

アインシュタインはどこまで正しい？ 検証が進む相対性理論

真貝寿明

アインシュタインが相対性理論を提唱したのは 100 年以上も前です。時間と空間が歪むという理論の予言は、ようやく実験や観測で精密に検証されるようになってきました。2019 年にはじめて公開されたブラックホールの写真、今年発表された東京スカイツリーでの時間の進み方の実験検証、そしてこれから明らかになる重力波の話など、いま研究者が取り組んでいる話題を紹介します。

1 相対性理論

「相対性理論」は、100 年以上も前にアインシュタインが提案した、時間と空間に関する物理の理論です。ふつうの物理の理論は、実験や観測結果を説明しようとして、多くの学者がいろいろと説を立て、議論や論争が展開されて、やがて一つの理論としてまとめられていきます。しかし、相対性理論は、アインシュタインがたった一人で、理論的な整合性をもとにして構築した理論です。物理学の歴史上、とても希有な出自となっています。

1.1 特殊相対性理論

アインシュタインは、2つの相対性理論を発表しています。1つ目は、光速に近づいたときの運

動の理論で、特殊相対性理論と呼ばれています（発表当初は、「相対性原理」と呼ばれていました）。この理論は、電磁気学の基礎方程式（マクスウェル方程式）に現われる光速 c が、誰から見た速度なのか、という疑問を解決する一つの提案でした。速度の測定は相対的なものだからです。当時の多くの物理学者が、宇宙のどこかに存在する絶対座標系の存在を考えていましたが、アインシュタインは、素直に「誰から見ても、光速は同じ c となる」ことを原理として物理学を書き直したのです。止まっている人からも、動いている人からも、光が同じ速度で動くとするならば、動いている人の時計はゆっくり進まないで整合性がとれません。アインシュタインは『時間の進み方は、測定する人の運動状態によって異なる』とする理論をつくったのです。

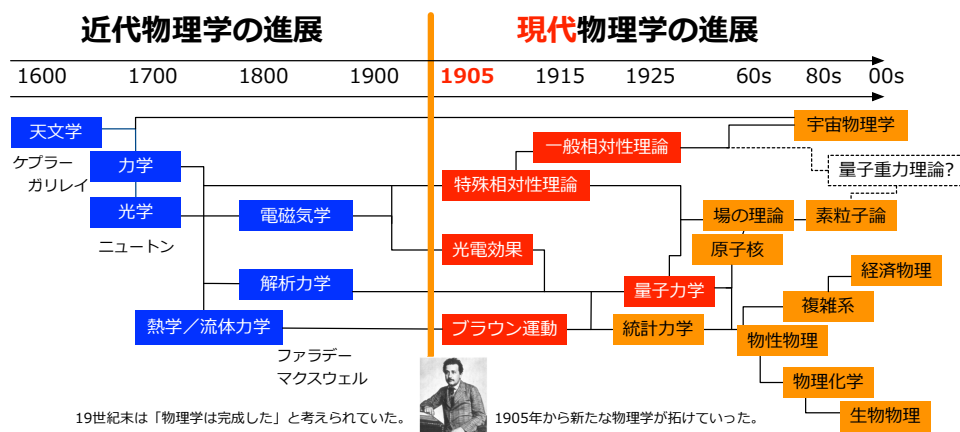


図 1: 1905 年を境に大きく変貌した物理学。 [1] より。

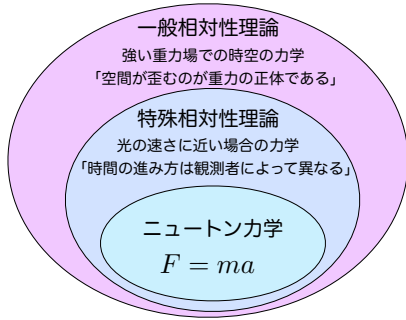


図 2: 相対性理論はニュートン力学を順に拡張していった。

つまり、ものすごく速いロケットに乗って地球に帰還すれば、自分だけ歳をとらず、未来の世界に行けるのです。浦島太郎の話が現実のものとなるのです。ただし、人類が作った最も高速の乗り物は、いまのところ国際宇宙ステーションで、秒速 7.8km です。この速さでは、まだまだ時間のずれは小さく、1 年間乗務しても、0.01067 秒だけしか、地表より未来に行けません。ですが、宇宙から飛来する粒子（宇宙線）は、光速に近い速さのため、粒子の寿命が極端に長くなることが確かめられています。大気に入射して不安定で寿命の短い粒子ができたとしても、その寿命が地上実験よりも長くなっていることが確かめられています。

