

ブラックホールと重力波

真貝寿明 (大阪工業大学, 武庫川女子大学)

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

一般相対性理論から導かれるブラックホールと重力波の最新の研究を紹介します。重力波は2015年に初めて観測され、その観測計画を率いた3名の研究者が2017年にノーベル物理学賞を受賞しました。また、2020年にはブラックホール研究をテーマに、ノーベル物理学賞が授与されました。

1 ブラックホール

1.1 ブラックホール解の発見

面白いことに、アインシュタイン自身は一般相対性理論を導いたところで満足してしまい、重力場の方程式 (アインシュタイン方程式) をきちんと解いたのは他の人の功績である。アインシュタイン方程式を初めて解いたのは、シュヴァルツシルトだった。シュヴァルツシルトは、平坦ではない時空の解を求めようとして、もっとも簡単な計算になるような仮定を置いた。すなわち、時空を球対称・静的 (計量は時間に依存しない)・真空として、時空の中心の一点にだけ質量 M の物体があるとしたときの解を求めた。

得られた解には奇妙な点があった。ゼロ割りで無限大が生じてしまう場所があったのである。その1つは、**シュヴァルツシルト半径**と呼ばれる

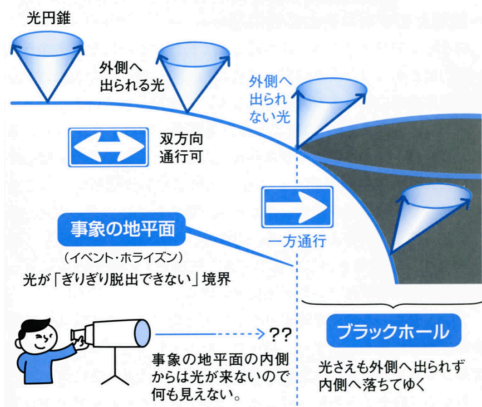
$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

のところと、 $r = 0$ のところである。ゼロ割りの割算は無限大となってしまう。物理的に無限大はあってはならない点である。

これは、今日では、**ブラックホール**と命名された時空である。 $r = r_g$ の面は、**事象の地平面**と呼ばれるブラックホールの境界面である。この面より内側では、光速であってもブラックホールから逃れることはできない。 $r = 0$ の点は**時空特異点**と呼ばれる。一般相対性理論が適用できなくなってしまう点である。

シュヴァルツシルト半径 (Schwarzschild radius)

ブラックホール (blackhole)
事象の地平面 (event horizon)



光が到達できるかどうかは、光円錐の振る舞いを考えると分かりやすい。ブラックホールの近くでは外側に放たれた光も内側へ戻ってくることになるので、光円錐が内側を向いている。

図 1: 光が無制限遠方へ脱出できない領域をブラックホールと呼ぶ。その境界面を事象の地平面とよぶ。

シュヴァルツシルト半径 (1) の値を計算すると表 1 のようになる。

表 1: シュヴァルツシルト半径 (対応するブラックホールの大きさ)。質量 M の物体がどの位の半径 R_{Sch} に押し込まれたらブラックホールになるか、という目安。Sgr A* は天の川銀河中心の超巨大ブラックホール。

天体	M	R_{Sch}
地球	$6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$	8.9 mm
太陽	$M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$	2.95 km
Sgr A*	$4.2 \times 10^6 M_{\odot}$	$1.24 \times 10^7 \text{ km}$

OnePoint

ブラックホールの近くにいるロケット内の時間の進み方は地球より遅い。つまり、このロケットは未来にいくタイムマシンになる。

つまり、一般相対性理論は、その解として、一般相対性理論が適用できない特異点を含んでしまうのだ。理論自身が破綻することを予言しているとは、非常に奇妙なことである。

シュヴァルツシルトのブラックホール解は、「球対称・静的」で「真空」という仮定のもとで得られた解だった。それから 50 年近く経って、1963 年にカーが回転しているブラックホール解を発見した。静止しているブラックホールよりも、回転しているブラックホールの方が現実的に存在していると考えられることから、カー解はその後のブラックホール研究を大きく前進させることになった。

OnePoint

ブラックホールの事象の地平面で何か特別なことが生じるわけではない。ロケットで知らない間に内側に入ってしまうこともあり得る。

1.2 ブラックホールの発見

■はくちょう座 X-1

ブラックホール自身は光を出さないので観測できない。しかし、周囲のガスや星を強い重力で引き寄せることから、間接的に発見することができる。1964 年には、はくちょう座に、強力な X 線を放つ謎の天体 X-1 が発見された。放出されるエネルギーから見積もると、この天体の中心にはブラックホールがあると考えられている。現在では、このようなブラックホールの候補天体は 30 個ほどある。

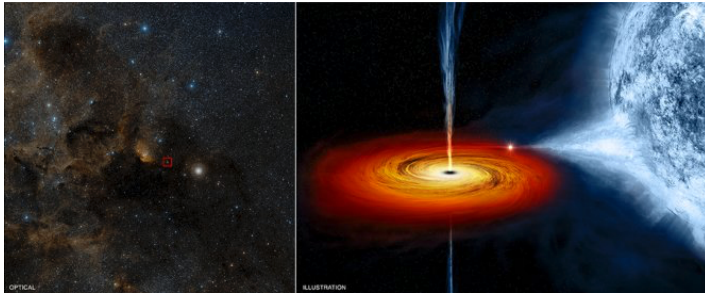


図 2: はくちょう座にある X-1 と呼ばれる強い電波源天体は、ブラックホールであると考えられている。右は想像図。ブラックホールは隣の星を吸い込みつつあるが、流れ込む物質は降着円盤を形成し強い X 線を放射する。[NASA のページが提供する画像]

