

重力波検出用衛星干渉計

川村 静児

Satellite Interferometer for Gravitational Wave Detection

Seiji KAWAMURA

The existence of gravitational waves was predicted by A. Einstein in his general theory of relativity 90 years ago, but they have not yet been detected. A Michelson interferometer is the most powerful instrument for gravitational wave detection because the longer arm length gives larger gravitational wave signals. An interferometer with extremely long arm length is attainable in space. NASA and ESA have been working on Laser Interferometer Space Antenna (LISA), while Japan has started a serious study about DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO), which aims at detecting gravitational waves between 1 mHz and 100 Hz. DECIGO consists of three drag-free satellites, 1000 km apart from each other, whose relative displacements are measured by a Fabry-Perot Michelson interferometer. We plan to launch DECIGO around 2021 after establishing required technologies by two pathfinder missions.

Key words: gravitational wave, Michelson interferometer, LISA, DECIGO, drag-free satellite

重力波の存在は90年前にアインシュタインの一般相対性理論の中で予言されたが、未だ検出には至っていない。近年、重力波検出のための大型レーザー干渉計が世界各地で建設され、重力波検出まであとわずかな感度で稼働している。さらに、重力波検出器を宇宙空間に作ろうという計画も検討されている。本解説では、重力波の性質、検出方法、地上の検出器の現状を簡単に紹介した後、重力波検出用衛星干渉計、特に日本の計画であるデシヘルツ干渉計重力波天文台 (DECIGO) について詳しく説明する。

1. 重力波

重力波とは、空間の潮汐的なひずみが光速で伝播する横波であり、加速度運動をする物体から放射される (図1参照)。重力波の放射は電磁波の放射と類似の現象であるが、大きな相違点は、電磁波が双極子モーメントの時間変化によって起こる放射であるのに対して、重力波は時間変化する四重極モーメントから発生する。重力波の双極子放射が存在しない理由は、運動量保存則により、質量の双極子モ

ーメントが時間変化できないからである。

重力波は重い物体が速く動くほど大きなひずみの振幅をもつが、たとえ1トン、1メートルの棒を毎秒1000回転の速さで回転させたところで、そこから放射される空間のひずみは (回転棒から重力波の波長程度離れた場所において) わずか 10^{-40} 程度にすぎない。しかし、宇宙では非常に重い物体が非常に速く動く現象、例えば連星中性子星の合体や、超新星爆発などが頻繁に起こっており、また宇宙の初期、インフレーションの時代にもすさまじいばかりの高質量物体の高速運動が存在した。幸いなことに、われわれの現在の天文学の知識と一般相対性理論を用いると、そういった天体現象から放射される重力波を検出することは、原理的に十分可能であることがわかる。ある天体現象から放射される重力波の波形は、その天体現象の振る舞いを反映しているため、検出された重力波信号を解析することにより、電磁波による観測では得ることのできない、その天体現象の重要な情報を得ることができる。すなわち、重力波天文学という全く新しい天文学の分野を創成するこ

