

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO による天文学・宇宙物理学の新展開

① ビジョンの概要

自然に対する好奇心は、人類の文明を発展させる原動力の1つである。人類は科学を探究することで自然界への理解を深め、その中で生まれる最先端技術は人々の日常生活へと還元されてきた。一方、未解明の謎も多く残されており、宇宙の誕生と進化、自然界を司る物理法則、物質と生命の起源が、物理学・天文学における重要なテーマとなっている。重力波による観測は、それらの謎に迫る新たな知見をもたらす。

② ビジョンの内容

自然に対する好奇心と探求心は、人類の文明を発展させる原動力の1つであり、築き上げられてきた科学は、人類が人類たる拠り所になっている。自然法則・宇宙の成り立ちへの人類の「知のフロンティア」は、科学者たちの純粋な探求心、そしてそれを支援する社会の営みの積み重ねによって押し広げられてきた。また、そこで必要とされる最先端技術は、人類の「技術のフロンティア」を切り拓く原動力となるとともに、日常生活へと還元されてきた。一方、人類はまだ自然を理解したとは言えない。素粒子や原子を説明する量子力学と、宇宙や天体を説明する重力理論を統一する理論はまだない。宇宙誕生の謎、暗黒物質や暗黒エネルギーの正体は分かっていない。宇宙の誕生と進化、自然界を司る物理法則、物質と生命の起源を解き明かすことが、物理学・天文学における重要なテーマとなっている。

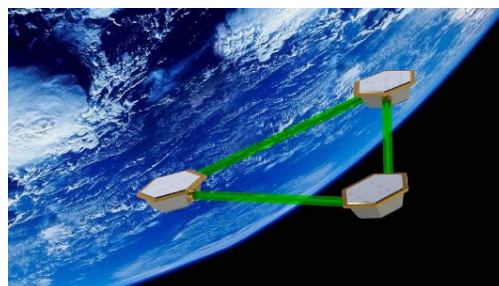


図1 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO 概念図

2015年に初めて観測された重力波は、人類の知見にブレークスルーをもたらす可能性をもっている。重力波は、質量の加速度運動による「時空のひずみ」が波として伝播する現象である。物質に対して非常に強い透過力を持つため、従来の観測手法では探ることができない宇宙の姿を我々に届けてくれる。特に、誕生直後の宇宙の姿、ブラックホール付近の強重力場、ガンマ線バーストや超新星爆発などの高エネルギー天体現象の中心部といった極限状態の直接観測が可能になる。さらには電磁波望遠鏡との同時観測によって、重元素生成の現場を探ることも可能になる。また、暗黒物質や暗黒エネルギーに対する定量的な観測も可能になる。今後、重力波観測は、現在の電磁波の観測と双璧をなすものに発展し、これまでとは違った宇宙の姿を見せてくれることが期待できる。

2015年に初めて観測された重力波は、人類の知見にブレークスルーをもたらす可能性をもっている。重力波は、質量の加速度運動による「時空のひずみ」が波として伝播する現象である。物質に対して非常に強い透過力を持つため、従来の観測手法では探ることができない宇宙の姿を我々に届けてくれる。特に、誕生直後の宇宙の姿、ブラックホール付近の強重力場、ガンマ線バーストや超新星爆発などの高エネルギー天体現象の中心部といった極限状態の直接観測が可能になる。さらには電磁波望遠鏡との同時観測によって、重元素生成の現場を探ることも可能になる。また、暗黒物質や暗黒エネルギーに対する定量的な観測も可能になる。今後、重力波観測は、現在の電磁波の観測と双璧をなすものに発展し、これまでとは違った宇宙の姿を見せてくれることが期待できる。

③ 学術研究構想の名称

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

④ 学術研究構想の概要

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO は、宇宙機3機の編隊飛行によって構成されたレーザー干渉計である(図1)。0.1-10Hz 付近の重力波を観測し、連星合体の時刻と方向を事前予告することで、合体の瞬間を他の電磁波望遠鏡などで観測する「マルチメッセンジャー観測」の中心的な役割を担う(図2)。さらに、初期宇宙からの重力波観測を目指す将来計画 DECIGO のための前哨ミッションの役割も持ち、観測技術の実証や前景重力波の観測と評価を行う。ブラックホール(BH)や中性子星に関連した高エネルギー天体物理学や原子核物理学、一般相対性理論や重力法則についての基礎物理学、宇宙の誕生・進化を解き明かす宇宙論など、自然界に対する人類の知の範囲を大きく拡大させる計画である。特に「宇宙のはじまりを直接観測する」という人類の夢の1つの実現に向けた大きな一歩となる。

B-DECIGO を構成する宇宙機は、お互いに 100km 離れた正三角形に配置される。それぞれの宇宙機内には、慣性基準となる鏡が非接触で保持されており、それらの間の距離変動をレーザー干渉計で精密に測定することで重力波をとらえる。宇宙空間では長い基線長がとれること、地面振動などが無いことから、地上の重力波望遠鏡では観測が困難な 10Hz 以下の周波数帯での観測が可能になる。加えて、鏡間で光を直接反射させてファブリー・ペロー共振器を実現し、光量子雑音で制限される感度限界を向上させている。太陽輻射圧変動などの外乱に起因する宇宙機の擾乱の影響を避けるために、宇宙機の位置・姿勢は、慣性基準となる鏡を基

