

超高感度レーザー干渉計を用いた重力波の直接検出

武者 満^{†a)}

Direct Detection of Gravitational Wave by Using Laser Interferometers

Mitsuru MUSHA^{†a)}

あらまし アインシュタインが一般相対性理論で重力波を予言して 100 年後に、米国のレーザー干渉計型重力波検出器 Advanced LIGO が重力波の直接検出に成功した。重力波はこれまでの天文観測で用いていた電磁波とは全く異なる情報を我々にもたらし、恒星・銀河の成立ちやダークエネルギーそして宇宙の始まりなど未だに理解されていない事項の解明の手がかりになると期待される。この重力波天文学の始まりによせて、超高感度のレーザー干渉計を用いた重力波直接観測を、原理・しくみ・歴史・初検出・将来像などとともに、筆者がかかわっている重力波検出器用光源の説明も含めて紹介する。

キーワード 重力波、レーザー干渉計、周波数安定化レーザー、ブラックホール

1. ま え が き

人は太古の昔から天空の星を見上げ、神を語り、暦を作り、船の標として大海原へと乗り出した。やがて望遠鏡を手にした Kepler, Galileo, Newton らは天体の精密計測から物の運動の規則性を見だし、古典力学を武器に星の世界を神話から天文学へと発展させ、中世から近世への門を押し開ける原動力となった。

近代天文学は観測機器の発展とともに進化を続け、光学望遠鏡による可視光観測から電波、赤外、X 線、果ては γ 線まで観測領域を広げることにより 138 億年に遡る宇宙の始まりについてまで議論をする事が可能となった。このように様々な情報を宇宙から得られるようになったが、その得られる情報は観測周波数帯域が広がった電磁波に限定されているにすぎない。特に宇宙の始まりや銀河の成立ち、そして恒星の一生などを理解するためには一般相対性理論に基づく非常に強い重力場の下での現象を知る必要があり、その代表的な例として挙げられるブラックホールや原始宇宙は電磁波の検出による直接観測が不可能と考えられている。このような現象を知るための有力な道具の一つが重力波である。重力波は 1916 年に Albert Einstein が一

般相対性理論に基づき予言した現象であるが、物質に対する相互作用があまりに小さいため直接検出は不可能であろうと考えられていた。しかし光学精密計測技術の進歩により 1990 年代から光干渉計による検出器の開発が進められ、予言から 100 年後の 2015 年の秋に初めて重力波直接検出に成功した。このように重力波検出は従来の天文観測の延長ではなくて、今までと全く異なる観測手段で宇宙を探る重力波天文学の開闢(かいびやく)という天文学史上の大きなパラダイムシフトと言える。本論文では重力波の原理、検出、検出器の歴史、将来の展望、そして重力波検出器の光源開発について簡潔に紹介する。

2. 重 力 波

2.1 重力波とはなにか

地上の高い所にある物体は(りんごに限らず)、拘束から放たれば地面に向けて落下する。Newton はこの現象を説明する上で「質量をもつ物同士には互いに引きあう力が働く」と考え万有引力の法則を考案した。18 世紀に発見された万有引力の法則は、それまで積み重ねられてきた Kepler の天体の運動や Galileo の落体の法則を完全に説明するのみならず、20 世紀初頭までは観測しうるあらゆる力学運動を支配する原理として認知されてきた。しかし 20 世紀に入り天体の精密計測が進むにつれ Newton 力学では説明できない現象が観測されるようになった。これらの問題を説明

[†] 電気通信大学レーザー新世代研究センター, 調布市

Institute for Laser Science, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8585 Japan

a) E-mail: musha@ils.ucc.ac.jp

するために Einstein は引力の本質について、「質量が他の物体に力を及ぼす」のではなく「質量はその周囲の時空をひずませ、他の物体はひずんだ時空により運動を励起される」と考えた。この質量と時空場の関係は簡潔な Einstein 方程式で表されており、この考えを基に 1915 年に一般相対性理論が発表された [1]。一般相対性理論は従来の Newton 力学を弱重力場中の近似として包含しており、巨大質量星により真空中で光が曲がって見える重力レンズ効果の観測により、静的な重力効果についてはその正当性が広く承知されている。一般相対性理論の発表の翌年に Einstein は静的な重力効果に加えて動的な重力効果についても「非対称な質量変動により時空の時間的変動が起こり、横波として光速で伝搬する」と予言しており、これが重力波である。電磁波が電磁気学から導かれる Maxwell 方程式の波動解で表されるのと同様に、重力波は一般相対性理論から導かれる質量と時空のひずみを記述する Einstein 方程式の波動解として記述されており、電磁波と異なり波源の質量から放射されたエネルギーが四重極の時空変動の横波として光速で伝搬する。

