてもスクールを開催することができた。大阪大学のスクールでは、KAGRA データ解析チームをメインの講師として、重力波天文学、データ解析手法、実際の演習までを約 40 名の学部学生に体験してもらうことができた [87]。また、今回初めて社会人 (放送大学大学生) の参加を得て、知名度の拡大を実感した [93]。本スクールのホームページ URL は以下の通りである。<http://vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp/gwschool2014>。

<受賞>

- [1] 須山輝明 日本物理学会若手奨励賞、日本物理学会、2015 年 3 月

- [2] 枝和成、JGRG presentation award、The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24)、2014 年 11 月 10 日-14 日

<報文>

(原著論文)

- [3] T. Fujita, S. Yokoyama, and J. Yokoyama, “Can a spectator scalar field enhance inflationary tensor mode?,” *PTEP* **2015** (2015) 043E01.
- [4] S. Kuroyanagi, K. Nakayama, and J. Yokoyama, “Prospects of determination of reheating temperature after inflation by DECIGO,” *PTEP* **2015** (2015) 1, 013E02.
- [5] K. Kamada and J. Yokoyama, “Topological inflation from the Starobinsky model in supergravity,” *Physical Review D* **90** (2014) 10, 103520.
- [6] J. Yokoyama, “Toward the detection of gravitational waves under non-Gaussian noises I. Locally optimal statistic,” *Proceedings of the Japan Academy ser B* **90** (2015) 422–432.
- [7] K. Eda, A. Shoda, Y. Ito, and M. Ando “Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas”, *Physical Review D*, Volume 90, Issue 6, 064039 (2014).
- [8] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi, J. Silk, “Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes”, *Physical Review D*, Volume 91, Issue 4, 044045 (2015).
- [9] K. Ono, K. Eda, and Y. Itoh “New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves”, *Physical Review D*, Volume 91, Issue 8, 084032 (2015).
- [10] Teruaki Suyama, Yi-Peng Wu & Jun’ichi Yokoyama: “Primordial black holes from temporally enhanced curvature perturbation”, *Phys. Rev. D* **90**, 043514 (2014), [arXiv:1406.0249].
- [11] Hayato Motohashi & Teruaki Suyama: “Third order equations of motion and the Ostrogradsky instability”, *Phys. Rev. D* **91**, 085009 (2015), [arXiv:1411.3721].
- [12] Y. Watanabe, A. Naruko and M. Sasaki, “Multi-disformal invariance of nonlinear primordial perturbations,” arXiv:1504.00672 [gr-qc].
- [13] Y. Watanabe and J. White, “Multi-field formulation of gravitational particle production after inflation,” arXiv:1503.08430 [astro-ph.CO].
- [14] T. Terada, Y. Watanabe, Y. Yamada and J. Yokoyama, “Reheating processes after Starobinsky inflation in old-minimal supergravity,” *JHEP* **1502**, 105 (2015) [arXiv:1411.6746 [hep-ph]].
- [15] T. Kobayashi, Y. Watanabe and D. Yamauchi, “Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski,” *Phys. Rev. D* **91**, no. 6, 064013 (2015) [arXiv:1411.4130 [gr-qc]].

