

アインシュタインからの宿題：重力波の検出

川村 静児 〈東京大学宇宙線研究所 seiji@icrr.u-tokyo.ac.jp〉

重力波の存在は100年近く前に、一般相対性理論から予言されたが、未だ直接検出はされていない。重力波は中性子星連星の合体や初期宇宙などから放射されると考えられており、重力波が検出されれば、全く新しい天文学、いわゆる重力波天文学が創成されると期待されている。重力波の検出方法として現在最も期待されているのはレーザー干渉計を用いたものである。実際、日米欧などでKAGRAをはじめとする大型レーザー干渉計型重力波検出器が建設されており、数年後には初検出が実現するであろうと予想されている。さらに、感度をより一層高め、さまざまな新しいサイエンスを生み出すために、将来の検出器の計画も検討・推進されている。

1. はじめに

重力波の存在が一般相対性理論により予言されたのは、すでに100年近くも昔のことであるが、未だに直接検出には成功していない。これは、重力波と物質との相互作用が極めて弱いからである。実際、長い間、重力波を検出するのは現実問題としては不可能であろうと考えられてきた。しかし、近年のレーザーをはじめとする各種技術の著しい進歩により、重力波の直接検出がすぐそこまで近づいてきた。アインシュタインの残した宿題をやりとげる準備がようやく整ったのである。本稿では、重力波とその検出原理を説明したのち、実際の検出器の過去と現状、そして検討・推進中の将来計画についても述べる。

2. 重力波とは？

アインシュタイン方程式は計量 $g_{\mu\nu}$ についての非線型方程式であるが、ミンコフスキー空間($\eta_{\mu\nu}$)からのわずかなずれ、すなわち $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ を考えると $h_{\mu\nu}$ の線型方程式として扱え、その解として、波動解が存在する。これが重力波である。重力波は、進行方向に垂直な面内で空間を潮汐的に伸び縮みさせながら、光速で伝わっていく(図1参照)。重力波は加速度運動をする物質から放射されるが、運動量保存の法則のため、双極子放射は存在せず、四重極放射が最低次の放射となる。したがって、非軸対称に回転

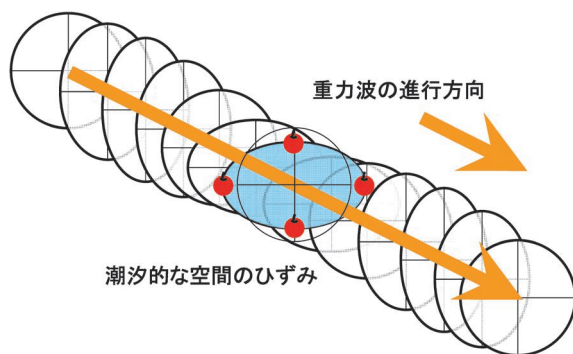


図1 重力波が伝わる様子。進行方向に垂直な面内で空間を潮汐的に伸び縮みさせながら、光速で伝わっていく。そこにリングが4つあると、それらの相対位置が潮汐的に振動する。

する系から発生する重力波の周波数は、回転周波数の2倍となる。人工的に発生可能な重力波はあまりにも小さいが、宇宙で起こる激しい天体現象からは観測可能な重力波が放射される。重力波は物質との相互作用が極めて小さく何でもすり抜けるため、直接検出は非常に難しい。しかし、逆に、この特徴こそが、何物にも邪魔されずに宇宙の観測ができるという最大の利点を生む。

重力波を放射する天体としては、中性子星やブラックホールの連星、超新星爆発、パルサーなどが考えられており、初期宇宙においても重力波が生成された可能性がある。また、これまでに想像すらできなかったような新しい天体現象からの重力波が観測される可能性もある。

中性子星連星は現在建設中の地上検出器のターゲットとして最も有望であろうと思われる天体である。中性子星連星はその公転運動により重力波を放出し、系のエネルギー・角運動量を失うため、徐々に軌道距離と公転周期が短くなり、最終的には合体すると考えられている(図2参照)。実際、ハルスとテーラーは中性子星連星を初めて発見し¹⁾(1993年ノーベル賞受賞)、彼らと共同研究者たちは、