2.2 重力波をどのようにして捉えるか

1974 年に Taylor と Hulse は連星中性子星のパルサーの周期を精密に計測し、その周期減少を連星回転の際の重力波放出により説明した [2]。この成果は重力波の初の間接的検出として 1993 年にノーベル賞の受賞対象となったが、時空波動として直接検出されるまで重力波の完全な存在証明とは認められていなかった。重力波は電磁波と同様に波源に応じて様々な周波数の信号が予想されており、それぞれの帯域において異なる検出方法が考案されている。宇宙マイクロ背景放射 (CMB) の偏光ゆらぎの観測による原始宇宙を起源とする 10^{-21} Hz 帯の超低周波重力波の検出 (BICEP2, POLARBEAR) や、重力波が横切ることによるパルサータイミングの変動を精密測定する 10^{-8} Hz 帯の重力波の検出 (PPTA, EPTA, NANOGrav) などさまざまな周波数域での重力波直接検出が試みられているが、本論文では超新星爆発や中性子連星・ブラックホール連星の合体を起源とする 1 mHz ~ 1 kHz の周波数域における重力波信号の検出について述べる。重力波は電磁波と比べて物質との相互作用が弱いためひき起こされる時空のひずみ量は非常に小さく、超巨大質量星の衝突のような巨大天体現象からの重力波も相対空間変位は $\delta l/l < 10^{-21}$ と見積もられている。これは太陽と地球の間の距離が水素原子 1 個分変動する

量に相当し直接検出は非常な困難が予想された。初めての重力波直接検出の試みは 1960 年代に Weber により行われたが、これは巨大なアルミ製の狭帯域共振型バーアンテナを使い重力波の潮汐力による弾性体振動を検出する試みであった [3]。Weber はこのアンテナを用いた重力波直接検出を発表してセンセーションを巻き起こし、この結果を受けて低温冷却され検出感度を高めたバーアンテナ型の重力波検出器を用いた追試が東大を含めた各国の研究グループにより 2000 年代まで進められていた (Nautilus, Explorer etc.)。Weber の初検出は結局否定され、バーアンテナを用いた検出は到達感度限界の低さや検出帯域の狭さにより現在は下火となっているが、不可能と考えられていた重力波直接検出の機運を起こした功績は大きい。その後重力波が及ぼす自由質点間の光学距離の変動をレーザー干渉計を使い捉える方法が提案され、1990 年代に入り長基線マイケルソン型レーザー干渉計を用いた重力波検出が具体化した。日本と欧米で 4 プロジェクト計 5 台のレーザー干渉計型重力波アンテナが建設されて、2015 年にアメリカの Advanced LIGO による初の重力波検出成功へと導かれたが、次章でこのマイケルソン光干渉計による検出計画の概要について解説する。

2.3 光干渉計型重力波検出器

重力波は質点の非対称運動によって引き起こされる時空の四重極変動と説明されるが、空間中の質点間に働く作用を次の二通りに解釈することができる。観測者が重力源から受ける力をゼロとする局所慣性系 (光速が一定の系) では、観測者の周囲の各質点は四重極の潮汐力を受けると考えられる。また重力波によって質点間の時空がひずむと考えると、光は時空の面に沿って進むため光が質点間を伝搬する時間が変わると考えることもできる。いずれの解釈に基づいても、互いに直交する方向にある 2 組の 2 自由質点間の距離の差を光を使い測定することにより重力波を直接検出することが可能となる。

この直交する方向の距離の差の変動を精密に測定するための Michelson 型レーザー干渉計重力波検出器の構成を図 1 に示す。光源は単 1 縦・横モードの連続波 (cw) レーザーであり、高い周波数・強度安定度とともに高い出力も必要とされる (詳細は 3 章)。レーザー出力は狭角 2 等辺 3 角形のリング型光共振器で構成されたモードクリーナーに入り、ビームの高次横モードの除去と強度雑音の低減が行われる。モードクリーナー

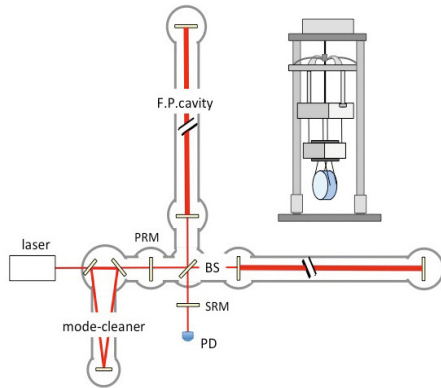


図 1 レーザー干渉計型重力波検出器の構成図

Fig. 1 Schematic of laser interferometric GW detector.

