

惑星探査機のドップラー追跡による重力波検出

戎崎 俊一¹

1. 重力波とは

重力波はアインシュタインが一般相対論で予言した時空の振動で、電磁波のように光速で伝わる。重力波は巨大な質量が光速に近い速度で運動するとき発生する。たとえば、超新星の原因となる星の重力崩壊や、中性子星やブラックホールなどの衝突などである。重力波が通過したとき、すべての質量は加速度を感じる。したがって、重力波は二つの質点の相対距離の変化で検出できる。

重力波検出の試みはたくさんの研究者によってなされてきたが、まだ誰もが納得できるようなシグナルは検出されていない。というのは天体で作られて地球にやってくる重力波の振幅が極端に小さいからである。われわれの銀河内で超新星が発生したとき、それに伴う重力波バーストの相対振幅は 10^{-18} 程度である。つまり、距離1mに対する変化幅は原子核の大きさ ($\sim 10^{-15}$ m) の1/1000のオーダーしかないことになる。現在この程度の重力波は検出できるようになっている。しかし、それでもまだ十分ではない。というのはわれわれの銀河内で発生する星の超新星は多めに見積もっても数十年に一度しかないからである。これでは人間のライフサイクルに比べて長すぎる。乙女座銀河団には数百個ぐらいの銀河が集まっているので一年に数回ぐらいは重力波バーストを伴う型の超新星が発生していると期待される。しかし、乙女座銀河団からくる重力波バーストを検出するためには、さらに3桁以上検出限界を下げなければならない [1, 2]。これを目標に各国で精力的に技術開発がなされているが、まだまだ道は遠いといわざるをえない。

しかし、重力波を発生するまったく別のメカニズムがある。銀河の中心にある巨大ブラックホールの合体である [1, 3]。多くの銀河の中心には太陽質量の1億倍程度の質量を持つ巨大ブラックホールが存在することが知られている。2つの銀河が衝突・合体すると、それらの中心にある巨大ブラックホールも合体する。このような巨大ブラックホールの合体はクェーサーなどの活動的銀河核の活動を誘発するのではないかと注目を集めている。もちろんこの合体の際、強い重力波バーストが発生する。波源が2Gpcと非常に遠い(宇宙膨張による後退速度が光速の50%を超える)距離にあっても、地球における振幅は 10^{-15} とかなり大きい。しかも、その頻度は数年に一度とわれわれの銀河で発生する超新星よりも高い。ただし、その周期は1,000秒から10,000秒と長く(星の重力崩壊の場合1ミリ秒程度)、地上ではノイズが邪魔をして検出は困難である。しかし、惑星探査機と地球の相対速度の変化を監視することにより、このような長周期の重力波を検出することができる。実際、ボイジャーやパイキング、ユリシーズなどの惑星探査機を使って実験がなされ、 3×10^{-14} の検出限界を得ている。しかも、もう1桁以上検出限界を下げる方法は後に述べるように、すでに提案されている。

2節では巨大ブラックホール合体による重力波バーストの頻度を見積もり、その天体物理学的な意義を考察する。3節で、惑星探査機のドップラー追跡による重力波検出の原理を説明し、現在の実験の検出限界を決めているノイズ源とそれを克服する方法について考察する。4節で長周期重力波の検出のための具体的な提案を行う。

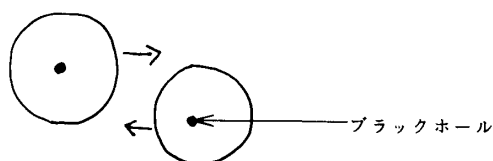
¹東京大学教養学部宇宙地球科学教室

2. 巨大ブラックホールの合体による重力波バースト

銀河が衝突したとき、その軌道運動は効率よく銀河の内部運動に変換される。つまり、銀河同士の衝突は非弾性的である。その結果、相対速度が比較的小さい場合には衝突をした銀河同士は合体する。銀河の約30%を占める楕円銀河はこのような衝突・合体でできたと考えられる説が有力である[5, 6]。また、クエーサーなどの活動的銀河核の活動が銀河の合体によってトリガーされるのという説も注目を集めている。

