

## 重力波望遠鏡 KAGRA

大橋 正健  
Ohashi Masatake

### 1. ついに重力波が検出された！

2016年2月11日、宇宙天文分野で特大のニュースがワシントンから発信された。それは、14億光年先の連星ブラックホールの合体が重力波によって観測されたというものであった。重力波とは、一般相対性理論から予言されていた時空のさざ波で、「アインシュタインの最後の宿題」として、多くの研究者がその検出一番乗りを目指していたものである。その課題について決着がつき、一般相対性理論の正しさもあらためて確認できたということになる。世界では1960年代から重力波をとらえようという努力が続けられてきたのであるが、それがあまりに微弱なため、実現には予言から100年の歳月が必要であった。以下では、この長い道のりと、これから始まる重力波天文学のために建設が続く重力波望遠鏡 KAGRA (図1) について解説する。



図1 KAGRA のイメージ図

### 2. 重力波とは何か？

重力波はアインシュタイン方程式を線形近似（物質が無く、時空がミンコフスキー空間からわずかにずれているという意味）したときに得られる波動解であり、その存在はアインシュタイン自身により1916年に予言されていた。一般相対性理論では時空の曲がり（重力）と重力を表裏一体の関係にあるとしているので、この波は時空を揺らしながら光速で伝播していくことになる。波としての性質は電磁波に似ていて横波であるが、電磁波が双極子輻射を持つのに対し、重力波では四重極輻射（図2参照）が最低次になっている。これは電荷にはプラスとマイナスがあるのに対し、質量にはマイナスのものが無いからである。電磁波はテレビアンテナのような直線の双極子アンテナで受信できるが、重力波を検出するた

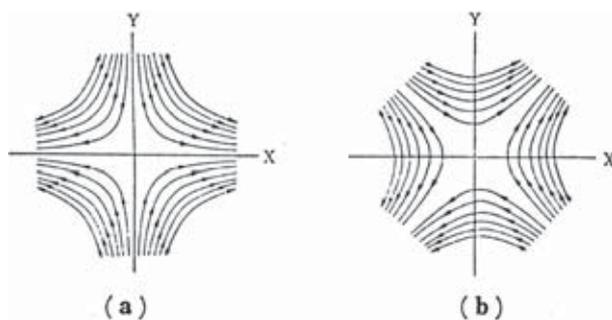


図2 重力波は四重極輻射であり、質点に及ぼす力は図に示すような潮汐力である  
45度傾いた2つの偏波、(a)+（プラス）モードと (b)×（クロス）モードがある

めにはマイケルソン干渉計のように四重極輻射の性質をうまく利用できるL字型のアンテナを使うのが良い。これについては後述する。重力波は非常に透過力が高く、その効果が源からの距離に反比例することも特徴である。

人間は地球の引力によって地上に垂直に立っているわけで、その意味で重力は身近なものであ

る。我々の体重も結局は重力相互作用の結果であるから、非常に強いと感じられることもあるが、実はこの相互作用は電磁相互作用に比べれば非常に小さいのである。そして、重力波の効果はさらに微かで、昨年とらえられた重力波では、地球と太陽の距離がたかだか水素原子1個分伸び縮みする程度である。このような現象を捉えるのはほとんど不可能に思え、もしかしたら重力波が存在しないのではないかという疑いも持たれた。しかし、重力波は確かに存在することがわかってきた。1974年、マサチューセッツ大のテイラーとハルスはアレシボ電波望遠鏡を用いたパルサー観測の結果、驚くべき事実を発見した。奇妙な振る舞いをするパルサーを見つけたのが事の発端であったが、それが連星系を構成する中性子星の1つであることに気づいた。そして観測を続けるうちに、連星の軌道公転周期が徐々に短くなっており、その現象が重力波の放出に起因すると仮定した一般相対性理論の予想値と一致することを発見したのである。当然ながらこの効果も微小なものであり、図3に示すように、約8時間の軌道公転周期が1年当たり76マイクロ秒ずつ短くなるという途方もなく小さな値であった。しかし、計算とのズレはわずか1%以下である。この発見には1993年度のノーベル物理学賞が授与されている。この連