特殊相対性理論の枠組みで、エネルギー保存則を考えると、質量とエネルギーは同じものである、とする有名な公式

$$E = mc^2$$

も導かれます。この式は『わずかでも質量が失われると、莫大なエネルギーが発生する』ことを表していて、核融合反応や核分裂反応が生じる原理を説明します。太陽が燃えるのは、核融合反応で水素がヘリウムに変化する際に放出されるエネルギーです。これは水素爆弾の原理にもなっています。原子力発電や原子爆弾は、ウランが核分裂反応を起こすときに放出されるエネルギーを利用するものです。

アインシュタインが特殊相対性理論を発表したのは、1905 年でした。この年、彼は、ブラウン運動の振るまいから水の分子が存在することを予言したり、光電効果（金属に光を当てると電子が飛び出す現象）の理解として光の粒子説を提案してもいます。いずれもその後の物理学を大きく書き

替える仕事であり、1905 年を境にして近代物理学から現代物理学へと新しい時代になったと歴史的に理解されています（図 1）。特殊相対性理論は、場の量子論と呼ばれる素粒子論の基礎でも使われており、いまではこの理論を疑う物理学者はいません。

1.2 一般相対性理論

アインシュタインは、その後、10 年かけて、相対性理論をさらに大きな理論へと発展させます（図 2）。1905 年の理論では、加速度運動する状態が扱えませんでした。そこで、加速度運動をどう含めるか苦心します。例えば重力による自由落下は加速度運動です。アインシュタインは、1912 年のある日、自由落下するエレベータの中では重力を感じないことに思い当たります。エレベータ内の狭い空間にいる人は、自分も同じ加速で落下しているため、無重量状態と感ずるでしょう。宇宙ステーション内で、宇宙飛行士がぶかぶか浮いているのと同じ状態です。このことは、『重力場での実験と加速度運動する系での実験は区別できない』ことを意味しています。これを等価原理といいます。

重力は狭い空間では消去できますが、星スケールの大域的には消去できません。そこで、アインシュタインは重力の正体を空間の幾何学に追求する作戦に挑みます。当時できあがっていた曲がった空間の幾何学（リーマン幾何学）を物理法則に適用したのです。彼が拠り所としたのは、考えられ得る方程式で最もシンプルであること、そして弱い重力の場合に既知のニュートン力学に帰着する理論であること、の 2 つでした。こうして導かれた一般相対性理論は、『重力の正体は、時空のゆがみである』とする理論となりました。

できあがった理論を太陽系に適用すると、当時ニュートン力学では説明できなかった「水星の近日点移動」（水星だけは閉じた楕円を描かないで太陽を周回している）の問題が、定量的に解決することがわかり、アインシュタイン自身、興奮のため数日間心臓の鼓動が高鳴っていた、と日記に記しています。

2 相対性理論の予言するもの

一般相対性理論の式が予言するものは、アインシュタイン自身の想像を超えるものでした [2]。

ブラックホール

すぐに発見された方程式の解は、今ではブラックホールと呼ばれるものでした。真空の空間の一点だけに質量がある、と仮定すると、ゼロ割りで破綻する答えが出てきたのです。物理的な状況を考えているのに、ゼロ割りで無限大となってしまう答えがでてくるとは理解しがたいことです。無限大となる2ヶ所は、今では、ブラックホールの地平面と呼ばれる境界面、および（中心の）時空特異点と呼ばれています。前者は座標系の取り方で除去できますが、時空特異点は取り除けません。つまりアインシュタインの相対性理論が破綻することを意味しているのです。

宇宙膨張

空間が一様な物質で満たされていると仮定すると、一般相対性理論の式はその時空が膨張あるいは収縮するような解となることを示します。これは、宇宙全体が膨張あるいは収縮することを意味しています。アインシュタインを含め、当時の多くの学者は、宇宙は未来永劫不変のもの、と考えていました。ハッブルやルメートルによって遠方の銀河が遠ざかっていくこと（宇宙膨張）が発見されるのは、1920年代の終わりです。実際に宇宙膨張が発見されるまで、アインシュタインは、静かな宇宙ができるよう、自身の方程式に宇宙項と呼ぶ修正項を加えて解決しようとしていました。宇宙膨張が確実になると、宇宙の始まりが問題になります。ビッグバンと呼ばれる大爆発があった証拠は得られていますが、それ以前はまだ未解決です。もし、時空の一点から宇宙が誕生したのであれば、その瞬間を描く物理学が必要になりますが、残念ながら、一般相対性理論と量子論を融合させた理論（量子重力）はまだできていないため、私たちは宇宙の本当の始まりをまだ理解できていません。

