

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO

安東 正樹*, 川村 静児**, DECIGO ワーキンググループ

Space Gravitational-Wave Telescope DECIGO

By

Masaki Ando*, Seiji Kawamura** and DECIGO working group

Abstract : 重力波観測による新たな天文学の開拓を目指して、現在、世界各国で重力波望遠鏡の開発や観測運転が進められている。その中で、日本の重力波グループでは、宇宙空間重力波望遠鏡 DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory) を打ち上げることを目指している。これは、互いに1000km 離れた3台のスペースクラフト (S/C) 間の距離を精密に測定することで重力波を観測する装置である。DECIGO は、0.1-1Hz の周波数帯に感度を持ち、地上の検出器や ESA/NASA の共同プロジェクトである LISA (Laser Interferometer Space Antenna) では捉えることが困難な初期宇宙起源の重力波を観測することが期待できる。

Key words : DECIGO, 重力波, 宇宙望遠鏡, レーザー干渉計

1. はじめに

質量を持った物体が加速度運動する際、その周囲の時空の歪みが空間を伝播していく。この波が重力波と呼ばれ、その存在は、一般相対性理論の一つの帰結として理論的に予言されている。重力波は、物体との相互作用が非常に小さく、強い透過力を持つため、中性子星やブラックホールなどの高密度天体の激しい天文現象の内部を直接観測する新しい手段となり得る。また、重力波は、電磁波では観測する事の出来ない、ビッグバンから38万年以内の初期宇宙を直接観測する唯一の手段としても期待がもたれている。重力波によって得られる知見（宇宙の起源や構成に対する知見、ブラックホールや中性子星の合体やガンマ線バーストなどの激しい天体現象に対する知見）は、これまで主に行われてきた電磁波による天文学とは相補的な情報になるはずである（図1）。重力波の直接観測は、一般相対性理論に残された大きな検証課題の一つであると共に、電磁波によるものとは質の異なった新たな天文学を拓く可能性を持っている。

重力波の検出と、それによる天文学の創成を目指した研究は1960年代から行われている。その成果として、現在までに、欧米や日本などでは既に大型重力波検出器が建設され、本格的な観測が始められている。これらの検出器では、連星中性子星の合体や超新星爆発で発生する100Hz-1 kHz の重力波をターゲットとしており、我々の銀河系やその近傍で重力波イベントがあれば検出できるだけの感度が実現されている。ただ、そのようなイベントは極めて稀と考えられており（連星中性子星の合体率は、1つの銀河で 10^{-5} /year 程度、超新星爆発は、 3×10^{-2} /

* 東京大学理学系研究科

** 国立天文台重力波プロジェクト推進室

year 程度), 本格的な天文学を行うには, 十分な観測体制にはなっていない. 本格的な天文学として成立させるためには, 検出器の感度をより向上して観測できる重力波源までの距離を広げる, もしくは, 検出器で観測可能な周波数帯を広げるなど, ターゲットとなる現象を増やすための改良が必要となる.

そこで, アメリカ合衆国 (Advanced LIGO) や日本 (LIGO [4]) では, 2014年頃の観測開始の次期計画として, より高感度の検出器を建設する計画を進めている. 重力波の振幅は波源までの距離に反比例するため, 感度が1桁上がれば, 1桁遠くの重力波源まで観測することができ, 観測できるイベント数を1000倍にすることができるのである. これらの検出器の感度が実現されれば, 年間10回程度の重力波イベントが期待できることになる.