出射光はビームスプリッター (BS) で直交方向に分岐され、干渉計の各腕の終端に置かれた鏡で反射されて再び BS で再結合され、その干渉信号を光検出器 (PD) で検出する。

この BS と両端の鏡が自由質点となり、重力波の影響で変化した BS と各鏡間の光学長の変化を干渉信号として検出する。主干渉計の基本的な構造は通常の Michelson 干渉計と同じであるが、その非常に高い目標変位感度 ($\delta l/l < 10^{-21}$) を実現するために様々な工夫が為されている。まず相対空間変位に対する感度を向上させるため干渉計の基線長を非常に長く (100 m ~ 数 km) している。更に干渉計の光学長を伸ばすために各腕は 2 枚の鏡の間で多重折り返しを行う delay-line や Fabry-Perot 光共振器の構造になっている。(ただし腕の長さが長すぎると、高い周波数の信号成分は平均化されて感度が落ちるので、検出帯域に応じて適切な長さに設計する)。また空気の屈折率変動や Rayleigh 散乱による光学長の変動を避けるために干渉計全体は高真空下に置かれている。鏡や BS は図 1 の右上に示してあるような多段の振子で懸架されており、振子の共振周波数以上の帯域では地面振動が抑制された自由質点として振る舞う。更に鏡の機械的 Q 値を高めることにより検出帯域での熱による鏡の弾性振動の励起 (熱雑音) を低減している。また干渉計感度の理論的限界は光の反跳力による輻射圧雑音や受光時の光の粒子性に起因する散粒雑音 (shot-noise) などの量子雑音 [4] でも決まっているが、このうち散粒雑音限界は干渉計入射パワーを高めることにより下げることができる。干渉計は受光部 (PD) で暗干渉

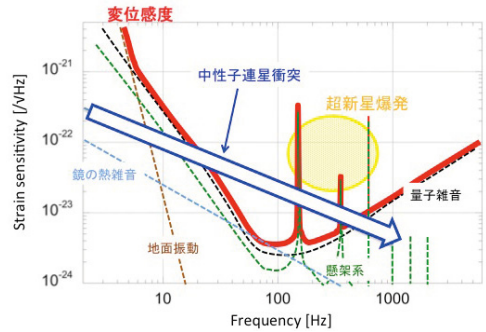


図 2 地上型重力波検出器の感度と重力波源

Fig. 2 Strain sensitivity and targets of the terrestrial GW detector.

になるように制御されており、その時には干渉計入射光は明干渉条件の光源方向に戻っている。そこで光源方向に戻った光を鏡 (PRM) で反射して再度干渉計に打ち返して実効的な干渉計入射パワーを増やす power recycling により散粒雑音限界を下げている。また干渉計の受光側に鏡 (SRM) を置き, squeezing により標準量子限界を上回る感度を実現する resonant sideband extraction (RSE) と呼ばれる試みも行われている [5]。これらの様々な工夫を行った結果得られる重力波検出器 (KAGRA) の変位感度予想曲線を図 2 に示す。低周波側は地面振動、鏡の熱雑音、鏡防振のための振子のワイヤーの熱雑音で、中・高周波数域は量子雑音 (輻射圧雑音と散粒雑音) で干渉計の変位感度が制限されている。

日本のレーザー干渉計型重力波検出計画は 1990 年代初頭、東大宇宙研が相模原キャンパスに作った TENKO100 から始まった。これは波長 514 nm の Ar⁺ レーザーを光源とした基線長 100 m の Michelson 型レーザー干渉計であり、両腕を delay-line 光学系にすることで光学長をかせいでいた。その後国立天文台で、試験用の 20 m 干渉計を経て 1995 年に三鷹キャンパス内に基線長 300 m の Fabry-Perot Michelson 型レーザー干渉計の TAMA300 が建設された [6]。TAMA300 は世界初の実用型重力波検出器であり、2003 年まで世界最高の $\delta l/l = 10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}}$ (300 Hz ~ 1 kHz) の変位感度を持ち、1000 時間の長期観測運転を実施した。TAMA300 での経験を踏まえた上で、より高い検出感度をもつ基線長 km クラスの光干渉計を用いた重力波検出計画が東大宇宙線研の主導で始まった。この計画は (1) 熱雑音を低減させるために鏡を冷却す

る (2) 地面振動が少ない地下トンネルに建設する (3) km クラスの基線長をもつ (4) 100 W クラスの出力の光源を使用する, ことを軸として計画が進められたが, 前の 2 点は海外の km クラスの干渉計では行われていない日本独自の試みであり本計画の特徴となっている. 計画は当初 LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) の仮名称で進められたが [7], その後 KAGRA の正式名称で 2010 年から建設が開始された [8]. KAGRA はニュートリノ検出器 KAMIOKANDE 等で有名な岐阜県神岡鉱山内に建設される. この鉱山は上部に重い山が乗っていることにより地面振動が東京に比べて 2 桁程低く, 低周波域で感度を得るには最適の立地である. 2014 年に 3 km 干渉計用のトンネル掘削が完了し真空装置や光学系, 懸架システム等の設置が進められ, 2016 年に KAGRA 計画第 1 段階の iKAGRA が完成した. iKAGRA は出力 2 W の光源で動作する基線長 3 km の Michelson 干渉計であり, 2016 年 3 月から 1 か月にわたる試験運転に成功している. 現在は 2018 年 3 月運転開始予定の第 2 段階の bKAGRA に向けて鋭意改良中である. 最終段階の KAGRA は両腕に Fabry-Perot 光共振器を内蔵した Fabry-Perot Michelson レーザー干渉計であり, レーザー光源は 150 W, 鏡は多段の振子で防振され, 更に鏡を 20 K 程度まで冷却することにより現在の Advanced LIGO 以上の感度による観測運転が予定されている.