重力波

電磁気学の方程式からは電磁波の存在が予言さ

れ、後に発見されました。一般相対性理論の式からも時空のゆがみが空間を光速で伝播していく現象があることが予言され、早々に重力波と命名されます。物理の議論として、ごく自然なものと考えられますが、厄介なのは一般相対性理論が「誰から見ても同じ式として表される」形式なため、さまざまな座標変換の自由度を許すことでした。そのため、本当に重力波が存在するのか、という問題の解決までに長い時間を要しました。アインシュタインも一度は重力波の存在を否定する論文を書きかけたほどです。重力波がエネルギーを運ぶ物理的な実体であることが示されたのは、アインシュタインの死後、1950年代の半ばであり、連星パルサーが発見され、その軌道半径が近づいていくことから重力波の存在が間接的に確認されたのは70年代のことです。

このように、一般相対性理論が予言する現象は理論が先行し、それを観測することで理論の正しさが確認されていくプロセスになっています。また、特異点を説明するためには一般相対性理論を超える理論が必要とされ、どこまでアインシュタインの理論が正しいのかを検証することが物理学上の大きなテーマになっています。相対性理論が発表されて100年以上が経ち、人類はようやくこの理論を検証する技術を手の中にしつつあります。以下では、最近ニュースになった話を紹介していきます。

3 ブラックホールの直接撮影に成功

2019年4月、国際共同観測プロジェクトであるイベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope, 以下 EHT と記載) のグループは、M87 銀河の中心にある巨大ブラックホールの直接撮影に成功した、と発表しました。発表された写真は、図3です。ドーナツ状に光る天体の中心部に黒い穴が映っています。

M87 銀河は、おとめ座の方向にある楕円銀河で、地球から 5500 万光年の位置にあります。中心部からジェットと呼ばれる高エネルギーのガスが噴出していることが確認されていて、これまでも「活動銀河中心核」の代表格として注目されてきたものでした。中心には巨大なブラックホールがあっ

て、周辺から落下してくるガスのうち、角速度が大きくて吸い込まれなかったものが、巨大ブラックホールの回転軸方向にジェットとして吐き出されているものと考えられています。(その意味で、ブラックホールは天文学的にはとても明るい天体なのです)。

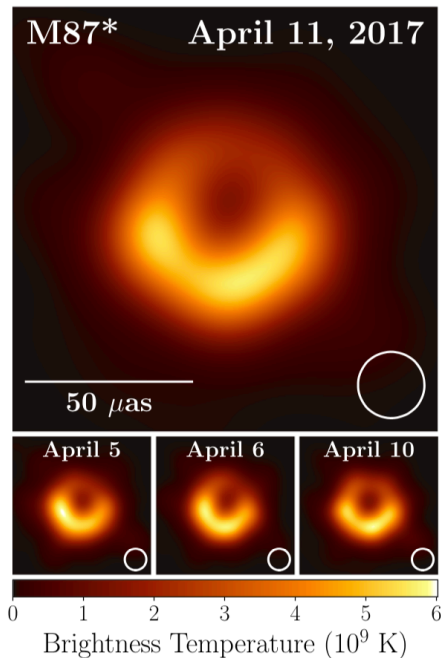


図 3: 論文に掲載された M87 銀河中心部のブラックホールの写真。各写真右下の白丸は、画像処理を一度に行ったサイズ (20 マイクロ秒角=人間の視力で 300 万に相当) を示す。明暗を温度に変換して表示している。北が上・東が左側。[3] より。

EHT は、このブラックホールを電波望遠鏡で撮影するために組織されました。日本人の天文学者も中心的な役割を担っています。電波望遠鏡は、パラボラアンテナの大きさが大きいほど多くの電波を集光することができます。最近では、遠方の電波望遠鏡を、同時に同じ天体に向けて観測し、あたかも巨大な一つの電波望遠鏡のようにデータを集めて画像を解析する「電波干渉計」の技術が主流になってきました。EHT は、この共同観測を地球規模に広げ、図 4 に示されているように、南米チリの ALMA 望遠鏡、メキシコの LMT、スペインの PV、北米アリゾナの SMT、ハワイの JCMT/SMA と南極の SPT の 6 局が参加して、同時観測したものです。撮影は 2017 年 4 月の一週間、毎晩行われ、データ解析に 2 年間をかけて、ようやく論文として報告・記者発表に至ったのでした。

ブラックホールは強い重力で周囲のものを引き込みます。ブラックホールに近づくときすべてのものは破壊され、高温のプラズマ状態となって、高速で回転しながら吸い込まれていきます。ブラックホールの半径のおよそ 1.5 倍までは光は円軌道を保てますが、それより内側になると、すぐに落下していくことになります。今回撮影された写真では、中心部が暗いリング状になっていて (ブラックホール・シャドウと呼ばれます)、この黒い部分の内側に本当のブラックホールが存在しているものと考えられます。その大きさから推定すると、このブラックホールの質量は、太陽質量の約 65 億倍と見積もられ、これまで不確定だった質量が判明しました。