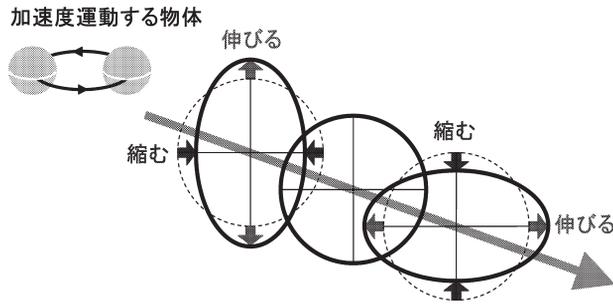


図1 重力波の概念図。重力波とは空間の潮汐的なひずみが光速で伝播する横波である。

とが可能となる。

重力波の検出の原理はごく単純である。重力波がやってくると物体間の距離が変化するので、その変化を何らかの手段で測ってやるのである。しかし、その変化量が途方もなく小さいために、計測は困難を極める。例えば、連星中性子星の合体は、地球から 200 Mpc の範囲で 1 年に数回程度起こると考えられているが、そこからやってくる重力波は地球に到達したところにはわずか 10^{-22} 程度のひずみをもつにすぎず、1 m 離れた 2 つの物体の距離を 10^{-22} m 振動させるだけである。一昔前までは、この変化量は小さすぎて測定不可能だと考えられていたが、現在ではさまざまな技術の進歩に伴い、特にレーザー干渉計を用いた検出方法が世界各地で精力的に研究されるようになり、重力波検出の可能性が一気に現実のものとなってきた。

2. レーザー干渉計による重力波検出

マイケルソン・レーザー干渉計は、直交した 2 本の腕のそれぞれの長さの差を測るものなので、潮汐力の波である重力波の検出にはうってつけである。図 2 に示すように、ミラーおよびビームスプリッターから構成されたマイケルソン干渉計に重力波がやってくると、干渉計の両腕の長さが差動的に変化し、干渉光の明暗が変化する。それを光検出器で測定すれば、重力波が検出できる。なお、ミラーおよびビームスプリッターは、重力波に対して自由質点として振る舞う必要があるため、ワイヤーで吊り下げられている。

レーザー干渉計が重力波検出に適している最大の理由は、干渉計のアーム長を長くすることで重力波に対する感度を高めることができる点にある。重力波は空間のひずみを引き起こすので、干渉計のアーム長が長いほど、重力波によって引き起こされるアーム長の変化量も大きくなる。一方、ミラーの変位雑音や検出系の雑音などは、干渉計のサイズによらない。したがって、干渉計のアーム長を長くすることにより、重力波に対する感度を飛躍的に高めるこ

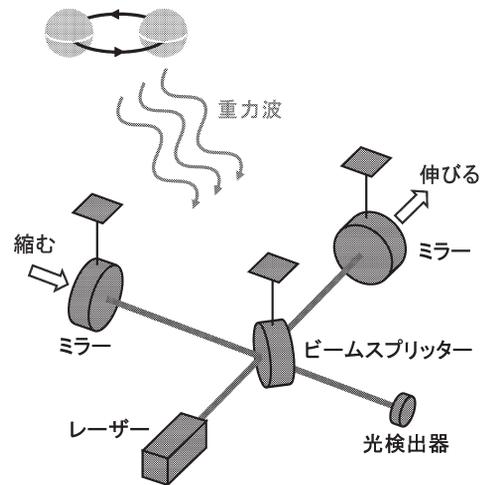


図2 重力波検出器としてのマイケルソン・レーザー干渉計。

とができるのである。

ここで、干渉計の感度を制限する雑音について、簡単に説明しておこう。重要な基本的雑音としては、地面振動による鏡のゆれ、量子雑音、熱雑音による鏡のブラウン運動がある。地面振動による雑音はおもに低周波領域で問題となる。これは、低周波ではもともと地面振動が大きいうえに、防振の効果を高めることが難しいためである。量子雑音は、光がフォトンの集まりであることに起因するもので、ショットノイズと輻射圧雑音の 2 種類がある。直感的には、ショットノイズが光の検出に伴うフォトン数のゆらぎによって引き起こされるものであるのに対して、輻射圧雑音は光が鏡に与える輻射圧のゆらぎがミラーを直接ゆさぶるものと考えられる。ショットノイズは高周波領域で、輻射圧雑音は低周波領域で問題となる。ちなみに、光の強度を上げると、信号に対するショットノイズの相対強度が減り、ショットノイズに対する感度は上がるが、輻射圧雑音によるミラーのゆらぎは増えてしまう。最後に熱雑音であるが、これは熱力学で説明されるいわゆるブラウン運動であり、鏡の振り子としての運動と内部モードに関するものの 2 種類があり、中間周波数領域で干渉計の感度を制限する可能性がある。もちろん、干渉計にはこの 3 つの基本的な雑音以外にもさまざまな雑音が存在し、感度を高めるためにはすべての雑音を引き下げることが必要であることを付け加えておく。