鏡の冷却による熱雑音の低減は日本オリジナルのアイデアであり, KAGRA に先立ち神岡に作られた CLIO (冷却型 100 m 干渉計) で技術を成熟させ, KAGRA で実施する予定である. 真空槽内で 2 段の熱シールドに覆われ多段懸架された鏡は, 冷却時に機械的 Q 値が高くなるサファイアを素材に用いており, 冷却機の振動を伝えないように防振したサファイアファイバのヒートリンクにより冷却される. 図 2 に示されるように KAGRA は連星中性子星合体や超新星爆発からの重力波検出を主目的として設計された重力波アンテナである.

2.4 Advanced LIGO による重力波の初検出

海外では独-英の GEO, 米国の LIGO, 伊-仏の VIRGO の 3 計画が進められている. ドイツの Hannover に建設されている GEO600 [9] は基線長 600 m の delay-line 型 Michelson 干渉計であるが, 後の二つの計画では 1990 年の最初から km 級の基線長をもつ Fabry-Perot 型 Michelson 干渉計を建設

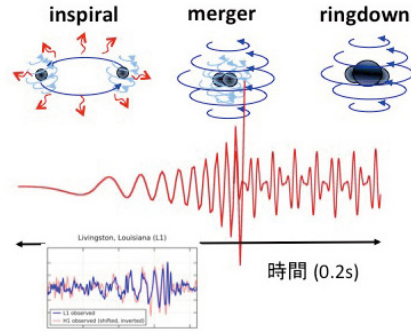


図 3 BH 連星合体過程からの重力波と初検出された信号 [12]

Fig. 3 GW Signals from inspiral and merger of BH binaries.

している. イタリアの Pisa に建設されている基線長 3 km の Fabry-Perot Michelson 型重力波検出器 VIRGO は 2003 年にいったん完成した後改良され 2017 年から Advanced VIRGO として運転が開始された [10]. 米国では 1992 年に LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) 計画が米国立科学財団 (NSF) に予算承認され, Washington 州の Hanford と Louisiana 州の Livingston の 2 箇所で基線長 4 km の Fabry-Perot Michelson 干渉計型重力波アンテナの建設を始めた [11]. 両者とも基本構造は KAGRA とほぼ同じであり, 2002 年に完成し 2010 年まで観測を行ったが重力波検出に至らなかった. その後全観測帯域に渡り 1 桁以上の変位感度向上を目指した改造に着手し, LIGO に比べて 4 倍感度を向上させた Advanced LIGO の観測運転を 2015 年から開始した. この間に LIGO は GEO600 や VIRGO と LIGO Collaboration Group としてデータ解析や技術の協力を始めている.

Advanced LIGO が本格観測開始に先立つ試験運転を始めて 2 日後, Hanford と Livingston の両検出器が受けた雑音の多い信号中に, 非常に高い相関をもつチャープ波形が存在することに気がついた. 慎重な解析と検討を重ねた結果, 翌 2016 年の 2 月 11 日に LIGO Collaboration Group は初の重力波直接検出に成功した事を発表した [12]. 得られた信号は図 3 左下に示すようにわずか 0.2 秒の間に周波数が 35 Hz から 150 Hz まで増加するとともに振幅も $\delta l/l = 10^{-21}$ まで増えるチャープ信号であり, 10^{-18} 台の雑音に埋もれた信号に適切なフィルタ処理をすることにより SN 比 24 が得られている. 2 台の干渉計間の距離 (3000 km) に

よる 7 ms の時刻ずれを補正すると 2 台の検出器で受けた信号はほぼ一致しており、誤検出確率 20 万年に 1 回以下の信頼度で重力波信号と確定した。このチャープ信号は巨大質量の連星がらせん運動をしながら近づき (inspiral), 衝突 (merge) し, その後合体して減衰振動 (ringdown) する各状態から発生した重力波を表しており, 信号の振幅から距離, 周期から軌道, 時間発展から質量など様々な情報を引き出すことができる。

