



KAGRA重力波望遠鏡のサファイアミラー

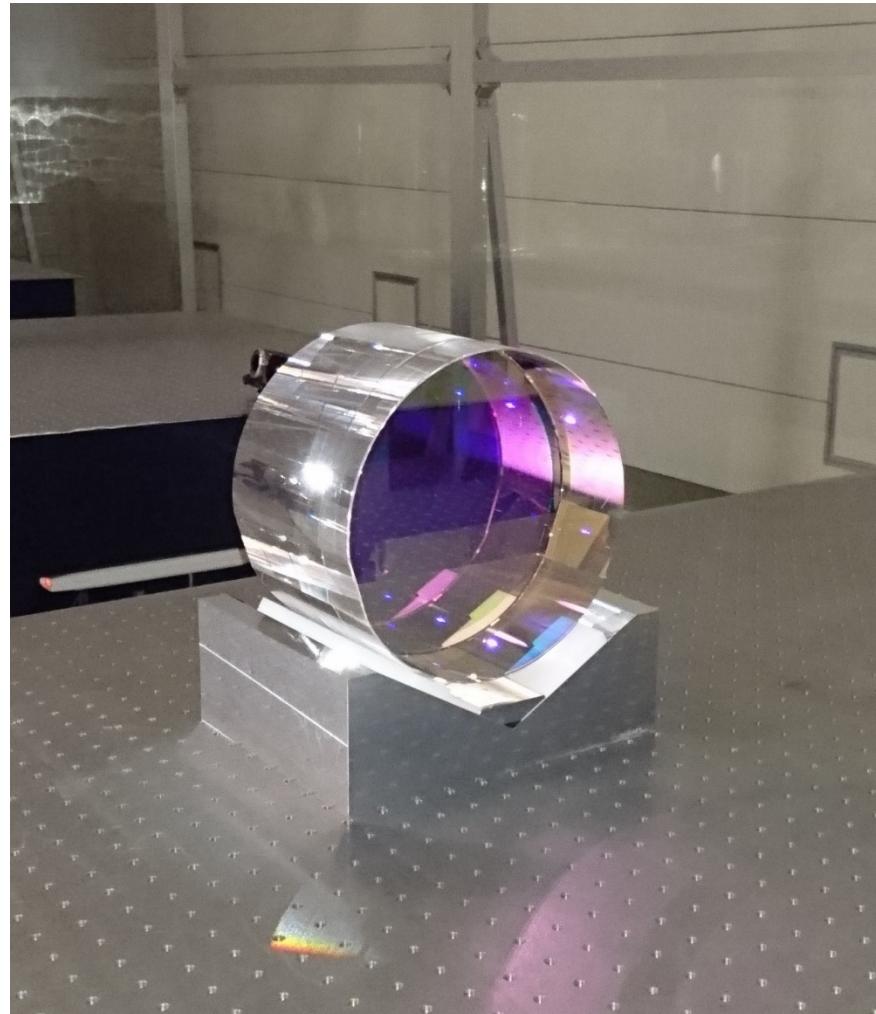
廣瀬 榮一

東京大学宇宙線研究所 特任助教

平成30年8月21日

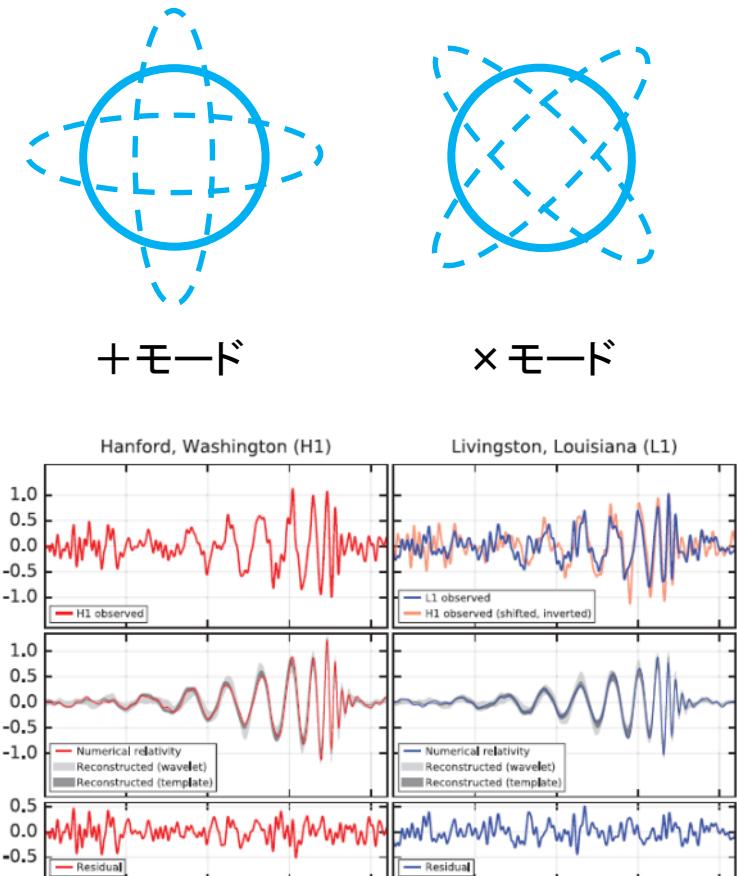
目次

- 重力波
- 干渉型重力波検出器
- 感度向上の工夫
- サファイア結晶について
- サファイアミラー仕様
- KAGRA共振器
- ミラー製作
- 製作にまつわる困難
- 協力企業・組織
- 今後の課題と予定
- まとめ



