

宇宙レーザー干渉計が切り拓く重力波天文学

瀬戸直樹

〈京都大学大学院理学研究科 606-8502 京都市左京区北白川追分町 e-mail: seto@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp〉

八木絢外

〈モンタナ州立大学 Bozeman, MT 59717, USA e-mail: kyagi@physics.montana.edu〉

安東正樹

〈国立天文台重力波プロジェクト推進室 181-8588 三鷹市大沢2-21-1 e-mail: masaki.ando@nao.ac.jp〉

現在建設中のKAGRAをはじめとする地上重力波望遠鏡の目標は、重力波の初の直接検出、そして重力波天文学を創成することにある。一方で、さらに先の重力波天文学・宇宙論の新たな展開を狙って宇宙空間での低周波重力波検出の可能性も検討が進められている。本稿では、低周波重力波天文学の特徴、具体的な計画の概要、および、それらによって切り拓かれるサイエンスの可能性について解説を行う。

1. はじめに

重力波とは空間の潮汐的なゆがみが横波として光速で伝播するものであり、その存在は一般相対性理論で予言されている。天体物理学的には、質量が加速度運動すると重力波が放射される。これは電荷が加速度運動をすると電磁波が放出されることの類推として考えると分かり易いであろう。重力波の振幅は、大雑把には波源の速度の自乗と質量に比例する。このため、重い星が激しく運動すると強い重力波放射が起きる。長期間精密観測された連星パルサーのエネルギー収支を通して、重力波の存在自体は間接的に証明されているものの、その直接検出には未だ成功していない。これは重力波の透過性が非常に高いことによるものだが、長期的にはこの特性を活かして、他の観測手段では検証することが困難な初期宇宙等の極限状態の物理を重力波を使って探ることが期待できる。

現在、重力波の直接検出を目指して世界各地で地上重力波望遠鏡の建設が精力的に推進されている。日本でもKAGRA (LCGT) が文部科学省の「最先端研究基盤事業」に選定され、岐阜県神岡の地下に建設が開始されている。^{1,2)} 地上の重力波干渉計は10-3,000 Hz付近に観測周波数帯を持ち、最も有望なターゲットは連星中性子星が合体付近で放出する重力波である。その重力波振幅とKAGRAの設計感度を比較すると、7億光年内の連星中性子星合体イベントが検出できる見積りになる。これまでに発見されている連星中性子星の個数に基づいて推定すると、不定性は大きいながらも年間10回程度の合体イベントの検出が期待できる。³⁾ 連星中性子星の合体時にはガンマ線バーストが付随する可能性があり、地上干渉計の観測対象にはこの他にも、超新星爆発といった、高エネルギーの現象を伴ったものが多い。重力波をとらえることでこれらの高エネルギー現象の解明や高密度天体の状態方程式を探る可能性がある。そのため、重力波と電磁波観測のマルチメッセンジャー天文学の研究も盛んになってきている。

一方、大質量ブラックホールに関連する現象などの観測

では、本稿で紹介するeLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna)^{*,4)} や DECIGO (DECihertz Interferometer Gravitational wave Observatory)⁵⁾ など宇宙重力波望遠鏡が威力を発揮する。例えば、eLISAは宇宙論的な距離にある大質量ブラックホール同士の合体を高い信号雑音比で観測することが可能であり、構造形成論をはじめとする天体物理学の進展に大きく寄与することが期待されている。これに加えて、宇宙干渉計を地上干渉計と比較した場合、相対論、宇宙論に関してはさらに面白いサイエンスが期待できる。例えば、観測的宇宙論の野心的な検出目標の一つが初期宇宙起源の背景重力波である。なかでも近年特に関心が持たれているのはインフレーション時に生成された背景重力波である。単純なインフレーションモデルの予言では、背景重力波のエネルギー密度 ($\Omega_{\text{GW}} \propto h^2 f^2$) が周波数によらずほぼ一定になるので、低周波ほどより大きなゆがみ h の重力波信号となる。このため、宇宙重力波干渉計においては、天体が放出する重力波だけでなく、初期宇宙起源の背景重力波の検出も視野に入れて仕様の検討が進められている。

本稿ではeLISAやDECIGO等、宇宙重力波望遠鏡計画の概要を述べ、特にDECIGOで期待される宇宙論、相対論関連のサイエンスについて詳しく説明していく。

2. 宇宙レーザー干渉計

2.1 低周波重力波の観測

レーザー干渉計型重力波望遠鏡は、空間中に浮かべられた2つの自由質点(テストマス)間の距離変動をレーザー干渉計によって精密に測定することを原理としている。テストマス間の距離変動は、それらの間を往復するレーザー光の位相変化として現れる。その位相変化をレーザー光の干渉を用いて観測するわけである。重力波の効果は空間の歪みとして現れ、振幅 h の重力波がやってきたとき、距離 L だけ離れた2つのテストマス間距離が、 $\delta L = hL/2$ だけ変動する。従って、距離変動 δL に対する外乱を抑えて精密に計測するとともに、長い基線長 L を確保することが重要となる。地上重力波望遠鏡では、テストマスとなる鏡を振り子によって懸架することで、振り子の共振周波数以上の周波数帯で自由質点として振る舞うように設計されている。単純な振り子では、その共振周波数は重力加速度と振り子長だけで決まり、おおよそ1 Hz程度になる。従って、地上での重力波望遠鏡では1 Hz以下に対して原理的な感度

* 従来のLISAに対して、最近行われた目標感度の再設定を反映した名称。

を持たせることは困難である。それに対して宇宙重力波望遠鏡では、テストマスは無重力下にある理想的な自由質点として実現され、低周波数に対しても感度を持たせることが可能になるのである。

上記の原理的な側面に加えて、宇宙重力波望遠鏡には、大きく分けて2つの利点がある。1つ目は、基線長を長くとることができる点である。現在建設中の地上重力波望遠鏡は、3-4 kmの基線長を持っている。これは、静寂な観測サイトの確保や真空槽などを含めたコストの制約から決められている。宇宙重力波望遠鏡では、1,000 km以上の基線長を確保することが可能である。これにより、テストマスに対する外乱変動の影響を相対的に抑えることができる。2つ目の利点は地面振動や重力勾配雑音の影響を避けられる点である。地面は地震などがなくても絶えず変動している。地上望遠鏡では、高性能の防振装置を組み込むことによって、この影響を大幅に抑えている。しかし、数Hz以下の低周波数帯では防振が容易ではなくなるとともに、地面などの変動起因の重力場変動によってテストマスが直接揺らされる重力勾配雑音の影響を避けることが困難であり、これらが望遠鏡感度を制限することになる。宇宙重力波望遠鏡では、この重力勾配雑音の影響は小さく、低周波数帯まで感度を持たせることが可能になるのである。

現在建設中の地上望遠鏡によって重力波信号が検出され、重力波天文学が切り拓かれた後に、他では得ることができない天体物理学や宇宙論的観測のために、宇宙重力波望遠鏡の実現を目指すことは必然と言えるだろう。

2.2 宇宙重力波望遠鏡計画

現在、宇宙重力波望遠鏡として、欧州のeLISA計画、日本のDECIGO計画の検討が進められている。干渉計の方式などで相違点もあるが、3機の宇宙機の編隊飛行によって3つの長基線長のレーザー干渉計を構成する点では共通している。基線を3つ持つことは、レーザー光源等に起因する同相雑音の除去や冗長性の確保といった技術的な利点があるだけでなく、波源の位置・偏波の特定といった天文情

