

連携記事

KAGRAプロジェクトの概要と展望

KAGRA Project : Status and Scope

黒田和明

東京大学 宇宙線研究所
教授

Kazuaki Kuroda

1 はじめに

20世紀初頭にアインシュタイン (Albert Einstein) が一般相対性理論で予言した重力波は、地上の実験室では発生できたとしてもその効果の微弱さのために検出が不可能であり、実験にかかるような代物ではないと信じられていた。しかし、1960年代に米国メリーランド大学のウェーバー (Joseph Weber) 教授が重力波の検出装置を完成させ、銀河中心から重力波が来ていると発表した¹⁾。この報告が契機となって世界中で検出装置の製作が始まった。1980年代までには、これらの検出器による観測や発生源に関する理論的研究が進み、ウェーバーの検出したとされる重力波は、もし事実だとすると、理論的には銀河中心で極めて巨大な事象が発生していなくてはならず、当時の天文観測から該当する現象が見当たらないことから、誤りだったということになった²⁾。ウェーバーの検出器は、アルミ合金の円筒1.4トンで地面振動や音の影響から免れるように真空中に支持したもので、重力波によって円柱に引き起こされる弾性振動を側面に張り付けたピエゾ素子で検出する共鳴型アンテナだった。重力波の性質は後述するが、アンテナの弾性振動を起こす原因には、地面振動の影響を免れたとしても、室温の熱雑音による振動³⁾、ピエゾ素子の雑音力⁴⁾があり、これらの雑音を上回る重力波信号しか検出できない。より微弱な重力波信号を検出するためには、雑音のより小さい検出器が必要である。熱雑音は温度を下げることで低下でき、ピエゾ素子の雑音はより感度の高い他の形式のトランスデューサーを用いることで改善できる可能性がある。ウェーバーの重力波アンテナで検出された弾性振動の振動は、周波数が1.66kHz、振幅はおおよそ 10^{-15}m の程度であった。より微弱な重力波信号をとらえるために、アンテナ本体を低温化し、量子磁束を測るSQUID素子を用

いたトランスデューサーが開発され⁵⁾、ウェーバーの最初のアンテナから半世紀経った最新のアンテナの感度による検出振幅は 10^{-22}m に達している⁶⁾。しかし、これでもまだ重力波は検出できていない。これは、この種のアンテナの周波数帯域が狭帯域であることと、感度向上がさらに必要であるにも関わらず原理的限界に至っているためである。この限界は量子限界と呼ばれ、これを乗り越える理論も完成しつつある。しかし、実験的にはまだ誰も成功していない。このようなアンテナに代わるものとして、レーザー干渉計を用いた検出器が開発されてきた。この長所は感度を上げるためにはレーザー干渉計の基線長を伸ばせばよいという点にある。

現在、このような長基線レーザー干渉計は、米国LIGO⁷⁾、仏伊合同のVirgo⁸⁾、英独合同のGEO⁹⁾、日本のTAMA¹⁰⁾、CLIO¹¹⁾があり、前三者は感度向上のための改修作業が進められ、日本では筆者らが進めるKAGRA*1プロジェクト¹²⁾が進行中である。

本稿では、多額の研究費や人的資源が投入される大型科学プロジェクトの一つである重力波検出に向けた取り組みを紹介する。

2 重力波と発生源

重力波は、時空の歪み波が光速で空間を伝搬していくものである。これを理解するためには、まず時空について知る必要がある。今となっては驚くべきことであるが、機械工学科をはじめとする工学部の多くの学科の授業では、学生が相対性理論について学ぶことがない。これはこれまで相対性理論が工学部で伝授される実学と無関係であるためであった。しかし、レーザー光を用いたり、位置情報のためのGPSシステムが利用され、量子現象が顔を出すナノデバイスが研究対象

*1 Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGT) に対して2012年1月に公募により決定されたニックネーム