詳細検討の結果この信号源は地球から約 13 億光年離れた質量 $36 M_{\odot}$ (M_{\odot} : 太陽の質量) と $29 M_{\odot}$ のブラックホール (BH) 連星が合体して $62 M_{\odot}$ のブラックホールとなったイベントであり, 質量欠損分 $3 M_{\odot}$ のエネルギーが重力波として放出された [12]。この重力波イベントは信号受信日にちなみ GW150914 と名付けられたが, 初検出の興奮が醒めやらぬうちに 2 回目の重力波検出 (GW151226) も発表された [13]。このように Advanced LIGO は 2016 年 1 月までの 1 回目の観測運転期間中に, 信号の SN 比の不足により正式には認められていないイベント (LVT151012) を含め 3 回の重力波直接検出に成功している。

これらの重力波の検出がもたらした最大の成果は重力波の存在確認であり, 重力波天文学の開闢を告げる重要な意義をもっている。そして強重力場中での一般相対性理論の初の実験検証であり, これがアインシュタインの最後の宿題を解いたと言われる所以である。それらに加え重力波の初検出は以下の様々な知見を我々にもたらした。まずは理論的, 間接的にしか存在が認められていなかったブラックホール (BH) 連星の直接検出を行った事である。重力波の初検出は中性子連星の合体起源と予想されていたが, 合体直前の距離と回転速度からこのイベントがブラックホール同士の連星以外ではありえない事が確認された。また従来の理論ではこの質量レベルのブラックホールの存在はほとんど予想されておらず, 今回の発見によりこのサイズのブラックホールの生成シナリオについて活発な議論が始められている [14]。また GW150914 の検出結果から従来より多くのブラックホール連星の存在が予想される方向に理論が修整され, 重力波天文学が成立するに十分な高頻度での重力波検出が期待されるようになった。また合体後の ringdown の信号はブラックホールの準固有振動の存在可能性を示唆している。このようにほんの 1 回の検出により我々に多くの情報と理論の発展をもたらした重力波は, 今後の定常観測の開始により天文学の飛躍的な進歩をもたらしてくれる

であろう。

2.5 将来展望

2015 年の Advance LIGO による重力波の初検出を皮切りに同程度の検出感度をもつ Advanced VIRGO や KAGRA が順次観測運転を始めるが, 今後はどのように重力波天文学が展開するのだろうか。重力波検出器の進むべき方向は感度・数・帯域に分けて考えられる。干渉計型重力波アンテナは干渉計面垂直方向にしか検出感度をもたないため, 全ての方角からくる重力波をあまねく受信するためには向きの異なる複数のアンテナが必要である。また指向性の弱い光干渉計型重力波アンテナで重力波源の位置を高精度で決めるためには離れた場所の複数台のアンテナが必要である。例えば GW150914 の場合 3000 km 離れた 2 台の検出器による観測でも方位角精度は 600 deg^2 (0.18 sr) であり, 重力波源の位置は南天の帯状の範囲 (全天球の 14%位) にしか絞り込めていない。Advanced LIGO の Hanford の検出器をインドに移設する LIGO-India の建設協定が 2016 年に結ばれたことにより, 2020 年代には 6 台体制で重力波観測を行う事が予定されている。

検出器の感度を上げれば弱いイベントからの重力波のみならず, より遠方からの重力波信号を捉えられるようになり重力波の受信頻度が上がる。また検出感度向上により連星合体後の ringdown からの信号を高い SN で捉えることができれば, GW150914 では確証が得られなかったブラックホールの準固有振動を観測できるようになる。このような高感度の第 3 世代検出器として ET (Einstein Telescope) が計画されている [15]。ET は欧州で建設予定の変位感度 10^{-25} を目指した検出器であり, 長基線長 (10 km)・地下建設・高出力レーザー (3 MW)・冷却鏡 (10 K)・squeezed 検出など各国の計画の良い所取りで設計された 3 角形構造のレーザー干渉計である。ET ではレーザーのパワーに関して相反関係にある散射雑音と輻射圧雑音による量子雑音限界を下げるために, ハイパワー光源の干渉計と低パワー光源の冷却干渉計の 2 台を同時運転させて検出感度を上げる計画である。

基線長や地面振動の制約により地上検出器ではアクセスできない 1 Hz 以下の低周波帯域にも様々な魅力的な重力波のターゲットが予測されているが, 基線長や地面振動の制約を外せる宇宙空間に重力波検出器を作りこの低周波数帯域の重力波検出を目指す宇宙重力波検出器計画が欧米 (LISA [16]) と日本 (DECIGO [17])

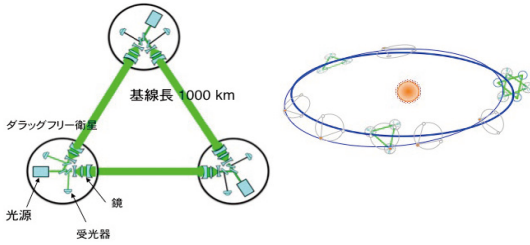


図4 宇宙重力波検出器 DECIGO の概念図と軌道案
Fig. 4 Preliminary design of DECIGO.

