

重力波望遠鏡における環境雑音対策

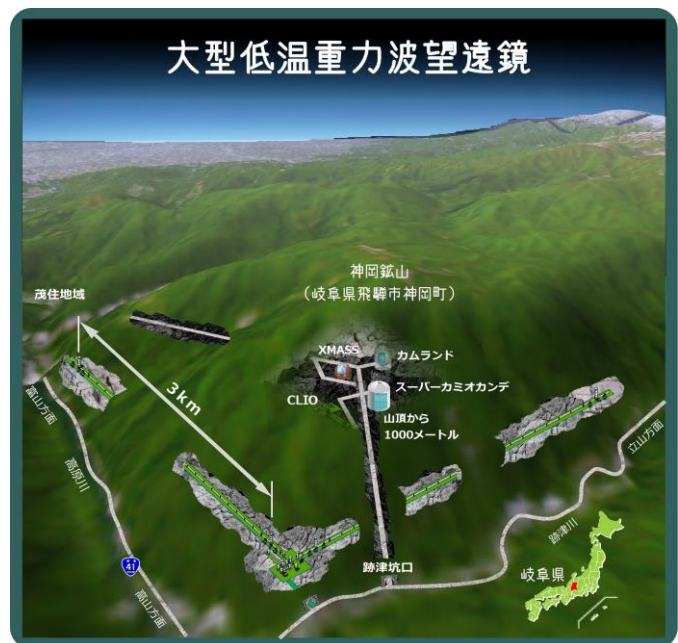
鷲見貴生（国立天文台重力波プロジェクト） on behalf of the KAGRA collation

概要(Abstract)

重力波とはアインシュタインの一般相対性理論によって記述される「時空のさざなみ」であり、ブラックホールや中性子星など非常に重い天体の連星合体や超新星爆発などによって発生する。日本では国立天文台も参加する KAGRA(岐阜県飛騨市)の建設が完了し、2020 年 4 月に 2 週間の国際共同観測を行った。本講演では、非常に微弱な重力波信号を捉える際の妨げとなる環境雑音への対策について紹介する。

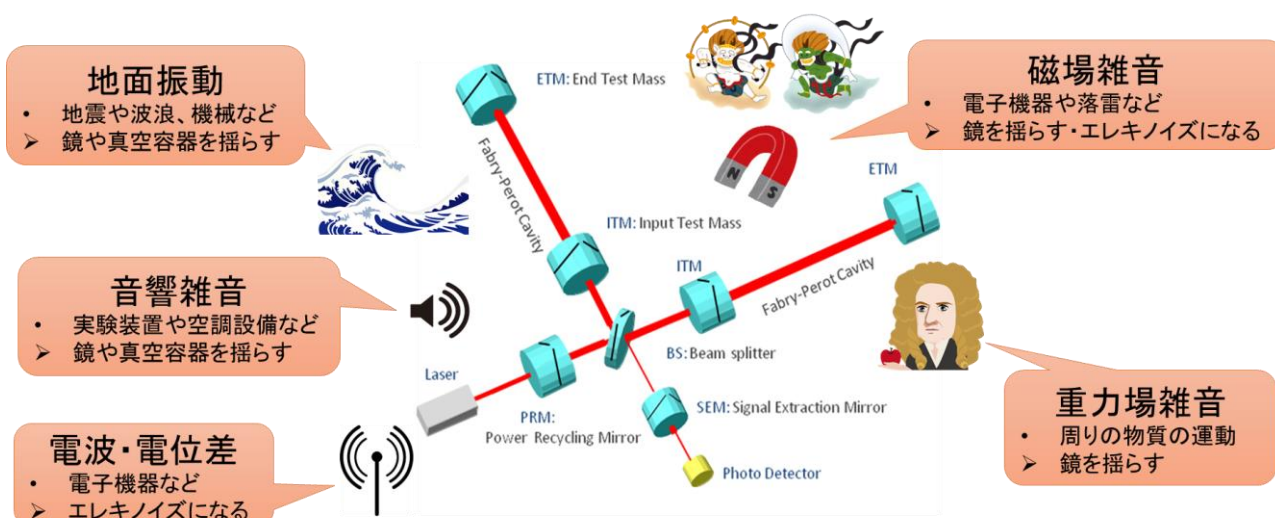
1. 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA は岐阜県飛騨市神岡鉱山にある重力波望遠鏡である [1]。基線長 3km のレーザー干渉計を用いて、10Hz から数 kHz における重力波信号を捉える。2020 年 4 月には、ドイツの重力波検出器 GEO600 との初の国際共同観測 (O3GK)を実施した。2021 年 2 月現在は、真真空容器を大気開放し装置のアップグレード作業が進行中である。世界の他の重力波検出器が全て地上にあること対し、KAGRA は地下施設で実験を行うことで地面振動雑音を地上の約 1/100 に低減し、さらに 13m の振子型防振装置によって重力波観測帯域の振動雑音を極限まで低減している。また、テストマスと呼ばれる鏡(約 20kg のサファイア、4 個)を 20K の極低温に冷却することで、熱雑音も低減する。



2. 重力波観測における環境雑音

重力波望遠鏡の感度は、主に地面振動雑音・熱雑音・量子雑音によって決まるという説明がなされる。これらは実験のデザイン段階で決定されるため「原理雑音」と呼ばれることもあり、比較的簡単に予想することができる。一方実際の実験系では、他にも様々な技術的理由による雑音が混入する。実際に O3GK の際の KAGRA では、最も感度の良い 200~400Hz 付近において実験室内の音に由来する雑音が支配的となった。この音響雑音のように、実験室内の装置や地質気象現象などの様々な環境に由来する雑音を環境雑音と呼び、これに対する取り組みは Physical Environmental Monitoring (PEM)と呼ばれる。