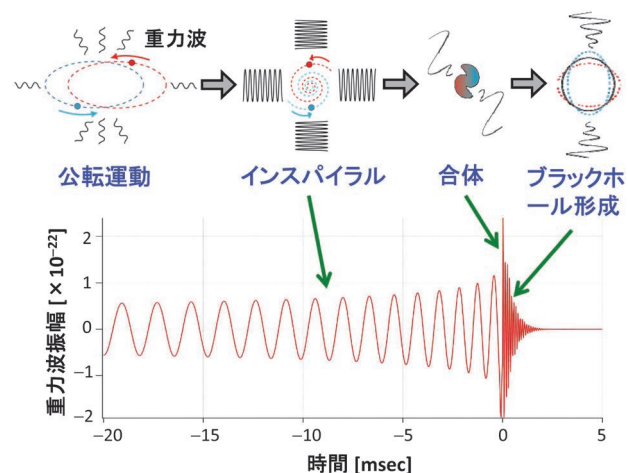


図2 中性子星連星の合体前後に放射される重力波。合体が近づくにつれ、徐々に強度を大きくしながら、周波数を低周波領域から1 kHz程度までスweepしていく。合体後に放射される重力波は、中性子星の状態方程式に依存する。

この連星の公転周期を長期間にわたって正確に測定し、公転周期の減少率が重力波放出によって説明できることを示した。²⁾ これは、重力波の存在を間接的に証明したものである。なお、中性子星連星の合体直前に放射される重力波は、徐々に強度を大きくしながら、周波数を低周波領域から1 kHz程度までスイープしていくが、その振る舞いは一般相対性理論によってほぼ正確に予測できる。しかし、合体後どのように状態が移り変わっていくのかは、中性子星の状態方程式に依存する。したがって、逆に合体直後に放射される重力波の波形を正確に観測することにより、中性子星の状態方程式に対する重要な知見を得ることが可能となる。また、ショートガンマ線バーストの正体だと推測されているのが、中性子星連星の合体であり、重力波とガンマ線バーストとの同時観測により、この推論が検証されることも期待されている。さて、中性子星連星の合体の頻度は、これまでにどの程度の範囲を探し、どれだけの中性子星連星が見つかり、またそれらがどのようなタイムスケールで合体するかを評価することにより、推測されている。これまでに見つかった中性子星連星はわずか10個程度であるため、その推測に伴う誤差は大きい、大体1銀河あたり1万年に1回の割合で中性子星連星の合体が起ると予想されている。³⁾

ブラックホール連星の振る舞いも、合体までは中性子星連星とはほぼ同様であるが、合体後の振る舞いは、一般相対性理論によって記述できる。ブラックホール連星の合体の頻度に関してはあまりよく分かっていないが、太陽質量の30倍程度のブラックホール連星の合体は、地球から50億光年の範囲で年間70~150回起きているという予測もある。⁴⁾

超新星爆発に関しては、未だ爆発のメカニズムすら完全には解明されておらず、どのような重力波が放出されるかもよく分かっていない。超新星爆発からの重力波は、爆発の球対称からのずれに応じて放射されるが、この球対称からのずれはそれほど大きくなく、したがって放出される重力波も比較的小さいのではないかと考えられている。

パルサーは回転する中性子星であるが、その回転が軸対称からずれているとそれに応じて重力波が放射される。パルサーが重力波を放射すると系のエネルギーが失われ、結果として回転のスピードが遅くなるはずである。したがって、電磁波によるパルサー周期の測定から求める回転の減少率が、放射される重力波に対する上限値を与える。なお、パルサーから放射されるビームは指向性を持っているので、電磁波観測では地球から見えていない多くのパルサーがまだまだ存在していると考えられる。

初期宇宙も重要な重力波源である。例えば宇宙誕生後 $10^{-44} \sim 10^{-33}$ 秒に起こったと考えられているインフレーションの時期に、時空の量子的揺らぎにより重力波が発生すると考えられる。その重力波はインフレーションにより引き伸ばされ、波長が長くなり、現在に至るところに存在

