

## 重力波が拓く新しい天文学

東京大学宇宙線研究所・重力波観測研究施設 三代木 伸二

### 1. “We have detected gravitational waves, we did it !”

2016年2月11日、アメリカの重力波観測施設・LIGO(ライゴ)のライツ教授が、人類史上初めて、重力波の直接検出に成功したと宣言し、ウェブサイト、テレビ、新聞の一面や号外で、歴史的偉業として大きく報道されたことを記憶されている方は多いかと思います。この重力波とは、今から約100年前の1916年に、アインシュタインが、自ら生み出した一般相対性理論から理論的にその存在を予測した、時空の歪みが波のように伝搬する現象です。ただし、その重力波の直接検出は、重力波が引き起こす効果があまりに小さく、重力波を発生させる天体現象も極めて稀有であるため、技術的にも困難で、確率的にも極めて低いと考えられてきました。しかし、ついそのどちらの予想をも打ち破り、天文・物理学者の悲願である重力波の直接検出に成功し、電磁波や粒子といった自然観測手段に、新しい重力波という手段が加わりました。本編では、この重力波とその発生源、重力波の効果と検出方法、およびそのための雑音低減技術、今回の観測結果から想像される初期宇宙、そして、今後の重力波天文学の広がりについて概観します。

### 2. 重力波と重力波源

重力波は“重力”の波ですが、高校生までに習うニュートン力学では、重力とは万有引力、つまり質量をもった物体間にはたらく力  $F(N)$  として

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

と記述されます。 $G$ は重力定数、 $m_1, m_2[kg]$ は物体の質量、 $r[m]$ は二物体間の距離です。しかし、この重力からは重力波は出ません。これに対し、アインシュタインは、重力とは質量をもった物体の周辺に発生する“時空の歪み”であり(図1左)、その歪みにそって発生する運動が、あたかも力を受けて運動しているように見えていると解釈しました。

これを表すのが、アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (\text{左辺の宇宙項は省略})$$

です。 $G_{\mu\nu}[1/m^2]$ が質量のまわりの時空の歪みを表すアインシュタインテンソル、 $T_{\mu\nu}[J/m^3]$ が質量の分布やエネルギーの流れを表すエネルギー運動量テンソル、 $\kappa$ は  $8\pi G/c^4 \sim 2.1 \times 10^{-43}[m/J]$  という非常に小さな定数( $c$ は光速)です。アインシュタインは、この式から真空( $T_{\mu\nu} = 0$ )でも、時空の歪み自身が波となって“光速”で伝搬する波動解の存在を理論的に導き出し、これが重力波と呼ばれています(図1右)。

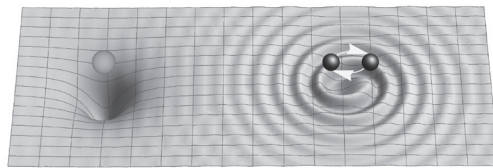


図1 時空の歪み(左)と重力波の伝搬(右)。重力波は“非軸対称”な運動から発生する。

重力波がくると、具体的には、自由落下している二質点間距離  $L$ (あるいは、自由質点間を走る光速)が変化したように見えます。例えば、図2のように円周上に質点を配置し、紙面に垂直に周期的な重力波が入射した場合、質点が重力波の二つの偏光に応じて図のような位置変化  $dL$  を起こし、特に直交する長短軸方向では、質点が“差動”の動きをします。

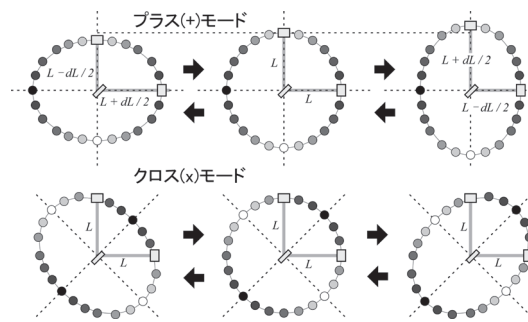


図2 重力波による自由質点の動き。重力波には二つの偏光があり、後述のマイケルソン干渉計でその差動変位を検出する。実際の干渉計は、+モードと×モードが混じった重力波を受けることになり、感度がないこともある。

この時の  $dL/L$  という無次元量が、重力波の振幅  $h$  です。よって  $G_{\mu\nu}[1/m^2]$  は単位面積当たりの時空の歪み量とも解釈できます。さらに、 $dL$  は  $L$  に比例してその値が大きくなります。

