

重力波天文学の現状と展望

藤本 眞 克*

1. 重力波天文学は可能か？

新しい天文学の観測手段として重力波が着目されるようになったのは、1969年から1970年にかけてJ. Weberが天体からの重力波バーストを捕えたと発表したのがきっかけであろう。彼の現象(Weber's events)が本当に重力波によるものだとすると、アンテナの指向性から見て銀河中心方向に起源がありそうなこと、アンテナ感度から要求される検出可能なエネルギー流量の大きさ、数日に1回という高い発生率、から得られるものは天文学的常識からは大きく隔っていた。15年前に『重力波天文学は可能か?』と題して天文月報(1972年10月号)に書いたのは、Weberの発表後数年以内に世界中で開始あるいは計画された重力波検出実験を紹介すると共に、この常識への挑戦に答えようとして始められた理論的なモデル作りや相対論的計算を紹介して天文学における重力波観測の重要性を強調するためであった。

その後、Weberの重力波アンテナより感度が2桁も良い装置によってもWeber's eventが見つからなかったこと、他の手段による天文観測との相関がないこと、理論的な説明も困難なこと、Weberが解析時にeventを定義するために用いたしきい値が恣意的であるとの批判、などから、1975年頃にはWeber's eventは重力波によるものではないと考えられるようになった。Weber自身はこれらの批判に対して、特別な波形の重力波に対しては自分の解析法が優位であること、アンテナ感度が量子的効果で増加する可能性があること、などと反論を続けているが、必ずしも説得的でなく旗色が悪い。

それでは、重力波天文学の可能性は消えてしまったのだろうか。否。Weberに刺激されて始められた世界各地の研究は、実験面でも理論面でも著しい発展を見せ、今度はより常識的なレベルで発生する重力波の検出を目標にできるようになってきた。今後10年ないし20年のうちに、重力波天文学の扉が開かれる可能性は大きい。

2. 重力波の発生源

重力波は電磁波とよく比較される。両者とも場の波動現象として、媒質なしの真空中を光速で伝播するなど類似性を持っている。しかし、重力場と電磁場で作用の大きさが決定的に違うため、重力波の発生・検出は電磁波のそれに比べて極端に困難である。Hertzの実験のように地上で電磁波を発生させてそれを検出することは、

重力波では今のところ不可能に近い。一方、天体の規模では、電磁力が正負の電荷によって中和され巨視的スケールで作用しなくなるのに対して、重力は万有引力として加算的に働くので、重力の果す役割が相対的に大きくなる。重力波の発生源として天体現象を考えるのはこの意味で自然なことである。

重力波は強い重力場がコヒーレントに変動する場合に最も効率良く発生する。質量の大きいコンパクトな天体ほど重力場は強く、またコヒーレントに変動しやすい。以下、代表的な重力波源と考えられているものを挙げる。

(i) 超新星爆発 激しい天体現象の代表的なもので、重力波バーストの発生源として注目され、理論的にもたくさんの研究がなされている。しかしながら、重力波を発生するためには、球対称からのずれが問題で、全質量エネルギーのうちのどれ程の割合が重力波として放出されるかについて確実な予想はまだ無い。軸対称な星の重力崩壊についての数値計算によれば、 $10 M_{\odot}$ のブラックホールが形成されるような超新星爆発で、 $10^{-3} M_{\odot} c^2$ 程度のエネルギーの重力波バーストが発生し、その継続時間はおよそ1ms、中心周波数は1kHz程度である。これが銀河中心で起れば、地球での重力波の振幅 h (2質点の距離の相対変位に対応)は $h \sim 10^{-18}$ であり、15Mpc離れた乙女座銀河団の中で起ったら $h \sim 5 \cdot 10^{-22}$ となる。

