



重力波天文学

藤本 眞 克

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: fujimoto@gravity.mtk.nao.ac.jp

重力波天文学という言葉が使われるようになって既に4半世紀が経過した。残念ながら当初の楽観的な予想は裏切られ、未だに重力波観測は実現せず、言葉や理論的予想だけが先行する状態が続いている。それでも、連星パルサーの発見と観測によって重力波発生の間接的証明がなされ、液体ヘリウム冷却の共振型重力波アンテナによる長期運転や大型レーザー干渉計重力波アンテナの建設開始など技術面での着実な前進が行われており、重力波天文学実現への期待は増している。ここでは重力波天文学に期待されるものを概観し、重力波検出装置開発の現状と展望を述べる。

1. 連星パルサーによる重力波の証明

重力は万有引力とも呼ばれ全ての物体に付随したものであり、重力波は重力の変動が波動として伝わっていくものであるから、ほとんどの物体が原理的には重力波を発生していることになる。しかしながら、ほとんどの物体から実際に放出される重力波は極めて微弱で、宇宙年齢の間積算したとしても、その影響は無視できるほどである。それは、重力の作用が電磁気力に比べてけた違いに弱いためである。累積効果で重力が支配的になる天体現象においても、重力波の発生やその効果は通常極めて小さい。重力波が問題になるのは、宇宙でも「普通ではない」場面においてである。

重力波の効果がはじめに観測されたのは、連星パルサーの公転周期の減少としてである¹⁾。2つの中性子星が互いのまわりを回っている公転軌道運動によって、周囲の重力場が変動し、その変動が外向きに波として伝搬していく。それが重力波の発生であり、その反作用で連星系のエネルギーが失われ、連星の軌道が縮んで公転周期が減少しているのである。この発見は「普通でない」連星中性子星の存在と同時に、重力波発生を間接的に証明した。さらに、その後類似の連星パルサーが発

見されるにおよんで、「普通でない」連星中性子星もそれほど特異なものではなく普遍的な存在であることが示された。重力波を放出しながら徐々に公転軌道を縮めていって、最後には2つの中性子星が衝突・合体するシナリオも普遍的なものと考えられ、強い重力波バーストの有力な発生源となった。これは、重力波で見る宇宙像つまり重力波天文学の世界が実在することを確信させるものであった。

2. 超新星爆発と重力波

重力波が問題になる「普通でない」天体現象の有力な候補として、昔から超新星爆発が挙げられている。超新星爆発に至る星の進化の過程については、この60年間にかなり詳細に理解できるようになってきた。球対称モデルに基づく理解が大筋で正しいことは、1987年2月に起こった16万光年かなたの大マゼラン雲での超新星爆発が証明した。この爆発に伴ってニュートリノが日本とアメリカでそれぞれ検出され、ニュートリノ天文学がスタートした。観測されたニュートリノは超新星爆発の中心部で予想通りの核反応が起きていることを示していた。しかし、重力崩壊から爆発に転じるあたりの様子や原因については、理論的な研究でもまだ不確かなことが多く、最後まで球対称を保つ

かどうかは疑わしい。ニュートリノは確かに発生していたが、超新星爆発時の中心付近の密度と温度が非常に高いために、その強い透過力をもってしても、途中で吸収や散乱の影響を受け、発生源から直接に地球上まで届いたわけではないため、中心部のはっきりした情報を知るには不十分である。ニュートリノよりさらに透過力に優れた重力波で超新星を見ることの意義は、そこにある。透過力だけでなく、重力波の発生メカニズムはニュートリノのそれとは大きく異なっており、重力波は超新星中心部で起こっているグローバルな物質のダイナミクスに伴って発生するため、超新星爆発の鍵となる爆発に転じる瞬間の情報が、重力波によって直接得られる可能性がある。