これまで、私たちのいる天の川銀河の中心や、はくちょう座の強い X 線源などで、周囲の天体やガスの動きからブラックホールが存在しているだろうことは予想されていましたが、このように 1 枚の写真で示されたことは、質的に理解を向上させますね。

今回発表された写真では、まだジェットを噴出しているところが不明で、EHT のプロジェクトはこれからも観測する電波の波長を短くしてさらに高解像度の撮像に臨むそうです。近い将来には、ブラックホールのもたらず周囲の時空の様子が動画として公開されることに期待して、結果を待ちたいと思います。

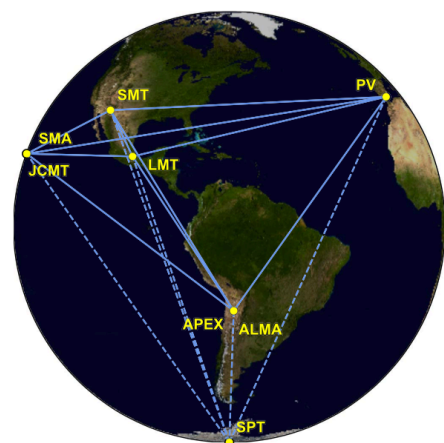


図 4: イベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope) のプロジェクトが使った電波望遠鏡のネットワーク。[3] より。

4 重力が時間を遅らせる：スカイツリーの実験

最近、私は、原子時計よりも100倍以上高い精度を出すことができる「光格子時計」を使った実験プロジェクトに参加させていただく機会がありました。本年(2020年)の4月に記者発表を行うことができました[4]ので、次にその内容を紹介します。

現在の国際単位系で定義される1秒の長さは、セシウム原子時計を使うことによって定められています。セシウムの原子が放出する放射を使って測定する技術で、5000万年に1秒のずれに相当する精度が実現されています。東京大学・理化学研究所の香取秀俊氏は、2001年に、この原子時計よ

りも100倍以上精度のよい次世代の原子時計を考案し、「光格子時計」と名付け、その実現と実用化を進めています。その原理は、図5〔左〕に示すようなものです。

まず、「魔法波長」と呼ばれる特別な波長のレーザー光を干渉させて作った微小空間(卵のパックのような空間)に、レーザー冷却された原子を1つずつ閉じこめて、互いに隔離します。そして、これらの原子にレーザー光を当てて、光を吸収する「原子の振り子」の振動数を精密に測定します。一度に多数の原子を同時に測定できるので、より精密な時間を測ることができる、というしくみです。こうして、18桁の精度(100億年に1秒のずれに相当)をもつ時計が実現するようになりました。現在、時計一つは冷蔵庫1つ位の大きさにまで小さくなっています(図5〔右〕)。

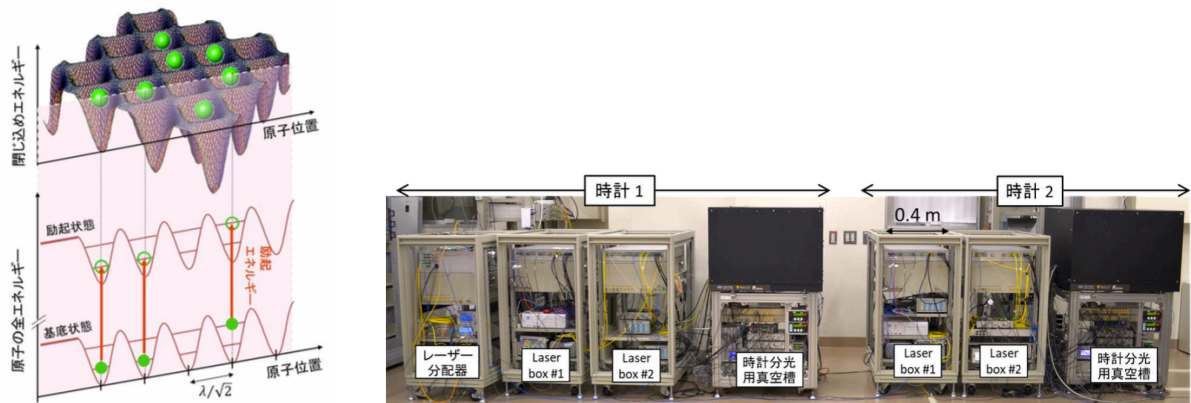


図5: 〔左〕光格子時計の原理。〔右〕光格子時計1台は冷蔵庫1つ位の大きさ。ストロンチウム原子をレーザー冷却している。

きて、一般相対性理論によれば、重力が強いほど時間の進み方が遅くなります。重力場中での光の波長が伸びる(低い周波数にシフトすることから「重力赤方偏移」と呼ばれています。重力赤方偏移を検証することは、アインシュタインが閃いた等価原理(§1.2)を検証することに相当します。つまり、この等価原理が破れていると、一般相対性理論の出発点が危ぶまれることになります。