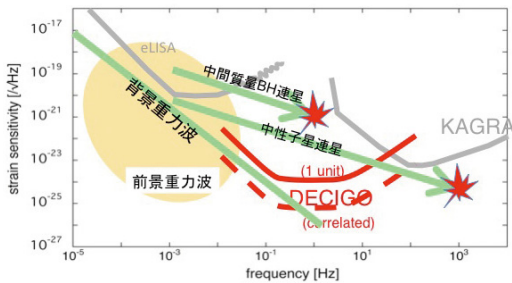


図5 DECIGO の感度曲線とターゲットの重力波源
Fig. 5 Strain sensitivity and targets of DECIGO.

で進められている。DECIGO の概念図を図4に示す。3台の衛星を一辺1000 kmの正三角形に配置し、衛星中で自由質点として浮いているミラー間で1000 kmのFabry-Perot共振器をつくり、狭角60度の3台のFabry-Perot Michelson干渉計を構成させる。最終的には4ユニットを打上げ相関計測を行う予定である。

日本の宇宙重力波計画は小型衛星にTorsion bar型重力波アンテナを載せて制御等の技術実証を行った2010年のSWIM μ vからスタートし、現在推進している前哨計画であるB-DECIGOを経て、2030年代にDECIGOを打上げる予定である。一方欧米のLISAはFabry-Perot光共振器はもたないが、遙かに長い(500万 km)の基線長をもつ光トランスポンダ型の3角形干渉計である。両宇宙重力波検出器の予想感度とターゲットを図5に示す。

宇宙重力波検出器の場合地面振動の影響を受けないので、低周波側は光の輻射圧雑音、高周波数側は散射雑音で感度限界が決まっている。DECIGOはより重い中性子星やブラックホール連星からの重力波を受ける事に加えて地上重力波で受けられるイベントの信号を数日前から受信して予告することができるが、最も重要なターゲットは宇宙初期を起源とする背景重力波である。背景重力波はCMBで観測できる前の誕生直

後の宇宙の状態を直接知る手がかりとなる低周波域の重力波信号であるが、より低周波数域では無数の連星合体イベントから発生する背景重力波が雑音として邪魔する。そのためDECIGOのみが、背景重力波を検出可能な狭い窓にアクセスできる唯一の重力波検出器として大いに期待されている。これらの宇宙重力波検出器は宇宙計画特有のさまざまな技術的・予算的な困難さをもつが、LISAは技術実証のための前哨衛星であるLISA Pathfinder (LPF)の打上げに昨年度成功しており[18]、両計画とも宇宙初期インフレーションやブラックホールの形成のメカニズム、ダークエネルギーの探索など様々な魅力的なターゲットの検出を期待しつつ、2030年代の実現に向けて邁進している。

3. 重力波検出器用の光源

重力波検出器には連続発振(cw)で単1縦横モード(高ビーム品質と単1周波数発振)のレーザーが使われるが、高い変位感度を得るためには高い周波数・強度安定度と高出力が必要とされる。Michelson干渉計は光の位相を使い長さを測るので変位感度と同程度の周波数安定度が必要と思われるかもしれないが、干渉計の双方の腕の長さが完全に一致していれば周波数の安定度は必要ない。実際には干渉計の腕の長さの非対称により周波数雑音が干渉信号雑音にカップリングするため高い周波数安定度が求められ、地上型重力波検出器では観測帯域の100~1 kHzで $\delta f = 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ (比較的安定な光源より8桁以上高い安定度!)の非常に高い周波数安定度が要求される。また変位感度の散射雑音限界を下げるために光源には高い出力が求められ、高出力と高安定度という相反する両性能を極限まで高める必要がある点が重力波検出器用光源の開発の難しさである。1990年当時の重力波検出器では高出力のAr⁺レーザー(10 W級の単1周波数高出力光源として当時唯一の選択肢)の周波数・強度を安定化する試みが行われていた。しかし強度・周波数雑音が高いAr⁺レーザーを安定化することは非常に困難であり光源の開発は難航していた。我々は逆に小出力だが高安定な光源の出力を増大することにより重力波用光源の開発を目指した。当時NPRO(Non-planar Ring Oscillator)と呼ばれるレーザー結晶自体が共振器となっているモノリシック構造の半導体レーザー励起Nd:YAGレーザー(波長1064 nm)が分光等の用途で開発されていた[18]。このレーザーは低雑音で高い制御性を持ち周波数安定化には最適であるが、その構

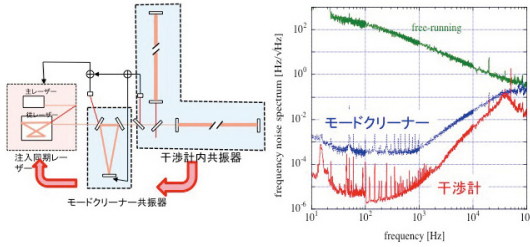


図 6 TAMA300 における光源の周波数雑音スペクトル [21]

Fig. 6 Frequency noise spectra of TAMA300 laser.