I型超新星のモデルとして考えられているような、アクリーションによってスピニングアップされて回転による不安定性のために軸対称からはずれた非軸対称の重力崩壊からは、もっと大量(軸対称の100倍近い)の重力波エネルギーが発生するかも知れない。しかし、この希望的予想を確めるには、はじまったばかりの非軸対称重力崩壊の数値計算が完成するまで待たねばならない。

重力波を地上で検出する立場からすると、重力波の振幅の大きさの他に、その現象の頻度も大事な要素である。超新星爆発の頻度にはかなりの不定性がある。観測される超新星爆発の頻度や推定されるパルサー生成率などから予想される超新星爆発による重力波バースト現象は、乙女座銀河団の中で2~3日に1回から1週間に1回程度と考えられている。

(ii) パルサー 自転する中性子星であるパルサーはもし完全に回転軸対称な形をしていれば、重力場は変化しないので重力波は発生しない。しかしながら、少なくとも磁軸は回転軸と一致しないであろうこと、固体殻を持

* 東京天文台 Masa-Katsu Fujimoto: Gravitational-wave Astronomy

っているパルサーもあること、などからある程度の回転対称からのずれが存在すると予想される。ずれの大きさを理論的に予想することはむづかしいが、ずれの大きさと重力波の振幅とは比例するため、重力波の上限値の観測からずれの大きさの上限値を求めて、中性子星の物性に対する制約的信息を得る可能性もある。ずれの大きさ $\epsilon=10^{-5}$ の場合に、かにパルサーからの重力波(周波数 60 Hz)は $h\sim 10^{-26}$ 、帆座パルサーも周波数 22 Hz で $h\sim 10^{26}$ が予想される。パルサーからの重力波は、ほとんど単一周波数の連続重力波であるため、長時間の位相をそろえた積分が可能で、検出感度を向上させることができる。

(iii) コンパクト星同士の連星系の合体 2 質点が相互にケプラー運動する場合に放出される重力波の計算は最も容易な部類に属する。連星パルサー PSR 1913+16 はパルサーのタイミング観測から、約 1.4 M_{\odot} の 2 星がおよそ 8 時間の軌道周期で連星系を構成していること、その軌道周期の減少は重力波放出によるものであることが分っている。この連星系は重力波放出による軌道の収縮を続け、 10^8 年後には合体してしまう。合体の直前には、重力波発生率が急激に増大するため、軌道周期の変化も激しく、1 時間程で 10 Hz から 1 kHz へと公転周波数が移ってゆき、潮汐力による星の破壊が起るだろう。この連星系最後のさえずる(チャープと呼ばれる)ような重力波バーストが重力波検出の目標として注目されるようになったのは比較的最近のことである。この重力波バーストは超新星爆発のそれと比べて発生力の学的構造が簡単であり、周波数の変化の仕方も予想できるという利点がある。この点を利用すれば、重力波の振幅と周波数変化の観測から重力波源までの距離が推定できるので、ハッブル定数の決定に役立つことができるという提案(B. F. Schutz, 1986)までである。波形の情報から重力波発生絶対値が分かり、測定される振幅との比較で距離が求まるという図式で、単純にモデル化できる重力波発生源ならではの利点と言えよう。

このようなコンパクト星同士の連星系の合体はどれだけの頻度で起るのだろうか。パルサーの統計から予想される頻度は、我々の銀河系の中でおよそ $2\cdot 10^5$ 年に 1 回である。したがって乙女座銀河団まで広げると 100 年に 1 回、100 Mpc 以内では 1 年に 3 回の現象ということになる。ただし、我々の銀河系で PSR 1913+16 ただ 1 例からの統計であるから、不定性は相当に大きい。予想される重力波の振幅は、PSR 1913+16 の場合 (10^8 年後!) $h\sim 10^{-18}$ 、100 Mpc の現象からは $h\sim 10^{-22}$ である。