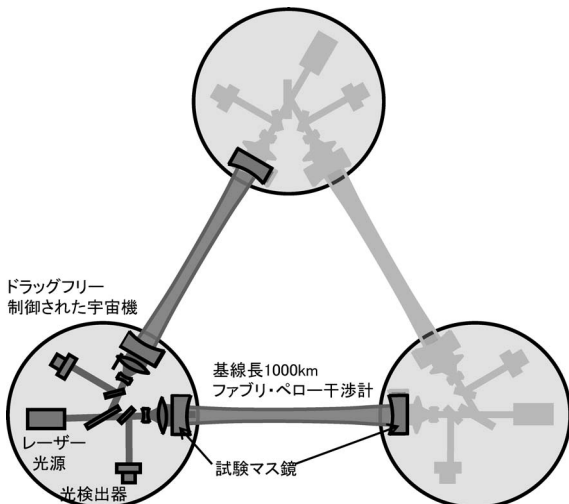


図1 DECIGOの構成：3機の宇宙機は1,000 km 離れて編隊飛行を行う。

報をより多く得ることに役に立つためである。図1にDECIGOの構成を示す。DECIGOでは、3機の宇宙機は1,000 km 離れて編隊飛行を行う構成になっている。各宇宙機の内部にはテストマスとなる鏡が非接触で保持されている。これらの鏡でファブリ・ペロー共振器を構成し、基線長変動をレーザー干渉計を用いて精密に計測することで、重力波信号をとらえる、というのが原理である。光源としては出力10 W、波長532 nmの倍波YAGレーザーを想定している。テストマスとなる鏡の質量は100 kg、直径は1 mである。ここで、宇宙機は太陽輻射圧変動などの外乱の影響を抑えるためにドラッグフリー制御される。つまり、宇宙機とその内部のテストマスの相対変動を測定し、その信号を宇宙機に取り付けられたスラスタにフィードバックすることで、宇宙機の位置と姿勢を保つのである。

図2にDECIGOおよび他の重力波望遠鏡の感度曲線を示す。基線長3-4 kmの地上望遠鏡は100 Hz付近に良い感度を持ち、連星中性子星合体や超新星爆発などのコンパクトで激しい天体現象を観測対象にしている。DECIGO (基線長1,000 km) は0.1 Hz付近で良い感度を持ち、中間質量ブラックホールや宇宙論的重力波を観測対象にしている。欧州のeLISAは、100万 kmの基線長を持ち、1 mHz付近で良い感度が期待できる。この周波数帯では、巨大質量ブラックホールに関連する現象などが対象となる。これらの感度曲線は、中心周波数および高周波数帯では光の散乱雑音によって、低周波数帯ではテストマスに働く外力雑音などによって、それぞれ制限されている。

2.3 低周波重力波のデータ解析

天体起源の重力波を低周波領域で観測する際の大きな特徴として、高周波領域と比べて、波源の個数密度(周波数あたり)が多く、それらの構成する前景重力波放射の分解可能性を考慮する必要がある点が挙げられる。ここでは、重力波周波数と系の進化のタイムスケールの関係も重要である。例えば、先に紹介した連星中性子星については、周波数あたりの連星中性子星の個数が $dN/df \propto f^{-11/3}$ であり、低周波領域で急増する。低周波領域での前景重力波放射に関して現在の標準的な理解を以下にまとめておく。

まず0.1-10 mHzのeLISAバンドについて述べる。この

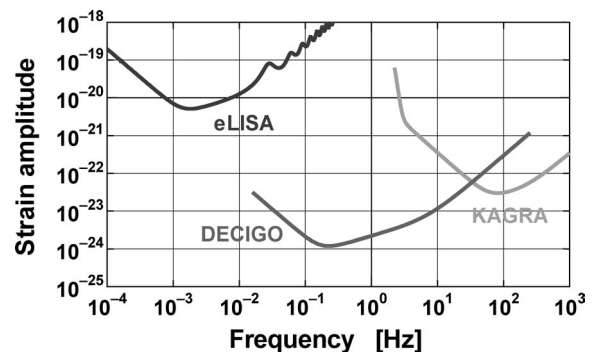


図2 eLISA, DECIGO, KAGRAの感度曲線。縦軸は無次元の歪み感度であり、重力波振幅 h に対応する。

領域で最も数の多い重力波源は連星の白色矮星であると考えられる。白色矮星とは核燃焼を終えた後、電子の縮退圧で 10^4 km 程度の半径を支えている星である。比較的近傍にある連星白色矮星が放出する振幅の大きな重力波に対しては、個々に検出してその重力波の寄与をデータから取り除くことが可能である。しかし、銀河系外の膨大な連星白色矮星を個々に検出することは絶望的で、それらは全体として前景放射を作ってしまう。決定すべきソースのパラメータ数よりも、検出器の情報量が少なく分離できなくなってしまうのである。

白色矮星の平均密度は高々 10^7 g/cm³ 程度であるために、重力と遠心力を比較することで、連星白色矮星が放出できる重力波の最大周波数は 0.2 Hz 程度と見積もられる。このため、連星白色矮星はこれより上の周波数帯では存在せず、連星中性子星がこの周波数帯での主要な前景重力波源となる。連星中性子星は重力波を放射しながら徐々に公転周期を短くしていき、最後には合体する。宇宙全体では年間 10^5 回の合体現象が起きていると見積もられ、0.2 Hz 付近では、合体約 1 年前の多数の連星からの信号によって前景重力波が作られる。この前景重力波のエネルギー密度は DECIGO の検出限界感度より 4 桁ほど強い。従って、限界感度の背景重力波をとらえるためには DECIGO バンドを通過するほぼすべての連星中性子星を検出し、その重力波信号の寄与をデータから取り除くことが不可欠である。これに対して、(1) 観測帯域が 1 Hz 近傍であり十分な情報量を確保できること、(2) このバンドで連星中性子星の運動が相対論的効果を摂動的に取り扱うポストニュートン法によって高精度で予測できること、(3) 個々の連星を検出するのに要するパラメータ数が 10 個であることを考慮すると、この前景除去作業に原理的な問題は存在しないと考えられる。⁶⁾ 実際には膨大なデータを効率よく解析することが必要になるが、地上干渉計のデータ解析と共通する側面も多く含まれている。

初期宇宙起源の背景重力波を DECIGO を使って狙う立場で考えると、重力波の初検出を狙う KAGRA における状況と大いに異なって、連星中性子星は厄介者であるかのように思われるかもしれない。しかし、以下に紹介するようにこれらの膨大な連星は宇宙論の新たな道具として活用できる可能性がある。

3. 宇宙干渉計のサイエンス

3.1 相対論 (I): 重力理論の検証

一般相対性理論は、現在最も良い精度で検証されている重力理論である。例えば、土星探査衛星 Cassini を用いた実験では、一般相対論からのずれは 10^{-5} 以下であるという制限がつけられている。⁷⁾ しかし、宇宙の加速膨張の原因である未知の物質ダーク・エネルギー、宇宙に満ち溢れている未知の重力源ダーク・マター、宇宙初期の急激な加速膨張期インフレーションといった、現在の物理学では説

明しきれていない問題も存在し、重力理論を一般相対論から修正することで、これらの未解決問題を自然に解決できる可能性がある。また、古典的重力理論が超弦理論等のより根源的な理論の古典極限として実現される場合、この理論は必ずしも一般相対論には帰着しない。上述した一般相対論に対する現在の制限は弱重力場での検証に過ぎず、強重力場での重力理論の検証こそが現在重要な課題となっている。重力波は重力の情報を直接反映するだけでなく、強重力場ほどより大きな振幅の重力波が放出されるため、強重力場における重力理論の検証にはまさにうってつけの観測手段といえる。

