

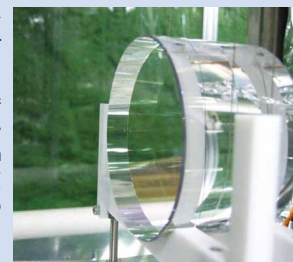
アインシュタイン理論を検証する 重力波検出

連星中性子星から放出される重力波のイメージ イラスト/KAGAYA

2012年7月、その存在が50年前に予言された「ヒッグス粒子」発見のニュースが世界を駆けめぐった。しかし、物理学には存在が予言されてから約100年後の現在でも未確認の現象がある。アインシュタインが予言した「重力波」である。重力波の検出は各国で試みられているが、未だに直接検出に成功した例はない。我が国でも、世界初の重力波検出を目指し、高精度の重力波検出装置の建設が進められている。



レーザー干渉計ではサファイア製の反射鏡が用いられる。写真(右):日本の重力波検出器(CLIO)で使用されている直径10cm、厚さ6cmの反射鏡。写真(上):反射鏡の上に見えるのが懸架システム。



相対性理論の4つの「予言」

1916年に発表された一般相対性理論では、重力とは質量の周辺の時空の歪みである、と説明している。アインシュタインは、重力が引き起こす事象として「重力レンズ」「光の赤方偏移」「水星の近日点の移動」「重力波」の4つを予言した。現在、アインシュタイン自身がその検証は難しいと考えていたと言われる重力波以外は、その存在が検証されている。

物理学100年の宿題とも言われる重力波とはどのようなものであろうか。重力波は、時空の歪みが波として伝播する「時空のさざ波」のイメージで説明される。静かな水面に鉄球を落としたときに波紋が広がって行くように、質量の運動によって時空が歪み、その歪みが光速で伝わって行くのである。

実は、連星中性子星^{*1}の詳細な観測によって、重力波の存在は間接的には検証されている。しかし、重力波の直接検出

は極めて難しく、各国で重力波を検出するための巨大な設備が建設されている。

水素原子1つ分の変位を測定する

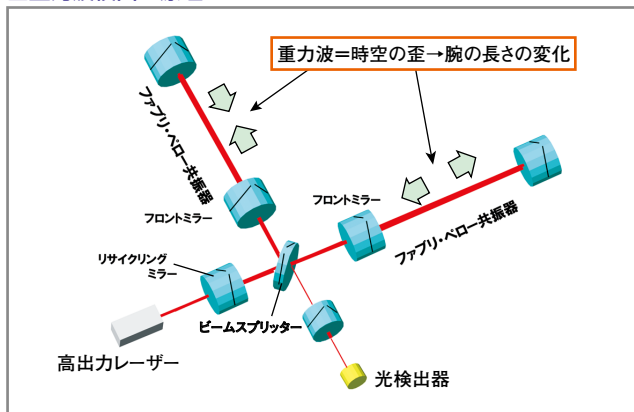
自然界には、原子核と電子を結びつける「電磁気力」、中性子のベータ崩壊を引き起こす「弱い力」、原子核を安定させている「強い力」と、「重力」の4つの力(相互作用)が存在している。重力波の検出が難しい理由は、重力が他の相互作用と比較して、極端に小さいためである。例えば、電磁気力と比較すると重力は約40桁も小さい力である。このため、超新星爆発や連星中性子星の合体などの巨大な質量による天体イベントが発する重力波でなければ、観測することが難しい。

しかし、その場合でも、予想される空間の歪みはごくわずかである。現在、最も確実な重力波の発生源と考えられている連星中性子星の合体が近傍の銀河で発生した場合、地球で観測される変位は 10^{-21} m程度である。これは地球と太陽の距離(1.5億km)に等しい長さの定規で、水素原子1個分(10×10^{-10} m)の伸縮を測定することに相当する。このような極

*1 連星中性子星

太陽の10倍程度の質量を持つ恒星は、燃え尽きた後には超新星爆発を起こし、中性子星になる。このような中性子星が互いの周りを回っているものを連星中性子星と呼び、重力波の発生源と考えられている。

■重力波検出の原理



マイケルソン干渉計は、2つの反射鏡と1つのビームスプリッターで構成されているが、KAGRAではファブリーペロー共振器とリサイクリングミラーを付け加えることで、実光路長を約1000倍に延ばし、レーザー光のパワーを向上させている。