連星中性子星の衝突・合体と超新星爆発は、最も検出可能性の大きい重力波発生源であり、それらの重力波の周波数は地上の検出装置で検出しやすい数 10 Hz から数 kHz にあると予想される。これらは重力波観測周波数帯のうち最も高周波数帯に属するものである。なぜなら、太陽質量以上のブラックホールの準固有振動の周波数はたかだか 10 kHz であり、それより高い周波数は小質量に対応して重力波の強度が弱いためである。重力波天文学の周波数領域は、kHz ~ Hz ~ mHz ~ μ Hz に跨っており、低周波の方の限界は観測可能な時間で決まってくる。

3. 宇宙初期の重力波

最近の宇宙論では、宇宙の初期に起こった相転移によって、宇宙の大規模な構造である銀河や銀河団が密集した壁状の構造、グレートウォールや、銀河や銀河団などを作り出す重力場のゆらぎが生み出されたとされる。すべての力が宇宙のはじめには統一されて一つの力であったのが、宇宙膨張によって温度が下がるにつれて、次々と相転移がおこって重力、強い力、弱い力と電磁気力にわかれていったというシナリオである。こうした宇宙の相転移のときにどうしても相転移から取り残されたままで留まる領域が発生することが知られている。こ

の領域が点状ならモノポール、紐状なら宇宙紐（ストリング）、壁状ならドメインウォールと呼ばれるものである。このうち宇宙紐は長い紐が絡まりあうと交差した部分で切れて、たくさんのループ状の紐になる。このループ状の紐は振動して重力波を発生して消えてしまう。この宇宙紐は、銀河形成の種になる密度のゆらぎの大きさやサイズ分布が観測からの要請に都合良く合うことから、もしこの宇宙紐の振動による重力波がそのスペクトルもいっしょに観測されたら、相転移から銀河形成に至る宇宙論の問題への重要な手がかりが得られる。

インフレーション宇宙モデルの中には、相転移によって生まれたたくさんの宇宙の泡（部分的に存在する相転移を起こしていない領域）が相転移終了間際に衝突して大量の重力波を発生すると予言するものがある。この時の重力波は、地上の重力波検出装置が観測できるキロヘルツ付近の周波数スペクトルを持っており、予想されている強さも現在建設中の重力波検出装置ではわずかに届かないが、予定されている改良によって目標の感度まで向上されれば、十分に受信できる可能性がある。この重力波の観測によって、宇宙のインフレーションを生み出す相転移がどのように起こっているのか、その様子を見ることができると期待されている。

宇宙背景放射と類似のことが、重力波についても存在すると予想される。現在では極端に作用の小さい重力も、宇宙のきわめて初期には、宇宙のあらゆるものと一体になるほどに強力だったと考えられる。それが、重力を量子力学ではなく古典的に扱えるようになる Planck time 以降、重力波は宇宙の他の物質の状態には無関係に宇宙の中を自由に飛び回れるようになる。宇宙が重力波に対して晴れ上がる直前の熱平衡状態にある重力波は、電磁波と同様に宇宙膨張のドップラー効果を受けて、現在の我々に観測される。この「宇宙背景重力波放射」の黒体温度はおよそ 1 K と予想されている。

また、量子力学的な時空ゆらぎによって生成される重力波も、宇宙背景重力波放射として存在す

る。これらがどの程度の強さで観測されるかは、宇宙のインフレーションの大きさにもよるが、もし観測されるようになれば、宇宙の時空構造が現れた時点の、もっとも若い宇宙の姿を観測できることになる。

4. 他の重力波源

銀河中心部にあるブラックホールが銀河どうしの衝突のときに衝突したり合体して発生する重力波や、銀河中心部の巨大ブラックホールへの星やガスの落下で発生する重力波などが、銀河に関係する重力波の発生として考えられる。これらの重力波の周波数はブラックホールの質量によるが、mHz 以下と考えられる。こうした重力波を観測すれば、銀河の歴史や銀河の活動に関連したブラックホールのふるまいを知ることが可能になる。

最近話題になっているものでは、MACHO がある。MACHO がどんな天体であるのかは諸説あるが、一つの可能性としてブラックホールが示唆されている²⁾。もしそれが正しくてかなりの割合で連星系を構成しているとすると、連星中性子星の衝突・合体と同様に重力波を放出することが考えられ、重力波によって MACHO 天体が観測される可能性がある。

