

# 未知の可能性を秘める 重力波の検出

基礎物理学専攻  
宗宮 健太郎 研究室

宗宮 健太郎 准教授 1975年岐阜県生まれ。東京大学工学部物理工学科卒業。東京大学新領域創成科学研究科博士課程修了。2011年より東京工業大学理工学研究科物理学研究流動機構准教授。



宗宮研究室では近年物理分野で最も注目を浴びている分野のひとつである重力波についての研究を行なっている。宗宮先生自身、重力波検出器の製作に携わっており、近々完成予定の検出器 KAGRA においてプロジェクトの中心的メンバーとなって最先端で活躍している。本稿では重力波を理解するための補助となる知識とともに、宗宮研究室の研究内容について触れていく。

## 相対論と重力波

皆さんは重力波という言葉を目にしたことがあるだろうか。現在重力波は理論面、実験面での研究が進み、科学雑誌で取り上げられることも多くなってきた。宗宮研究室では今まさに発展している重力波の検出についての研究を行なっている。検出のための研究は世界中で行われているが、現段階では検出には至っていない。しかし検出に成功すればそれは歴史的発見となるのだ。

重力波について紹介する前に、そもそも重力に対する考え方がどのように発展してきたのか見てみよう。今からおよそ300年前、ニュートンは質量をもつ物体同士は引き寄せあうという現象の原因こそが重力であるとした。しかし当時は、なぜ引き合うときに物体同士が互いの方向を知りうるのかという疑問に答えることができなかった。それに対してアインシュタインは、質量をもつものが存在するのならば、それによって空間の歪みが

でき、その結果ほかの物体にはたらく力こそが重力であるとした。

アインシュタインはどのようにして質量が空間の歪みを生み出すという結論に達したのだろうか。その答えを導くのが一般相対性理論の考え方である。一般相対性理論では、加速度運動している状態と重力がはたらいている状態は等しいものであるという事実を用いており、これを等価原理と呼ぶ。例えば、地球からの重力の影響を受けない遠い宇宙へ行き、ロケットに乗って加速度運動すると、乗っている人は重力のような力を感じる。一方で地上にいる人にとっても同じように重力がはたらいているはずだ。したがって、目隠しをしてロケットに乗り込むのなら、この2つの状態を見分ける手段は我々にはない。ここで宇宙空間での思考実験を試みることにする(図1)。加速度運動しているロケットに乗っている人が、光線銃でパルス状の光を放ったとしよう。この光はロケットが加速度運動をしているため、外部の静止して

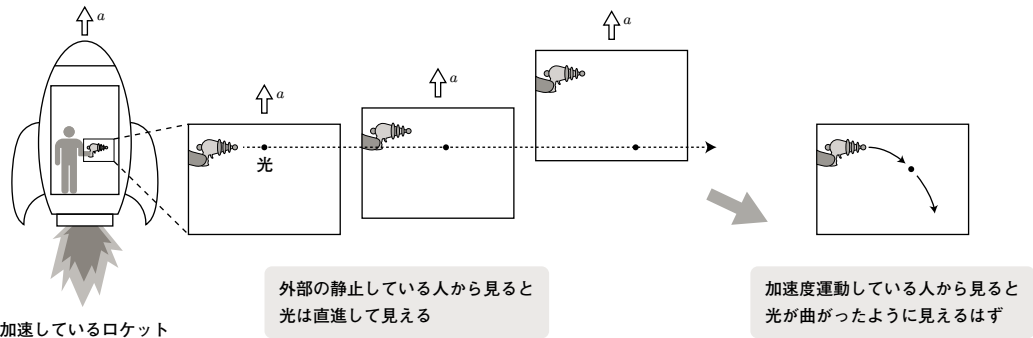


図1 アインシュタインの思考実験

いる人から見れば光は直進するが、ロケットに乗っている人から見れば曲線を描くように見えるはずだ。するとアインシュタインが提唱した等価原理から、重力がはたらいたため光が曲がると考えることができる。だが、光はある二点間を最短距離で進むという特性をもっているため、直線的に進むはずである。したがって、この思考実験において光が曲がった理由は、重力によって空間そのものが歪んだことに他ならないのである。アインシュタインはこのような着想から重力に関する考え方を深めたのだ<sup>1)</sup>。

