

重力波研究の歴史

1916年 アインシュタインが重力波を予言

アインシュタイン博士が一般相対性理論の中で重力波の存在を予言しました。ただし、予想される重力波の影響はあまりに小さいため、アインシュタイン自身も、重力波は観測できないだろうと考えていたようです。

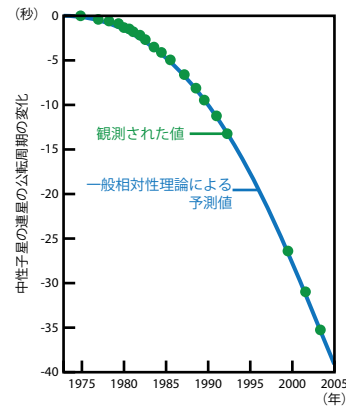
1960年代 ウェーバーによる共振型検出器での観測

1969年、ウェーバー博士が共振型検出器と呼ばれる検出器で重力波を発見したと発表しました。しかし、何人もの科学者が追試を行いましたが、残念ながら検出に成功することはありませんでした。ウェーバーの結果はおそらく誤りだろうということになりましたが、この時重力波検出に挑んだ科学者たちの多くは、後のレーザー干渉計を使った重力波研究などで大きな役割を果たすことになります。



1974年 ハルスとテイラー、連星中性子星を発見

ハルス博士とテイラー博士は、直径が20kmほどしかないのに太陽と同じくらい重さの中性子星が二つ、互いの周りを回る連星パルサー（中性子星）を見つけました。この連星の公転周期は年々短くなっています。その原因として連星の回転エネルギーが重力波放射によって失われるとして一般相対性理論により計算するとびたりと一致することが、その後の研究で明らかにされました。これは重力波の存在の間接的証拠と言われていました。両博士は連星中性子星発見の功績により1993年ノーベル物理学賞を受賞しました。



1970年代～ レーザー干渉計を使った重力波観測への挑戦

ハルスとテイラーの発見により、重力波の直接検出の試みは勢いを増しました。1970年代後半、ウェーバーの学生として共振型検出器の実験を行ったフォーワード博士や、マサチューセッツ工科大のワイス博士など、多くの科学者がレーザー干渉計を使って重力波観測への挑戦を始めました。その後も、より大型で高感度な検出器が世界中で次々と作られるようになりました。

1990年代～ 日本でも重力波研究がさかんに

1990年代から、日本でも重力波の観測をめざす研究が加速しました。20m～100mクラスのプロトタイプ干渉計に続いて国立天文台のTAMA300や神岡のCLIOなどの重力波検出器を建設して重力波観測技術の向上と干渉計の経験を積み重ね、2010年KAGRAプロジェクトが開始、2012年にはトンネルの掘削も始まりました。



国立天文台のTAMA300 (c)NAOJ

2015年 米国 LIGO で重力波初検出

米国LIGOの2台の重力波望遠鏡の2015年9月の観測データからブラックホールが合体したときの重力波を検出したことが2016年2月に発表されました。アインシュタインの予言から100年、重力波観測の試みが本格的に始まってから約50年という年月を経ての大発見でした。この成果によりLIGOの3名の研究者が2017年ノーベル物理学賞を受賞しました。また2017年には欧州Virgoと共同で中性子星の合体からの重力波もとらえ、世界中の光学望遠鏡の観測結果と組み合わせる「マルチメッセンジャー天文学」の幕開けとなりました。

2019年 KAGRA 完成

2019年、KAGRAは完成しました。時空の小さなゆがみを検出するための慎重な調整を経て2020年2月に観測運転を開始しました。同年4月にLIGOグループに属するドイツのGEO600と共同観測を行い、2023年5月には米国LIGOとの共同観測を開始しました。今後も感度を高めつつ国際共同観測を続け重力波天文学の更なる発展を目指します



Photo: Enrico Sacchetti

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を得て推進されています。



東京大学宇宙線研究所 重力波観測研究施設
〒506-1205 岐阜県飛騨市神岡町東茂住 238
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>