- [16] N. Takeda and Y. Watanabe, “No quasistable scalaron lump forms after R^2 inflation,” Phys. Rev. D **90**, no. 2, 023519 (2014) [arXiv:1405.3830 [astro-ph.CO]].
- [17] C. Germani, Y. Watanabe and N. Wintergerst, “Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data,” JCAP **1412**, no. 12, 009 (2014) [arXiv:1403.5766 [hep-ph]].
- [18] R. Saito, D. Yamauchi, S. Mizuno, J. Gleyzes and D. Langlois, “Modified gravity inside astrophysical bodies,” arXiv:1503.01448 [gr-qc].
- [19] T. Namikawa, D. Yamauchi and A. Taruya, “Future detectability of gravitational-wave induced lensing from high-sensitivity CMB experiments,” Phys. Rev. D **91**, no. 4, 043531 (2015) [arXiv:1411.7427 [astro-ph.CO]].
- [20] T. Kobayashi, Y. Watanabe and D. Yamauchi, “Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski,” Phys. Rev. D **91**, no. 6, 064013 (2015) [arXiv:1411.4130 [gr-qc]].
- [21] D. Yamauchi and M. J. Lake, “Dynamics of cosmic strings with higher-dimensional windings,” arXiv:1410.6267 [hep-ph].
- [22] D. Yamauchi, K. Takahashi and M. Oguri, “Constraining primordial non-Gaussianity via a multi-tracer technique with surveys by Euclid and the Square Kilometre Array,” Phys. Rev. D **90**, no. 8, 083520 (2014) [arXiv:1407.5453 [astro-ph.CO]].
- [23] K. Kamada, Y. Miyamoto, D. Yamauchi and J. Yokoyama, “Effects of cosmic strings with delayed scaling on CMB anisotropy,” Phys. Rev. D **90**, no. 8, 083502 (2014) [arXiv:1407.2951 [astro-ph.CO]].
- [24] T. Hiramatsu, Y. Miyamoto and J. Yokoyama, “Effects of thermal fluctuations on thermal inflation,” JCAP **1503**, no. 03, 024 (2015) [arXiv:1412.7814 [hep-ph]].
- [25] T. Nakama, T. Suyama and J. Yokoyama, “Reheating the universe once more: the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales,” Phys. Rev. Lett. **113**, 061302 (2014) [arXiv:1403.5407].
- [26] K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, “Testing scenarios of primordial black holes being the seeds of supermassive black holes by ultracompact minihalos and CMB μ -distortions,” Phys. Rev. D **90**, 083514 (2014) [arXiv:1405.5999 [astro-ph.CO]].
- [27] T. Nakama, “The double formation of primordial black holes,” JCAP **10**, 040 (2014) [arXiv:1408.0955 [gr-qc]].
- [28] T. Harada, C. Yoo, T. Nakama and K. Koga, “Cosmological long-wavelength solutions and primordial black hole formation,” Phys. Rev. D **91**, 084057 (2015) [arXiv:1503.03934 [gr-qc]].
- [29] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh and M. Ando, “Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas,” Phys. Rev. D **90**, no. 6, 064039 (2014) [arXiv:1406.7059 [gr-qc]].
- [30] K. Eda, Y. Itoh, S. Kuroyanagi and J. Silk, “Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes,” Phys. Rev. D **91**, no. 4, 044045 (2015) [arXiv:1408.3534 [gr-qc]].
- [31] K. Ono, K. Eda and Y. Itoh, “New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves,” Phys. Rev. D **91**, no. 8, 084032 (2015) [arXiv:1503.01231 [gr-qc]].
- [32] K. Takahashi and J. Yokoyama, “Equation of state of dark energy in $f(R)$ gravity,” Phys. Rev. D **91**, 084060 (2015) [arXiv:1503.07412 [gr-qc]].
- (会議抄録)
- [33] K. Kohri, T. Nakama and T. Suyama, “Relationship between dark matter properties and primordial black holes as seeds of supermassive black holes,” Proceedings of JGRG23, 531-538, 2013.
- (学位論文)
- [34] Yuhei Miyamoto: “Effects of thermal fluctuations on phase transitions in the early Universe” (博士論文)
- [35] 高橋 一史: 「 $f(R)$ 重力理論におけるダークエネルギーの状態方程式の研究」(修士論文)
- [36] 林中貴宏: 「de Sitter 時空における Schwinger 効果」(修士論文)
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [37] Jun'ichi Yokoyama, “Prospects of determination of thermal history after inflation with DECIGO” COSMO 2014, University of Chicago, 2014/8/26.
- [38] Kazunari Eda, “Searching for gravitational waves using triple-output torsion-bar antennas”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Matsumoto, Nagano, 2014/08/02-2014/08/04.
- [39] Kazunari Eda, “Multiple output configuration for a torsion-bar gravitational wave antenna”, The 24th Japan General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, the University of Tokyo, 2014/11/12.
- [40] Yousuke Itoh, “KAGALI Coding Style Guide: Its motivation and introduction” A Satellite meeting of the The 7th Korea-Japan Workshop on KAGRA, 富山大学, Toyama, 2014/12/19-20.