となるような現在では無関係ではなくなりつつある。力学の基礎としてニュートンの法則さえ学んでおけばよい時代はとうの昔に過ぎ去ったのである。

ニュートン力学で頭がいっぱいの人は、地球から1.5億km離れた太陽の引力が瞬時に作用すると仮定するので、光が1ナノ秒の間にたった30cmしか進まないということは想像できないかも知れない。光の速さはこの世の中で最高の速さであるにも関わらず有限で、光はのろのろとしか進まないのである。アインシュタインの特殊相対性理論では、光の速さが光源の速さに依らず一定であるという仮定をし、加速度運動をしていない相対速度のみをもつ2つの座標系に優劣はなく対等（相対的）であるとする。これから2つの座標の間の変換式が導出され、その変換式では時間と空間が入り混じってしまうことが分かる。我々の日常での経験では考えられない現象も起きて来る。例えば、光速に近い速度で等速運動をしている電車（座標系A）を地上で観察する（座標系B）と、地上で列車の先頭と最後尾に同時に雷が落ちて、電車の中央の車両に乗っている人は先頭に落ちた雷は早く、最後尾に落ちた雷は遅く観察される（雷の光が観察者に到達するまでに観察者が移動するため）。速度に応じて、距離や時間が変化してしまい、物理法則を2つの座標系で成り立たせるためには時間と空間その物を変換（ローレンツ変換）する必要がある。双子のパラドックスなど多くの啓蒙書の格好の題材となっている現象が起きる。

物理学者は時間と空間とが独立な座標ではなく互いに入り混じった物理的存在だということを知ったのである。等速運動を考えた特殊相対性理論に対して、加速度運動と重力の効果を定式化した一般相対性理論では、時間と空間を合わせて時空と呼び、物質やエネルギーが存在しなければ時空は平坦であるが、物質やエネルギーがあれば、その周囲の時空は曲がっている。そこで、曲がりの原因となっている物体が加速度運動をすると、周囲の曲がりの様子は、時空のひずみ波となって周囲に伝搬していく。これが重力波である。電荷の作る電気力線が急激な電荷の運動により、歪みとなって電波の形で放出されるのと同様である。実はこれらの方程式の形式は次元を別にすれば同じになっている。

重力波は、電磁波と同様に横波であり、光速で伝播する。光に偏光があって2つの自由度があるように、重力波にも2つの偏波がある（Fig.1）。物質やエネルギーの加速度運動から重力波は放出されるが、宇宙に存在する星などの天体は、その起源はさておき、水素やヘリウムの核融合で光輝いているが、徐々に重い元素に転換され、核融合が鉄原子まで進むと燃え尽きて燃料がなくなり、重力による星内部へ向かう力

を核反応で保持できなくなると重力崩壊を起こす。この際に星形成物質の大きい加速度変化が起きて重力波が発生する。この重力崩壊には超新星爆発が伴うが、太陽の8倍程度の質量の星が重力崩壊すると、非常に強い重力のため、原子が存在できずに中性子だけから成る中性子星が誕生する¹³⁾。なお、超新星爆発によって重元素が周辺に撒き散らされる。知られている中性子星の質量は太陽質量のほぼ1.4倍程度であり、磁場を伴って自転することからパルサ的な電磁波を振りまくパルサーとなる。これまで観測されているパルサーは2千個に達する。パルサーが非球対称である時には、回転に伴い重力波が放出される。かにパルサー^{*2}や帆座パルサーは、これまで重力波検出の対象とされてきたパルサーであり、光学や電波望遠鏡でその回転周期を観測して、その周期（の半分）と同期する重力波が検出の対象となってきた。重力崩壊するもとの星が太陽質量の8倍程度よりさらに大きい質量の場合、崩壊の後でできる天体はブラックホールとなり、その周囲は光をも飲み込むほどの強い重力に支配される。重力崩壊する前の質量が太陽質量と同じ程度のように軽い場合には、中性子星ではなく電子の量子力学的な排他力が重力と釣り合った白色矮星となる。恒星がもともと連星である場合など、連星の中性子星が存在していることが知られており、遠くからその運動を観測すると、2つの質点同志が教科書通りの方程式に従って運動するように観測されるはずである。我々の銀河系で早くから発見されていた連星パルサーPSR1913+16からのパルスの精密な長期観測により、重力