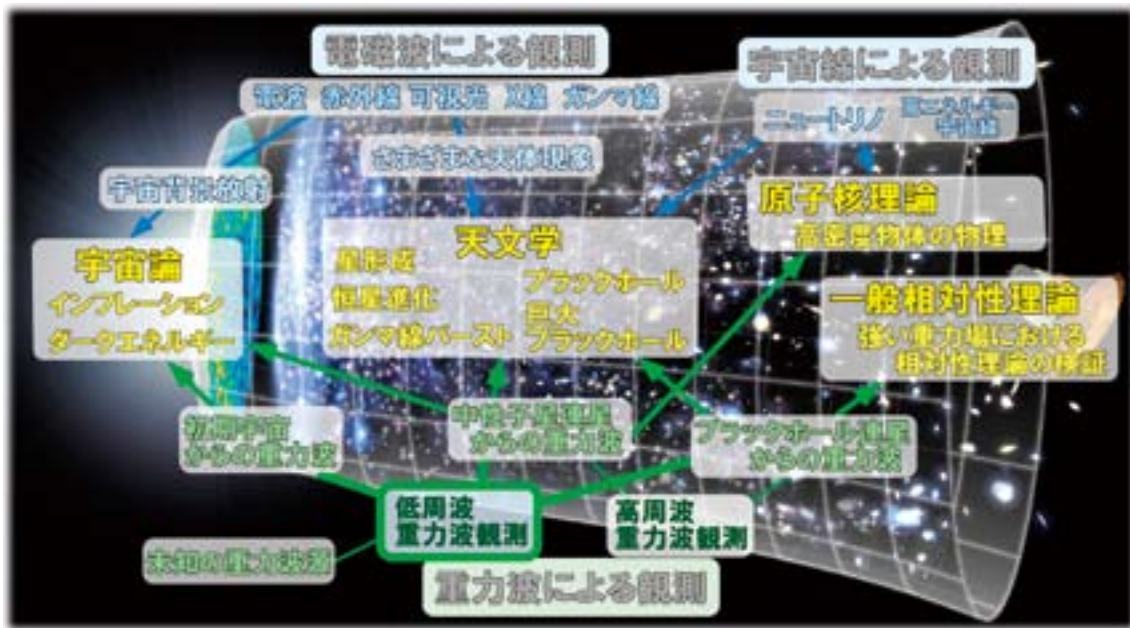


図1 重力波による天文学の期待

これらの地上検出器が十分な感度を持つのは, 地面振動の影響を避けることができる10Hz 以上の周波数帯域であり, 連星中性子星の合体や超新星爆発などのコンパクトで激しい天体現象が主な観測対象とされている.

一方, より低周波数帯の重力波を観測し, 重力波によって多様な天文現象を観測するために, 宇宙空間に重力波望遠鏡を打ち上げる計画が, 2020年前後を目安に進められている. 宇宙空間では, 地上では低周波数で問題となる地面振動の影響が無い. また, レーザー干渉計の基線長を長くすることで, 低周波数の重力波の効果を積分することができる. それによって, 宇宙レーザー干渉計では, 低周波数の重力波に対する感度を高めることができる. 欧米が協力して進めている LISA (Laser Interferometer Space Antenna) プロジェクトは, 地球と同様な太陽周回軌道に500万 km 離して配置した3台の人工飛翔体 (スペースクラフト, S/C) によって長基線長の干渉計を構成する計画である [3]. LISA は, 1 mHz 付近に感度を持ち, 大質量ブラックホールに関係した現象や, 銀河系内連星からの重力波を観測することが期待されている. 日本でも, 宇宙空間重力波望遠鏡 (DECIGO) を打ち上げることを目指している [1, 2]. DECIGO は, 0.1-1 Hz の周波数帯に感度を持ち, 地上の検出器や LISA では捉えることが困難な, 宇宙論的な距離にある波源からの重力波や, 初期宇宙起源の重力波を観測することが期待できる.