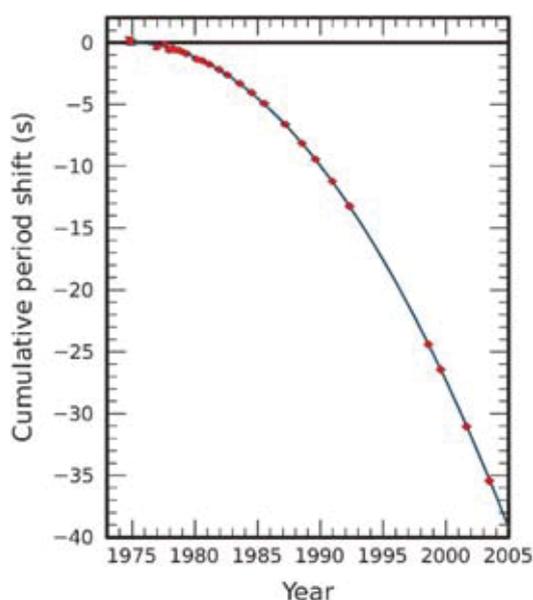


図3 重力波の放出による連星パルサー PSR1913 + 16 の軌道公転周期の減少を長期にわたり観測した結果  
実線で示す一般相対論の予想値と1%以下の精度で一致する (wikipedia より)

星中性子星 (PSR1913+16) は、重力波の存在を間接的に証明したわけである。

### 3. 連星中性子星からの重力波

連星中性子星は、その軌道公転周期が徐々に短くなることを前節で紹介したが、その最終的に行きつく先を想像してみよう。軌道公転周期が短くなるにつれ、軌道そのものも小さくなっていき、ついには2つの中性子星は合体してブラックホールを形成するのである。PSR1913+16の場合には、あと3億年ほどで合体すると予想されている。この最終段階では強力な重力波が発生する。もともと連星というのは最も効率良く重力波を発生する機構（重力波発生の計算ではダンベルが回転するモデルが典型的な例となる）であり、その連星が超高密度星（中性子星のようにコンパクトな星）で構成されていれば理想的である。最終段階で発生する重力波形はチャープと呼ばれ、図4に示すように徐々に周期が短く、かつ振幅が大きくなってゆく特徴的な波形である。合体直前の周期は約1ミリ秒（発生する重力波の周期はその半分となる）で、銀河中心で起きた場合の地球上での振幅を無次元歪で表せば $10^{-18}$ 程度である。このユニークな波形のおかげで、検出の障害となる様々な外乱の影響を低減することができるので、重力波検出器の最も期待されるターゲットであった。もちろん、3億年も待っているわけではなく、例えば乙女座銀河団の距離までに存在する多数の連星中性子星が合体する瞬間を期待していたのである。この頻度は数年に1回程度と見積もられている。また、この合体の瞬間が $\gamma$ 線バースト源になっているのではないかという予測もある。連星中性子星が合体した後にしばらく続くであろうブラック

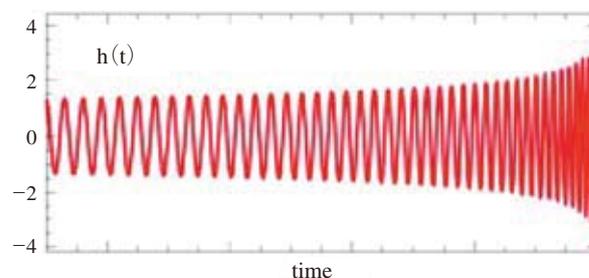


図4 連星中性子星が合体する直前に発生する重力波形  
チャープと呼ばれている。合体後はブラックホールの準固有振動により重力波が発生する

ホールの準固有振動も重力波を発生し、ブラックホール物理学を探るために重要である。

連星中性子星以外でも、質量をもって加速度運動する天体は全て重力波源になりうる。超新星爆発も有力な重力波源のひとつであるし、今回発見された連星ブラックホールなど、観測によって初めて明らかになる重力波源もたくさん存在しているはずである。