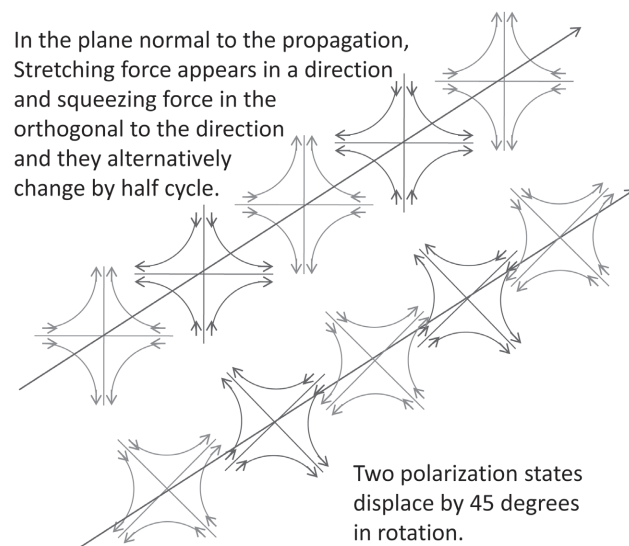


Fig.1 Gravitational wave is transversal plane wave that propagates in the speed of light in vacuum. There are two polarization states that coincide with each other by 45 degree rotation around the axis of the wave direction.

*2 おうし座のかに星雲の中心部にある中性子星

波によるエネルギーの放出がテーラー (J.H.Taylor) とハルス (R.A.Hulse) によって確認され、アインシュタインの一般相対性理論の正しさが検証された¹⁴⁾。ハルスとテーラーは1993年のノーベル賞に輝いた。連星パルサーは公転周期の半分の周期の重力波を放出していくため、連星パルサー系から力学エネルギーが失われ、その分、公転軌道が収縮して終には2つの中性子星が合体してしまう。合体までの時間や放出されるエネルギーは最初の軌道半径と連星の質量だけで決まり、同時に放出される重力波の時間変化の信号も計算できる。合体が起こると大抵の場合、中性子星であり続けることは不可能でブラックホールになる。このブラックホールができる、ブラックホールの時空が固有振動に似た振動を起こすことが分かっており、ここからも特徴的な重力波が放出される。ブラックホールの存在は、そこに落ち込む星屑から発せられるX線やガンマ線などの観測により確認されているが、ブラックホール時空そのものを観測することは重力波によってでしかできない。

3 検出原理

ウェーバーの検出器は重力波によって引き起こされる弾性体の共鳴振動を利用していたが、レーザー干渉計では、鏡

をフリーにしてレーザー干渉計の基線長に沿って振動が引き起こされる現象を利用する (フリーとは振り子状に吊るされた重りが水平方向に狭い範囲では自由に運動できること)。重力波レーザー干渉計の原理はFig.2に示す通りであり、その基本はいわゆるマイケルソン干渉計である。マイケルソン干渉計は、ライト兄弟が初めて空を飛んだ時代に、アメリカ人として初めてノーベル賞に輝いたマイケルソン (A.A.Michelson) が光の波長のレベルで長さを測定できるように発案したもので、エーテルの存在を否定した実験で有名であるが¹⁵⁾、現在では精密な変位計測分野では工業的に多く利用され、産業に必要な不可欠のアイテムになっている。重力波がこのレーザー干渉計に紙面の上から達するとビームスプリッターから鏡1までの距離が伸びる変化を受けるときには、ビームスプリッターから鏡2までの距離は縮む変化を受けるため、信号ポートから取り出される光の位相は、一つの腕における光の位相変化の2倍の変化を示すことになる一方、2つの同等な腕の鏡により、レーザー光源の強度雑音などレーザー干渉計に共通に入る雑音は打ち消されることになる。