より「普通に近い」現実的なものとしては、白色矮星を含んだ連星系の公転による重力波や、中性子星や白色矮星が自転や振動することによって放出する重力波などが挙げられる。こうした重力波は弱い連続的に放射されており、確実に存在するものと言える。こうした重力波を観測することによって、天体の形状とその運動に影響をあたえる高密度天体の内部の物質の状態を予想することができる。

重力波天文学の本当の醍醐味は未知の現象の発見にある。しかし、本当に未知なものは発見されるまで説明のしようもないから、ここまで電磁波観測などから得られた現在の宇宙像に基づいて予想される重力波源とそこから何が分かるかについて述べた³⁾。

5. 重力波の望遠鏡

重力波の測定法には大別して2通りある。1つ

は、時空間の歪みを直接計測する方法で、レーザー干渉計、ドップラー測距、パルサーのタイミング測定などが該当する。もう1つは、重力波によって発生する状態変化を計測する方法で、共鳴振動子をアンテナとする共振型検出器がそれである。

前者は基本的には自由落下している物体間の距離を電磁波の伝搬によって計測する方法であり、各物体の外来および熱的な振動と電磁波の計測雑音が感度や周波数帯を制限する。後者は物体内の音波伝搬である弾性振動の状態変化を測定するものであり、熱的な弾性振動と状態変化を検出する検出器の雑音で感度が制限される。

どちらの方法にしろ、信号に対する指向性は広くほぼ全方位型であることが重力波望遠鏡の特徴である。指向性を増すための反射や屈折など集光法がないのが、ほとんど相互作用しない重力波の性質から来ているため、重力波源の方向を決めるには3ヶ所以上の望遠鏡で波の到達時間差を利用した幾何学的方法によるしか方法がない。しかし、それぞれの望遠鏡がカバーできる方向が広いことは、たまにしか発生しないバースト的な現象を観測するには適している。このような特徴を生かした天文観測には、重力波望遠鏡の国際的なネットワークが不可欠である。実際、地上で建設中や運転中の各国のレーザー干渉計や共振型アンテナの間で、ネットワークのためのデータの共通フォーマット化が進行している。

6. 共振型アンテナの現状と計画

共振型アンテナは重力波検出実験の開拓者である米メリーランド大の J. Weber が開発したもので、1969年に重力波イベントを発見したと発表して大騒ぎを巻き起こしたものである。その後の各グループによる追試で確認されずに、重力波によるものではないと結論付けられたが、この事件が重力波検出への4半世紀以上に及ぶ情熱に火を着けたことは間違いない。

円柱状のアルミ合金の弾性振動を検出してその

変化を調べる点では30年来変わりはないが、熱振動を抑えるためにアンテナ全体を液体ヘリウムで冷却し、振動検出器の雑音を下げするために、dc-SQUIDや超伝導空洞共振器が使われている。現在、ローマ大、西オーストラリア大、ルイジアナ州立大でそれぞれ、約2トンのアルミ合金（西オーストラリア大はニオブ）が液体ヘリウムで冷却され、長期間にわたって高稼働率で運転中で、約1 kHzでの重力波検出感度 $h \sim 6 \times 10^{-19}$ が達成されている⁴⁾。これは銀河系内で大きな重力波発生があれば、ぎりぎり検出可能なレベルである。

現在、ローマ大とパドヴァ大でそれぞれ、アンテナを100m Kに冷却して、感度を1桁上げるべく装置を建設・開発中である。

さらに高感度な共振アンテナとして球状のアンテナに量子雑音限界の検出器を組み合わせる計画が提案され、準備実験が行われている。1 kHz以上の重力波に対する感度では、レーザー干渉計の将来計画よりも優勢である⁵⁾。