重力理論が一般相対論からずれている場合、連星の軌道進化や重力波の伝播の仕方が異なるため、観測される重力波形(特に位相)が一般相対論で予言されるものからずれる。地上の重力波検出器では、連星合体直前の約 10 分間しか観測できないが、宇宙重力波干渉計では、合体の数年前から合体直前までを観測することができる。例えば、0.1 Hz の重力波を 3 年間観測した場合、重力波のサイクル数(観測される位相の数)は実に 10^7 にものぼる。これは、一周期での位相のずれが 10^{-7} 以上であれば DECIGO で観測可能であることを意味する。また、前述した通り、DECIGO では年間約 10^5 個の合体イベントを高い信号雑音比で観測することができ、この高感度と統計的優位性を用いることで、現在得られている制限と比べて、文字通り桁違いに高精度の検証が可能となる。例えば、一般相対論と比べて新たにスカラーの重力自由度が加わったスカラー・テンソル理論の代表格であるブランズ・ディッケ理論に対しては、太陽系実験と比べて 4 桁も高精度の検証が可能となり、⁸⁾ 超弦理論から動機づけされる高次曲率補正理論(scalar-Gauss-Bonnet 理論)に対しては、低質量 X 線連星よりも 3 桁も良い精度の検証が行える可能性がある。一方、eLISA は例えば重力子の質量の検証に有用であり、現在の太陽系実験よりも 4 桁程度強い制限が与えられそうだと期待される。⁹⁾

3.2 相対論 (II): ブラックホール時空構造の解明

一般相対論の重要な予言の一つに、ブラックホールの存在がある。一般相対論では、ブラックホールの唯一性定理が証明されており、現実に存在するブラックホールは質量と自転のみで特徴づけられる Kerr ブラックホールであると考えられている。現在、太陽質量よりも 3 倍以上の質量を持つコンパクトな天体はブラックホールであろうと考えられているが、事象の地平面(この面よりも内側からは光ですら外側へ脱出できない、ブラックホールの「表面」のようなもの)の存在は証明されておらず、ブラックホール周りの時空構造が調べられた例もほとんどない。これらのブラックホール候補天体は、よりエキゾチックな天体である可能性もあり、また、ブラックホールであっても、重力理論が一般相対論からずれていれば、Kerr ブラックホールとは異なっている可能性もある。そのため、ブラックホー

ル周りの時空構造を直接検証することが重要となる。

eLISA が観測対象としている重力波源の一つに、超巨大質量ブラックホールと恒星質量ブラックホールや中性子星から成る、質量比の大きな連星 (EMRI) がある。EMRI からの重力波は、等質量の超巨大質量ブラックホール連星からのそれよりも振幅が小さいため、EMRI は合体直前であっても、小さい方のコンパクト天体が超巨大質量ブラックホールの周りを何周も公転する。この時の運動はブラックホールの時空構造に支配されているため、重力波形にも時空構造の情報が含まれているのである。Kerr ブラックホール時空では、多重極モーメントは全て質量と自転のみで表されるため、例えば EMRI からの重力波を用いてブラックホールの質量、自転、四重極モーメントが決定できた場合、これらの関係性を調べることで、中心にある超巨大質量ブラックホールが Kerr ブラックホールであるかどうかを検証することができる。具体的には、eLISA を用いると、四重極モーメントは 0.01-1% の精度で決定できると期待される。¹⁰⁾ もし Kerr ブラックホールからのずれが観測されれば、そのインパクトは計り知れないものとなるであろう。

3.3 宇宙論 (I) : 宇宙加速膨張の直接測定とダーク・エネルギー

Type Ia と呼ばれる種族の超新星爆発では、天体の光度距離を (経験的に) 知ることができ、スペクトルから赤方偏移を決定することができる。これら 2 つの量の間の関係は、ダーク・エネルギーやダーク・マターのエネルギー密度といった宇宙論パラメータで支配されているため、これら 2 つの量を独立に測定することで、宇宙論の検証を行うことができる。一様・等方宇宙を仮定すると、観測結果から、現在の宇宙は加速膨張していることが示唆されている。DECIGO を用いたサイエンスの中で最もインパクトのあるものの一つに、この宇宙加速膨張の直接測定がある。超新星爆発等の宇宙論観測は、加速膨張を間接的に検証したに過ぎず、加速膨張を直接測定した例はまだない。宇宙が加速膨張している場合、加速膨張していない場合と比べて、観測される重力波信号の位相にずれが生じる。このずれの大きさは、例えば一年観測で 10^{-10} と非常に小さいが、観測時間を稼ぐこと、およびイベント数の多さを利用することで、DECIGO では宇宙の加速膨張が直接測定できると期待されている。実は、現在までの観測結果は、ダーク・エネルギーを導入せずとも、宇宙の非一様性から説明することもできる。この場合、宇宙の加速膨張は単なる見かけ上のものに過ぎず、実際は多くの場合減速膨張していることになる。そこで、もし DECIGO で正の加速膨張が検出されれば、LTB モデルと呼ばれる最も典型的な非一様宇宙モデル (圧力ゼロの物質 (ダスト) で構成された、球対称な非一様宇宙モデル) は完全に棄却することができる。¹¹⁾ 重力理論の検証では、修正重力理論は多くの場合ある極限で一般相対論を含むため、完全に棄却することは難しいが、LTB 宇宙はある極限でダーク・エネルギーを含んだ一様・

等方宇宙に一致することは無いので、正の加速膨張が検出されれば、完全に棄却できてしまうのである。電磁波を利用した宇宙加速膨張の直接検出としては、遠方の非常に明るい天体であるクエーサーからのスペクトルに現れるライマン α 吸収線の変化を利用しようという試みがある。しかし、この観測手法は、赤方偏移が $z > 2$ の遠方 (減速膨張期) の宇宙にしか感度を持たないため、「加速」膨張を直接検出することは難しい。ゆえに、加速膨張の直接測定は DECIGO のユニークかつ重要なサイエンスの一つと言える。

また、宇宙重力波干渉計を用いて、超新星爆発の観測と同様の宇宙論を行うことができる。つまり、天体までの光度距離と赤方偏移が独立に測定できれば、その間の関係から宇宙論パラメータを決定することができる。¹²⁾ 超新星爆発が標準光源と呼ばれるのに対して、重力波源は標準音源と呼ばれる。DECIGO の場合、標準音源として最適な波源は、中性子星連星である。重力波の振幅は光度距離の逆数に比例するため、振幅から光度距離が高精度 (例えば、 $z=1$ の中性子星連星に対しては 1% の精度) で決定できる。残念ながら、赤方偏移は質量と縮退してしまうため、重力波観測のみから決定することは難しい。しかし、重力波観測から、中性子星連星が属する銀河を同定できる可能性が高く、すると、電磁波観測であらかじめ分かっているその銀河の赤方偏移を用いることができる。超新星爆発の場合と比較すると、重力波観測の方は光度距離が非常に高精度で決定できるため、より精度の高い宇宙論解析が行えると期待される。ダーク・エネルギーの状態方程式は数% の精度で決定でき、宇宙論パラメータに関しては、将来の電磁波観測よりも 1 桁程度高い精度で決定できると期待される。¹³⁾

3.4 宇宙論 (II) : 初期宇宙

DECIGO の究極のターゲットは、初期宇宙起源の背景重力波である。前述したように、もしこのような重力波がとらえられれば、インフレーションの情報を引き出すことが可能となる。一方、背景重力波のスペクトルから、インフレーションと放射優勢期を橋渡しする再加熱時期の情報を得られる可能性もある。例えば、再加熱温度が $T=10^{6-9}$ GeV であった場合、重力波スペクトルに現れる特徴的な折れ曲がりを DECIGO で観測できる可能性がある。¹⁴⁾ また、初期宇宙のスカラー場の揺らぎから、原始ブラックホールが形成され、これがダーク・マターとなる可能性があるが、このようなスカラー揺らぎの 2 次的効果からも背景重力波が生成される。近年、この重力波がちょうど DECIGO 帯に現れることが示され、ダーク・マターの支配的な成分がこの原始ブラックホールであった場合、背景重力波のエネルギー密度は DECIGO の感度よりも 7 桁程度大きなものになることがわかった。¹⁵⁾ このように、DECIGO を用いてダーク・マターの正体に迫ることもできる。