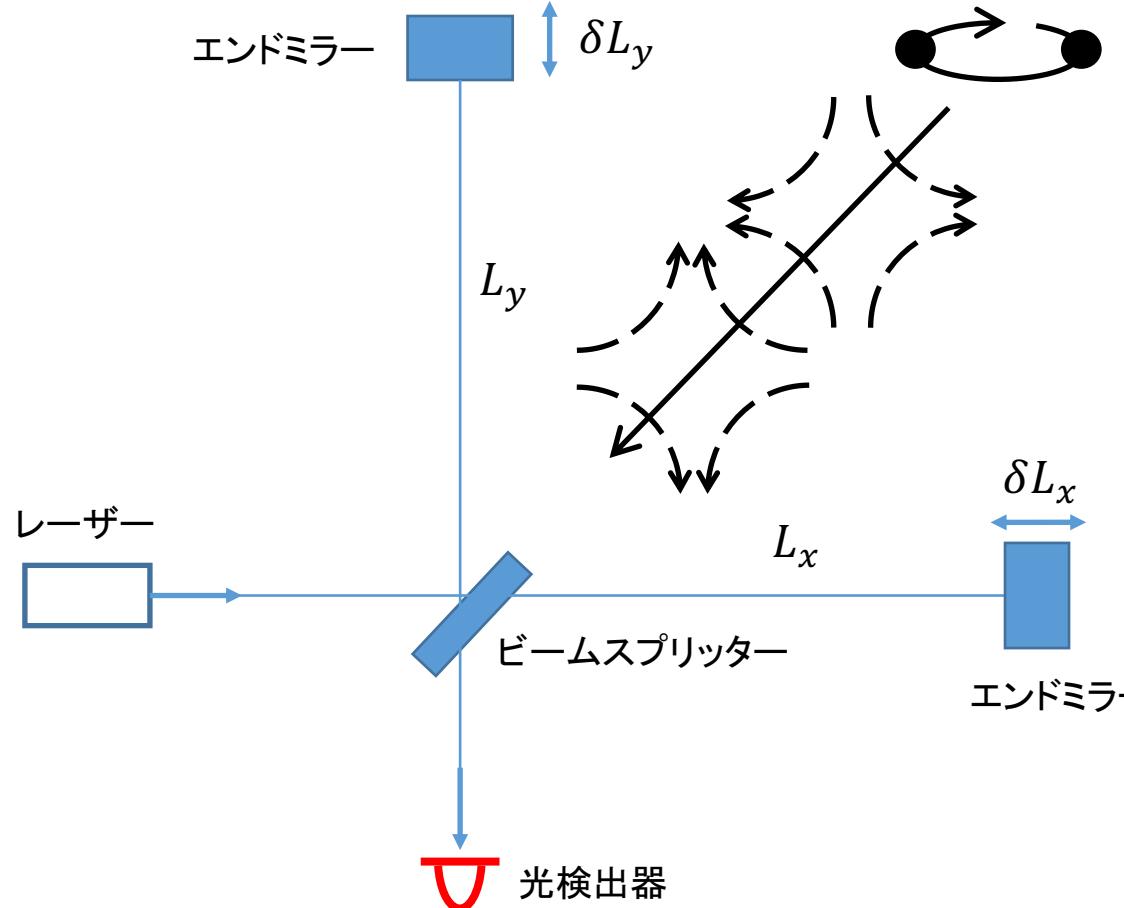
重力波

- ・ アインシュタインが一般相対性理論完成の翌年1916年に予測
- ・ 連星などから放射される時空の波
- ・ 光速で伝搬する横波(進行方向に垂直に波が振動する)
- ・ スピン2: +モード、Xモード (電磁波はスピン1)
- ・ 1974年ハルスとティラーにより発見された中性子連星の軌道周期の変化が重力波放出によって説明され、間接的に重力波の存在が確認
- ・ 2015年アメリカLIGOが世界で初めて重力波(GW150914)を直接観測し、一般相対性理論から予測される重力波の波形と一致
- ・ その後もLIGOはいくつか重力波を観測した。特にGW170817の中性子連星合体は欧州VIRGOも加わり、さらに世界中の電波観測望遠鏡も同じイベントを観測し、重力波の存在はゆるぎないものになっただけでなく、重力波天文学がはじまった
- ・ KAGRAも国際ネットワークに一日も早く加わるべく前進している



