

《子供たちに聞かせてあげたいノーベル賞 2017》

2017 年ノーベル物理学賞

レーザー干渉計重力波観測装置 (LIGO) への 貢献と重力波の観測



2017 年ノーベル物理学賞は「レーザー干渉計重力波観測装置 (LIGO) への貢献と重力波の観測」に対して、米国マサチューセッツ工科大学名誉教授レイナー・ワイス博士、米国カリフォルニア工科大学名誉教授バリー・バリッシュ博士、米国カリフォルニア工科大学名誉教授キップ・ソーン博士に授与されます。

重力波とは 100 年前にアインシュタインによって一般相対性理論から存在が予言され「アインシュタイン最後の宿題」とも呼ばれる、宇宙空間に発生するさざ波です。海にさざ波があるのと同様に宇宙空間にもさざ波があるとアインシュタインは予言していたのです。

大きく重い鉄の塊はもちろん、人間でさえ、質量のある物体はすべて周辺の空間をゆがませます。ゆがみ方はそこにある物体が重いほど大きくなりますが、非常にわずかなゆがみなので私達の身の回りにあるような物は、たとえ巨大なコンテナ船でさえまわりの空間がゆがんでいることを

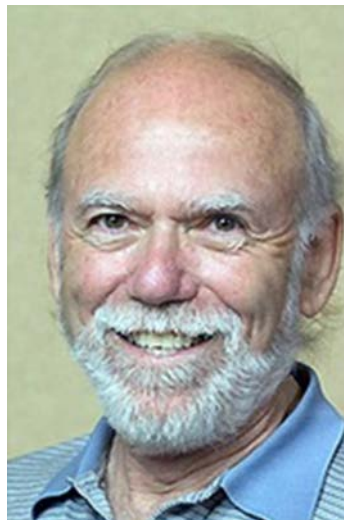
認識することはできません。空間のゆがみを観測できる最も身近な物が 2×10^{27} 乗トンという言葉では表現することが出来ないほど重い太陽です。

空間をゆがませている物体が移動すると周辺の空間のゆがみも一緒に移動するために、ゆがみの波が発生します。これが重力波です。波はさらに観測が難しいので、今の人類の技術では巨大ブラックホールのようなとつもなく重い物が急加速しながら宇宙空間を移動するようなすさまじい天文現象が起きなければ観測することは出来ません。

重力波を予言したアインシュタイン自身も実際に観測は不可能であろうと考えていたかすかな重力波の観測に 2015 年、人類は初めて成功しました。



レイナー・ワイス博士
米国マサチューセッツ工科大学
名誉教授



バリー・バリッシュ博士
米国カリフォルニア工科大学
名誉教授



キップ・ソーン博士
米国カリフォルニア工科大学
名誉教授

アインシュタイン最後の宿題について答えを提出

人類が初めて重力波の観測に成功したのは 2015 年 9 月 14 日（報告は 2016 年）、検出したのは米国の 2 カ所に設置されたレーザー干渉計重力波観測装置（LIGO）でした。LIGO は長さ 4 キロメートルの観測装置 2 基を組み合わせて空間のゆがみを測定する望遠鏡です。望遠鏡とはいっても重力波は音と同じ性質のため LIGO はよく知られた望遠鏡とは全く姿が異なり、レンズもパラボラアンテナがありません（図 1）。



図 1 上空から見た LIGO

重力波は光と同じように天体観測に使用することが出来ます。LIGO が重力波の観測に成功したことによって、人類は新しい宇宙観測手段を手に入れたと言えます。

LIGO は、20 カ国以上から 1000 人を超える科学者が参加して推進している国際共同プロジェクトです。受賞の 3 人は重力波が本当に観測可能なものなのか日々不安を感じながらも 40 年以上の努力を積み重ね、ついに人類初の重力波観測を成し遂げました。重力波が観測されたのは 2015 年 9 月 14 日でしたが、翌年 2 月 11 日まで発表は保留にしてデータを詳細に検討し、可能性のある誤差はすべて排除され、得られた震動は重力波に間違いがないことが確認されました。

震動する時空

初観測された重力波は 2 つのブラックホールの衝突現場から発生し、水に投げ込まれた小石から波紋が広がる

ように、時空の揺れは宇宙に広がりました。13 億光年彼方で起きたこの出来事が、アメリカの 2 カ所に設置された LIGO 研究所にわずかな時間差をもって到達しました。

アインシュタインは 3 次元の空間と 1 次元の時間からなる 4 次元時空では、天体が互いの周りを回転するような、質量を持つ物体が加速運動をすると、必ず重力波が発生し、時空が振動することを予測しました。

ブラックホールも 1915 年のアインシュタインの一般相対性理論によって予測された存在でした。しかし、その予測から 50 年以上にわたって、ほとんどの物理学者は、ブラックホールはアインシュタインの方程式の解としてしか存在せず、宇宙に実際には存在しないと確信していました。光でさえも脱出できないブラックホールというのは実在しように無いほど奇妙な存在に思えたからです。