3. 地上の大型干渉計

さて、地上においては、どれだけアーム長を伸ばせるであろうか。これには、まず干渉計を建設する場所について考える必要がある。長さ 10 km を超える L 字型の平地で、干渉計の建設が可能場所というのは、世界でもきわめて

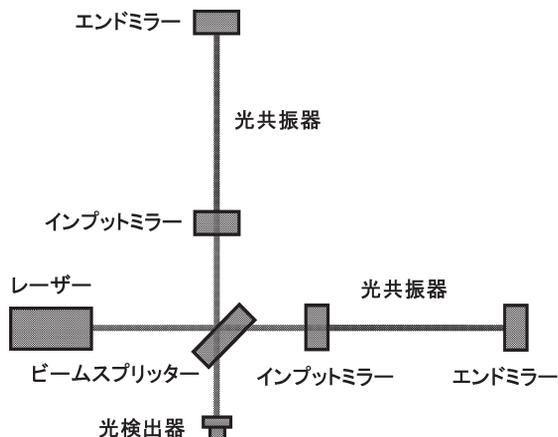


図3 重力波信号を増幅するための光共振器をアームに組み込んだマイケルソン干渉計。

限られることがわかっていて、次に、真空装置のコストの点からはどうであろうか。干渉計のアームを走るレーザー光の速度はビーム内に存在する気体分子の数密度に応じて変動するため、ビームは真空パイプで覆う必要がある。また、アームが長いほど光が広がり、大きな径の真空パイプが必要になる。簡単な見積もりによると、10 km を超えるアーム長をもつ干渉計の真空パイプのコストは、べらぼうに高くなってしまふことがわかる。結局、これらの制約から、地上においては、アーム長はせいぜい 10 km が限界であると考えられる。

そこで考えられたのが、干渉計の腕の部分に光共振器を挿入する方法である (図3 参照)。ビームスプリッターの近くに高反射率をもつインプットミラーを置き、遠方のエンドミラーとの間で光共振器を構成し、光をミラー間で多重反射させることで実効的にアーム長を伸ばし、重力波信号を増幅するのである。干渉計の検出に伴うノイズ (センサーノイズ) は、光の折り返し回数によらず一定だと考えられるので、結果としてシグナル・ノイズ比が改善される。一方、ミラーを直接ゆらす雑音 (変位雑音) は、重力波信号と同様に増幅されるので、変位雑音に対するシグナル・ノイズ比はアーム光共振器を用いてもよくなる。通常、干渉計の感度は低周波側ではミラーの変位雑音、高周波側ではセンサーノイズで制限されるので、アーム共振器の有効性はもっぱら高周波側に限られるといえる。この方式は、現在の地上の重力波検出用干渉計の主流となっている。

さて、1990 年台に入って、重力波検出を目指して大型レーザー干渉計が世界各地で建設された。アメリカの LIGO、フランス・イタリアの Virgo、ドイツ・イギリスの GEO600、そして日本の TAMA300 が、現在、重力波

検出まであとわずかの感度で稼動している (図4 参照)。LIGO は 4 km のアーム長をもち、ワシントン州とルイジアナ州に 2 台作られている。LIGO の現在の感度は 100~400 Hz で $5 \times 10^{-23} / \text{Hz}^{1/2}$ であり、地球から 15 Mpc 離れたところで起こる連星中性子星の合体から放射される重力波を捉えることができる。Virgo はアーム長 3 km であり、その特徴はスーパー・アテニューエーターとよばれる巨大防振システムを使っていることである。GEO600 はアーム長 600 m で、腕共振器を用いずに、干渉計の検出器側のポートにもう 1 枚ミラーを置くことによって重力波の信号を増幅している。TAMA300 はアーム長 300 m であるが、いち早く稼動状態を実現し、2000 年夏から約 2 年間世界最高感度を誇った。なお日本では、TAMA300 の次の計画として LCGT 計画を推進している。LCGT は 3 km のアーム長をもつ干渉計で、ミラーの熱雑音を抑えるため低温に冷やすことが特徴であり、地面振動が非常に少ない神岡のトンネル内に設置される予定である。