PRL 116, 061102 (2016)より

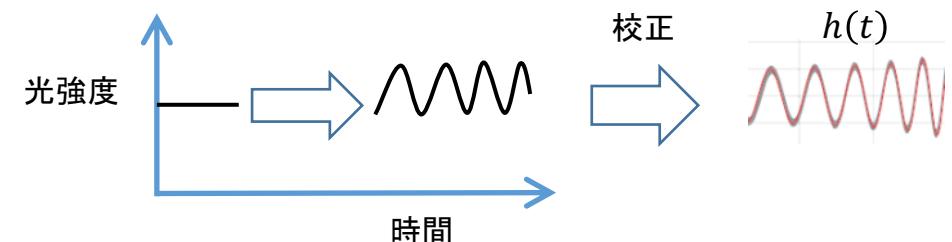
干渉型重力波検出器



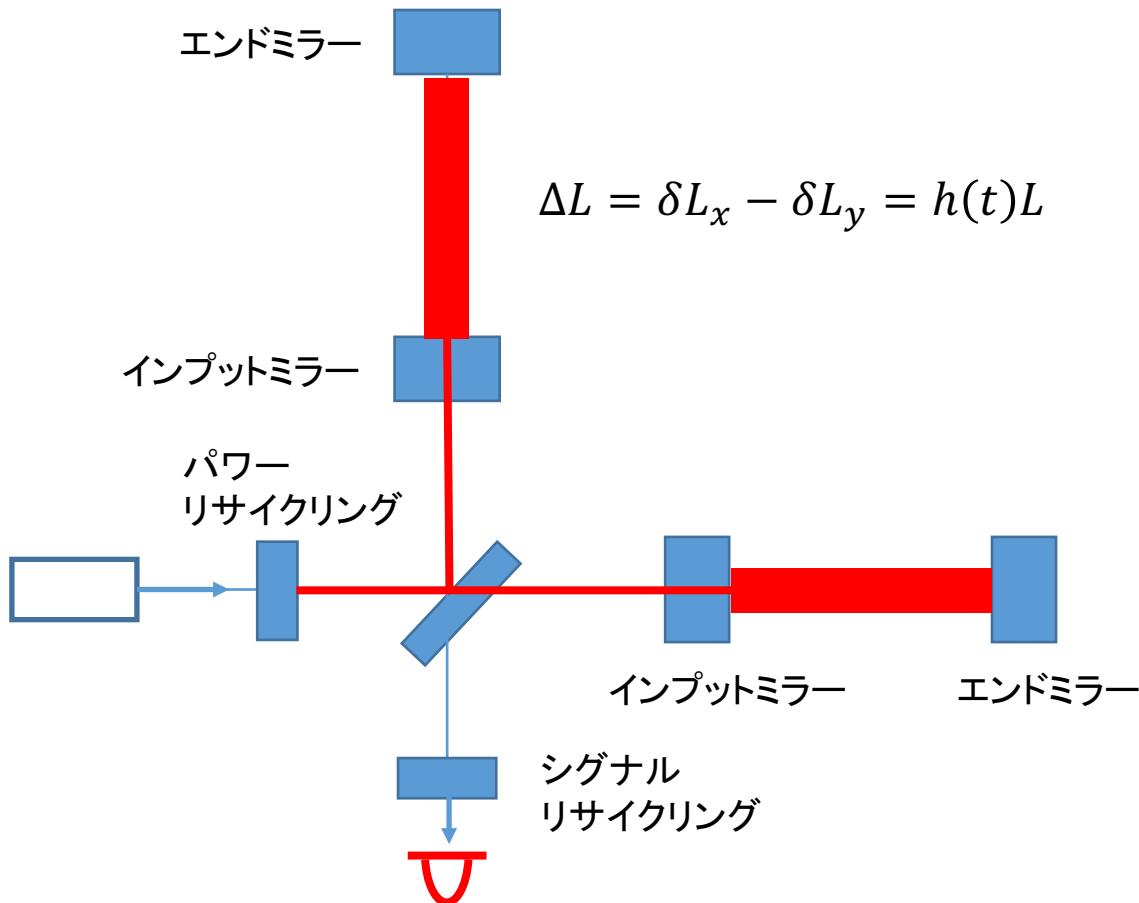
ブラックホールや
中性子の連星

$$\Delta L = \delta L_x - \delta L_y = h(t)L$$
$$L_x = L_y = L = 3\text{km} \text{ (KAGRA)}$$

- 重力波がない状態で光検出器のあるほう(ダークポート)を光が打ち消しあうように調整しておくと、重力波がくると腕の長さの違い ΔL が生じる(ミラーが差動することにより、光を検出する)
- 信号を校正しひずみデータ $h(t)$ にする



感度向上の工夫



- ・ インプットミラーを配置しエンドミラーとの間で光を往復させる光共振器を用いる。実効的な腕の長さLが増大する
- ・ このとき共振器の中のパワーはインプットミラーがないときに比べ増大する(KAGRAでは約1000倍) $s \propto 1 / \sqrt{P}$
- ・ さらにパワーリサイクリングミラーで光をためる
- ・ シグナルリサイクリングで感度のよい周波数を選択することができる
- ・ ミラーが外乱で揺れると感度が落ちるのでなるべくミラーを揺らさない静謐な環境に検出器を建設し(KAGRAは地下を選択)、防振装置で防振する
- ・ さらに、ミラーそのものが振動しないように低温にする(熱雑音の低減)→KAGRAでは世界にさきがけて優れた機械特性をもつサファイアを選択し低温運転をすることに決定

$$x \sim \sqrt{\frac{4k_B T}{m\omega_0^2 \omega Q}}$$

一般的な損失をもつ物体のゆらぎ(共振周波数より十分小さい場合)

