

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2019年12月号



第3回 Moon Village Association 国際シンポジウム 京都セッション「宇宙教育とアウトリーチ活動」

Moon Village Association (MVA) は、2019年12月5日～8日に京都大学宇宙総合学研究ユニット・東京理科大学宇宙コロニーセンター・慶応義塾大学がホストとなり、東京と京都で国際ワークショップ／シンポジウムを開催します。MVAは2017年に設立されたNGO団体で、月面での人類の活動を盛り上げていくことを目指している団体です。京都では、京都大学北部総合教育研究棟で12月8日に一般公開シンポジウムを行います。京都でのシンポジウムのテーマは「宇宙教育とアウトリーチ活動」です。MVAの活動内容や宇宙分野の教育活動について知ることのできる良い機会ですので、是非、多くの方に京都セッションへご参加いただければと思います。

日時：2019年12月8日(日) 9:00-17:30

会場：京都大学 北部総合教育研究棟 1階 益川ホール

参加費：無料

第6回宇宙建築賞参加報告

星之内菜生（工学部 B4） 小原輝久（工学部 B4） 太田裕一郎（工学部 B4） 増田凱斗（農学部 B4）
許大星（農学部 B3） 岩見歩昂（工学部 B3）

2019年11月初旬から宇宙農場施設というテーマのもと、第6回宇宙建築賞コンペティションに取り組んでおりました。幸いなことに同月24日東海大学で行われた公開審査会にて、私たちの作品“*Our Eco*”が入賞しましたので、作品について簡単な紹介と所感について記させていただきます。

本農場施設の建築目的は、食や自然のもたらすヒーリング効果から、宇宙で働く人の生活環境を向上させることです。そこで、アクアポニックスという水耕栽培と水産養殖を組み合わせた循環型システムを提案しました。このアクアポニックスでは、水槽内にアユなどの食用淡水魚を飼い、そこから生じる排泄物などの有機物を栄養分として植物に供給します。それにより、水槽内で過剰に有機物が溜まることなく、清潔に保たれます。また、施設の骨組みに竹を使用し、強度と伸縮性に優れた（宇宙服のような）膜で骨組みを覆います。こうして竹が成長していくにつれて、膜が上に伸長していき、農場が自然の力で完成します。この自動施工性により、農場施設建設における人的・物的コストを下げるすることができます。

今回、このメンバーで1つの作品を最後まで仕上げる過程は、非常に有意義なものになりました。6人それぞれ専門が異なるため、話し合いのたびに多種多様な意見が出ました。多角的な意見をまとめるため、専門外の書籍を読み漁ることも度々あり、その過程でお互いの分野に対する理解も深まりました。また今回のメンバーは、2年前の第一回有人宇宙実習(ILAS)で5泊6日、苦楽をともにした面々でし

た。実習以降もしばしば交流があり、その度に刺激をもらっていました。今は皆が別の研究室で研究に没頭しているため忙しく、このコンペが第 1 期実習メンバーで 1 つの課題に取り組む最後の機会なのかなと思うと、感慨深いものがあります。このようなお互いにとって刺激になり、高めあえる仲間たちに出会えたことはとても幸運なことだと改めて感じるとともに、その機会をくださった土井先生をはじめとする宇宙ユニットの先生方に感謝しています。（許大星 記）

「宇宙+アート」の可能性を探るシンポジウム 開催報告

2019 年 11 月 22 日「宇宙+アート」の可能性を探るシンポジウム（主催：総合生存学館アートイノベーション産学共同講座、後援：宇宙ユニット）が、本部キャンパス総合研究 17 号館で開催されました。全人類の知恵をもって宇宙に挑むためには、アートな考えが必要であり、また、アートは芸術家だけのものではなく私たち一人一人が新しい価値を創造する生き方の姿勢であると土佐尚子教授からのメッセージがありました。多くの学生が、宇宙分野に取り組む企業の方々や講師たちと意見交換を行いました。「それぞれの立場から宇宙とアートを結び付けるものは何か？」を考える貴重な機会となりました。（辻廣智子 記）



大学院分野横断型講義「有人宇宙学」のご案内

大学院生・学部生(聴講可)を対象として、大学院分野横断型講義「有人宇宙学」を水曜日 5 限（16:30～18:00）に総合生存学館大講義室（2F）にて開講します。本講義では、人類が宇宙における持続可能な社会基盤を構築するために何が必要なのか、自然科学的・人文社会科学的に解説します。理工系ばかりでなく人文社会系学生が、宇宙における持続的社会的構築という命題の中に、自分の研究分野との接点を見つけ、自分の研究の新たな意義と新しい方向性を見出すことをめざします。今後の講義予定は以下のとおり。