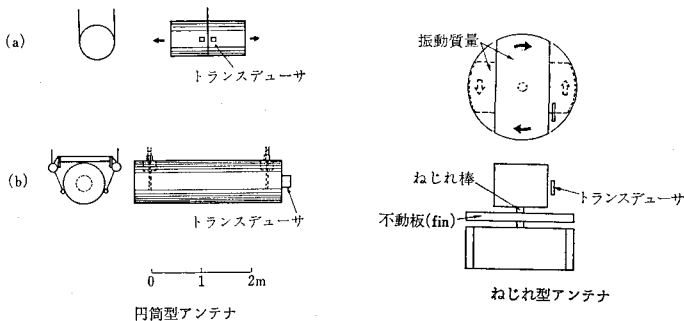
(iv) 背景的重力波源 個々の重力波源に分離することの困難な重力波は、時間的にも空間的にもランダムに分布しているものとして取り扱う。典型的なものとしては、宇宙初期の宇宙背景輻射、銀河形成に伴う重力波放射、多数の連星系からの重力波などが考えられる。このような確率過程的な重力波の大きさを表わすのに、中心周波数 f に等しい周波数幅で見た時の平均振幅 $h(f)\sqrt{f}$ を用いる。ここで $h(f)$ は h のスペクトル密度の平方根である。この中心周波数 f で周波数幅 f の重力波のエネルギー密度は、宇宙の臨界密度との比で論じられることも多い。

このほかにも、最近 X 線源として注目されているアクリンションによってスピニングアップされた中性子星の X 線強度に比例した重力波放出などが最近議論されている。各発生源の予想値が、バースト的、連続的、背景的に分けて図 4~図 6 に示されている。

こうした重力波発生議論は、様々な手段の天文観測結果から天文現象のモデル(構造や頻度など)を推定する部分と、モデルが与えられた場合に発生する重力波の大きさや波形を推定する相対論的理論計算の部分に大別される。最近著しい進展をみせる後者は、波形予想による最適フィルターによって検出に役立つだけでなく、重力波が検出された場合にモデルの可否を判定し重力波独自による天文情報をひき出すのに有用である。一方、前者に関しては、今迄の天文学の歴史が示すように一つの新観測事実で大きく変わる可能性もあるので、重力波検出に際しても一応の目安を与えるものと考え、事前予想にとらわれることなく感度が上がるたびに観測してみる態度が必要であろう。

3. 重力波の検出装置

重力波の検出原理は簡単である。2 つの質点の間隔が重力波の通過に伴って変化するのを検出すれば良い。2 つの質点が互いに自由(重力以外の力が働かない状態)であるか、結合されているかによって、検出方式が分類される。



(a) Weber の初期のアンテナ (1660 Hz, 1400 kg, 室温)
 (b) Stanford 大学のアンテナ (840 Hz, 4800 kg, 4.3 K)

図 1 共振質量型重力波アンテナの例

(i) 共振質量型 Weberの先駆の実験以来、世界各地で用いられたのがこのタイプの検出装置である。2つの質点をバネで結合して共振振動子として働かせるタイプで、実際には弾性体の固有振動モードに対して等価的な質点とバネが考えられる。重力波によって揺り動かされた質点の運動は振動子の振動状態を変えてしまう。この振動状態の変化で重力波の存在を知ろうとするのがこの方式である。振動子の状態を変化させる重力波以外の原因および振動子の状態を知るための検出器の雑音によって重力波検出の感度が決まる。振動子の状態を変化させる原因としては、外来振動、宇宙線などによるものや検出器の反作用によるもののような外因と、振動子の熱振動あるいは零点振動のような内因がある。これらを減少させて重力波に対する感度を高めるためには、できるだけ質量・サイズ共に大きい振動子を内部損失が可能な限り小さくなるような材料・形状・支持法で作作り、十分な外来雑音除去の上で、極低温まで冷却すること、および低雑音の微小振動検出器を開発してインピーダンス整合のもとに使用することである。