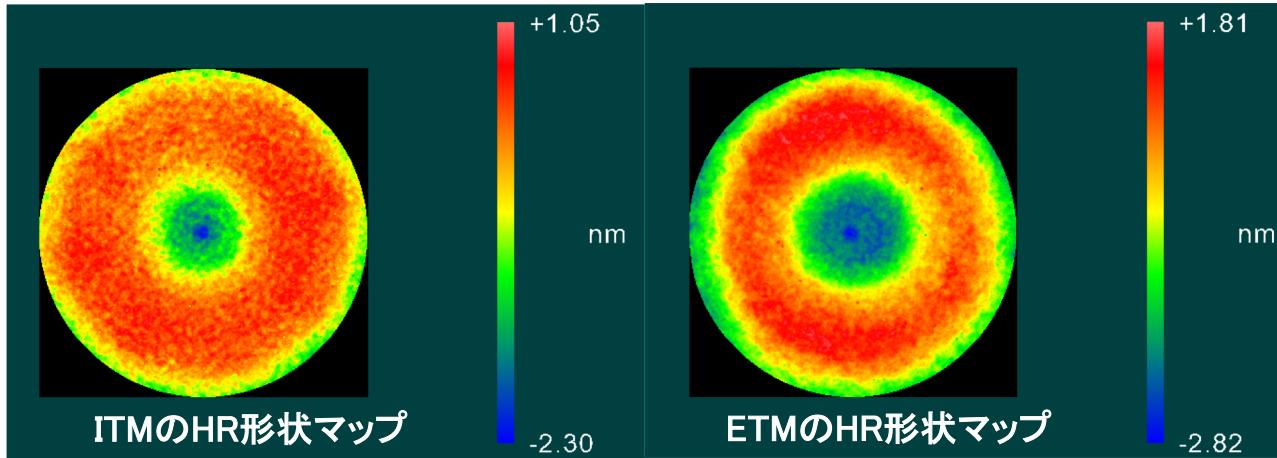
サファイア結晶

	サファイア	合成石英
結晶分類	三方晶系	アモルファス
モース硬度	9(ダイヤモンド10)	7
密度 g/cm3	3.98	2.2
屈折率	1.75	1.45
屈折率一様性	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁷
複屈折	あり(C軸に垂直な面内はなし)	非常に小さい
吸収@1064nm ppm/cm	~50 at best	5
Q値	10 ⁸ →低温で増大	10 ⁶ →低温で減少
熱伝導率 W/m/K	46→低温で増大4000以上(20K)	1.4

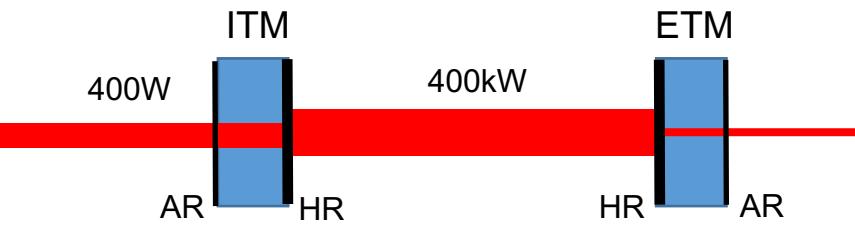
サファイアミラー仕様

	エンドミラー(ETM)	インプットミラー(ITM)
直径/厚み mm	220 / 150	220 / 150
質量 kg	23	23
曲率半径 m	1907	1904
形状誤差(直径140mm内) nm	0.9	0.5
ラフネス nm	0.1	0.1
バルク吸収 ppm/cm	90	30
コーティング材料	Ta ₂ O ₅ / SiO ₂	Ta ₂ O ₅ / SiO ₂
HRコーティング吸収 ppm	0.5	0.3
ARコーティング吸収 ppm	-	0.7
散乱 ppm	11	8
透過率	7ppm	0.46%

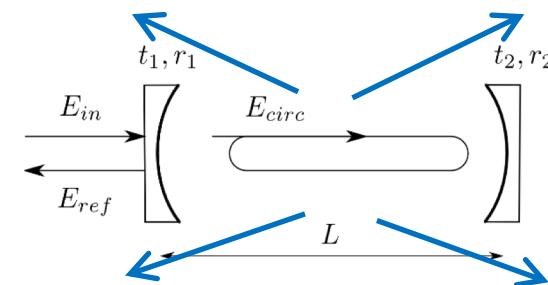
KAGRA共振器



	ITM	ETM
コーティング吸収	0.5ppm	0.5ppm
散乱	8ppm	11ppm
欠陥	1ppm	1ppm
ラフネス	5ppm	5ppm
回折	0.5ppm	0.5ppm
透過	-	7ppm
合計	15ppm	25ppm