銀河が衝突・合体したとき、その中心にある巨

(a) 母銀河の衝突



(b) 母銀河の合体



(c) ブラックホールの合体



図1 銀河の合体に伴うブラックホールの合体。巨大ブラックホールを持った銀河が合体すると、ブラックホールも合体する。そのとき強い重力波が放出される。このような巨大ブラックホールの合体の過程はクエーサー活動とも関係があるのではないかとされている。

大ブラックホールは力学的摩擦のせいで角運動量を失い、中心に向かって急速に落下する。銀河の合体後 10^9 年後にはその近心点は重力波を十分に放出できるほど近くなり、お互いに合体する(図1)[7, 8, 9]。ブラックホールが合体する瞬間は非常に強い重力波バーストを起こす。その典型的な周期は

$$P \sim \frac{3\pi\sqrt{3}GM}{\sigma^3}(1+Z) \\ = 8.2 \times 10^3 \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right) (1+Z) \text{ (sec)} \quad (1)$$

と見積られる[4]。ここに M はブラックホールの質量、 Z はブラックホールが合体した場所の宇宙論的赤方偏移である。赤方偏移が Z の天体は宇宙膨張による後退速度が光速の $Z/(1+Z)$ 倍になる。もちろん Z が大きいほどその天体は遠い。放出される重力波の周期はだいたい1時間ぐらいで星の重力崩壊による重力波(周期はミリ秒程度)より、ずっと長い。地球で期待される無次元振幅 h は

$$h = 2 \times 10^{-15} \left(\frac{1+Z}{Z} \right) \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \times \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right) \left(\frac{H_0}{100 \text{ km/s/Mpc}} \right) \quad (2)$$

と見積られる。ここで ϵ は重力波で放出されたエネルギーの、ブラックホールの静止質量に対する割合である。この値は乙女座銀河団で発生した星の重力崩壊による重力波バーストの振幅より6桁大きい。地球で観測されるバーストの頻度は

$$\tau \simeq 0.64 \left(\frac{n_{el}}{3.7 \times 10^{-3} / \text{Mpc}^3} \right) \left(\frac{N}{10} \right) \\ \times \left(\frac{H_0}{100 \text{ km/s/Mpc}} \right). \text{ (/yr)} \quad (3)$$

と見積られる。ここで n_{el} は立方 Mpc 当りの楕円銀河の数である。(3)式では、楕円銀河は平均 N 回合体を経験しているとし、 Z はクエーサーの存在密度が最大になる値2.7とした。また、すべての楕円銀河は $10^8 M_\odot$ のブラックホールを持つとした。この仮定は楕円銀河の全質量とそのコア半径が正

の相関を持つことと矛盾しない（詳しくは [7] を参照）。

以上を一言でまとめると次のようになろう。すなわち、銀河合体に伴う中心ブラックホールの合体による重力波バーストはその無次元振幅が 10^{-15} と大変大きく、数年に一度は発生する。

3. ドップラー追跡による重力波検出

探査機のドップラー追跡は普通探査機の位置を精度良く決定するのに使われる。まず、探査機に向かって地上局から電波を送信する (uplink)。探査機に登載されたトランスポンダは地球からやってきた電波を参照しながらその位相にロックした電波を地球に逆送信する (downlink)。探査機から帰ってきた電波を地上で受信し、そのドップラー偏移を調べることにより、探査機の地球に対する相対速度がわかる。

このような地球・探査機系に重力波が入射してくると特徴的な3つの山を持つシグナルがドップラー追跡のデータに現れる。まず、重力波が地球を叩いた瞬間、山がデータに現れる。また、その瞬間に送信した電波の位相は重力波のために乱されているので、探査機への往復の光路長だけ遅れた時間に別の山を作る。その間に重力波が探査機を叩いたことに対応する山が現れる (図2)。真中の山の他の二つの山に対する相対位置は地球と探査機を結ぶ線と重力波の入射方向で決まる。逆に、これを使って重力波の到来方向を決めることができる。