また、アインシュタイン方程式から、左辺の時空に大きな歪みを発生させるには、 $\kappa$ の逆数並の天文学的大きなエネルギーが必要ことがわかります。実際、後述のように人類が検出可能なレベルの振幅をもつ重力波を発生する天体現象は、その放出エネルギーが重力波に転換されるわずかな割合を考慮すると、重力崩壊型超新星爆発( $\sim 10^{38} \sim 43 J$ )や、連星中性子星の合体( $\sim 10^{47} J$ )、連星ブラックホールの合体( $> 10^{47} J$ )という特殊な星の稀有な現象に限られると考えられています。

それぞれの重力波源からは、図3のような波形の重力波が発生すると予測されています。超新星爆発からは、1ミリ秒くらいの鋭い突発的な信号がでた後、数10ミリ秒程度余韻が続く波形(図3(a))、連星中性子星の合体からは、周波数とその振幅が漸増し、合体時に最大振幅と最大周波数(およそ1kHz)に到達するチャープ波形と、それに続くブラックホールの形成とともに急激に振幅が小さくなるリングダウン波形が特徴的です(図3(b))。連星ブラックホールの場合には、質量が中性子星より重いため、そのより強い引力により、十分な回転をする前に合体するので、振幅は大きいですが、周波数が低めのチャープ波形と、同様のリングダウン波形をもつ重力波になると予想されています(図3(c))。ただし、超新星爆発は、1銀河当たり100年に1回、連星中性子星合体は、10万年に1回しかなく、連星ブラックホールに至っては、信頼できる統計がありません。この稀有な天体現象からの重力波を年に数回の現実的な頻度で検出するには、例えば、連星中性子星の合体からの重力波の場合、100万個の銀河を内包できる約7億光年先で発生した重力波をとらえる能力をもつ“重力波望遠鏡”が必要です。そのためには  $10^{-22}$  程度の振幅(rms値)の重力波をとらえる必要があり、それは、地球の直径に対して陽子数個分の長さ変化をとらえる精度に匹敵します。この技術的な困難さこそが、重力波の直接検出が100年間アインシュタインからの宿題として残り続けた最大の理由です。

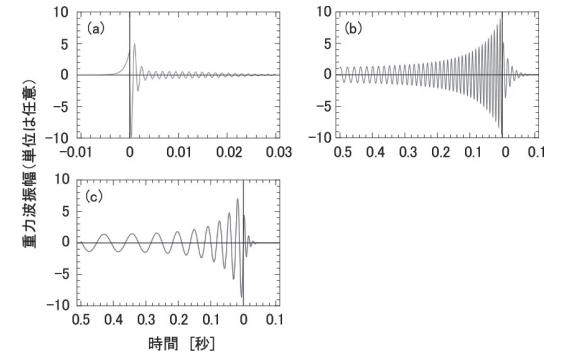


図3 様々な重力波の波源とその重力波波形 (a) 重力崩壊型超新星爆発 (b) 連星中性子星の合体 (c) 連星ブラックホールの合体

### 3. 重力波望遠鏡を作る

現代の重力波検出器は、前述した、重力波の自由質点に及ぼす効果が、直交方向で差動の変位となって現れる性質を利用するため、図4(あるいは図2)のようなマイケルソン型のレーザー干渉計が利用されます。レーザー光源から出た光を、ビームスプリッター(以下BS)で直進透過光と直交反射光とに等分の光量で分岐させ、それぞれ遠方に置いた鏡X1、Y1で反射させ、またBSでお互いを合わせることで発生する光の干渉縞の変化を光検出器でとらえる装置です。もし、重力波によって遠方の鏡の位置が変化すると、干渉縞の明暗の変化となって現れます。実際には、この重力波による干渉縞の変化が起きないように、光検出器の信号をもとに両腕の鏡の位置を制御しており、重力波の信号は、この位置制御信号から読み取ります。また、レーザー干渉計の腕部(光路長)が長いほど、重力波の効果を積分し増幅させることができます。しかし、地球上では、二質点間距離が離れすぎると、互いの位置での重力加速度の方向の違いが問題となるため、3~4kmの長さが選ばれています。さらに、一往復では積分が足りないため、BSに近い位置にも鏡を用意(X2, Y2)、二枚の鏡の間で光を折り返すことで光路長を稼ぎます。ただし、光の往復時間の逆数程度の周波数以上の重力波の効果は、往復している間に逆相の影響を受け相殺が発生しますので、実際的には、100回から1000回程度の折り返し回数が選ばれ、約10Hzから1kHzの間の周波数をもつ重力波に対して最高の感度をもつように設計されます。

