



じつきょう 理科資料

NO. 80

サイエンス・プラザ

宇宙を観測する新しい窓・重力波

東京大学宇宙線研究所 准教授
三代木 伸二

2016年2月11日、アメリカを中心とする研究グループが、2015年9月14日9時40分45秒（協定世界時）に、連星ブラックホールの合体から発生した重力波の直接検出に成功したと発表しました。この重力波の直接検出は、科学史に深く刻まれる偉業として称賛され、一般にも大きく報道されたため、初めて重力波という言葉が耳にされた方も多いかもかもしれません。本稿では、重力波とは何か、その重力波の発生源や検出方法、及びそのために必要とされる極限技術、今回の重力波観測結果からわかること、そして、現在と今後の世界の重力波望遠鏡計画について紹介します。

1 「重力波」とは？の前に「重力」とは？

重力（万有引力）とは、ニュートン力学では、質量をもった物体同士の間で働く引力として理解されます。しかし、アインシュタインの一般相対性理論では、重力とは、質量をもった物体の周りで発生している時空の歪みと解釈されます。それ

では、図1のように3次元空間の次元を1つ減らした2次元空間で考えましょう。まずは格子状に区画されたゴムシートを考えます。質量の無い状態では、格子の形は維持され時空は平坦ですが、質量を持つ物体を置くと、その物体を中心とした“くぼみ”がゴムシートに発生し、その周りの格子が引き伸ばされます。これが時空の歪みです。このくぼみに物体が落ちていく現象こそが、引力による運動なのです。

結局、重力波とは、物体の周りの時空の歪みが、その物体の運動（厳密には非軸対称な運動）によって変化し、波のように外の時空に広がっていく現象です。実は、皆さんが腕をぐるぐる回しても重力波が発生します。しかし、その時に発生している重力波の振幅はあまりに小さく、人類の技術では到底検出できません。結果的に、人類が検出可能な振幅を持つ重力波を発生する現象は、星の爆発や、ブラックホールの誕生、そして宇宙の誕生のようなすさまじいエネルギーの放出を伴う天

◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ	援業実践
宇宙を観測する新しい窓・重力波…………… 1	ピア・インストラクションの実践…………… 12
ファインバブルの基礎とその応用について… 8	高校生へ私が選んだ1冊の本 恐竜は減んでいない…………… 16

平坦な空間

星の重さで歪んだ空間

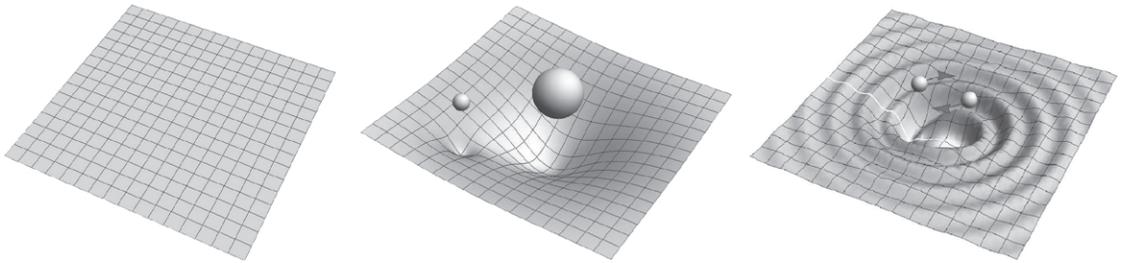
重い星が運動して重力波発生
(例: 連星中性子星)

図1 平坦な時空と質量により歪んだ時空, 及び重力波の発生と伝播。

体現象になります。

2 重力波の間接的存在証明と重力波の発生源

非常に大きな質量を持ち、かつ非常に小さい天体ほど互いにより接近可能になるため、大きな振幅の重力波を発生させることができます。その最有力候補が、二つの中性子星の連星運動とその最後に起こる合体です。中性子星とは、ほぼ中性子という核子だけでできた特殊な星で、半径が10km程度しかないにもかかわらず、太陽と同程度の質量を持つ星です。しかもこのような重くて小さい星二つが互いを回りあう連星系からは、その公転周期の半分の周期の強い重力波が常時放出されています。このような中性子星連星は、我々銀河系に数個見つかっており、特に有名なものが、PSR1913+16です。しかも、この連星は、片方の中性子星がパルサーと呼ばれる、電波を放ちながら原子時計並みに正確な周期で自転している星でした。ハルス博士とテイラー博士は、これに着目し、その自転とともに地球に届く正確な電波パルス列を正確な時計の代わりとして、連星の公転周期の変化を数年にわたって調査したところ、観