【第 10 回】 12 月 11 日 宇宙法（青木節子）

【第 11 回】 12 月 18 日 宇宙人類学（岡田浩樹）

【第 12 回】 12 月 25 日 有人宇宙学演習 2（土井隆雄）

【第 13 回】 2020 年 1 月 8 日 有人宇宙学演習 3（土井隆雄）

大学院分野横断型講義「宇宙学」のご案内

大学院生・学部生(聴講可)を対象として、大学院分野横断型講義「宇宙学」を木曜日 1 限 (8:45~10:15) (12月20日のみ)金曜日 5 限(16:30~18:00))に総合生存学館大講義室 (2F)にて開講します。本講義では自然科学が明らかにしてきた宇宙の歴史と現在の姿、そして人類生存圏の拡大の営みとしての宇宙開発の現状とそこから生じつつある人文社会学的な問題群を概説し、人類の生存に関わるようなリスクにどう向き合ったよいかについて議論を行います。今後の講義予定は以下のとおり。

【第9回】12月12日 宇宙医学(寺田)

【第10回】12月20日(5限) 人類の生存を脅かす宇宙規模災害 Disasters from space : スーパーフレア(柴田先生) ※通常の講義(12/19 木 1 限)は行わない

【第11回】12月26日 宇宙開発利用の現状と将来 Space development and utilization (磯部)

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	場所
12月8日 (日) 9:00~17:30	第3回 Moon Village Association 国際シンポジウム 京都セッション プログラムの詳細については HP (https://www.ussp.kyoto-u.ac.jp/mva2019.html) をご覧ください。	京都大学北部構内 北部総合教育研究 棟1階 益川ホール
12月13日 (金) 15:00~16:30	第9回 宇宙学セミナー タイトル: Cooperation, Competition, and Regulation of Space 宇宙開発における協力、競争と規制とは 講演者: John Horack 博士 (オハイオ州立大学)	理学研究科6号館 402 一般対象
12月20日 (金) 16:30~18:00	第10回 宇宙学セミナー タイトル: 人類の生存を脅かす宇宙規模災害 Disasters from Space : スーパーフレア 講演者: 柴田一成博士 (京都大学)	総合生存学館 大講義室 (2F)
12月24日 (火) 15:00~16:30	第11回 宇宙学セミナー タイトル: Large Capillary Fluidic Phenomena in Space: Giant Drops, Bubbles, Flows, and Their Critical Role in Plumbing aboard Spacecraft 宇宙における巨大毛細管流動現象: 巨大液胞、気泡、流れと宇宙船の配管系におけるそれらの影響 講演者: Mark Weislogel 博士 (ポートランド州立大学)	TBA 一般対象

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.ussp.kyoto-u.ac.jp/seminar.html>) で公開いたします。

重力波検出器 KAGRA での研究参加報告

曾束 元喜

(京都大学工学部物理工学科 3 回生)

皆様初めまして。工学部物理工学科 3 回生の曾束と申します。今年 8 月、私は国立天文台・総合研究大学院大学主催のサマースチューデントプログラム（研究体験プログラム）に参加し、「重力波検出器 KAGRA における Fabry-Perot 共振器の Finesse 測定の自動化」というテーマで約 1 ヶ月間研究体験を行いました。今回は、重力波天文学のこれまでの発展についてや、私が KAGRA での滞在経験を通して学んだことなどについて簡単にご紹介させていただきます。

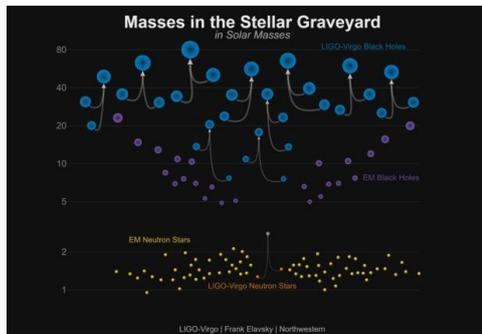
1. 重力波天文学の幕開け

重力波とは、質量を持つ物体の加速度運動により発生する時空の歪みが光速で伝わる伝搬現象です。これは 1916 年にアルベルト・アインシュタインが発表した一般相対性理論から予言される波動で、その存在は 1980 年代に Hulse と Taylor らにより間接的に証明されました。彼らは中性子星連星 PSR1913+16 の軌道を 10 年以上観測することによって、その距離が重力波の放出によって徐々に小さくなっていくことを発見しました。彼らのこの業績は高く評価され、1993 年度のノーベル物理学賞受賞へと繋がりました。