■いて座 A*

ゲンツェルとゲズ は、それぞれ独立に、私たちのいる銀河（天の川銀河）の中心に、超大質量なブラックホールがあることを突き止めた天文観測で、2020 年のノーベル物理学賞を受賞した。銀河の中心は我々から見て天の川の中央にあり、いて座（さそり座の東）の方向にある。銀河の中心部分の手前には、多くの星があって、分解能の高い精密な観測が要求される。しかもガスが濃いために波長の長い近赤外線領域にある光でようやく観測することができる。

ゲンツェル率いるドイツのグループはチリにある南天天文台 (ESO) を用いて、そしてゲズ率いるアメリカのグループはハワイにあるケック望遠鏡を用いて、1992 年以来すでに 30 年近く、天の川銀河の中心を継続的に観測してきた。分解能を高めるためには地球の大気による光の揺らぎが問題になる。そこで、2つのグループは当初は露光時間を 1/10 秒ほどの短時間にして何枚も撮影する手法を用いた。ゲンツェルのグループは 4 年かけて、銀河中心付近では、多くの星が激しく動いていることを明らかにする (1996 年)。しかし、短時間露光では、暗い星までは映らない。そこで、ゲズのグループは、補償光学として提案されていた技術を導入した。これは、地上からレーザー光を望遠鏡の視野に放ち、人工的な星をつくって、その大気の揺らぎを計測する。そして、大気のゆらぎを打ち消すように望遠鏡から得られるデータを修正する技術である (図 4)。この技術によって長時間露光が可能になり、銀河中心の星々を構成する成分や 3 次元的な移動速度がわかるようになった。

このようにして得られた星の追跡画像は実に説得力があるものだった。例えばゲンツェルらが S2 と名付けた (ゲズらは S02 と名付けた) 星は、16 年の周期で楕円運動をしていたのである (図 5 参照)。この事実は、焦点にあたる場所に巨大な重力源が存在していることを示していて、この場所こそが、電波天文学者らによって命名されていた天の川銀河の中心 (いて座 A

Reinhard Genzel (1952–)
Andrea M. Ghez (1965–)



図 3: 2020 年ノーベル物理学賞の受賞者。左からペンローズ、ゲンツェル、ゲズの似顔絵。ノーベル財団が受賞者発表に用いたもの。

スター、Sgr A*) だということがわかる。ゲンツェルらも補償光学の技術を用いて観測し、2グループは一致する観測結果を出した。

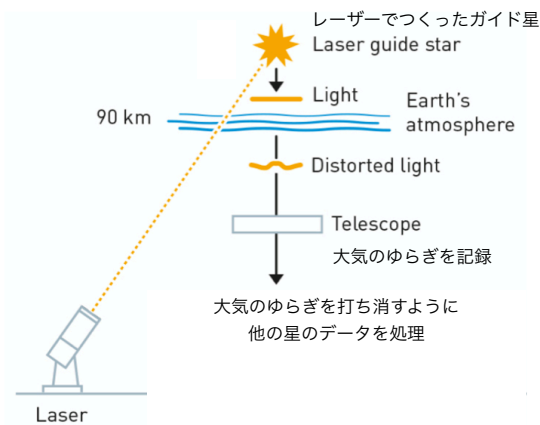


図 4: 補償光学の原理 (ノーベル財団による贈賞理由説明資料を加工した)。

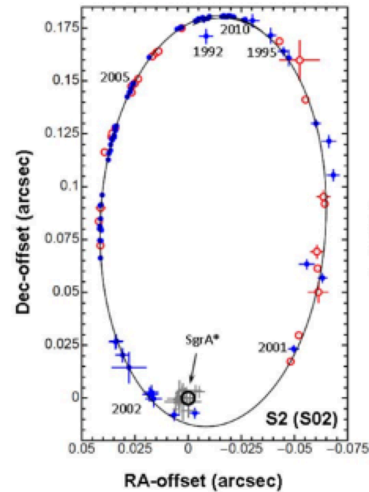


図 5: S2(S02) と名付けられた星は 16 年の周期で楕円運動をしている。焦点に相当する部分が天の川銀河の中心で、その質量が太陽質量の 400 万倍であることが見積もられた。(ノーベル財団による贈賞理由説明資料から、ゲンツェルらの 2000 年の論文を加工したもの)

天の川銀河の中心の位置は、その他の周囲の星の運動からも推測され、矛盾なく定まるようになった。質量は太陽質量の 400 万倍と見積もられる。しかも、光っている天体がなく、星の運動も予想された速度で移動することから、点に近い重力源であると考えられる。これらから結論されるのは、銀河中心には、超大質量ブラックホールが存在している、ということだ。こうして、見えないブラックホールの存在がわかるのである。

1.3 ブラックホールの直接撮像の成功

2019 年 4 月、ブラックホールを直接写真に撮ることに成功した、という記者発表が世界各地に同時刻で行われた。イベントホライズン・テレスコープ (EHT) と銘打たれた電波望遠鏡を用いた国際プロジェクトである。日本は、国立天文台 (水沢) のグループが中心となって、プロジェクトをリードした。このプロジェクトが発表したのは、M87 というおとめ座銀河団にある楕円銀河 (約 5500 万光年) の中心にある、超巨大ブラックホールの写真である (図 6 [左])。厳密にはブラックホールは発光しないので、その周囲の天体から発せられた光がつくるブラックホールの影 (ブラックホールシャドウ) である。