その他にもレーザー干渉計には、周波数と強度が安定で、かつ、ビーム品質のよい連続波のレーザー光源(波長は1064nm)が必要ですが、現代の技術をもってしても、200W程度が限界です。しかし、目標の重力波への感度を達成するには、実効的に、この約100倍のレーザー光量が必要です。原理の詳細は割愛しますが、その補完のため、さらに二枚の鏡(PR, SR)を追加し、約10倍分をパワーリサイクリングという技術、残り10倍分をシグナルリサイクリング技術で補う工夫がなされています。こうして得られる望遠鏡の変位感度は、鏡という巨視的物体の位置決定精度が、ハイゼンベルグの不確定性原理で決まるレベルにまで到達します。

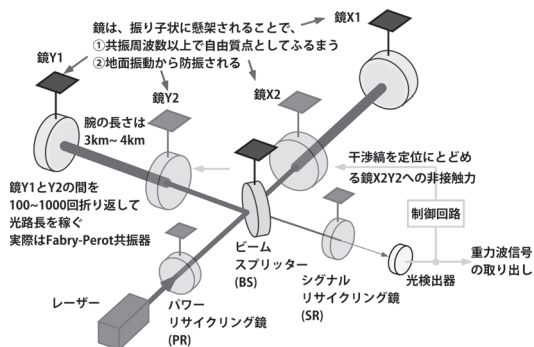


図4 レーザー干渉計重力波望遠鏡の原理と実際。不透過部位が基本的なマイケルソン干渉計。透過部位の鏡4枚を追加し、重力波望遠鏡を高感度化する。

現在世界で、このような重力波望遠鏡が、主に3グループ4基建設されており、2基がアメリカ中心のLIGOグループ、1基がイタリア・フランス・オランダ中心のVirgo(ヴィルゴ)グループ、残る1基が日本のKAGRA(カグラ)です。KAGRAは現在、岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下200m以深に建設中です。

#### 4. 雑音との闘い - KAGRAの場合 -

腕の長さの $10^{-22}$ (rms値)の歪み変化をとらえるレーザー干渉計にとって、すべての外乱が雑音になるため、それらを除去する必要があります。その内の一つが地面振動です。地上では、必ず地面に支点を確保し鏡を支持しますが、地面は、風雨・波浪・潮汐などにより常に振動しているため、支持機構を通じ鏡が揺れます。その揺れを低減するために図4のような「振り子」構造を利用します。振り子は、共振

周波数以上で周波数の2乗に反比例して伝わりにくくなる性質があるからです。ただし、1段振り子では不十分なので、例えばKAGRAでは長さが13m超もある8~9段の多段振り子を利用します(図5左)。これにより、観測帯域付近の100Hzの振動を10桁以上低減します。

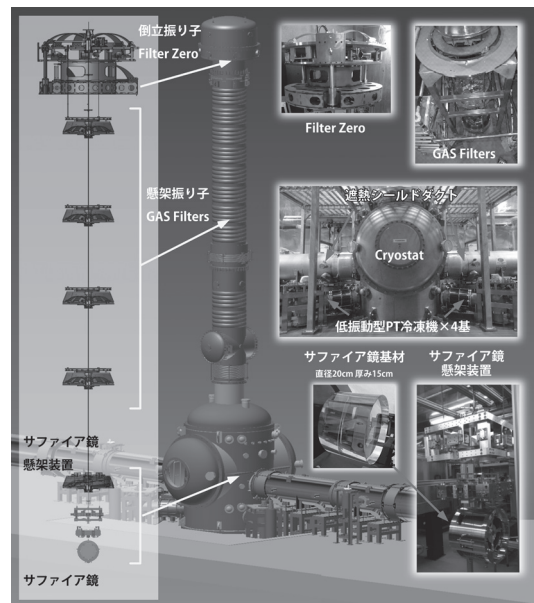


図5 KAGRAで使用されるサファイア鏡基材とその地面振動防振装置と冷却装置。図4の鏡X1, X2, Y1, Y2の位置の鏡用に準備される。

レーザー光線の通過する場所のわずかの空気の揺らぎも雑音になるため、3kmの腕部を含め、ほぼすべての光路部は、大気圧の1兆分の1に相当する約 $10^{-7}$ Pa程度の真空にされます。また、レーザー干渉計は、そもそもレーザーの波長(周波数)を安定な物差しとして精密長さ計測を行う装置なので、そのレーザーの周波数、強度、そしてビームの形状の揺らぎが大きいと雑音になります。そのため、例えば、周波数雑音は元のレーザーの雑音を100億分の1程度に、強度雑音は1000分の1程度に低減するシステムが組み込まれます。そして、最後に最も取り除くことが難しいのが、鏡やその鏡を吊り下げている振り子の熱振動です。この熱振動を低減するには、極限的に内部のエネルギー損失がない超高品質な鏡や振り子の吊り下げワイヤーを用意するか、あるいは、そもそも熱振動しないように、鏡を-253℃まで冷却する方法などが取り入れられてい