測された公転周期の減少率が、重力波の放出が公転のエネルギーを持ち去ると仮定した時の理論的予測値とぴったり一致しました。結果、これが重力波の間接的存在証明とみなされ、その功績で両博士は1993年のノーベル物理学賞を受賞されました。つまり、重力波は一般相対性理論の予言通り実在したのです！ただし、これは重力波の間接的な存在証明であり、時系列で重力波の波形を直接的に観測したわけではありません。

ところで、このような中性子星連星の公転周期は、重力波の放射によりさらに短くなり、最後は接近し合体して、ブラックホールになると考えられています。その合体の瞬間に特に大きな重力波が出ると考えられており、この時の重力波を直接的にとらえることを第一目標にして、現在の重力波望遠鏡の開発が行われてきました。

中性子星連星の合体からの重力波の予想波形は図2(a)のように、チャープ波形という、典型的には数Hzから1kHzの周波数帯域で周波数が高まりながら振幅も大きくなるという特徴があります。ただ、このような連星中性子星の合体現象は、1銀河当たり10万年に1回程度しか起こらない

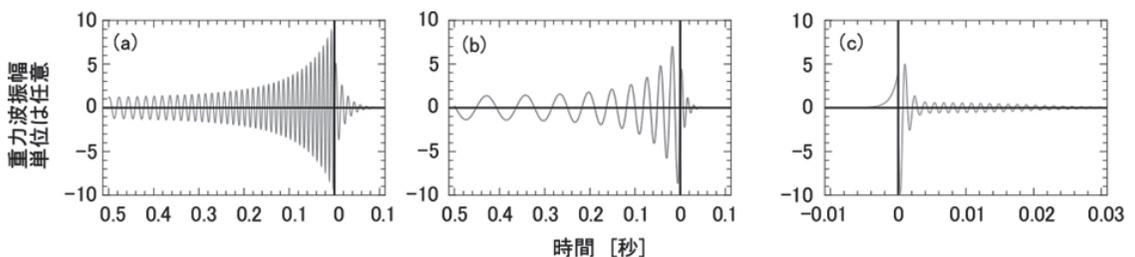


図2 様々な重力波波形 (a) 中性子星連星 (b) ブラックホール連星 (c) 超新星爆発。

と予想されています。ならば、100万個の銀河系を内包できる、半径約7億光年の範囲の最遠で発生した重力波を検出可能な感度を持つ重力波望遠鏡を開発すれば、1カ月に1回は検出可能となるはず。現在の世界の重力波望遠鏡は、この検出能力を目標として開発されています。その他にも、中性子星ではなく、もっと重いブラックホール同士の連星の合体からも重力波の発生が期待できます(図2(b))。しかし、ブラックホール連星の合体の発生頻度はよくわかっていません。さらに、超新星爆発の時にもスパイク波形的な重力波が発生すると予想されています(図2(c))。ちなみに、超新星爆発の頻度は、1銀河当たり、約100年に1回程度と見積もられています。

重力波は、宇宙の誕生を探る研究においては決定的に重要です。最新の理論的予想や観測の事実から、宇宙はある極微の一点から発生し、インフレーションにより一瞬で拡大し、138億年を経て今のような宇宙になったと考えられています。このような宇宙誕生から現在までについて、光(電磁波)を使う限り、誕生後38万年経過した以降のことしか知り得ません。なぜなら、宇宙は、その38万年間は灼熱状態にあり、光が散乱され、まるですりガラス越しに見た風景のように、その時代の姿がぼかされてしまうからです。しかし、重力波とニュートリノはそんな灼熱の宇宙ですら直進できるため、重力波を使えば、究極的には宇宙誕生の瞬間を見ることができるのです。