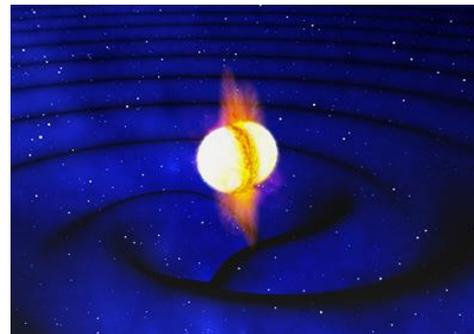
観測できるほどの大きな振幅を持った重力波を発生させるには、高密度で非常に大きな質量の物体が加速度運動を行う必要があります。したがって重力波の発生源としては、例えばコンパクトな連星の衝突合体现象や超新星爆発などといった大規模な天体運動や天体现象が想定されます。とはいえ、地球上で観測できる時空の歪み量は極めて小さく、重力波を観測するには究極的に繊細な検出器が必要になります。現在、主要な重力波検出器として最前線で活躍しているものには、米国・ルイジアナ州及びワシントン州に設置されている LIGO や、フランスやイタリアなどのヨーロッパ諸国が共同で運用する Virgo などが知られており、特に LIGO は 2015 年 9 月に史上初めての重力波の直接検出に成功した観測装置として脚光を浴びました。LIGO 検出器によって観測された重力波は検出の日付にちなんで GW150914 と名付けられ、LIGO による重力波観測への決定的な貢献として、2017 年には米国の 3 名の科学者にノーベル物理学賞が授与されました。このように、重力波観測に関する研究は近年世界中からますます注目されてきており、今後の宇宙物理学・天文学の発展に寄与することが期待されています。

では、重力波を通して様々な天体现象を観測することの意義とは一体何でしょうか。下の図 1（左）は、重力波観測及び X 線観測により見つかったブラックホールの質量分布を示しており、縦軸が太陽質量を、紫色の点の集合が X 線観測によりこれまでに見つかったブラックホールの分布を、そして青色の点の集合が重力波観測により新しく見つかったブラックホールの分布を表しています（横軸は特に意味はありません）。従来、ブラックホール連星の合体を観測するには X 線による観測法が主に用いられてきましたが、それによって見つかったものは太陽質量の約 20 倍程度以下のものがほとんどでした。それに対

し、重力波観測ではより大質量のもの（太陽質量の 30 倍程度以上）が次々と見つかっており、LIGO が初観測した GW150914 も地球から約 13 億光年の彼方で、太陽の 36 倍と 26 倍の質量を持つ 2 つのブラックホールが衝突した時に発生した重力波でした。今後、重力波によるブラックホール観測は、巨大ブラックホール形成の新たなシナリオの可能性を模索する手段として重宝されていくことが期待されます。また、2017 年には中性子星連星の合体による重力波が世界で初めて観測されました。中性子星の合体現象は鉄以上の重い金属元素の起源であるという仮説もありますが、詳しいことはまだよく分かっていません（図 1（右））。



©LIGO, Virgo



©NAOJ

図 1. （左）ブラックホール質量の比較（右）中性子星連星の合体

従来、中性子星観測では電磁波による観測法が主流でしたが、今後重力波による観測が浸透していけば、中性子星の内部構造の把握や他の宇宙観測法では得られなかった新たな知見を得られるようになるでしょう。このように、重力波検出法の確立の最大の意義は、我々が宇宙を見る新しい観測手段を手に入れたということです。人類が宇宙を観測する手段として可視光から始まり、現在では電波、マイクロ波、赤外線、X 線、γ線など、あらゆる電磁波による宇宙の観測がなされています。さらに、宇宙からのニュートリノを検出し、2002 年のノーベル物理学賞を受賞した小柴昌俊名誉教授（東京大学）らは、「ニュートリノ天文学」という新しい分野を築き上げました。そしてこの重力波の検出も、新しい「重力波天文学」を拓く第一歩となり、さらなる宇宙の深淵を目指すきっかけとなっていくでしょう。

2. 重力波検出器 KAGRA

LIGO や Virgo などに続く世界的な超高感度重力波検出器として、日本で 2010 年から建設が進められてきた検出器が「大型低温重力波望遠鏡 KAGRA」です。KAGRA は、東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構、自然科学研究機構 国立天文台を共同ホスト機関とした協力体制の下、富山大学などの国内外の研究機関・大学の研究者との共同で進められてきたプロジェクトです。岐阜県飛騨市神岡町に建設が進められてきた KAGRA ですが、2019 年 10 月 4 日、正式に完成したことが報道され、LIGO、Virgo との研究協定を締結したことが発表されました。これら主要な 3 者の重力波検出器で同時観測を行うことによって、重力波を発生させた天体をより正確に特定することができるようになると言われており、2019 年度内には重力波の観測運転を開始し、LIGO、Virgo との共同観測を始める予定です。KAGRA をはじめとした重力波検出器では、レーザー干渉計によって時空の歪みを測定します。先ほども述べたように、地球上で観測できる重力波による時空の歪みは極めて小さく、

LIGO によって観測された GW150914 の場合では、地球と太陽までの距離が水素原子 1 個分だけ変化する程度の歪みだったと言います。このような微細な歪みを観測するためにはレーザー干渉計の精度を極限にまで高める必要があります、そのためには高出力のレーザー光源、大口径・超低損失ミラー、超高真空装置などの様々な最先端技術が要求されます。その中でも特に KAGRA には以下に示すような大きな特徴があります。



