

重力波天文台実現にむけて

— 我国の取り組み —

藤 本 眞 克*

今世紀中に重力波天文学の開始をめざして世界各国で重力波天文台建設計画が進行している。我国でも、1988年に早川（名大）、水島（コロラド大）、宅間（電通大）各先生の提案で、重力波に関心を持つ全国の研究者が集まって重力波天文台を実現するための共同研究や体制作りを開始した。

我国は共振型重力波アンテナでは独自の開発経験を有するものの干渉計型アンテナの開発研究については欧米のグループより後発であるので、研究の進め方に工夫が必要である。研究開発において我々が採ろうとしている方針はトップダウン的である。すなわち、まず目標を定め、目標達成に必要な研究開発項目を洗い出し、それらを適当なインターフェイスによってグループ分けして、ある程度独立なグループ毎に研究開発と進めていく方法である。この方法を具体化するため、まず重力波アンテナの検出目標を設定しその実現のためのアンテナの概念設計を行なった。設計の基本方針は、目標達成に必要な機能的要求を先進グループの経験と知識を参考にしてできるだけシンプルな設計で満たすこととした。この設計より導かれる各種の技術的要求を整理・グループ化して、研究開発計画と目標を定めた。これが平成3年度より4年計画で開始される重点領域研究の計画研究の骨子になっている。

このような方針によって、先進グループの試行錯誤でつぎはぎになったプロトタイプ干渉計では明かにされていない過剰雑音の問題が克服でき、本格的な重力波アンテナの設計・建設に直接役立つ開発研究がなされるを期待している。

1. 重力波アンテナの概念設計

重力波を観測手段とする天文学（重力波天文学）が成立するためには、ある程度の頻度と強度をもった重力波発生源とそれを観測できる感度を持った重力波アンテナが必要である。現象の頻度として月ないし年に1回以上を要求すると、乙女座銀河団までの範囲内で起きる大質量星の超新星爆発が最も有望な重力波発生源であろう。そこで、重力波アンテナの性能としてこの重力波が現象として観測できる感度を持つことを要求すると、

$$\text{最小検出重力波振幅 } h_{\min} \sim 10^{-21}$$

$$\text{観測周波数帯域 } \nu_g = 500 \sim 2500 \text{ Hz}$$

である。

レーザー干渉計型の重力波検出装置でこの感度を達成するには、実効光路長が 150 km (1 kHz の重力波の半周期間の光路長) の干渉計で $1 \mu\text{m}$ の波長の光の 10^{-9} ラジアン位の位相変化を検出できなければならない。検出可能な位相変化は不確定性関係により光子数ゆらぎの逆数より小さくはなれない。光子数ゆらぎはレーザー光のようなコヒーレント光では光子数の平方根に等しい。これらから、 10^{-9} ラジアン位の相を検出するためには 10^{18} 個の光子が必要で、1 kHz の信号、 $1 \mu\text{m}$ の光ではおよそ 1 kW 以上のパワーの光源が要求される。

また、レーザー光自体も極めて単色性の良いものが要求される。重力波振幅が 10^{-21} の信号を検出するには、相対波長ゆらぎも 10^{-21} 以下でなければならないが、実際の干渉計は直交する2本の腕を持つマイケルソン型干渉計で、2本の腕が完全に等しければレーザー光の波長の変化はキャンセルして見えないため効かない。一方、重力波は2本の腕に逆位相で作用するため干渉縞変化信号として検出できる。現実には2本の腕にアンバランスが存在するため、1 kHz 帯域のレーザー光の相対波長ゆらぎとして、 10^{-19} 程度のものが要求される。

実効光路長 150 km の腕を実現するのに、ディレイライン (DL) 方式とファブリーペロー (FP) 方式がある (図1)。それぞれ折返し数や FP 共振器のフィネスを大きくすれば、短い腕で光路長 150 km が実現できるが、地面振動や熱雑音による鏡の変位の影響も増幅されるため、あまり短い腕の干渉計は技術的に難しい。一方あまり長い腕にすると干渉計の応答速度が遅くなって厳しい制御が困難になる。これら現実的条件を考慮すると、腕の長さが 3 km で有効折返し数が 50 回程度が現実的な値であろう。

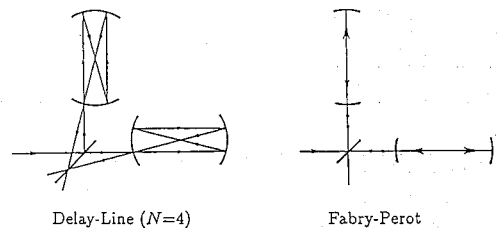


図1 ディレイライン方式とファブリーペロー方式

* 国立天文台 Masa-Katsu Fujimoto: Design of A Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory

