

重力波の初の直接検出とその意義

1. aLIGOの発見

2016年2月12日午前0時30分(日本時間), アメリカのaLIGO (advanced Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) は, 約3,000 km離れた2台の検出器により質量が $36^{+5}_{-4}M_{\odot}$, $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ は太陽質量)の連星ブラックホールからの重力波を2015年9月14日に検出したと高らかに発表した. 重力波とはアインシュタインの一般相対性理論で予言されていた, 時空のゆがみが光速で波動として伝搬する現象である. ハルスとテイラーにより発見されたPSR1913+16という連星中性子星の軌道周期が, 重力波放出によって減少する割合から間接的に既に存在は確認されていたが, 直接検出は初めてである.

aLIGOは, 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建設された, それぞれ腕の長さ ~ 4 kmのレーザー干渉計(図1)である. aVirgoはイタリアにある腕の長さが3 kmのもので現在改良中, また日本のKAGRAは岐阜県飛騨市の神岡鉱山内で建設中の腕の長さが3 kmのレーザー干渉計である. 前身のLIGOとVirgoは2002年から2011年にかけて観測を行ったが, 重力波を検出することはなかった. その後, より高感度化を目指したアップグレードをLIGOは行った.

aLIGOが正式な観測期間に入る直前の, 2015年9月14日9時50分45秒(協定世界時), 2台のLIGO検出器はブラックホール連星の合体によって発生した重力波を観測し

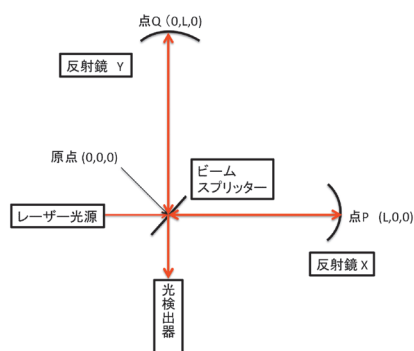


図1 レーザー干渉計の原理. 重力波がない時にはレーザー源からの光はビームスプリッターで右と左に2等分され, 端の鏡で反射されて同時にビームスプリッターに戻って来る. しかし, 重力波がやって来ると時空のゆがみのために同時には戻って来ないので干渉パターンが発生する. これを光検出器で検出して重力波の存在を知ることができる装置である. レーザー干渉計の腕の長さを L , 重力波により生じる腕の長さとの差を ΔL とすると, それらと重力波の振幅 h との関係は $h = \Delta L/L$ と表される. 重力波は計量テンソルの揺らぎであるため重力波の振幅 h は無次元であることに慣れないかもしれないが, 注意して欲しい.

た.¹⁾ 検出された重力波は35 Hzから250 Hzまで振動数が上昇し, 最大時の振幅は 1.0×10^{-21} となった. 元々のノイズ入りの振幅は $h \sim 10^{-18}$ もあり, どこに重力波があるか全く解らないnoisyなものである. しかし, 詳細な解析の結果, 得られた信号のSNR(信号雑音比)は24で, ノイズによって発生するのは, 20万年に1回以下, ノイズである確率は 2×10^{-7} 以下で有意さは 5.1σ 以上である. 一般相対性理論による理論波形と較べることにより, 合体前のブラックホールの質量はそれぞれ $36^{+5}_{-4}M_{\odot}$, $29^{+4}_{-4}M_{\odot}$ で終状態のブラックホールの質量は $62^{+4}_{-4}M_{\odot}$, 無次元化されたカーブラックホールの角運動量パラメーター a/M は $0.67^{+0.05}_{-0.07}$, 光度距離は 410^{+160}_{-180} Mpc, 赤方偏移は $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ であった. 何故質量だけからブラックホールと言えるかという, 普通の星ならこんな高振動数の重力波は放出できないし, 中性子星には約 $3.2M_{\odot}$ という上限質量が存在するからである. また, 2台しか稼働していなかったのも, 位置の決定精度は600平方°程度の南天だということしかわからない. なお, イベントの名前はGW150914と名付けられた.

2. GW150914は我々に何を示したか?

次の5つの事項が少なくとも考えられる.

- 1) 重力波の初の直接観測
- 2) 連星ブラックホールの初めての存在確認
- 3) ブラックホールの準固有振動(ringing tail)の存在確認の可能性
- 4) 宇宙で最初にできた種族III星の存在確認の可能性
- 5) 継続時間の短いガンマ線バーストがブラックホール-ブラックホール連星の合体である可能性.

1)と2)は間違いのないもので, 直ちにノーベル物理学賞に値するだろう. 3)は, 図2の最後の方に何となく見えている減衰振動に関するもので, 裸の特異点がないという宇宙検閲官仮定のもとで唯一許されているカーブラックホールになっているかどうかという, アインシュタイン理論の強い重力場中での確認のために必須である. 中野らによる研究では 5σ レベルで確認するためには, 準固有振動だけで $SNR > 35$ が必要であるが,²⁾ 今回のイベントは全体で $SNR = 24$ なので足りない. しかし, aLIGOやKAGRAの最終感度では1年間に今回の100倍くらいのイベント数を期待できる. 準固有振動が確認されればノーベル物理学賞に値するだろう. 4)は今回のブラックホールの質量がブラックホール候補X線星CygX-1等の質量の2-3倍以上ある大きなものである理由と関係している. 太陽のような,