重力波レーザー干渉計では、マイケルソン干渉計を基本として、高感度化のため、腕に当たる部分の鏡をファブリーペロー共振器^{*3}で置き換え、レーザー光導入部分にはレーザー光を無駄なく利用するためのリサイクリング共振器^{*4}、信号

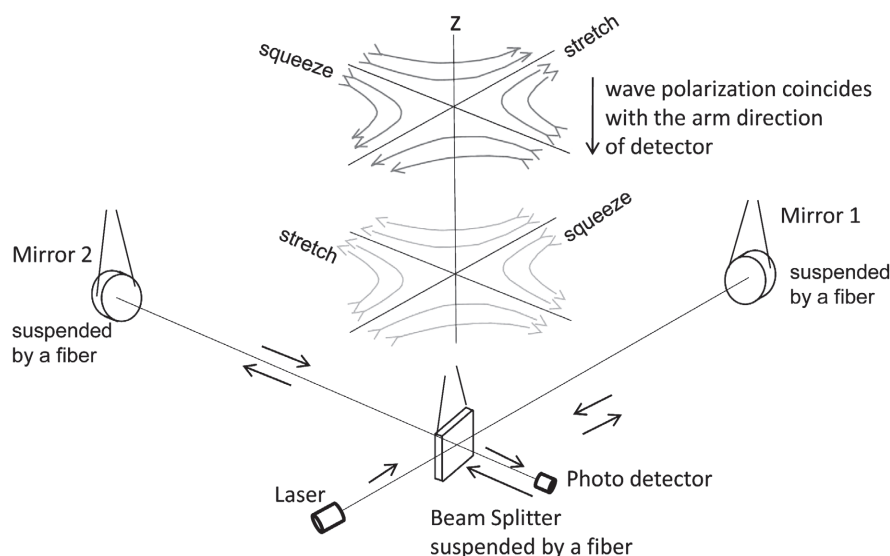


Fig.2 A Michelson laser interferometer is hit by gravitational wave incident vertically with a polarization that coincides with the arm direction of the detector. The gravitational wave causes tidal force that squeezes the length between the beam splitter and the mirror 1 at an instance, whereas the length between the beam splitter and the mirror 2 is stretched. The displacements of mirrors alternatively change with time, which is detected by output of the photodetector that converts the interference laser light into electrical signal.

- *3 高反射率の2枚の球面鏡を対向させ光を繰り返し反射させて共振状態に保つことにより光を閉じ込めることができるようにした干渉計で、閉じ込めの時間は共振の鋭さを示すフィネス (反射率で決まる) と鏡の間の距離で決まる。なお、閉じ込める光の折返しの回数に比例して等価的に光のパワーが増大する。
- *4 光検出器に向かう干渉光強度を最小にする状態が雑音最小の状態、この状態で動作させるが、この時、レーザー光源側に向かう干渉光強度は最大になる (理想的には100%の入射パワーが戻って行く)。これを打ち返すことができるように、適切な反射率をもつ鏡をレーザー光源とビームスプリッターとの間に置き、その位置を入射光の位相と合うように微調してマイケルソン干渉計の光と共振させる共振器系を構成する。これがリサイクリング共振器である。マイケルソン干渉計の腕鏡がファブリーペロー共振器に置き換えられても同様に共振器系を構成できる。

を取り出す側には信号の帯域を広げて取り出す共振器を付け加える構成が一般的である。共振器の仕様など、現実には種々の形式があり得る。KAGRAの干渉計はこれらの改良を加えた典型的な方式を用いているが、将来の開発研究によるバージョンアップが図られることは容易に想像できる。