今回の実験では、東京スカイツリーの展望台(高さ450m)と地表に光格子時計を設置して、時間の進み方を比較しました(図6)。そして、2つの時計の刻む時間に差があることとアインシュタイン

の予言する重力の差を比較することで、2地点の標高差が 452.650 ± 0.039 mであることを求めました。同時刻にレーザー光を用いた測距も行い、2地点の標高差が 452.631 ± 0.013 mであることも分かりました。つまり、時計だけから450mの高度差を数cm以内の誤差で測定できたのです。(スカイツリーの高さは、季節によって鉄骨の熱膨張のため数十cm変化します。また、潮の干満でも重力が微小に変化します。同時刻にレーザー測距を行ったのはそのためです。)

この成果は、およそ1万キロメートルの高低差を利用する人工衛星を使った検証実験に迫る精度

で、光格子時計のもつ将来性を示した実験にもなりました。近い将来、正確な時計を持ち歩くことで、自分のいる高度が分かったり、重力の違いから地下資源探査や地下空洞の検出ができるように

なることが期待されます。1秒の定義もいずれは光格子時計を基準とするように変更されることでしょう。

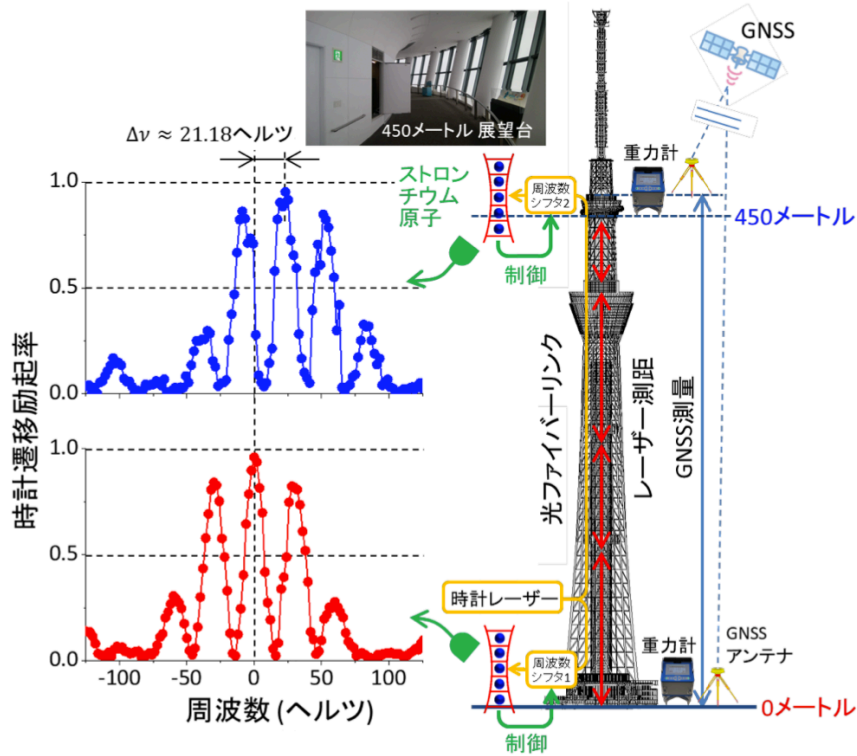


図 6: 東京スカイツリーでの一般相対論検証実験の概要。地上階と展望台に設置した2台の可搬型光格子時計を光ファイバーでつなぎ、周波数比較を行った。一方、2台の時計の標高差を従来の測量手法（GNSS 測量およびレーザー測距）によって計測した。時計遷移を分光して得られたスペクトルでは、標高差 450メートルに相当する約 21 ヘルツの周波数シフトが観測された。

5 重力波観測

3つ目の話題として、いま、一般相対性理論研究をもっとも面白くしている重力波の観測について紹介しましょう。§2でも触れましたが、一般相対性理論が残した大きな予言の1つに、重力波の存在があります。時空の歪みが、湖の表面のさざ波のように周囲へ（立体的な球面状に）波として伝わってゆく現象が重力波です（図7）。

重力波の初検出まで

残念ながら、重力波はとても弱く、人工的に発生させることは困難です。原理的には質量のある

物体が加速度運動すれば発生しますが、太陽程度の天体が光速に匹敵するほどの速さで回転運動しないと、重力波は観測可能にはなりません。しかも、波の振幅は波源からの距離に比例して減少するので、天体スケールのものを観測するのは非常に困難になります。ターゲットとされる天体現象は、超新星爆発や連星ブラックホールの合体、連星中性子星の合体などですが、それらの発生頻度も不確かです。

しかし、それでも、アインシュタインから出された宿題を解決しようと、世界中の研究者は長く準備を続けてきました。理論の研究者は、シミュレーションを駆使してどのような重力波が発生す