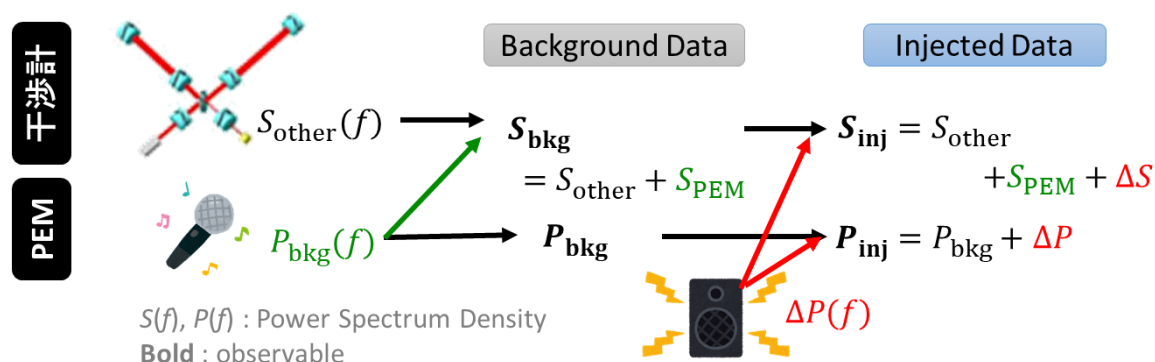
➡ Targets of Physical Environmental Monitoring (PEM)

3. KAGRA における環境雑音の評価・対策

これらの環境雑音を監視するため、KAGRA では地下実験施設内に地震計・加速度計・マイクロフォン・磁力計・電圧計・温湿度計・地物干渉計、地上に気象計や落雷検知器といった様々なセンサーを合計 100 個以上設置し、常時データ取得を行っている [2]。KAGRA の重力波信号に直接雑音となる周波数帯域だけでなく、干渉計制御に影響する基線長や室温などの長期変動も対象としている。また安価で軽量の Chromebook PC と USB センサーを組み合わせたポータブル PEM システムを開発し、電源やケーブルリングの制限を受けず広大な地下実験施設内で効率よく環境雑音の発生源を同定することが可能となった。2019 年 10 月にはこのシステムをイタリアの重力波望遠鏡 Virgo に持参して環境雑音源の探索を行い、感度向上に貢献した [3]。



環境雑音が干渉計信号の雑音成分として実際にどの程度寄与しているかは、人工的に環境雑音を増加させて干渉計応答を見る雑音注入試験(PEM injection)によって定量評価される。この手法は LIGO や Virgo など海外の重力波望遠鏡でも広く使われているが、我々は従来の周波数保存を仮定したモデルを



拡張し、環境雑音が異なる周波数の干渉計信号に影響を及ぼすモデルを新たに定式化した [4]。前章で述べた O3GK に現れる音響雑音成分は、この手法により評価されたものである。

4. KAGRA の信号に見られた環境雑音事象の例

ここでは KAGRA の試運転中および単独観測期間中に見られた環境雑音由来の事象を紹介する。

1) 実験設備由来の環境雑音の例：コンプレッサーの減圧

2020 年 2 月の KAGRA 単独観測の際、重力波観測レンジがおよそ 2.5 時間ごとに定期的に悪化する現象が見られた。このような挙動は間欠運転する装置に由来する場合が多く、実際に PEM のマイクによって、重力波信号検出ポート近くのコンプレッサーによる音・振動が原因と判明した。これは緊急時に真空容器を閉じるゲートバルブのためのものであり、観測中も電源を切ることができない装置であるが、防音と防振を施すことで即座に解決することができた。

2) 自然現象由来の環境雑音の例：落雷

2020 年 3 月 22 日昼頃、KAGRA の試運転中にすぐ付近で落雷があり、それと同時に干渉計にもパルス状の信号が観測された。落雷検知器や坑内の磁力計にも同時にパルスが見られた一方、加速度計など他のセンサーには反応がなかったことから、データ収集系のノイズではなく重力波望遠鏡自身が電磁波の影響を受けたものであると解釈できる。また、これは重力波信号にフェイクする突発性雑音を PEM によって同定した良い例となった。現在、地下施設における落雷の影響についての論文を準備中であり、近々投稿予定である。

5. まとめと展望

今回紹介したように、環境雑音は(干渉計や防振系などの”花形”と比べてあまり目立たないが)重力波観測において非常に重要である。その性質上系統的に取り組むことは難しく、どうしても対処療法的になってしまうといった困難がある一方、様々な種類のセンサーや分野の知識を活用し活動範囲も幅広いため、非常に面白い分野でもある。

現在 KAGRA は 2022 年度に開始予定の次の観測(O4)に向けてアップグレード作業が進行中であり、PEM でも水流計や微気圧振動計、高感度磁力計といった新たなセンサーの導入を進めている。また次の観測では、今回はかなり限定的な実施となった雑音注入試験をさまざまな場所・種類に対して実施したいと考えている。さらに、KAGRA の特徴である低温鏡・地下環境は将来計画の Einstein Telescope などでも採用される予定であるため、KAGRA の環境雑音評価はこれらにとっても非常に重要な情報に位置づけられている。

Reference

- [1] T. Akutsu *et.al.* (KAGRA collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. (2020) ptaa125
- [2] T. Akutsu *et.al.* (KAGRA collaboration), [arXiv:2009.09305]
- [3] I. Fiori, T. Washimi *et.al.*, Galaxies 2020, 8(4), 82
- [4] T. Washimi *et.al.*, [arXiv:2012.09294]