

# 重力波の観測(4)観測技術について

中嶋 浩一 (一橋大学大学院社会学研究科名誉教授)

締め切り間際に原稿を書くのは悪い習慣と思っていたが、必ずしもそうではなかった。今回の原稿の締め切りの直前に、新たなニュースが入ってきたのだ。2015年9月の最初の観測からわずか1年3ヶ月、本年1月4日に3度目の重力波が観測されたとのことであった。

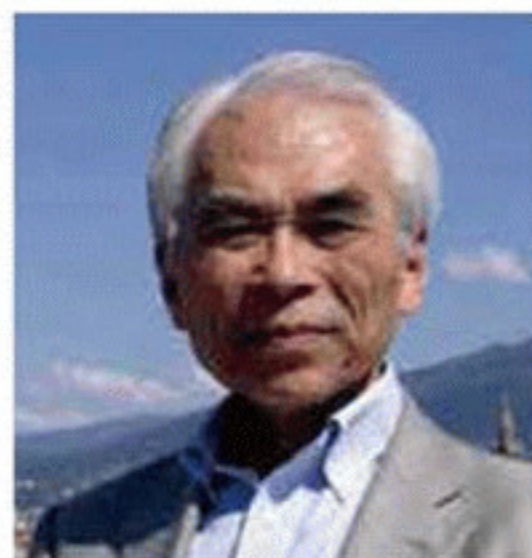
今回のイベント(このような突発的な現象を「イベント」と呼ぶ)も、最初のものと同様、大型ブラックホールの合体であったが、前回のものが13億光年の遠方であるのに対し、今回のものは20億光年とさらに遠方のものを捕らえたという。また合体前の2つのブラックホールの自転の回転軸、すなわち「自転軸」が、前回のように「公転軸」と平行ではなく少なくとも一方が傾いていた、とのことである。これは、2つのブラックホールがそれぞれ独立に形成された後、接近してペアとなったということの意味している。一連の重力波観測で浮かび上がった新たなナゾ、すなわち「太陽の数十倍の質量の大型ブラックホールはどのようにして形成されたか」というナゾに、また新たな手がかりがもたらされた。

あの小柴さんのノーベル賞のニュートリノ観測は、1987年の観測からすでに30年経ったが同様な現象はまだ観測されていない。重力波天文学が先にダッシュを始めてしまったようだ。しかしニュートリノ観測も、規模をさらに大きくする計画があり、実現すれば同様のダッシュが始まるに違いない。

さて今回のテーマは、重力波観測で用いられている高度な技術の説明である。そしてさらに、本連載の主テーマである「これらの最先端の知識・技術と私達の日常との関わり」についても考察する。

まず重力波観測技術のどんなところがすごいのか、簡単にまとめると：

1. 重力波は「時空のゆがみ」の波動であり、観



測はとりあえず空間のゆがみを測定する。そしてそのゆがみの大きさは、観測装置の大きさ4kmに対してわずか0.00000000001mmである。これを測定するのである！

2. 観測装置は「地面」に設置されるのであるが、どんなに静かな山間僻地でも地面はかなりの大きさで振動している。これは地震のみでなく、海洋の荒波が遠くで岸に打ち寄せるだけでも起こるといふ。その振動の大きさは0.003mmにも達する。他にもダンブトラックの通過による振動などもかなり大きい。そしてこれらの振動が装置に伝わらないようにするために超高度な免震構造が必要である。

3. 免震構造で振動を除去してもまだまだ大きな「ノイズ」が残る。そしてこれはコンピュータによるデータ処理技術で克服する。文字通り、干し草の山から針を一本探し出すのである。

これらの実現のために、装置の細部それぞれの部分(例えば反射鏡表面の研磨精度など)に最先端の超高度な技術が用いられているのであるが、残念ながら細部については割愛する。これらの超高度の技術は何も重力波装置だけでなく、「すばる望遠鏡」や、ヒッグス粒子を見つけた粒子加速器「LHC」などでも同様に多用されている。