電波望遠鏡は口径が大きいほど微弱な電波を集めることができる。日本のグループは、以前から、石垣島・鹿児島・小笠原・水沢の各電波望遠鏡を用いた同時観測を行って、あたかも 1 つの大きな電波望遠鏡での撮像のように解析する超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry:

VLBI) の技術を磨いてきた。EHT は、地球上にある 8 台の電波望遠鏡 (図 6 [右]) を 1 週間かけて、M87 の中心ブラックホールに向けた。地球サイズの電波望遠鏡となり、20 マイクロ秒角の解像度を持つ。これは人間の視力でいうと、300 万に相当する。そして、解析に 2 年を要してブラックホール・シャドウの写真を初めて実現した。

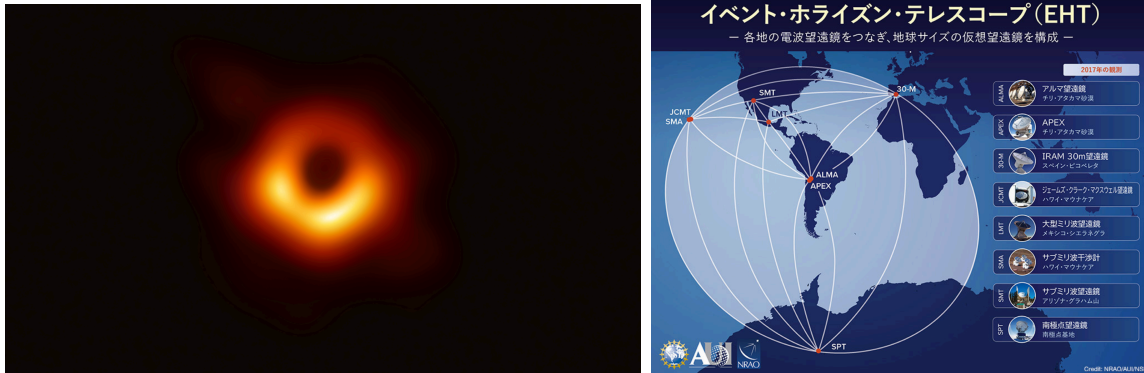


図 6: [左] イベントホライズン・テレスコープ (EHT) のプロジェクトが 2019 年 4 月に発表した、M87 銀河中心ブラックホールの写真。[右] EHT で使われた電波天文台。

光がある距離以上にブラックホールに近づくと、光はブラックホールの重力に直接とらえられたり、ブラックホールを周回しながらやがてブラックホールに吸い込まれてしまう。そしてその距離よりも遠い位置を通過する光は、進行方向が曲げられるため、本来は地球に届かない光も地球に届くことになる。EHT プロジェクトは、ブラックホールシャドウがドーナツのよう見えた理由として、図 7 にあるような光の軌跡のシミュレーション図も発表した。撮影された写真から、M87 の中心にあるブラックホールの質量が、太陽の 65 億倍であることがわかった。

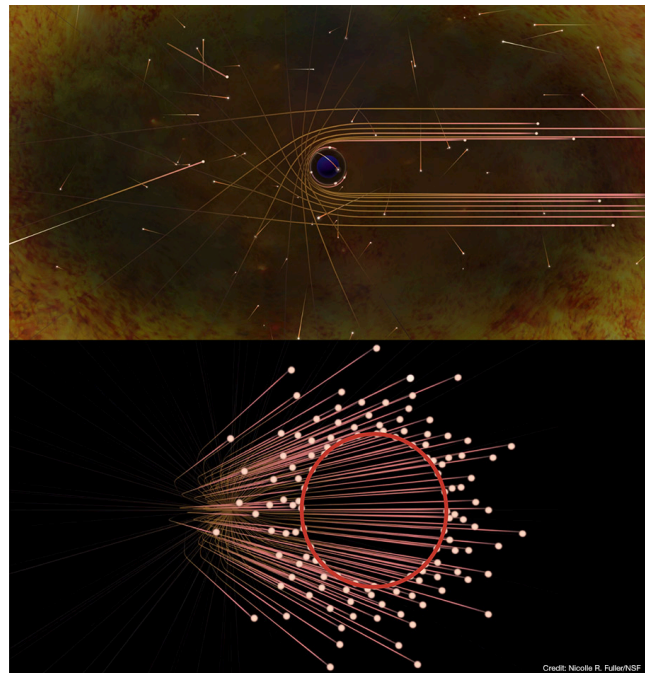


図 7: EHT が同時に発表したブラックホールの周囲の光の軌跡の模式図。

1.4 時空特異点の問題

シュヴァルツシルト・ブラックホールの解にも、カー・ブラックホールの解にも、無限大となる時空特異点が存在している。物理的な現象を扱う微分方程式の解に、物理的でない無限大の発散点が生じるのは不思議である。無限大となれば元の理論がそもそも適用できなくなってしまうからだ。当時多くの研究者は、相対性理論の解に特異点が存在するのは、解を導く時に課した時空の対称性が原因だと考えていた。ところが、ホーキングとペンローズは「重力崩壊の状況では**時空特異点**の発生が避けられない」ことを時空の対称性を課さずに証明する。1965年に発表した**特異点定理**である。

ホーキングとペンローズは、時空の数学的構造を解析して、

特異点定理 (1965年)