参照する時計が瞬間的に狂ったときは重力波とは違うパターンのシグナルを作る。受信局も送信局も同じ時計を参照しているときは、その時計が狂っても最初と最後の山だけ現れ、真中の探査機に対応する山は現れない。また、受信局が送信局

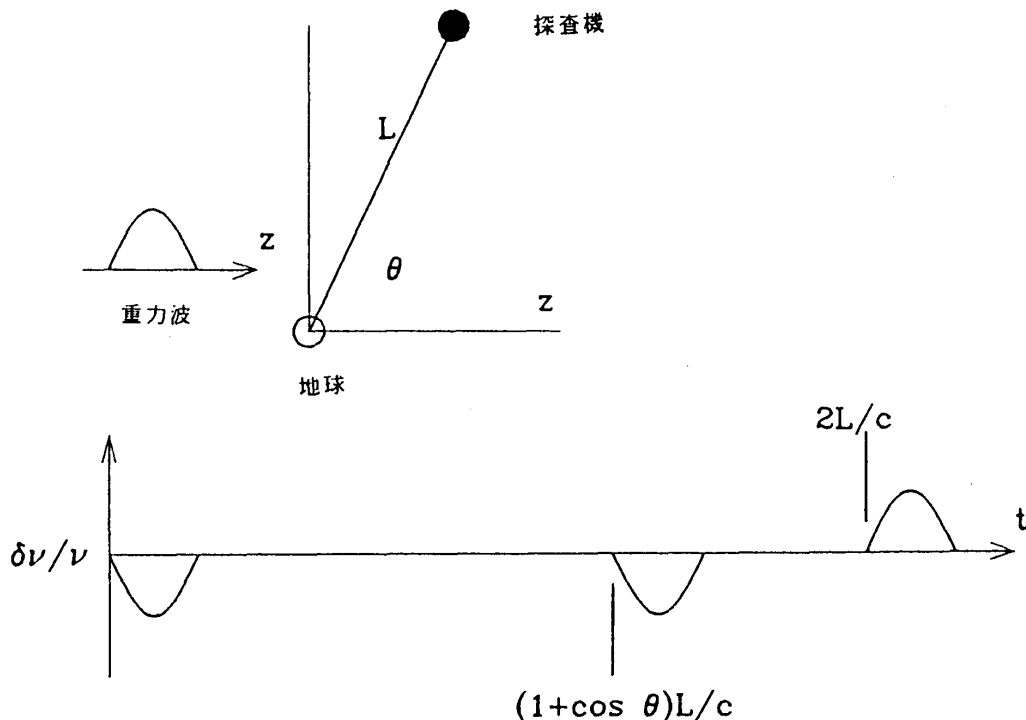


図2 地球・探査機系に重力波入射したとき、ドップラー追跡のデータに現れるシグナル。

と違う時計を参照しているときは、どちらの時計が狂ったかによって、最初と最後の山のどちらかだけ現れる。このように、複数の局で受信することで検出の信頼性を上げることができる。

ボイジャーや、バイキング、ユリシーズなどの惑星探査機を使ったドップラー追跡実験が何度か行われた [10, 11, 12]。地球近くの人工衛星では、基線が短かすぎ地球大気による対流圏遅延が相対的に重要になるので精度があがらない。

惑星探査機を使ったとき、ドップラー追跡の検出限界はどれも 3×10^{-14} 程度である [10, 11, 12]。これは惑星間空間に充満している太陽風プラズマによるプラズマ遅延の変動で決められている。プラズマ中を伝搬する電波の速度はプラズマ中の荷電粒子との相互作用で少しだけ光速より遅くなる。このプラズマ遅延は光路長で積分したプラズマのコラム密度に比例し、電波の周波数の自乗に逆比例する。太陽風の密度は場所により大きく違う。このムラムラが太陽風に乗って吹き流されるのでコラム密度も変動する。探査機が太陽と反対方向にあるときは、コラム密度自身が比較的小さいこと、太陽風の流線が光路とほぼ平行になることなどの原因で、プラズマ遅延の変動が小さい。この