るのかを明らかにしてきました (図8)。また、実験の研究者は、巨大なレーザー干渉計をつかって、

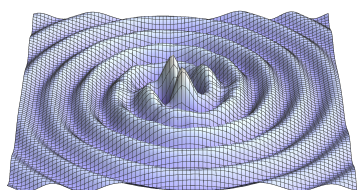


図 7: 連星から放出される重力波のイメージ図。中央の2つの大きな山のところに星があり、2つの星が次第に近づいて合体するまでに、時空に歪みを引き起こす。歪みは波として周囲に伝播する。

干渉計とは、光のもつ波の性質を利用して、微小な距離測定をする装置です。1つの光を2筋に分け、L字型の2本の経路(「腕」と呼ぶ)で光を往復させ、再び合成する装置をつくり、干渉縞を見ることで、2本の腕の距離の差を見るしくみです(図9)。重力波の場合は、微弱な変化を相対的に検出するために、腕の長さは数kmで設計されます。アメリカのLIGO¹は4kmの腕をもち(図10)、イタリアのVIRGO²と日本のKAGRAは3kmの腕をもちます。

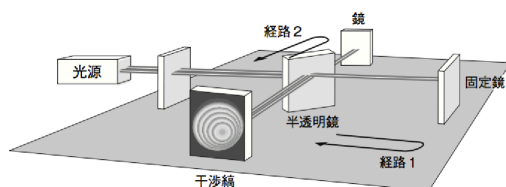


図 9: 干渉計の原理。

建設に先行していたLIGOのグループは、2000年代には典型的な連星中性子星合体なら20 Mpc(7000万光年先)の現象を観測できる装置を完成させ、観測を行いました。2年間の観測期間に一度も重力波を検出できませんでした。そこで、装置をアップグレードして感度を高め、2015年9月から再度観測をスタートさせます。そして正式な

重力波検出の準備を進めてきました。

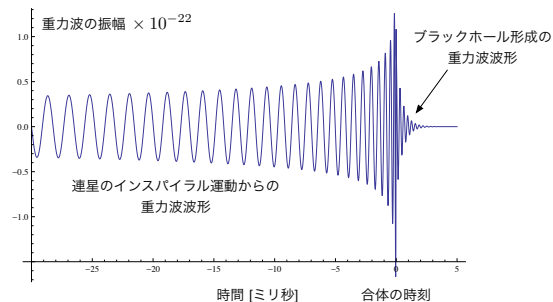


図 8: 中性子星連星の合体の前後で放出される重力波の波形(予想)。次第に振幅を大きくしながら、1kHzに近い周波数にまで上がる。合体後にブラックホールが形成されるならば、重力波はブラックホールに飲み込まれてしまい、急速に減衰する。この減衰部分が観測されれば、ブラックホールを直接観測したことになる。

観測に入る2日前の試運転期間中に、はじめての重力波観測に成功しました。



図 10: アメリカ・ルイジアナ州のLIGO。

LIGOグループによる重力波初観測の記者発表は、2016年2月に行われました(図11)。2015年9月14日に2つのLIGOの干渉計が6.9ミリ秒差で同じ重力波波形を検出した、というもので、GW150914と名付けられて発表されました。図11〔下〕の画像は、2つの干渉計の波形が6.9ミリ秒ずらずと一致していることを示しています。時間差から重力波の到来方向が南半球側とわかりました。波形は、0.2秒間に、35Hzから250Hzまで周波数が上昇し、そのあと急速に波が減衰しています。図8で予測された波形とほとんど同じです。周波数の上昇は、2つの連星が合体する直前に接

¹ライゴ。Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (レーザー干渉計重力波天文台)の頭文字をとったもの。ワシントン州のハンフォード(砂漠の中)と、ルイジアナ州のリビングストン(ジャングルの中)の2箇所に干渉計をもつ。

²ヴィルゴ。イタリア・ピサに設置されたヨーロッパ天文台 EGO 所属のレーザー干渉計。

近しつつある状況を示して、波形から、太陽質量の36倍と29倍の質量をもつ2つのブラックホールの合体であることがわかります。さらに、急速に波が減衰していることから、最終的に大きなブラックホールになったことも確認されます。減衰のしかたとコンピュータシミュレーションの結果から、合体後には太陽質量の62倍の質量のブラックホールになったことがわかりました。初めの全質量と最後の質量を比べると、太陽質量の3倍の質量が失われています。質量とエネルギーの等価性 ($E = mc^2$) を考えると、放出されたエネルギーの総量が計算でき、地球で観測された重力波の振幅を考えると、このブラックホール連星合体は、13億光年先から来たことがわかりました。