重力波についても、それは著しく微弱で空間のゆがみは地球と太陽の間の距離を原子核 1 個分伸び縮みさせる程度であると計算していましたので、アインシュタイン自身も重力波を実際に検出することは不可能であろうと考えていたといいます。しかし、1950 年代に重力波の実在が計算上実証され、存在するものであればいつかは観測できるはずと多くの科学者は考えるようになりました。

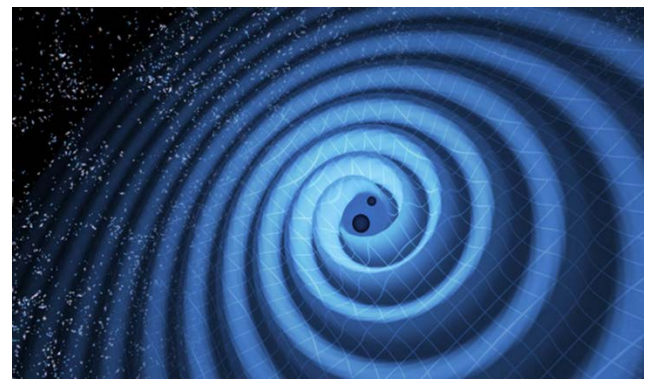


図 2 双子ブラックホールが放出する重力波のイメージ

重力波を放出した天体はそれに相当するエネルギーを失います。1970 年代、アメリカの天文学者ジョセフ・テイラー博士とラッセル・ハルス博士が互いの周りを回転する双子のパルサーを巨大電波望遠鏡で観測した結果、パルサーはちょうど重力波の理論計算値に一致するエネルギーを失って互いの距離が近づいていることを観測しまし

た。これは間接的ではあるものの、現実の宇宙空間で重力波の存在を示したことになり、この業績により2人は1993年にノーベル物理学賞を受賞しました。

重力波の直接観測をするには10光年先にある星までの距離を髪の毛の直径レベルの正確さで計測できる精度を持つ観測装置の開発が必要であるため、さらに多くの年数が経過することになりました。

重力波は過去を明らかにする

今回観測された重力波を放出したブラックホールは宇宙の歴史の中で早い段階に互いの周りを回転し始めました。その結果、宇宙空間にさざ波をまき散らし、エネルギーを放出するとさらに互いに近づいて回転速度を上昇させていきました。このようなブラックホールのダンスが何百万年か続き、ある時ほんの一瞬で、ブラックホールの地平線同士が接触し、光の速度で両者は合体し、1個の自転するブラックホールとなって重力波の放出は終了しました(図3)。

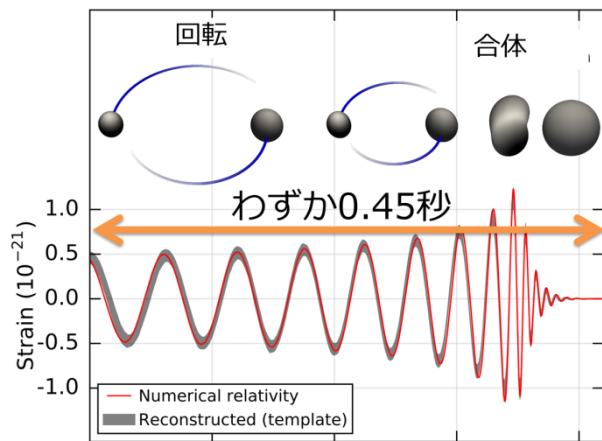


図3 上段はブラックホールの状態の模式図、下段は観測された重力波。ブラックホールの衝突は一瞬の出来事だった

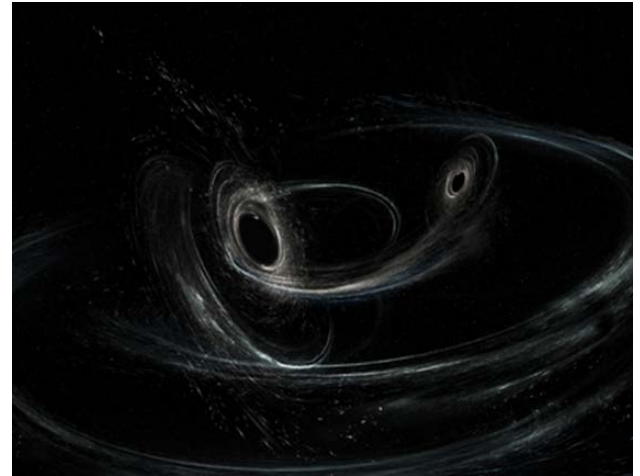


図4 互いの周りをまわるブラックホールの想像図。空間が著しくゆがむため、光もゆがんで見える

LIGO - 巨大干渉計

重力波の検出装置はLIGO以外にもこれまで多くの科学者が開発に取り組んできました。重力波は音に似ていることから、初期の検出器は音叉に似ており、特定の周波数の重力波に敏感に反応するように設計されていました。そのような観測装置を開発した当時の代表的な科学者の一人が米国メリーランド大学のジョセフ・ウェーバー博士でした。ウェーバー博士が重力波の検出に取り組んだ1960年代は多くの科学者たちは重力波とブラックホールが存在することに疑問を抱いていた時代でした。結局、ウェーバー博士は重力波を音叉で検出することはできませんでした。

