

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 計画 (略称: KAGRA)

① ビジョンの概要

重力波を用いた学術は始まったばかりで全貌が明らかではないが、文明は予想もしなかった気付きから発展してきている。電磁波でしか宇宙を見ることができなかった基礎学術が、新たな重力波というメッセンジャーによりその幅が広がり、人類に与えられた宿題を解き明かす一步一步を進めるとともに、限られた物理量のなかで生きている我々の存在意義や、多様な考え方を尊重しあうための礎となることを希求している。

② ビジョンの内容

重力波は、宇宙スケールでおきている遙か遠方の極限下の現象を、何にも遮られることなく観測できるメッセンジャーとして、その観測は新たな天文学、物理学や関連する分野を融合する研究手段となっている。検出が極めて困難であったが故にアインシュタインの予言から 100 年も要したが、ひとたび手が届けば、観測対象の数は感度の 3 乗として飛躍的に増大し、いずれは、電磁波も届かないような天体の深い部分や、宇宙の果て、あるいは開關直後に到達できる可能性を秘める。地球近傍では決して見ることができない事象を継続的かつ地道に観測、解明していくことは、学術の発展には欠かせない。

重力波を用いた学術はまだ始まったばかりで、今後どうなっていくのかわからない。これまでの歴史が示すように、科学や技術は、我々が全く予想もしなかった気付きや失敗から発展してきている。目先の切羽詰まったものだけが注視される中で、この自然界に対する好奇心と探求心という、人類の固有の文明を発展させる原動力たる学術に、改めて注目してよいのではないか。

③ 学術研究構想の名称

地上の重力波望遠鏡によるマルチメッセンジャー天文学の展開

④ 学術研究構想の概要

本構想は、地下と低温というこれまでにない方法で重力波検出を目指し、2010 年度に最先端研究基盤事業として採択された、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の設計感度を達成し、更にアップグレードすることで、近年創生したばかりのマルチメッセンジャー天文学に必要な、国際重力波観測国際ネットワークにおける重要拠点として、基礎学術を推進し、ビジョンの実現を目指す研究計画である。

アジア圏で唯一稼働している検出器としての KAGRA の役割は、短時間で波源到来方向を高精度で特定し、重力波分光に必要な自由度を提供することによって、地球規模の重力波望遠鏡の重要な一翼を担うのみならず、我が国のマルチメッセンジャー重力波天文学の礎となり、関連した物理、天文学や融合する近隣分野にも大きな貢献をする。

重力波による時空のわずかな歪みを検出する必要があるため、欧米では、装置の大型化を目指す第 3 世代 (3G) の新規施設計画が推進されているが、我が国では、あくまで、3 km の地下トンネルに設置された KAGRA を有効かつ戦略的に活用する構想に基づいた研究計画を推進する。主な理由は、KAGRA が既に 3G で検討されている地下と低温技術を先取りした 2.5G 検出器であることと、それ故に、3G でも特定の周波数帯域に絞ればひけをとらない感度で観測に貢献できるとともに、これまで地道に築いてきたノウハウを海外や次の世代に継承することができるからである。

⑤ 学術的な意義

重力波は物質との相互作用が微弱であり、アインシュタインの予言から 100 年もかかるほど検出が困難だが、それは透過性が非常に良いということを含意し、電磁波では到達できないほどの深奥の物理現象に迫ることができる。これまではビッグバン後 38 万年の晴れ上がり後の姿しか観測できなかった宇宙が、重力波によりインフレーションが起きたとされる開關後わずか 10 のマイナス 38 乗秒程度の初期まで探索できる可能性が拓けた。重力波が他の観測対象と決定的に違うもう一つの点は、その検出手段がエネルギー密度ではなくて振幅を測定するという点にある。到達距離が検出感度に比例するため、検出器の向上に対して観測で