レーザー干渉計のすべての鏡は地面振動の影響を避けるために精密な防振装置が施され、すべての鏡の熱振動は可能な限り小さい材料が選定され、また、鏡を吊るすワイヤにはこれまた熱雑音の小さい材料が選ばれる。鏡は光を無駄なく反射するように、精緻な誘電体多層膜の成膜が施されるが、その熱雑音の大きさを下げる努力が必要である。レーザービームが通過する空間は残留ガスの屈折率揺らぎが雑音とならない 10^{-6} Paよりよい超高真空中に保たれる¹⁶⁾。kmスケールの巨大な超高真空装置は、その容積の点で世界にも例がない大きさである。レーザービームはその強度揺らぎはもとより周波数揺らぎが小さい必要があり、これらは技術的に解決可能であるものの、レーザービームを構成する光子のために光検出器で発生するショット雑音はレーザーパワーを上げていくしか低減の方策がない。これまで世界で稼働してきた長基線レーザー干渉計のレーザーパワーは10Wクラスのものであり、入口の光リサイクリング共振器で10倍から100倍の間に拡大される。腕鏡に置き換えられたファブリーペロー共振器の中では、このレーザーパワーが光共振器のフィネスに応じて100倍から1000倍に拡大される。TAMA干渉計では数kWのパワーであったが¹⁷⁾、KAGRA干渉計ではこれが500kWになる。鏡面に研磨による微細な凹凸があると光を乱反射するため、この凹凸の大きさはサブナノメートルにする必要がある。ファブリーペロー共振器の中で高いフィネスを保証して無駄のない光折り返しのためには、鏡面の曲がりにも高い精密さが要求される。レーザーの周波数安定度は、重力波検出の感度に直接影響するため、長基線のファブリーペロー共振器を含むフィードバックループによる制御で保たれている。なお、吊るした鏡のゆれを押しとどめるための制御ループが鏡のゆれの自由度の数ほど必要である。例えば、レーザービーム方向の鏡の振り子振動のゆれは、実効値で1pmよりも小さくなるように制御される。

さて、以上の検出器で重力波の観測を行うわけであるが、現在、取り組んでいるKAGRAプロジェクトでは、超新星爆発に伴う重力波や連星パルサーの合体に至るまでの重力波、ブラックホール誕生時の時空の振動による重力波をとらえることができる。この説明は、アインシュタインの理論が正しいという前提での理論的な予測であり、重力波が現実に出れば、これらの予測が正しいかどうかを含めてアインシュタインの理論の検証がなされることになる。問題は、星の重力崩壊や連星パルサーの合体がどの程度の頻度で起こる

のかということであるが、天文観測の統計によれば、超新星爆発は我々の銀河のような大きさの銀河で数10年に1回、連星パルサーの合体は10万年に数回の割合で起こると予測されている¹⁸⁾。なお、天文学的データによれば、我々の銀河程度の銀河は、1辺の長さが1千5百万光年の立方体空間の中に1個の割合で存在する。従って、KAGRAプロジェクトのレーザー干渉計は、連星パルサーの合体による重力波を1年の観測で確実に検出するために、3.3億光年先で起こる合体現象までとらえることのできる感度に設計されている。

4 技術開発

これまで稼働してきたレーザー干渉計に特有の技術は、高性能反射膜を成膜した超低損失の石英ガラス製の鏡¹⁹⁾、高出力レーザー光源、巨大超高真空容器、超高性能防振装置²⁰⁾などであるが、これまでの検出器の感度をさらに上回る感度を実現するためには、さらに新たな技術開発が求められている。しかし、それらのすべてを限られた紙面で紹介することはできないため、ここでは日本のKAGRAプロジェクトで挑戦している新たな技術開発について紹介する。それは、極低温に冷却した鏡を使用し、かつ、地面振動の小さい地下に検出器を設置するという、これまで世界でも試みられたことのない技術である。