4. スペース重力波アンテナ

このように、地上の大型干渉計は重力波検出まであとわずかと迫る感度を達成しているが、重力波天文学を創成するためには、さらに一段と感度を上げ、より頻繁に重力波を検出する必要がある。その手段として簡単に考えつくのは、重力波検出器を宇宙空間にもっていくことである。そうすれば、土地の制約もなく、また真空装置も必要でないため、アーム長を飛躍的に長くすることが可能である。

ここで、アーム長と重力波信号の大きさとの関係について、もう少し詳しく考えてみよう。アーム長を伸ばすと重力波信号が大きくなることは、すでに述べた。しかし、アーム長を長くして、光のアーム内での滞在時間が、ねらう重力波の周期程度まで長くなると、光がアーム内に滞在している間に重力波の位相が変化してしまい信号のキャンセルが起こる。したがって、アーム長を伸ばすことにより信号の増幅が起こるのは、光のアーム内での滞在時間に対応する周波数よりゆっくりとした重力波に対してのみである。例えば、アーム長を 1 万 km 程度に伸ばすと、10 Hz 程度以下の重力波に対しては完全な形で感度改善の恩恵を受けることができる。

また、地上の干渉計では、10 Hz 以下の低周波領域で地面振動による雑音や、周辺の物質が動くことによって引き起こされる重力場変動による雑音が問題となるため、低周波領域で感度を上げることができない。しかし、宇宙空間では地面振動はそもそも存在しないし、重力場雑音も地上に比べて激減する。