7. レーザー干渉計の現状と計画

レーザー干渉計を用いて重力波を検出するというアイデアは共振型アンテナよりも古い。しかし、現在につながる徹底的な雑音源の考察はWeberの発表に刺激を受けた米MITのR. Weissが行い、1970年代の後半からミュンヘンとグラスゴー、のちにカルテクでそれぞれプロトタイプの研究がはじまった。1980年代の半ば頃に雑音源が特定できるレベルに到達し、数kmの基線長を持つ大型レーザー干渉計計画が提案され、1990年代に入って米国LIGO計画、仏伊VIRGO計画がそれぞれスタートし現在に至っている。

LIGO計画は米国内2ヶ所にそれぞれ基線長4 kmのレーザー干渉計を建設するもので、現在、土木建築工事がほぼ終了し(図1)、真空パイプの敷設も始まっている。現在の予定では2002年に第一段階の運転を開始し、 $h \sim 10^{-21}$ の感度で2年間の運転を行うことになっている。それに並行して、

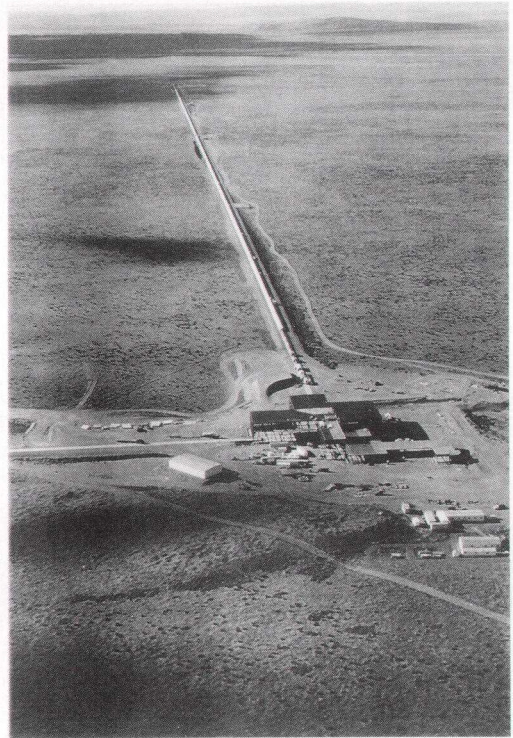


図1 米国ワシントン州ハンフォードに造成中のLIGO観測所(航空写真)。中央コーナーの実験棟や一辺4 kmの真空パイプの土台になるコンクリートのスラブや覆いが造られている。

$h \sim 10^{-22}$ へと感度を上げていくための開発研究が共同研究の形で来年から本格的に始まり、2002年から組込を始める計画になっている。

レーザー干渉計の感度は数100 Hz以上では光のショット雑音、数10 Hz以下は地面振動、中間領域は鏡の熱振動で制限されており、開発研究ではこれらを一一つ改良して段階的な感度向上を目指している。このうち、光のショット雑音を下げerには実効的な光パワーを上げる必要があり、レーザー自体のパワーアップと光リサイクルの利得を上げることが必要となるが、鏡の熱レンズ効果や光検出器の耐性などパワーアップに伴って解決すべき問題がたくさん出てくる。そのため、レーザー干渉計の感度を1 kHz近くで改良するのは容易ではなく、レーザー干渉計の感度は低周波側に良くなっていく傾向にある。これは、連星中性子星の衝