大型低温重力波望遠鏡 かぐら

KAGRA

東京大学宇宙線研究所
重力波観測研究施設

2023年6月

「重力波」とは？

宇宙空間をつたわる「時空のさざなみ」
アインシュタインが1916年に予言

重力波は、1915年から1916年にかけて出版された、アインシュタインの一般相対性理論の中で予言されました。一般相対性理論では、物体と物体の間にはたらく重力は、物体の質量がつくる「空間のゆがみ」によってもたらされると考えます。そして、そのような物体が動くと、つくられたゆがみは波となって宇宙空間を光と同じ速さでつたわります。これが、時空のさざなみとも呼ばれる「重力波」なのです。



観測できそうな重力波を出す天体現象

星ほどの重い物体が動いたり、合体したり、爆発したり…

質量を持った物が運動すると、必ず重力波が発生します。皆さんが腕を回しても重力波は出ているはずですが、その重力波はあまりに小さく、現在の人類の技術では検出できません。人類が「検出」できそうな重力波を発生させるのは、星のような重い物体がお互いの周りをぐるぐるまわりながら合体したり、吹き飛んだりといった現象です。星が一生を終える時に起こる超新星爆発や、中性子星やブラックホールの連星運動とその合体、そして宇宙の誕生のようなすさまじいエネルギーを放出する天体現象などが考えられます。