以上のように、宇宙重力波干渉計を用いると非常にインパクトのある様々なサイエンスが可能であり、上述したも

のは部分的な紹介に過ぎない。重力波観測でしか得られないような重要かつインパクトのあるサイエンスや、電磁波観測と比べて格段に精度の良い検証が行えるものが数多く存在することをここに強調しておく。

4. むすび

宇宙干渉計で低周波重力波の窓を新たに切り開くことにより、天体物理学、宇宙論から基礎物理に至るまで数多くの成果が得られるであろう。一方、地上実験と異なり、宇宙空間での実験は装置の監視、調整等に関して格段に厳しい制約のもとで遂行しなければならない。また、打ち上げ時の振動、大気圏外の過酷な放射線環境等も精密測定装置に対して大きな負荷となりうる。このため、比較的規模の小さな前哨衛星等を打ち上げることによって段階的に技術成熟度を高め、重力波観測感度に影響を与えうる様々な潜在的要素を慎重に評価し、確実に目標感度を達成することが求められる。

このような長期的な視点に立ち、日本においては、過去7年間にわたってDECIGOの前哨衛星であるDECIGO Pathfinder (DPF)の開発が精力的に進められている。DPFは、DECIGOのために必要な技術のうち、1機の衛星で達

成可能な多くの宇宙技術実証を行うことに加えて、0.1 Hz近傍での重力波観測および地球重力場観測の世界最高感度を実現することを目的としている。2009年には超小型試験装置SWIMの宇宙実証が実現され宇宙重力波望遠鏡実現の第一歩が標されている。¹⁶⁾ 今後の動向が注目される。

参考文献

- 1) 黒田和明, 河邊径太: 日本物理学会誌 **62** (2007) 659.
- 2) 川村静児: 日本物理学会誌 **66** (2011) 841.
- 3) E. S. Phinney: *Astrophys. J.* **380** (1991) L17.
- 4) P. Amaro-Seoane, *et al.*: arXiv: 1201.3621.
- 5) S. Kawamura, M. Ando and N. Seto, *et al.*: *Class. Quantum Grav.* **28** (2011) 094011.
- 6) C. Cutler and J. Harms: *Phys. Rev. D* **73** (2006) 042001.
- 7) B. Bertotti, L. Iess and P. Tortora: *Nature* **425** (2003) 374.
- 8) K. Yagi and T. Tanaka: *Prog. Theor. Phys.* **123** (2010) 1069.
- 9) E. Berti, J. Gair and A. Sesana: *Phys. Rev. D* **84** (2011) 101501.
- 10) L. Barack and C. Cutler: *Phys. Rev. D* **75** (2007) 042003.
- 11) K. Yagi, A. Nishizawa and C.-M. Yoo: *JCAP* **1204** (2012) 031.
- 12) B. F. Schutz: *Nature* **323** (1986) 310.
- 13) C. Cutler and D. Holz: *Phys. Rev. D* **80** (2009) 104009.
- 14) K. Nakayama, S. Saito, Y. Suwa and J.i. Yokoyama: *JCAP* **0806** (2008) 020.
- 15) R. Saito and J.i. Yokoyama: *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 161101.
- 16) 安東正樹, 穀山 渉, 坪野公夫: 日本物理学会誌 **65** (2010) 987.

(2012年7月17日原稿受付)

The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO

Seiji Kawamura^{1,2}, Masaki Ando³, Naoki Seto³, Shuichi Sato⁴, Takashi Nakamura³, Kimio Tsubono⁵, Nobuyuki Kanda⁶, Takahiro Tanaka⁷, Jun'ichi Yokoyama⁸, Ikkoh Funaki⁹, Kenji Numata¹⁰, Kunihito Ioka¹¹, Takeshi Takashima⁹, Kazuhiro Agatsuma², Tomotada Akutsu², Koh-suke Aoyanagi¹², Koji Arai¹³, Akito Araya¹⁴, Hideki Asada¹⁵, Yoichi Aso⁵, Dan Chen¹⁶, Takeshi Chiba¹⁷, Toshikazu Ebisuzaki¹⁸, Yumiko Ejiri¹⁹, Motohiro Enoki²⁰, Yoshiharu Eriguchi²¹, Masa-Katsu Fujimoto², Ryuichi Fujita²², Mitsuhiro Fukushima², Toshifumi Futamase²³, Tomohiro Harada²⁴, Tatsuaki Hashimoto⁹, Kazuhiro Hayama², Wataru Hikida²⁵, Yoshiaki Himemoto²⁶, Hisashi Hirabayashi²⁷, Takashi Hiramatsu⁷, Feng-Lei Hong²⁸, Hideyuki Horisawa²⁹, Mizuhiko Hosokawa³⁰, Kiyotomo Ichiki³¹, Takeshi Ikegami²⁸, Kaiki T Inoue³², Koji Ishidoshiro⁵, Hideki Ishihara⁶, Takehiko Ishikawa⁹, Hideharu Ishizaki², Hiroyuki Ito³⁰, Yousuke Itoh³³, Kiwamu Izumi¹⁶, Isao Kawano³⁴, Nobuki Kawashima³⁵, Fumiko Kawazoe³⁶, Naoko Kishimoto³⁷, Kenta Kiuchi⁷, Shiho Kobayashi³⁸, Kazunori Kohri³⁹, Hiroyuki Koizumi⁹, Yasufumi Kojima⁴⁰, Keiko Kokeyama⁴¹, Wataru Kokuyama⁵, Kei Kotake², Yoshihide Kozai⁴², Hiroo Kunimori³⁰, Hitoshi Kuninaka⁹, Kazuaki Kuroda¹, Sachiko Kuroyanagi¹, Kei-ichi Maeda¹², Hideo Matsuhara⁹, Nobuyuki Matsumoto⁵, Yuta Michimura⁵, Osamu Miyakawa¹, Umpei Miyamoto²⁴, Shinji Miyoki¹, Mutsuko Y Morimoto⁴³, Toshiyuki Morisawa³, Shigenori Moriwaki⁴⁴, Shinji Mukohyama⁴⁵, Mitsuru Musha⁴⁶, Shigeo Nagano³⁰, Isao Naito²⁷, Kouji Nakamura², Hiroyuki Nakano⁴⁷, Kenichi Nakao⁶, Shinichi Nakasuka⁴⁸, Yoshinori Nakayama⁴⁹, Kazuhiro Nakazawa⁵, Erina Nishida¹⁹, Kazutaka Nishiyama⁹, Atsushi Nishizawa⁷, Yoshito Niwa⁴⁸, Taiga Noumi⁴⁸, Yoshiyuki Obuchi², Masatake Ohashi¹, Naoko Ohishi^{1,2}, Masashi Ohkawa⁵⁰, Kenshi Okada⁵, Norio Okada², Kenichi Oohara⁵¹, Norichika Sago⁷, Motoyuki Saijo²⁴, Ryo Saito⁵, Masaaki Sakagami⁵², Shin-ichiro Sakai⁹, Shihori Sakata⁵³, Misao Sasaki⁷, Takashi Sato⁵⁴, Masaru Shibata⁷, Hisaaki Shinkai⁵⁵, Ayaka Shoda⁵, Kentaro Somiya⁵⁶, Hajime Sotani⁵⁷, Naoshi Sugiyama³¹, Yudai Suwa⁷, Rieko Suzuki¹⁹, Hideyuki Tagoshi²⁵, Fuminobu Takahashi⁴⁵, Kakeru Takahashi⁵, Keitaro Takahashi³¹, Ryutaro Takahashi^{1,2}, Ryuichi Takahashi¹⁵, Tadayuki Takahashi⁹, Hirotaka Takahashi⁵⁸, Takamori Akiteru¹⁴, Tadashi Takano⁵⁹, Nobuyuki Tanaka², Keisuke Taniguchi²¹, Atsushi Taruya⁸,

