

アインシュタインの予言後100年で重力波の検出

LIGOはブラックホール同士の衝突からの重力波を観測し、宇宙に新しい窓を開いた。
マックス・プランク研究所、ハノーバー大学の研究者たちからの重要な貢献

科学者たちは初めて、遠い宇宙での大異変から地球に届く重力波と呼ばれる時空の波紋を観測した。これは、1915年にアインシュタインが発表した一般相対性理論における重要な予測を裏づけ、宇宙へとまったく新しい窓を開くことになる。

重力波は、その劇的な起源や重力の性質に関する情報を運んでおり、それらの情報は他の手段では得ることができない。物理学者たちは、検出された重力波が、二つのブラックホールが合体し、一つのより巨大なブラックホールを生成する時の最後の一瞬から生じたものだと結論づけている。このような二つのブラックホールの衝突は予測されていたが、これまでに観測されたことはなかった。

今回の重力波は、米国東部夏時間(9時51分UTC)2015年9月14日、午前5時51分にルイジアナ州リビングストンとワシントン州ハンフォードに設置されるレーザー干渉計重力波天文台(LIGO)のペアの検出器の両方によって検出された。LIGO天文台は国立科学財団(NSF)により資金提供されており、カリフォルニア工科大学とMITにより考案、構築、運営がなされている。この発見はGEOコラボレーション、オーストラリア干渉計型重力天文学コンソーシアムを含むLIGO科学コラボレーション(LSC)と、二台のLIGO検出器からのデータを使用するVIRGOコラボレーションによってなされ、Physical Review Letters ジャーナルで出版が受理された。

ハノーバーとポツダムにあるマックス・プランク研究所 重力物理学(アルバート・アインシュタイン研究所(AEI))および、ドイツのハノーバー大学(LUH)重力物理学研究所に所属する研究者たちは、数ある重要な分野での発見に極めて重要な貢献を果たした。それは、物理の限界に達する、極めて高感度の検出器の開発と稼働、高性能コンピュータクラスタ上での効率的なデータ解析方法の開発、また信号検出から天体物理学の情報を推測するための高精度波形モデルなどである。

GEO600からのアドバンスト型検出器技術

GEOコラボレーションには、マックス・プランク研究所とハノーバー大学に所属する研究者たちに加え英国の科学者たちが含まれる。彼らはハノーバー近郊にあるGEO600と呼ばれる重力波検出器のデザインから稼働までを行ってきた。GEO600はシンクタンクとして、アドバンスト型検出器で用いられる技術を試験してきた。Advanced LIGO(aLIGO)が史上初の好感度を出すために使われたほとんどの重要な技術は、GEOコラボレーション内で開発およびテストされた。それによりこの検出に至ることができた。それらの技術とは、シグナル・リサイクル法、レゾナント・サイドバンド・エクストラクション(RSE)干渉計、そしてモノリシックに作られたミラーを吊るためのサスペンションである。さらに、aLIGOで用いられる高出力レーザーを開発、設置まで行ったのは、アルバート・アインシュタイン研究所の研究者たちとハノーファーにあるレーザー・センターの科学者たちである。この高出力レーザーは高精度測定にはなくてはならないものである。

「科学者たちは過去数十年間、重力波を探し求めてきたが、今やっと、この信じられないほどの精密技術が現実となって宇宙から届く非常に微かなエコーを拾うことができるようになった。マックス・プランク、ハノーバー大学、そして英国チームの科学者たち、GEOコラボレーション

の努力と技術開発なしには今回の検出はありえなかった。」とマックス・プランク研究所 重力物理学 ディレクター兼ハノーバー大学 重力物理学研究所ディレクター、カーステン・ダンスマン教授は述べる。

検出のためのコンピュータ出力と解析法

マックス・プランクの科学者たちは、aLIGO 検出器からのデータ中に埋もれる弱い信号を得るための、高度で効率的なデータ解析法を開発及び実行し、その大部分の生産分析を行ってきた。それに加え、aLIGO データでの検出や解析に使われる主な計算的資源は、アトラスと呼ばれる AEI が運営する重力波データ解析用に設計された、世界で最も強力なコンピュータクラスタによって提供された。アトラスは、aLIGO データの分析のため 2400 万時間以上の CPU コアタイムを提供してきた。