重力波をとらえる

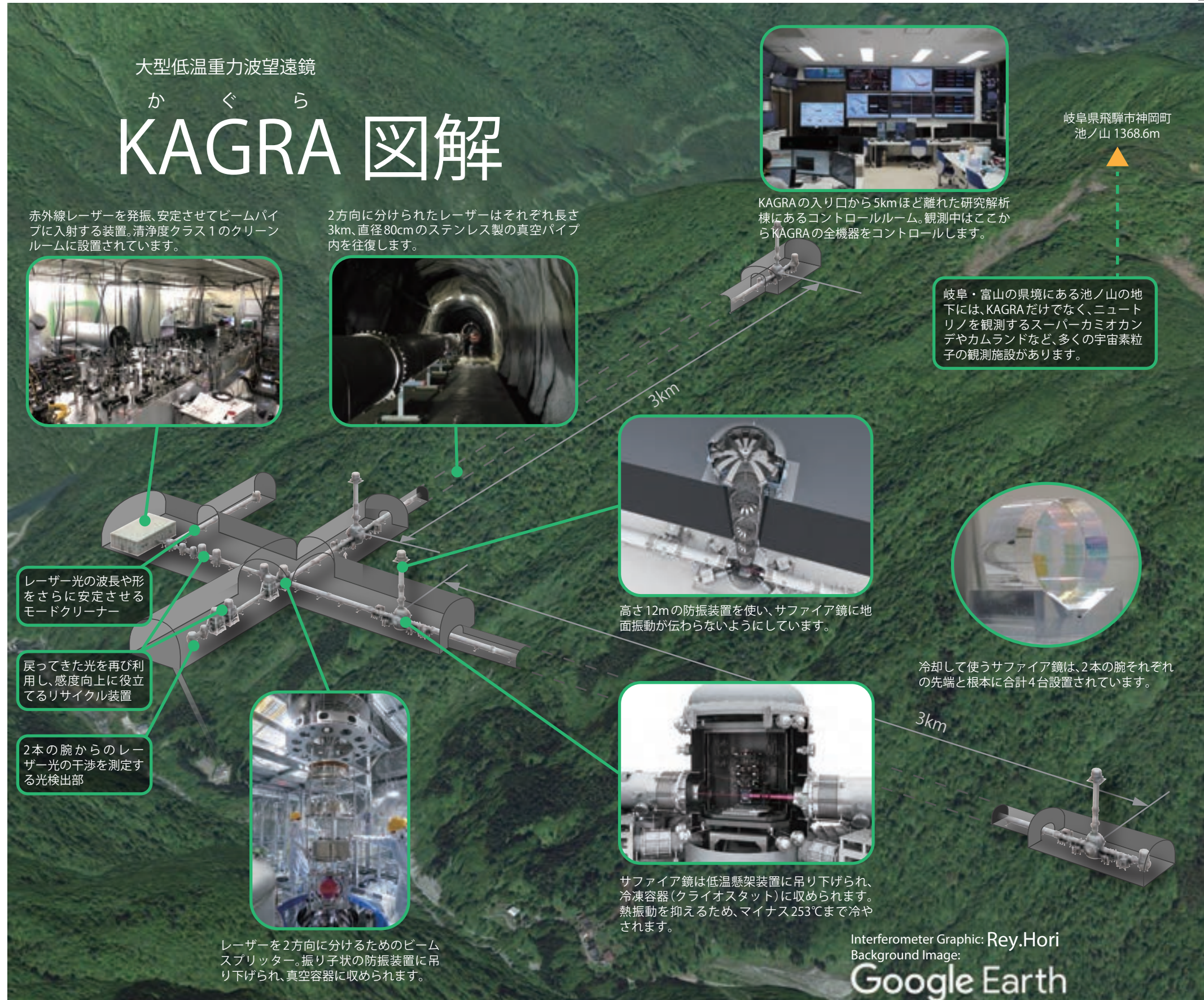
地球と太陽の間が水素原子1個分伸び縮み

宇宙のすさまじい現象で生み出された重力波でさえ、地球に届くまでに大変ちいさなゆがみになってしまいます。KAGRAが捉えようとしている重力波のゆがみの大きさは、 10^{-21} 程度、つまり、地球と太陽との距離(約1.5億km)が水素原子1個分(約1千万分の1mm)伸び縮みする程度の小ささです。

小さなゆがみを捉えるレーザー干渉計

そんな小さなゆがみをどうやって捉えるのでしょうか。KAGRAは一辺3kmのL字型の腕の両端に置いた鏡の間でレーザー光を往復させ、腕の長さのほんのわずかな変化をレーザー干渉という技術で捉えます。重力波望遠鏡は、巨大で精密な「ものさし」なのです。

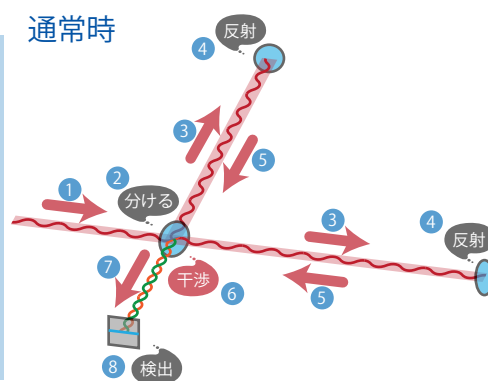
KAGRAでは、わずかなゆがみを捉えるため、様々な工夫がされています。レーザー光を反射する鏡は、地面から振動が伝わらないよう、振り子のような「防振装置」に吊り下げられています。また、地面振動そのものを小さくするため、地下にトンネルを掘って設置されました。さらに、鏡の熱振動を抑えるため、冷凍容器(クライオスタット)の中でマイナス253℃まで冷やされます。そして、レーザー光が空気で散乱したり揺らいだりするのを避けるため、装置全体は真空槽に入れられています。他にも、感度を高めるための様々な工夫が取り入れられています。



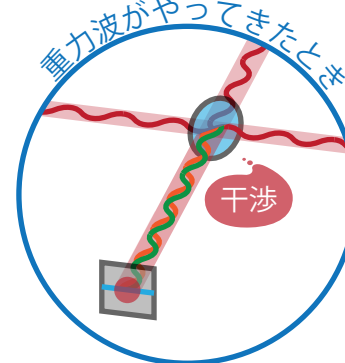
レーザー干渉計の仕組み

- 1 レーザーを発振する
- 2 ビームスプリッターの鏡で直進する方向と90度直交する方向の2つの光に分ける
- 3 レーザー光がうでの先まで進む
- 4 うでの先にある鏡で反射する
- 5 反射したレーザー光が戻ってくる
- 6 2本のレーザー光が混ざり合って干渉する
- 7 干渉したレーザー光が進む
- 8 干渉したレーザー光の信号を検出する

通常時



重力波がやってきたとき



2方向に分かれたレーザー光がうでの先にある鏡で反射されて戻ってきてふたたび重なるとき、レーザー光が干渉して光を強め合ったり弱め合ったりします。

通常時は山と谷が重なるように調整します。すると、2本のレーザー光が打ち消しあって信号は検出されなくなるので、この状態で重力波がやってくるのを待ちます(左の図)。

重力波がやってくると、2本のうでの長さが変わります。すると、2つの方向のレーザー光が進んだ距離がわずかに変化し、山と谷の重なり方が少しだけずれます(右の図)。このときに現れる干渉光を観測し、重力波の信号を検出します。