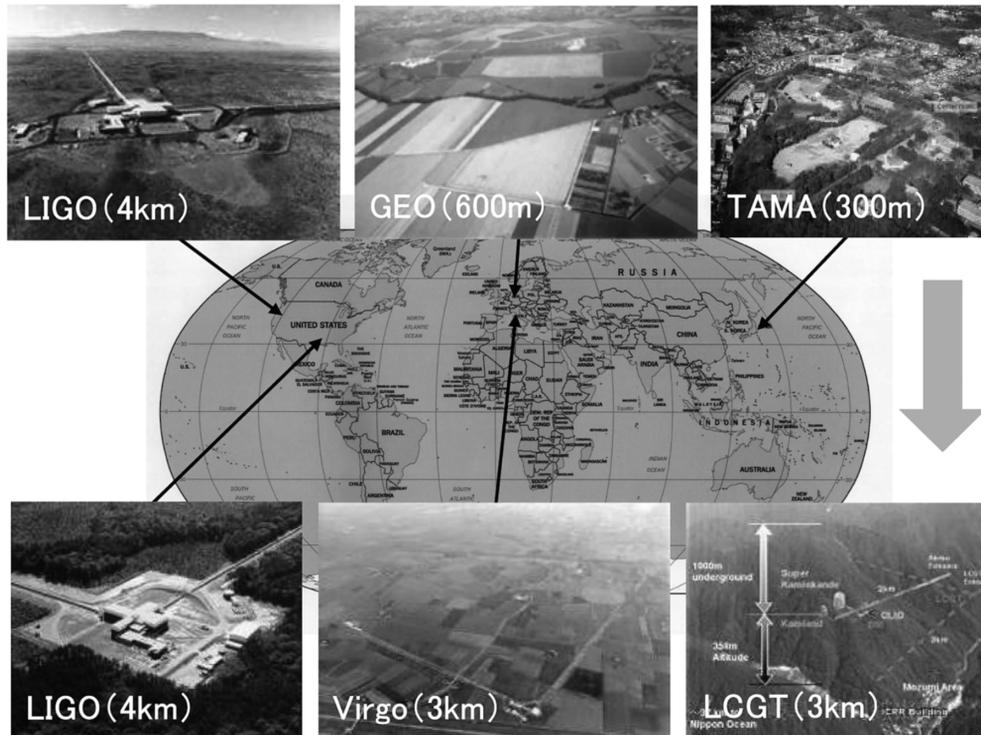


図4 世界の大型地上干渉計。

したがって、長いアーム長による低周波領域での重力波信号の増幅、および地面振動や重力場雑音などの低周波領域での雑音の低減が可能となることから、宇宙空間における重力波検出器は低周波領域で、地上干渉計では実現しえない感度を達成できる可能性があることがわかる。

ところで、低周波の重力波源にはどのようなものがあるのでしょうか。一般に重い物体ほど動くスピードが遅くなることから、低周波領域での重力波源としては、大質量のブラックホール連星の公転運動や合体などが考えられる。これらの情報を重力波を通して知ることは、銀河中心に存在する超巨大質量のブラックホールの成り立ちの謎を解くうえでも非常に興味深い。

こういった背景から、欧米ではすでに NASA と ESA の共同計画である Laser Interferometer Space Antenna (LISA) 計画が提唱され、活発に準備が進められている。また、日本でも最近、DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO) についての詳細な検討を開始した。

4.1 LISA

LISA 計画¹⁾は、互いに 500 万 km 離れた 3 つの衛星を打ち上げ、それらの間隔をレーザーで測定し 1 mHz~0.1 Hz の重力波を検出しようとするものである。図 5 に示すように、3 つの衛星は太陽周回の地球軌道付近に置かれ、正三角形の形を保ちながら軌道上を運動する。

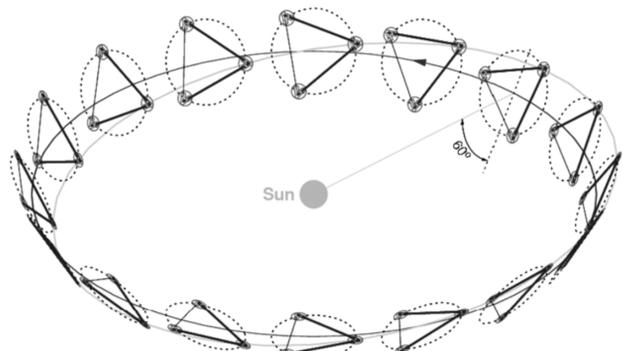


図5 LISA スペース重力波アンテナの3つの衛星の軌道 (LISA プロジェクトより提供)。

3 つの衛星はいわゆるドラッグフリー衛星とよばれるものであり、太陽光の輻射圧やダストによる外乱 (ドラッグ) に抗して、重力のみで決まる軌道を運動することができる。ドラッグフリーの原理は、以下に述べるように単純なものである。衛星の中には、重力波検出のためのミラーが浮かんでおり、そのミラーの衛星筐体に対する相対位置を、筐体に取り付けられたセンサーによって計測する。その情報を用いて、ミラーが常に筐体内の所定の位置に浮かび続けるように、衛星外部にある推力装置 (スラスター) を用いて筐体の位置をコントロールする。衛星内部にあるミラーには、太陽光の輻射圧やダストによる外乱が働かず、重力のみによって決まる運動を行うため、それに追隨

する衛星もドラッグフリーとなるわけである。

レーザーはパワー1 W、波長 $1\ \mu\text{m}$ のNd:YAGレーザーが用いられ、望遠鏡ミラーの直径は0.3 mである。このため500万 km離れた衛星にはわずか100 pW程度しか到達できず、地上検出器のように、ミラーで直接打ち返す方法は使えない。そこで、単純に反射するかわりに、いわゆる光トランスポンダーとよばれるシステムを使う。この原理は、以下のようなものである。まず、ある衛星(衛星Aとする)に搭載されたレーザー(レーザーAとする)から、別の衛星(衛星Bとする)に光がやってくる。衛星Bはこの光を受け、衛星Bに搭載されたレーザー(レーザーBとする)の光を、入射光の位相に合わせて打ち返す。こうすることにより、あたかもミラーで直接反射したかのごとく光を打ち返すことができるのである。