- [41] Kazunari Eda, “A new estimation method for masses of isolated neutron stars using gravitational waves”, , 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, 広島大学、Hiroshima, 2015/02/19-21.
- [42] T. Suyama, “Black hole perturbation in modified gravity,” The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation-JGRG24, Kavli IPMU, The University of Tokyo, Nov. 10 - 14.
- [43] T. Suyama, “Third order equations of motion and the Ostrogradsky instability,” 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, Hiroshima University, Feb. 19 - 21.
- [44] Y. Watanabe & N. Takeda, “Self-production of Scalar Gravitons after Starobinsky Inflation,” AP-CosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Matsumoto, Aug. 2013
- [45] Y. Watanabe, “New Higgs Inflation vs. Starobinsky Inflation: status after Planck2013 and BICEP2 results,” Cosmology after Planck, Munich Institute for Astro- and Particle Physics, Germany, Sep. 2013
- [46] Y. Watanabe, C. Germani & N. Wintergerst, “Self-unitarization of New Higgs Inflation,” 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Kavli IPMU, The University of Tokyo, Nov. 2014
- [47] Y. Watanabe, C. Germani & N. Wintergerst “Self-unitarization of New Higgs Inflation and compatibility with Planck and BICEP2 data,” 4th UTQuest B-mode Cosmology, KEK, Feb. 2015
- [48] Daisuke Yamauchi: “Constraining primordial non-Gaussianity via multitracer technique with surveys by Euclid and Square Kilometre Array”; CosPA 2014 (University of New Zealand, New Zealand, December, 2014)
- [49] Daisuke Yamauchi: “Constraining primordial non-Gaussianity via multitracer technique with Euclid and SKA”; The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (IPMU, Japan, November, 10, 2014)
- [50] T. Hiramatsu, Y. Miyamoto, and J. Yokoyama, “Effects of thermal fluctuations at the end of thermal inflation”, The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, Kavli IPMU, Chiba, Japan, Nov. 10 - 14, 2014.
- [51] T. Nakama, “Scalar perturbations induced by the second-order effects of primordial gravitational waves,” RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Matsumoto, Nagano, Japan Jul. 31 - Aug. 4.
- [52] T. Nakama, “Scalar perturbations generated by the second-order effects of gravitational waves and their cosmological implications” (Poster), The 18th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO 2014), University of Chicago, Chicago, Aug. 25 - 29.
- [53] T. Nakama, “Investigating tensor perturbations on small scales from their second-order effects to generate scalar perturbations,” The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, Tokyo, Japan, Nov. 10 - 14.
- [54] T. Nakama, “Tensor perturbations as a source of scalar perturbations,” CosPA 2014 (the 10th Asia-Pacific Symposium on Cosmology and Particle Astrophysics), University of Auckland, Auckland, New Zealand, Dec. 8 - 12.
- [55] °T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized Galileon”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Asama Spa ”Jimotoya”, Matsumoto, Nagano, July 31- August 4, 2014
- [56] °T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized G-inflation,” The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, the University of Tokyo, Japan, November 10 - 14 , 2014
- [57] °T. Kunimitsu, T. Suyama, Y. Watanabe, J. Yokoyama, “Large tensor mode, field range bounds, and consistency in generalized G-inflation,” 30th Institut d’astrophysique de Paris Colloquium “The Primordial Universe after Planck,” Institut d’Astrophysique de Paris, Paris, France, December 15 - 19, 2014
- [58] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yousuke Itoh, and Masaki Ando, ”Searching for gravitational waves using triple-output torsion-bar antennas”, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics, Nagano, Aug. 2-4, 2014.
- [59] Kazunari Eda, Kenji Ono, and Yousuke Itoh, ”A new estimation method for masses of isolated neutron stars using gravitational waves”, 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, Hiroshima, Hiroshima University, Feb. 19-21, 2015.
- [60] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yousuke Itoh, and Masaki Ando, ”Multiple output configuration for a torsion-bar gravitational wave antenna” The 24th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG24), Kavli IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Nov. 10-14, 2014.
- [61] Kazunari Eda, ”Gravitational waves as a probe of dark matter mini-spikes”, Colloquium at the Albert Einstein Institutes, Hannover, Germany, Sep. 18, 2014.
- [62] K. Takahashi: “Cosmological evolution of the chameleon field in the presence of a compact object”, JGRG24, (Kavli IPMU, Tokyo, 11/12, 2014)