造上高出力を得ることは難しかった。そこでこの低出力の NPRO を主レーザーとして高出力マルチ縦モードの従レーザーを同期させる出力 W クラスの注入同期レーザーを開発し、その主レーザーを制御することにより周波数の安定化等を行った [19]。このレーザーの出力を 10~20 W に増やした光源が TAMA300 を始めとした第 2 世代の重力波検出器の光源として今に至るまで各プロジェクトで使われている [20]。レーザーの周波数安定化は安定な光周波数基準に対してレーザー周波数を一致させることにより行われるが、現在狭線幅光源の周波数基準としては低膨張ガラスなどのスペーサーの両端に高反射鏡を貼付けた固定スペーサー Fabry-Perot 共振器が広く使われている。しかしこの構成の共振器では重力波検出器に必要な帯域での要求周波数安定度は得られないため重力波検出器中の Fabry-Perot 共振器を周波数基準として用いる。これらの共振器は共振器長が非常に長く、各鏡が振子防振装置により非常に高く安定化されているため、固定スペーサー型に比べて遙かに高い周波数安定度をもっている。

図 6 に TAMA300 で使われた注入同期 Nd:YAG レーザーの周波数雑音スペクトルを示す。レーザーは最初にモードクリーナーに使われる 10 m の 3 角形共振器の共振周波数に対して周波数安定化を行い (図 6 青線)、そのモードクリーナーを主干渉計の 2 本の 300 m Fabry-Perot 共振器の common mode を基準に安定化することにより $\delta f = 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ の非常に高い周波数安定度を実現している [21]。現在の第 3 世代の重力波検出器は 100 W クラスの出力が必要とされるが、高周波数・強度安定度と高ビーム品質を保ったまま出力増幅するために複数のファイバ増幅器や注入同期レーザーによる並列増幅とそれらをコヒーレントに加算するコヒーレント加算 [22] の技術の組み合わせで

高安定・高出力の光源開発を進めている。

宇宙重力波検出器用 DECIGO 用の光源では地上型と異なり比較的困難といわれる 0.1~1 Hz での周波数安定度と輻射圧雑音を下げるとともに高い強度安定度が求められる。また干渉計の基線長が非常に長いので、伝搬中のビーム拡がりによる光学回折損失を抑えるために波長を短くする必要がある。そのため波長 515 nm のヨウ素飽和吸収を基準として周波数安定化させた小型・高効率・高機械的安定性・長期安定動作・耐宇宙線被曝などの宇宙使用の要件も満たした光源開発を行っている [23]。この光源は重力波用の光源としてのみならず光周波数基準を用いた宇宙空間での様々な応用も視野に入れて開発が進められている。

4. む す び

光干渉計を用いた重力波検出計画は、目的とする現象の存在も定かでない検出をするための技術も完全に確立されていない状態から手探りで進められ、各国の理論・干渉計・光源・高性能鏡・データ解析等の様々な分野の研究者や技術者の 30 年近くの努力の末に初検出にこぎつけた。この初検出はブラックホールや一般相対性理論の検証といった様々な成果を生み出したが、これから人類に様々な知見を与え新しい天文学の風景を提示してくれる重力波天文学の幕開けとしての意義も更に大きい。Advanced LIGO グループは 2018 年から第 3 回目の観測運転を開始するが、2~3 日に 1 回の割合で重力波が観測され、100 以上のブラックホールの質量やスピンの分布を調べる事によりダークマターの解明にも繋がるかと予想している。実際に本論文を仕上げているこの瞬間に Advanced LIGO の第 2 回観測運転での 3 回目の重力波検出の報告が飛び込んできた [24]。重力波天文学は、今後 X 線天文や γ 線天文と協力して一つの天体現象を様々な方法で検証するマルチメッセンジャー天文学としての発展も期待される [25]。GW150914 では発生と同時に γ 線観測衛星 Fermi により重力波の来た方向からの γ 線観測も行われ、(現状では否定されているが) ショート γ 線バースト (SGRB) のブラックホール連星起源説について討議された。また天文の分野以外にも、実験が困難な超強重力場下での物理現象の検証として物理学者の注目を集めている。このように生まれたばかりの重力波天文学が開く新たな宇宙像、物理の発見を夢見ながら本論文の結びとする。