「信号を見た最初の二人がマックス・プランク研究所 重力物理学の科学者である。私はこの研究所がこのエキサイティングな発見で主導的な役割を果たしたことを誇りに思う。アインシュタイン自身ブラックホールの存在を信じていなかったし、重力波は検出するには弱すぎると思っていたが、彼ならば間違っていたことを気にもしなかっただろう。」とマックス・プランク研究所 ディレクター ブルース・アレン教授は言う。

合体するブラックホールの観測への道を開く重力波の正確なモデル

マックス・プランクの研究者たちは、ブラックホールが互いの周りを回りながら衝突する最終過程で生成する重力波の高精度なモデルを開発した。これらの波形モデルは LIGO データのバイナリの合体を継続的に探すために使用された。GW150914 として知られているブラックホールの合体を 5 シグマ以上の有意性で観測したのもこの検索であった。彼らはまた、この波形モデルを用いて二つのブラックホールの質量やスピン、地球からの方向と距離、合体により作られた巨大ブラックホールの質量やスピンなどの天体物理的なパラメータの推測を行った。波形モデルはまた、GW150914 が一般相対性理論の予測との一致を検証するためにも用いられた。

「互いを周回する一対の巨大ブラックホールの合体という、宇宙で最も極端なイベントのうちの一つの重力波放射のモデル作りに何年をも過ごした。そして、それがまさに今回検出された信号の形と同じだったのだ！アインシュタインの相対性理論が、現実をこんなにも正確に表現していることは圧倒的だ。GW150914 は、起こり得る最も極端な条件下におき、重力がどのように動作するかを確認するための、素晴らしい機会を与えてくれる」とポツダムにあるマックス・プランク研究所 重力物理学 アレッサンドラ・ボナノ教授は言う。

LIGO での研究は 米国とその他 14 カ国の大学からの 1000 人以上の科学者のグループである LIGO 科学コラボレーション (LSC) により行われている。LSC を成す 90 以上の大学や研究機関が、検出器技術を開発し、データを解析している。その中の約 250 人の学生もコラボレーションの重要なメンバーである。LSC の検出器ネットワークは LIGO の二つの干渉計と GEO600 の検出器から構成される。GEO チームは、マックス・プランク研究所重力物理学 (アルバート・アインシュタイン研究所(AEI))、ハノーバー大学、グラスゴー大学の科学者、また、パートナーであるカーディフ大学、バーミンガム大学、英国のいくつかの大学、スペインのパレアレス大学の科学者からなる。

LIGO は、ライナー・ワイス (MIT 物理学教授、名誉教授)、キップ・ソーン (カリフォルニア工科大学理論物理学のリチャード P.ファインマン教授、名誉教授)、ロナルド・ドレーバー (カリフォルニア工科大学物理学の教授、名誉教授) たちにより、重力波を検出する手段として 1980 年代に提案されたことから始まった。

Virgoでの研究は、19の欧州研究グループに所属する250人以上の物理学者やエンジニアからなる、Virgoコラボレーションにより行なわれている（フランスの国立科学研究センターCNRSから6グループ、イタリアの国立原子核物理研究所INFNから8グループ、オランダのNikhefから2グループ、ハンガリーのウィグナーRCPグループ、ポーランドのPOLGRAWグループ、VIRGO検出器のあるイタリア・ピサ近郊のヨーロッパ重力観測所EGO）。

