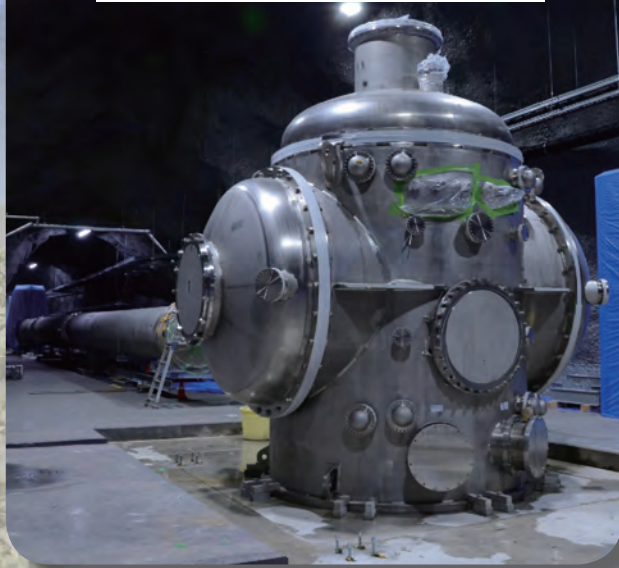


KAGRA に設置されたクライオスタット



↓ KAGRA では、鏡の基材として、直径 22 センチメートルの単結晶サファイアを利用します。徹底的に内部の不純物を取り除いているため、宝石の青いサファイアと異なり無色透明です。内部を通過するレーザー光線の損失も非常に少なく、かつ、サファイアの熱伝導率は、金属のアルミニウムや銅程度に高いため、冷やす素材として最適です。 基材は研磨・コーティングされて鏡になります。

KAGRA で使用されるサファイア基材



KAGRA で高度な技術を発揮している主な企業（略称）
鹿島建設、東芝、興研、三井金属エンジニアリング、富士通、ジェック東理社、ミラプロ、住友重機械工業、ジェイ・エス・ピー、GT クリスタルシステムズ（米）、三菱電機、ZYGO（米）、CSIRO（豪）、Galli & Morelli（伊）、シグマ光機、ジェネシアなど

大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）は、中核機関である東京大学宇宙線研究所と、国立天文台、高エネルギー加速器研究機構とが密に連携しながら、国内外の数多くの研究機関の研究者の協力も得て推進されています。

← KAGRA を特徴づける技術の一つが、レーザー干渉計を構成するサファイアでできた鏡の温度を -253°C まで冷却し、望遠鏡の雑音を低減することです。鏡を冷却するための特殊なクライオスタット真空装置や熱輻射シールドダクト、これらを冷却する超低振動冷凍機の開発が完了し、KAGRA で使用予定の 4 基すべてが、トンネル内の設置予定場所に据え付けられました。

レーザー光学系とクリーンブース



↑ KAGRA では、約 200W で連続出力される強力な赤外線レーザー光源が必要です。そのため、ほんのわずかの粉塵でさえ、光学素子に損傷を与えるため、極めて清浄な環境が必要です。KAGRA では、ISO Class 1 レベルの清浄空気を生成できる空気清浄化フィルターを利用し、レーザー装置専用の防音清浄空間を準備しています。

KAGRA の名前の由来

大型低温重力波望遠鏡（IB LCGT）装置にふさわしい名前をつけたいと考え、2011 年 2 月に公募を行い、小川洋子委員長他 5 名の命名委員会による厳正な審査で、応募総数 666 件の中から「かぐら」を選出しました。「かぐら」は、「神楽」にもなぞらえていますが、神岡「KAMIOKA」の頭文字「KA（か）」と、重力波を表す英語「GRAVITATIONAL WAVE」の頭文字「GRA（ぐら）」を合わせたものにもなっています。



2015 年 4 月 30 日

文責：東京大学宇宙線研究所・重力波推進室
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>
KAGRA 共同研究者リスト：
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/organization>