室温300Kを3Kにまで冷却すれば、他の物理的因子が変化しなければ、熱振動が10分の1に低下し、単純には感度が10倍になる。現実には、鏡の温度は20Kに設定され、すべての周波数領域で感度向上が見込めるわけではないので、感度改善はこれより悪いが冷却による感度向上は確実に見込める。技術的な問題の最大のものは、これまで開発されてきた石英ガラスが低温で使用できないことであり、これに代わる素材としてサファイヤを選択した。現時点で、低温鏡として使用できる素材は、ダイヤモンドを除けばサファイヤとシリコンしかないことが分かっており、シリコンでは現在1ミクロンのレーザー光の波長を1.5ミクロンに変更する必要がある、光学系の設計に大きい変更を施す必要が生じる。このため、KAGRAではサファイヤを用いることとした。鏡の直径は当初25cm、厚さ15cmであったが、これを可能とする大きさの光学品質の高い単結晶素材を製造することが容易ではないため、現実的な選択として直径22cmとしている。

Fig.3には、防振のために吊るされた鏡の冷却を吊るした2本のファイバーの伝熱特性を利用して行う概念図が描かれているが、この図から明らかなように極低温では熱輻射による冷却は不可能であり、かつ、超高真空中での残留ガスによる冷却はあり得ない。鏡は地面振動から隔離されているだけでなく熱的にも隔離されているので、もしも、設計値を超える

発熱があるとたちまち鏡の温度が上昇してしまう²¹⁾。ファブリーペロー共振器の設計光パワーは、500kWであり、鏡の反射における損失を1ppmとすると、0.5Wの熱が発生する勘定になる。この発熱を10Kに冷却された支持点からファイバーによる熱伝導で冷却を行う。このファイバーの材質としては、熱伝導性に優れ、熱雑音の小さいサファイアファイバーが選択され、その直径を2mmとした。支持点の冷却には、4Kで1Wレベルの冷却能力のあるパルスチューブ型の2段型冷凍機を使用する。鏡は閉空間ではなく真空ダクト方向に開いた空間に吊るされるため、熱の流入過程やレーザー光の乱反射を数値シミュレーションによりできるだけ精密に推定して、クライオスタットを設計する必要がある²²⁾。

検出器を地下に設置することについては、プロトタイプ装置で長年開発研究を進めてきており、実地の経験も蓄えている。設置予定場所は、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山であり、超新星からのニュートリノ検出で有名なカミオカンデが設置されていた地区であり、現在は、それを大きくしたスーパーカミオカンデによる観測が続けられている。すでにある坑道を利用して地面振動の計測を行い、岩盤の中の振動が地中に侵入するに従って低減され、地表面からも200m侵入すれば、それより奥深くの振動振幅と変わらないことを確認している。この結果に基づき、KAGRAレーザー干渉計設置のための空洞掘削の計画が立てられ、現在、掘削工事中である。空

洞内の出水に備えた排水のためにトンネル床面に勾配を取っているが、この勾配は、レーザー干渉計のレーザービームが鉛直に吊るされた鏡に斜めに入ることになり、防振性能を悪くする。しかし、トンネルが水平であると排水のための電動ポンプを設置することが必要となり、これだと振動源をまき散らすようなものでせっかく静寂な地下に設置する意味が薄れる。また、地下掘削によって発生する塵埃は長期にわたって空洞内に浮遊し、鏡を取り扱うクリーンな環境に負荷がかかるなど、新たな環境によって起こる新たな問題を的確に処理してい行かなければならない。

いずれにしても以上の新しい技術開発に関するお手本は世の中には存在せず、筆者らが試行錯誤で開発に取り組んでいるものである。

5 国際協力

本プロジェクトは、重力波の初観測を目指して建設がスタートし、他国の重力波プロジェクトと先陣争いが行われている。単独の検出器で信頼性の高い検出を実現することに疑問を呈する向きもあるが、原理的に単独の検出器による重力波検出は可能である。しかしながら、重力波の性質上、単独の検出では、重力波源の位置を決めることはできない。天空での位置を決めるのは、同等な感度の検出器が同時に3台稼

