

## 重力波天文学をめざして

早 川 幸 男\*

光で天上の神秘を探ってきた人類は、今世紀中頃から情報のチャンネルを次々に広げ、宇宙線と総称される各種の原子核や電子及び電波から  $\gamma$  線に到る広い波長範囲の電磁波を利用できるようになった。さらに太陽と超新星 1987A からのニュートリノを観測することに成功した。しかしまだ重力波が天文学の手段として残されており、1960 年代から重力波を検出する努力が積み重ねられているが、いまだに検出に成功していない。最近世界の数グループで高感度の重力波天文台の建設が提案され、今世紀末か来世紀初頭には重力波天文学が成立する勢である。わが国でも一昨年に全国的な重力波研究グループが組織され、本年 4 月から重点領域研究「重力波天文学」が発足し、重力波検出に必要な基礎技術の開発を進めることになった。

重力波の検出にまだ成功していない理由は、重力波が弱いからではなく、その相互作用が極端に弱いからである。例えば SN 1987A の場合、崩壊した質量エネルギーの 0.1% が  $10^{-2}$  秒間に重力波として放出されたであろう。そのエネルギー流束は太陽光のそれと同程度である。しかし強さ  $S$ 、振動数  $\nu$  の重力波によって誘起される時空の歪（振幅）は

$$h = [(4/\pi)GS/c^3\nu^3]^{1/2}$$

である。ここで  $S$  にかかる係数は  $(4/\pi)G/c^3\nu^2 \approx 3 \times 10^{-45}$  erg  $\text{cm}^{-2}$  s という小さい値であるから、 $S = 3 \times 10^8$  erg  $\text{cm}^{-2}$  s $^{-1}$  に対して  $h \approx 10^{-19}$  となる。重力波の進行方向に垂直な面内に互に直交して距離  $L$  だけ離れて置かれた 2 対の自由質量間の光の行路差は  $hL$  である。 $L = 1$  km、 $h = 10^{-19}$  に対して  $hL = 10^{-14}$  cm だから、これを検出する困難さが理解できるであろう。

もしこの重力波が観測できたなら、超新星爆発の機構についてどんな知見が加えられたであろうか。ニュートリノの観測から爆縮した質量等の重要な知見が得られた。爆縮で発生したニュートリノは 0.1 秒以内に放出されるから、数 eV/c $^2$  の有限の質量を許しても約 1 秒以内に到達するはずである。ところが数秒おくれて到達したニュートリノがあった。これに対して爆縮についていくつかの説が提出された。爆縮が 2 段で起こったとか、まず高速で回転する円盤が形成され、それが 2、3 個に千切れて順次に落下したとか。

重力波は二つの偏りをもつ光速で伝播する波と考えら

れている。重力波の到達時刻をニュートリノのそれと比べれば、速度の下限、すなわち重力波量子の質量の上限が得られる。また、観測方法によっては偏りが求められ、重力理論の検証ができる。重力波の強さは爆縮の非対称度に関係するから、爆縮に伴う質量の移動を追跡できる。爆縮で生じた中性子星は準固有振動を示す重力波を放出するので、それから中性子星の密度や状態方程式についての知見が得られる。ニュートリノが高密の物質中に暫く捕捉されるのに比べて、重力波は裸の姿を写し出してくれる。

1987 年初頭に 2 種類の重力波検出装置が存在していた。一つは共振型と呼ばれ、重力波で誘起される固体の振動を共鳴を利用して検出するものである。1969 年に重力波を検出したと発表した Weber が用いた円筒や、東大理学部で開発した円板等がアンテナである。検出可能な振幅の下限は、アンテナの質量  $M$ 、温度  $T$ 、積分時間  $t$  に対して  $(T/Mt)^{1/2}$  に比例する。ヘリウム温度に冷却すれば  $h \sim 10^{-18}$  まで検出可能であった。他はレーザーを用いたマイケルソン干渉計である。レーザーの波長を  $\lambda$ 、出力を  $P$ 、光路長を  $L$  とすれば、 $h$  の下限は  $(\lambda/Pt)^{1/2}/L$  に比例する。当時は  $h \geq 10^{-17}$  が達成されていた。しかしどの検出器も SN 1987A の爆発時には稼動していなかった。これらを定常的に働かすことは困難であったからである。

次の超新星爆発に備えるにはどうすればよいか。わが銀河ではもう 300 年も超新星が出現していないから、そろそろ起こってもよさそうである。しかし幸運に頼るわけにはいかない。平均して年に数回は観測できるように検出感度を上げないと、天文学として成立しにくい。昨 1990 年には約 30 事象の超新星が光で見出されたから、約 10 Mpc の遠方で起こる超新星に伴う重力波が観測できれば年に数回の事例が得られる。これには  $h \sim 10^{-21}$  が測れなければいけない。しかし重力波が受かったというだけでは、2 発目以後の仕事につながらない。波形が観測されて、爆縮の機構や爆縮生成物の性質がわかるためには、限界振幅をもう 1 桁下げる必要がある。