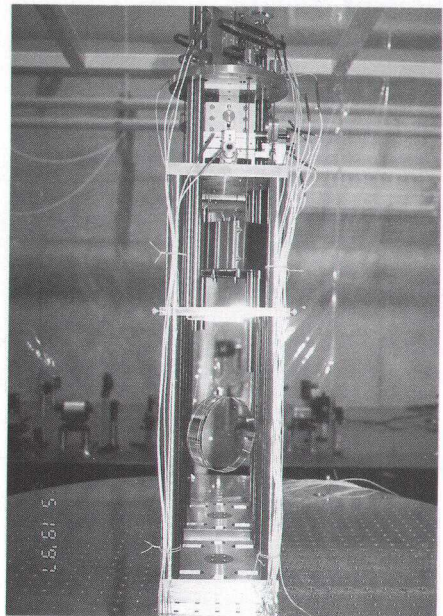
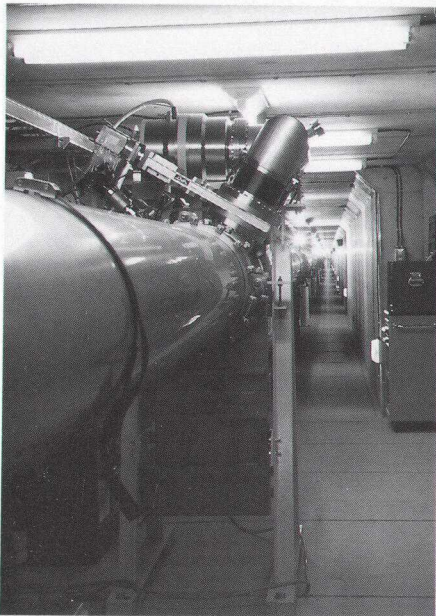
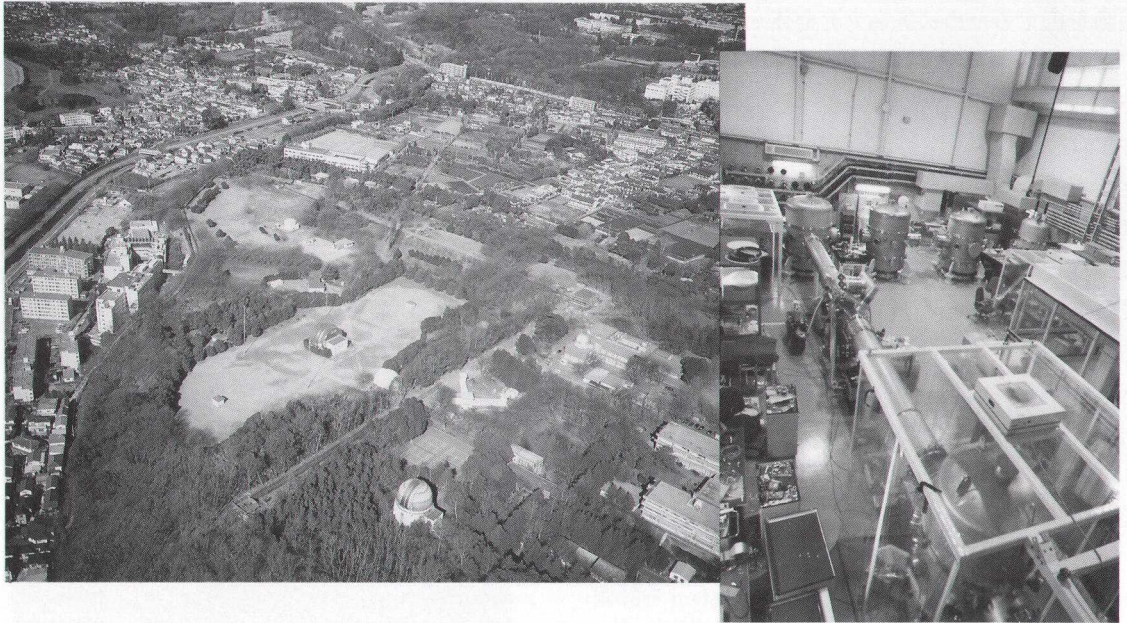


図2 国立天文台三鷹構内に建設中の TAMA300.

