

2018年8月21日
東京大学宇宙線研究所

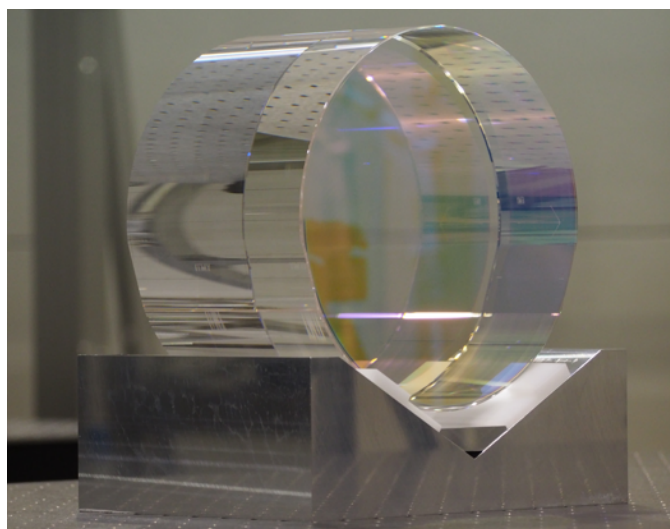
KAGRA のサファイア鏡プレス公開 参考資料

本資料、および追加の資料、写真等を以下の URL よりダウンロードできます。
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/archives/2655> （パスワード: kagra-mirror）



【概要】

東京大学宇宙線研究所を中心として、国立天文台、高エネルギー加速器研究機構などが共同で推進し、岐阜県飛騨市の地下に建設中の重力波望遠鏡 KAGRA（かぐら）の最重要構成要素のひとつ、サファイア鏡（ミラー）4基すべてが完成しました。日本国内製サファイア単結晶で製作した2基のうち、最後の1基を本日、東京大学柏キャンパスでプレスの皆様に公開します。



KAGRA 用サファイア鏡のプレス公開

- <日時> 2018年8月21日（火）10:00~12:30 頃（9:30 受付開始）
- <場所> 東京大学宇宙線研究所 6階大会議室
柏キャンパス・千葉県柏市柏の葉5-1-5,
つくばエクスプレス柏の葉キャンパス駅よりバスまたはタクシー約10分
- <内容> 10:00~11:00 KAGRA とサファイア鏡製作についての説明（6階大会議室）
11:00~12:00 サファイア鏡公開（地下1階 クリーンルーム）
12:00~12:30 ぶら下がり取材対応（6階大会議室）
- <対応者> 廣瀬 榮一（東京大学宇宙線研究所 特任助教）
大橋 正健（東京大学宇宙線研究所 教授・重力波観測研究施設長）

【サファイア鏡撮影時の注意点】

- ・ 6階大会議室より、2グループに分かれて地下1階実験室へご案内します。
- ・ 撮影時間は、準備・撮影・交代を含めて1社あたり5分以内をお願いします。
- ・ 撮影場所が狭いので、撮影時の人数は1社あたり2人以内（テレビカメラの場合は3人以内）をお願いします。
- ・ サファイア鏡は埃を極度に嫌います。撮影時はクリーンルームに入らず、係員の指示した撮影範囲内での撮影にご協力をお願いします。