図 2. KAGRA 坑内の様子

©ICRR

(1) 3km の基線長を持つ検出器

KAGRA では、レーザー干渉計の互いに直交する 2 本の腕の基線長はそれぞれ 3km もあります。レーザー干渉計は一般的に腕を長くするほど重力波に対する感度が向上しますが、LIGO や Virgo に匹敵する基線長を持った KAGRA は、国際的な競争力を持つ検出器としてその地位を確立していると言えます。

(2) 検出器を鉱山内部に建設

重力波の検出に使用する鏡を揺らし、検出精度を低下させてしまう原因の一つとして地面振動があります。そこで KAGRA では、検出器を岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下内に建設することで地面振動を低減することを目指しました。その結果、地表に建設されている他の重力波検出器と比較して地面振動によるノイズを約 100 分の 1 程度にまで軽減することに成功しました。

(3) 検出器の鏡をマイナス 250 度 (20K) まで冷却

鏡を揺らしてしまうもう 1 つの原因として、鏡そのものの熱雑音が挙げられます。鏡を構成する分子の熱運動は鏡が高温であればあるほど激しくなります。KAGRA の共振器では、鏡をできるだけ冷却することで構成分子の振動による鏡の揺れを低減しています。

(4) 鏡の材質にサファイアを使用

サファイアは光学特性に優れているのみならず、低音に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなるなどの長所があるため KAGRA の鏡の材質として最適であると言えます。

以下の図 3 に KAGRA サイトの全体図を示します。神通川流域に沿ってそびえ立つ神岡鉱山内に KAGRA は建設され、その入口近くには宇宙素粒子観測装置スーパーカミオカンデも併設されています。KAGRA 検出器から少し離れたところにある地上のコントロール室から、信号やコマンドを送信し各種機器を制御することができます。

KAGRAサイトの全体図

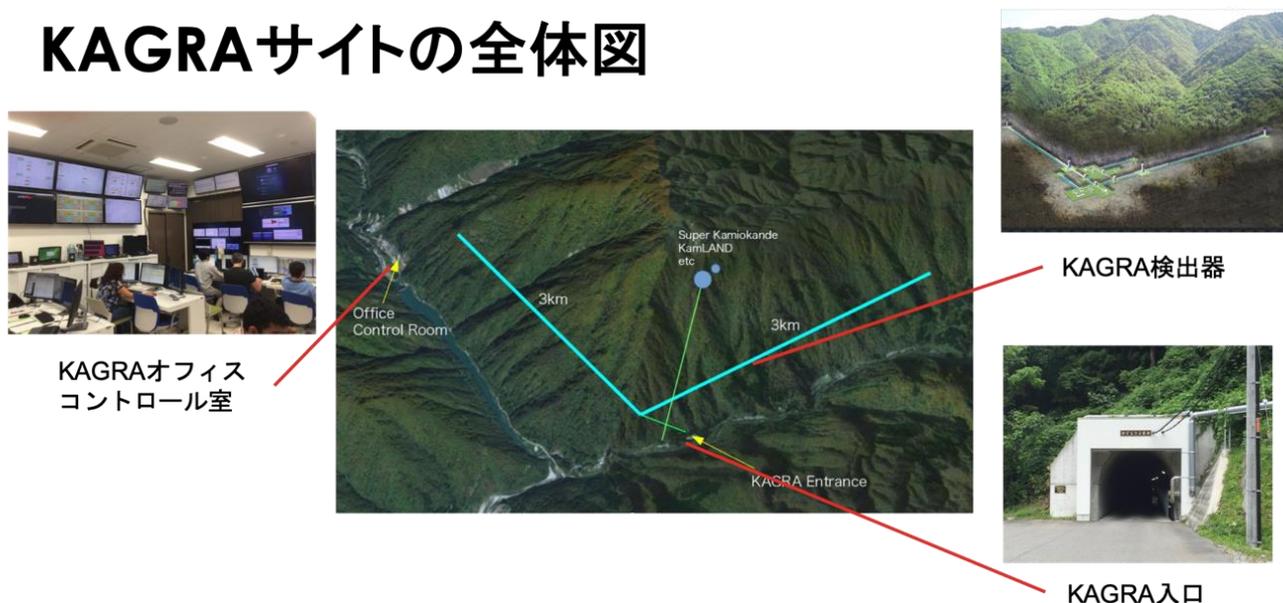


図 3. KAGRA サイトの全体図

3. 干渉計による重力波検出の仕組み

重力波の検出実験は、1960 年代に Weber らの研究チームが共鳴型検出器を用いてその検出を試みたことから始まりましたが、現在ではレーザー干渉計型検出器が主流となっています。重力波には自由質点（重力以外に力を受けていない質点）間の固有距離を変化させるという性質があります。そこで、レーザー干渉計型検出器ではレーザーを使って鏡と鏡の間の固有距離を測定します。この時鏡は自由質量と同等に振る舞う必要があるため、特殊なワイヤーを用いた振子型防振装置によって吊るされています。