一般相対性理論の方程式の解には、真空や普通の物質を考える限り、必ず特異点が存在する

という定理を発表した。強い重力源があれば光を曲げるほど時空がゆがむ。凸レンズを通る平行な光が焦点の1点に集められるように、強い重力が存在すれば、時空には必ず無限大を含む点が存在する、という定理である。

物理的には特異点の出現はたいへん困る。しかし、ホーキングとペンローズの特異点定理は一般的な数学的証明で、それが避けられないことを示している。

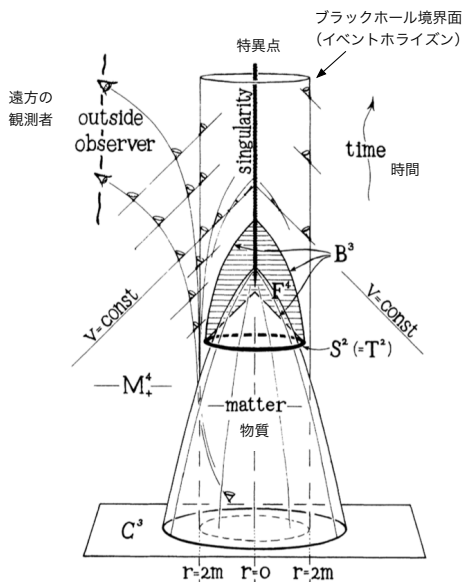


図 10: ペンローズが描いたブラックホール形成の図。横の広がりが空間 (2次元で表している)、縦方向上向きに時間の進みを表す。物質が重力崩壊してつぶれ、光 (円錐で描かれているのが光の広がり方を示す) が遠方へ到達しない領域が出現する。中心では特異点が発生するが、それはブラックホール境界面の内側にあるので、遠方の物理を乱さない。(R. Penrose, Phys. Rev. Lett. 14 (1965) 57 の図を加工。)

時空特異点
(space-time singularity)
特異点定理
(singularity theorem)

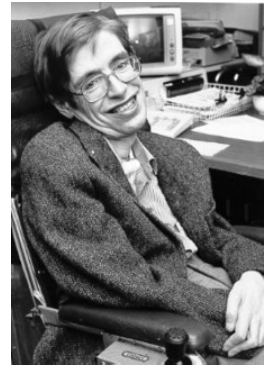


図 8: Stephen W. Hawking (1942–2018)

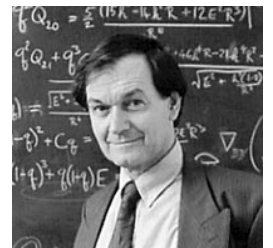


図 9: Sir Roger Penrose (1931–)

■宇宙検閲官仮説と裸の特異点

ペンローズは、現実的な解決方法として、

宇宙検閲官仮説 (1969 年)

重力崩壊でできる時空特異点はブラックホールの内側に必ず隠されるだろう。だからブラックホールの外側の観測者には、特異点の悪さは影響しないから大丈夫だ

という仮説を唱えた。宇宙のどこかに特異点があっても、ブラックホールの内側に閉じこめられる、という予想である。逆に、ブラックホールに閉じ込められずに出現する特異点のことを、ペンローズは**裸の特異点**^{*1}と呼んだ。そのような裸の露出は、宇宙検閲官(?)が禁止するのだ、という粋なネーミングである。

これはあくまでも仮説であり、証明されたものではない。面白い考えだが、日本的に言えば「臭いものにフタ」という発想だろうか。検閲官仮説は、特異点の取り扱いに対する難しさを解決するものではない。また、宇宙の初期特異点に対する解決法も不明のまま残されている。

その後、いろいろな研究から、おおよそペンローズの予想は正しいことがわかってきたが、特殊な状況では、裸の特異点が発生する、という計算例が報告された。例えばとても細長い形に分布した粒子が重力崩壊すると、ブラックホールができず、裸の特異点が形成する、という数値シミュレーション報告である。また、ブラックホールができるかできないかの境界を調べていくと、いくらでも小さいブラックホールが作られる可能性が判明し、これは同時に、裸の特異点が生じる可能性も意味していた。

時空特異点の扱いは、研究者にとって悩みの種である。とりあえず自然界は、特異点をブラックホール地平面の内側にかくまってくれているとはいえ、このままでは究極の強い重力場の研究が進まない。将来的には、一般相対性理論と量子論を融合した究極の大統一理論が特異点問題を解決してくれる、と信じてはいるが、究極理論の候補には素粒子論(場の理論)に立脚した**超弦理論**(超ひも理論, super-string theory)と、一般相対性理論を拡張した**ループ量子重力理論**(loop quantum gravity)の2つがあり、どちらも実験検証ができない理論のため、数学的な整合性などの研究が行われている段階である。

宇宙検閲官仮説

(cosmic censorship conjecture)

裸の特異点

(naked singularity)

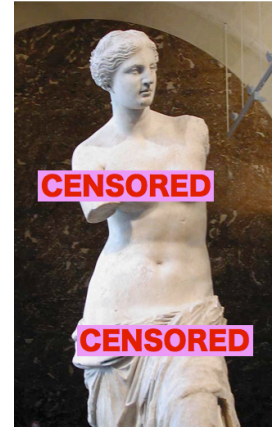


図 11: 「子供は見てはいけません」の意味で censored という言葉が使われる。

*1 英語で裸は, nude と naked の 2 つがあるが, nude は自ら見せる裸, naked は思わず見られてしまう裸というニュアンスがあるようだ。