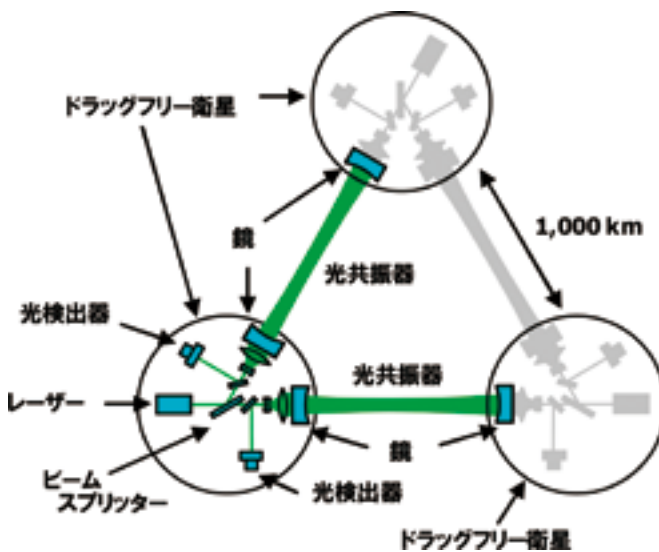


図2 DECIGO の概念図

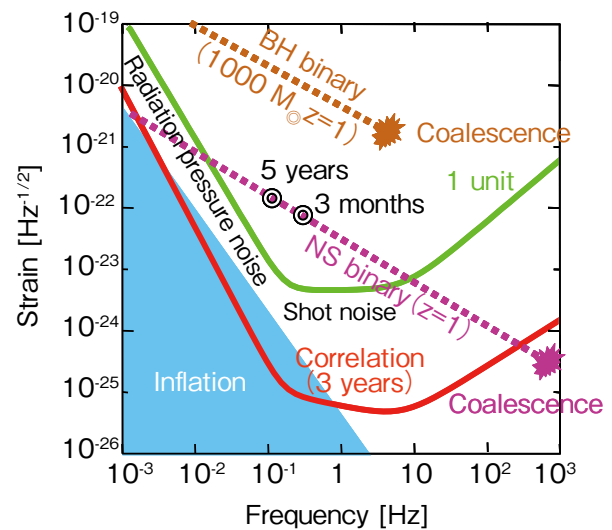


図3 DECIGO で実現できる感度と観測対象

2. DECIGO

2.1. DECIGO の概要

宇宙空間重力波望遠鏡（DECIGO）は、3 台の S/C を打ち上げ、その間の距離を精密に測定することで、主に 0.1-1 Hz の周波数帯の重力波を観測する装置である（図2）。正三角形に 1000km 離れた 3 台の S/C 内には鏡（試験質量、テストマス）が収められ、これらによって、3 対のファブリ・ペロー（Fabry-Perot, FP）干渉計が構成されている。この干渉計の基線長変動を、レーザー光によって精密に観測することで、重力波を観測することができる。（基線長は、レーザー光の回折による拡がり、鏡の直径で決められている。重力波による空間の歪み変動を検出するためには、基線長は長いほど高感度化が可能である。その一方で、基線長を長くすると、レーザー光の回折損失の影響で、FP 干渉計を構成することができなくなる。1000km という基線長は、直径 1 m の鏡で FP 干渉計を実現できる上限値に近い長さになる。）それぞれの鏡は、S/C 内に非接触保持され、S/C が受ける太陽輻射圧などの外乱が、光路長変動測定に対する雑音として直接現れることを防ぐように設計されている。その際、試験質量を S/C に安定に保持するために、試験質量の位置を基準にし、それを取り囲む S/C 位置を制御するドラッグフリー制御が施される。また、これらの S/C は、地球重力場変動の影響を避けるために、地球から十分離れた太陽周回軌道に配置される。鏡の直径は 1 m、質量は 100kg であり、それらの間の距離を測定するためのレーザー光源としては、出力 10W の倍波 Nd : YAG レーザー（波長 532nm）を用いる。冗長性を考慮して、レーザー光源は各 S/C に搭載されており、各 S/C 内の鏡間の距離を、2 つの方向から独立に計測するように、設計されている。

上記の構成によって、実現される感度限界は、図3のようになる。最も良い感度は、 $3 \times 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$ であり、0.1-1 Hz の周波数帯で実現されている。この感度は、低周波数帯では、鏡に働く外力の影響と、レーザー光の輻射圧による雑音で制限されている。一方、高い周波数帯では、レーザー光の散射雑音で感度が制限されている（輻射圧雑音と散射雑音は、光が光子の集まりであることに起因する、干渉計にとって原理的な雑音である。これらは不確定性関係で結ばれており、一方を改善すれば他方が悪化する、というトレードオフの関係にある。）。