現在米国スタンフォード大学で働いているアンテナは、4.2Kに冷却された4.8tのアルミ円柱で、誘導コイルとSQUID(超伝導量子干渉計)によってその振動を検出するもので、約1kHzの重力波バーストに対する最小検出可能振幅は $h \sim 10^{-18}$ が達成されている。このアンテナは、最終的には 10^{-2} Kまで冷却され、同じく開発中の雑音温度 10^{-7} Kという量子限界ぎりぎりの性能をもつSQUIDと組み合わせられて、 $h \sim 10^{-21}$ の感度を達成すべく研究開発が進められている。また同様なアンテナは、米国メリーランド大学、イローマ大学などでも建設されている。

(ii) 干渉計型 自由な質点の間隔 l は、振幅 h の重力波によって $\Delta l = hl$ だけ変化する。この間隔変化をレーザー干渉計によって測定するのが干渉計型重力波アンテナである。これは通常、直角二等辺三角形の各頂点にミラーのついた質量を配置して、3つのミラーによりマイケルソン型干渉計を構成したものである。地上の装置では完全に自由な質点の実現は不可能であるが、ワイヤーで釣り下げられた質量は、その振り子の周波数に比べて十分に高い周波数の水平方向の力に対しては、ほぼ自

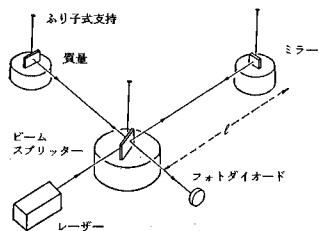


図2 干渉計型重力波アンテナの原理

由な質点として振舞う。重力波がこの干渉計を通過すると、二等辺のうちの一辺は縮み、別の一辺は伸びるため干渉縞の変化が生じる。それを光子検出器で測定するのである。重力波に対する感度は、干渉計の腕の長さとして、どれだけ微細な干渉縞の変化が検出可能であるかで決まる。腕の長さを等価的に伸ばすため光路が重ならないようにして何回もミラーの間を往復させる方式(delay-line型)や、変位に対する干渉縞の変化の割合を拡大するために同じ光路を多重往復させて光学共振器を構成する方式(Fabry-Perot型)が使われている。一方、干渉縞の変化に対する検出感度を高めるためには、レーザーの周波数安定度を高めること、出力を増して光子のショット雑音を減らすことが必要である。干渉計内の有効な光子数を増やすために、出力した光子をくり返し入力して使うリサイクル方式や、周期的な重力波に同期して腕を交替しながらリサイクルを行うことで積分効果を高める共振型リサイクル方式なども研究されている。干渉計型アンテナは、原理的にはどのような周波数成分の重力波に対しても感じるが、実際には地面の振動の影響やミラー支持部の熱雑音のために、数10Hz以下では感度が劣化する。西独マックス・プランク研究所や米国カルフォルニア工科大学などでは30mから40mの腕の長さの干渉計が作られ、1kHzより高い周波数では、光子のショット雑音で決まる感度に近い雑音レベルが得られている。これは1kHzの周波数幅の平均振幅で 10^{-17} に相当する。現在、これらのグループなどから、1kmから4kmの腕の長さで100Wのレーザー光を用いる干渉計型アンテナの建設計画が出されていて、最終目標は $h \leq 10^{-22}$ のバースト重力波や $h \sim 10^{-27}$ の連続重力波が検出可能な感度を達成することとされている。

(iii) その他の検出法 人工天体のドップラー追跡データや、パルサーのタイミングデータなどを解析することによって、観測された電磁波の周波数や伝播時間にあらわれた重力波の影響を推定することが可能である。この方法の感度は、伝播路の媒質によるシンチレーションや遅れの決定精度、観測に使用する時計の安定度、受信