3 重力波の特徴

重力波の性質は、一般相対性理論から導くことができます。まず、重力波は、電磁波と同様に光速で伝搬する“横波”であり、ほぼすべての物質を減衰せずに貫通する能力を持ち、発生源からの距離に反比例して振幅が減少しながら伝搬します。さらに、電磁波が、プラスとマイナスの電荷の双極子の振動から発生することから、放射の最低次数は双極子になるのに対し、重力にはマイナスの質量がないため、四重極放射が最低次となります。その四重極放射には、2つの偏光が存在し、1つ

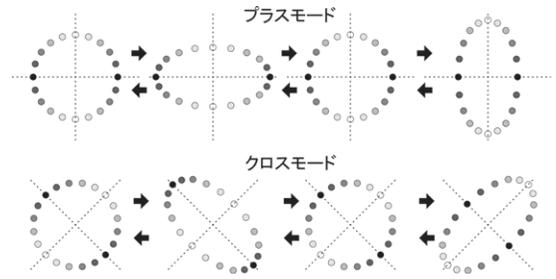


図3 四重極放射とその2つの偏光、及び、重力波の通過による自由質点の運動。

をプラスモード、もう1つをクロスモードと呼びます(図3)。

では、実際に重力波が到達した場合、どんな現象が発生するかというと、2つの自由質点間の距離が伸縮したように見えます。図3のように、円周上に質点を配置し、紙面に垂直な方向から、ある周期の重力波が入射したとすると、2つの偏光に応じて、質点が図に示されたような位置の変化を起こし、特に直交する2つの偏光軸方向にだけ着目すれば、質点が逆相の動きをするように見えます。しかも、その2つの質点の間の距離が離れているほど、重力波による伸縮の絶対長さも大きくなります。ただし、先ほどの激しい天体現象を仮定しても、重力波によって励起される変位の大きさは、発生源までの距離にもよりますが、地球と太陽の間の距離である1億5000万kmを観察していても、たかだか水素原子1個分(10^{-10}m)程度で、比率でいうと 10^{-21} という極限的な小ささです。この小さな時空の変化をとらえる超精密長さ計測装置こそが、重力波望遠鏡なのです。

4 重力波望遠鏡の原理と光学技術

極限長さ精密計測を実現するため、重力波望遠鏡では、マイケルソン干渉計の原理を応用します(図4(a))。マイケルソン干渉計では、一つのレーザー光源から出た光をビームスプリッター(BS)で等しいパワーで直交2方向に分離し、質点に見立てた鏡で反射して戻ってきた光同士を再度BSで合わせて干渉させ、光検出器で受光することで、鏡の動きをこの干渉縞の明暗の変化として捉えます。ただし、地球は丸く、BSと鏡の位