2 重力波

ニュートンの万有引力の考え方では、どんなに遠くに離れている物体の間でも、力は一瞬で伝わることになるが、これは情報伝達の上限度が光速であるとする特殊相対性理論と矛盾する。重力場の方程式を解析したアインシュタインは、電磁波と同じように重力も波として伝わることを発見した。時空の歪みも、湖の表面のさざ波のように、周囲へ（この場合は立体的な球面状に）波として伝わってゆくのである。大きな重力源が振動すれば、時空は伸びたり縮んだりしながら波のように伝わるというのだ。これが**重力波**である。伝播する速度は光速である。

残念ながら、重力波は非常に弱い。原理的には質量のある物体が加速度運動すれば発生するのだが、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らない。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、天体スケールのもを観測するのは非常に困難になる。ターゲットとされる天体現象は、超新星爆発やブラックホールの合体、中性子星の合体などだが、それらの発生頻度も不確かだ。

2.1 初期の重力波検出実験

60年代の終わりには、重力波を実際に観測しようと試みる物理学者も登場した。アメリカのウェーバーである。ウェーバーは、メーザーと呼ばれる原子共振を用いた光の発振原理（レーザー光線登場の原型となった原理）を考案した物理学者でもある。彼は、1.5トンものアルミニウムの円筒を吊るし、重力波が通過するときその形が歪むことを観測しようと試みた。今では「共振型」と呼ばれる原理である。そして68年に「2台の装置で重力波を同時観測した」と報告し、世界に衝撃を与えたが、残念ながら追従した他のどのグループも追試できず、今では幻の発見とされている。しかし、ウェーバーの誤報は、より正確に重力波を検出しようとする機運を生んだ。

2.2 連星パルサー：重力波の間接的証明

■パルサー

中性子星は燃え尽きた星が到達する1つの姿である。原子は、原子核のまわりに電子が飛び回っている構造であり、両者は電氣的にプラスとマイナスで引力が働いている。ところが、星が燃え尽きると、星は重力で押し潰されて原子核と電子も合体してしまう。電氣的に中性になり、中性子だけの塊のとても重たい星になる。典型的な中性子星は、半径約10キロメートルで、太陽の1.4倍の質量になる。中性子星はその小ささゆえ超高速で回転する。そして磁場によってパルス信号を定期的に（ミリ秒周期で）放出すれば、**パルサー**と呼ばれる天体になる。

重力波
(gravitational wave)

OnePoint

重力波の波源として期待されているもののうち、波形予測の研究が進んでいるのは、ブラックホールや中性子星連星の合体現象である。



図 12: Joseph Weber (1919-2000)

パルサー (pulsar)

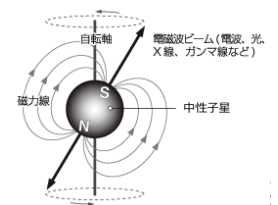


図 13: パルサーの正体は高速に回転している中性子星。磁極方向から放出される電波が、灯台のサーチライトのように周期的に観測される。

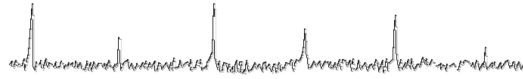


図 14: 連星パルサーを拾っている電波のデータ.

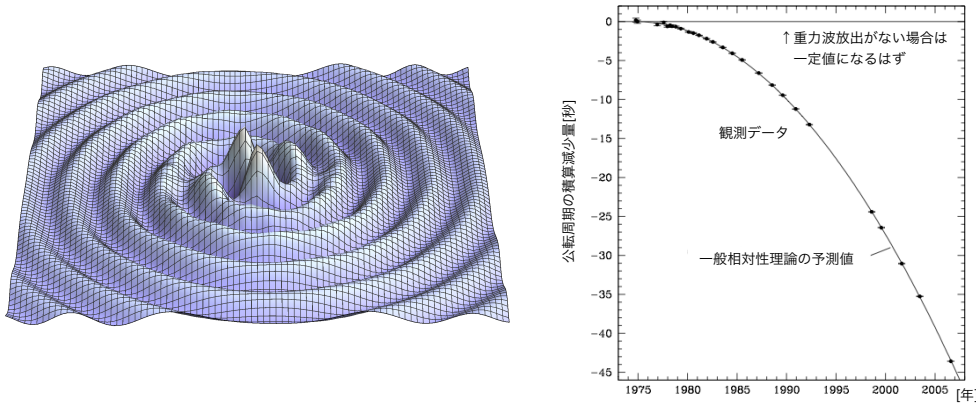


図 15: [左] 連星から放出される重力波のイメージ図. 中央の 2 つの大きな山のところに星があり, 2 つの星が次第に近づいて合体するまでに, 時空に歪みを引き起こす. 歪みは波として周囲に伝播する. [右] 重力波を放出することによって, 連星パルサーの公転周期が減少していくことが予想されるが, 30 年以上にわたって, その予想曲線にピッタリと観測データが一致する. [Weisberg et al (2010), arXiv:1011.0718 より]

■連星パルサーの発見

1974 年, ハルスとテイラー は, 電波望遠鏡でパルスの周期が約 8 時間で周期的に変わる奇妙なパルサーを発見した. 観測を続けると, 中性子星 2 つが連星となっていて, その片方からのパルスであることが分かった. 連星中性子星の発見である.