アインシュタインの定義した重力はトランポリンのようなゴムシートの上に重いものを乗せた時の状況にたとえられる(図2)。ゴムシートの形状を空間の歪みとすると、その歪みの影響によりゴムシートの上に乗っている石や砂は高質量の物体に引き寄せられるような力を受ける。これが重力のイメージである<sup>2)</sup>。

一般相対性理論に基づき考えると理論上観測可能だと予想されている物理現象が4つ存在する。水星の近日点移動、重力赤方偏移、重力レンズ、そして重力波だ。これらのうち実際に観測に成功していないのは重力波だけである。重力波の検出に成功してはじめて一般相対性理論が完全に裏付けられる。したがって、現在重力波の検出に大きな期待が集まっているのだ。

その重力波とはどのようなものなのだろうか。先に述べたとおり、質量は空間の歪みを作り出す

が、質量が運動するとどうなるだろう。空間の歪みも運動するのだ。重力波とは、質量をもつ物体が原因で生じた空間の歪みが振動し、波となったものなのである。そのため、重力波は通過する空間を幾何学的に変化させながら伝わる性質をもつ。

重力波は質量をもつ物体が加速度運動をしたときに生じる。つまり、恒星が他の恒星の万有引力の影響で加速した場合や、恒星がそれ自体の万有引力により内部に凝縮、反発して爆発する場合などに生じるのだ。

重力波を検出することで何がわかるのだろうか。検出が可能な重力波は、人間が近づいて調べることのできない中性子星やブラックホールといった巨大な質量をもつ天体の運動によって生じる。したがって、重力波を検出し、その振動数や振幅を調べることによって、今までは電磁波を通しての表面的な観察しかできなかった中性子星の内部

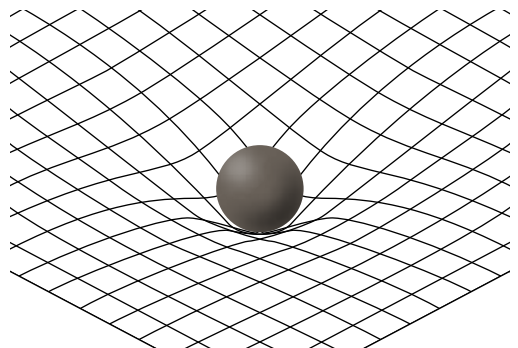


図2 重力のイメージ

1) スティーブ・L・マンリー『アメリカ最優秀教師が教える 相対論&量子論』講談社、2011年、p.80-81

2) キップ・S・ソーン『ブラックホールと時空の歪み——アインシュタインのとんでもない遺産』白揚社、1997年、p.26

構造や、宇宙空間のどこにブラックホールが存在するのか、そしてその質量はどの程度かといったことがわかる。さらには重力波は障害物を通過しても減衰することがないため、宇宙が誕生した時代に発生した重力波を観測すれば宇宙のはじまりについての情報まで手に入るのである。

重力波の検出は、アインシュタインの一般相対性理論の観測的な裏付け、そして天体や初期の宇宙の状態について調べる新しい手段、という2つの面から期待されている物理学の重要な課題なのである。一般相対性理論は理論面について言えばほぼ完成品となっているが、観測的な部分は未完成であり、重力波の検出に成功してはじめて完成したと言えるのだ。

### 重力波の観測—— $10^{-21}$ への挑戦

では、重力波はどのように検出されるのだろうか。重力波の検出というテーマは宗宮先生の研究に直結するものだ。重力波は先に述べたとおり、空間を伸び縮みさせながら伝わる。つまり、ある二点間の距離を変化させながら伝わるのである。現在の検出器ではこの性質を利用して観測が行われている。