さて、この増幅反射された光は衛星Aにやってくる。そこで、この光とレーザーAの光とを干渉させる。この干渉光を検出することにより、衛星間の距離を測定する仕組みになっている。ちなみに、この測定はレーザーAの周波数を基準とした衛星A-B間の距離の測定であるので、レーザーAの周波数安定度により測定の精度が決まる。しかし、両腕の衛星間の距離の測定をひとつのレーザーを用いて行うことにより、もし両腕の長さが等しければ、レーザーの周波数雑音の影響を消すことができる。

ところで、各衛星は重力場中を自由落下しているが、3つの衛星間の距離が完全に保たれたまま、運動を続けられるような軌道は存在しないため、衛星間の距離は衛星の運動とともに大きく変化する。このため、先ほどの例でいうと、衛星Bによって増幅反射された光はAとBの衛星間距離の変化に伴うドップラー効果により、レーザーAの光の周波数から変化する。したがって、その光が再び衛星Aに到達したとき、その光とレーザーAとの干渉光には2つの周波数の差に対応するビートが現れる。このビート信号を既知の安定な発振器からの信号でダウンコンバートし、その信号をモニターすることにより、衛星間の距離の変動を測定する。

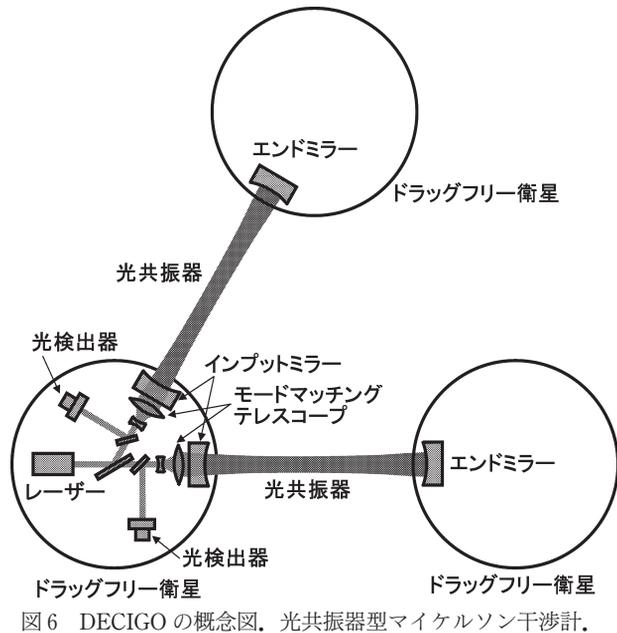
先ほど、もし両腕の長さが等しければ、レーザーの周波数雑音の影響はないと述べたが、LISAでは衛星間の距離が時間とともに大きく変化するため、周波数雑音は非常に大きな問題となる。この周波数雑音の影響を抑えるために、以下の3つの手段が検討されている。まず、外部共振器などの基準を用いた周波数安定化、そして両腕の同相アーム長信号を用いた周波数安定化、そして得られるいくつかの信号を時間をずらしてコンビネーションをとることにより、周波数雑音をキャンセルする方法である。

LISAの目標感度は、3 mHz以下ではさまざまな鏡のゆらぎの雑音で制限され、3 mHz以上では光のショットノイズで決まっている。最も感度の高い周波数帯は10 mHz付近で、その感度は $10^{-20}/\text{Hz}^{1/2}$ である。LISAの目標感度が実現されると、巨大ブラックホールや各種高密度連星からの重力波が非常に高いシグナル・ノイズ比で検出されることがわかっている。また、宇宙初期からの重力波に関しても、たとえ検出できなくとも、有意義なアップリミットが与えられることが期待される。