招待講演

- [63] Jun'ichi Yokoyama, "Cosmology of the Higgs field", Preworkshop on gravitation and cosmology, National Tsinghua University, Taiwan, 2014/4/11.
- [64] Jun'ichi Yokoyama, "Gravitational Waves: Near future, Far future" CosPA 2014, University of Auckland, New Zealand, 2014/12/11.
- [65] Jun'ichi Yokoyama, "Inflationary Magnetogenesis" Primordial Universe After Planck, IAP, France, 2014/12/17.
- [66] Jun'ichi Yokoyama, "Discussion session" The fourth UTQuest Workshop B-mode cosmology, IPNS, KEK, 2015/2/19.
- [67] Yousuke Itoh, "Status of KAGRA and gravitational wave astronomy", 2nd International Workshop on Theoretical and Computational Physics, Buon Ma Thuot, Vietnam, 2014/07/28-31.
- [68] T. Suyama, "Reheating the Universe Once More - the dissipation of acoustic waves as a novel probe of primordial inhomogeneities on even smaller scales," IAS workshop on New Perspectives on Cosmology, HKUST, Hong Kong, May. 19 - 23.

(国内会議)

一般講演

- [69] 枝和成, 『3出力ねじれ振り子型検出器 (TOBA) によるパラメータ決定精度の向上』, 日本物理学会 2014 年秋季年会, 佐賀大学, 佐賀県, 2014 年 9 月 21 日
- [70] 伊藤洋介, "KAGRA Data Analysis Subsystem status report", KAGRA f2f@Toyama Univ. 2 Aug. 2014.
- [71] 渡邊悠貴, Jonathan White, "ヒッグス凝縮場による非一様再加熱からの宇宙論的制限," 第 70 回日本物理学会, 早稲田大学, Mar. 2015
- [72] 山内大介: "Dynamics of cosmic strings with higher-dimensional windings"; 物理学会 (早稲田大学, 3/23, 2014)
- [73] 山内大介: "Constraining non-Gaussianity with multi-tracer technique"; 第 3 回観測的宇宙論ワークショップ (名古屋大学, 11/28, 2014)
- [74] 山内大介: "Constraining non-Gaussianity with multi-tracer technique"; 物理学会 (佐賀大学, 9/20, 2014)
- [75] 平松尚志, 宮本裕平, 横山順一, "熱的インフレーションにおける揺動効果", 日本物理学会秋季大会, 佐賀大学, 佐賀, 2014 年 9 月 19 日
- [76] 中間 智弘, 須山照明: "テンソルゆらぎの二次の効果で生成されるスカラーゆらぎとその宇宙論的帰結"; 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学, 佐賀, 日本, 2014 年 9 月 18 日 - 21 日.
- [77] 中間 智弘, 須山照明, 横山順一: "テンソルゆらぎの二次の効果で生成されるスカラーゆらぎとその宇宙論的帰結 (2)"; 日本物理学会 2015 年春季大会, 早稲田大学, 東京, 日本, 2015 年 3 月 21 日 - 24 日.
- [78] ° 國光太郎, 須山輝明, 渡辺 悠貴, 横山順一, "Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized Galileon", 第 44 回天文・天体物理若手夏の学校, 信州・戸倉上山田温泉ホテル圓山荘, 2014 年 7 月 28 日-31 日
- [79] 枝和成, 正田亜八香, 伊藤洋介, 安東正樹, 「3出力ねじれ型振り子検出器 (TOBA) によるパラメータ決定精度の向上」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 佐賀大学, 2014 年 9 月 18 日-21 日
- [80] Kazunari Eda, "Multiple output configuration for a torsion-bar gravitational wave antenna" Joint Seminar, University of Tokyo, Hongo, Dec. 1, 2014.
- [81] 高橋 一史: 「コンパクト天体の存在下におけるカメレオン場の宇宙論的進化」, 日本物理学会秋季大会 (佐賀大学, 9/19, 2014)
- [82] 林中貴宏, 藤田智弘, 横山順一: "de Sitter 時空における Schwinger 効果"; 日本物理学会 2015 年春季大会, 早稲田大学, 東京, 日本, 2015 年 3 月 21 日 - 24 日.