2.2. DECIGO で期待できる科学的成果

DECIGO で期待できる科学的成果としては、(1)宇宙の起源や構成に対する知見 [5]、(2)ブラックホールや中性子星の合体、ガンマ線バーストといった激しい天体現象に対する知見、の 2 つに大別することができる。

DECIGO が観測を行う周波数帯では、銀河系内連星によるバックグラウンド的な重力波が無い場合、宇宙論的な距離にある天体からの重力波や、初期宇宙起源の重力波を観測することができる。これらを観測することによって、宇宙の起源や構成に対する知見を得ることが期待できる。特に、重力波の透過性はとて高いために、他の手段では観測することが困難な極限状態の初期宇宙を調べることが可能となる。近年測定された宇宙マイクロ背景放射の非等方性をはじめとする様々な観測事実は、宇宙初期にインフレーションと呼ばれる急速な膨張時期があったことを強く示唆しており、更なる観測的追究が宇宙論の長期的な目標となっている。インフレーションに関する重要な予言の一つとして、その時期に生成された背景重力波の存在が挙げられる。この背景重力波の検出はインフレーションの確認、そしてその基本的な特徴を捉える上で大きな意義がある。背景重力波に関してはインフレーション以外にも初期宇宙の相転移時に生成される重力波など様々な理論モデルが提案されており、DECIGO が高エネルギー物理学に対して重要な貢献をする可能性がある。

DECIGO は、宇宙論的な距離にある連星中性子星連星を高い SN 比で観測する感度を持っている。これらの連星からの重力波形は、一般相対性理論によって高い精度で記述される、極めて正確な時計と見なすことができる。観測可能な連星は、1 年あたり数万個にも及び、この膨大かつ正確な時計は、宇宙論や天文学の研究を行う上で革新的な道具となる可能性がある。その一例として、宇宙全体のエネルギーの約 3/4 を占めるとされるダークエネルギーの性質を決めることが挙げられる。遠方の超新星爆発の観測等は、最近の宇宙の膨張速度が時間と共に加速していることを示唆しており、その要因は、負の圧力を持つダークエネルギーに起因していると説明されている。遠方の連星からの重力波を観測し、その周波数変化を精密に観測することにより、赤方偏移を従来と独立な方法で決定することが可能となる。連星中性子星からの重力波を、合体の 5 年前から観測した場合、この周波数のずれは重力波の到着時間に換算して、1 秒程度になる。この観測によって、宇宙膨張を支配しているダークエネルギーの性質に迫る新たな手がかりを与える可能性がある。

一方、重力波観測の天文学的側面に関しては、DECIGO は地上検出器や LISA とは異なった観測周波数を持つことから、それらと相補的な情報を得ることが期待できる。また、高い感度と観測イベントレートを持つことから、連星の合体などの激しい天体現象の統計量を求め、銀河の形成などに対する知見を得ることも期待できる。連星中性子星の合体イベントは、地上検出器の主な観測対象となっているが、DECIGO では、このイベントを、地上検出器の観測周波数帯に入る数年前から観測することができ、合体時期の予測を行うことができる。さらに、DECIGO の感度では、このような連星を年間数万個程度観測できると見積もられており、一般相対性理論の検証や中性子星の状態方程式に関する情報が得られることが期待できる。また、DECIGO では、宇宙論的な距離にある太陽質量の 1000 倍程度のブラックホール連星の合体を観測することができる。これによって、銀河の中心にあると考えられている超巨大ブラックホールや、銀河の形成メカニズムを解明することが期待できる。