しているはずである。もし、インフレーションからの重力波を直接検出することができれば、インフレーション理論の検証になるだけでなく、その詳しいメカニズムも解明される可能性がある。なお、最近BICEP2チームにより、インフレーションの時期に発生した重力波を検出したとの報告があった。^{5,6)} インフレーション時に発生した重力波により生じた潮汐的な温度分布により、宇宙の晴れ上がりの瞬間に散乱された電磁波は、いわゆるBモードと呼ばれる特徴的な偏光を持つことが予想されるが、この偏光がBICEP2により観測された可能性があり、インフレーションからの重力波の間接的検出であるといえるかもしれない。しかし、この結果が正しいといえるためには、ダストによる前景放射との識別が重要となる。いずれにせよ、電磁波では宇宙の晴れ上がり前の宇宙の様子を直接観察することはできないため、重力波による直接検出の重要性はいくら強調してもしすぎることはない。

3. 重力波の検出

重力波の検出の原理はいたって簡単である。重力波によって引き起こされる物質の潮汐的な変位を電磁波などを使って測定するのである。重力波の検出方法としては、物質の共振を使って感度を高める方法や人工衛星の通信波を用いたドップラートラッキングなどがこれまでに行われてきた。また、パルサーからの電磁波を正確に計測することによって、巨大ブラックホールの合体に伴う非常に低周波の重力波を観測しようとする、いわゆるパルサータイミング⁷⁾も活発に行われている。さらに、最近では原子の干渉⁸⁾を用いた方式も検討されている。しかし何と云っても、現在重力波検出に最も近く、また、さまざまな天体現象をターゲットとした重力波検出が可能であると考えられているのが、マイケルソンレーザー干渉計を用いた検出方法である。

マイケルソンレーザー干渉計型重力波検出器の検出原理を簡単に説明しよう(図3参照)。レーザーから出た光はビームスプリッターで垂直な2方向に分けられる。それぞれの光は遠方の鏡で反射され、ビームスプリッターに戻ってきて干渉する。鏡やビームスプリッターは吊り下げられており、その振り子の共振周波数より十分高い周波数領域においては、水平方向に自由に動けるようになっている。重力波がやってくると、鏡が潮汐的に変位し、垂直2方向に光路差が生じて干渉光の明暗が変化するので、これを光検出器で検出してやれば重力波が検出できる。

ちなみによく聞かれる質問に、「重力波によって空間がひずむため、確かに鏡は動くが、それを測定する光の方も影響を受けるので、結局重力波の効果は測定できないのではないか?」というものがある。もちろん測定可能であるが、その理由は以下のように説明できる。まず、局所慣性系の座標で考えよう。一般相対性理論によると、この座標系においては、重力波の影響は、原点からの距離に比例し

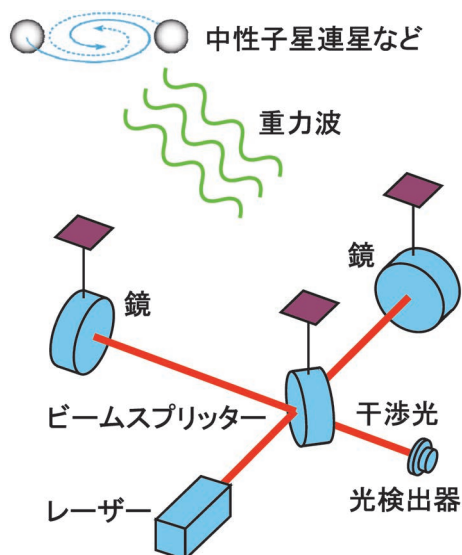


図3 マイケルソンレーザー干渉計による重力波検出の原理。鏡やビームスプリッターは重力波に対して自由に応答できるように吊り下げられている。重力波がやってくると、2つの鏡の位置が差動的に変化し、干渉光の明暗が変化する。それを光検出器で測定する。