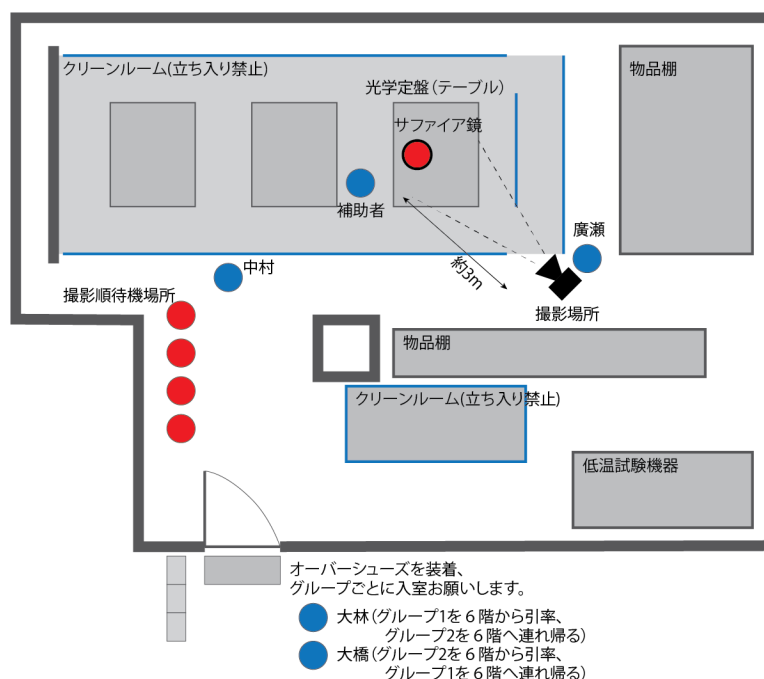


図 1：地下1階クリーンルーム撮影時のレイアウト

係員の指示に従い、オーバーシューズを着用の上入室をお願いします。

【重力波について】

重力波とは、ブラックホール連星や中性子連星が合体するときなどに発生する「時空のひずみ」が波として宇宙空間をつたわるもので、1916年にアルバート・アインシュタインが一般相対性理論からその存在を予言しました。それから約100年経った2015年、アメリカにあるLIGOの2台の重力波望遠鏡が13億光年離れたところにあるふたつのブラックホールが合体した時に発生した重力波を世界で初めて直接観測し、その存在が証明されました。その後、いくつかの重力波観測に成功し、ヨーロッパのVirgo観測所も加わり、重力波で宇宙を観測する重力波天文学が幕を開けました。日本のKAGRAもこのネットワークに加わることでより正確な重力波観測をおこなうことが期待されており、現在急ピッチで観測に向けた準備がすすんでいます。

【重力波望遠鏡】

重力波望遠鏡は、重力波による時空のひずみを観測する装置で、1メートルあたり 10^{-20} (10のマイナス20乗)メートルという、水素原子の大きさ (約 10^{-10} メートル) と比べて10桁も小さなひずみの観測をおこないます。そのためにレーザー光をビームスプリッターという鏡でL字の2本の腕の方向に分け、それぞれの先端に配置した鏡で反射させて戻ってきた光のわずかな位相差 (到達時間の違い) を測定するいわゆるマイケルソン干渉計で重力波を観測します。

【なぜサファイアの鏡を使うのか】

この時、鏡の分子の熱運動も観測のノイズになるので、KAGRAでは鏡を冷却し分子運動によるノイズを小さくします。そこで、冷やすことでうまく熱運動を抑えることができ、熱伝導もよい (つまり冷やししやすい) サファイアの単結晶を鏡の材質として選びました。KAGRAの観測時、サファイアの熱がもっとも伝わりやすい20ケルビン (およそマイナス253℃) で運転します。

この鏡を冷却するという技術は現在常温で運転しているLIGOなどでも将来の感度向上のために導入が検討されている技術のひとつで、日本のKAGRAはその先進的なアイデアをいち早く取り入れているといえます。

【サファイア鏡について】

今回完成したKAGRA用のサファイア鏡は直径22cm、厚さ15cm、重さ23kgで、高性能サファイアミラーとしては世界最大です。L字型に伸びる2本の長さ3kmの腕それぞれの先端と根元でレーザー光を何百回も折り返す「光共振器」として使うため、サファイア鏡は合計4基必要で、今回で全ての鏡がそろえることになります。

【光共振器を用いて感度をあげる】

重力波による空間のひずみは腕の長さに比例します。つまり、できるだけ長い距離をつかって測定すると小さなひずみまで検出できるようになります。そのために世界の重力波望遠鏡は

3~4km という長い腕を持つのですが、 10^{-20} メートルという小さなひずみの検出のためには1往復では足りないため、それぞれの腕の先端と根元に鏡を向かい合わせに置き、合わせ鏡の要領でレーザー光を何百回も往復させて（KAGRA の場合約 1000 回）実効的な距離を稼ぎます。この仕組みを光共振器と呼びます。

感度を高めるには共振器の中に光を効率よくため込む必要があります。KAGRA の場合、光が共振器の中を一往復する間に失うレーザーパワーを 100ppm (1/10000) 以内に抑えることを目標としています。ところが、往復する間に光が共振器の外に漏れたり鏡に吸収されたりするのでこれは簡単ではありません。例えば、レーザー光が真空ダクト内を伝搬する間に径が広がるのを防ぐため、鏡の表面をわずかに凹面にして光を集めるようにしています。また、凹面部分が完全な球面ではなくわずかでも誤差があると共振器の外に光が逃げて行ってしまうため、鏡を研磨するときに極力この誤差を小さくし、反射膜コーティングの膜厚が一様になるような非常に厳しい要求値で製作しています。KAGRA で用いるサファイアで鏡を作る場合、この厳しい要求値を大きなサイズで実現できるかどうかは前例がなくやってみるまでわかりませんでした。