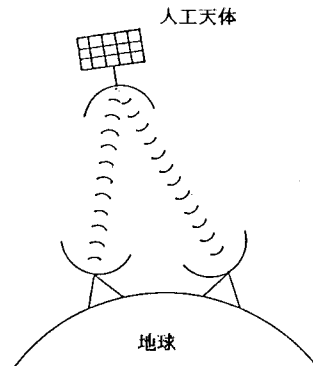


図3 人工天体のドップラー・トラッキング

雑音や観測精度などによって決定される。この方法は地上の装置では実現困難な 1 Hz 以下の低周波の重力波、特に背景的重力波に関する情報を与えてくれる。

4. 日本の重力波研究

日本での重力波検出実験は、Weber の発表に刺激されて 1970 年に東大理学部物理学教室の平川研究室で開始された。Weber の重力波バースト (1660 Hz) に対する周波数スペクトルの情報を得ようとして、1桁低い周波数である 100 Hz 領域の共振型アンテナの開発を行い、これに付随したアンテナ支持方式の研究や静電型トランスデューサーの開発がなされた。この低周波アンテナの開発は、かにパルサーからの連続重力波 (60 Hz) 探査への応用や、動的重力場の方法による重力波二乗則の検証実験への応用へとつながり、周波数同調技術の開発や Cold Damping 法の確立などもなされた。一方、内部損失の小さいアルミ合金 (5056) を発見して、世界各地の重力波実験グループがアンテナ材料として採用することになった。さらに、内部損失の小さい低周波共振アンテナとしてねじれ型アンテナを発明して、連続重力波に対する高感度アンテナを可能にした。また、超電導 cavity 型トランスデューサーの開発においても独自の工夫がなされている。

大型の共振型アンテナを建設して極低温に冷却するといった大型計画については、国際的に 10 年近く遅れているが、上述したような点での日本のグループの独創性や貢献度は、国際的にも十分評価されている。

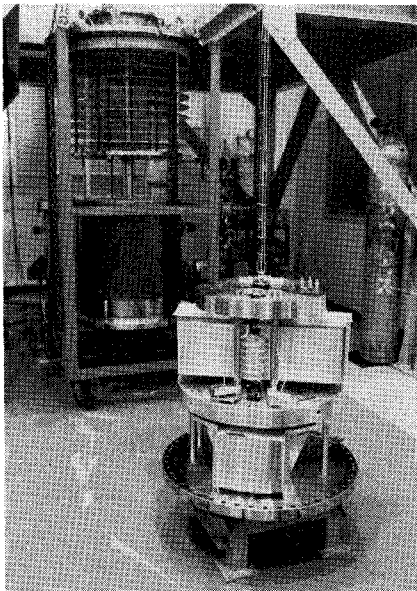


写真 1 かにパルサーからの重力波の探査用重力波アンテナ。74 kg のねじれ型アンテナ (手前) と液体ヘリウム冷却用クライオスタットの内部容器 (後方)。(東京大学と高エネルギー物理学研究所との共同実験)

ここ数年来、極低温に冷却した重力波アンテナを用いた実験も開始し、その大型化も進めつつある。

一方、理論面では京大の数値相対論グループを中心にした活躍はめざましいものがある。重力波の発生については、軸対称重力崩壊の数値計算や半解析的な解釈、ブラック・ホールの準固有振動とテスト粒子の制動による重力波放出の解釈、非軸対称重力崩壊の数値計算の開始など重力波天文学にとって欠くことのできない研究がなされている。

また、未だ実績はないが、レーザー干渉計型アンテナについてプロトタイプが宇宙科学研究所で作られつつあり、東京天文台でも基礎的な検討を始めている。

5. 重力波天文学への道

現在欧米で進められている重力波アンテナの計画はその最終目標の感度が達成されれば、天体重力波が検出される可能性は大きいと思われる。図 4~図 6 は、それぞれバースト重力波、連続重力波、背景的重力波について、考えられる発生源からの重力波と計画されている重力波アンテナの感度を周波数と振幅で示したものである (PHYSICS THROUGH THE 1990s, National Academy Press, 1986, より)。これには、本文で論じなかった宇宙空間でのレーザー干渉計計画も含まれている。発生源の不確実性については先に述べたが、アンテナ感度を算出する場合に仮定されている技術的前提についても注意して図を見る必要がある。例えば地上の装置として、共振

