

「時空のさざ波」をとらえる日

大橋正健

東京大学宇宙線研究所助教授

宇宙で起こる現象は時空の歪みをつくり、「重力波」となって光速で伝わっていく。その微弱な波を検出する可能性が見えてきたのはごく最近だ。先駆けとなったTAMAから、計画中のLCGT、次世代検出装置への進歩をたどる。

宇宙には、電磁波に比べるときわめて微弱な重力波が存在する。この波は、重力と曲がった時空が表裏一体の関係にあるとするアインシュタインの一般相対論から導き出されるものであり、「時空のさざ波」と形容されるように、時空の歪みが光速で伝播していく。残念ながら、われわれはまだ重力波を直接検出したことはないが、とらえられれば、宇宙・天体に関する重要な情報が得られるであろう。そのため、重力波の望遠鏡である巨大レーザー干渉計の建設が世界中で進行中であり、すでに数台が稼働している。

重力波自体は、連星をつくるパルサー^{*1} PSR1913+16の軌道周期を長期にわたって観測することにより間接的に存在が証明されている。高感度の観測機器を開発すれば必ず検出できるはずなので、この競争は今後も続くであろう。

繰り返しになるが、重力波は極微少な波であり、物質とほとんど相互作用しないので、透過力が強い。超新星爆発によ

て中性子星やブラックホールがつけられる瞬間の時空のダイナミクスや、連星中性子星が合体してブラックホールになる過程を刻々と把握できるのは、重力波だけだと考えられている。後者はガンマ線バースト源であるという予想もあるので、宇宙の謎の解明に役立つかもしれない。とにかく、重力波によって極端に高密度な天体の物理を探ることができる。

重力波検出の難しさ

実際の重力波の検出の話に戻ると、これまでメリットとしてあげてきた重力相互作用の弱さは、今度は逆にデメリットとなる。重力波をとらえるには、基線長が数kmにも及ぶ巨大なレーザー干渉計で、時空に固定されたミラーの微小な動きを 10^{18} mレベルで測定しなければならないのである(図1)。想定される時空の歪みはわずか 10^{-21} で、この値は通常は誤差ともみなされないほど小さい。例えば、太陽と地球の距離が水素原子1個分

の伸び縮みをするのに相当する。

この極限計測の邪魔をする雑音は何かといえば、大まかにいって、低周波帯の地面振動、高周波帯の光子雑音^{*2}とその中間100Hz帯にあるミラーの熱雑音である。レーザー干渉計の基線長をなるべく伸ばしたいのは、地面振動の影響を相対的に下げるためである。また、高出力レーザーが必要な理由は、不確定性 $\Delta N \Delta \phi \geq 1/2$ における光子数 N を非常に大きくして(同時に ΔN も大きくなる)、測定可能な最小位相差 $\Delta \phi$ を小さくするためである。熱雑音については、冷却する等の方法が有効である。

1916年に一般相対論が誕生し、重力波の存在が予言されてから今日に至るまで、重力波を直接検出しようとするさまざまな試みが続けられてきた。最初は数トンのアルミ棒を重力波アンテナとして使い、その極微少な弾性振動を検出するタイプが主流であった。1969年にはその検出実験を考案したウェーバーが「重力波を検出した」と発表した。これは誤報であった。その後レーザー技術が発展したのに伴って、1990年代にはレーザー干渉計型重力波検出器が主流となった。

先駆けとなったTAMA

TAMAは、1997年に国立天文台三鷹キャンパス内に建設された基線長300mのレーザー干渉計である。当時、アメリカでは基線長4kmのLIGOの建設が始まっていて、それに先駆けて重力波観測をしたいという日本の重力波研究グループの強い意志で推進され、1999年には最初の観測が実行された。

TAMAには先端的光学機器が集約されており、今後の拡張性にも富んでいる。筆者は高性能ミラーの開発にかかわったのであるが、通信用光ファイバーのために開発された石英ガラスがいかに透明であるか、半導体ウェハー加工にも通じる超平滑研磨がいかに滑らかな表面を削りだすか、レーザー干渉計用ミラーのためのコーティング装置がいかに損失の少ない光学薄膜を生み出すか、などの最先端技術に素直に驚いたものであった。そのほか、TAMAに組み込んだ高出力レーザーは製作から10年経った今でも現役であり、その技術力は特筆に値する。そうした技術によって、われわれの銀河(銀河系)内で発生する連星中性子星合体イベントを検出できる感度を獲得し、すでに数回の観測を行ってきた。

そのTAMAに遅れること4年、2003年にはついにLIGOが稼働し始めた。2005年からの長期観測では、おとめ座銀河団の距離まで観測範囲を広げ、少なくとも1年間の観測データを取得する予定である。この観測範囲には1000個ぐらいの銀河があり、いよいよ本格的な観測が始まったという印象である。もちろんTAMAも可能な限りLIGOとの同時観測を行っており、共同で執筆した観測論文も出版している。