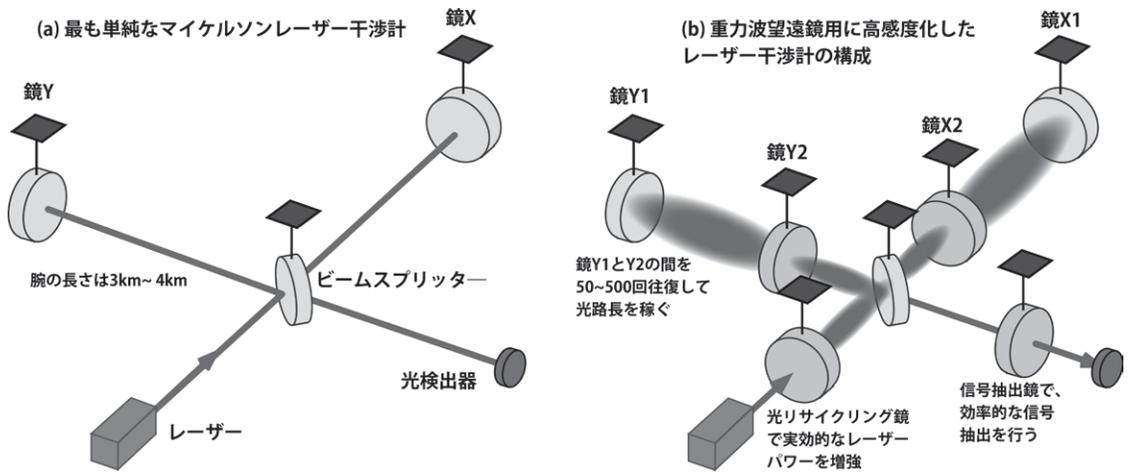


図4 マイケルソン型レーザー干渉計 (a)と、感度を高めたレーザー干渉計 (b)の構成。

置での重力の向く方向の相違を考慮すると、地球上で取れる干渉計の腕の最大直線距離は4 km くらいです。また、4 km の往復では8 km しか光が走らないので、BSに近いところに鏡を追加し、2枚の鏡の間で光を50回から500回程度往復させることで光路長を稼ぎ、重力波の効果を増幅させて感度を高めています。その他にも、さらにいくつかの鏡を干渉計内に追加し、性能を高め(図4 (b)), 10^{-22} の歪み振幅の重力波を捉える能力を目指しています(図5)。

レーザー干渉計では、干渉計内のレーザーパワーの損失が、重力波感度の悪化に直結するため、光の損失を極限まで低減した鏡や光学素子が必要で

す。例えば、皆さんが日常で使用する鏡は、平面に見えても少しは凹凸があるので、ガラス基材の表面にアルミや銀といった金属の薄膜を蒸着させて、光を反射していますが、その反射率は90%程度しかなく、残りは、すべて膜で吸収・散乱されて無くなります。一方、重力波望遠鏡で使う鏡は、その表面に曲率2 km 程度の曲面が超精密研磨技術により、理想曲面からのずれがレーザー波長の100分の1以下しかないような精度で作成されています。さらに、その表面には、望遠鏡で使用される1064 nm のレーザー光だけを99.99%以上反射し、光の吸収や散乱による損失が0.005%以下程度しかないような誘電多層膜という特殊な

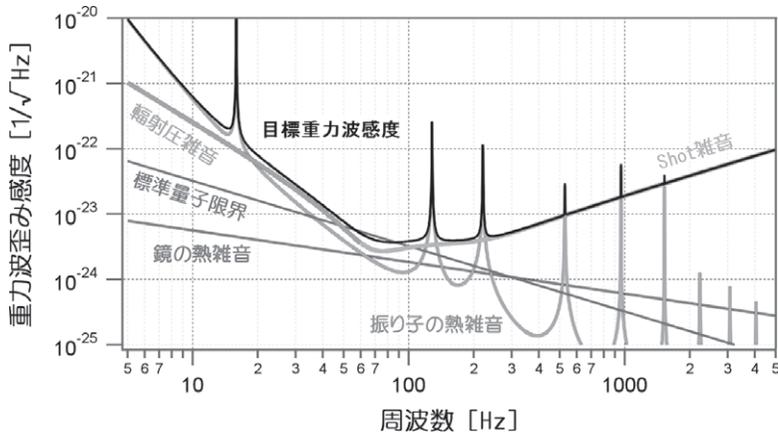


図5 世界の重力波望遠鏡が目指す重力波感度の例。横軸は重力波の周波数、縦軸が歪み感度。

縦軸の値が小さいほど感度がよい。

100 Hz 付近の最高感度 3×10^{-24} [1/√Hz] に観測帯域幅の1000 Hzの平方根をかけた値が、本文中の歪み振幅 10^{-22} になる。

膜が蒸着されます。ただし、重力波望遠鏡の鏡は直径 30cm 程度もあるので、その表面ほぼすべてでこれだけの条件を満たすには、超絶的な工作・製造技術が必要となります。

5 重力波望遠鏡の主な雑音源とその低減技術

このように極限的に微小な変化を捉える重力波望遠鏡にとって、考え得るほぼすべてのものが鏡を揺らす雑音源になるため、それらを目標感度以下にする様々な技術的工夫が必要です。