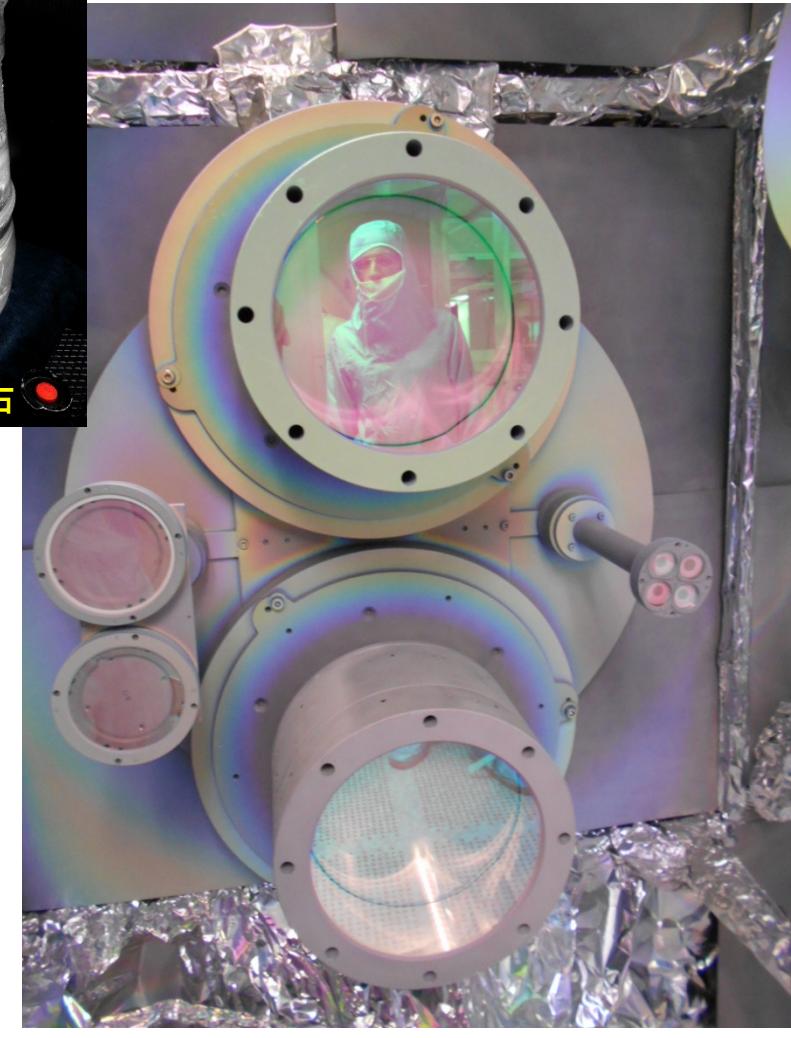
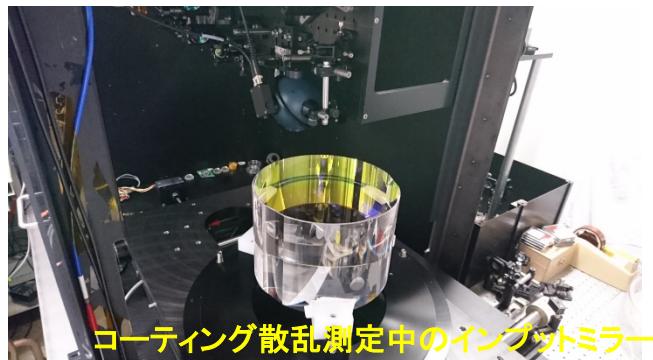
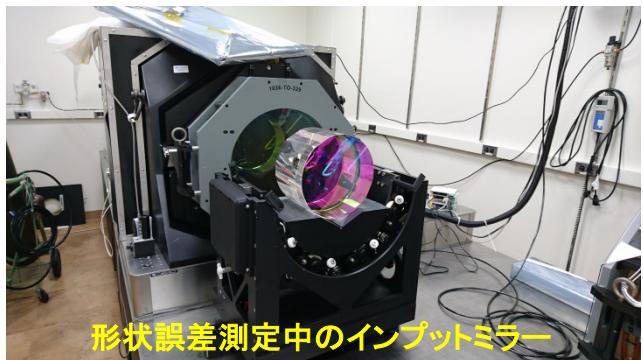
- 入射レーザーパワー最大の時は上記のパワーが共振器内にたまる
- $400\text{kW} \times 0.5\text{ppm} + 400\text{W} \times (50\text{ppm/cm} \times 15\text{cm} + 0.7\text{ppm}) = 0.5\text{W}$ (ITMの場合)
- 冷凍機の能力は1Wあるのでこのときでもミラーを20Kに保つことができる