〈左上〉実験施設の全景（工事中の航空写真）。

一辺 300 m の直角な腕とコーナーに建設中の実験棟が見える。

〈左下〉地下配管路の中に設置された全長 300 m、直径 40 cm の真空パイプ。

〈右上〉中央コーナーの実験棟内部に設置された真空槽。各々の真空槽に干渉計を構成するミラーがそれぞれ入る。

〈右下〉真空槽内部に設置された振り子式に懸架されたミラー。

突前の出来るだけ長時間を観測する目的に合致するものではあるが、最後の最も相対論的な現象を逃すことにもなりうる。これをカバーしうるのが、前に述べたように共振型アンテナかも知れない。

8. 中規模レーザー干渉計 TAMA 300

我が国はレーザー干渉計による重力波検出では1990年代に入ってから遅れたスタートであった。国立天文台に作った20 mプロトタイプ干渉計では、後発の利点を生かして、当初から大型干渉計と同じ方式をできるだけ採用し、レーザーやミラーなども技術進歩の恩恵を受けることができたため、外国のプロトタイプに先駆けた新しい方式でのシステム運転を行うことができたが⁶⁾、感度を極限まで引き出すための細かいノウハウの蓄積やシステムの整備という点では不十分なところも多かった。

引き続き建設することになった中規模レーザー干渉計 TAMA 300 は、このクラスで世界で初めて稼働する干渉計になる予定であり、要求される技術レベルは LIGO の第一段階に匹敵するものであるため⁷⁾、国際的にもその正否が注目されている。現在、建物、真空槽など周辺の整備がほぼ終了して、干渉計システムへの組み上げ作業を部分的に開始し出したところである(図2)。20 mプロトタイプでのこれまでの経験を生かし、必要に応じてプロトタイプでのテストを並行して行いながら、組込の実験を行っている。目標の感度はリサイクルなしの運転で現在の世界最高感度より1桁高い、 $h \sim 3 \times 10^{-20}$ を達成しようというものである。これが達成されると、次にリサイクルによってさらに高感度化を目指す計画である。世界に先駆けて未踏の領域に踏み込む訳で、楽観は出来ないが、何か出てきても原因をきちんと特定し評価できれば大きな国際貢献になると考えて、前向きに計画を進めるつもりである。

9. 重力波天文学の将来

現在は地上の重力波検出装置を必死で開発している段階であるが、重力波天文学の将来はどのよ

うに展開していくのだろうか。未知の発見の内容によるが、おそらく低周波の重力波検出を求めてスペースでの重力波望遠鏡が必要になると思われる。スペースは雑音の点では地上よりも技術的にやさしい。基線が長いので、熱雑音は効かず、地面振動もなく、重力勾配の変動も小さい。さらに低周波ではショット雑音が低いので光パワーは小さいもので良い。スペース特有の問題があるにしても、地上で重力波検出を成し遂げた技術があれば、解決は容易だろう。問題は、多数の重力波源の混信をどうやって分離するかにあるかも知れない。なにしろ、重力波は遮閉できないので、感度を上げすぎると、あらゆるものが聞こえてくるのだ。それに、低周波の信号では、連続波もバーストもストカスティックな信号も観測時間内では区別がつかないかも知れない。このような贅沢な悩みで頭を使う時代がはやく来てほしいものである。

参考文献

- 1) Taylor, J.H. et al. 1979, *Nature* 277, 437
- 2) 中村卓史, 1997, *日本物理学会誌*, 52, 843
- 3) Thorne, K.S. 1987, *Three hundred years of gravitation*, ed. S.W.Hawking and W.Israel, Chap.9 (Cambridge Univ. Press, Cambridge)
- 4) Pallottino, G.V. 1997, *Gravitational Waves: Sources and Detectors*, ed. I. Ciufolini and F. Fidecaro, p.159 (World Scientific, Singapore)
- 5) Cerdonio, M. et al. 1997, *Gravitational Waves: Sources and Detectors*, ed. I. Ciufolini and F. Fidecaro, p.176 (World Scientific, Singapore)
- 6) Araya, A. et al. 1997, *Applied Optics*, 36, 1446
- 7) 三尾典克, 1997, *応用物理*, 66, 939

Gravitational Wave Astronomy

Masa-Katsu FUJIMOTO

National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: For more than a quarter of a century, gravitational wave astronomy is expected eagerly to become an important field of astronomy, but is still an open region of science, since no gravitational wave has yet been detected. In this paper, possible sources of gravitational wave and their meanings are surveyed. Current status and recent progress in the development of gravitational wave detectors are also briefly reviewed.