#### 4. 重力波の検出法

重力波検出の原理は、重力波によって引き起こされる2点間の距離の変化をとらえることである。しかも、極限的な測長が求められる。その中で、光の往復時間の変化を測るのがレーザー干渉計で、現在は重力波検出法と言えばこれである。この検出器の最大の特徴は、共振等を用いていないので重力波に対する応答関数が平坦で、観測帯域が広くとれることである。観測帯域が広いと、連星中性子星の合体前に発生する準周期的重力波（チャープ波形）を積分することができて、重力波検出可能性が飛躍的に増す。例えば、合体直前の「最後の3分間」を積分すれば、感度は50倍も高くなるのである。（この積分のために用いられる重力波形の雛型をテンプレートと呼ぶが、これはポストニュートン近似を駆使してつくられている。）また、重力波の効果は検出器のサイズに比例するので、他の検出法に比べはるかに大型化できることも利点となる。マイケルソン型レーザー干渉計では、直交する2つの基線に沿って進む光の往復時間に差があると、干渉によって光検出器に入射する光の強度が変化する。この強度変化を測定して重力波を検出するというのがレーザー干

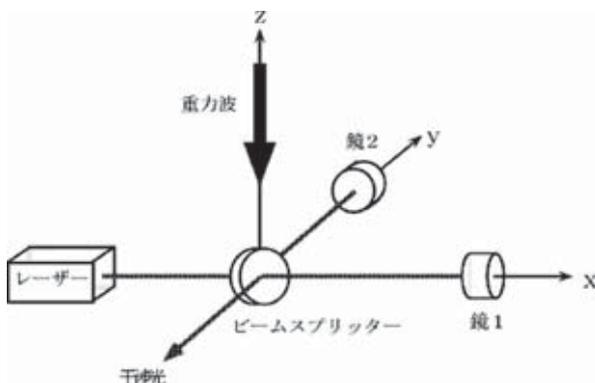


図5 レーザー干渉計は上下方向から来る重力波に最も高い感度を持つ

渉計型重力波検出器である（図5）。直交する2方向での差を見ているため、重力波が四重極放射である特徴をうまく利用できる。最適光路長は重力波の半波長（1 kHzの時150 km）であるが、このような長基線を地上で実現するのは困難なため、マイケルソン干渉計の腕をファブリーペロー光共振器で置き換え、等価的に光を折り返す方法が用いられる。

#### 5. 重力波観測の現状とKAGRA

地上レーザー干渉計の現状としては、まず、重力波を初観測したLIGO（図6）がある。LIGO計画ではアメリカの東西両海岸（ワシントン州とルイジアナ州）に基線長4 kmのレーザー干渉計を2台建設した。

また、ピサにイタリアとフランスが共同建設した3 kmのVIRGOがある。つまり、既に3台の巨大レーザー干渉計が動き始めており、2017年には同時観測をする予定である。目標は、約100万個の銀河の中で発生する連星中性子星の合体を観測するこ