共振型検出器で周期的振動を測る場合は、長時間積分によって  $h \sim 10^{-25}$  まで観測可能であるが、候補となる重力波源は少い。重力崩壊では  $\sim 1$  kHz の重力波バーストが発生するので、広帯域の観測を本来の目的とするレーザー干渉計が向いている。しかも光路長  $L$  を長くするとそれに逆比例して検出限界が下るので、大型の干

\* 名古屋大学 Sachio Hayakawa: Perspective in Gravitational Wave Astronomy

渉計の建設が提案されている。本号では腕の長さ 3 km で 50 回の折り返しによる  $L \sim 150$  km の干渉計の設計が紹介されている。諸外国で提案されている重力波干渉計も大体同じ規模である。

干渉計の性能を決めるのは雑音である。低周波側では地震性雑音が卓越するので、100 Hz 以下の重力波観測は難しい。高周波側では光子数のゆらぎが原理的限界になる。ゆらぎ（ショット）雑音を減らすためにはレーザーを強くして光子数を増やすことが大切である。連続波レーザーを 1 kW 程度の出力で安定して発振させなければならない。現在利用できるレーザーに比べて桁違いに高い性能が要求される。しかし現存の実験用干渉計においては、ショット雑音以外の雑音が見られ、その原因がまだ解明されていない。そこで当面次の課題を解決しなければならない。

第 1 に、雑音の原因を見出し、それを減らす工夫をすることで。こうして光路長のゆらぎ  $\delta L$  をショット雑音限界まで下げなければならない。第 2 に、高出力・高安定のレーザーを開発し、ショット雑音を下げる。現在半導体レーザー励起の Nd:YAG レーザーが有力な候補であるが、周波数と出力の安定化が研究課題である。また高出力に伴って光学系に与える擾乱も抑制しなければならない。 $\delta L$  が期待通りに小さくなれば、光路長を長くすれば  $\delta L/L$  が減少して限界振幅が下る。しかし光路長の増大に伴って新しい雑音が発生し得るので、第 3 に、光路長増大に伴う諸問題を明らかにしなければならない。こうして十分小さな  $\delta L/L$  が達成されても、それが安定に常時稼動して有効なデータが取得できなければならない。こうして、第 4 に、いつ起こるかわからない重力崩壊に備えて定常運転を可能にする工学的研究が大切である。干渉計はほぼ全方向に感度を持ち、どこで起こるかわからない重力崩壊を監視するのに適している。しかし重力波源の方向を決めないと天文学にならない。そのためには少なくとも 3 個の検出器で到来時刻の差を測る必要がある。それ故、第 5 に、重力波観測について緊密な国際協力が重要である。

第 1 と第 2 の課題に対して答を得て、第 3 の課題について見通しを得れば、大型の重力波天文台の設計が可能になる。重点領域研究はこの段階に到達することを目標にしている。万事が順調に進めば今世紀中に第 5 課題に達して、重力波天文学が天文学の仲間に入れてもらえるであろう。

地球上に建設する重力波天文台は、北米大陸の両岸地区に 2 台、英独合同で西欧に 1 台の計画が進んでいる。その他仏伊連合や豪州の計画も動き始めている。それに日本が加われば適正分布の観測網が張れるであろう。しかし地上に置く限り地震性雑音を避けることは難しく、

低周波の重力波は観測できない。低周波領域には連星の運動、大質量星の重力崩壊（時間は質量に比例）、宇宙初期の相変化に伴う重力波等、多くの興味ある現象が関与している。これらを観測するには測定器を宇宙空間に置かなければならない。

自然の観測装置として優れているのがパルサーである。連星パルサー PSR 1913+16 の公転周期の変化が重力波放出で説明され、一般相対論に基づく重力波存在の証拠が得られた。現在ミリ秒パルサー PRS 1937+21 等の周期ゆらぎを測って背景重力波の密度を求める努力が続けられている。

重力波源を同定しかつ波形を知ろうとすれば、地上と同様の干渉計を宇宙空間に飛ばすのがよい。地球の公転軌道に乗せて  $L \sim 10^{12}$  cm の間隔で 3 個の飛翔体を飛ばして  $\nu \sim 10^{-3}$  Hz をねらえば、活動的銀河核にあると考えられる巨大質量のブラックホールの生成、コンパクト星を伴う連星、背景重力波等が検出できるであろう。干渉縞の測定には、直接干渉ではなく VLBI の場合に似た技術の応用が想定される。このような雄大な計画はもちろん来世紀の夢で、天国からそれを眺めるのを期待しながら、当面は小さな雑音退治に全力を挙げなければならぬまい。

