

スペース重力波アンテナ DECIGO

川村 静児

〈国立天文台・重力波プロジェクト推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: seiji.kawamura@nao.ac.jp

DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO) は重力波検出のための日本の究極の将来計画であり、1 mHz から 100 Hz の重力波検出を目的とする。DECIGO は 1,000 km 離れた三つのドラッグフリー衛星からなり、それらの相対距離を光共振器型マイケルソン干渉計を使って計測するものである。DECIGO が実現すれば数々の宇宙の謎を重力波を通して解き明かせる可能性があり、重力波天文学に新たな窓を開くことが期待される。DECIGO は要求される技術検証のための二つのパスファインダー・ミッションの後、2021 年頃の打ち上げを予定している。

1. はじめに

2005 年は、特殊相対性理論を含むアインシュタインの三つの大発見の百周年を記念した世界物理年であった。そしていよいよ後 9-10 年経つと、今度は一般相対性理論の百周年となる。一般相対性理論は数々の常識破りの予言をし、それらはことごとく正しいことが確かめられてきたわけであるが、いまだ完全には検証されていないものがある。それが重力波の存在である。重力波の検出の重要性は、それが単に一般相対性理論の検証となるだけにとどまらず、重力波を通して宇宙の謎を解き明かす、いわゆる重力波天文学創成の可能性を秘めている点にある。重力波は確かに検出するのが非常に難しい。それは物質との相互作用が極めて小さいからである。つまり重力波は何でもほとんど素通りしてしまう。しかし、これが逆に天体の観測という点から見ると非常に強力な武器となりうる。例えば、外郭に覆われている天体内部の運動の様子や、宇宙が電磁波に対して晴れ上がる以前の初期宇宙の姿も重力波によって観察できるはずである。また、天候に左右されることなく、天体が地球の裏側にあろうとも問題なく観測を行

える。このように天文学の期待の星である重力波を最大限に検出しようのがスペース重力波アンテナ DECIGO である。

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、スペース重力波アンテナ DECIGO の概念設計や得られるサイエンス、そして現状と今後の予定について詳しく説明する。

2. 重力波

重力波とは重力の波である。電荷が加速度運動をすると電磁波が放射されるように、質量を持った物質が動くとき重力波が生じる。重力波も電磁波と同じように光速で空間を伝播する横波である。ただし、電磁波が電場と磁場が時間変化をしながら伝わっていく波であるのに対して、重力波は「潮汐的な空間のひずみ」が時間変化をしながら空間を伝わっていく波のことである。つまり図 1 に示すように重力波の進行方向に垂直な平面内で空間が、ある方向には伸び、それと直交する方向には縮み、また次の瞬間には、伸び縮みが逆になるというように潮汐的に変化するのである。そして電磁波の類推から容易に想像がつくように、重

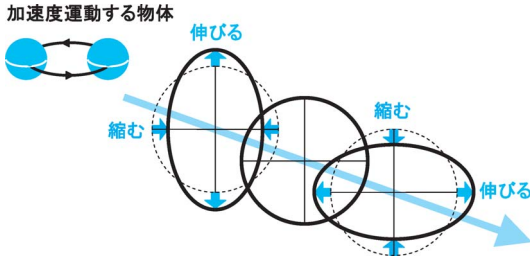


図1 重力波の概念図. 重力波とは、空間の潮汐的なひずみが光速で伝播する横波であり、加速度運動をする物体から放射される。

い物体が速く動くほど大きなエネルギーをもった重力波が放射され、重力波の引き起こす空間のひずみもそれだけ大きくなるのである。

さて宇宙では、巨大な質量をもつ物質が猛烈なスピードで動くような天体現象が頻繁に起こっている。では具体的にどのような天体が強い重力波を放射すると考えられているのであろう？以下に現在考えられている主な重力波源を列挙し簡単に説明する。

(1) 高密度天体の連星

二つの星がお互いの周りを回っている連星系のなかでも、中性子星やブラックホールなどの高密度天体の連星は星自体の半径が小さいため非常に短い公転運動の軌道距離をとることが可能であり、したがってそれだけ速いスピードで動くため強い重力波の放射が期待できる。