それではまず、空間のゆがみを精密に測定する方法について説明しよう。

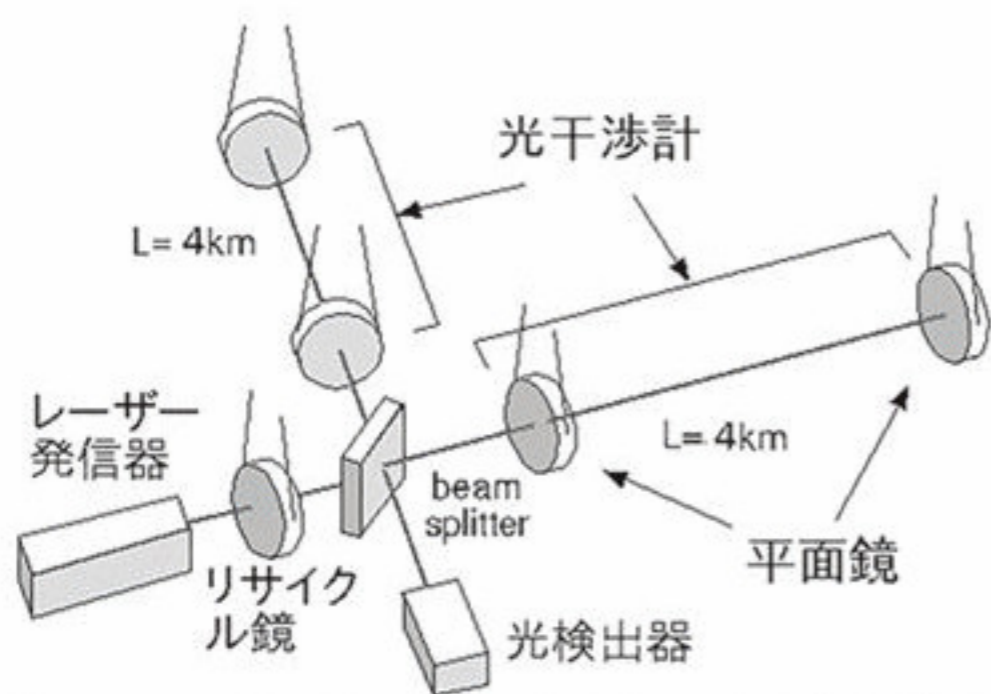


図1. 光の干渉計によって、空間のゆがみを測定する。(図は、国立天文台三鷹の重力波装置TAMA300のものを加工して使用。)

連載第2回でも述べたように、空間のゆがみは「2地点間の長さの変化」として検出され、また長さの変化は「光の物差し」を使って測定する。光は0.001mmという小さな波長の波動であり、これが物差しの目盛りとなる。そして「干渉法」という技術を用いれば、これの1000分の1くらいまでは測定できる。

さらに、ゆがみを測定する長さは4kmということになっているが、これは図1のように両端に平面反射鏡を置き、「鏡の間」のように何度も反射させて距離を拡大する。反射の回数は100往復以上であるというから、1000km近い長さを測ることになる！

こんなような方法で前述の0.00000000001mmを実現するのであるが、そのためには超高精度の平面鏡、超高反射率の反射面、光が減衰しないような超高真空、などの多くの技術がこれを支えていることは言うまでもない。

次に「振動の除去」について説明する。

「免震構造」は、地震に対する建物の揺れを少なくするという目的ですでにいろいろなものが開発されているが、基本的にはゴムのような弾力のあるもので外部の振動を遮断するという方法を用いる。しかしこのような方法は、特定の振動数の振動（例えば周期数秒の振動）が来た時に「共鳴」という現象を起こし、かえって大きな振動が発生してしまうということがある。高層ビルではこのようなことが起こって、上層階ではゆっくりした気持ちの悪い大きな揺れが来る、ということをよく聞く。