1970年代半ばに研究を開始したワイス博士は、微弱な重力波を検出するには、周辺のノイズをいかにして正確に差し引くかが重要であると考え、ノイズの原因を分析し、それを克服するレーザー光線検出器の開発に取り組みました。

その後、ワイス博士とは別に検出器を開発していたロナルド・ドレーバー博士、ソーン博士が研究に合流し、3人は共同で検出器を開発することになりました。ドレーバー博士はプロジェクトの途中で研究から外れましたが、レーザー光線を使用した干渉計にターゲットを絞って開発は続きました。この干渉計は、L字型に接続した4kmの長さの2本のアームからなり、アームの先端にはそれぞれ巨大な

鏡が吊り下げられています。2本のアームの伸びる方向が異なるので、もしここに重力波が到達して空間が振動すれば、それぞれのアームが異なる長さの伸び縮みをします。LIGOは常に鏡の間で跳ね返るレーザー光線を計測することによってアームの長さの変化を測定していますが、重力波が無い状態であれば、鏡から跳ね返ってくるレーザー光線は2本のアームの接続点で正確に衝突し互いに打ち消し合います。しかし、重力波が到達するとアームの長さに違いが生じ、レーザー光線がアームの中を往復するのに要する時間に差が出るので、レーザー光線は同期しなくなるはずですが（図5）。

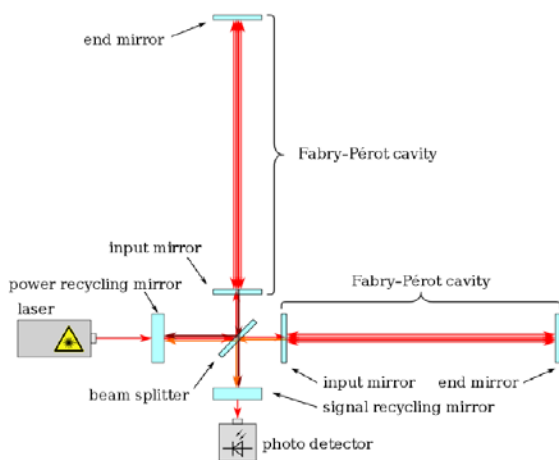


図5 LIGOの模式図、赤線はレーザー光線の経路。1本のレーザー光線をスプリッターで2方向に分け、鏡で反射して戻ってきたレーザー光線を干渉させることによって、何も起きていない時には完全に反応をゼロにできる。遙か彼方の高速道路を走行する車や、風で木の葉が地面に落下した振動などのノイズの除去さえ完璧であれば重力波の到達を確認できる

レーザー干渉計のアイデアは古くからあり、考え方はシンプルなのですが、原子核の長さよりも小さい微視的な変化を測定するためには、想像を絶する正確さの計測器が必要でしたので、実現には40年以上かかりました。

LIGOでは、4キロメートルの長さのアーム2基を設置し、この中をレーザー光線が何度も往復することによって測定できるレーザー光線の距離を延長し、時空の小さな伸びを検出する機会を増やしました。

さらに、LIGOが一基だけであれば、周辺の大地の振動などの誤差を差し引くことが出来ないため、米国北西部ワシントン州ハンフォードの草原のど真ん中とそこから3000キロメートル南にあるルイジアナ州リビングストンの沼地の2カ所に建設されました。

トラックが通っても振動の影響を受けず、一方で重力波には鋭敏に反応しなければならない光学系を備え、レーザーの量子的振る舞いによる誤差まで補正された観測装置の建設には、ソーン博士の高度な理論分析とワイス博士の卓越した工学知識が十分に活用されました。プロジェクトは次第に巨大化し、1994年にバリッシュ博士がLIGOリーダーとして就任したことによって1,000人以上の研究体制になり、大規模な国際協力体制が構築されました。

意外と早く来た重力波

2015年9月、数年間続いた機材の更新作業を終えてLIGOは再起動をしていました。本格実験開始前の9月14日の早朝、米国では多くの研究者がまだ眠っている時刻に突然LIGOは重力波を検出し、理論値に正確に一致するデータを送信し、世界中の関係者を一斉にたたき起こしました。

その情報は直ちには公開されず、詳細な解析が行われ、地球の南の方向13億光年彼方から届いた重力波の検出に間違いのないこと、太陽の29倍と36倍の重さの2個のブラックホールの衝突が起源であること、合体したブラックホールは太陽の62倍の重さのブラックホールになり、衝突後数十分の1秒の間に太陽3個分の質量に相当するエネルギーを重力波として放出したことがわかりました。

それは地球上の生命が単細胞生物から多細胞生物へと移り変わっているちょうどその頃起きた衝突の影響が地球に届いた瞬間でした。その後、ノーベル賞の受賞までに人類は重力波を4回検出しており、今後、日本やインドの重力波望遠鏡が完成することによって、より精度の高い観測態勢が整うことが期待されています。