

《ハイテクとおめがね事情(2)》

重力波望遠鏡

重力波が運んでくる情報を捕まえて宇宙の新しい姿を見つけようとする重力波天文学が最後のフロンティアとして注目されている。宇宙の観測手段はここ半世紀ばかりの間に革命的な変貌を遂げてきた。可視光だけに頼っていた観測が今では広い範囲の電磁波(電波、赤外線から紫外線、X線、 γ 線まで)や宇宙線、ニュートリノによる観測まで可能になってきている。そして次は重力波による観測が待望されているのである。

電磁波と重力波はどちらも真空中を光速で伝わる横波である点で類似しているが、発生、伝搬、検出の過程における物質との作用の強さが、大きく異なる。電磁波は原子や分子レベルの物質と直接的に大きく作用するが、重力波は極端に作用が弱くマクロな物質の集合でのみ作用が顕在化する。これは、電磁作用には正負があり中和効果があるのに、重力作用は常に引力のみで累積効果があるからでもある。この違いのために、電磁波は星

間空間や天体表面付近の物質状態に関する情報をもたらす。重力波は天体の構造を支配している天体内部の物質の集団的な運動の情報をもたらす。

重力波は我々の住む空間と時間(4次元時空)を歪ませる。この僅かな歪みを検出して重力波の通過を感知するのが重力波望遠鏡である。現在世界各地で精力的に開発研究が行われている重力波望遠鏡はマイケルソン干渉計を利用したものである。マイケルソン干渉計は、直交する2方向で光を往復させて戻ってきた光を干渉させるものである。重力波による空間の歪みで2方向の往復経路に差が生じるのを干渉縞の変化として観測するのが検出の原理である。原理は単純であるが、現実の検出は極めて困難である。その理由は重力波による歪みの大きさが極めて小さく、干渉計に生じる経路の差が非常に小さいためである。その大きさは、乙女座銀河団の距離で超新星爆発があっても、地上に届く重力波で往復2 kmの経路に 10^{-18} mの差が生じる程度である。検出の困難さが想像できよう。しかし重力波の検出は科学者の長年の夢であり、実現のための努力が続けられてきた結果、重力波望遠鏡実現の目途が立つところまで来ている。

重力波望遠鏡の当面の目標は、乙女座銀河団での効率良い重力波発生を捕らえる感度を達成することである。そのためには、長さが3-4 kmの干渉計が必要であり、100 W以上のパワーの単一周波数のレーザー光や、波面ひずみが殆ど無く吸収や散乱の極めて少ない光学素子、機械損失が少なく熱雑音による振動が小さい鏡材とその支持法などが不可欠である。このような重力波望遠鏡の建設計画は、すでに米国(LIGO)と仏・伊(VIRGO)で始められており、2000年頃の稼働開始を目指している。