この共鳴を制御するのが「制振構造」で、振動のエネルギーを吸収する「ダンパー」という装置を用いる。あるいは大きなおもりをビルの最上階に置いて、これを振動の反対方向に動かして振動を制御する、などの方法がある。

重力波装置も、原理的にはこれと同じである。振動の除去は、前出の図1の干渉計の反射鏡の部分について重点的に行われる。図1で見ると、反射鏡はヒモのようなもので吊り下げているが、まずこれによって水平方向の揺れが大きく除去される。そしてこれらをさらに板バネを介して吊り下げることにより、垂直方向の振動を除去する。これを図2のように何重にも重ねて使用することによって、振動を劇的に小さくすることができる。

(反射鏡のところに住居を作ることができれば、地震のない快適な住空間ができるのだが。) もちろん、ダンパーなどの制振機構にも高度な技術が用いられていることは言うまでもない。

実は振動は地面のものばかりではない。物体が熱を持っているとき、物体を構成する原子分子は細かく振動しているのであり、これによる影響を「熱雑音」と呼ぶ。これを避けるには、物体の温度を下げるしかない。今回初めて重力波を観測した米国のLIGOという装置は、特にこのような冷却を行っていないが、近く稼働を開始する日本の装置KAGRAは、図2の装置全体をマイナス250℃まで冷却しており、他にない新たな発見が期待される。

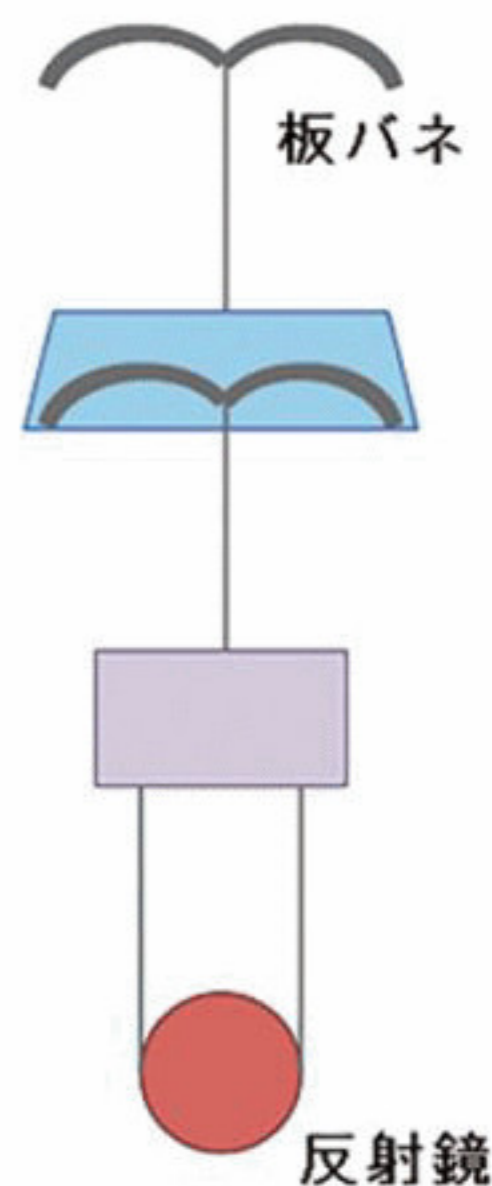


図2. 免震、制振装置。(図は、2016年日本物理学会、奥富氏の報告より引用。)

さてこのような振動除去の努力を極限まで追求しても、まだまだ重力波よりもずっと大きな振動が残ってしまう。実際の重力波の効果を「信号」

と呼ぶのに対して、これらの振動の効果を「雑音」、「ノイズ」と呼ぶ。LIGOの最初の観測では、ノイズの振動の大きさは信号のその1000倍もあったという。

これからがコンピュータによる情報処理の出番である。ノイズには、単調かつ規則的な繰り返しのような振動もあれば、逆にまったく規則性のない、いわゆる「ランダム」な振動もある。前者はその規則性を利用してそのノイズを合成し、それをデータから引き去ってしまえば除去することができる。人間の耳でも、単調な音の繰り返しはそのうちに意識できなくなってしまうがこれは日常よく経験することである。