大型低温重力波望遠鏡

かぐら
KAGRA

重力波（じゅうりょくは）とは？

皆さんは、アインシュタイン博士をご存知ですか？ 20 世紀初めに質量に光の速度を二度かけると、その質量から取り出せるエネルギーとなることを発見し、それは、原子力エネルギーとして我々の生活の一部を支えています。あるいは、相対性理論を提唱し、早く移動する人の時間は止まっている人の時計より遅く進むことも発見しました。この時計の一見奇妙にも見える振る舞いを正しく考慮することは、現在では、カーナビゲーションにおいて高速で地球を周回する人工衛星の電波から自分の位置を計算をする時に必須となっ

ています。このように、とっても難しそうに見える相対性理論も皆さんの身近でしっかり役立っています。重力波（じゅうりょくは）も、アインシュタイン博士の相対性理論から導き出された「波動現象」です。みなさんの生活になじみのある波動現象は、目で見ることのできる可視光線、TV や携帯電話で使う電波、暖房や調理に使う赤外線、レントゲンで使う X 線、そして、海の波でしょう。これらは、受信したり、反射させたり、遮蔽したりすることができます。しかし、重力波はすべての物を貫通し、ひとたび発生すると、そ

の効果を消したり遮蔽することができません。つまり、宇宙がビッグバンで始まった直後から今までに宇宙で放たれた重力波は、138 億年経過した現在も、宇宙中に響きわたっています。しかし、残念ながら、人類史上この重力波の直接検出に成功できた人はいません。もし、このような千里眼のような重力波で世の中を観察したらどんな新しい世界がみえるのだろうか？これが、大型低温重力波望遠鏡計画（愛称：KAGRA（かぐら））の始まりです。

重力波を発生させてみよう

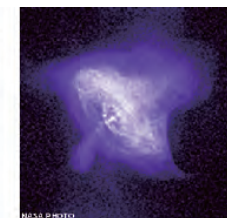
重さを持つ物は、その重力で周りの時空を歪（ゆが）めています。その物体が運動をすると、周りの歪んだ時空が波のように宇宙空間に広がってゆきます。これが重力波です。実は、皆さんが腕をぐるぐる回しても重力波が発生しますが、その重力波の振幅はあまりに小さく、人類の技術では到底検出できません。人類が検出可能な重力波を発生させる物は、星の爆発や宇宙の誕生の様な凄まじい炸裂を伴う天体現象です。

重力波の発生源は？

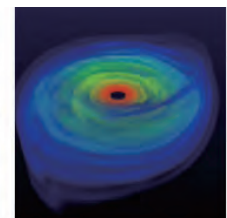
太陽より数倍重たい星が一生を終えて爆発する超新星爆発現象、その爆発の後に誕生しうる半径が 10km しかないのに、太陽と同じくらい重たい中性子星の自転、そんな中性子星同士の合体現象、その後に誕生するブラックホールなどから人類が観測可能な重力波が発生します。宇宙誕生の瞬間のビッグバンでも重力波は発生します。



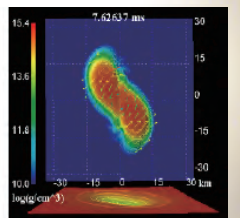
超新星爆発



パルサー



ブラックホール



中性子星の合体

KAGRA

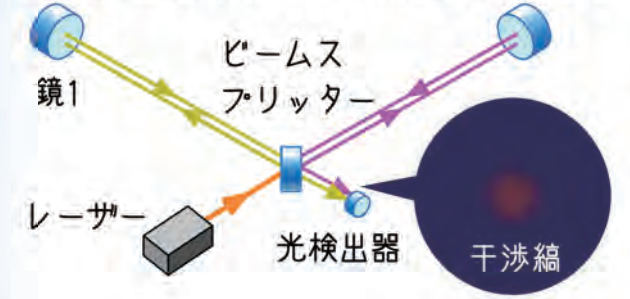
陽子
中間子
崩壊
μ粒子
宇宙線から発生するミューオンという粒子は、光速に近い速度で走るため、相対論により寿命が伸び、地球に届くようになります。

重力波がきたらどうなる？

重力波が来ると、時空が歪み、二地点間の長さが変化します。しかし、先の重力波の源から来る重力波による長さの変化量は、発生源までの距離にもよりますが、だいたい太陽と地球の間の長さ（1.5 億 km）が水素原子一つ分（0.0000000001m）伸び縮みする程度です。この微小な長さの変化を捕える装置が、今、神岡鉱山内で建設中の、「大型低温重力波望遠鏡（KAGRA）」です。この微小な変化をとらえるために、数多くの最先端技術が結集されています。