微細な変位を精確に測定することは極めて困難であり、これこそが今日まで重力波が直接観測できなかった理由である。

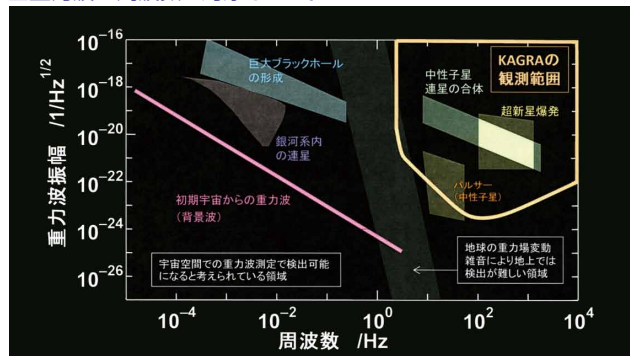
重力波を捉えるレーザー干渉計

重力波の直接的な検出は、1960年代から研究が始められている。現在主流となっているのは、レーザー光を利用したマイケルソン干渉計を利用する方法である。マイケルソン干渉計では、1つの光源から発した光をビームスプリッターで2つに分け、それぞれを鏡で反射させて、再び合成することで生じる干渉縞により、2つの反射鏡の位置を測定している。重力波は2つの物体の距離の変化として検出でき、例えば1000m離れた反射鏡の位置変化を 10^{-18} mオーダーで捉えることができれば、 10^{-21} m程度の重力波による空間の歪みを検出できること

日常生活に生かされている相対性理論

相対性理論というと天文や宇宙がイメージされるが、現代生活に欠くことのできないGPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)にも相対性理論が生かされている。GPS衛星は、地上との通信時間によってその位置を測定している。しかし、秒速4kmという高速で移動している(特殊相対性理論により時計は遅れる)ことと、高度2万kmを飛行している(一般相対性理論により重力ポテンシャルが高いところにある時計は進む)ことにより、地上の時計とは1日当たり 3.84×10^{-5} 秒の誤差が生じる。これは、地上では約11kmの距離に相当する誤差である。GPSでは相対性理論により、この誤差を補正して、正確な位置測定を実現しているのである。

■重力波の周波数と対象イベント



天文イベントで発生する重力波は、その発生源と距離によって、周波数と振幅(歪み)が決まる。KAGRAで検出を目指しているのは、10Hz~10³Hzの帯域の連星中性子星の合体や超新星爆発による重力波である。なお、地球上での観測では、重力場変動雑音のために、1Hz以下の重力波を捉えることは困難である。また、重力波の振幅の単位は1/Hz^{1/2}であるが、重力波検出器では長さ(m)の変化として検出される。

■重力波イベントの発生頻度

種 類	頻 度	重力波振幅/1/Hz ^{1/2}	帯域/Hz
連星中性子星の合体(200 Mpc ^{*1})	数回/年	10 ⁻²¹	10~10 ³
超新星爆発(銀河系内)	1回/数十年	10 ⁻¹⁸	~10 ³
超新星爆発(おとめ座銀河団内)	数回/年	10 ⁻²¹	~10 ³
巨大ブラックホールの形成 ^{*2}	1回/年	10 ⁻¹⁷	~10 ⁻³
インフレーションからの背景波	常時	※3	※3

※1: 1 Mpc = 約326万光年

※2: 銀河中心部に存在する太陽の100倍~1億倍の質量を持つブラックホール。

※3: 宇宙誕生後のどの時期で発生したかによって、重力波の振幅・帯域が異なる。

になる。

マイケルソン干渉計の精度を上げるためには、レーザーの光路長(基線長と呼ぶ)を長くとる方法がある。米国ではLIGO^{*2}(基線長4kmが2台、2kmが1台)、イタリアでは仏伊共同プロジェクトのVIRGO^{*3}(基線長3km)、ドイツでは英仏共同プロジェクトのGEO600^{*4}(基線長600m)がそれぞれ建設されている。

我が国では、基線長300mのTAMA300^{*5}(三鷹市)や、同100mのCLIO^{*6}検出器(神岡鉱山)を建設して、さまざまな検出技術を蓄積してきた。そして、現在岐阜県の神岡鉱山に建設中なのが3kmの基線長を持つ「KAGRA^{*7}(かぐら)」である。

このような観測設備では、どの程度の範囲の宇宙を観測することが可能であろうか。TAMA300の観測範囲は我々の住む銀河内であったが、GEO600では300万光年先のアンドロメダ銀河まで観測可能になっている。さらに、LIGOやVIRGOでは7000万光年先の乙女座銀河団までの観測が可能である。

*2 LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory

*3 VIRGO: Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations (VIRGO: おとめ座)