連星中性子星合体イベントは、1銀河あたり10万年に1回ぐらいの頻度で発生すると予想されている。年に1回とか月に1度のイベントを期待するならば、1000個の銀河の観測では足りない。さらに高感度な検出器が必要である。そのため、LIGOは数年後には大幅な改造が予定されている。

LCGTから宇宙へ

日本では、TAMAで培ったレーザー干渉計技術にさらに低温技術をプラスした先進的レーザー干渉計LCGTを予算要求中である。基線長3kmのレーザー干渉計を地面振動の静かな神岡鉱山内に設置し、サファイアミラーを極低温まで冷却して感度を向上させるというアイデアがLCGTの基本概念である(図2)。筆者は、



図2 LCGTの基本概念。地面振動の静かな神岡鉱山内に基線長3kmのトンネルを掘削し、そこに冷却サファイアミラーを組み込んだレーザー干渉計を設置する。

この基本概念を具体的な干渉計デザインとして文書化する作業に携わってきた。また、新たに開発された低振動冷凍機をはじめLCGTに組み込まれる低温技術の優位性を実証するための低温プロトタイプCLIOの責任者を務めている。LCGTは建設開始から5年後に稼働予定である。この強力な観測ツールによって、連星中性子星合体イベントを高精度に記録できるはずである。

LCGTや改造版LIGOによってブラックホールや中性子星の物理が解明できれば、重力波の役割はそれでおしまいであろうか? いや、われわれ研究者の好奇心は果てしなく、その次には宇宙初期を重力波によって観測したいと考えている。電磁波の背景放射と同じように重力波の宇宙背景放射も存在するので、それをとらえれば、光の晴れ上がりよりはるか以前の宇宙の姿が見えることになる。

そのような重力波を観測するためには、検出対象となる重力波の波長が長くなるので、宇宙空間にレーザー干渉計を展開する必要がある。2015年の打ち上げを目指しているLISA計画では、基線長が500万kmにも及んでいる。スペース重力波アンテナとしては、宇宙膨張を重力波の精密観測で測定しようとする

DECIGOという構想もあり、今後は魅力的な将来計画に発展していくであろう。

*1 パルサー
短い周期のパルス状の電波を放射している天体。その正体は、巨星が最後に起こす超新星爆発でできる超高密度の中性子星である。

*2 光子雑音
光の量子性に起因する雑音。光の量子はフォトンと呼ばれるが、その数 N はポアソン分布に従い、 \sqrt{N} の揺らぎをもつ。このフォトン数揺らぎ ΔN と位相揺らぎ $\Delta \phi$ は不確定性関係 $\Delta N \Delta \phi \geq 1/2$ を満たす。

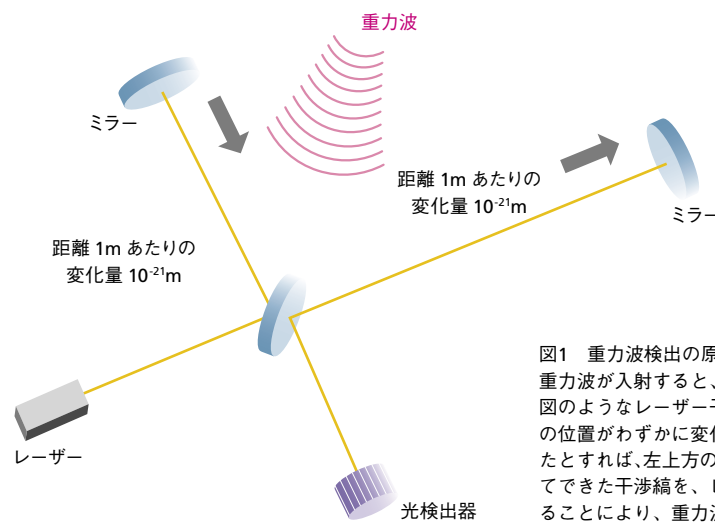


図1 重力波検出の原理

重力波が入射すると、2点間の距離が変化する。図のようなレーザー干渉計では、中央のミラーの位置がわずかに変化し、右側の光路長が伸びたとすれば、左側の光路長が縮む。これによってできた干渉縞を、レーザーを照射して測定することにより、重力波が検出できる。



大橋正健(おおはし・まさたけ)
正直なところ、重力波の研究との出会いは偶然であった。しかしながら、気がつけば20年以上もこの分野に留まっているので、ここまでできたら何とか重力波を検出してみたい。具体的には、明日からでも神岡に3kmのトンネルを掘り始め、数年後にはLCGTで重力波を観測したいと願っている。