**Hiroyuki Tashiro³, Yasuo Torii², Morio Toyoshima³⁰,
 Shinji Tsujikawa⁶⁰, Yoshiki Tsunesada⁶¹, Akitoshi Ueda²,
 Ken-ichi Ueda⁴⁶, Masayoshi Utashima³⁴, Yaka Wakabayashi²⁷,
 Kent Yagi³, Hiroshi Yamakawa⁶², Kazuhiro Yamamoto⁶³,
 Toshitaka Yamazaki², Chul-Moon Yoo⁷, Shijun Yoshida²³,
 Taizoh Yoshino²⁷ and Ke-Xun Sun⁶⁴**

¹ Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

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

³ Department of Physics, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

⁴ Faculty of Engineering, Hosei University, Kajinocho, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan

⁵ Department of Physics, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

⁶ Department of Physics, Osaka City University, Osaka, Osaka 558-8585, Japan

⁷ Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

⁸ Research Center for the Early Universe, School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, 113-0033, Japan

⁹ Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami, Kanagawa 252-5210, Japan

¹⁰ NASA Goddard Space Flight Center, Code 663, 8800 Greenbelt Rd., Greenbelt, MD20771, USA

¹¹ KEK Theory Center, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

¹² Department of Physics, Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku, Tokyo, 169-8555, Japan

¹³ LIGO Project, California Institute of Technology, MS 18-34, 1200 E. California Blvd., Pasadena, CA 91125, USA

¹⁴ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0032, Japan

¹⁵ Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science and Technology, Hirosaki University, Hirosaki, Aomori 036-8560, Japan

¹⁶ Department of Astronomy, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

¹⁷ Department of Physics, College of Humanities and Sciences, Nihon University Setagaya, Tokyo 156-8550, Japan

¹⁸ RIKEN, 2-1 Hirosawa Wako 351-0198, Japan

¹⁹ Ochanomizu University, 2-1-1, Otuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-0012, Japan

²⁰ Faculty of Business Administration, Tokyo Keizai University, Kokubunji, Tokyo 185-8502, Japan

²¹ Graduate School of Arts and Science, The University of Tokyo, Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan

²² Theoretical Physics, Raman Research Institute, Sir C V Raman Avenue, Sadashivanagar PO, Bangalore 560 080, India

²³ Astronomical Institute, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

²⁴ Department of Physics, Rikkyo University, Toshima, Tokyo 171-8501, Japan

²⁵ Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

²⁶ College of Industrial Technology, Nihon University, 2-11-1 Shin-ei, Narashino, Chiba 275-8576, Japan

²⁷ Wakabadai, Shiroyamacho, Sagami, Kanagawa 220-0112, Japan

²⁸ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba Central 3, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8563, Japan

²⁹ Department of Aeronautics and Astronautics, School of Engineering, Tokai University, Japan

³⁰ National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

³¹ Department of Physics and Astrophysics, Nagoya University, Nagoya 464-8602, Japan

³² Kinki University School of Science and Engineering, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan

³³ Physics Department, University of Wisconsin—Milwaukee, PO Box 413, 2200 E. Kenwood Blvd., Milwaukee, WI 53201-0413, USA

- ³⁴ Japan Aerospace Exploration Agency, Tsukuba Space Center, Sengen 2-1-1, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505, Japan
- ³⁵ Kinki University Liaison Center, 3-4-1 Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan
- ³⁶ Institut für Gravitationsphysik, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 38, 30167 Hannover, Germany
- ³⁷ JST Presto, Aerospace Dynamics Laboratory Graduate School of Engineering, Kyoto University, Uji-shi, Kyoto 611-0011, Japan
- ³⁸ Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, Twelve Quays House, Egerton Wharf, Birkenhead L41 1LD, UK
- ³⁹ Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan
- ⁴⁰ Graduate School of Science, Hiroshima University, Higashi-hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan
- ⁴¹ Department of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgebaston, Birmingham, B15 2TT, UK
- ⁴² Gunma Astronomical Observatory, Agatsuma-gun, Gunma 377-0702, Japan
- ⁴³ JAXA Space Exploration Center, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan
- ⁴⁴ Department of Advanced Materials Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8561, Japan
- ⁴⁵ Institute for Physics and Mathematics of the Universe (IPMU), University of Tokyo 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa City, Chiba 277-8568, Japan
- ⁴⁶ Institute for Laser Science, The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan
- ⁴⁷ Center for Computational Relativity and Gravitation, and School of Mathematical Sciences, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY 14623, USA
- ⁴⁸ Department of Aeronautics and Astronautics, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
- ⁴⁹ Department of Aerospace Engineering, National Defense Academy, 1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka 239-8686, Japan
- ⁵⁰ Department of Biocybernetics, Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata, Niigata 950-2181, Japan
- ⁵¹ Department of Physics, Niigata University Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-2181, Japan
- ⁵² Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan
- ⁵³ Observatoire de la Côte d'Azur, ARTEMIS-OCA BP 4229, Bd de l'Observatoire, 06304 Nice Cedex 4, France
- ⁵⁴ Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata, Niigata 950-2181, Japan
- ⁵⁵ Department of Information Systems, Osaka Institute of Technology, Kitayama, Hirakata 573-0196, Japan
- ⁵⁶ Waseda Institute for Advanced Study, 1-6-1 Nishi Waseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8050, Japan
- ⁵⁷ Theoretical Astrophysics, Institute for Astronomy and Astrophysics, Eberhard Karls University of Tuebingen, Auf der Morgenstelle 10, 72076 Tuebingen, Germany
- ⁵⁸ Department of Humanities, Yamanashi Eiwa College, 888 Yokone-machi, Kofu, Yamanashi 400-8555, Japan
- ⁵⁹ Department of Electronics and Computer Science, College of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 274-8501, Japan
- ⁶⁰ Department of Physics, Faculty of Science, Tokyo University of Science, 1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan
- ⁶¹ Graduate School of Science and Engineering/Physics, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan
- ⁶² Kyoto University, Research Institute for Sustainable Humanosphere, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan
- ⁶³ INFN, sezione di Padova, via Marzolo 8, 35131 Padova, Italy
- ⁶⁴ Stanford University, Stanford, CA 94305-4088, USA

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

Received 2 November 2010, in final form 22 December 2010

Published 18 April 2011

Online at stacks.iop.org/CQG/28/094011

Abstract

The objectives of the DECI-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory (DECIGO) are to open a new window of observation for gravitational wave astronomy and to obtain insight into significant areas of science, such as verifying and characterizing inflation, determining the thermal history of the universe, characterizing dark energy, describing the formation mechanism of supermassive black holes in the center of galaxies, testing alternative theories of gravity, seeking black hole dark matter, understanding the physics of neutron stars and searching for planets around double neutron stars. DECIGO consists of four clusters of spacecraft in heliocentric orbits; each cluster employs three drag-free spacecraft, 1000 km apart from each other, whose relative displacements are measured by three pairs of differential Fabry–Perot Michelson interferometers. Two milestone missions, DECIGO pathfinder and Pre-DECIGO, will be launched to demonstrate required technologies and possibly to detect gravitational waves.

PACS numbers: 04.80.Nn, 95.55.Ym, 95.85.Sz, 07.60.Ly

(Some figures in this article are in colour only in the electronic version)

1. Introduction

Gravitational waves are considered one of the most powerful future means of revealing various aspects of the universe which have not yet been observed by conventional methods. Although gravitational waves have not yet been directly detected, we should have a clear roadmap plan to lead us to a completely new astronomy, gravitational wave astronomy. The world's gravitational wave community is currently working on ground-based detectors [1] such as LIGO [2, 3], Virgo [4, 5], GEO [6, 7], LCGT [8, 9] and AIGO [10, 11] for the first detection of gravitational waves to establish gravitational wave astronomy. A space gravitational wave antenna, LISA [12–14], has also been pursued to expand the window for gravitational wave astronomy. Proposed here is another space antenna, DECI-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory (DECIGO), to further expand the window for gravitational wave astronomy and open fruitful avenues for science.