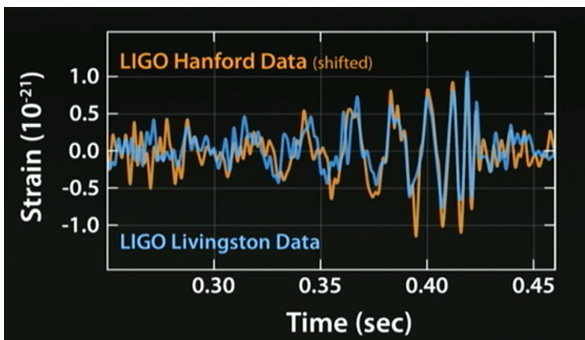


図 11: 〔上〕記者会見冒頭で、“We have detected gravitational wave. We did it.”とアナウンスし、ガッツポーズを決めた LIGO 所長の D. Reitze. 〔下〕記者会見で発表された重力波波形。2つの干渉計からの波形が重なっていることを示している。(どちらも中継画像のキャプチャ)

この発表の翌年、ノーベル財団が異例の速さで、重力波観測をリードしてきたワイス、ソーン、バリッシュに物理学賞を授与したことから、重力波の初観測がもつインパクトがいかに大きかったかを察しただけなのでしょう。その後、2017年8月には連星中性子星の合体によって生じた重力波の初検出も報告されました (GW170817)。連星

中性子星の合体では、合体後周囲から強い光が放射されることが予想されます。重力波の検出の第一報がインターネットで流れた直後から、世界中の天文学者が、波源方向に望遠鏡を向けた観測をはじめ、可視光、赤外線、X線、ガンマ線観測でのフォローアップ観測が成功し、多波長で同じ天体を観測してさまざまな側面をあきらかにする「マルチ・メッセンジャー天文学」が誕生しました。2020年8月末現在、重力波の観測報告は50例近くに及んでいます。

日本の KAGRA 干渉計

日本では、1995年には300mの腕をもつ干渉計 TAMA を東京の国立天文台に建設し、一歩欧米にリードしますが、観測装置の規模が小さくて実際に重力波を検出するには及びませんでした。そこで、km-スケールでの大型低温重力波干渉計 LCGT を計画しますが、建設費が巨額であったゆえ（そして重力波検出が世界に一例もなかったため）なかなか予算が認められませんでした。梶田隆章氏が宇宙線研究所所長に2008年に着任し、自らが重力波研究を牽引することで、現在へつながる潮流ができました。LCGT計画は、2010年に初期建設費140億円が承認され、東日本大震災で遅れが発生しましたが、2012年にトンネルの掘削に着工しました。LCGTの名前は一般公募によって KAGRA (かぐら) [5] と決まりました。「神岡 (Kamioka) 重力波 (GRAvitational wave) 天文台」が由来ですが、日本人なら「神楽」をも連想する命名です。

図 12 は、KAGRA の概要図です。岐阜県北端に位置し、ニュートリノ検出器 Super-Kamiokande と KamLAND と同じ山の中に建設され、研究所も同じ神岡町茂住に設置されました。一辺が3kmのレーザー干渉計で、米欧の干渉計に比べ、技術的に次の2点で進んでいるのが特長です。一つは低周波数側での地面振動を抑えるために地下に建設されたこと。KAGRA は少なくとも地表からは200m地下にあります。鏡の制震装置は、最大で14mの高さのものになりますが、トンネルを高層に掘って吊り下げる構造をとっています。もう一つは熱雑音を抑えるために鏡をマイナス250度の温度にまで冷却することです。そのために、サファイアの鏡 (23 kg) が使われ、ファンのない冷却

装置（伝導による冷却）が開発されました。3 km のパイプの中は真空であり、LIGO の 2 台の干渉計に次いで世界第 3 位の大きさの真空装置となっています。

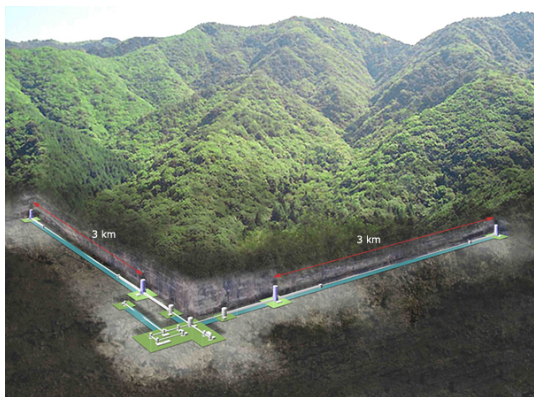


図 12: 岐阜県・神岡の山中に設置された KAGRA.