2.3. DECIGO の制御・軌道

DECIGO は、1000km 離れた S/C 間でレーザー干渉計を構成するという大型かつ精密な観測機である。従って、干渉計の制御や S/C のドラッグフリー制御においては、これまでにない精密な制御が必要になる。図 4 は、DECIGO の 1 辺に相当する部分を示している。1000km 離れた S/C のそれぞれの中には、鏡が非接触で保持されており、それらの間の距離をレーザー干渉計によって測距するという構成になっている。レーザー干渉計の感度を保つため、干渉計によって取得された変動信号は、基線長を一定に保つよう鏡の位置にフィードバックされる。一方、S/C とその内部の鏡との間の相対位置変動は、ローカルセンサーによって読み取られ、S/C に取り付けられたスラスタにフィードバックされる。このドラッグフリー制御によって、S/C は、これらの鏡に働く太陽輻射圧変動等の外力を防ぐシールドの働きをすることになる。

干渉計基線長制御では、鏡に働く外乱（重力、電磁力、レーザー光輻射圧など）を抑圧し干渉計が動作することが重要であり、レーザー光の波長（532nm）よりも十分良い精度での制御が要求される。その要求値は、

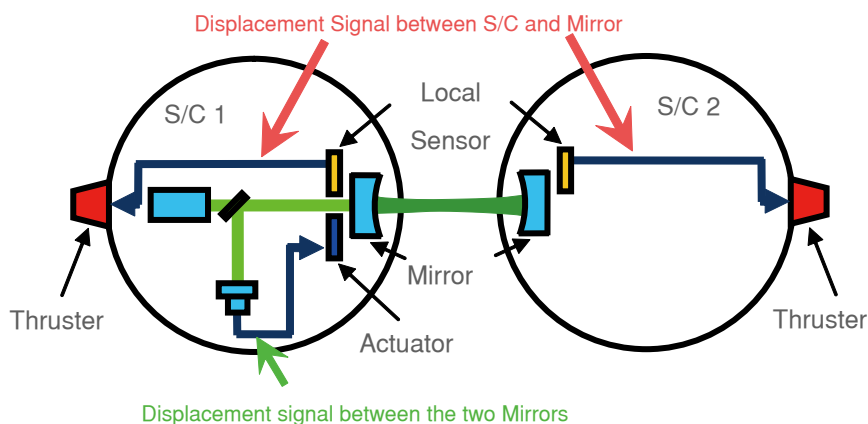


図4 DECIGOの制御

3×10^{-10} m 程度, 0.1Hz 付近の変動成分としては, 3×10^{-18} m/Hz^{1/2}以下と見積もられている. これらの精度は, 地上での基線長 4 km 程度の重力波検出器では実現されており, 十分実現可能な値である. 一方, 鏡と S/C 間の相対変位制御 (ドラッグフリー制御) に関しては, 鏡を基準に S/C に働く外力 (太陽光輻射, 天体重力など) を抑圧し, S/C 変動が鏡の変動を引き起こさないこと, 変動がローカルセンサーの線形領域に収まっていることなどが要求される. そのことから, RMS 変動で 0.1mm 程度以下, 0.1Hz 付近の変動で 3×10^{-10} m/Hz^{1/2}以下の相対位置変動であることが要求されている. この実現のためには, 高感度のローカルセンサーと, 低雑音のスラスタが必要となる. スラスタとしては, 太陽輻射圧等の外力を十分に抑圧するだけの最大推力と, 十分広いドラッグフリー制御帯域を実現するための応答速度, スラスタ自身の雑音が問題にならないだけの低雑音, 長期間の運用に耐えられるだけの総推力が要求される. このことから, DECIGO では, 最大推力 100 μ N, 推力雑音 0.1 μ N/Hz^{1/2}, 応答速度 10Hz 以上, 10^4 以上の総インパルスといった性能を持つ小型・低雑音の電気推進スラスタを用いる見込みである.