- ミラー形状誤差で約10ppm漏れる(マップを用いた光学シミュレーション)
- 合計で一往復で50ppmのパワーの損失(100ppm以下が要求値)

ミラー製作

- 結晶開発(HEMまたはTSMGによる育成、吸収評価)
↓
- 研磨(grinding, lapping, polishing, ion beam figuring、形状評価)
↓
- コーティング(イオンビームスパッタリング)
↓
- 最終評価(形状誤差、曲率半径、コーティング仕様など)



製作にまつわる困難

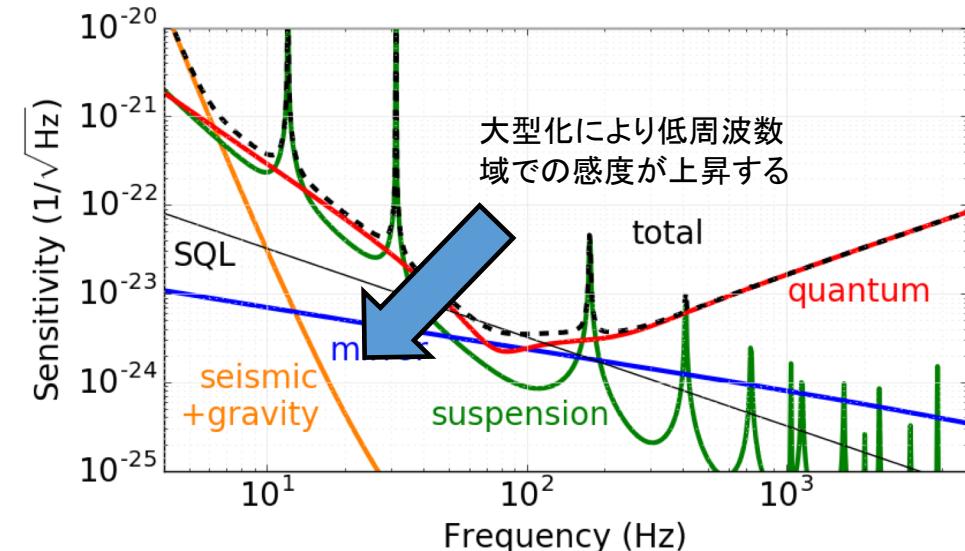
- KAGRAの当初計画では直径25cmで30kgという計画だったが、C軸結晶で光学素子としてつかえるものは現状22cmが最大と判明(25cmだとバブルが入ったりする)
- 硬く加工するのに時間がかかり(約1年)、工具が破損することもしばしば。研磨メーカーもこのサイズは初のこころみ。また結晶はひとつひとつ個性があり少しづつ加工し様子をみながらでないと失敗してしまう。
- 散乱に効いてくるマイクロラフネスが研磨で達成できるかサファイアでは未知数だった
- ITMで要求される吸収値を満足するような結晶が偶然育成できる確率は非常に小さく、結晶メーカーとの共同作業が必要だった。結局トータルでインプットミラー用結晶入手に数年を要した
- 屈折率の一様性が石英より悪く、結晶内を光が通ったときにビーム波面がよごれてしまう。これを補正するためにITMのAR側で非球面研磨をおこなう必要があった(完全ではない)
- コーティングも石英以外でこのサイズのサファイアミラーにコーティングしたのは初めての試みで、きちんとコーティングできるかはまったく予測できなかった。
- 上記のような不確定な要素があるなか、重力波検出器で使用することができるレベルのサファイアミラーを完成することができた。このレベルのサファイアミラーとしてはわれわれの知る限る世界最大
- 限られた予算とリソースでなんとかすべてのサファイアミラーを完成できたのは、協力していただいたメーカー・組織によるところが大きい