2. Objectives and scope

DECIGO [15–19] is the future Japanese space gravitational wave antenna. DECIGO is aimed at detecting gravitational waves mainly between 0.1 and 10 Hz, somewhat similar to BBO [20] and ALIA [21].

The objectives of DECIGO are to open a new window of observation for gravitational wave astronomy and thus to reveal a variety of secrets of the universe ranging from astrophysics to cosmology. Scientific insights obtained by DECIGO will include (1) verifying and characterizing inflation, (2) determining the thermal history of the universe, (3) characterizing

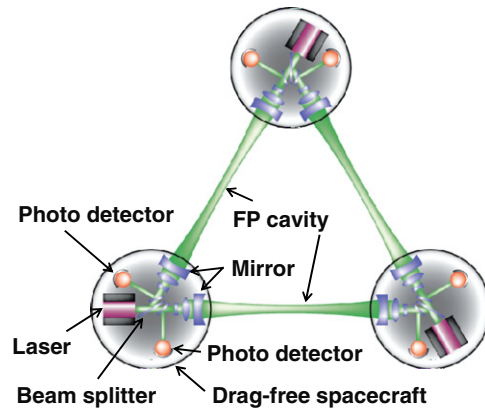


Figure 1. Pre-conceptual design of DECIGO.

dark energy, (4) describing the formation mechanism of supermassive black holes in the center of galaxies, (5) testing alternative theories of gravity, (6) seeking black hole dark matter, (7) understanding the physics of neutron stars and (8) searching for planets around double neutron stars.

It should be emphasized that the frequency band of DECIGO, 0.1–10 Hz, is appropriate to reach a very high sensitivity, since the confusion limiting noise caused by irresolvable gravitational wave signals from many compact binaries in our galaxy is expected to be very low above 0.1 Hz [22]. Note also that this frequency band is between that of LISA and ground-based detectors. Thus DECIGO will be able to play a follow-up role for LISA by observing inspiral sources that have moved above the LISA band, as well as a predictor for ground-based detectors by observing inspiral sources that have not yet moved into the ground-based detector band.

3. Pre-conceptual design

The pre-conceptual design of DECIGO is the following. DECIGO consists of four clusters of spacecraft; each cluster employs three drag-free spacecraft containing freely-falling mirrors as shown in figure 1. A change in the distance between the mirrors caused by gravitational waves is measured by three pairs of differential Fabry–Perot (FP) Michelson interferometers. The distance between the spacecraft is 1000 km, the diameter of each mirror is 1 m and the wavelength of the laser is $0.5 \mu\text{m}$. This ensures a finesse of 10 in the FP cavities, which is determined by the diffraction loss of the laser power in the cavity. The mass of each mirror is 100 kg and the laser power is 10 W. DECIGO will be delivered into heliocentric orbits with two clusters nearly at the same position and the other two at separate positions.

We chose the FP configuration rather than the light transponder configuration because the FP configuration could provide a better shot-noise-limited sensitivity than the transponder configuration, since gravitational wave signals can be enhanced by the FP cavity. Note that the FP configuration requires a relatively short arm length to avoid the optical loss of the diverging laser light; this makes the requirement of the acceleration noise considerably stringent.

The implementation of the FP cavity using the drag-free spacecraft is feasible. Each spacecraft follows the motion of the mirror inside each spacecraft as a result of the function of the drag-free system. Each mirror is, on the other hand, controlled in position in such a way

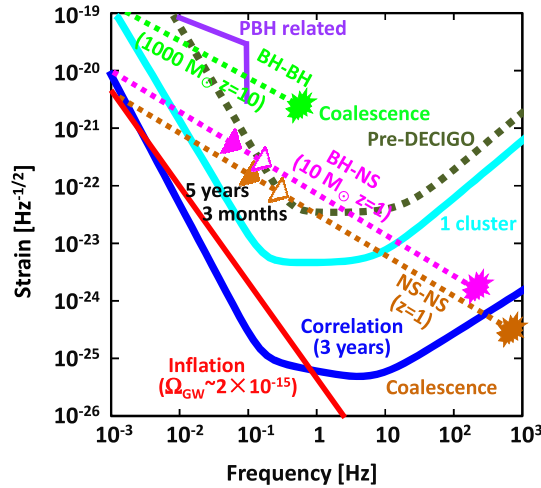


Figure 2. Sensitivity goal of DECIGO and Pre-DECIGO together with expected gravitational wave signals.

that the distance between the mirrors is maintained as a result of the function of the FP cavity. Therefore, the distance between the spacecraft is also maintained.

Since the mirrors are shared by two interferometers to form a FP cavity, the optical field from one interferometer in the cavity will leak out the end mirror, which is an input mirror for the second interferometer, and will reach the photo detector of the second interferometer. One method to avoid this undesirable interference is to keep the lasers at well-separated frequencies. Another method is to control the lasers at exactly the same frequency. We are currently optimizing the optical method for the best sensitivity of the detector.

4. Sensitivity goal

As shown in figure 2, the sensitivity goal of DECIGO is better than 10^{-23} in terms of strain between 0.1 and 10 Hz. The sensitivity is limited by the radiation pressure noise below 0.15 Hz, and by the shot noise above 0.15 Hz. The sensitivity obtained by taking the correlation between the two clusters of DECIGO nearly at the same position is also shown in figure 2. To achieve these sensitivities, we should suppress all the practical noise below the stringent requirement, especially on the acceleration noise of the mirror and frequency noise of the light.

The acceleration noise includes the noise caused by the actuator for the control of the resonance condition, thermal noise due to gas damping, especially with a small gap between the mirror and the mirror housing [23], and other practical noises. Achieving this extremely low acceleration noise in the presence of large actuating force to maintain the resonance condition requires very challenging dynamic range performance of the actuator. Fortunately, however, this stringent requirement can be significantly relieved by implementing a large loop gain of the control system at the observation band. Suppressing the thermal noise due to gas damping with a small gap also requires an extremely high vacuum level in the vicinity of the mirror and a sophisticated structure of the housing system to make the gap wider.

Frequency noise couples with a residual imbalance between the two arms to produce noise in the interferometer output. To suppress the effect of frequency noise below the aimed sensitivity, we should impose stringent requirements on the three quantities: frequency stability of the laser with the first-stage frequency stabilization, frequency stabilization gain by the common-mode arm length and common-mode rejection ratio.

5. Expected science

Once we attain the goal sensitivity of DECIGO, we can obtain a variety of fruitful science mentioned below. Here, we need to simultaneously perform these scientific studies using the same data streams of detectors. Therefore, it is critical to develop efficient data analysis methods for DECIGO, as in the case of LISA. For example, in order to detect a weak inflation background, astrophysical foregrounds should be removed down to an appropriate level. Among others, the foreground by cosmological neutron star binaries is relatively well estimated and its amplitude is expected to be at least approximately five orders of magnitude higher than that of an inflation background in terms of Ω_{GW} [24].