た力（当該物質の質量にも比例）として扱える。例えば原点をビームスプリッターの位置にとると、原点からの距離に比例した力に応じて鏡が動き、それをレーザー光（局所慣性系なので速度は一定）で測定するので、測定量は存在する。同じことは、Transverse-Traceless (TT) ゲージという、重力波がやってきても自由運動している初速度ゼロの物体の座標が変化しないような座標系で考えることもできる。TT座標においては、重力波の影響は、光の見かけの速度が潮汐的に変化（例えば縦方向に速くなり、横方向に遅くなる）することである。したがって、見かけの速度が変化した光で、動かない鏡の位置を測るので、やはり測定にかかる。このように、座標系の取り方により、見かけ上メカニズムの記述は変わってくるが、測定量としては同じ答えが導かれる。なお、局所慣性系はその名の通り、局所領域でのみ有効な座標系であり、当該重力波の波長と比べて干渉計のアーム長が十分に短い場合にのみ成り立つ。

重力波検出器にマイケルソン干渉計を使う利点は、何といっても、アーム長を伸ばすことにより感度を高めることができる点にある。これは、たとえば局所慣性系座標で考えると、アーム長 L が長いと鏡に働く力（原点からの距離に比例）が強くなり、それだけ鏡の変位 ΔL が大きくなり、干渉光の明暗の変化が大きくなるためと説明できる。なお、重力波の振幅 h は実験では $\Delta L/L$ として得られる。一方、ほとんどの雑音はアーム長に依存しないため、アーム長を長くすれば信号雑音比を上げる、すなわち感度を高めることができる。マイケルソン干渉計型重力波検出器は、電磁波の望遠鏡とは違い、指向性が非常に緩やかであり、ほとんどの方向からやってきた重力波をある程度は検出することができる。では、重力波源の方向はどのように決めるのであろう？ これには、なるべく離れた場所に3台の検出

器が必要である。重力波は光の速度でやってくるので、それらの検出器の検出の時間差から重力波のやってくる方向が分かる。また、複数台の検出器は、局所的に起こる雑音を排除するためにも有用である。したがって、重力波検出器は離れた場所に数台あることにより、天文学的観測器としての性能をより一層発揮することが可能となる。

干渉計型重力波検出器の感度を上げるためには、いかに雑音を抑えるかが極めて重要となる。干渉計の基本的な雑音としては、地面振動雑音、熱雑音、そして量子雑音がある。地面振動は特に低周波領域で鏡を大きく揺らすため、高度な防振システムが必要となる。防振は、基本的には鏡を振り子状に吊るすことにより行われる。これは、振り子の共振周波数より高い周波数では、吊り下げ点の水平方向の振動の鏡への伝わり方が周波数の2乗に反比例して落ちていくことを利用したものであり、振り子を多段に吊るすことにより、より強力な防振効果が得られる。熱雑音は、いわゆるブラウン運動であり、鏡自体の熱振動や振り子としての熱雑音が存在する。熱雑音を抑えるには、鏡の材質や吊り下げシステムを工夫することにより機械的ロスをなるべく小さくする必要がある。また、鏡を低温にすると熱雑音は抑えられる。量子雑音には、ショットノイズと輻射圧雑音がある。半古典的な説明をすると、ショットノイズは、（レーザー）光がフォトンの集まりであることに起因する検出時のフォトン数の統計的揺らぎに伴う雑音である。輻射圧雑音は、光が鏡によって反射される際に、フォトンが鏡をランダムに叩き、鏡を揺らすことによって起こる雑音である。レーザー光のパワーを上げるとショットノイズの影響は減るが、輻射圧雑音が増え、パワーを下げるとその逆の振る舞いをする。レーザーのパワーをいかに変えようとも、不確定性原理で規定される「標準量子限界」と呼ばれる感度限界を破ることは、古典的な方法では不可能であるが、スクイーミングなどの技術を使うと、それは可能となる。これら3つの基本的雑音の他にも、ありとあらゆるプラクティカルな雑音が存在し、高感度を実現するためにはそれらをことごとく抑え込む必要がある。