今回の発見は、Advanced LIGOでの感度の向上により可能となった。というのも第一世代LIGO検出器がAdvanced LIGOとして大きくアップグレードされ、探索可能な宇宙の体積が大幅に増加したからだ。それにより、初めての連続観測で、すでに重力波検出が達成されたのである。Advanced LIGOの財政は米国国立科学財団（NSF）によって支援されている。また、ドイツでの資金調達機関（マックス・プランク研究所）、英国での資金調達機関（科学技術施設評議会、STFC）また、オーストラリアでの資金調達機関（オーストラリア研究会議）がこのプロジェクトにとり重要な役割を果たしてきた。Advanced LIGOの感度をより向上させるための重要な技術は、ドイツと英国から成るGEOコラボレーションにより開発され、試験されてきた。重要なコンピュータリソースは、AEIハノーバーアトラスクラスター、LIGO研究所、シラキューズ大学、ウィスコンシン大学ミルウォーキー校らにより貢献されている。オーストラリア国立大学、アデレード大学、フロリダ大学、スタンフォード大学、ニューヨーク市コロンビア大学、ルイジアナ州立大学などの数カ所の大学で、Advanced LIGOのための主要な構成要素の設計、構築、確認実験が行われた。

添付資料情報：

マックス・プランク研究所 重力物理学(アルバート・アインシュタイン研究所 ((AEI))) は、ベルリン近郊のゴルトム（ポツダム市）及びハノーバーに付属の研究所を併設するマックス・プランク協会所属の研究所であり、それは密接にハノーバー大学に関連している。1995年に始まって以来、マックス・プランク研究所 重力物理学(アルバート・アインシュタイン研究所 ((AEI)))は主要な国際的研究拠点としての地位を確立してきた。研究プログラムは5つの部門で行われ、数ある独立の研究グループにより重力波物理学のすべてのエリアをカバーしている。それは、宇宙の巨大次元から小さなスケールを扱う弦の場の理論までカバーする。5部門のなか3部門はLIGO科学コラボレーションの一部であり、初めての重力波直接観測に主要な役割を果たした。

ハノーバー大学 重力物理学研究所は AEI Hannover と共同設置されている。二つの研究所の科学者たちは、同じ建物内で、緊密に連携しながら、あらゆる側面の重力波研究を行う。50人以上いる博士課程の学生は International Max Planck Research School (IMPRS)のメンバーとして、ハノーバー大学における博士号取得に向け研究を進める。

マックス・プランク研究所における重力波の研究には長い歴史があり、この分野が始まった当初である1960年代にまでにさかのぼる。共鳴型重力波検出器数台を用いた同時実験を行うことで、60年代に重力波検出の早期主張の反証を行ったのも、マックス・プランクのグループであった。その後グループはレーザー干渉計を用いることに決め、最初のプロトタイプ・レーザー干渉計型重力波検出器を作り上げた。それにより大型検出器には欠くことのできない、今日知られるほぼすべての主要な概念が開発されて、動作確認実験も行われた。光モード・クリーナー、迷光サスペンション、パワー・リサイクル技術、さらにハノーバー大学がのちに加わり、デュアル・リサイクル技術、レゾナント・サイドバンド・エクストラクション干渉計、熱アダプティブ光学素子、複数ステージ・モノリシック・サスペンション、さらに安定したハイパワーレーザーである。

重力波はアインシュタインの一般相対性理論の重要な予言の一部である。加速運動をする巨大な質量を持った物体は時空に波紋を起す。それが遠く離れた2点間の距離に相対的な変化をもたらす。恒星の爆発やブラックホールの合体といった、天文学的な波源から出された重力波でさえ、地球上で1キロの長さに対して陽子の直径(10^{18} メートル)の千分の一にあたる変化しか起こさない。今日になり初めて検出器は重力波検出が可能な感度に達することができた。これまでは見えなかった「重力波による宇宙」が天文学における新時代の先がけとなる。アメリカのLIGO、ドイツのGEO600、イタリアのVirgo、加え計画途中の日本の検出器とインドの検出器は緊密に連帯している。宇宙における低周波数帯での検出器であるLISAプロジェクトも、ハノーバー大学とAEIの科学者たちが中心になり、ESAとNASAにより準備が進められている。