太陽程度の質量をもつ 2 つの中性子星が 9 時間弱で周回するこの連星は, 一般相対性理論をテストする良い実験場となった. 大きな質量の星が高速で運動しているので, 連星からは重力波が発生する. 重力波は連星からエネルギーを持ち去るので, 連星はエネルギーを失って近づいていく. そのため, 公転周期はだんだん短くなるはずである. 発見後 30 年以上経つが, 連星の公転周期の減少は, 一般相対性理論の予測と完全に一致している (図 15 [右]). こうして, 重力波が存在していることが, (間接的にだが) 初めて報告されることになった. ハルスとテイラーは, 「重力研究の新しい可能性を開いた新型連星パルサーの発見」の功績により, 1993 年にノーベル物理学賞を受賞した.

Russell A. Hulse
(1950–)
Joseph H. Taylor, Jr.
(1941–)
1993 年ノーベル物理学
賞共同受賞

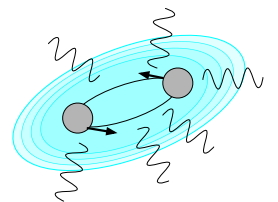


図 16: 連星パルサーは周囲に重力波を放出し, 次第にエネルギーを失って, 最後は合体する.

2.3 レーザー干渉計による重力波検出

80年代に入ると、レーザー干渉計を用いて広い周波数帯域での重力波検出を目指す計画が提案される。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ある（図17）。1つの光を2筋に分け、L字型の2本の経路（「腕（アーム）」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ある。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で設計される。実際にはレーザー光線は、腕を100往復ほどして干渉測定器に入射するので、数100kmの腕をもつ干渉計である。

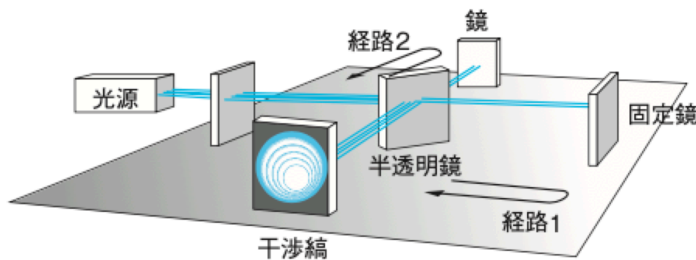


図17: マイケルソン干渉計の概略。光を2つに分け、別の経路を通して再び合成する。合成した光の強弱が変化すれば、2つの経路の距離差あるいは2つの経路の速度差が検出されたことになる。

微弱な重力波を検出するためには、レーザー信号に含まれるノイズとの戦いが強いられる。巨大な干渉計では強力なレーザー光が必要になるが、強力な光は量子揺らぎを発生させ、微小な測定を阻害する。実験物理学者たちは、相反する技術的要請を乗り越えて、2000年代には干渉計を稼働させた。理論物理学者たちは、連星の合体現象で生じる重力波の波形予測の計算を、さまざまな難題を乗り越えて準備した。

■2000年代の重力波観測

アメリカは、LIGO（ライゴ^{*2}）と呼ばれる一辺が4kmの腕をもつレーザー干渉計を、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箇所に設置（図18）し、2005年から観測を開始した。イギリスとドイツは600mの腕をもつ干渉計GEOをドイツ・ハノーバーに設置し、2005年に稼働。フランスとイタリアは3kmの腕をもつレーザー干渉計VIRGO（ヴィルゴ）をイタリア・ピサに設置し、2007年に観測を開始する。日本は、これらに先立って2002年から3年間、東京・三鷹の国立天文台に300mの腕をもった干渉計TAMAを運用した実観測を行った。

重力波は、ほかの物質と相互作用が弱いため、地球があってもすり抜けて通り過ぎてゆく。宇宙から来る現象であっても、空を見上げる必要はない。



図18: アメリカ・ルイジアナ州のLIGO干渉計。

1 pc=3.26 光年

^{*2} Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, レーザー干渉計重力波天文台 <https://ligo.caltech.edu/>

しかし、(予想されていたことだが) 2000 年代の干渉計の能力では、どのプロジェクトも重力波を捉えることができなかった。もっとも感度の高かったアメリカの LIGO は、20 Mpc (7000 万光年先) の中性子星連星を捉える能力をもっていたが、2 年以上の実観測で、一回も確かな重力波イベントを発見することができなかった。

■2015 年からの重力波観測

各国は、レーザー干渉計を数年間停止し、感度を改善して、第 2 世代干渉計として再び観測を始めた。感度が 10 倍良くなると、10 倍遠いところの天体からの重力波を捉えることができる。体積比で 1000 倍にあたるので、重力波を捉える確率も 1000 倍高くなる。

日本は、岐阜県・神岡の山中に、一辺が 3km の腕をもつレーザー干渉計 KAGRA (かぐら)^{*3}を新たに建設した。山中にトンネルを掘って造られた干渉計は、地面振動を抑えることができ、装置全体を 20K の低温に冷却することで熱雑音も抑え、第 2 世代 LIGO と同程度の感度を得る計画である。2016 年 3 月には、1 ヶ月の試験運転を行った。2019 年 10 月には LIGO-Virgo との共同観測協定を調印し、2020 年 4 月に実観測を行った。

重力波観測は、LIGO-Virgo-KAGRA の共同観測として実施されている。これまで行われた観測期間を表 2 に示す。現在は各干渉計の改良中で、次期観測 (O4) は 2022 年 12 月下旬から 1 年間の予定である。

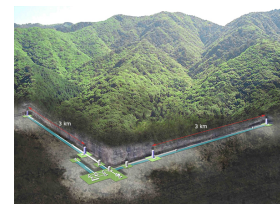


図 19: 岐阜県・神岡の山中に建設された KAGRA の説明図。
[東京大学宇宙線研究所提供]