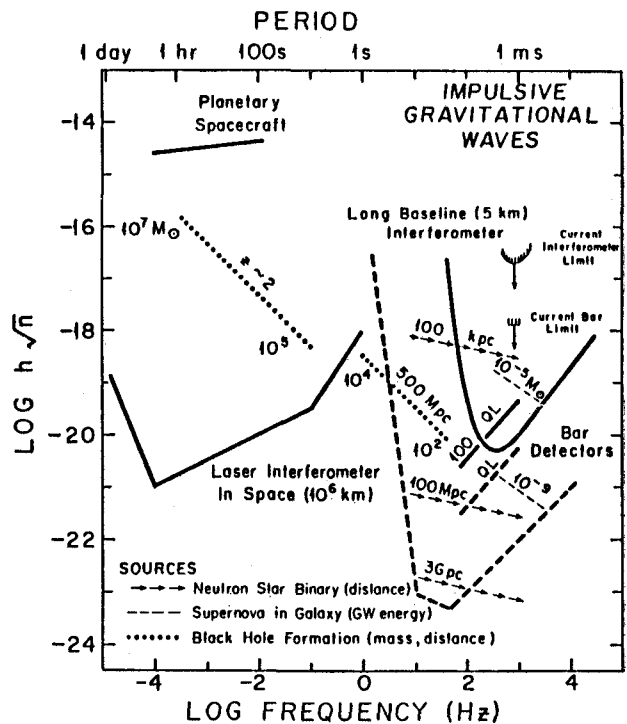


図 4 バースト重力波に対するアンテナ感度

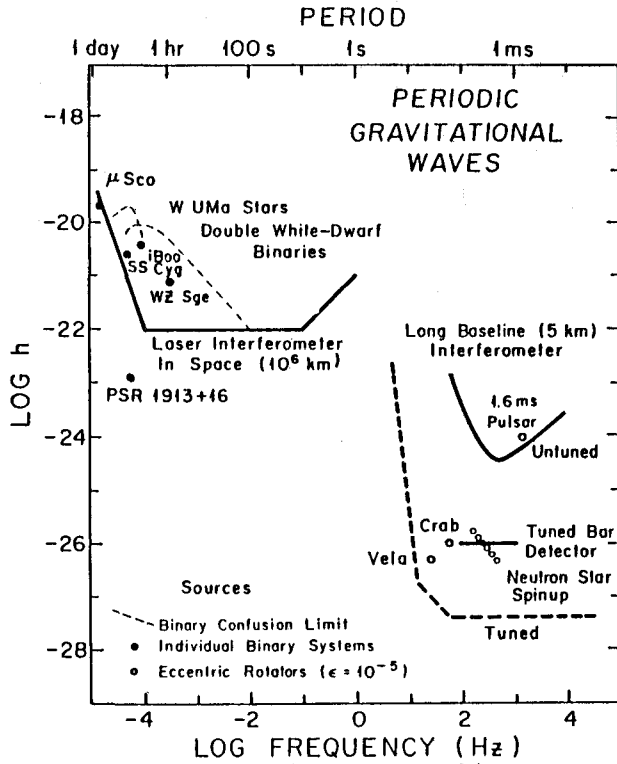


図 5 連続重力波に対するアンテナ感度

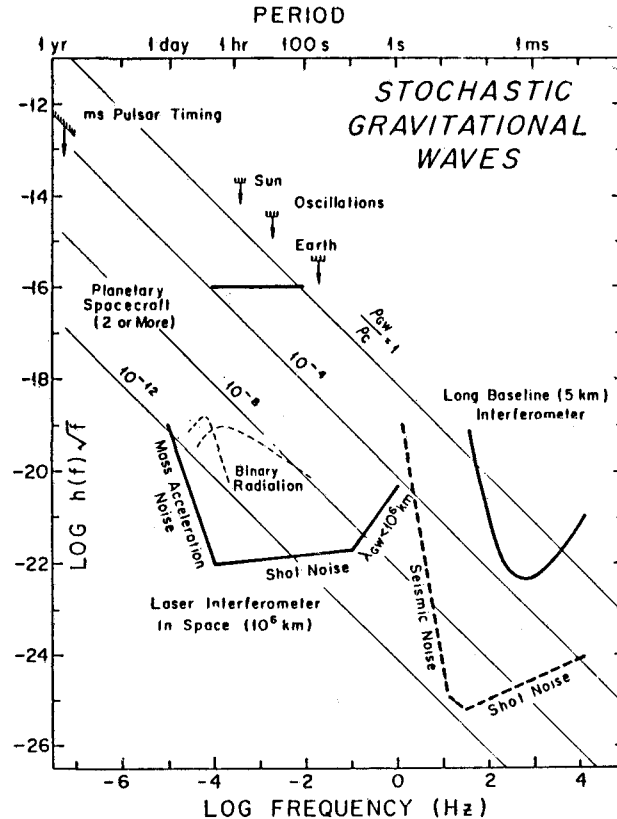


図 6 背景的重力波に対するアンテナ感度 (図中 ρ_c は宇宙の臨界密度)

質量型 (図で Bar Detectors) と干渉計型 (Long Baseline Interferometer) の感度を比べると、最終目的 (図で破線で示されている) では干渉計型の優位は動かないように見える。これは原理的には正しいが、実際の技術上の実現性を考慮すると必ずしもそうとは言い切れない所がある。共振質量型の場合に量子限界の検出器を実現することは、干渉計型で 100 W のレーザー光をリサイクルして使用する技術や 10 Hz 以上で十分に防振されたミラーを制御する技術に比べて、過去の技術の蓄積からも容易であるかも知れないからだ。干渉計型の計画がプロトタイプをスケールアップしたものであるのに対して、共振質量型の計画が既に働いている装置のグレードアップである点でもより実現度は高い。すなわち、当面の目標 (図の実線) では感度としては同じ程度で現実性は共振質量型がやや有利と言える。