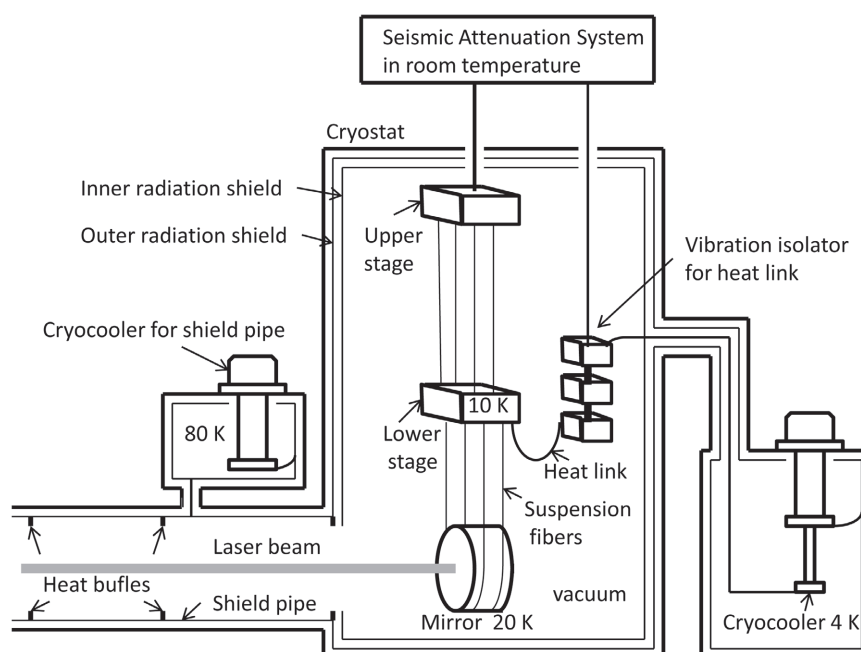


Fig.3 Schematic view of the cryogenic mirror system of KAGRA project. The prototype of the system has been tested by CLIO interferometer placed at Kamioka underground. The mirror is desigend to be made of sapphire crystal and suspended by four sapphire fibers. Refrigerators cools the heat link that is connected through a vibation isolation with the lower stage that suspends the mirror. Since the 3 km beam tube is maintained at room temperature, the shield pipe isolates heat entering into the cryostat by reducing the solid angle pursed by the mirror and arranging heat bufiles inside the shield pipe. See text about the heat balance of the mirror.

働している必要がある。次々に重力波が検出され、それらの位置が決定できるようになってはじめて重力波天文学の世界が実現される²³⁾。重力波の最初の検出は筆者らが行うかも知れないし、欧米のプロジェクトかも知れない。また、全体の合同プロジェクトかも知れない。しかし、誰が最初に検出するにせよ、検出されることは間違いなく分かっている、その後最初の検出に劣らず実りある重力波天文学が開始されるであろうことも疑いがない。

このような大型のサイエンスプロジェクトは、共通の目標を持つ他の国々と協力して推進することが望ましいのは、その成果が日本国内にとどまらず人類共通の宝物になるからである。従って、初検出がなされた後には、他国と共同で観測網を整備することになる。また、困難な技術開発を共同開発することにより、新しいノウハウが編み出されこれを共有することで、関係する国々の絆が一層深まり、国際平和に貢献できる。ここで使用する技術はいずれも最先端の技術であり、これまで重力波レーザー干渉計の観測装置を稼働させてきた国々はいわゆるG8の先進国だけであった。KAGRAでは、重力波観測を核とする共同研究への参加を日本の周辺の国々に働きかけており、アジア諸国からの参加者が次第に増えつつある。