表 2: これまでの重力波観測期間

観測期	Advanced LIGO		Advanced Virgo		KAGRA	
	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日	年月日
O1	2015 9 12	–2016 1 19	–	–	–	–
O2	2016 11 30	–2017 8 25	2017 8 1	–2017 8 25	–	–
O3a	2019 4 1	–2019 9 30	同左	–	–	–
O3b	2019 11 1	–2020 3 27	同左	–	–	–
O3GK	–	–	–	–	2020 4 7	–2020 4 21

■重力波波形の予測

重力波の振幅はとても小さいために、ノイズにまみれた信号データから、重力波の波形が隠れていないかの宝探しをすることになる。そのために、あらかじめ、重力波波形の正確な計算をすることが課題となった。中性子星連星やブラックホール連星の合体前後で、どのような重力波が発生するのかを、コンピュータシミュレーションを用いて解けるようになったのは、2005 年のことである。予想される波形を図 20 に示す。

^{*3} <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>

KAGRA は、神岡の「か」と「gravitational wave」をかけた名称。ニュートリノ観測でノーベル物理学賞を 2 度日本に導いた (2002 年度小柴昌俊氏、2015 年度梶田隆章氏) スーパーカミオカンデ (小柴氏の時代はカミオカンデ) に隣接する場所である。

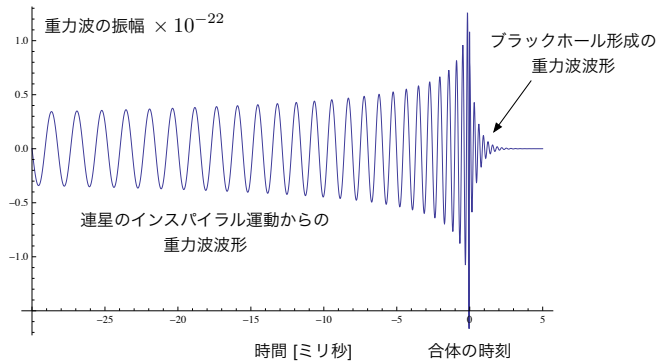


図 20: 中性子星連星の合体の前後で放出される重力波の波形 (予想). 次第に振幅を大きくしながら, 1kHz に近い周波数にまで上がる. 合体後にブラックホールが形成されるならば, 重力波はブラックホールに飲み込まれてしまい, 急速に減衰する. この減衰部分が観測されれば, ブラックホールを直接観測したことになる.

OnePoint

連星合体の最後の段階をインスパイラル (inspiral), 合体 (merger) を経て, 最後にブラックホールができて波が収まっていく段階をリングダウン (ringdown) という.

2.4 重力波の直接観測

■GW150914

2016年2月, アメリカの LIGO グループは, ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した, と発表した. 発表された重力波の観測は, 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, というものだ. GW150914 と名付けられた. 図 21 は, その波形である. 時間差から重力波の到来方向が南半球側とわかった.

GW は gravitational wave (重力波) の頭文字.

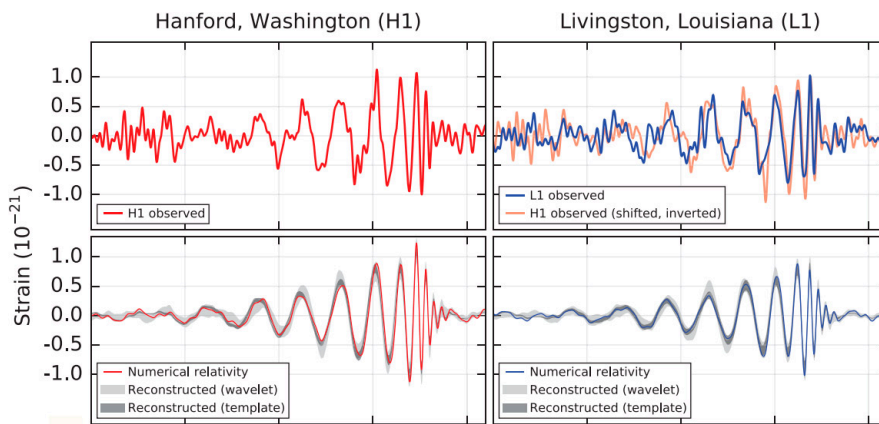


図 21: GW150914 の重力波波形. [上] LIGO の2つの干渉計のデータ. [上右] 0.69 ミリ秒ずらすと2つの干渉計からの波形が重なることを示している. [下] 観測されたデータに合うようにブラックホール合体のシミュレーションして得られた波形を示したもの. [LIGO グループの発表資料より]

OnePoint

重力波の初観測となった GW150914 は, ブラックホール連星の初検出でもあった. しかもその質量は, これまでに知られていない大きさのものだった.