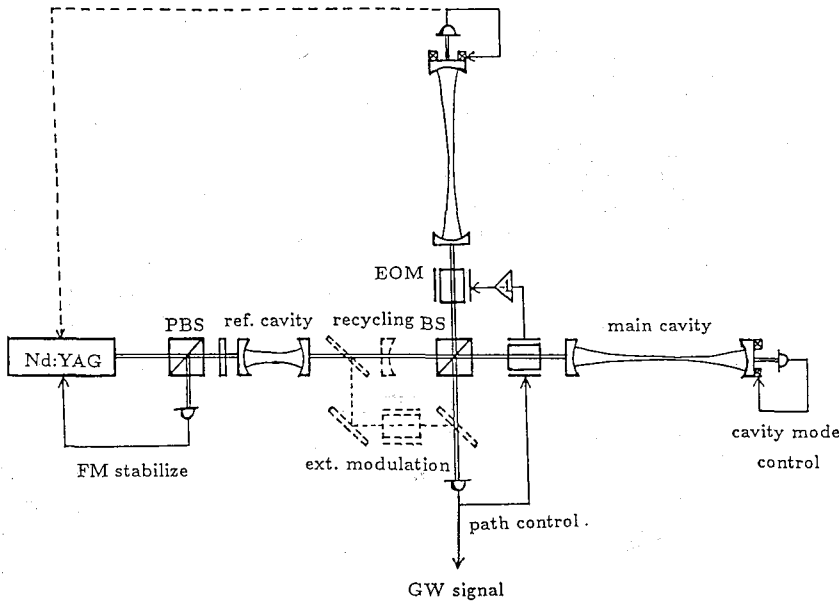


図2 FP方式レーザー干渉計型重力波アンテナ

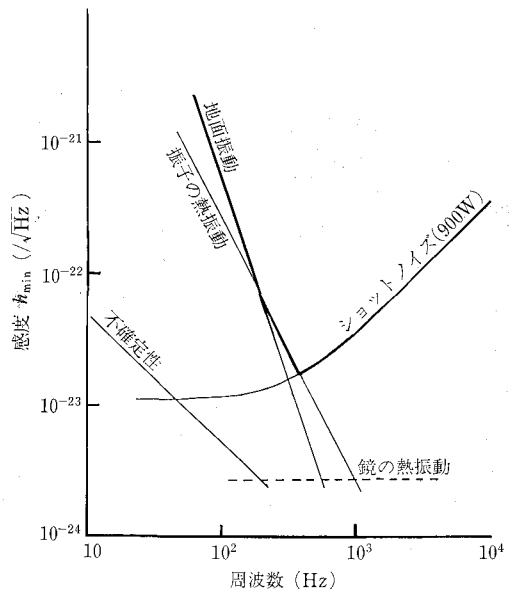
ディレイラインかファブリーペローかの方式の選択については、まだしばらく決定を保留することにする。そのため、重点領域研究では2方式を並行して研究する。その結果や外国での状況を見て選択する。概念設計ではファブリーペロー方式を採用した。原理的な比較に限れば、周波数特性のなめらかなFP方式が信号情報獲得上は有利である。

図2に概念設計した重力波アンテナの基本構成を示す。図の左側からレーザー光源部、光源波長安定化およびモードクリーン化用のファブリーペロー共振器があり、次にオプションとして光リサイクル用反射鏡と外部変調方式の干渉光検出素子が描かれている。右側は干渉計本体で、それぞれの腕が3kmのFP共振器になっている。各共振器は透過光を検出することによって制御され、干渉光をつねに干渉縞暗部になるように電気光学変調素子(EOM)で位相調整することでフィードバック制御されている。このフィードバック信号が重力波信号を含んでいる。

この設計の特徴は、1kW出力のNd:YAGレーザーの基本波長1.06 μm を光源として用いること、レーザー光の全パワーを用いた波長安定化をすること、干渉計本体のFP共振部の内部には素子を入れず鏡の機械共振を利用した機械変調方式を採用すること、光源・安定化・干渉の各部分の独立性が高いこと、などが挙げられる。