5.1. Verification and characterization of inflation

DECIGO can detect stochastic background around 0.1–1 Hz corresponding to $\Omega_{\text{GW}} = 2 \times 10^{-15}$ by correlating the data from the two clusters of DECIGO, which are placed nearly at the same position, for 3 years (see figure 2). According to the standard inflation models, we might detect gravitational waves produced at the inflation period of the universe with DECIGO. This is extremely significant because gravitational waves are the only means which make it possible to directly observe the inflation of the universe, and determine the energy scale of the inflation E_{inf} with a relation (see e.g. [25])

$$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-15} (E_{\text{inf}}/2 \times 10^{16} \text{ GeV})^4.$$

5.2. Determination of the thermal history of the universe

DECIGO can not only observe the primordial gravitational waves generated during inflation [26] directly, but also potentially determine the thermal history of the early universe between the end of inflation and the Big-Bang nucleosynthesis [27]. The gravitational waves generated during inflation re-enter the Hubble radius with the same amplitude. Then, they start to oscillate to decrease the amplitude in proportion to $a(t)^{-1}$, where $a(t)$ is the cosmic scale factor. This simple evolution law of gravitational waves makes it possible to probe the equation of state (EOS) of the bulk energy density [27–32] and the effective number of relativistic degrees of freedom [33] by measuring the amplitude of gravitational waves at each frequency. Nakayama *et al* [28, 29] argued that DECIGO can thereby determine the reheating temperature of the inflation if it lies in the range 10^5 – 10^9 GeV, which is in accordance with the constraints imposed by the gravitino problem [30].

5.3. Characterization of dark energy

As shown in figure 2, DECIGO can observe gravitational waves coming from a large number of neutron star binaries for several years prior to coalescences. Their estimated merger rate at $z < 1$ is $\sim 50\,000 \text{ yr}^{-1}$ [34]. From the gravitational waveforms of individual binaries, it is possible to determine their luminosity distances in a very clean manner. By identifying their host galaxies within the expected error boxes (typically less than 10 arcsec^2) and additionally

measuring their redshifts, we can observationally study dark energy only using the first principles of physics [35].

5.4. Formation mechanism of supermassive black holes in the center of galaxies

DECIGO can detect gravitational waves coming from coalescences of intermediate-mass black hole binaries with an extremely high fidelity. For example the coalescences of black hole binaries of $1000 M_{\odot}$ at $z = 10$ give a signal to noise ratio on the order of 1000 (see figure 2). This will make it possible to collect numerous data about the relationship between the masses of the black holes and the frequency of the coalescences, which will reveal the formation mechanism of supermassive black holes ubiquitously observed in the center of galaxies.

5.5. Test of the alternative theories of gravity

DECIGO is very powerful in probing gravitational theories, especially Brans–Dicke theory [36]. It is the simplest type of scalar–tensor theory and the current strongest bound is obtained from the Saturn probe Cassini using Shapiro time delay [37]. This theory can be tested from gravitational wave observations of NS/BH binaries (see figure 2 for the GW spectrum of a $(1.4 + 10) M_{\odot}$ NS/BH binary at $z = 1$) because the binary evolution differs from that of general relativity (GR) due to the additional scalar dipole radiation [38–40]. Since a NS/BH binary signal with DECIGO has a large number of gravitational wave cycles and a wide effective frequency range for a given observation period, it has advantages for probing Brans–Dicke theory over other interferometers such as Advanced LIGO and LISA. For precessing NS/BH binaries with the predicted event rate of 10^4 per year, DECIGO can put four orders of magnitude stronger constraint than the solar system experiment [41].

While the inflation background is the primary target for the correlation analysis with the two clusters, it would be important to carefully design the system so that we can disclose various aspects of stochastic gravitational wave backgrounds. One of the interesting quantities from fundamental physics is the Stokes V parameter [42]. This parameter characterizes the asymmetry of the amplitudes of the right- and left-handed waves, and it is a powerful measure to probe violation of parity symmetry that interchanges the two circular-polarization modes. Other potential targets are the additional polarization modes (e.g. scalar gravitational waves) that are predicted by modified gravitational theory beyond Einstein’s theory. If GR does not strictly hold in the high-energy regime of the universe, extra-polarization modes of gravitational waves would be produced during inflation era, together with ordinary polarizations in GR. In addition, the energy density of non-Einstein gravitational waves might exceed that of the tensor modes, depending on the coupling parameters in a specific theoretical model. Thus a search for extra-polarization modes is indispensable as a cosmological test of GR. For separate detection of each polarization mode, a detector geometrical configuration should satisfy the condition that the detectors are located away from each other at least by more than one wavelength of a gravitational wave to break the mode degeneracy. As for DECIGO, this condition can be satisfied by slightly adjusting the relative configuration of the clusters. Hence, we can decompose non-Einstein polarization modes with modest sensitivity [43].

5.6. Search for black hole dark matter

DECIGO can be a powerful probe for the abundance of primordial black holes (PBHs) [44], which are a viable candidate of the dark matter in the form of black holes. For PBH

formation, large amplitude density fluctuations are required in the early universe. The required fluctuations are so large that gravitational waves are generated from them with amplitudes large enough to be detected by DECIGO as depicted in figure 2 [45, 46]. The typical frequency of the induced gravitational waves is uniquely determined by the mass of PBHs. The DECIGO band corresponds to the mass range 10^{-13} – $10^{-7} M_{\odot}$, which is, as yet, unconstrained by the gravitational lensing experiments [47]. Therefore, DECIGO has an ability to determine whether the PBHs are the dark matter or not.

5.7. Physics of neutron stars

The EOS of neutron stars is not yet well known. In principle, QCD Monte Carlo calculations will give us the final answer in the future but there exist difficulties with this kind of calculation. DECIGO can determine the mass of 100 000 neutron star binaries per year so that the mass spectrum of neutron stars will be measured. Especially, the maximum mass of the spectrum can constrain the EOS while the spectrum can give important information on the formation processes of neutron stars.

5.8. Planet Search with DECIGO

With DECIGO we can search circumbinary planets around double neutron stars even at cosmological distances $z \sim 1$. The underlying approach is similar to the method used for detecting planets around a radio pulsar [48] and to observe gravitational wave modulations imprinted by wobble motions of the binaries [49]. To clearly discriminate the periodic signature of a circumbinary planet, it should orbit around the binary at least three times during the passage of the DECIGO band, corresponding to the orbital period less than 20 days for $z \sim 1$. In this case, the combination $M_p \sin(i)$ (M_p : mass of the planet, i : its inclination angle) at $z \sim 1$ can be estimated with better than 10% accuracy even for the mass $M_p \sin(i)$ as small as the Jupiter mass 2×10^{30} g. Once a planet is detected with DECIGO, it would provide us with interesting information about formation and evolution of planets under extreme environments.

6. DECIGO pathfinder and pre-DECIGO

DECIGO is an extremely challenging mission. The technologies required to realize DECIGO should be obtained and demonstrated step by step. Therefore, we plan to launch two milestone missions before DECIGO: DECIGO pathfinder (DPF) [19] and pre-DECIGO.

6.1. DECIGO pathfinder

DPF will demonstrate the key technologies for DECIGO using a single spacecraft just as LISA pathfinder [50] does for LISA. The technologies to be demonstrated include the drag-free system, the FP cavity measurement system in space, frequency-stabilized laser in space and the clamp release system. DPF also has its own scientific objectives both in gravitational wave observation and measurement of the earth's gravity.

DPF is a small drag-free spacecraft that contains two freely-falling masses, whose relative displacement is measured with a FP interferometer with a frequency-stabilized laser. The masses are clamped tightly for the launch and released gently in space. The optical and mechanical parameters of DPF are 30 cm for the cavity length, $1 \mu\text{m}$ and 25 mW for the laser wavelength and power, respectively, 100 for the finesse of the FP cavity and 1 kg for the mirror mass. The strain sensitivity of DPF will be about 10^{-15} between 1 and 10 Hz, as

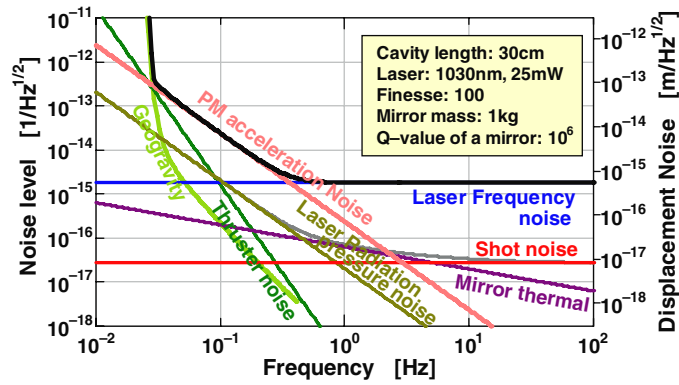


Figure 3. Goal sensitivity of DECIGO pathfinder together with the estimated noise.

shown in figure 3. This sensitivity is limited by the frequency noise of the laser, because there is only one arm cavity in DPF. All the other noise sources such as the acceleration noise and thermal noise should be suppressed with an appropriate design. DPF will be delivered into a geocentric sun-synchronous orbit with an altitude of 500 km.