さらに雑音に埋もれた重力波信号を効率的に見つけ出すためのデータ解析の手法の開発も非常に重要である。たとえば、高密度連星の合体前に放射される重力波の波形は、星の質量や合体の時刻などに依存するため、それらのパラメータを少しずつ変えて作った波形のテンプレートを多数用意し、実際のデータとの相関を取る、いわゆるマッチドフィルターの解析手法などが有用である。

4. 重力波検出の現状と将来

1990年代に入って、日米欧でそれぞれ「大型」干渉計の建設が始まった。これらはいわゆる第1世代検出器であり、高い確率での重力波検出を狙ったものではなく、今後の装置改良による感度向上の足掛かりを作るものとしての意味合いの方が強かった。干渉計のタイプとしては、ほとんど

のものがパワーリサイクルド・ファブリペロー・マイケルソン干渉計であった。これは腕共振器を使い、レーザー光を往復させてアーム長の実効的距離を伸ばすことにより感度を高め、さらに干渉計から返ってきた光を入射光と同相で再び干渉計に打ち返すことにより、光の実効的パワーを高め、ショットノイズの影響を下げるタイプのものではあった。アメリカのLIGO計画においては、4 kmのアーム長を持つ検出器がワシントン州とルイジアナ州に建設され、また、ヨーロッパのVirgo (3 km)とGEO600 (600 m)は、それぞれイタリアのピサとドイツのハノーヴァーに建設された。日本でも東京三鷹の国立天文台にTAMA300 (300 m)が建設され、2000年に重力波検出器として世界最高感度を出すなどの成果を上げてきた。

これら第1世代検出器は、重力波の初検出にこそ至らなかったが、サイエンスとしていくつかの重要な成果を上げてきた。特にLIGOは、7,000万光年遠方で起こる中性子星連星の合体からの重力波を捉えることのできる感度を達成し、2年間以上の観測を行った。以下にLIGOが達成した3つの重要な成果を示す。まず、2007年に観測されたショートガンマ線バーストGRB070201は、アンドロメダ銀河を含む方向からやってきたことが、ガンマ線の観測により分かったのであるが、もし、これがアンドロメダ銀河内の中性子星連星の合体によって引き起こされたものであるなら、LIGOの検出器で重力波が検出されているはずであった。しかし、実際には観測されなかったことから、この仮説は棄却された。⁹⁾ 次に、かにパルサーから放射される重力波に対する観測からは、回転減少率から課せられる重力波の上限値の4%以下しか、重力波が放射されていないことを突き止めた。¹⁰⁾ さらに、初期宇宙からの背景重力波に関しては、100 Hzにおいて、これまでビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景輻射から得られる間接的な上限値を更新し、超弦理論モデルや初期宇宙進化モデルに新たな制限を付け加えた。¹¹⁾

現在はこれらの感度をさらに高めた、いわゆる第2世代検出器が建設中である。干渉計のタイプとしては、パワーリサイクルド・ファブリペロー・マイケルソン干渉計の信号検出ポートにさらにもう一枚鏡を加え、干渉計の重力波に対する周波数応答を変化させ、量子雑音を最適化した干渉計を用いるのが主流である。鏡の防振システムなども、第1世代のものとは比べ物にならないほど高度なものになっている。第2世代検出器としては、アメリカのAdvanced LIGO、ヨーロッパのAdvanced Virgo、GEO-HFがあり、日本ではKAGRA^{12, 13)}が建設中である(図4参照)。

KAGRAは他の検出器と違い、地下への設置、低温鏡の使用という大きな特徴を持つ。まず地下に関しては地上よりも2ケタほど地面振動が小さく、低周波の揺れがさまざまなメカニズムにより観測周波数帯に雑音を引き起こすことを抑制する。また、鏡を低温に冷やすことにより、最も信頼できる物理法則に則って熱雑音を下げることが可能と