図 1 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA のイメージ

きる波源数は3乗で増え、ブラックホールや中性子星からなる連星合体など地球上では到底見ることでない現象の観測数は今後飛躍的に伸びてゆく。これにより、力のしくみをこれまでに無い方法で検証することや、宇宙の成り立ちを理解し、ひとびとの世界観を広げることが可能になる。また、重力波天文学によって、暗黒エネルギーの理解や修正重力理論の導入と検証、原始重力波による宇宙最初期の観測と力の大統一の検証、ハッブル定数の独立な測定、銀河形成と重元素合成、及び相対論的ジェットの解明など、宇宙論的なブレークスルーの貢献が期待される。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

重力波は1916年にアインシュタインが提唱した一般相対論によって予想されてから、存在そのものを問う実験が進められてきたが、LIGOを中心とした欧米のプロジェクトにより2015年に初検出がなされ、2017年に米国の3人にノーベル賞が授与された。それまでは、重力波の検出が研究の目的であり、いかに感度の高い装置を建設するかという視点において国際的に競争がなされてきた。

国内では、地上と宇宙それぞれにおける重力波観測の構想があるが、まずは地上の観測においてKAGRAの実績が必須であり、それによって国内外のコミュニティの理解と幅を広げることが、重力波の二つの構想のみならず、多くの関連分野のビジョン達成にも貢献することになる。

⑦ 社会的価値

基礎学術という性質上、当該構想によって得られる成果は、知的価値はあるものの、社会的価値への積極的な貢献を目指すものではないが、KAGRAで得られる低温、真空工学、多次元制御技術、量子計測、材料科学などの最先端の技術の開拓による産業的価値は極めて高いこと、最先端研究施設への国内外からの多数の訪問者によって地域の経済と生活の活性化に貢献すること、我が国の学術研究が世界的に認められ成果を出すことは未来を担う子どもたちに夢を与え、次世代の科学技術を発展させるための好循環を生み出すこと等があげられる。

⑧ 実施計画等について

実施計画・スケジュール 重力波検出器の感度として、中性子連星合体信号を有意同定できる距離(Mpc)がしばしば用いられる。KAGRAは04で10Mpc、2027年に計画されている05で25-128Mpc、引き続き06では150Mpc、その後10年でアップグレードにより300Mpcを目指す。

重力波検出器の感度は、量子力学と立地環境による原理雑音と、制御や外部からの技術雑音で決まる。前者は場所の選定と量子的なゆらぎを減らすために高出力レーザーや重い鏡を用いるなど、検出器の設計段階で決まるが、後者の技術雑音がそれを下回ることが重要となるため、先行研究で培った技術を導入して数年で量子雑音に近づける。原理雑音には他に鏡の熱振動も含まれ、KAGRAはサファイアを極低温にするため、将来的にはより低い熱雑音を達成できると期待される。そのために、2025年に向け新しいサファイア鏡を開発している。量子雑音を減らすために、今後レーザー出力を上げていくことはもちろんであるが、周波数依存スクイーミングも10年以内に導入し、広い周波数帯域での量子雑音の低減を目指す。

実施機関と実施体制 KAGRAは東京大学宇宙線研究所(ICRR)が主推進機関として運用に責任をもち、加えて自然科学研究機構国立天文台(NAOJ)、および高エネルギー加速器研究機構(KEK)も運用に協力すると3者で合意されている。その他に、国内では約30の大学・研究機関、国外からは14か国の研究機関が参加している。コラボレーターは総勢500人規模で、約半数が国外からである。

総経費 204億円

所要経費 KAGRAの運用費として、インフラ維持、電気代と消耗品、人件費、計算機、旅費で総額90億円(10年間)、これにKAGRAアップグレードのために、高出力レーザーと光学部品8億円、高性能サファイア鏡10億円真空低温懸架系などの整備25億円、量子スクイーミング装置の導入12億円、周波数依存スクイーミング16億円の導入、地下環境を活かした低周波感度の向上15億円、膨大な重力波データの解析と保存のための計算機の設備と維持28億円などを加えた合計204億円が必要である。KAGRAは海外からの参加者が増えており、海外からの予算が増えていくため、国内で全てを負担する必要はない。

⑨ 連絡先

梶田 隆章(東京大学宇宙線研究所)