我国も同様な重力波望遠鏡の建設を

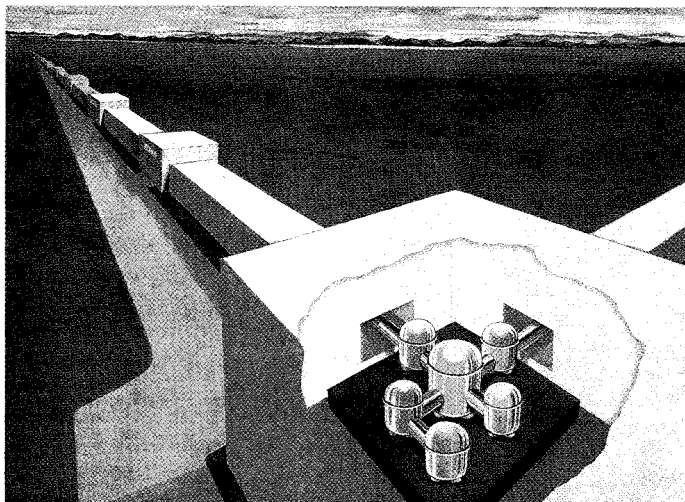


図1 重力波望遠鏡の完成予想図

目指しており、基礎開発研究のために、1991年度から科学研究費の重点領域研究「重力波天文学」を進めてきた。これにより、国立天文台では我国で初めてのファブリ・ペロー方式の20 mプロトタイプ干渉計を建設し、宇宙研のTENKO-100とともに、基礎研究を進めている。20 m干渉計は、マイケルソン干渉計の2つの直交する方向にそれぞれ基線長20 mのファブリ・ペロー共振器を配置したもので、半導体レーザー励起のNd:YAGレーザーから0.5 W、1.064 μm の光を照射し、各ファブリ・ペロー共振器からの反射光をマイケルソン干渉計で干渉させる。

ファブリペロー共振器からの反射光を光のまま直接干渉させて位相差を測定する方式でプロトタイプ干渉計を働かせたのは世界で初めてである。従来の外国のプロトタイプ干渉計では、それぞれの反射光を光検出器で検出して位相変化を計測し、2方向での位相変化の差を電気信号の差から求める方法が採られていた。こちらの方が共振器の制御を独立に行えるので簡単であるが、反射光をすべて検出してしまうので、光の有効利用ができない。これに対し、直接干渉の方式では、干渉光のうちほぼ打ち消し合った光を検出器で検出し、強め合った光は入射光源の方に戻っていく。この光をリサイクル鏡を使って入射光の位相に合うようにして再び干渉計に戻してやれば、入射光のパワーが増大し、干渉計の感度を高めることができる。光の再利用は重力波望遠鏡計画では必須技術と考えられており、直接干渉での運転はそのために必要な第一歩であった。

初めの運転ではレーザー光源の持つ周波数雑音が支配的であることが分かったので、その後、基線長1 mのファブリ・ペロー共振器を光源側に追加して、レーザーの周波数安定化を行うと同時にその透過光を利用することで空間モードを単一化して、きれいな光による干渉計の運転を行っている。まだ調整中であるが、このような構成のプロトタイプ干渉計が動作したのも世界で初めてであ

る。この構成も重力波望遠鏡を実現するのに欠かせないものである。

このような成果をさらに発展させ、本格的な重力波望遠鏡を実現するための中間ステップとして、1995年度から新プログラム方式による研究(新プロ)「高感度レーザー干渉計を用いた『重力波天文学』の研究」(古在由秀研究リーダー)を開始する予定である。そこでは、レーザー干渉計を高感度化するための基礎開発研究をより一層推進すると同時に、銀河系近傍で強い重力波発生現象が起こった場合に検出可能な実証型の重力波望遠鏡を建設し運転することになっている。

この望遠鏡(TAMA)は基線長が約300 mのファブリ・ペロー方式のマイケルソン干渉計で、国立天文台三鷹構内の20 mプロトタイプ干渉計の脇に設置する計画である。目標としている感度は、現在世界でプロトタイプ干渉計により達成されている検出感度のおよそ100倍の高感度である。これは本格的な重力波望遠鏡の目標感度にくらべると約10倍感度が低いが、運良く銀河系の近傍で強い重力波発生があれば、確実に検出できるものである。

一台の重力波望遠鏡は一本の導線の電波アンテナに対応し、広い指向性を持つ。その上、重力波はほとんど作用無しに通るため、反射や屈折により指向性を持たせるのは不可能である。そのため、重力波の信号を観測しても、どの方向から来たものか判断できない。方向を決定するためには、最低3台の重力波望遠鏡で同じ信号を観測して到着時間の差から幾何学的に決める必要がある。それぞれの重力波望遠鏡には感度の無い方向があることも考慮すると、地球上になるべく離して設置された最低4台の重力波望遠鏡から成る観測網を形成して、はじめて重力波の望遠鏡あるいは天文台と呼べるものになる。重力波の検出を確認するためにも、重力波による宇宙の観測を行うためにも、国際協力が不可欠なのである。

藤本眞克(国立天文台)