*4 GEO600: German-British Gravitational Wave Detector

*5 TAMA300: 干渉計型重力波アンテナの装置名称(TAMAは多摩地区に建設されていることによる)

*6 CLIO: Cryogenic Laser Interferometer Observatory(低温レーザー干渉計)

*7 KAGRA: 大型低温重力波望遠鏡の装置名称

■KAGRAの完成予想図



大型低温重力波望遠鏡にふさわしい名前として神岡 (KAmioka) と重力波 (GRAvitational wave) の造語であるKAGRAが公募により選ばれた。従来は、LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) の略称で呼ばれていた。

観測可能な重力波は、巨大な質量をもつ天体同士のイベントにより発生する。しかし、現在存在する最も高感度の検出器であるLIGOやVIRGOが測定できる範囲で、重力波が発生する天文学的なイベントが発生する頻度は、150年に1度程度であるとされている。観測距離が10倍になれば、観測対象となる銀河数は1000倍になる。KAGRAでは、3kmの長い基線長に加え、さまざまな技術的な工夫により感度を向上させることで、観測範囲を7億光年先のヘラクレス座銀河団まで広げ、より多くの天文学的イベントを捉え、年に数回から10回ほどの頻度での重力波を検出することを目指している。

「KAGRA」の革新的な測定技術

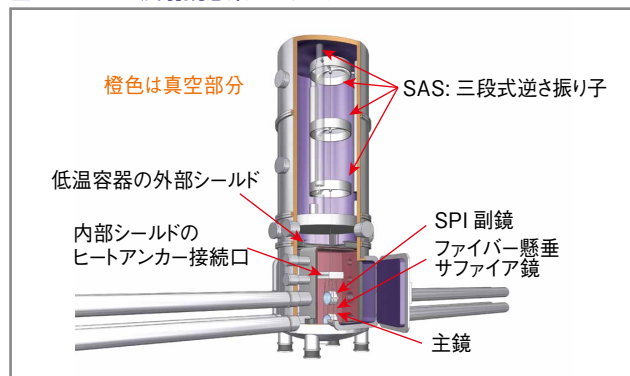
KAGRAには、TAMA300とCLIOで開発・検証された革新的な技術が随所に採用されている。

重力波の極微細な変位を捉えるためには、いかにして重力波以外の「雑音」を排除するかが課題である。重力波検出器としてのKAGRAの特長は、地下に建設することで低周波帯の雑音を抑え、鏡を冷却することで中～高周波数帯の雑音を抑え、高感度を実現することである。

CLIOによる測定結果から、飛騨片麻岩という硬い岩盤できている神岡鉱山では、比較的単純な防振装置でも地面振動雑音を十分に小さくできることが分かっている。さらに、TAMA300よりも多段かつ高性能の懸架システムを採用することで、防振効果を向上させている。

また、反射鏡や反射鏡を吊すワイヤーの熱振動の低減には、 -250°C (20K) という極低温まで冷却する日本独自の方

■KAGRAの反射鏡懸架システム

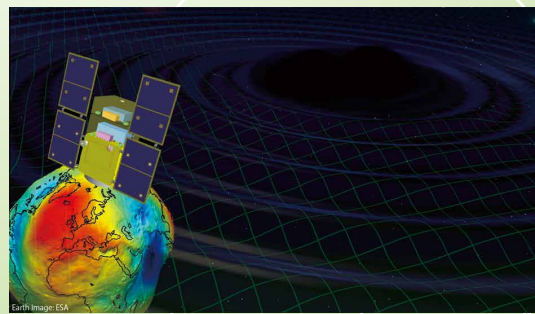


高さ14mにもおよぶ多段懸架システムの懸架図。なお、詳細については、解説記事を参照。

宇宙で重力波を観測する

次世代の重力波望遠鏡として、基線長10 kmで地下に建設する「アインシュタイン・テレスコープ」の計画があるが、地上のレーザー干渉計は、微小な振動が鏡の部材を伝わって、鏡に影響を与えるため、低い周波数の重力波を検出しづらい。

そこで宇宙空間で浮遊させた鏡を用いたレーザー干渉計の研究開発が、各国で進められている。日本では国立天文台などがDECIGO*8計画を進めており、海外でもESA (欧州宇宙機関) が主導となって計画を進めている。

