

KAGRA の建設状況

2015 年度前半までに、KAGRA の基盤的施設整備と真空ダクト、および、真空タンクの設置と締結を終え、KAGRA の第一期実験施設が完成しました。それと並行して、レーザー干渉計重力波望遠鏡に必須の、レーザー光源、レーザー周波数の予備安定化装置、レーザー光誘導鏡、ビームスプリッター、そして、3km の腕の端部用の鏡↑



3km 伸びる Y アームトンネルと真空ダクト

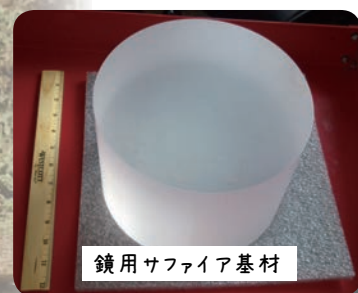
総延長 7700 メートルのトンネルが、1 年 10 か月という短期間で完成しました。大量の湧水を作る困難な工事でしたが、1 か月 359.4 メートルというダイナマイト工法によるトンネル掘削速度の日本新記録が達成されるなど、従事された建設会社の高い技術のたまものといえるでしょう(以前の掘進最速記録は、黒部ダム建設時に記録)。3km の腕部の真空ダクトは、長さ 12m、直径 80cm の真空ダクトを約 250

本締結することで構成されています。鏡を格納する真空タンクも所定の位置に設置され、真空ダクトにも結合され、結果、一つながりの容積としては日本で最大となる高真空の空間が完成しました。



レーザーとスーパークリーンルーム

KAGRA で得られたすべての情報は、坑外のデータ収集解析棟に送信され、モニター画面上で把握が可能です。KAGRA の運転も、この建物からできるようになっています。→



鏡用サファイア基材

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。

の設置、これら鏡を地面振動から防振する装置の導入が完了しました。さらに、レーザー干渉計を望遠鏡として運転するための制御装置、重力波信号や環境信号を取得し蓄積する計算機の準備も行われました。そして 2016 年 3 月中旬には、試験運転を開始する予定です。



データ収集解析棟の制御室

← 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。基材は研磨・コーティングされて鏡になります。



鏡の熱振動を低減するために、鏡を -253 度まで冷却するクライオスタットという装置と、鏡を温める効果のある常温部からの熱輻射を低減するための遮熱↓

ダクトという装置を設置しました。KAGRA では、これらの装置のペアが計 4 セット必要ですが、すべて準備されました。

KAGRA の名前の由来

大型低温重力波望遠鏡 (ID LCGT) 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。

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、SP エンジニアリング、住友重機械工業、JSP、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

文責：東京大学宇宙線研究所・重力波観測研究施設
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp> 2016 年 4 月 1 日
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。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)) を開始した理由です。そして、ついに、2015 年 9 月 14 日、同じ目的をもって建設されてきたアメリカの重力波望遠鏡 LIGO (ライゴ) が人類史上初となる重力波の観測に成功しました！くしくも、相対性理論が発表されてちょうど 100 年目の 2015 年が、重力波と言う新しい観測の「窓」による、重力波天文学のはじまりの年となりました。

重力波を発生させてみよう

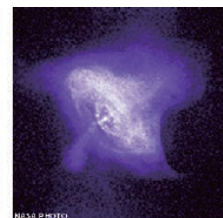
重さを持つ物は、その重力で周りの時空を歪 (ゆが) めています。その物体が運動をすると、周りの歪んだ時空が波のように宇宙空間に広がってゆきます。これが重力波です。実は、皆さんが腕をぐるぐる回しても重力波が発生しますが、その重力波の振幅はあまりに小さく、人類の技術では到底検出できません。人類が検出可能な重力波を発生させる物は、星の爆発や宇宙の誕生の様な凄まじい炸裂を伴う天体現象です。

重力波の発生源は？

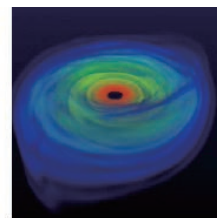
太陽より数倍重たい星が一生を終えて爆発する超新星爆発現象、その爆発の後に誕生しう半径が 10km しかないのに、太陽と同じくらい重たい中性子星の自転、そんな中性子星同士の合体現象、その後に誕生するブラックホールなどから人類が観測可能な重力波が発生します。宇宙誕生の瞬間のビッグバンでも重力波は発生します。