製作にかかわった企業・組織

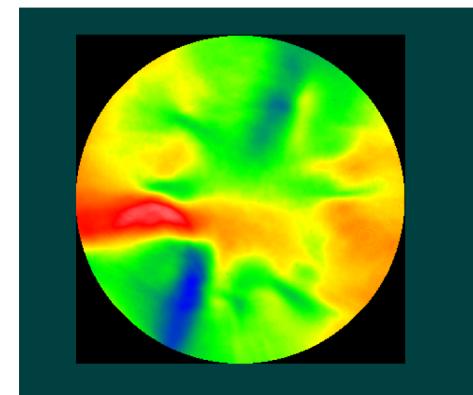
- 株式会社信光社(サファイア結晶、日本)
- GT Crystal Systems(サファイア結晶、アメリカ)
- ZYGO, AMETEK Corporation(研磨、アメリカ)
- Coastline Optics(研磨およびプロトタイプ製作、アメリカ)
- LMA (Laboratoire des Matériaux Avancés) (コーティング、フランス)
- CSIRO(コーティング試作、オーストラリア)
- LIGO laboratory(評価、シミュレーション、R&D全般、アメリカ)
- 東京大学物性研究所工作室(ミラーハンドリング用パーツ製作、柏)

今後の課題と予定

- ・重力波の一日も早い観測
- ・サファイアミラーの成立性を示したことは低温運転を検討している海外の第3世代重力波検出器に対し先導的な役割を果たした。欧洲ET(Einstein Telescope)などではサファイアとシリコンふたつが候補材料で、今後のサファイア結晶開発は重力波天文学発展に大きく貢献する可能性がある
- ・感度上昇のため大型結晶が必要
- ・さらなる低吸収・屈折率一様性
- ・さらなるコーティング一様性
- ・基礎的な研究が不可欠
- ・国内結晶メーカーと共同研究の開始した



KAGRAホームページより
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/researcher/parameter>



ITMY屈折率非一様性(補正後)

まとめ

- LIGOによるGW150914以来のいくつかの重力波観測後、GW170817ではVIRGOも加わり、さらに世界中の電波望遠鏡も同じイベントを観測したことで重力波の存在はゆるぎないものになつただけでなく、重力波天文学がはじまつた
- KAGRAは世界に先駆けて熱雑音低減のためにテストマスミラーを低温にする低温共振器を採用したkmスケールの干渉型重力波望遠鏡で、その基材はサファイアである
- サファイアミラー製作においては、要求値を満たす結晶育成、研磨加工、コーティングと困難があつたが完成した。測定値とそれをつかった計算から予想される共振器内での一往復での損失は50ppm(要求値100ppmはクリア)であり、ミラーの発熱も最大入射レーザーパワーを仮定しても0.5W程度でミラーを20Kに冷却できる見込みである
- われわれの知る限り、重力波望遠鏡で使用できる仕様をもつたサファイアミラー製作はこれが世界初、サイズも世界最大である。低温ミラーを検討している世界の第三世代重力波望遠鏡に対して先駆的成果を与えた
- 将来の感度上昇を見据えると課題は残されており、基礎的な研究をふくむR&Dを進め重力波天文学の発展に大きく貢献したいと考えている