4.2 DECIGO

DECIGO^{2,3)}は、日本のスペース重力波アンテナの将来計画であり、1 mHz~100 Hzの周波数帯でさまざまな天体現象からの重力波を頻繁に検出し、DECIGO実現のときまでにすでに開かれていると期待される重力波天文学をより深めて、宇宙をよりよく理解することを目的としている。DECIGOのねらう周波数帯は、LISAの周波数帯と地上検出器の周波数帯の間をカバーするため、LISAや地上検出器では得られない情報を得ることができる。また、LISAの帯域では、白色矮星などの連星からの重力波信号が同時にたくさん検出されるため、それらをひとつひとつのソースからの重力波に分離できず、重力波信号でありながら雑音扱いとなるという問題がある。そのため、現在の目標感度以上に感度を上げてあまり意味がない。これに比べてDECIGOは、0.1 Hz以上でこの種の雑音が非常に小さいことから、著しく高い感度を実現することが可能である。どれくらい高い感度かという点、例えば連星中性子星からの重力波が少なく見積もっても年間50000個は検出できるレベルである。

DECIGOは互いに1000 km離れた3つのドラッグフリー衛星からなり、図6に示されているように、それらの衛星間の距離を光共振器を用いたマイケルソン干渉計を用いて計測するものである。ちなみに、図6では、両腕からの光の直接干渉を使わずに、それぞれのアームで独立に信号をとっている。また、3つの衛星の配置、何台の干渉計を搭載するかなどに関しては、現在検討中である。DECIGOでは、光共振器を使うことから衛星間の距離は一定に保つ必要があり、LISAとは違ったむしろ地上検出器に近い検出システムとなっている。アーム長はLISAの500万 kmと比べて非常に短いですが、これは衛星から発せられた光が回折によってあまり広がらないうちに別の衛星に届き、それを直径1 mの鏡で直接反射して光共振器(フィネスは10)を組むためである。レーザーの波長は回折損失をなるべく小さくするため $0.5\ \mu\text{m}$ とし、パワーはショットノイズと輻射圧雑音とのバランスから10 Wとしている。また、鏡



の質量は、輻射圧雑音を減らすため 100 kg とできるだけ重くしている。

DECIGO の目標感度を、LISA と LCGT の感度とともに図 7 に示す。DECIGO のアーム長は LISA ほど長くなく、地上干渉計より長いということにより、DECIGO の得意な周波数帯は、LISA と地上干渉計の中間となる。DECIGO の目標感度は、0.15 Hz 以下ではレーザー光の輻射圧雑音により制限され、それ以上ではショットノイズで決まる。つまり、感度はすべての周波数領域において量子雑音で制限される。

これを実現するためには、さまざまなプラクティカルな雑音をすべて量子雑音以下に抑えなくてはならない。その中でも最も難しいと思われるものは、ミラーに働くさまざまな力の雑音とレーザーの周波数雑音である。力の雑音には、センサーやアクチュエーターのつくる雑音や衛星の筐体のつくる重力場の変動などがあるが、これらすべてをミラー 1 枚当たり $4 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$ 以下に抑える必要がある。また、周波数雑音に関しては、まずレーザーの周波数を安定な外部共振器などを使って、例えば 1 Hz において $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ 以下に安定化する必要がある。また、その光を両腕のアーム長の同相信号を基準として、1 Hz において 10^5 以上のゲインで安定化しなくてはならない。(重力波信号は、両腕のアーム長の差動信号に現れるので、同相信号を基準として光の周波数の安定化を行うことは重力波検出の妨げにならない。) さらに、 10^5 の同相除去比が必要とされるため、両腕の光の滞在時間を 10^5 の精度で合わせる必要がある。