(2) 高密度天体の合体

高密度天体の連星は重力波を放出しそれによって系のエネルギーを失う。したがって徐々に公転周期が減少し、軌道半径は縮小していく。この減少率はごくわずかなものであるが、やがて気が遠くなるような長い時間の後、軌道半径は星の大きさと同じくらいまで小さくなり、最終的には星同士の合体に至る。そしてこの前後には凄まじいエネルギーの重力波が放出される。連星中性子星の合体に関しては、現在見つかっている連星中性子星の発見の確率と合体までにかかる時間の類推から、地球から 200 Mpc の範囲で年間数個の合体

が起こっていると予想される。またある種のガンマ線バーストの正体が連星中性子星の合体である可能性もある。また、活動銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールは小規模～中規模質量のブラックホール同士の合体を繰り返すことによって生じたものである可能性がある。

(3) 超新星爆発

超新星爆発においては、太陽質量以上の物体が瞬時にして爆発するので重力波の放出が期待できる。ただし、一般相対性理論によると球対称の運動からは重力波は放出されないので、爆発がどれだけ球対称からずれているかが問題となる。

(4) パルサー

パルサーは高速で回転している中性子星であるので重力波の放出が期待できる。ただし、中性子星が完全に回転軸に対して軸対称であれば重力波は放出されない。もしパルサーが軸対称からずれていると重力波を放出し、それに伴い系のエネルギーが失われ回転周期が増加するはず。したがって、パルス周期の変化の観測から放射可能な重力波の上限が与えられる。

(5) 宇宙初期からの重力波

ビッグバンの 10^{-43} 秒後には重力波は他の物質に邪魔されずに宇宙を自由に飛び回れるようになる。これ以降に発生した重力波が 137 億年のときを経て、宇宙膨張による赤方偏移を受けて、現在のわれわれのもとにやってきているはずである。また、インフレーション宇宙モデルによると、初期宇宙の加速膨張時に、銀河や大規模構造の種となった密度の揺らぎが生み出され、同時に背景重力波も生成されると考えられている。一方、初期宇宙の相転移で形成される可能性のあるコスミック・ストリングなども重力波を放出する可能性がある。これらを検出することにより宇宙論のより詳しいシナリオへの重要な手がかりとなることが期待される。

(6) 未知なる天体

宇宙にはまだわれわれの現在の知識では想像す

らできないような天体現象がたくさんあると思われる、そのなかには、他の観測手段では全く見ることができないが、重力波を通してのみ観測可能なものがあるかもしれない。

さて以上のような天体から発せられた重力波は空間の潮汐的なひずみの波として地球上にもやってくる。ではわれわれはその空間のひずみをどのように知ることができるだろうか？ 答えは簡単、空間のひずみによって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ればよい。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、地球から 200 Mpc 離れたところで連星中性子星の合体が起こったとして、そこからやってくる重力波は地球に到達した頃にはわずか 10^{-22} 程度のひずみをもつにすぎず、1 m 離れた二つの物体の距離を 10^{-22} m 振動させるだけである。原子の大きさが 10^{-10} m なのでそれよりさらに 12 桁も小さい変化である。果たしてこのような超微小な変化量を測定できるのだろうか？

3. レーザー干渉計による重力波検出

重力波の検出方法として現在最も有力だと考えられているのがマイケルソン・レーザー干渉計である。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舞う必要があるため、ワイヤーで吊り下げられている。重力波検出にレーザー干渉計を用いる理由は、アーム長を長くするだけで感度を上げることができるからである。重力波は空間のひずみとして伝わってくるので、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ミラーの変位も大きくなる。一方、ミラーの変位雑音や検出系の雑音などはアーム長に

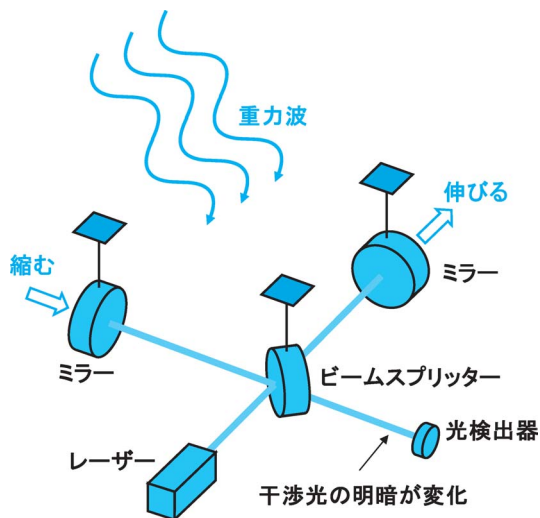


図2 マイケルソン干渉計を用いた重力波検出器の原理。重力波がくるとマイケルソン干渉計の両腕の長さが差動的に変化し、干渉光に明暗の変化をもたらす。それを光検出器で測定する。