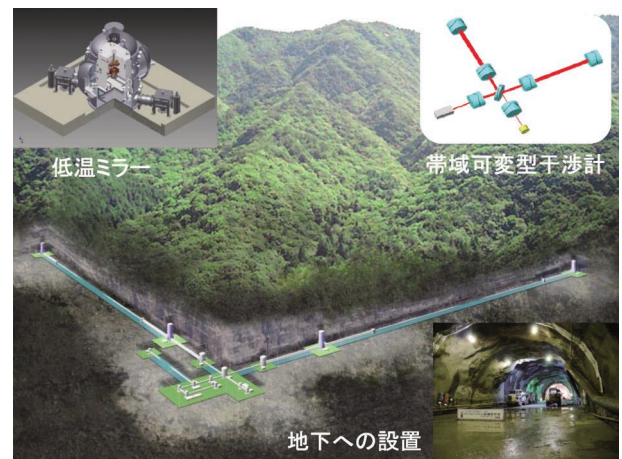


図4 KAGRAの完成予想図。KAGRAは、地面振動の小さい地下に設置され、熱雑音を抑えるため鏡を低温に冷やす。また、量子雑音を最適化するため常域可変型干渉計を用いる。(東京大学宇宙線研究所、高エネルギー加速器研究機構提供)

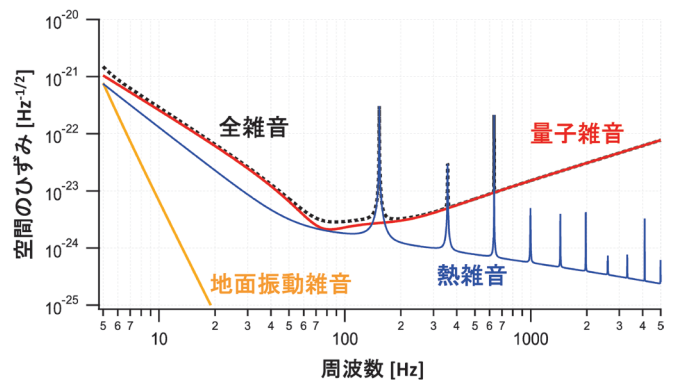


図5 KAGRAの目標感度。予想される地面振動雑音、熱雑音、量子雑音も同時に示されている。

なる。KAGRAは、現在トンネルの掘削が完了し、トンネル内の整備と並行して、検出器のインストールを行っているところである。このあと、まずは常温でシンプルな干渉計(iKAGRA)を建設し、これを動作させ、2015年末に1か月の観測を行い、その後、低温で最終形の干渉計(bKAGRA)へとアップグレードさせ、2017年中の動作を目指す。KAGRAが完成し目標感度(図5参照)が達成されると、7億光年遠方の中性子星連星の合体からの重力波を、年間10回程度検出できると期待されている。そして、ガンマ線バーストとの同時観測により、ショートガンマ線バーストのメカニズムの解明も可能である。また、ブラックホール連星の合体からの重力波の検出も十分に期待でき、特に、合体後のブラックホールの準固有振動¹⁴⁾からの重力波の観測から一般相対性理論の正否が判明するかもしれない。さらに、超新星爆発、パルサーなどからの重力波の検出も可能かもしれない。なお、すでに述べたように、重力波検出器が観測器としての性能をフルに発揮するためには、地球上の離れた場所に、検出器が数台あることが本質的であることから、LIGO、Virgo、GEO、KAGRAの間には取り決めに基いて活発な研究協力が行われている。また、電磁

波や宇宙線の観測との連携も極めて重要である。たとえば、中性子星連星の合体がショートガンマ線バーストの正体であることを示すためには、ガンマ線との同時観測が、また超新星爆発に関してはニュートリノ検出器との同時観測が不可欠である。このようにさまざまな検出方法で天体観測を相補的に行ういわゆるマルチメッセンジャー観測により、天体現象のより深い理解が可能になる。