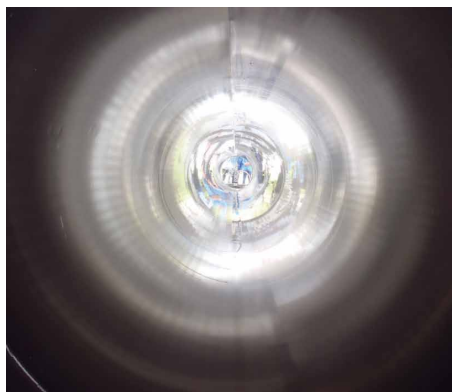


DECIGO パスファインダー (DECIGOのための試験衛星) のイメージ図

*8 DECIGO: DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (0.1ヘルツ帯干渉計型重力波天文台)

法を採用している。反射鏡の材料には低温での機械的性質や使用するレーザー波長などからサファイアが採用され、直径22cm、厚さ15cmのサファイア鏡が作成される計画である。

高周波数帯では、光の粒子性に起因する散乱雑音が問題である。これはレーザーの光量を増加させることでS/N比 (信号対雑音比) を向上させることが可能である。KAGRAでは、ファブリーペロー共振器とリサイクリングミラーを採用することで、これを実現している。ファブリーペロー共振器とは2枚の鏡の間でレーザーを1000回程度往復させることによって、光路長を実効的に延長する仕組みである。また、リサイクリングミラーはビーム



電解研磨後のダクト内面
写真提供：三愛プラント工業(株)



液圧成形によって製作されたベローズ
写真提供：(株)ミラプロ、本社工場



ダクトとベローズの溶接作業の様子
写真提供：(株)ミラプロ、野田工場

スプリッターからレーザー発振機側へ戻ってくるレーザー光を再びファブリーペロー共振器に戻すことで、レーザー光量を増加させている。

超精密測定に不可欠な超真空技術

重力波検出器では、空気などの影響を避けるために、レーザーの光路や反射鏡の周囲は真空であることが求められる。KAGRAでは、直径80cm、長さ6kmのレーザー光路と20個程度の真空タンク内で 10^{-7} Paという超高真空を実現する必要がある。

真空系を構成する材料には、ステンレス鋼やチタン、高純度無酸素銅などがあるが、KAGRAでは大型部材に対しても表面処理が可能で入手性のよいステンレス鋼(SUS304L)を採用している。真空ダクトは直径80cm、長さ12mのステンレス管を500本繋げて構成される。 10^{-7} Paの真空度を実現するためには、真空ダクトの前処理が重要である。通常はダクトを加熱することで表面の吸着ガスを除去するベーキングと呼ばれる脱ガス工程が行われるが、地下に設置するKAGRAでこの工程を行うことは難しい。そのため、事前にダクト内面を電解研磨処理し、超純水で洗浄後、熱風式ベーキングを行っている。

ダクト同士はフランジとベローズにより接続される。外径880mm、厚さ30mmのフランジ製作では、ステンレス鋼塊からのリング鍛造(SUS304F)を採用している。フランジの平面度を確保するためには、溶接時の残留歪みを避けるために、突き合わせ部分とフランジ間に十分な長さを確保する必要がある。このため、ステンレス鋼板からの切り出し加工では厚さ120mmの鋼板が必要になり現実的でない。さらに、棒材の曲げ加工では継ぎ目溶接部からの真空漏れの危険性があるため、リング鍛造が採用された。ベローズ材料にはSUS316Lを採用し、成形は折り目部分への粉塵の噛み込みの恐れがない液圧成形によって行っている。



ベーキング炉(手前)とリーク検査中のダクト(奥)
写真提供：(株)ミラプロ、野田工場

現在、KAGRAの建設は、坑道の掘削が行われており、2015年末には初期観測を開始し、2017年から本格的な重力波検出を目指すべく、作業が進められている。なお、KAGRAと同程度の感度を実現するために、米国のLIGOや欧州のVIRGOも改造工事が進められており、2017年頃に完成予定といわれている。大型重力波検出装置の建設ではやや出遅れていた我が国であるが、KAGRAの完成により、世界で初めて重力波の直接検出に成功する可能性が見えてきた。

極限の計測技術である重力波検出装置の開発で培われた、高安定・高出力レーザー技術、低温技術、真空技術、光学技術や計算機技術などは、幅広い分野での応用が期待できる。サイエンスの分野では、従来の電磁波やニュートリノによる観測では得ることのできなかった新しい情報をもたらす「重力波天文学」の誕生への期待が大きい。重力波は指向性が弱く、1つの観測装置では、発生源の方向を特定しづらいため、国際的な重力波天文学の観測ネットワークを実現させることにより、近い将来にはこれまでとは異なる新しい宇宙の姿を見ることができるようになるかも知れない。

●取材協力 東京大学宇宙線研究所、国立天文台、(株)ミラプロ
●文 石田 亮一