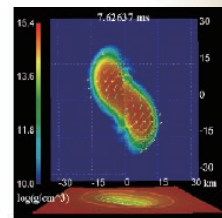
超新星爆発



パルサー



ブラックホール



中性子星の合体

KAGRA

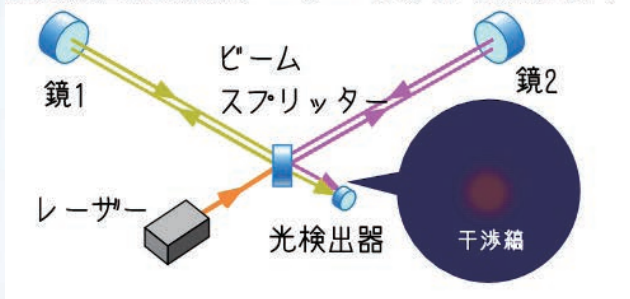
陽子
中間子
崩壊
粒子
宇宙線から発生するミューオンという粒子は、光速に近い速度で走
るため、相対論により寿命が伸び、地球に届くようになります。

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。

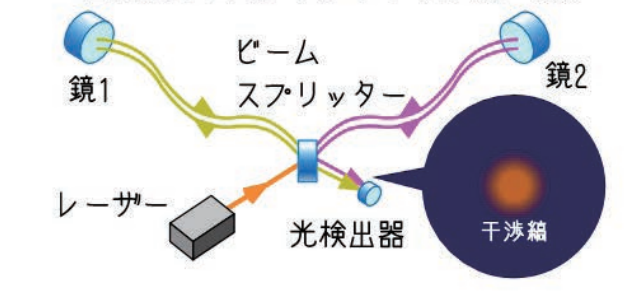
重力波望遠鏡では、普通の光や電波の望遠鏡と異なり、レーザー干渉計というものを利用します（下図）。レー

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、より鮮明に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。

重力波で空間がやがむと干渉縞が明滅



重力波の観測で何がわかる？

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。また、強い重力場においても、一般相対性理論は正しいのか、あるいは、修正が必要なかがわかります。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、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と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

日本の大型低温重力波望遠鏡・KAGRA

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、250 人に及ぶ国内外の研究者が協力しています。

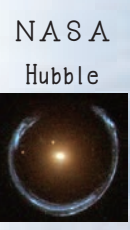
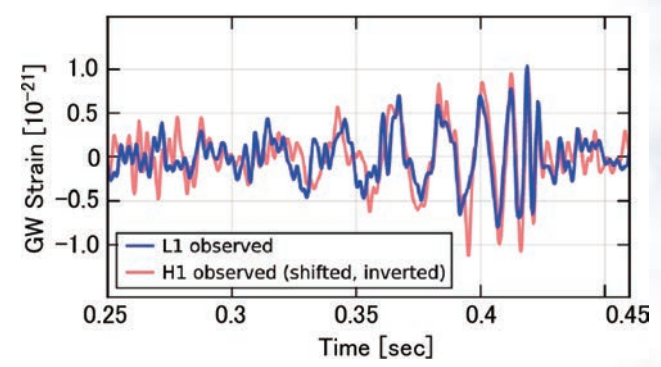


人類史上初の重力波の検出に LIGO が成功！

アメリカの LIGO グループが、2015 年 9 月 14 日の観測において、人類史上初となる重力波の検出に成功したと、2016 年 2 月 11 日に発表しました。3000km 離れた場所にある 2 台の重力波望遠鏡が、7 ミリ秒の時間差でほぼ同じ波形の信号を検出し、その波形は、質量が 29 太陽質量と 36 太陽質量のブラックホール連星の合体から発生する重力波の予想波形とほぼ一致しました。さらに、その信号は、同時計測しているどの環境雑音とも相関がなく、かつ、雑音でそのような特徴的な波形が偶然に発生する確率は 20 万年観測して 1 回という低さであったため、この信号は、重力波によるものに間違いないと判定されました。ついに、人類は、重力波という新しい観測の「窓」を手に入れたのです。ただ、残念ながら、LIGO の 2 台の

重力波望遠鏡では、波源の位置の推定誤差が大きいため、今後 VIRGO や KAGRA が同程度の感度を持ち、ネットワーク観測を行うことにより、より正確で多くの情報を得ることが期待されます。

（下図：Physical Review Letters. 116, 061102 (2016), Fig.1）



NASA Hubble
相対論では、重力による空間の曲りで「重力レンズ」が発生す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。