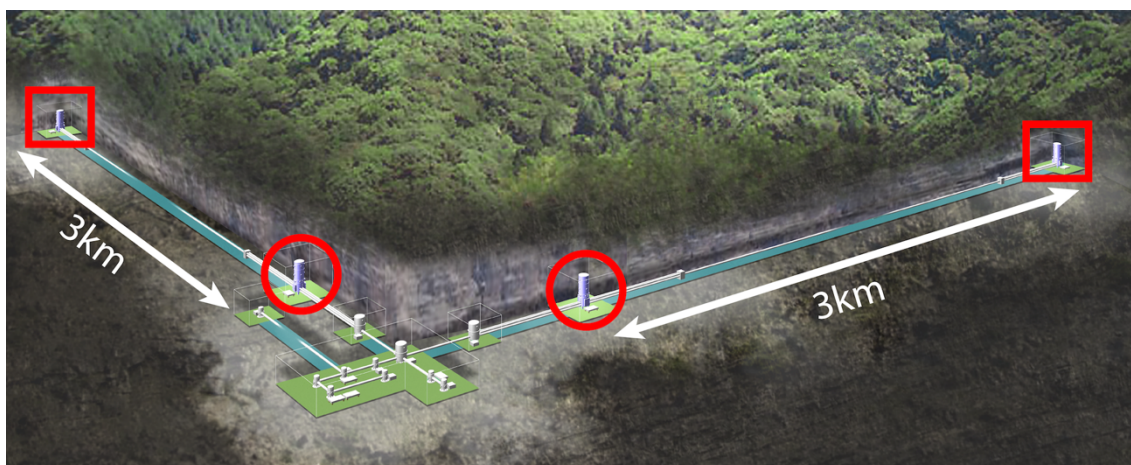


図 2：サファイア鏡の設置場所。米国製結晶を用いたエンドミラーは□で示した低温容器内に、日本製結晶を用いたインプットミラーは○で示した低温容器内に設置する。

【国内結晶メーカーと共同で新たな課題を克服】

KAGRA の 4 基のサファイア鏡のうち、腕の先端に設置したはじめの 2 基の鏡(エンドミラー)はレーザー光の反射のみを考えればよく、米国製のサファイア結晶から製作した鏡が要求性能を満たしました。一方、手前に設置する 2 基の鏡(インプットミラー)は入射するレーザー光や光検出器へと導くレーザー光がサファイア結晶中を通過します。このとき結晶中の屈折率が一定でないとレーザー光がゆらぎ、感度低下の一因となってしまいます。また、結晶中の屈折率が変化する部分では、光の吸収も大きいことがわかりました。一般にサファイア結晶は LIGO などでも用いられている合成石英と比べて屈折率の非一様性がひと桁ほど大きく、屈折率なるべく一様で低吸収の結晶を開発することが 3、4 基目のサファイア鏡の成功の鍵となっていました。東京大学宇宙線研究所の廣瀬榮一特任助教の率いる KAGRA の鏡チームは日本国内の結晶

メーカーと試行錯誤しながらなんとか要求値を満たすサファイア結晶を製作することに成功しました。さらに、わずかに残った屈折率の非一様性の影響を抑えるために鏡の厚さを場所によって変更を加えることで補正し、十分な性能のインプットミラーが完成しました。

【今後の見通し】

今回完成したサファイア鏡を今秋 KAGRA の低温真空容器内に設置し、2019 年内に最終構成での観測を開始できるよう調整を続けます。その先を見据え、鏡チームはサファイア鏡をさらに大型化することで低周波数域（100Hz 以下）での感度を飛躍的に上昇することを検討しています。そのために、この春から前述の結晶メーカーと東京大学宇宙線研究所の間で 100 kg クラスのサファイア結晶開発を目指した共同研究契約を結び、KAGRA のインプットミラー用結晶開発で得た経験とノウハウをベースにした研究開発を開始しました。

【補足】

KAGRA 用サファイア鏡製作にかかわっている協力団体

- ・ 株式会社信光社（インプットミラー用低吸収結晶、日本）
- ・ GT クリスタルシステムズ（エンドミラー用結晶、アメリカ）
- ・ AMETEK, ZYGO Extreme Precision Optics（研磨、アメリカ）
- ・ LMA（コーティング、フランス）
- ・ Coastline Optics（スベアエンドミラー製作、インプットミラー研磨の一部、アメリカ）
- ・ CSIRO（サファイアミラープロトタイプ製作、オーストラリア）
- ・ Caltech, the LIGO laboratory（サファイアミラー評価、アメリカ）
- ・ 東京大学物性研究所工作室（サファイアミラー用ハンドリング治具製作、日本）

【本件に関するお問い合わせ先】

〈大型低温重力波望遠鏡 KAGRA に関すること〉

東京大学宇宙線研究所 KAGRA 広報 大林

TEL: 04-7136-5188 (平日 9 時～17 時)

Email: kagra-pub@icrr.u-tokyo.ac.jp

〈東京大学宇宙線研究所に関すること〉

東京大学宇宙線研究所 広報担当 中村

TEL: 04-7136-5148 (平日 10 時～17 時)

Email: icrr-pr@icrr.u-tokyo.ac.jp