主な雑音源のうちの 하나가地面振動です。レーザー干渉計の鏡は、何らかの方法で地面から支持される必要がありますが、地面は地震が起きていなくても常時振動していますので、その振動が鏡の支持構造を伝わり鏡を揺らします。図6は東京と地下 1000m の岩盤の中の地面の振動の大きさを、横軸に周波数をとって表したグラフです。図5の 100 Hz での目標感度を達成するには、振動の少ない地下環境でもさらに最低7桁も地面振動の影響を低減させる必要があります。対策として、振り子の原理を利用した防振装置が投入されています。振り子は、その共振周波数以上の周波数では、支点の揺れが周波数の二乗に反比例して減衰し、質点に伝わる特性があります。ただし、1段の振り子では、100 Hz 付近で得られる減衰

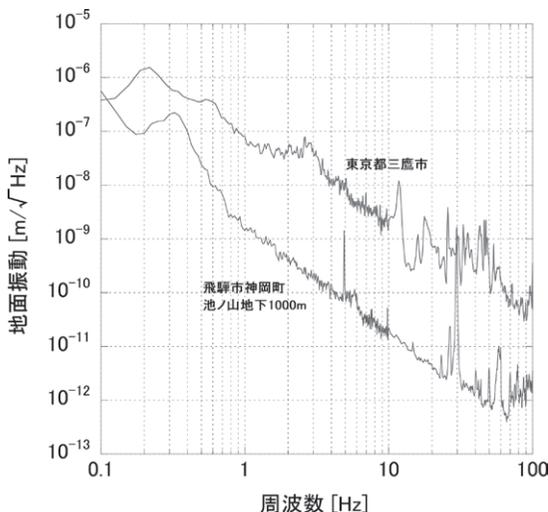


図6 東京三鷹市と神岡町池ノ山地下 1000m での地面振動の比較。

比が足りないため、それを7段程度まで連ねた多段振り子として構成し、鏡を末端の質点として懸架することで、振動を目標レベルまで低減しています。

空気の揺らぎも雑音になります。レーザー光線が通過する空間に残留空気があると、その屈折率の揺らぎが光路長の揺らぎになります。そのため、レーザー光線が通過する真空ダクトの中の気圧を、大気圧の1兆分の1までに低減しています。

さて、そもそもレーザー干渉計は、レーザーの安定な波長（周波数）を物差しにして長さを計測する装置ですので、その物差しが揺らいでいては高い精度の計測はできません。市販のレーザーの安定度では不十分なので、その波長の揺らぎを100億分の1程度に低減する技術が投入されています。

そして、最も除去しにくい雑音が熱雑音です。原子は温度に応じた振動をしています（熱振動）。この熱振動のせいで、レーザー光線から見ると、鏡の反射面が振動しているように見えます。さらに、鏡は防振のために振り子状に懸架されていますが、その振り子の運動も熱振動で励起され鏡を揺らします。この熱雑音を低減する一つの方法が、理由は割愛しますが、鏡や振り子の機械的なエネルギー損失を極限まで低減した合成石英という素材で、鏡とその懸架ワイヤーを作成することです。もう一つの方法が、鏡とその懸架振り子を 20 K 程度に冷却する方法です。ただし、後者の冷却法では、熱伝導率が悪い合成石英基材を鏡としては使用できず、代わりに、単結晶の無色透明なサファイアを利用し、懸架ワイヤーにもサファイア繊維を利用します。理由は、サファイアは、低温で銅やアルミ並みに熱伝導がよいため、冷却し易いからです。ただし、地面振動から防振しつつ、冷却しなければならないため、非常に高度で注意深い鏡の懸架と冷却方法の両立が要求されます。

6 重力波の初検出から重力波天文学に向けて

今回アメリカの研究グループ LIGO（ライゴ）が検出した重力波信号は、GW150914 と命名され

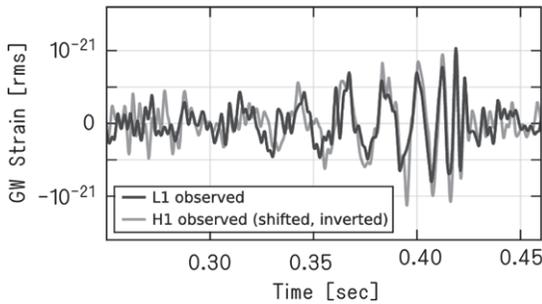


図7 GW150914の波形 (Phys. Rev. Lett. 116, 061102より)