今回ここに報告する信号は、地球到達時刻が2015年9月14日、米国東部夏時間午前5時51分(9時51分UTC)、であるため、GW150914と呼ばれる。ハンフォードとリビングストンの検出器両方によって検出された。0.2秒間にわたり観測され、その間信号の周波数と強度は両方とも増加していった。0.2秒間に周波数は35 Hzから250 Hzまでに増えて最大強度ストレイン(歪み)は 10^{-21} を記録した。

ハンフォードの検出器の7ミリ秒前にリビングストンの検出器が信号を記録したという、到着時間差から、科学者たちは波源が南半球に位置していたと特定できる。

信号は、一般相対性理論の予測によると、互いに周回して合体していく一対のブラックホールから出たものでその質量はそれぞれ太陽の約29倍および36倍であるといえる。合体によって生成された単一のブラックホールは太陽の約62倍である。太陽の約3倍の質量が一瞬にして重力波に変換された。それによる最大出力エネルギーは、晴れ上がり以降観測可能な宇宙すべてのエネルギーの約50倍である。観測からまた、ブラックホールは地球から410メガパーセック(13億光年)離れた場所にあることもわかった。

Advanced LIGO 干渉計に起こる、ランダムな雑音のゆらぎの特徴づけにより、科学者たちは統計的有意性を標準偏差5.1と推測する。そのことはつまり、16日間連続観測を行った時に、ランダムな検出器のゆらぎで、偶然にこのような信号が起こる確率は、20万分の一以下だということを示す。

Advanced LIGO はアメリカのワシントン州ハンフォード、ルイジアナ州リビングストン両方に設置された重力波検出器によって構成される。各観測所に設置された、L字型をした長さ4キロメートルの真空チューブのなかで、レーザー光が干渉計を行き来することにより、両端部に置かれたミラー間の距離を精密にモニターする。アインシュタインの理論によれば、重力波が検出器を通過する際、ミラー間の距離が微小量変化する。この干渉計では、陽子(10-19メートル)の一万分の一よりも小さな長さの変化が検出可能である。

信号が宇宙から到着したものであり、重力波を発生させたイベントの方向を決定するために、独立した、遠く離れた複数の天文台が必要である。

aLIGO は2016年1月12日に最初の同時連続観測を終えた。観測中の感度は初期LIGOに比べ、3倍から5倍に上回った。デザイン感度では初期LIGOの感度を10倍上回ることが期待されていた。

GEO600 はドイツ、ハノーファー近郊に位置する、600メートルの基線長をもつ干渉計型重力波検出器である。マックス・プランク研究所 重力物理学とハノーバー大学 重力物理学研究所

の科学者たち、また英国のパートナーらによりデザインおよび稼働されている。GEO600 は重力波検出器の世界的なネットワークの一部であり、現時点において、ほぼ連続的データを取得している唯一の検出器である。GEO600 はまた、非古典的な光（スクイーズされた光）、シグナル・リサイクル技術やパワー・リサイクル技術、さらに一体化したサスペンションのような、アドバンスト型検出器で用いられる技術のシンクタンクでもある。

アトラス はハノーファーにある AEI に設置された大きなコンピュータ・クラスターであり、驚くべき計算能力を持つ。アトラスは 14,000 以上の CPU コアと、250,000 GPU コアから成り、重力波データ解析用に設計された、世界で最も大きなコンピュータ・クラスターである。アトラスは主にマックス・プランク研究所から投資や運用などの援助を受け、さらにハノーバー大学からも運用的援助を受けている。

資金情報

LIGO 天文台は国立科学財団 (NSF) により資金提供されており、カリフォルニア工科大学と MIT により考案、構築および運営がなされる。LIGO のアップグレードには、NSF による資金提供に加え、ドイツのマックス・プランク研究所、英国の科学技術施設評議会 (STFC) さらにオーストラリア研究会議 (ARC) から多大の資金的及び技術的な貢献が提供された。

GEO600 は、教育科学・研究技術省、ニーダーザクセン州、マックス・プランク研究所、科学技術施設評議会 (STFC) とフォルクスワーゲン によって資金を供給されている。