次にランダムノイズであるが、これはデータ量を増やし、多くのデータを平均化すれば小さくすることができる。世論調査などでおなじみのことと思う。

残念ながら、人間の耳ではランダムノイズを小さくすることはできないが、人間の脳はまた一つ優れた情報処理能力を持っている。それは「特定の音を聞き分ける」という能力である。どんな雑踏の中でも母親は自分の子供の声を鋭く聞き分ける、という例がわかりやすい。脳の中でどのような操作が行われているか、まだよくわかっていないが、おそらく脳の中には特定の信号のみを受け入れるフィルターのようなものがあるのではないかと考えられる。

このフィルターをコンピュータの中でデジタルに実現するのであるが、考えただけでも大変複雑なプログラムになることがわかる。天文学者が重点的に狙っている重力波現象は、さしあたり中性子星やブラックホールの合体現象であるが、これは本連載の3回目にもあるようにかなり特殊な、小鳥のさえずりのような信号であることがわかっている。したがって、このようなデジタルフィルターが威力を発揮する。このようにして今回の大発見が行われたのであった。

余談であるが、人間でも発達障害によって脳の一部に異常がある場合、このような特殊フィルターが働かないということがあるらしい。このような人は、授業中など、校庭の雑音と先生の話とが聞き分けられず、授業にまったく集中できない「問題児」になってしまうという。脳の機能さえ

回復できればまったく普通の人になれるのだが。

最後に、これらの超高度な技術を開発・利用して宇宙を究めるといふことの「意味」を考えてみよう。

よく言うように、これらの高度の技術開発がいずれは私たちの暮らしに役立つのだ、ということがある。例えば、長さの測定でなく時間の測定の技術であるが、現代科学は「原子時計」によって10億分の1秒という超高精度の時間をキープできるようになっている。こんなに高い精度は日常生活に何の必要性もないと思われるが、現在これを衛星に利用することによって「GPS」が運用されており、私たちの暮らしに計り知れない利益をもたらしている。

ただやはり、すべてがこのように役に立つわけではないことも確かである。ほんのわずかな有効活用の可能性のために多大な労力を費やすのは、あまり説得力のある考え方とは言えないだろう。

宇宙や自然界、身の回りのいろいろなナゾに迫り、一つでも多くそれを解明し、一步一步自然のヴェールをはがしてゆくという作業に、それ自体を目的とする一つの大きな「意義」を認めるべきではないだろうか。もちろんこれは日常生活にある程度の余裕があつてのことであるが、余裕のない中であっても「私たちはなぜこの世に生きているのだろうか」という問いかけが心に浮かぶことはないだろうか。

重力波に関する連載も、この4回で一区切りとする。しかしどうも近い将来、またまた新たな連載をしなければならぬような大発見がありそうな予感がする。ご愛読、ありがとうございました。

#### プロフィール

1942年、群馬県生まれ。大学院天文学専攻課程修了後、東京天文台（現国立天文台）に勤務。当時はまだ日本標準時は天文台の天体観測から決められており、これに関係した観測や研究を行った。その後標準時は原子時計で決められるようになり、天文台の観測は終了。これを契機に一橋大学に移り、一般教養科目および情報科学の教育を担当した。このころちょうどインターネットの普及が始まり、これに合わせてデータベース天文学の研究を始めて、国立天文台天文データセンターの整備運営に協力した。現在も天文データ整備の研究を行いつつ、一般教養教育の経験を生かして天文学普及活動に積極的に関わっている。  
駿台天文講座・駿台天文台 教育顧問