現在観測に用いられている形になるまで検出器はさまざまな形をとってきた。1960年代後半、ウェーバーが初めて検出器の製作に取り掛かった。彼は特定の振動数に対して大きく共振するアルミニウムの塊を使って重力波観測を行なった。

ウェーバーが観測を始めて以来、世界中の物理

学者が重力波観測に関する研究を進めてきた。それに伴い重力波検出に向けての動きが活発化し、観測の技術は進化し続けてきたのだ。

1995年、日本では検出器TAMA300の建設が始まり、2002年にはアメリカでLIGO、その後ドイツやイタリアでも観測が始まった。そして最先端の重力波検出器は岐阜県の神岡鉱山内に完成予定のKAGRAである。

1990年代以降に誕生した検出器も含め、現在主流となっている検出器はマイケルソン干渉計をベースとした干渉計型検出器だ。ウェーバーの検出器は特定の振動数の重力波しか観測することができない構造であった。しかし干渉計型検出器を用いれば空間の歪みによって生じる距離の変化に着目することができるので、あらゆる振動数の重力波の検出ができる。すると検出に成功する可能性が格段に上がるのである。

光の干渉を用いた干渉計型検出器の仕組みを見てみよう。実際は検出器の大きさには限りがあるためKAGRAにはレーザーの光を増幅させる鏡が設置されているが、ここでは簡略化して示すことにする(図3)。干渉計型検出器でははじめにレーザー光が中央のハーフミラーに到達する。ハーフミラーは半分的光を反射し、残りの半分的光を透過させる。次にその光がそれぞれの進行方向にある鏡に反射してハーフミラーに戻ってくるが、そのときに光が干渉し、その様子が光検出器によってとらえられる。鏡間の距離が変化していない状態のときは、光検出器に到達する光は位相が真逆になるので、弱めあう。一方、重力波によって光

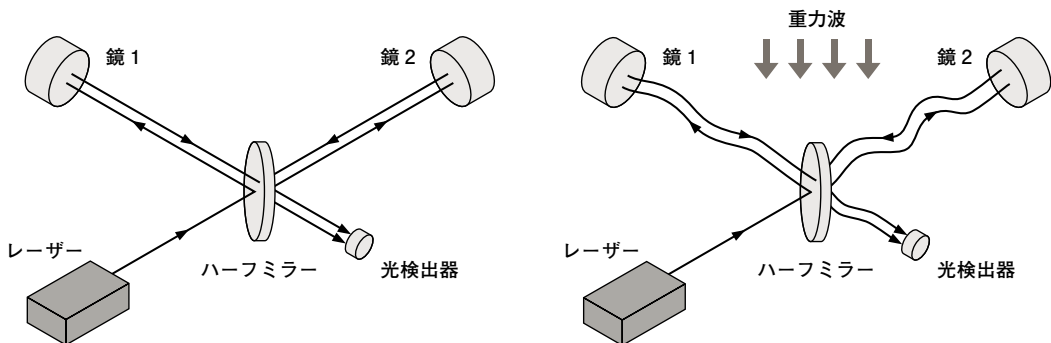


図3 干渉型検出器

実際のKAGRAには、ハーフミラーと鏡1、鏡2、レーザー、光検出器の間にレーザー（信号）増幅のための鏡が設置されている。

の通過している空間が歪められたのなら、光検出器に到達する光の位相が通常とは異なるので、光は弱めあうとは限らない。そのわずかな干渉の変化や光の到達時間の差が、重力波によって光の進んだ距離がどのくらい変化したのかを示す。この情報を用いることにより重力波の振動数や振幅を計測することができる。