技術的協力として、これまでにLIGOプロジェクトを擁する米国の研究グループと技術情報の交換を行う枠組みを構築しており、Virgo計画やGEO計画に参画する研究者が立案したヨーロッパでの次期計画Einstein Telescopeをめぐり、KAGRAの先進技術を核とした研究者交流プログラムが走り始めた²⁴⁾。

6 まとめ

重力波は20世紀初頭にアインシュタインによって予言された時空の波動であるが、直接検出に成功した例はない。しかし、その科学的意義の重要性から地道な技術開発が半世紀にわたって連綿と続けられ、近年の大型レーザー干渉計の相次ぐ建設によりようやくその技術開発が実を結びつつある。そのような中で日本ではKAGRAプロジェクトが進行中であり、建設が終了して本格的な観測が始まる2017年以降、世界と初検出を争うことになる。初検出の後には、世界のプロジェクトと協力して国際観測ネットワークの構築を行い、KAGRAはアジア地域での重力波観測拠点として末長く学術上の国際貢献を果たすことになる。

参考文献

- 1) J.Weber : Phys. Rev. Lett., 22 (1969) , 1320.
- 2) 培風館 : 物理学辞典, 物理学辞典編集委員会編, 初版,

- (1984) , 901.
- 3) C.Kittel : Elementary statistical physics, Wiley, New York, (1958) Sec, 30.
- 4) 変位を電圧等の電気信号に変換するすべてのトランスデューサーでは、電気系電流雑音による反力が生じて被測定対象に雑音力を及ぼす。例えば, H.J.Paik : IL Nuovo Cimento, 55 (1980) 15.
- 5) H.J.Paik : J. Appl. Phys., 47 (1976) , 1168.
- 6) P.Astone : arXiv, 0806.1335v2 [hep-ex] , (2008) .
- 7) B.Abott et al. (LIGO Scientific Collaboration) : Rep. Prog. Phys., 72 (2009) , 076901.
- 8) F.Acernese et al. (Virgo Collaboration) : Class. Quantum Grav., 25 (2008) , 114045.
- 9) M.Prijatelj, et al. : Class. Quantum Grav., 29 (2012) , 055009.
- 10) M.Ando et al. : Phys. Rev. Lett., 86 (2001) , 3950.
- 11) T.Uchiyama and S.Miyoki : J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 46 (2011) , 392.
- 12) 黒田和明, 川邊径太 : 日本物理学会誌, 62 (2007) 9, 659. 黒田和明 : 低温工学, 46 (2011) 7, 385. 最新の情報はKAGRAプロジェクトWebサイト <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 13) K.Nomoto and M.Hashimoto : Phys. Rep., 163 (1988) , 13.
- 14) J.H.Taylor and J.M.Weisberg : Astrophys. J., 345 (1989) , 434.
- 15) A.A.Michelson and E.W.Morely : Phil. Mag., 24 (1887) , 449. 或いはA.A.Michelson : Studies in Optics, Univ. Chicago Press, (1927) , Chap 8.
- 16) 斉藤芳男・高橋竜太郎ほか : J. Vac. Soc. Jpn. (真空) , 44 (2001) 5, 481.
- 17) S.Nagano, et al. : Rev. Sci. Instr., 73 (2002) , 2136.
- 18) M.Burgay, et al. : Nature, 426 (2003) , 531.
- 19) 大橋正健 : 応用物理, 68 (1999) 6, 663.
- 20) R.Takahashi, et al. : Class. Quantum Grav., 25 (2008) , 114036.
- 21) T.Tomaru, et al. : Phys. Lett., A 301 (2002) , 215.
- 22) T.Tomaru, et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 47 (2008) 3, 1771.
- 23) B.F.Schutz : Class. Quantum Grav., 28 (2011) , 125023.
- 24) The ELITES Project Web site : <http://www.et-gw.eu/elitesmainmenu>

(2012年7月15日受付)