KAGRA を構成するレーザー干渉計の概観を図 4 に示します（実際は観測精度を向上させるためこれら以外にも様々な種類の鏡が設置されていますが、ここでは簡略化して描いています）。レーザー干渉計型重力波検出器の基本となるのは Fabry-Perot Michelson 干渉計と呼ばれるものです。Michelson 干渉計では、レーザーを Beam Splitter によって直交する 2 方向に分け、再び Beam Splitter に戻ってきた光を再結合させることができ、その干渉後の光の強度を Photo Detector で測定します。また、レーザー干渉計の腕を構成する部分は Fabry-Perot 共振器と呼ばれており、2 枚の鏡の間で光が多重干渉することで実効的な基線長を延長し、重力波検出の精度を向上させています。この干渉計に重力波が到来すると時空が歪み一方の腕の光路長が伸び、もう一方が縮むため、Beam Splitter 上で光に位相差が生まれ干渉状態が変化します。そして、Photo Detector に入る光の強度変化をモニターすることで重力波の信号として検出することができるのです。

重力波検出では Fabry-Perot 共振器内で多重反射して戻ってきた光の位相の変化が重要になるため、共振器を共振状態に保つ必要があります。すなわち、共振器内に入ってきたレーザー光の往復光路長が波長の整数倍になり、定在波が発生している必要があるのです。この Fabry-Perot 共振器の共振の鋭さを表す物理パラメーターは Finesse と呼ばれ、共振器における光路の平均折り返し数と比例関係にあることが知られています。

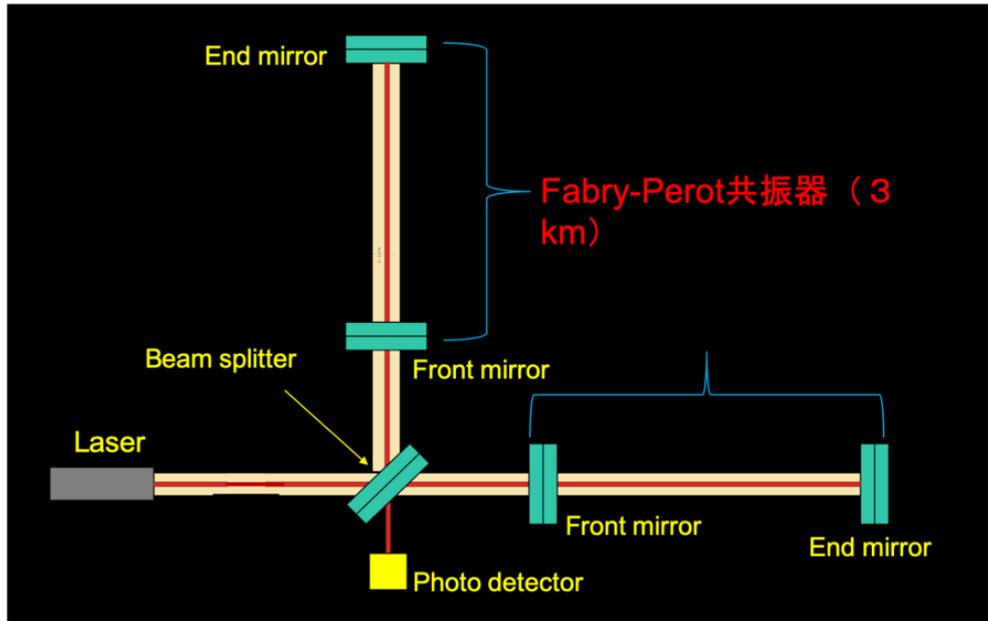


図 4. KAGRA におけるレーザー干渉計の概観

4. KAGRA の低温反射鏡への分子吸着の影響と Finesse の測定方法

上で、KAGRA の共振器内の反射鏡は熱雑音低減のため 20K まで冷却されているということを紹介しました。ところが鏡をこのように超低温にまで冷却すると、鏡の近傍に存在していた残留ガス分子が鏡に吸着し、いわゆる「くもり」が発生した状態になるということが KAGRA 建設の過程で明らかになりました。共振器内の鏡は真空容器内に保存されており、周囲にはごくわずかなガス分子しか存在していないにも関わらずこのような問題が発生してしまうメカニズムはよく分かっておらず、KAGRA では分子吸着が起こる度に鏡を一旦昇温するなどして分子を飛ばすことで対策をしています。残留ガス分子が吸着すると、鏡の反射率が低下しレーザー光のロスが増加するため、レーザー光子の平均往復回数も減少します。したがって Fabry-Perot 共振器の Finesse も低下し、共振性能の低下を招くこととなります。そこで KAGRA では、分子吸着による共振性能低下にいち早く気づき対策を講じるため、継続的な Finesse の計測が不可欠です。