文 献

- [1] A. Einstein, “Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie,” *Annalen der Physik*, Ser.49, pp.769–822, 1916.
- [2] R.A. Hulse and J.H. Taylor, “Discovery of a pulsar in a binary system,” *Astrophysical Journal*, vol.195, pp.L51–L53, 1975.
- [3] J. Weber, “Evidence for Discovery of Gravitational Radiation,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.22, pp.1320–1324, 1969.
- [4] C.M. Caves, “Quantum-mechanical noise in an interferometer,” *Phys. Rev. D*, vol.23, p.1693, 1981.
- [5] J. Mizuno, et. al., “Resonant sideband extraction: a new configuration for interferometric gravitational wave detector,” *Phys. Lett. A*, vol.175, p.273, 1993.
- [6] K. Arai, et. al., “Recent progress of TAMA300,” *J. Physics: Conference Series*, vol.120, 032010, 2008.
- [7] K. Kuroda and the LCGT collaborations, “The status of LCGT,” *Classical and Quantum Gravity*, vol.23, no.8, pp.S215–S221, 2006.
- [8] Y. Aso, Y. Michimura, K. Somiya, M. Ando, O. Miyakawa, T. Sekiguchi, D. Tatsumi, and H. Yamamoto, “Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector,” *Phys. Rev. D*, vol.88, 043007, 2013.
- [9] J. Hough, et. al., “GEO600,” *MaxPlanck fur Quantumphysik Technical Report No. VIR-0517A-15*, 1989.
- [10] F. Acernese, et. al., “Advanced VIRGO: A second-generation interferometer wave detector,” *Classical and Quantum Gravity*, vol.32, no.2, 024001, 2015.
- [11] A. Aasi and the LIGO scientific collaboration, “Advanced LIGO,” *Classical and Quantum Gravity*, vol.32, no.7, 074001, 2015.
- [12] B.P. Abbott, et. al., “Observation of gravitational waves from a binary black hole merger,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.116, 061102, 2016.
- [13] B.P. Abbott, et. al., “GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.116, 24113, 2016.
- [14] T. Kinugawa, K. Inayoshi, K. Hotokezaki, and T. Nakamura, “Possible indirect confirmation of the existence of Pop III massive stars by gravitational wave,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol.442, pp.2963–2992, 2014.
- [15] M. Puntro, et. al., “The Einstein telescope: A third-generation gravitational wave observatory,” *Classical and Quantum Gravity*, vol.27, no.19, 194002, 2010.
- [16] P. Amaro-Seoane, et. al., “Low-frequency gravitational-wave science with eLISA/NGO,” *Classical and Quantum Gravity*, vol.29, no.12, 124016, 2012.
- [17] N. Seto, S. Kawamura, and T. Nakamura, “Possibility of direct measurement of the acceleration of the universe using 0.1 Hz band laser interferometer gravitational wave antenna in space,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.87, 221103, 2001.
- [18] E.A.P. Cheng and T.J. Kane, “High-power single-mode diode-pumped Nd:YAG laser using a monolithic nonplanar ring resonator,” *Opt. Lett.*, vol.16, pp.478–480, 1991.
- [19] M. Musha, K. Nakagawa, and K. Ueda, “Wide-band and high frequency stabilization of an injection-locked Nd:YAG laser to a high-finesse Fabry-Perot cavity,” *Opt. Lett.*, vol.22, pp.1177–1179, 1997.
- [20] S.T. Yang, Y. Imai, M. Oka, N. Eguchi, and S. Kubota, “Frequency-stabilized, 10-W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd:YAG laser,” *Opt. Lett.*, vol.21, pp.1676–1678, 1996.
- [21] S. Nagano, et. al., “Development of a multistage laser frequency stabilization for an interferometric gravitational-wave detector,” *Review of Scientific Instruments*, vol.74, pp.4176–4183, 2003.
- [22] M. Musha, T. Kanaya, K. Nakagawa, and K. Ueda, “Intensity and frequency noise characteristics of two coherently-added injection-locked Nd:YAG lasers,” *Appl. Phys. B*, vol.73, pp.209–214, 2001.
- [23] A. Suemasa, A. Shimo-oku, K. Nakagawa, and M. Musha, “Development of highly frequency and intensity stabilized lasers for space gravitational wave detector DECIGO/B-DECIGO,” *CEAS Space Journal* (published online).
- [24] B.P. Abbott, et. al., “GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2,” *Phys. Rev. Lett.*, vol.118, 221101, 2017.
- [25] B.P. Abbott, et. al., “Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914,” *Astrophysical Journal Letters*, vol.826, L13, 2011.

(平成 29 年 6 月 2 日受付, 8 月 21 日再受付,
12 月 11 日公開)

武者 満



1989 東京大学・工卒. 1991 同大大学院・理学系修士課程修了. 1994 東工大大学院博士課程修了. 工学博士. 学振特別研究員(国立天文台)を経て現在量子エレクトロニクス分野の研究に従事.