The primary scientific objective of DPF is to perform an observation run for gravitational waves down to 0.1 Hz with a possibility of detection of gravitational waves coming from rather unlikely events of intermediate-mass black hole inspirals in our galaxy. Although the probability of having such events is considered to be rather rare, data obtained by DPF observations will be quite important since this observation band is difficult to access by ground-based gravitational-wave detectors.

The secondary scientific objective of DPF is to measure the earth's gravity. Since the proof masses of DPF orbit around the earth almost freely, gravity distributions of the earth can be measured from the trajectories of the proof masses. DPF is expected to provide data whose sensitivity is comparable with that provided by other earth gravity measurement missions, such as GRACE [51], Champ [52], and GOCE [53].

We have been developing the required technologies of DPF intensely. We have already made significant progress in the breadboard model of most of the subsystems, such as the interferometer system, test mass module, and laser and frequency stabilization system. We plan to launch DPF with the small-spacecraft science mission run by the Japanese space agency, JAXA/ISAS. DPF was one of the two final candidate missions for the second mission, but unfortunately it was not selected. We will submit a proposal for the third mission in 2011, expecting that it will be launched in 2015.

6.2. Pre-DECIGO

The objectives of Pre-DECIGO are scientifically to detect gravitational waves with modest optical parameters, and technologically to demonstrate the technologies of formation flight using three spacecraft. Pre-DECIGO is designed to have a sensitivity that is conservative compared with DECIGO by a factor of 10–100. Accordingly, the optical parameters and the noise requirements of Pre-DECIGO are less stringent than DECIGO. Pre-DECIGO consists of three drag-free spacecraft containing freely-falling mirrors, whose relative displacement is measured by a differential FP Michelson interferometer. The distance between the spacecraft is 100 km, the diameter of the mirror is 0.3 m and the wavelength of the laser is 0.5 μm . This

corresponds to a finesse of 100 in the FP cavities. The mass of the mirror is 30 kg and the laser power is 1 W. The goal sensitivity as shown in figure 2 will ensure detection of gravitational waves coming from neutron star binaries as far as 300 Mpc. We hope to launch Pre-DECIGO in 2021.

7. Conclusions

The future Japanese space gravitational wave antenna, DECIGO, is expected to detect gravitational waves from various sources and provide a variety of fruitful science, and thus to open a new window of observation for gravitational wave astronomy. We plan to launch two milestone missions before DECIGO to demonstrate required technologies and possibly to detect gravitational waves: DPF and Pre-DECIGO.

Acknowledgments

This research was supported by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), grant-in-aid for scientific research, the Global COE Program of the graduate school of science in Kyoto University and the Research Center for the Early Universe (RESCEU) at the University of Tokyo.

References

- [1] Kawamura S 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084001
- [2] <http://www.ligo.caltech.edu>
- [3] Abbott B P *et al* 2009 *Rep. Prog. Phys.* **72** 076901
- [4] <http://www.virgo.infn.it>
- [5] Accadia T 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084002
- [6] <http://www.geo600.org>
- [7] Grote H 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084003
- [8] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/lcgt/lcgt2010e.html>
- [9] Kuroda K 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084004
- [10] <http://www.anu.edu.au/Physics/ACIGA>
- [11] Barriga P 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084005
- [12] http://www.esa.int/esaSC/120376_index_0_m.html
- [13] <http://lisa.jpl.nasa.gov/>
- [14] LISA System and Technology Study Report ESA document ESA-SCI 2000
- [15] http://tamago.mtk.nao.ac.jp/decigo/index_E.html
- [16] Seto N, Kawamura S and Nakamura T 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 221103
- [17] Kawamura S *et al* 2008 *J. Phys.: Conf. Ser.* **122** 012006
- [18] Sato S *et al* 2009 *J. Phys.: Conf. Ser.* **154** 012040
- [19] Ando M *et al* 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084010
- [20] Phinney E S *et al* 2003 The Big Bang Observer: NASA Mission Concept Study
- [21] Bender P L *et al* 2005 Massive Black Hole Formation and Growth, White Paper (The NASA SEU Roadmap Committee)
- [22] Farmer A J and Phinney E S 2003 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **346** 1197
- [23] Cavalleri A *et al* 2010 *Phys. Lett. A* **374** 3365–9
- [24] Cutler C and Harms J 2006 *Phys. Rev. D* **73** 042001
- [25] Smith T L, Kamionkowski M and Cooray A 2006 *Phys. Rev. D* **73** 023504
- [26] Starobinsky A 1979 *JETP Lett.* **30** 682
Starobinsky A 1979 *Pis. Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **30** 719
- [27] Seto N and Yokoyama J 2003 *J. Phys. Soc. Japan* **72** 3082–6
- [28] Nakayama K, Saito S, Suwa Y and Yokoyama J 2008 *Phys. Rev. D* **77** 124001
- [29] Nakayama K, Saito S, Suwa Y and Yokoyama J 2008 *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **JCAP06(2008)020**
- [30] Kawasaki M, Kohri K and Moroi M 2005 *Phys. Lett. B* **625** 7–12

- [31] Boyle L A and Steinhardt P J 2008 *Phys. Rev. D* **77** 063504
- [32] Nakayama K and Yokoyama J 2010 *J. Cosmol. Astropart. Phys.* JCAP01(2010)010
- [33] Watanabe Y and Komatsu E 2006 *Phys. Rev. D* **73** 123515
- [34] Cutler C and Holz D E 2009 *Phys. Rev. D* **80** 104009
- [35] Schutz B F 1986 *Nature* **323** 310
- [36] Brans C and Dicke R H 1961 *Phys. Rev.* **124** 925
- [37] Bertotti B, Iess L and Tortora P 2003 *Nature* **425** 374
- [38] Eardley D M 1975 *Astrophys. J.* **196** L59
- [39] Berti E, Buonanno A and Will C M 2005 *Phys. Rev. D* **71** 084025
- [40] Yagi K and Tanaka T 2009 *Phys. Rev. D* **81** 064008
- [41] Yagi K and Tanaka T 2010 *Prog. Theor. Phys.* **123** 1069
- [42] Seto N 2007 *Phys. Rev. D* **75** 061302
- [43] Nishizawa A, Taruya A and Kawamura S 2010 *Phys. Rev. D* **81** 104043
- [44] Hawking S 1971 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **152** 75
- [45] Saito R and Yokoyama J 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 161101
- [46] Saito R and Yokoyama J 2010 *Prog. Theor. Phys.* **123** 867
- [47] Carr B J, Kohri K, Sendouda Y and Yokoyama J 2010 *Phys. Rev. D* **81** 104019
- [48] Wolszczan A and Frail D A 1992 *Nature* **355** 145
- [49] Seto N 2008 *Astrophys. J.* **677** L55
- [50] Antonucci F *et al* 2011 *Class. Quantum Grav.* **28** 094001
- [51] <http://www.csr.utexas.edu/grace>
- [52] http://op.gfz-potsdam.de/champ/index_CHAMP.html
- [53] <http://www.esa.int/esaLP/LPgoce.html>