招待講演

- [83] 横山順一 「一般相対論入門」KAGRA データ解析スクール@RESCEU 東京大学 2014 年 4 月 18 日
- [84] 横山順一 「原始重力波直接検出への期待」 日本物理学会 2014 年秋季大会 重力波シンポジウム 佐賀大学 2014 年 9 月 19 日
- [85] 横山順一 「初期宇宙と重力波」 DECIGO 検討会 京都大学理学部 2014 年 10 月 26 日
- [86] 伊藤洋介, 『重力波で探る巨大ブラックホールの物理量』(2014 年 4 月 24 日発表) 「活動銀河核ワークショップ ~2020 年代への展望~」, 国立天文台 (三鷹), 2014 年 4 月 23 日 (水)・24 日 (木)
- [87] 伊藤洋介, 『重力波天文学』, KAGRA データ解析スクール @大阪大学 2014 大阪大学, 23-24 Nov. 2014.
- [88] 須山輝明 "原始密度揺らぎに関する話題" 第 27 回 理論懇話会シンポジウム, 国立天文台, 2014 年 12 月 24 日 - 26 日.
- [89] 須山輝明 "原始密度ゆらぎ生成機構の峻別法の発見" 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 21 日 - 24 日.
- [90] 山内大介: "SKA による宇宙論"; SKA-Japan ワークショップ (国立天文台, 3/3, 2015)

(セミナー)

- [91] 横山順一 「CMB 偏光による原始重力波の発見と宇宙論」 東京大学物理学教室ビッグバン宇宙国際研究センター合同談話会 2014 年 4 月 22 日
- [92] Kazunari Eda, "Gravitational waves as a probe of dark matter mini-spike", Albert Einstein Institute, 2014/09/18.
- [93] 伊藤洋介, 『KAGRA データ解析スクール』, KAGRA データ解析ミーティング (ネット会議), 2014 年 11 月 7 日

- [94] 伊藤洋介、『単独パルサーの重力波観測による質量決定』、新潟大学コロキウム、新潟大学、2014年12月2日
- [95] 伊藤洋介、『重力波天文学「重力波検出器をつくり重力波を見つけよう！！」(データ解析担当、2015/03/06)、宇宙線研究所スプリングスクール2015、宇宙線研究所、2015年3月3日(火)～7日(土)
- [96] 須山輝明「小スケールの宇宙初期揺らぎを探る」弘前大学外圏宇宙セミナー 2014年9月24日
- [97] 須山輝明 “Black hole perturbation in Horndeski theory” 京都大学基礎物理学研究所 2015年2月18日
- [98] Y. Watanabe “New Higgs Inflation vs. Starobinsky Inflation: status after Planck2013 and BICEP2 results,” 早稲田大学, 理論物理学セミナー, 2014年5月16日
- [99] Y. Watanabe “Gravitational reheating after inflation,” Theoretical Physics Group Seminar, Technische Universitaet Muenchen, Germany, 9th Sep. 2014
- [100] Daisuke Yamauchi: “Breaking of Vainshtein screening in scalar-tensor theories beyond Horndeski”; APC theory seminar (APC, France, February, 10, 2015)
- [101] T. Kunimitsu, “Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized G-inflation,” Joint Seminar on Cosmology and Gravitation, RESCEU, University of Tokyo, Japan, December 1, 2014
- (講演)
- [102] 横山順一、「たくさんの宇宙」朝日カルチャーセンター 新宿 2014年5月10日
- [103] 横山順一、「死んだらどうなる?」朝日カルチャーセンター 新宿 2014年5月10日
- [104] 横山順一、「宇宙論入門」埼玉県立高校見学会 2014年11月14日 東京大学
- [105] Jun'ichi Yokoyama, “One-dollar proposal,” AAPS General Council Meeting, 2015/2/7 Seoul, Korea.