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とができるのである。

4. 地上の大型干渉計

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働している。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 台つくられている。LIGO の現在の感度は $100\text{--}400$ 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捕らえることができる。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呼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、干渉計の方式に工夫を加えることにより重

力波の信号を増幅している。TAMA300はアーム長300 mと四つの中では最も短い、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維持した。なお日本の重力波グループは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。

5. 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、アーム長をさらに飛躍的に長くすることが可能である。

ところで、アーム長を伸ばすと重力波信号は大きくなるのだが、アーム長が長すぎると、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、低周波の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。

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。

さらに実際に存在する重力波の大きさは低周波領域ではどうなるであろうか？ 一般に、重い物体ほど動く空間スケールが大きくなり、発生する重力波の周波数が低くなる一方で、重い物体はより大きな重力波を発生させることができる。したがって低周波領域での重力波信号はより大きなものもあると期待できる。

6. LISA

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。LISA計画¹⁾は、互いに500万 km離れた三つの衛星を太陽周回の地球軌道付近に打ち上げ、それらの間隔をレーザーで測定し0.1 mHz-0.3 Hzの重力波を検出しようとするものである。

レーザーはパワー1 W、波長1 μm 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。そこで各衛星にそれぞれレーザーを搭載し、光トランスポンダ型の増幅反射システムを使う。

LISAの目標感度は3 mHz以下ではさまざまな鏡の揺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期待される。

7. 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、LCGTの次のステップと考えられている。DECIGOはDECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatoryの略であり、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の狙う周波数帯は、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。ところで、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。

7.1 DECIGOの概念設計

DECIGOは互いに1,000 km離れた三つの衛星からなる。三つの衛星は、衛星筐体の中に質量が厳密に求められた測距用ミラーをもつ。ミラーの筐体に対する相対位置は筐体に取り付けられたローカルセンサーにより計測される。衛星外部にあるスラスターを用いて筐体の位置をコントロールすることによって、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制御されている。このため衛星自体は太陽光の輻射圧やダストによる外乱を受けるが、内部にあるミラーは重力によってのみ運動が決まり、衛星はミラーの動きに追随する（ドラッグフリー衛星）。

三つの衛星間の距離は光共振器を用いたマイケルソン干渉計で計測される。図3に示すように、レーザー光はビームスプリッターで二つに分けられ、それぞれモードマッチング・テレスコープを通過した後、別の衛星に向かって打ち出され、フ

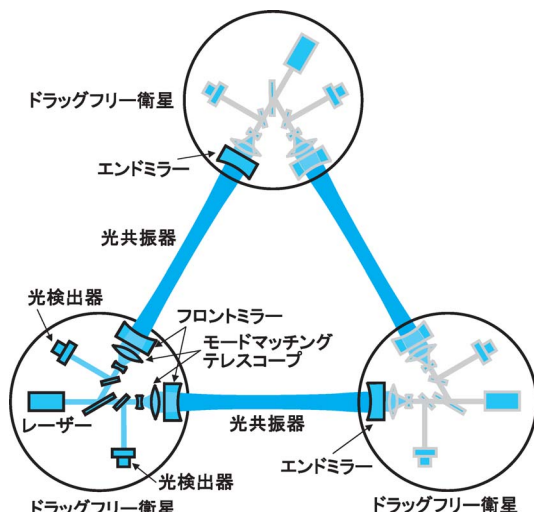


図3 DECIGOの予備概念設計。レーザー光はビームスプリッターで二つに分けられ、それぞれモードマッチング・テレスコープを通過した後、別の衛星に向かって打ち出され、フロントミラーとエンドミラーの間で共振する。

ロントミラーとエンドミラーの間で共振する。この共振によって重力波信号を増幅し感度を上げている。この技術は地上の干渉計で用いられているものであり、LISAの光トランスポンダ方式とは非常に違った検出系を構成することになる。

DECIGOでは光共振器を使うことから、一方の衛星から出射されたレーザービーム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、大部分のパワーをミラーで反射する必要がある。このためアーム長は1,000 kmとLISAの500万 kmと比べて非常に短くなる。また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 μmとし、ミラーの直径は1 mが必要となる。このとき光共振器のフィネスは10が実現できる。

レーザー光のパワーに関しては、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。

なお、干渉計は3台づくり、それぞれの衛星に

マイケルソン干渉計の中心部がくるように配置する(図3参照). こうすることにより重力波の到来方向や偏光に対してもより幅広く感度をもたせることができる. また複数の干渉計の信号を用いることにより感度を上げたり, 相関をとることにより雑音の除去もでき, さらに相関を長期間積分することにより背景重力波に対する感度を上げることもできる.