ました。LIGOでは、1994年にその計画が開始され、ワシントン州とルイジアナ州の約3000 km離れた場所に、腕の長さが4 kmのレーザー干渉計型重力波望遠鏡がそれぞれ1基ずつ建設されました。2005年から2007年にかけて、歪み振幅が 10^{-21} 程度の重力波を捉える能力で観測を行いましたが、優位な重力波信号は見つかりませんでした。その後、 10^{-22} の検出感度を目標とした、Advanced LIGO (aLIGO) 計画が進められ、 3×10^{-22} 程度の検出能力を得た直後に行った観測でGW150914の検出に成功したのです。この重力波の初検出は、それが人類史上初であったという意味だけではなく、ブラックホールという天体の実在を、ブラックホール自身が発した重力波信号で直接確認し、30太陽質量程度のブラックホールが持つ強い重力場においても、一般相対性理論が正しいことが分かったという点でも、物理学・天文学に与えた知見の大きさは計り知れません。

今回の重力波信号(図7)の特徴は、低い周波数(ただし、観測できた下限周波数は、約35 Hz)から約250 Hzまで周波数が上昇するとともに振幅も上昇し、歪み振幅が 10^{-21} まで拡大した後、急速に小さくなっていく波形で、かつ、ほぼ同じ波形の信号が、両方の望遠鏡で7ミリ秒の時間差で検出されたことです。解析により、まず、この波形は、質量が太陽の36倍と29倍(4倍前後の誤差はある)のブラックホールの連星合体から理論的に予想される重力波とそっくりでした。さらに、その検出時間差は、2つの望遠鏡間を光の速

度で伝わる最大時間差の10ミリ秒より短く、重力波が光速で伝搬することと矛盾しません。そして、重力波信号と同時に取得している10万個の環境データ、つまり、望遠鏡の様々な場所に設置してある地面振動、音、電場、磁場、光、温湿度、電気回路信号など可能な限り多く取得した信号との相関がないことを確認し、このような特徴的な同じ波形の信号が、自然な雑音によって偶然発生するのは20万年観測していても1回しかないという確率の低さを根拠に、重力波以外にはありえないと結論したのです。また、判明したブラックホールの質量から、発生した直後の重力波の振幅が計算され、それと、地球で検出した振幅との比較から、約13億光年(6億光年前後の誤差はある)離れた場所で発生し、かつその重力波のエネルギーは太陽3個分というとても大きく大きなもので、さらに、合体後のブラックホールの質量は、太陽62個分であることも導かれたのです。

このように1発の重力波の信号から非常に多くの情報が得られた一方で、その発生源の方向決定精度は600平方度にとどまり、特定することができませんでした。その精度を上げるには、3台目、4台目の重力波望遠鏡が必要です。最低3台の望遠鏡があれば、その到達時間の差から三角測量の原理で方向を決定できます。ただし、現在の重力波望遠鏡の運転稼働率は70%程度で、3台が同時に動いている同時稼働率は、単純には34%まで低減し、いつ来るかわからない重力波を常時観測するには不十分です。そのため、4台目以上があることで3台同時観測時間を稼ぐことは、重力波観測を天文学として発展させるために、非常に大事な事なのです。

7 世界の重力波望遠鏡と宇宙重力波望遠鏡

aLIGO以外にも、すでに、ヨーロッパのフランスとイタリアとオランダなどが中心になって建設している基線長が3 kmのVIRGO(ヴィルゴ)重力波望遠鏡が、イタリアのピサ市の郊外にあります。現在は、改良を加えたAdvanced VIRGO重力波望遠鏡(aVIRGO)を構築中です。日本で

も、国内の大学・研究機関だけではなく、韓国グループなどの国際的チームも参画した、基線長が3 kmのKAGRA重力波望遠鏡を、岐阜県飛騨市神岡町池ノ山の地下200 m以深に建設中です(図8)。これらの望遠鏡の目標重力波感度は、すべて 10^{-22} 程度で同じですが、装置の構成が少し異なります。aLIGOやaVIRGOが地表に建設され、熱雑音の低減を鏡の品質の向上で克服しようとしているのに対し、KAGRAは地下という地面振動の低い場所に設置され、かつ、熱雑音の低減を、鏡や懸架装置の冷却で行おうとしています。