図 21 で示された重力波は, 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る. 図 20 で予測された波形とほとんど同じだ. 周波数の上昇は, 2つの連星が合体する直前に接近しつつある状況を示し

ていて、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った。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る。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った。これまで私たちはブラックホールを望遠鏡で「観た」ことがなかったが、重力波の波形データの中から初めてブラックホールの存在が「見えた」のである。

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る。質量とエネルギーの等価性 ($E = mc^2$) を考えると、これだけの質量が重力波のエネルギーとして宇宙に放出されたことになる。地球で観測された重力波の大きさを考えると、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った。

■GW170817

LIGO グループは、その後 2017 年末までに合計 6 つの重力波検出を報告したが、GW170817 も大きなニュースになった。GW170817 は、ブラックホール連星ではなく、初めての中性子星連星の合体だった。合体直後にすぐにブラックホールができないために、衝突後の高温の核物質の爆発現象が生じ、それが衝突後数週間にわたって光り続けた。

重力波の検出直後 6 分程で LIGO グループは中性子星合体であることに気づき、4 時間後には重力波波源天体の天球上の位置を絞り込み、全世界の天文台に観測情報を提供した。世界中の 70 を超える天文台と人工衛星による望遠鏡がその方向に望遠鏡を向け、ガンマ線、X線、可視光線、赤外線、電波などさまざまな波長での観測が同時に行われたのである。1 つの天体現象を異なる望遠鏡で多角的に追跡する、いわゆるマルチ・メッセンジャー天文学として期待されていた総合的な天体観測体制がスタートした。

その結果、合体の 2 秒後にはガンマ線で観測されていたこと、波源天体は 40Mpc 先の銀河 NGC4993 であることなどがわかり、日ごとに減光していく様子と中性子星連星合体のシミュレーションの結果と比較することで、合体直後に原子核の R-プロセス反応が予想通り起きていたこともわかった。「中性子星連星の合体で金がつくられたことがわかった」と広くニュースで報道されたが、これは望遠鏡で金が見えたわけではなく、減光の様子とシミュレーションモデルが合致した結果である。合体直後のガンマ線の観測から合体後の爆発のモデルが検証されたり、波源の距離が特定されたことと重力波と光の到達時刻の差から一般相対性理論の検証や宇宙膨張モデルの検証も行われた。

2017 年のノーベル物理学賞は、重力波検出に成功した LIGO グループの牽引者 3 名が受賞した。検出の翌年に受賞対象となるのは、異例のスピードであった。

GW170817 は、Virgo グループを含めて 3 台の干渉計での同時観測となった。



図 22: 2017 年ノーベル物理学賞の受賞者。左からワイス、バリッシュ、ソーンの似顔絵。ノーベル財団が受賞者発表に用いたもの。

Rainer Weiss (1932–)
Barry C. Barish (1936–)
Kip S. Thorne (1940–)

■重力波観測の現状

2021年11月、LIGO-Virgo-KAGRAは、O3bの観測期間終了までに、90回の重力波イベントを観測した、と発表した。そのうち連星ブラックホールの合体が83例、連星中性子星の合体が2例、ブラックホールと中性子星の連星合体が3例、ブラックホールと正体不明の連星合体が2例である。最後の「正体不明」とは、従来の理論で考えられている中性子星の質量上限 ($2.5M_{\odot}$) よりも重く、従来の理論で考えられているブラックホールの質量下限 ($5M_{\odot}$) よりも軽い天体が相方と考えられるイベントである。

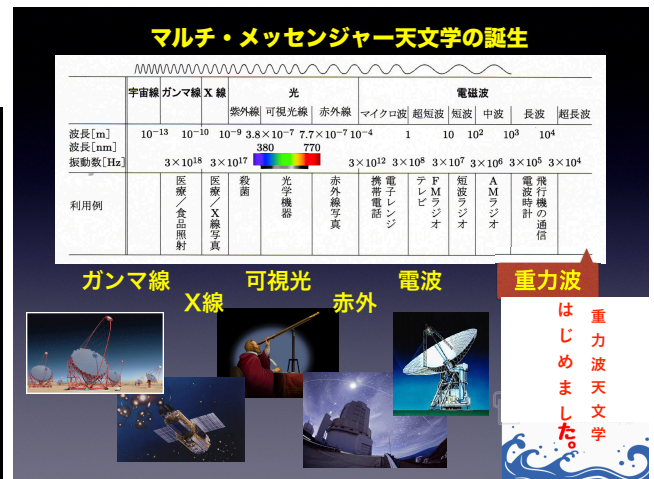
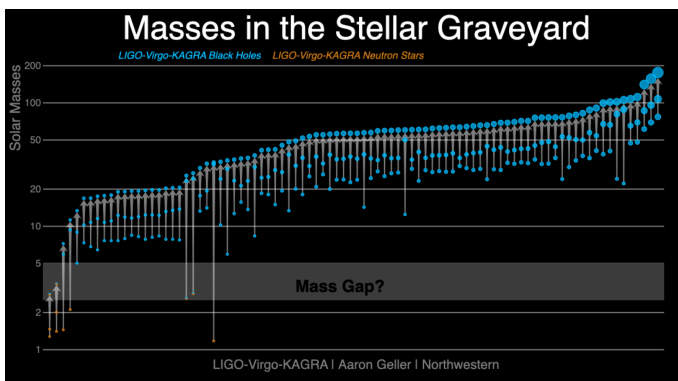


図 23: [左] これまでに観測された連星合体を縦軸に質量（太陽質量の単位）にして小さい順に並べたもの。[右] 重力波観測が可能になったことで、これまでの天文観測に新たな「眼」が加わったことになる。

今後、重力波がより多く観測されるようになれば、波源となった天体の様子（質量・回転・軌道などのパラメータの特定）だけではなく、中性子星内部の高密度物質の状態がどのようになっているのか、一般相対性理論はどこまで正しいのか、といったこれまで不可能だった物理的な問題へアプローチしていくことが可能になる。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 真貝寿明, 「現代物理学が描く宇宙論」(共立出版, 2018)