図 13: 2019 年 10 月, 富山にて行われた LIGO-Virgo-KAGRA 共同観測協定の調印式での記念撮影。左から EGO 副代表 C. Olivetto, Virgo 代表 J. van den Brand, KAGRA 組織代表 梶田隆章, LIGO 所長 D. Reitze, 真貝, KAGRA 組織副代表 大橋正健。[写真提供 飛騨市]

KAGRA はトンネルの掘削に 2 年, そして装置の搬入に 2 年をかけ, 2 度の試運転を行いながら, 2019 年 4 月にはすべての装置の設置を終えました。そして初観測に向けて準備を進めます。私は, 2015 年の夏に, KAGRA の研究グループに加入しました。2017 年からは, サイエンス部門の委員長として, KAGRA の取りまとめをする役に就き, 米欧との共同研究協定を行いました (図 13)。重力波観測は, 装置一台だけでは観測したことを証明することが難しく, 世界的なネットワークを組んだ方が互いに得になるからです。そして, ついに, 2020 年 2 月末, KAGRA は, 観測を開始するに至りました。新型コロナウイルスの蔓延のため, 現在

は世界中の観測装置が止まっていますが, 2022 年にはそれぞれが観測能力を向上させて, 共同観測を始めます。

KAGRA が重力波観測に加わることで, 重力波の観測がより正確になり, 遠方の重力波源の位置やパラメータが精密に求められるようになります。波源となった天体の様子が詳しく分かることによって, 相対性理論の正しさも検証されていくこととなります。観測された重力波の統計が蓄積されれば, ブラックホールの形成モデルや銀河系の形成シナリオが次第に明らかになることになるでしょう。連星中性子星の合体のように, マルチ・メッセンジャー天文学が機能すれば, 重力波の伝播速度や重力波の伝播経路についての理解も進むこととなります。そして, 何より, 重力波によって, 未知の現象が発見されれば, 物理学・天文学の双方に大きなインパクトを与えることになるでしょう。

6 アインシュタインはどこまで正しいのか

これまで 100 年以上に渡って, アインシュタインの相対性理論はさまざまな形で検証されてきました。そして試みられた実験や観測を, 相対性理論はすべてパスしてきています。

今回紹介しました, ブラックホールの直接撮像は, ブラックホールの存在を視覚的に示す第一歩となりましたが, まだアインシュタインの理論の正確さがどこまでいえるのか, という話にはつながっていません。スカイツリーを用いた重力赤方偏移の実験も, 基本的にアインシュタインの理論通りになったことで, 光格子時計の有用さを証明できた, と捕える方がよいでしょう。重力波の観測は, まだ始まったばかりで統計的なことは言えませんが, 基本的に相対性理論に反するようなデータは得られていません。

重力の理論としては, アインシュタインの相対性理論をさまざまな形で拡張した「修正重力理論」も多数発表されています。しかし, 今のところ, 一番正しいのはアインシュタインの相対性理論で, 他の修正重力理論は増やしたパラメータに大きな制限が付き, 結果としてアインシュタインの理論と区別がつかないパラメータ領域でのみ生き残れ

る状況です。

これは物理の研究者にとって、嬉しさ反面、悲しさ反面です。

嬉しいと感じるのは、アインシュタインの相対性理論は、理論としてのシンプルさが追求された形であり、美しさを伴うからです。自然現象を記述する方程式は、何故かいつも単純な原理で表すことができる、ということを物理学者は身に染みて知っています。その点を考えると、相対性理論が他の醜く修正された理論に勝ち続けているのは爽快ですし納得もできます。原理を追求した結果得られた理論が、100年経っても私たちに正解を導き出していることは、研究の目指すべき方向を示してくれている気がしてなりません。

しかし、将来的な量子重力理論の構築を目指して、研究者たちは、相対性理論を包含する次の大きな理論を作ろうと、その糸口を探し続けています。時空特異点問題を解決するために、そして(今回は紹介できませんでしたが)宇宙の不可思議な加速膨張を説明するために、何らかの理論的なステップアップが必要なのは分かっています。しかし、相対性理論が綻びを見せてくれないと、次の一歩が踏み出せないのです。

「アインシュタインが正しかった」という研究報告を読むたびに、研究者たちは、アインシュタインに対する畏敬の念を抱き、そして安堵と懸念を感じているのです。

参考文献

- [1] 真貝寿明『現代物理学が描く宇宙論』(共立出版, 2018)
- [2] 真貝寿明『ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の100年と展開』(光文社新書, 2015)
- [3] The Event Horizon Telescope Collaboration, *Astrophysical Journal*, 875 (2019) L1
プレスリリース文
<https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20190410>
- [4] M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai & H. Katori, *Nature Photonics*, 14 (2020) 411.
プレスリリース文
<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200407/>
- [5] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>

真貝寿明 (しんかいひさあき)

大阪工業大学情報科学部教授, 武庫川女子大学非常勤講師, 理化学研究所客員研究員. 専門は, 一般相対性理論・宇宙論. 著書多数.