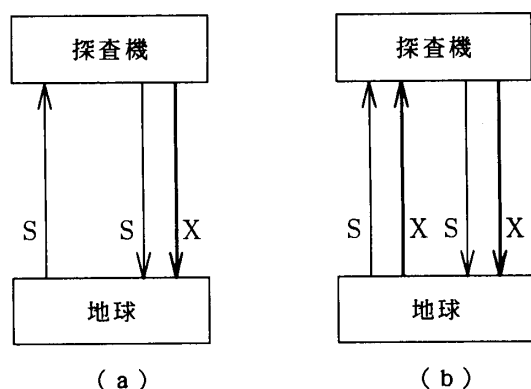


図3 (a)従来の追跡法. uplink には S バンドしか使われていない. (b)提案中の追跡法. uplink にも downlink にも S バンドと X バンドの 2 波長を用いる.

とき上記の 3×10^{-14} 程度検出限界を得ることができる。このような好条件の時期は 1 カ月位しか続かない。探査機が太陽に近いときはプラズマ遅延によるノイズが数倍以上大きいことが分かっている。このことも長時間観測が重要な重力波検出実験のネックになっていた [10, 11, 12]。

これまでの実験の問題点は downlink には S バンド (約 2.1GHz) と X バンド (約 8.3GHz) の 2 波長を使っているが, uplink には S バンドの 1 波長しか使っていないことである (図 3(a))。このため, downlink に関してはプラズマ遅延の周波数依存性を使って補償できるが, uplink に関してはそれができない。downlink 時と uplink 時では時間が違うので, プラズマの状態が大きく変わってしまうのである。

この問題点を解決するには, uplink にも S バンドと X バンドの 2 波長を使い, uplink 分のプラズマ遅延も補償できるようにすることである (図 3(b))。まず, X バンドは約 4 倍周波数が高いので, プラズマ遅延自身が S バンドより一桁以上小さい。これに S バンドのプラズマ遅延を使って補償すればプラズマ遅延によるノイズを実際上 0 にすることができる。こうすれば太陽との相対位置に関係なく, 良い精度で重力は検出実験ができるようになる [4, 13]。これはガリレオ計画で実行される予定だったが, 打ち上げ後, アンテナが故障し実現が困難になった。

プラズマ遅延がほぼ完全に補正できるようになると, 重力波の検出限界を決めるのは原子時計の精度と対流圏遅延である。問題となる数千秒ぐらいの時間尺度では水素メーザーを使った原子時計の精度は 3×10^{-15} 程度である。水素メーザーの次世代の原子時計として, レーザー冷却型セシウム時計, 原子泉方式原子時計, 光原子時計, イオントラップ原子時計などが開発中であり, 今までの精度向上率 (5 年で 1 桁) から見て, 10^{-15} を切る精度は十分達成可能できると思われる [14]。

対流圏遅延は地球の大気による電波の遅延であ

る。大気は中性なので遅延量はSバンドでもXバンドでも余り変わらない。したがって、プラズマ遅延のように両者の差から補正することができない。対流圏での遅延の変動による誤差は 4×10^{-15} 程度であると見積られている。これは2波長追跡では補正できないが、光や電波など極端に離れた2波長を用いれば補正できる。VLBIなどで用いられている対流圏遅延の補正方法をさらに改良し、オンラインで対流圏の遅延量をモニターし補正して、 10^{-15} まで押え込むことは可能である。

4. Planet-B への提案

宇宙科学研究所はわが国初の火星探査機 Planet-B を1996年に打ち上げる予定である。現在の計画では Planet-B も downlink のみ S・X バンドの2波長で、uplink は S バンドの1波長で行うことになっている。私は uplink も2波長を使うことを提案しているが、重量・電力に対する制限が厳しいこと、Xバンドの送信には地上施設を追加する必要があることなどで困難が多いと聞いている。2波長 uplink は無理でも、uplink を X バンドで行うだけでもプラズマ遅延によるノイズが一桁以上減り、重力波に対する検出限界が大幅に下がることが期待できる。Xバンドによる uplink だけでも実現できないかと考えている。