7.2 DECIGOの感度と要求性能

DECIGOの目標感度をLISAとLCGTの感度とともに図4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, さまざまな実際の雑音をすべて量子雑音以下に抑えなくてはならない. そのなか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 $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ 以下に安定化し, その光をさらにコモンモードのアーム長を基準として 10^5 のゲインで安定化しなくてはならない. 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.

また, 二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

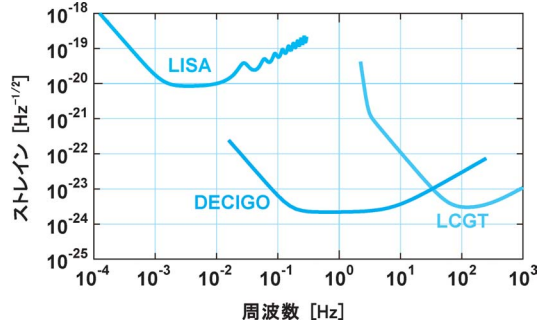


図4 DECIGOの目標感度. LISAと地上干渉計を代表してLCGTの目標感度とともに示す.

うにする. 次にその衛星の姿勢制御を行い, 反射された光が元の衛星に返るようにする. 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. 具体的に言うと, 図5に示すように, 衛星Aのミラーと衛星間の変位信号はローカルセンサーにより計測され, 衛星のスラスターに返されてドラッグフリーの制御がされる. 衛星Bでは同様の制御に加えて, ミラー間の変位信号がミラーのアクチュエーターに返されて干渉計の制御がされる. ちな

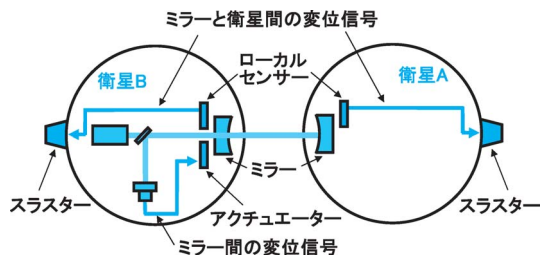


図5 ドラッグフリー衛星と干渉計の制御の関係。衛星Aのミラーと衛星間の変位信号はローカルセンサーにより計測され、衛星のスラスタに返されてドラッグフリーの制御がされる。衛星Bでは同様の制御に加えて、ミラー間の変位信号がミラーのアクチュエーターに返されて干渉計の制御がされる。

みに重力波信号はこのフィードバック信号の中に見れることになる。ここで重要なことは、衛星筐体の揺らぎはあくまでも衛星筐体に返されるため、原理的には重力波信号を汚すことはないことである。

7.3 DECIGOによって得られるサイエンス

もしDECIGOの目標感度が実現すれば非常に実りあるサイエンスの結果が得られる。それらを以下に列挙する(図6参照)。

(1) 連星中性子星から発せられる重力波が高頻度で検出できる。地球から $z=1$ より近い距離にある連星中性子星が合体の5年ほど前から見え始める。シグナル・ノイズ比は平均して26程度であり控えめに見積もっても1年間に7,200個程度発見されるであろう。また全宇宙では1年間に50,000個程度検出されるであろうと期待される。

(2) 太陽質量の1,000倍の質量をもつ中間質量ブラックホール連星が、地球から $z=1$ の距離にあったとするとそこから発せられる重力波をシグナル・ノイズ比6,000の高感度で捕らえることができる。これはこの天体が宇宙のどこにあっててもDECIGOによってそこからやってくる重力波が検出できることを意味する。