重力波は、初検出されればそれで終わりではなく、感度をより一層高めることにより、さらに面白いサイエンスの発見へとつながっていく。ヨーロッパではすでに第3世代検出器ET¹⁵⁾の準備が始まっており、アメリカでも個人レベルでの検討が行われている。第3世代検出器にとって重要な技術は、地下への設置と、低温鏡であり、その意味ではKAGRAは第3世代の技術を先取りしたもの、つまり第2.5世代検出器であるといえる。このような背景からETとKAGRAの間では活発な技術交流が行われている。さらに、感度を飛躍的に高める方法としては干渉計を宇宙に持っていき、アーム長を飛躍的に伸ばすことである。ヨーロッパのESAが中心となって行っているのはeLISA¹⁶⁾であり、これは100万km離れた3つの衛星の重力波による距離の変化を、光トランスポンダ方式を使って測定するものである。eLISAの主目的は中間質量～大質量ブラックホール連星からの重力波を測定し、銀河中心の巨大ブラックホール形成のメカニズムを解明することである。一方、日本ではスペース重力波アンテナDECIGO¹⁷⁾が計画されている。これは、1,000km程度離れた衛星間の距離の変化を、光共振器を用いて感度よく測定するもので、インフレーションからの重力波の直接検出や宇宙膨張加速度の直接計測によるダークエネルギーの特徴づけ、そしてダークマターの探索などを目的としている。

5. まとめ

アインシュタインの残した宿題、重力波検出への道のりは決してたやすいものではない。しかし、感度を2倍よくすれば、2倍遠くの天体まで観測可能となり、体積でいうと8倍、つまり頻度も8倍になる。したがって、一旦初検出がなされ、重力波天文学の創成がなされたあとは、感度の向上に伴い、加速度的に得られるサイエンスが豊富なものになっていき、重力波天文学が急速に発展していくことが期待できる。その意味で、重力波は、苦勞の末にやっと

宿題を提出する我々に、アインシュタインが「よく頑張りました！」と手渡してくれる最高のご褒美であるともいえる。このご褒美を享受して、さまざまな彩に満ち満ちた宇宙の謎を収穫しほうだいとなる時代はすぐそこまで来ているのである！

参考文献

- 1) R. A. Hulse and J. H. Taylor: *Astrophys. J.* **195** (1975) L51.
- 2) J. H. Taylor and J. M. Weisberg: *Astrophys. J.* **253** (1982) 908.
- 3) D. R. Lorimer: *Living Rev. Relat.* **11** (2008) 8.
- 4) T. Kinugawa, *et al.*: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **442** (2) (2014) 2963.
- 5) BICEP2 Collaboration: arXiv: 1403.3985v2.
- 6) BICEP2 Collaboration: arXiv: 1403.4302v2.
- 7) G. Hobbs, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **27** (2010) 084013.
- 8) S. Dimopoulos, *et al.*: *Phys. Rev. D* **78** (2008) 122002.
- 9) B. Abbott, *et al.*: *Astrophys. J.* **681** (2008) 1419.
- 10) B. Abbott, *et al.*: *Astrophys. J. Lett.* **683** (2008) 45.
- 11) B. Abbott, *et al.*: *Nature* **460** (2009) 990.
- 12) <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- 13) 川村 静児: *日本物理学会誌* **66** (2011) 841.
- 14) E. W. Leaver: *Proc. R. Soc. London A* **402** (1985) 285.
- 15) M. Punturo, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **27** (2010) 084007.
- 16) Pau Amaro-Seoane, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **29** (2012) 124016.
- 17) S. Kawamura, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **28** (2011) 094011.

著者紹介



川村 静児氏: 専門は重力波物理学。KAGRAのサブプロジェクトマネージャーでありコミッショニングを担当。

(2014年6月10日原稿受付)

Homework from Einstein: Detection of Gravitational Waves Seiji Kawamura

abstract: The existence of the gravitational wave was predicted in the general theory of relativity almost 100 years ago, but it has never been directly detected. Gravitational waves are considered to be emitted from the coalescence of a neutron star binary, the beginning of the Universe, etc. The detection of gravitational waves is expected to establish completely new astronomy, so-called gravitational wave astronomy. The most promising method for the detection of gravitational wave is a laser interferometer. Actually in Japan, the US, and Europe, large-scale laser interferometric gravitational wave detectors, such as KAGRA are being built with expectation of the first detection within several years. Furthermore, future detectors with higher sensitivities have been and are planned and studied to obtain various new science.