現在観測対象として最も注目を浴びているのは、中性子星連星の運動によって生じる重力波である。この運動は、2つの中性子星が互いに回転し、その回転周期を縮めながら近づき、最終的に合体して1つの星になる運動である（図4）。中性子星とは質量の大きな恒星が内部の重力により圧縮されて小さくなった星のことで、中性子のみで構成されている。半径は10 kmほどととても小さいが、太陽並みの質量をもち、天体の表面で観測できる重力が地球の $10^{12}$ 倍にもなる。2つの中性子星の合体の過程におけるエネルギー保存則を考えると、2つの星が近づき回転周期が縮まった分、何らかの形でエネルギーを放出しなければならない。そのエネルギーは地球に到達する程度の大きさの重力波という形で放出されることが予想されている。

中性子星の合体の過程から生じる重力波では、その中性子星の運動や重力波の強さが物理法則に基づいてあらかじめ計算されており、時間と共に徐々に振動数と振幅を増しながら1.5 kHz付近で合体することが知られている。KAGRAの場合、100 Hz付近で、地面の振動やブラウン運動に起因する鏡の熱揺らぎといったさまざまな雑音の合計が小さく、雑音と重力波の区別が最もはっきりするため、100 Hz付近でもっとも効率良く信号を取得することになる。したがって中性子星連星から発せられる重力波は現在の検出器において一番感度の良い周波数帯での観測が期待されているのだ。

中性子星連星は地球から $3 \times 10^{16}$  km離れたところで存在するが、このくらい離れたところで中性子星の運動が起こった場合、地球に届く重力波の大きさは1 mの距離が $10^{-21}$  m伸び縮みする程度の大きさでしかないことがわかっている。

1 mに対しての $10^{-21}$  mの世界は物凄く小さな世界だ。地球と太陽の間にある水素原子の動きを考

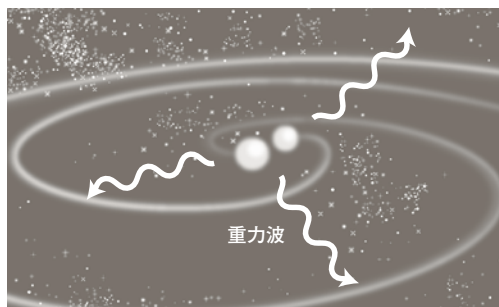


図4 中性子星連星による重力波の放出

えるような小さいスケールの話である。したがって我々の想像をはるかに超えるような観測精度が必要となる。

観測精度を向上させるために、最先端の検出器KAGRAではどのような工夫がされているのだろうか。KAGRAは地面の振動を最低限に抑えるために鉱山の中に製作され、さらに熱による分子の振動を抑えるために鏡は20 Kまで冷却される。また、光を反射させる鏡にはサファイアが用いられている。サファイアは反射性に優れているのみならず、低温の状態でも熱が伝わりやすいという性質をもっている。そのため低温まで冷やすことができるのだ。熱によって生じる雑音を抑えなければならない重力波検出器にとって、サファイアは最も適した材質なのである。鉱山内の立地、20 Kまでの冷却、サファイアの利用といった取り組みは、世界中のどの検出器にも見ることのできないKAGRA独自の工夫である。

また、検出の信憑性を向上させるために重力波検出器は世界各国に設置されている。重力波は光速で地球に到達するため、その影響は地球に対してほぼ同時に及ぼされる。したがって、検出器が設置されているいくつかの国で同じデータをとることができるはずだ。

現在ではおよそ100 Hzの周波数をもつ雑音においては1 mに対しての $10^{-23}$  m、つまり $10^{-23}$ 程度までなら感知できるようになっているが、中性子星連星の運動によって生じる重力波は数秒ほどで通り過ぎてしまう。したがって、観測データを処理した際に $10^{-21}$ 程度の感度に上げるためには、雑音検出レベルを100 Hzで $10^{-24}$ 程度にまで高める必要がある。