(3) DECIGO 2台の出力の相関を3年間取ると、背景重力波に対して $\Omega_{GW}=2 \times 10^{-16}$ の感度を

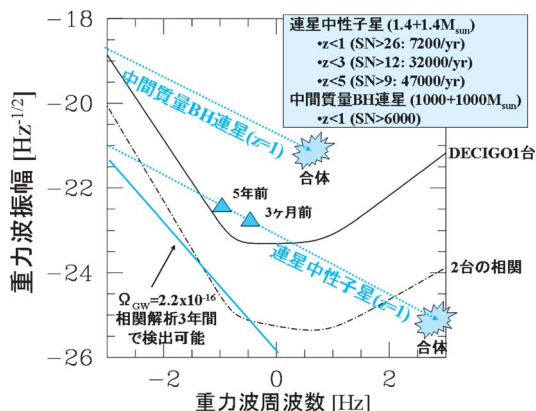


図6 DECIGOによって観測可能な重力波源。連星中性子星からの重力波は $z=5$ までの範囲がシグナル・ノイズ比9で検出可能であり、年間50,000個程度観測される。太陽質量の1,000倍のブラックホールの合体からの重力波は、 $z=1$ までの範囲がシグナル・ノイズ比6,000で検出可能である。また2台の相関を3年間取ることにより、 $\Omega_{GW}=2 \times 10^{-16}$ の背景重力波が観測できる。

もたせることができる。この感度は非常に高く、宇宙初期からの重力波を捕らえる可能性も十分ある。

(4) 近年行われた高赤方偏移の超新星爆発の観測は、われわれの宇宙が加速膨張をしていることを示唆している。これに関して、DECIGOを用いるとその加速膨張を直接計測できる可能性がでてくる。つまり、遠方にある連星中性子星からの重力波は宇宙の膨張により赤方偏移を受けているが、もし膨張が加速していれば重力波の位相にわずかな変化が生じる。したがってこれを測定してやれば加速膨張を直接計測することができる。また、遠方の中性子星連星までの距離を、観測された重力波信号を用いて決定してやれば、赤方偏移を母銀河の測定から決めることにより、超新星爆発の観測よりよい決定精度でダークエネルギーの状態方程式が得られる可能性もある。

7.4 今後の予定

DECIGOは2021年に打ち上げを目標としてい

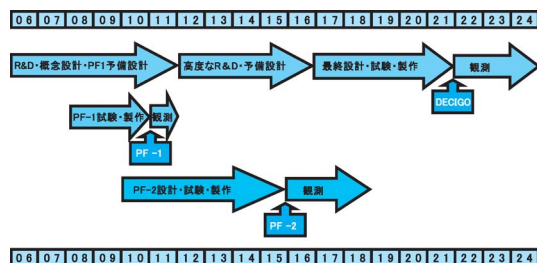


図7 DECIGOのスケジュール. 必要な技術の確認のための、2回のパスファインダー・ミッションのあと、DECIGOの打ち上げは2021年を目標としている。

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(図7参照)。最初のパスファインダーでは一つの衛星の中に二つのミラーを入れ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。第二のパスファインダーの目的はまだ完全には決まっていないが、おそらく離れた二つの衛星の間を光共振器で結ぶ試験が中心となると思われる。

8. おわりに

スペース重力波アンテナDECIGOの実現には乗り越えなくてはいけないさまざまな技術的困難がある。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、ガンマ線バーストの謎、銀河中心の超巨大ブラックホール形成の謎など、さまざまな宇宙の謎を解き明かすであろう。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。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。DECIGOはこのような可能性を秘めた重力

波天文学の時代をわれわれにもたらしてくれるのである。

謝辞

本稿の執筆に際してはDECIGOワーキンググループでの議論を参考にさせていただきました。またUC Irvineの瀬戸直樹氏には原稿をチェックしていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) LISA: System and Technology Study Report, ESA document ESA-SCI (2000)
- 2) Seto N., Kawamura S., Nakamura T., 2001, Phys. Rev. Lett. 87, 221103
- 3) Kawamura S., et al., 2006, Classical and Quantum Gravity 23, S125

Space Gravitational Wave Antenna— DECIGO

Seiji KAWAMURA

National Astronomical Observatory of Japan,
TAMA Project Office, 2-21-1 Osawa, Mitaka,
Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: DECI-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory (DECIGO) is the Japanese future space antenna for gravitational wave detection between 1 mHz and 100 Hz. It consists of three drag-free satellites, 1,000 km apart from each other, whose relative displacements are measured by Fabry-Perot Michelson interferometers. DECIGO will open a new window of observation for gravitational wave astronomy, revealing the various mysteries of the universe. We plan to launch DECIGO around 2021 after establishing required technologies by two pathfinder missions.