ます。特に日本のKAGRAでは、後者の冷却法が採用され、そのためのクライオスタットという冷却用真空タンクや、振動を低減した冷凍機が開発されました(図5中)。さらに、冷却のため、鏡の基材として一般的な石英ガラスではなく、低温での熱伝導性が良い直径22cm厚みが15cmもあるサファイア単結晶が使われます(図5右下)。

#### 5. 検出された重力波とその発生天体の起源

今回LIGOが検出した重力波信号は二つあり、それぞれGW150914<sup>1)</sup>、GW151226<sup>2)</sup>と命名されました。その波形から、前者は質量が太陽の36倍と29倍、後者は太陽の14.2倍と7.5倍の、共にブラックホール(以下BH)の連星合体からの重力波と同定されました。これは重力波の直接検出という偉業だけでなく、最も予想していなかった天体現象からの重力波でもありました。さらに、BHの実在を重力波で直接確認し、10太陽質量程度のBHの作る極めて強い重力場における一般相対性理論の正しさがほぼ確認されたという点でも画期的な成果です。GW150914の場合(図6)、ほぼ同じ波形の信号が、3000km離れた2基の望遠鏡で、7ミリ秒の時間差で検出されました。この時間差は、重力波が光速で伝搬する予想と矛盾せず、重力波信号と同時に取得している10万個の環境データとの相関がないことも確認されたため、この信号が重力波以外にはありえないと結論づけられました。

すでに、このようなBHが宇宙初期で誕生したシナリオについて、様々な仮説が立てられています。一つは、宇宙誕生後に形成された金属をほとんど含まない初代星が、終末を迎えた後に生まれたBHが起源という説<sup>3)</sup>、ビッグバン直後の高温高压状態が

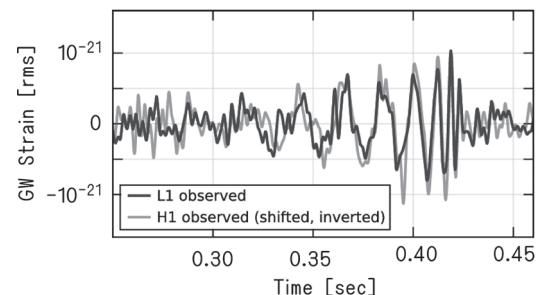


図6 LIGOが検出した重力波・GW150914の波形<sup>1)</sup>

ら、星を経ないで高密度物質から直接生まれた原始BHであるとする説<sup>4)</sup>などがあり、今後もさらに多くの重力波の検出がなされることで、仮説の選別が進むことが期待されます。

#### 6. 重力波天文学を目指して

電磁波の周波数が、電波のkHzから $\gamma$ 線の $10^{18}$ Hz(=  $10^{18}$ Hz)までの広がりがあるように、重力波にも、天体の運動をその起源とする仮定のもとでは、aHz(=  $10^{-18}$ Hz)からkHzくらいまでの広がりが見込まれます。重力波観測の第一歩を踏み出した地球上の重力波望遠鏡の観測帯域は、10Hzから1kHzくらいです。しかし、地面振動や地球重力雑音が壁となり、より低周波の重力波を受けることはできません。そこで、地面振動のない宇宙空間に重力波望遠鏡を構築する案も既に提案され、欧州宇宙機関(ESA)が主導してLISA計画が進行中です。LISAでは、500万km離れた衛星間で行う光の送受信により、 $\mu$ Hzから1Hz付近の重力波をとらえようとしています。その他にも、1Hz付近の重力波をターゲットにしたDECIGOやBBOなどの計画もあります。さらに、宇宙誕生直後に発生したと思われる原始重力波(aHz~fHz(=  $10^{-15}$ Hz))の痕跡を宇宙背景マイクロ放射の中のBモードという偏光特性から発見しようとするBICEP3計画も進行中です。電磁波の天文学が、分光観測により次々と新たな発見を成し遂げたように、今後、このような重力波分光観測も、重力波天文学を大きく発展させ、光では見えない新たな世界を明らかにしてくれるでしょう。

#### 参考文献

- 1) Abbott, B. P., et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", Phys. Rev. Lett., 116, 061102 (2016)
- 2) Abbott, B.P., et al., "GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence", Phys. Rev. Lett, 116, 241103 (2016)
- 3) Kinugawa T., et al., "Possible indirect confirmation of the existence of Pop III massive stars by gravitational wave", Mon. Not. R. Astron. Soc., 442, 2963-2992 (2014)
- 4) Sasaki, M., et al., "Primordial black hole scenario for the gravitational-wave event GW150914, Phys. Rev. Lett., 117, 061101 (2016)