図3に期待される重力波アンテナの雑音(検出感度)が1Hzあたりの重力波振幅に換算して信号周波数の関数として示されている。

図3 重力波アンテナの雑音スペクトル



2. 重点領域研究の研究構成

概念設計で考えられた性能の重力波アンテナの実現可能性を調査し、詳細設計が可能なレベルまで技術的見通しを得るために、図4に示した構成で重点領域研究を進めようとしている。すなわち重力波発生理論的考察で目標の見直しや詳細検討を行なう一方で、高出力・超高安定レーザー光源の開発と重力波検出用干渉計に特有な要素技術の開発を行ないつつそれらの成果を取り入れた方式の干渉計プロトタイプを建設・運転する。プロトタイプのうちディレイライン干渉計では、すでに10mが

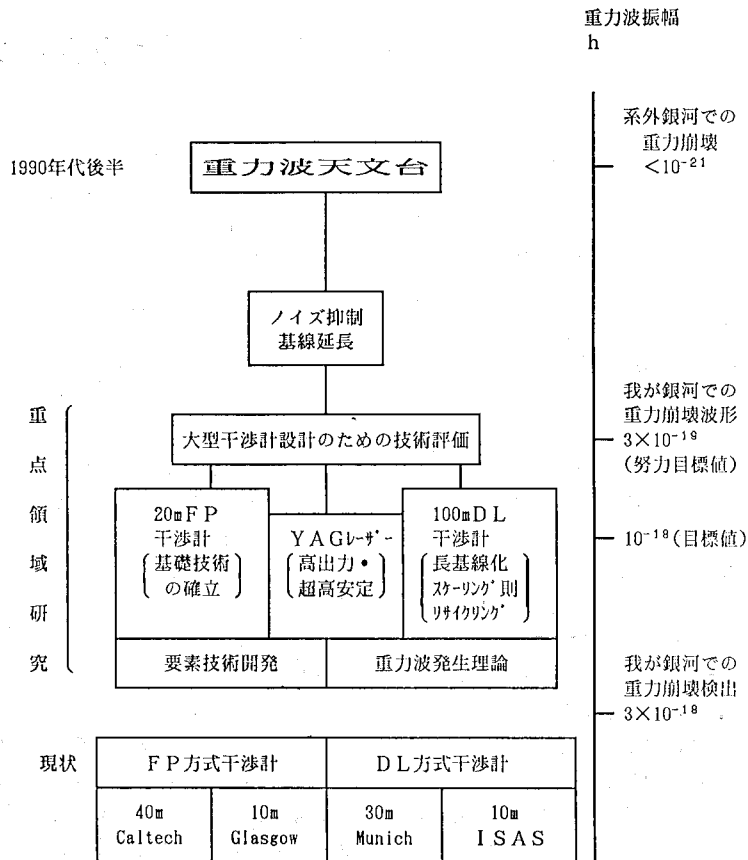


図 4 重点領域研究の構成と位置付け

運転されていることを踏まえ長基線化に伴う光学的・技術的問題を重点的に検討する。一方のファブリーペロー干渉計は我国では初めて創られるものであるから、概念設計で考えられた設計思想に出来る限り忠実に建設して、基礎技術の確立と本格的干渉計への見通しの獲得を目指す。これらの成果に基づいて大型重力波アンテナが詳細設計できるようになることが、この重点領域研究の大きな目標である。また一方、それぞれのプロトタイプ干渉計が目標感度で長期間安定に運転できれば、我々の銀河近傍で超新星爆発が起きたら重力波が検出される可能性が高いので、このレベルの長期運転も目標の一つである。

3. 重力波天文台の実現にむけて

今年から始まる重点領域研究（「重力波天文学」）によって我国でも重力波天文台実現にむけて大きな一歩を踏み出そうとしている。今まで述べた技術的な研究開発の成果はもとより、この研究を通じて極限計測技術に関心を持つ研究者や技術者、技術の応用に興味を持った他分野の研究者などとの研究交流が盛んになり分野の裾野が

広がること、また若手研究者の参加や育成によって重力波研究者の層が拡大することを期待している。マンパワーと支持者の増大は重力波天文台を実現するためには不可欠の要素である。

また、一辺 3 km の直交する干渉計を設置する静かで水平な敷地も必要である。我国でこのような広大な土地を探すのは容易ではないが、一つの可能性としてニュートリノ検出で有名な岐阜県の神岡鉱山のトンネルを利用することが議論され始めている。オーストラリアの研究者からは西オーストラリアのパース近郊の砂地での共同建設が提案されている。場所の決定はまだ先のことではあるが、ともかく現時点で国内外に候補地があることは重力波天文台実現にむかって走り出そうとしている我々を力づけてくれている。