このように、原理的なことや実際的なことを考えると、当面は 2 つの型の装置は並行して開発が進められるべきであろう。日本においても、共振質量型アンテナによる連続重力波検出の試みのような独創的な研究をさらに発展させること、干渉計型アンテナに対しても日本の技術力の高さを生かすような開発的研究や共振質量型で発揮したような独創的で基礎的な研究を開始することが必要である。最終目的の実現のためにクリアすべき難問の多さを考えれば、まだ日本の研究者が十分に貢献し、重力波検出の国際競争と国際協力に参加する余地は十分に残されている。

これから 10 年ないし 20 年かかるかも知れない重力波天文学の扉を開くための研究は、今迄の日本の天文学研究のやり方からすれば、全く非能率的で成果の出ない面白味のない研究と見えるかも知れない。しかしながら、例えば、本文では説明する余地がなかった量子非破壊測定法 (Quantum Non Demolition measurement) のように重力波検出における問題から出発しながら量子光学をはじめ物理計測技術の最先端の問題にまで広がる研究上の寄り道 (天文学から見れば) を楽しむゆとりこそ、新しい学問を拓くために日本の研究者に求められているのかも知れない。

日本の重力波研究や相対論実験にとってかけがえのない学識と人柄を持っておられた平川浩正先生 (東大・理・物理教授、日本天文学会の会員でもあられた) が昨年 11 月に亡くなられた。平川研究室でなされた数々のユニークな研究を進展させ、重力波検出のために貢献することが先生のご遺志を継ぐことになると確信している。