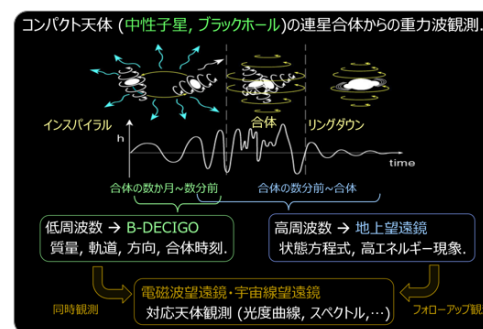


図2 連星系からの重力波の合体前観測

準に制御（ドラッグフリー制御）され、精密な編隊飛行が実現される。

⑤ 学術的な意義

2015 年の重力波の初観測によって重力波の存在が証明されるとともに、連星 BH の存在という新たな発見もあった。その成果を受け、2017 年のノーベル物理学賞は、重力波初観測に貢献した 3 氏が受賞している。2017 年には、連星中性子星合体からの重力波信号も観測され、ガンマ線、X 線、光・赤外線、電波など、幅広い電磁波波長で対応天体が発見されている。その結果、金などの重元素の起源、一般相対性理論の検証など基礎物理学的な知見、ハッブル定数など宇宙論的知見、中性子星についての原子核物理の知見、など幅広い科学的成果が得られている。宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO は、このような観測にブレークスルーをもたらす連星系を合体の数か月前に発見し、いつどこで合体が起こるのかを事前予想する。事前に母銀河の情報を公開することで、連星合体の瞬間の地上大型望遠鏡や宇宙望遠鏡での観測が可能になり、より遠方での暗いイベントや、より高分解能での撮像・分光観測が実現できる。連星中性子星合体・ガンマ線バーストという宇宙で最も高エネルギーの爆発現象を、リアルタイムに観測することで、人類の宇宙に対する知のフロンティアは飛躍的に広がるのが期待できる。

B-DECIGO の実現と同時期には、10Hz 以上の高い周波数帯では第 3 世代の地上重力波望遠鏡、100mHz 以下の低い周波数帯では宇宙重力波望遠鏡 LISA の観測運転が想定される。さらに低い周波数帯では、SKA など電波望遠鏡アレイによるパルサータイミングの手法、LiteBIRD など宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測も推進されている。その中で 0.1-10Hz という周波数帯で観測を行うのは B-DECIGO だけである。地上重力波望遠鏡 CE、ET と宇宙重力波望遠鏡 LISA を結びつけるとともに、電磁波望遠鏡も含めたマルチメッセンジャー天文学の中心的な役割を担う。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

地上の重力波望遠鏡としては、米国の LIGO、欧州の VIRGO、日本の KAGRA が観測運転を開始している。2030 年代には、米国では CE、欧州では ET と呼ばれる次世代重力波望遠鏡の検討が進められている。これらによって B-DECIGO で事前発見した連星系の合体の瞬間を CE、ET や電磁波望遠鏡で観測するという相補的な観測が可能になる。宇宙重力波望遠鏡としては、欧州の LISA 計画が 2030 年代半ばの実現を目指している。B-DECIGO では中間質量 BH 連星の合体を観測し、階層的な合体によって大質量 BH 形成の謎に迫るのに対して、LISA ではそれらの大質量 BH がさらに合体する様子を観測する。これらの相補的な観測から、宇宙におけるブラックホール形成史を解き明かすことが期待できる。

⑦ 社会的価値

重力波初観測の際には、国内でも主要メディアではトップニュースとして報道された日本の国民は、基礎的な科学的発見や、宇宙に対する純粋な好奇心、人類の文明への貢献にも強い関心と誇りを持っており、その結果が人々の生活に還元されることも理解している。B-DECIGO による宇宙観測は、「ノーベル賞級」という言葉では測りきれない科学的価値を持ち、国民の理解を得て、知的活動を高める一端となりえる。実用面では、B-DECIGO で用いられる精密編隊飛行技術は、衛星サイズの制約を打破し、宇宙利用の新たな可能性を切り拓く。宇宙の観測だけでなく、地震・津波・土砂崩れ・洪水などの自然災害の状況把握、大気・海洋・大陸氷床などのモニタによる気候変動観測、GPS 衛星の高感度化などへの波及効果が想定される。

⑧ 実施計画等

2040 年代に打ち上げ、5 年間の観測運用を行う。ミッション公募への提案後、4 年間でミッション検討・根幹技術開発。プロジェクト開始後 4 年間で基本設計・詳細設計。その後 4 年間で実機の製作を進め、打ち上げ、観測を開始。並行して、データセンターの立ち上げを進める。本計画は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の戦略的中型ミッションを核として実現する。JAXA、東京大学、名古屋大学、法政大学、電気通信大学、国立天文台、京都大学などが協力体制を構築している。総経費は国内負担分として 500 億円を見込む。内訳は、根幹技術開発・地上実証試験経費・人件費 60 億円、実機製作・性能と機能の試験・人件費、および打ち上げ経費として 390 億円、その後の観測運用経費・人件費として 5 年間で 50 億円を想定している。

⑨ 連絡先

安東 正樹（東京大学 理学系研究科）