## 宗宮研究室のこれから

先生の研究室に入るとまず目に入るのは研究室規模のレーザー干渉計、そして細かい分析をするために使うコンピュータである。観測精度向上のためには、幾度となく行われる検出器での原理検証実験や、コンピュータでのシミュレーションが欠かせないのだ。宗宮先生が研究室をあげて携わっているのは、重力波検出に向けての中核部分となる研究であり、実験面、理論面双方からの研究を行なっている。では、具体的に先生がどのようなことを行なっているのか見ていこう。

実験面においては、鏡やレーザー光の発射部分などの特定の部位がどのような構造であれば一番良い精度が期待できるのか、規模を統一的に小さくした検出器を用いて研究している。例えば、400 kWのレーザーを実験室で準備するのは危ないが、その代わりに4 Wのレーザーを準備する。鏡も本来20 kgのものを0.2 gとして検証を行うことで、元のサイズで実験を行なったときと同じ現象を観察することができる。このような検出器を製作して、研究室の中で原理を検証し、良いものができあがったら実際の検出器に導入するのだ。特に最先端の検出器KAGRAでは、新しい取り組みがなされていることもあり、原理検証は慎重に行わなくてはならない。そういった面でこのような実験は重要なものとなっている。

理論面においては主に量子雑音についての研究が行われている。量子雑音とは光の量子性から生じる雑音である。光は光子と呼ばれる素粒子の流れとして捉えられ、確率的な分布をもつ。そのため、単位時間あたりに流れる光子の数には揺らぎが存在する。この揺らぎにより光子が鏡に与える運動量にも揺らぎが生じ、重力波の観測に雑音を及ぼす。先生はこういった量子雑音を減らすために、どのように対処すれば良いのか研究している。

観測においてはハイゼンベルグによる不確定性原理から生じる観測の限界についてを理解しておく必要がある。鏡の変位において、測定精度を上げれば上げるほど運動量に不確定性、つまり揺らぎが出てくるのだ。現在この量子的な限界を超えるために光バネや量子制御といった最新の理論

が応用されている。

先生はこれから先の目標として、まずは検出器KAGRAの完成、そして新しい原理を用いた新型検出器の開発を掲げている。さらに先には重力波の検出データを用いて、まだ誰も到達したことのない新しい物理を発見することを目指している。既存の物理知識のみでは説明のつかない物理がこれから先きっと出てくるだろう。

重力波の検出に成功するまでにはあらゆる困難を乗り越えなければならず、とても大変だ。一体、何が先生をそこまで重力波に没頭させるのだろうか。先生は小さい頃からドラえもんが好きだった。中でもタイムマシンに魅せられていた。どうやったらタイムマシンを作れるのか、作ることができるか、とすればその仕組みはどうなっているのか、といったことについて考えていた。そうしてだんだんと、自然科学に関する興味をふくらませてきたのだ。大学生になるとおのずと重力というものに興味をもち始めた。重力は時空と深いかかわりがあり、タイムマシンを作る基盤となる知識になるかもしれない。そのような状況の中、重力に関しての研究を進める研究室に偶然巡り合い、その研究室で先生は重力波に出会ったのである。ここで新しい可能性を秘めた重力波というものに強く興味を抱いた。これが先生の重力波研究の始まりである。

宇宙に思いを馳せ、初心を貫き通し、重力波の検出に携わる先生の姿勢には目を見張るものがある。重力波という物凄く検出が困難であり、想像もつかない未知の領域に入り込んでいくのはとても苦勞を要することだ。しかし、細かいことを突き詰め、真理を追求する姿勢こそこれからの研究に必要な不可欠なことなのだ。

---

### 執筆者より

取材では最先端の重力波に関するお話をしていただき、とても刺激になりました。加えて、取材を通して物理に関する自分の興味の幅を広げることもできました。お忙しい中、快く取材を引き受けていただいたこと心から感謝申し上げます。

(綾部 貴仁)