以上の制御に対する要請を緩和するためには, 出来るだけ外力の影響を受けない安定な環境・軌道選択が必要になる. DECIGO の軌道選定においては, 上述の S/C 間の相対加速度が小さいということに加えて, 太陽電池発電が困難でない (S/C 生存からの要請), 地球からの距離が遠すぎない (通信の要請), 軌道投入が困難でない (推力/重量からの要請) などの要素を考慮に入れる必要がある. これまでの検討では, 地球公転軌道上を地球の後ろに追従して周回する軌道が有力となっている. 3機の S/C はこの軌道付近をお互いの周りを周回するように配置される (レコード盤軌道). 解析計算によると, 惑星重力の影響がない場合には, 1000km の S/C 間距離が 1 年間に約 30cm 程度変動すると見積もられている. また, 惑星重力による S/C 間の相対加速度は, 4×10^{-12} m/s²程度と見積もられている. これを打ち消すために必要な推力は 10^{-9} N 程度に相当し, 微弱な力で補正することが可能である.

3. DECIGO パスファインダー

DECIGO のような大規模な観測装置を実現するためには, 入念な地上試験と, 宇宙実証試験が不可欠である. そこで, DECIGO は, 2 回の前哨衛星を打ち上げる計画になっている. その最初のものは, DPF (DECIGO Path Finder) と名づけられている. DPF は, 1 機の 300kg 級小型衛星内に, 安定化レーザー光源と 2 つの鏡 (試験質量) で構成された短基線長のファブリ・ペロー干渉計, ドラッグフリーシステムを搭載する. これは DECIGO の基線長 1000km の干渉計を短縮して 1 機の衛星内に収めたものという位置づけになり, DECIGO と同様に, 重力波

によるファブリ・ペロー干渉計の基線長変化を、安定なレーザー光によって観測するものである。DPFでは、DECIGO実現のために重要な開発項目である、(1)衛星のドラッグフリー制御、(2)レーザー光源とその安定化システム、(3)レーザー干渉計制御、(4)クランプ・リリース機構、の4つの宇宙実証試験を行う。また、上記の全てのシステムを動作させた状態で、低周波数帯（0.1-1 Hz）での重力波の観測を行う。特に、頻度は低いとは考えられてはいるが、もし我々の銀河中心付近で、中間質量ブラックホールの合体現象や、大質量ブラックホールの準固有振動現象が起こった場合、DPFで検出することが可能である見込みである。一方、DPFで観測した結果、これらの重力波が観測されなかった場合には、そのようなイベントに対する上限値を与えることになる。この周波数帯での重力波観測はこれまでに行われていないため、DPFで得られる観測データは、地上の検出器では得られない貴重なものになることが見込まれる。

DPFで行うドラッグフリー制御では、DECIGOで用いられるものと同等の性能を持ったローカルセンサーやスラスタが用いられる予定になっている。小型・低推力・低雑音のスラスタは重要な開発項目の1つになっており、検討と評価試験が進められつつある。現在、DPFは、JAXAの小型衛星ミッション候補の1つに選定されており、最短で2012年度の打ち上げを目指し、ワーキンググループでの検討と基礎技術開発を進めている段階である。

4. まとめ

将来、重力波観測は、電磁波観測と相補的な役割を果たし、宇宙の新しい知見をもたらしてくれることが期待できる。その目標に向かって、日本の重力波グループでは、宇宙空間重力波望遠鏡DECIGOの検討を進めている。DECIGOでは、これまでに無い精密な計測と宇宙機の制御が必要になり、ドラッグフリーのための低推力・低雑音のスラスタの開発はミッション成功の根幹に関わる重要な要素になっている。本稿の読者が興味を持ち、ご意見を下されば幸いである。

参考文献

- [1] N. Seto, S. Kawamura and T. Nakamura,
“Possibility of direct measurement of the acceleration of the universe using 0.1Hz band laser interferometer gravitational wave antenna in space”, Phys. Rev. Lett. 87 221103 (2001).
- [2] S. Kawamura et al “The Japanese Space Gravitational Wave Antenna – DECIGO”, Class. Quantum Grav. 23 S125 (2006).
- [3] LISA : System and Technology Study Report, ESA document ESA-SCI (2000) .
- [4] K. Kuroda et al “Japanese large-scale interferometers” Class. Quantum Grav. 19 1237 (2002)
- [5] B. F. Schutz, “Determining the Hubble constant from gravitational wave observations”, Nature 323 310 (1986).