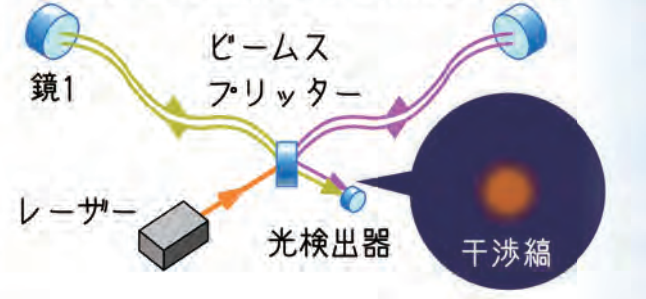
重力波望遠鏡では、普通の光や電波の望遠鏡と異なり、レーザー干渉計というものを利用します（下図）。レー

重力波望遠鏡はレーザー干渉計を使います



ザー干渉計では、一つのレーザー光源からの光を直交する二つに分け、遠くに置いた鏡で反射させて、戻ってきた光の到達時間の差を測ることで、長さの変化を計ります。光は、曲がった空間にそって進む性質があるので、曲がった空間を通過した光は、そうでない光よりも、速く到着したり、遅く到着したりします。その結果、干渉縞が明滅しますのでその明滅から重力波の到来を察知します。現在すでに、0.0000000000000000001メートルの変化まで検出可能ですが、重力波をとらえるために、さらにあと 1/10 のレベルまで性能を上げる努力がなされています。

重力波で空間が歪むと干渉縞が明滅



重力波の観測で何がわかる？

アインシュタインからの最後の宿題である重力波の観測により、一般相対性理論の正しさが証明されます。さらに、重力波により、人類が今まで道具としてきた光やX線のような電磁波では知ることのできない過去の宇宙まで、究極的には宇宙誕生の瞬間まで知ることができるかと期待されています。また、「重力」の本質は、他の物

理の研究対象と比べると著しく理解が進んでいません。重力波の観測は、重力の特性をより詳しく知る助けになるかもしれません。また、重力波望遠鏡のために開発された要素技術は、様々な分野で最先端の技術として応用され、役立っています。



GPS の時計



「速度」と「重力の強さ」の二つの補正が必要です。結果的には地上の時計のほうがゆっくり進むことになります。

実は、相対性理論では、重力が強い場所の時計はよりゆっくり進むことも示されています。よってGPS衛星の時計の補正は、



地上の時計

日本の重力波望遠鏡・KAGRA（かぐら）

2010 年より、岐阜県飛騨市神岡町池の山にある神岡鉱山内において、日本の重力波望遠鏡（KAGRA）の建設が開始されました。山裾地下 200 メートルのところに、一辺 3km の L 字型トンネルを新たに掘削し、その中に設置されます。地下に設置することで、地面振動を大幅

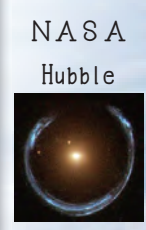
に低減し、かつ、レーザー干渉計を構成する鏡を、 -253°C まで冷却することで、熱雑音を抑え、感度を高め、年数回の重力波イベントの観測により、重力波天文学の創生を目指しています。KAGRA 計画には、225 人に及ぶ国内外の研究者が協力しています。



KAGRA の建設状況



KAGRA に必須のトンネル工事は、2012 年 5 月より、茂住地区から掘削が開始されました。断層の横断や大量湧水の発生などの困難を伴う工事でしたが、施工業者の極めて高度な掘削技術により、世界最高のか月合計 600m 超の掘削速度を達成しながら掘削は進行し、2014 年 3 月にトンネルは完成しました。2014 年度には、電気、換気、照明、クレーン、通信、給排水等の各設備を整えると同時に、並行して、各腕 3km にわたる真空ダクトの敷設と締結を終え、真空漏れのないことも確認しました。さらに、干渉計を構成する多くの鏡を格納する各真空タンク、及びそれを格納するクリーンブースも設置されました。



相対論では、重力による空間の曲りで「重力レンズ」が発生しうる事を予言しますが、実際に、写真のような歪んだ銀河が観測されています。