また、2台のaLIGOと1台のaVIRGOだけでは、天球上のある方向から来た重力波に対しては、その位置決定精度が、100平方度程度でしか決まらない一方、KAGRAが加わることで、2平方度程度まで決定可能になるため、KAGRAの存在は非常に重要です。さらに、インドにも1台建設する計画があり、重力波天文学を目指した動きは世界的に加速しています。

さて、地球上にある重力波望遠鏡の観測周波数帯域は、10 Hzから1 kHzくらいで、主に、連星中性子星や中量連星ブラックホールの合体、超新星爆発からの重力波を捉えることができますが、将来的には、地面振動や地球重力雑音が実質上の壁となり、低周波の重力波を受けることはできま

せん。そこで、そもそも地面振動がない宇宙空間に重力波望遠鏡を構築する案も提案され、既に欧州宇宙機関(ESA)が主導してLISA計画が進行中です。LISAでは、0.01 Hz付近の重力波を捉えようとしており、2015年12月には、その技術立証機であるLISA-Pathfinder機の打ち上げに成功し、現在テスト中です。その他にも、1 Hz付近の重力波をターゲットにしたDECIGOやBBOなどの計画が、日本などのグループからも提案されています。

8 新しい観測の窓・重力波

今まで、宇宙を観測する手段は、可視光、電波、赤外線、紫外線、X線、 γ 線と、波長の異なる電磁波、そして、ミューオンやニュートリノなどの様々なエネルギーを持つ素粒子に限られていました。しかし、ついに、2015年、宇宙を観測する新しい窓として重力波が加わりました。様々な電磁波や素粒子によって、同じ物や現象の異なる側面が明らかにされ、それらを通信、医療、製造などに利用することで、人類の生活が飛躍的に発展したことは周知の事実ですが、この新たな重力波によって、全く新しい宇宙の姿が垣間見え、新たな可能性が広がるかもしれません。

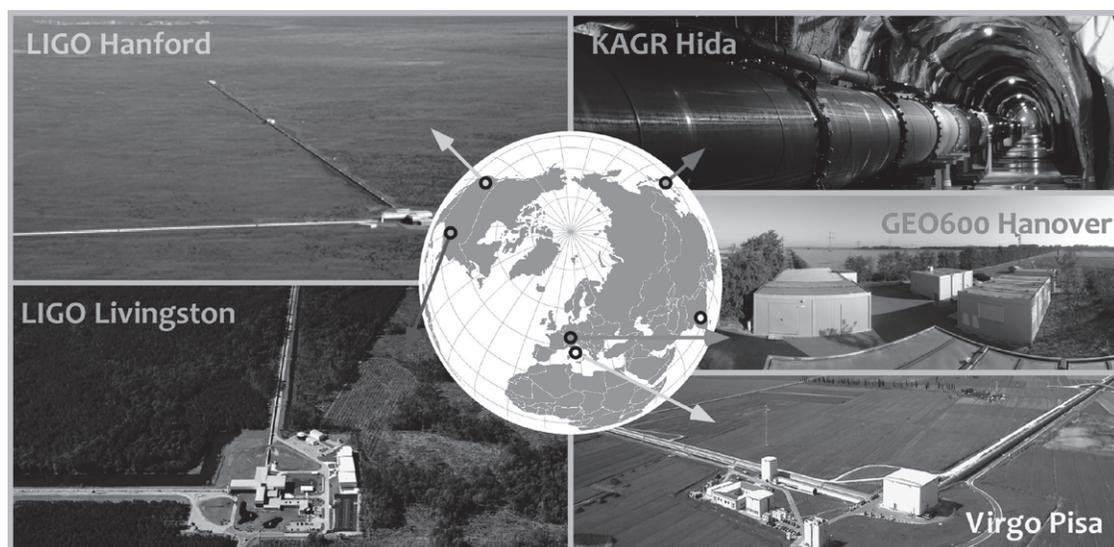


図8 世界の地上重力波望遠鏡