図6 LIGOの2台のうち、東海岸（ワシントン州ハンフォード）にある重力波天文台



図7 建設中のKAGRA  
手前に低温ミラーを格納するための真空容器が見える

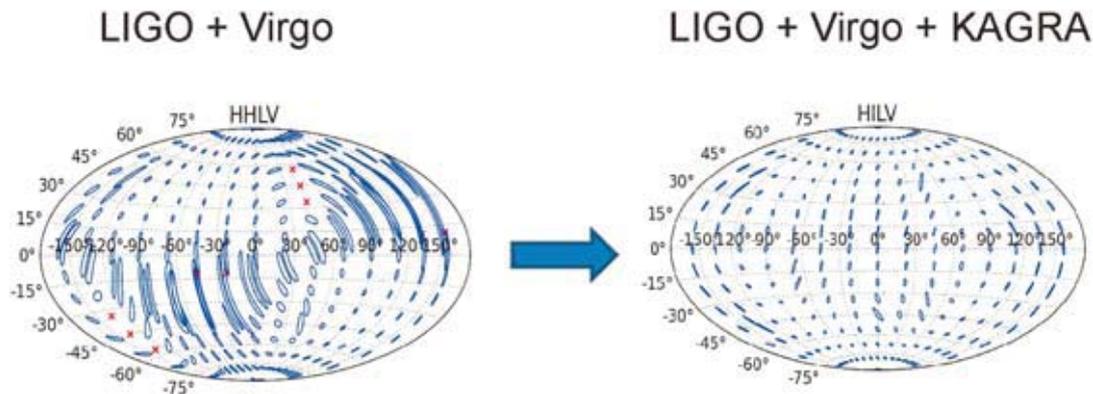


図8 KAGRA が観測ネットワークに参加することで、全天をカバーできるようになる  
S. Fairhurst, "Improved source localization with LIGO India", J. Phys.: Conf. Ser. 484(2014)012007

とであり、初期観測を終了した後に改造され、現在は第2世代の重力波検出器と呼ばれている。

このような状況の中、日本のKAGRA（図7）が建設中である。KAGRAは地面振動等の外乱に影響されにくい地下に設置され、熱雑音を低減するためにサファイア製のミラーを極低温（20 K程度）に冷却する先進的な低温レーザー干渉計である。そのため、KAGRAは第3世代の重力波検出器とも言えるもので、最終的にはLIGOやVIRGOをしのぐ感度を目標としている。日本の重力波研究者は、国立天文台三鷹キャンパス内に建設した基線長300 mのTAMA300によりLIGOに先んじてレーザー干渉計による本格的な重力波観測を実行し、神岡鉱山内に基線長100 mのCLIOを建設して低温レーザー干渉計の利点を実証してきた。このような準備のもとで2010年にKAGRAの建設に着手した。既に常温の試験運転を終了して、低温技術を組み込む作業を進めており、2018年からは低温レーザー干渉計として稼働する予定である。

さて、重力波初観測により開かれた重力波天文学の今後であるが、重力波源の方向を特定する重力波天文台ネットワークを構成するためには、少なくとも4台のレーザー干渉計が必要である。理論上は、信号の到達時間差と偏波の情報を利用して方向決定は3台で可能であるが、3台のレーザー干渉計全てが感度を持つ方向から重力波がやってくる保証はないので、全天をカバーするためには3台では足りないことになる。したがって、KAGRAの存在意義はとて大きく、実際にLIGO、VIRGOおよびKAGRAの観測ネットワークが構成されてははじめ

て、全天をカバーする重力波観測が可能となるのである（図8参照）。したがって、日米欧の3極構造の一員としての役割を果たすべく、なるべく早期の観測開始を目指して建設を続けているのである。

## 6. 終わりに

このような巨大な装置により重力波を観測することで何が知りたいのか？という問いがあれば、「まず、ブラックホールができる瞬間をとらえたい」というのがその答えである。これまで考えられていた一番ありそうなシナリオは、連星中性子星の合体によりブラックホールが生まれるという天体現象であった。しかしながら、その思惑は少し外れ、連星ブラックホールが合体するイベントがとらえられた。連星ブラックホールは、想像はされていたが、実際に存在するかどうかは誰にもわからなかったものである。しかも2回続けて検出されるほど大量に存在するなど、誰が想像しただろうか。この事実からもわかるように、宇宙はまだ謎だらけと言える。その中で、重力波は我々がまだ見たこともない天体情報を持っている。ブラックホールだけでなく、様々な天体から来る重力波を観測することで21世紀の天文学を大きく進めることができると信じている。

（東京大学宇宙線研究所重力波観測研究施設長）

\*当協会の学術誌「RADIOISOTOPES」Vol.66 No.2（2017年2月15日発行）にて、総説「宇宙を観測する新しい窓・重力波」を掲載する予定です（著者：三代木伸二先生）。KAGRAについてもご紹介いただいておりますので、ご興味のある方はぜひそちらもご覧ください（事務局）。