重力波の検出限界が 3×10^{-14} から 10^{-15} へ下がるということは、探査機の位置の精度が1km程度から、30m程度に向上するということである。特に、Planet-B の場合は観測結果の解釈に火星に対する相対位置が重要になると聞く。この点からもドップラー追跡の精度を上げるのは重要なのではないだろうか。

重力波の検出は物理学者のアインシュタイン以来の夢である。これを成し遂げればノーベル賞は間違いない。失礼ながら、Planet-B のどの観測計画も、たとえそれが大成功でも、とてもノーベル賞は無理である。ガリレオの故障でアメリカがもたついている間にさっさと実行してしまうのは、

多少の犠牲を払う価値は十分にあると思うのは私だけだろうか。

最も補正が困難な対流圏遅延を相対的に小さくするには、基線を長くすればよい。また、太陽から遠ざかるにつれて、太陽風の変動による探査機のみらつきも小さくなる。したがって、冥王星や海王星などへ向かう探査機を uplink も downlink も2波長を使ってドップラー追跡すれば、重力波の検出限界を大幅に下げることができる。さらに、そのような探査機が複数あれば、検出の信頼性を大幅にあげることができる上に、独力で重力波の到来方向を決めることができる。

参考文献

- [1] 早川幸男, 1990: 重力波天文学への招待, 数理科学 **11**, 5.
- [2] 早川幸男, 1991: 重力波天文学をめざして, 天文月報 **4**, 113.
- [3] Fukushige, T., Ebisuzaki, T., Makino, J., 1991: Gravitational Wave Burst Produced by Merging of Central Black Holes of Galaxies. *Astrophys. J. (Letters)*, in press.
- [4] Thorne, K. S., and Braginsky, V. B., 1976: Gravitational-Wave Bursts from the Nuclei of Distant Galaxies and Quasars: Proposal of Detection Using Doppler Tracking of Interplanetary Spacecraft, *Astrophys. J. (Letters)*, **204**, L1.
- [5] Toomre, A. and Toomre, J., 1972: Galactic Bridges and Tales, *Astrophys. J.*, **178**, 623.
- [6] Okumura, S. K., Ebisuzaki, T., and Makino, J., 1991: Kinematic Structure of Merger Remnants, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **43**, 781.
- [7] Ebisuzaki, T., Makino, J., and Okumura,

- S. K., 1991 : Merging of Two Galaxies with Central Black Holes, *Nature*, **352**, 212.
- [8] Fukushige, T., Ebisuzaki, T., and Makino, J., 1992 : Rapid Orbital Decay of Black Hole Binary in Merging Galaxies, *Publ. Astron. Soc. Japan* (in press).
- [9] Makino, J., Fukushige, T., Okumura, S. K., and Ebisuzaki, T., 1992 : Evolution of Massive Black Hole Binary in Merging Galaxies: I Evolution of Binary in Spherical Galaxy, submitted to *Publ. Astron. Soc. Japan*.
- [10] Hellings, R. W., Callahan, P. S., Anderson, J. D., and Moffet, A. T., 1980 : Spacecraft-Doppler Gravitational Wave Detection II, *Phys. Rev. D*, **23**, 844.
- [11] Armstrong, J. W., Woo, R., and Eastbrook, F. B., 1979 : Interplanetary Phase Scintillation and the Search for Very Low Frequency Gravitational Radiation, *Astrophys. J.*, **f230**, 570.
- [12] Bertotti, B., Ambrossi, R., Asmar, S. W., Brenkle, J. P., Comoretto, G., Giampier, G., Iess, L., Messeri, A., and Wahlquist, H. D., 1992 : The Gravitational Wave Experiment, *Astron. & Astrophys.*, **92**, 431.
- [13] Hellings R. W., 1979 : Detecting a Gravitational Radiation Background using Spacecraft Doppler Tracking, *Phys. Rev. Letters*, **43**, 470.
- [14] Vanier, J. and Audoin, C. 1989 : *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Vol. I, II (Adam Hilger, Bristol).