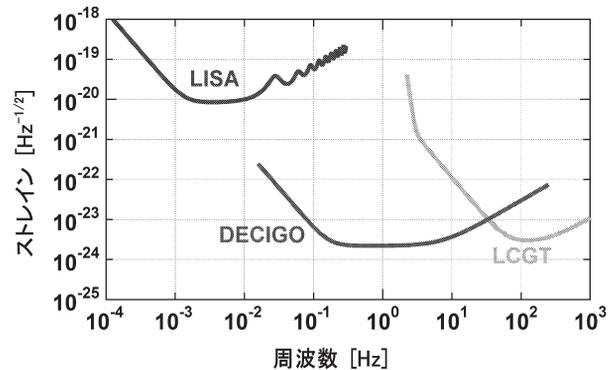


図 7 DECIGO の目標感度。LISA と地上干渉計を代表して LCGT の目標感度とともに示す。

また、2 つの衛星を光共振器で結んだ状態にもっていく技術も非常に難しいものであることは容易に想像できる。まず、一方の衛星の姿勢を制御して、レーザー光が別の衛星にちゃんと当たるようにする。次に、その衛星の姿勢制御を行い、反射された光がもとの衛星に戻るようにする。この状態ではまだ衛星間の距離は大きく変動しているので、干渉光にはドップラー効果に起因するビート信号が現れる。このビート信号を使って、衛星の相対距離の変化がなるだけ小さくなるように衛星をビーム方向に動かす。ある程度距離が一定に近づけば、後は位相変調・復調などの手法を用いて変位信号を取得し、衛星の位置を制御する。また、この状態になれば、波面計測などの手法を用いて衛星の姿勢の高性能な制御を行うことができる。

DECIGO は、衛星間の距離を一定に保つ必要があるのもので、通常のドラッグフリー衛星にその機能が追加されたものが必要となる。例えば、一方の衛星は通常のドラッグフリー衛星でよいが、もう一方の衛星はドラッグフリー衛星としての機能を果たしつつ、さらにミラー間の距離を一定に保つための力を衛星筐体からミラーに加えなくてはならない。そうすると、反作用で筐体自身が逆方向に動くため、それを打ち消す向きにスラスターを吹くことで、筐体の位置を制御する必要がある。この際、重力波信号は、衛星筐体からミラーに印加されるフィードバック信号の中に現れることになる。

DECIGO は 2021 年に打ち上げを目標としているが、その前に、必要な技術の確認のための 2 回のパスファインダー・ミッションを行う予定である。最初のパスファインダーでは、1 つの衛星の中に 2 つのミラーを入れてその距離を計測する。目的は、ドラッグフリー衛星の技術試験と計測技術の宇宙空間での確認、そして地上では困難な 10 Hz 以下の重力波の観測を、可能な限りの感度で行うことである。第 2 のパスファインダーの目的・スコープは、まだ完

全には決まっていないが、おそらく離れた2つの衛星の間を光共振器で結ぶ試験がメインとなると思われる。

LISA や DECIGO などのスペース重力波アンテナは、その実現までには乗り越えなくてはならないさまざまな技術的な困難がある。しかし、原理的に実現不可能でない以上、必ずやいつかはこの夢のような感度が実現できるはずである。その暁には、頻繁な重力波の検出が可能となり、いくつかの宇宙の謎を解き明かすであろう。さらに、これまでの宇宙の概念を打ち破るような新しい天体現象が見つかる可能性もある。また、宇宙誕生の瞬間を、重力波によって直接観ることもできるかもしれない。このような可能性を秘めた重力波天文学の時代は、すぐそこまで来ている

のである。

文 献

- 1) G. Heinzel, C. Braxmaier, K. Danzmann, P. Gath, J. Hough, O. Jennrich, U. Johann, A. Rüdiger, M. Sallusti and H. Sculte: "LISA interferometry: Recent developments," *Classical Quantum Gravity*, **23** (2006) S119-S124.
- 2) 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.*, **87** (2001) 221103.
- 3) S. Kawamura, *et al.*: "The Japanese space gravitational wave antenna—DECIGO," *Classical Quantum Gravity*, **23** (2006) S125-S131.

(2006年4月12日受理)