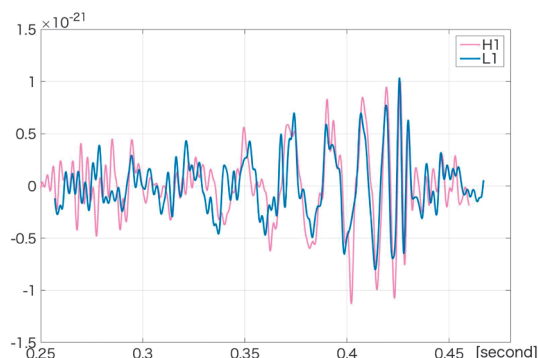


図2 2つのaLIGOで検出された重力波波形。両者への重力波の到着時間を考慮して、時間はずらしてある。細部では違うものの全体としては両者の一致が見て取れる。振幅は生データの $h \sim 10^{-18}$ より3桁も小さい。

質量にして2%程度の金属量の星では進化の後半段階で、炭素以上の金属の吸収線のために質量放出が起こる。GW150914のような大きな質量のブラックホールを作るには金属量の少ない星、例えば宇宙で最初にできた水素とヘリウムしか存在しない種族III星が候補である。種族III星は赤方偏移 $z=10$ くらいの過去にできるが、ブラックホール連星が重力波放出で合体するのに要する時間は連星形成時の公転半径の4乗に比例し、現在合体することが可能である。aLIGOが発表したこのブラックホール起源に関する文献3でも、種族III星起源が期待されており、衣川らの2年前の予言⁴⁾を引用している。何故 $\sim 30M_{\odot}$ - $30M_{\odot}$ のブラックホール連星なのかを簡単に言うと $\sim 30M_{\odot}$ の種族III星は、小さい半径で一生を終わるのでそのままの質量でブラックホールになる。一方、もっと質量の大きな種族III星は大きな半径で一生を終わるので、相手の星が外層と相互作用して、外層の大半を失ってブラックホールになるので結局 $\sim 30M_{\odot}$ - $30M_{\odot}$ になる。あと10個くらい同様のイベントが見つかれば、種族III星起源が確定するだろう。種族III星が過去に存在したことは理論的には疑いようがないが、未だその確認がないので、これもノーベル物理学賞に値するだろう。5)はFermi衛星がGW150914の0.4秒後に50 keV-4.8 MeV領域でGW150914と無矛盾な方向からの継続時間約1秒のガンマ線イベントを発見した。⁵⁾これが、同じものだとすると、継続時間の短いガンマ線バースト(SGRB)をジェットの少し横から見たのと無矛盾である。GW150914には大量の回転エネルギー($\sim 10^{55}$ erg)があり、SGRBのブラックホール連星説が中性子星連星説に替わって議論され始めている。

3. 日本グループの追観測

今回の重力波検出では、日本グループによる追観測も行

われている。日本では、重力波発生源天体からの電磁波やニュートリノ信号検出のための、Japanese Collaboration for Gravitational-Wave Electro-Magnetic Follow-up Observation (J-GEM) が組織され、このJ-GEMと国際宇宙ステーション搭載の全天X線監視装置MAXIは、LIGO-Virgoと追観測パートナーとしての協定(MOU)を結んで、追観測の準備を進めてきた。J-GEMに参加する、南天にある名古屋大学のB&C 61 cm望遠鏡において9月20日から26日に追観測が行われ、東京大学木曽観測所のシュミット望遠鏡の広視野カメラKWFCでも9月18日に限界等級が約18等級で24平方度の観測が行われた。いずれの観測でも有意なイベントは検出されていない。MAXIは全天を約90分で観測可能であるが、今回の到来方向の誤差領域の90%はイベント発生後30分で観測された。そして、 1×10^{-9} erg/s/cm²という 3σ の上限値を得た。

4. KAGRAの意義

aLIGOの記者会見での、日本人記者のKAGRAの今後の役割についての質問に対して、aLIGOの責任者が1) KAGRAは唯一地下にある装置である。2) KAGRAは唯一低温鏡を使う装置である。3) KAGRAが参加することで、どの方向から重力波が来ても、到来したかわかる体制ができる。と明確に答えていた。加速器の新粒子探しのよう、先に見つけられると終わりという話ではない。ET (Einstein Telescope) という将来計画では、地下に腕の長さ10 kmで低温鏡を使ったレーザー干渉計を作る計画である。この装置が動き出すと今回のaLIGOの10万倍の数の重力波源が見つかるだろう。ETの建設のためにもKAGRAの稼働は必須である。今回の発見はガリレオガリレイが自作の望遠鏡で初めて月を見たことに対応する。その後の電磁波によって我々が得た宇宙の知見は膨大である。つまり、我々は重力波によって解き明かされる全く新しい世界の扉を少しだけ開けた瞬間にいたのであり、その奥には膨大な智の宝庫が待っているのだ。

参考文献

- 1) B. P. Abbot, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **116** (2016) 061102.
- 2) H. Nakano, T. Tanaka and T. Nakamura: Phys. Rev. D **92** (2015) 064003.
- 3) B. P. Abbot, *et al.*: Astrophys. J. Lett. **818** (2016) L22.
- 4) T. Kinugawa, K. Inayoshi, K. Hotokezaka, D. Nakauchi and T. Nakamura: Mon. Not. R. Astron. Soc. **442** (2014) 2963.
- 5) V. Connaughton, *et al.*: arXiv: 1602.03920.

田越秀行〈大阪市立大学大学院理学研究科 tagoshi@sci.osaka-cu.ac.jp〉

中村卓史〈京都大学大学院理学研究科 nakamura.takashi.4w@kyoto-u.ac.jp〉

(2016年2月25日原稿受付)

*1 図1でビームスプリッターと鏡の間の距離を腕の長さと呼ぶ。