共振器の Finesse の測定にはキャビティリングダウンと呼ばれる計測方法が用いられます。その大まかな流れを図 5 に示します。共振器が共振している状態では外部から供給される光子数と共振器内から失われていく光子数が釣り合っているため共振器内の光子数は一定であり、共振器後方から漏れ出す透過光の強度も一定になります (I)。ここで、共振時に入射光を遮断 (シャッターオフ) すると (II)、共振器内部への光子の供給が絶たれるため光子数は徐々に

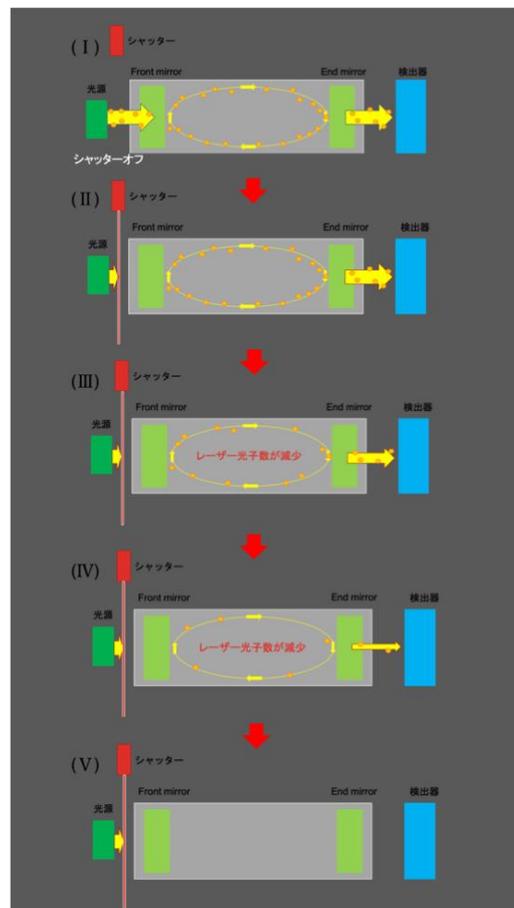


図 5. キャビティリングダウン法

減少していき、透過光の強度も低下していきます（Ⅲ,Ⅳ）。やがて共振器内部の光子数が 0 になると、漏れ出す透過光の強度も 0 になります（Ⅴ）。共振器後方に設置された検出器で検出されるレーザー透過光の強度は指数関数的に減少することが知られており、その変化を数式で表現した場合の時定数 τ は光子寿命と呼ばれます（図 6）。そして、光子寿命 τ と Finesse の間には対応関係があることが分かっており、 τ の値を計測することで Finesse を算出することができます。

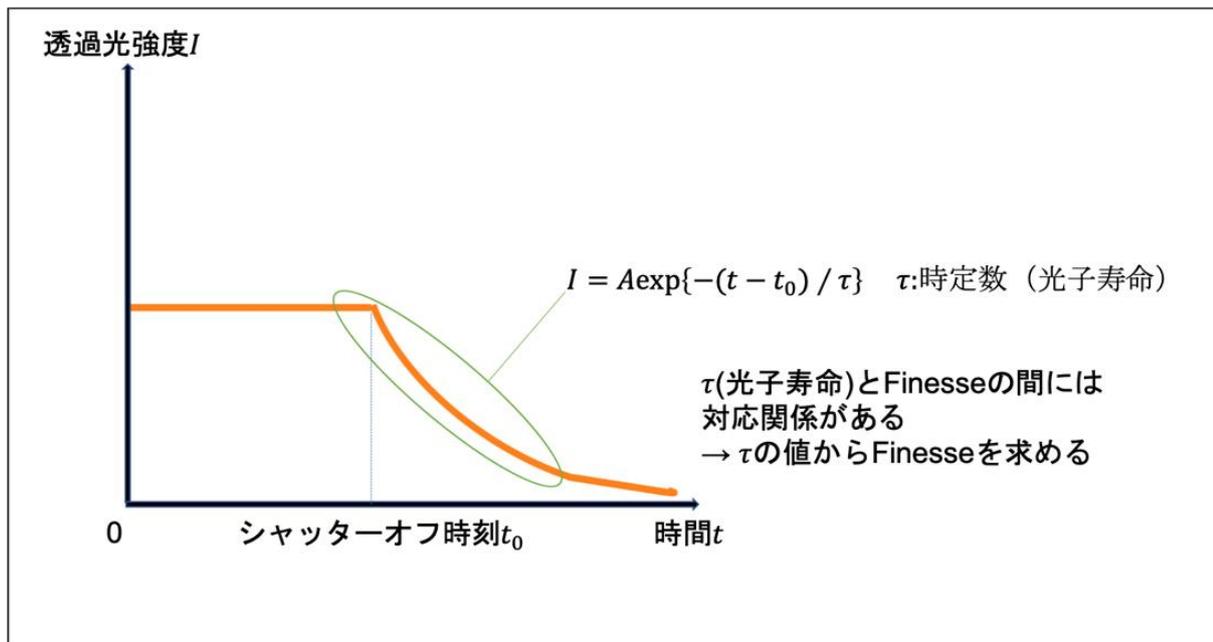


図 6. レーザー透過光強度の時間変化と Finesse の関係

しかし、この Finesse の測定のプロセスは、全て手動で行うには少々手間のかかる作業であるため、KAGRA ではより効率的に Finesse 測定を行えるようにすることが求められていました。そこで私はこの Finesse 測定のプロセスのうち、Fabry-Perot 共振器を共振させる作業（これをロックと言います）のみ手動で行うこととし、それ以降は python によるプログラミングにより自動的に実行できるようにすることで作業の効率化を目指すことを目的に、数週間の研究を行いました。

5. Fabry-Perot 共振器の Finesse 測定の自動化

共振器の Finesse 測定の自動化のプロセスを図 7 に示します。まず共振器を手動でロック後、KAGRA のコントロール室から共振器のシャッターを閉じるように信号を送ります（①）。信号を受けた検出器は実際にシャッターオフを行い、その時の透過光強度の時間変化のデータは KAGRA 坑内のデータストレージへと保存されます（②）。KAGRA のストレージに保存されたデータは GPS 時間を用いて管理されており、シャッターオフを行った時間から数秒後までのデータがまとめてコントロール室の PC へと転送されます。このデータを読み込み解析に必要な部分のみを切り取りプロットし、その上から非線形関数をフィッティングすることで光子寿命 τ および Finesse を算出します（③）。この過程を自動的に実行することができるプログラムスクリプトを python で開発しました。なお、KAGRA の Fabry-Perot 共振器における理想的な Finesse の値はおよそ 1,400 程度です。

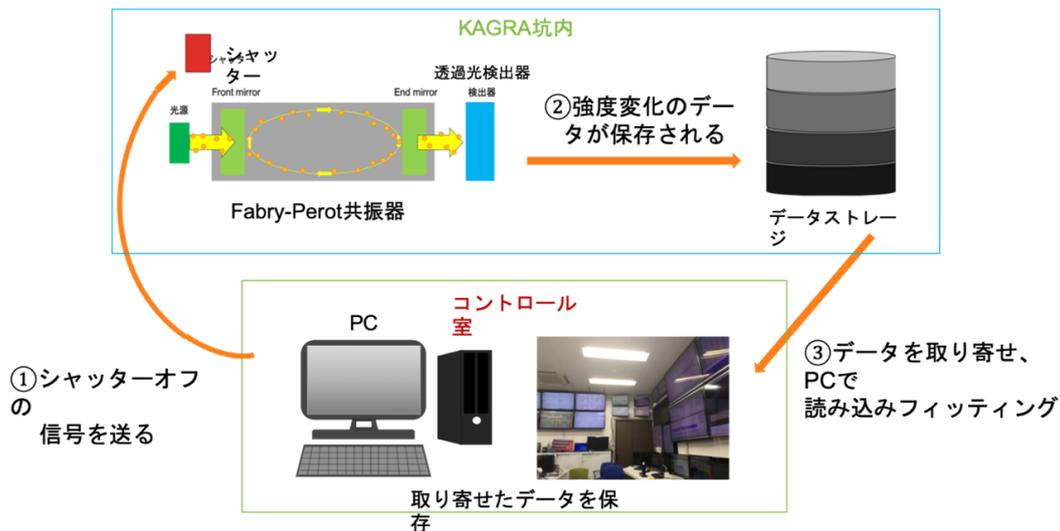


図 7. Finesse 測定の自動化のプロセス

以下の図 8 に実際に得られたフィッティング結果を示します。横軸は時間(s)、縦軸は透過光強度を規格化した値を示しています。この図の場合、Finesse の測定値は 1,409 となっており、共振器の共振性能はおおよそ理想的な状態に保たれていることがわかります。なお Finesse の測定過程においては、透過光強度が初期値の 80%以下となった後、十分減少するまで（値が 0.01 となる時間まで）のデータを切り出しフィッティングを行いました。

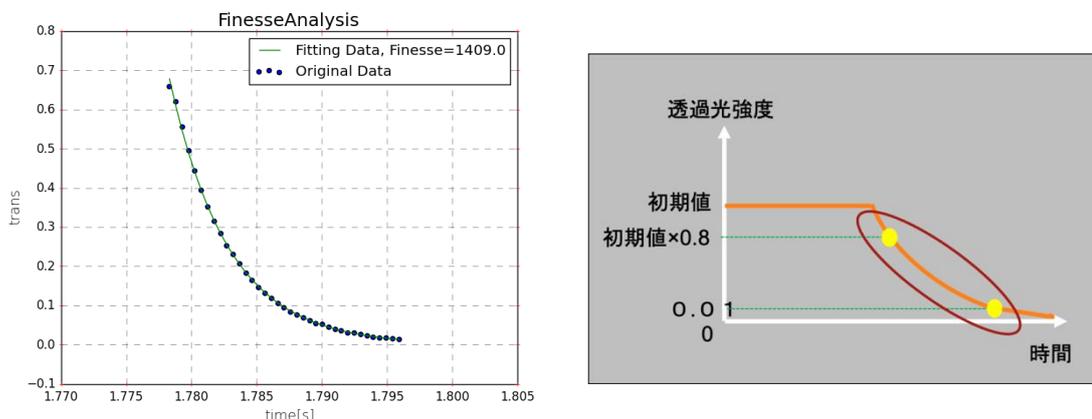


図 8. Finesse 測定のフィッティング結果とその方法

また、データをフィッティングし Finesse を算出する過程を複数回繰り返すことで Finesse の測定値が複数個得られるため、それらから平均値や標準偏差を算出するといった統計的な処理が行えるようにプログラムをアップデートすることを検討しました。そこで、測定回数を任意に決めて入力し、その回数分測定が行われるようにプログラムを実装し、同時に平均値と標準偏差を表示できるようにしました。右の図 9 に実際の解析の様子と結果の算出画面の様子を示します。

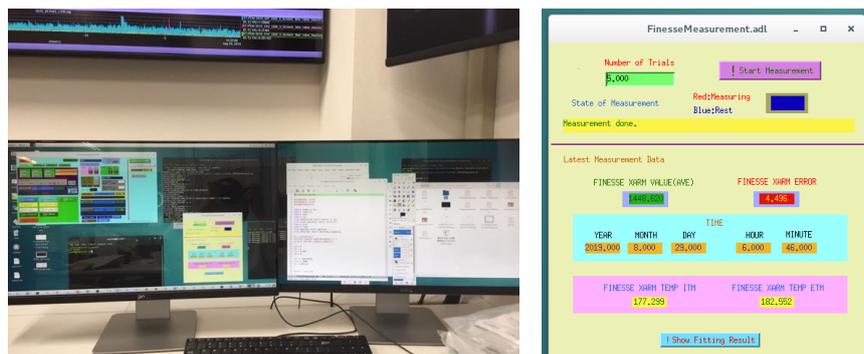


図 9. 実際の解析の様子(左)と結果の算出画面(右)

様子を示します。最終的には、Finesse 測定値の平均値と標準偏差のほか、UTC での計測時刻や測定時の鏡の温度がまとめて表示されるようにまで研究を進めることができました。

6. 終わりに

KAGRA 滞在中は上記の Finesse 測定の自動化の研究に加えて、KAGRA 坑内の見学を行ったり、富山大学で開催された KAGRA Face to Face Meeting に参加したりもしました。実際に KAGRA のトンネル内に入坑し様々な観測機器をこの目で見ることは、非常に貴重な経験だったと思います。また、Face to Face Meeting では、KAGRA 建設に関わる様々な人々のお話を耳にすることができました。今後、KAGRA による重力波観測が活発化し、日本の重力波研究がますます飛躍することを楽しみにしています。

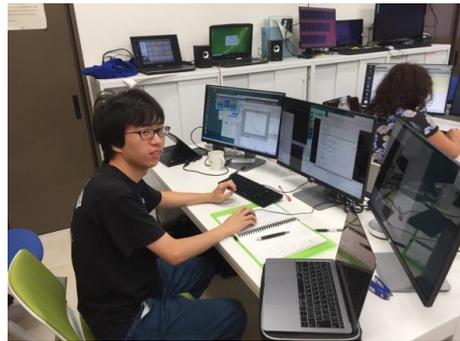


図 10. KAGRA コントロールルームにて(上、左下)、KAGRA オフィスの外観(右下)

This work was partially supported by Summer Student Program (2019) National Astronomical Observatory of Japan and the Department of Astronomical Science, SOKENDAI (the Graduate University for Advanced Studies).
本研究は 2019 年度国立天文台・総研大天文科学専攻サマースチューデントプログラムの援助を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 安東正樹：「Fabry-Perot 型レーザー干渉計重力波検出器の制御」、東京大学理学系研究科物理学専攻 46035、1996 年 1 月
- [2] 麻生洋一：「補助干渉計による Fabry-Perot 干渉計の安定化」、東京大学理学系研究科物理学専攻 06040、2002 年 1 月
- [3] 自然科学研究機構 国立天文台ニュース、2018 年 2 月 1 日 No.295
- [4] 国立天文台 重力波プロジェクト推進室ホームページ <https://gwpo.nao.ac.jp>

京都大学 宇宙総合学研究ユニット
<http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：伊藤梓

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp