

重力波天文学は可能か？

藤 本 眞 克*

1. 地下室天文学

10 数年前までは、天文学といえばすぐ、星をながめる事を想い浮かべたものです。今や天文学も多様化の時代で、光による観測以外に、電波、赤外線、紫外線、X線、 γ 線によって宇宙像が描かれるようになりました。天文学とは無縁と思われるような、屋なお暗い地下室でも、天文学の進歩がなされています。古くから地味な観測が続けられている宇宙線観測や、地下深い金鉱にもぐってのニュートリノの検出がそうです。これからお話しする重力波の検出も、我々が地下室で実験を行なっているという意味で、地下室天文学の仲間に入るといいます。アンデラ天文学といえば、もっとびったり来るかも知れませんが。

2. 重力波

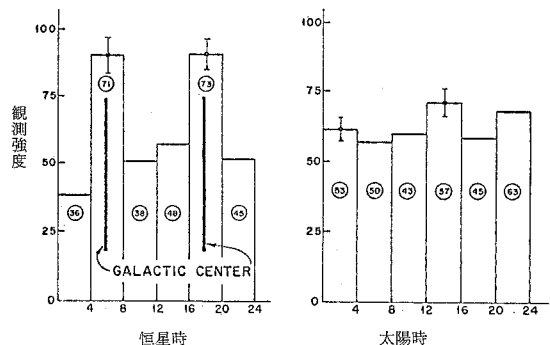
重力波とは何かという事から話を始めましょう。電波というのは、光速で伝わっていく電気的な力の場の波動の事ですが、重力波も同じように光速で伝わっていく重力の場の波動の事です。重力波の存在を理論的に予言したのはアインシュタインで、彼は自分の作った一般相対性理論を弱い重力場に適用すると、電波の場合と同じ形の波動方程式が導かれることを示したのです。

数学的な言い方をすれば、アインシュタイン方程式 $R_{ij} - \frac{1}{2}g^{ij}R = \kappa T^{ij}$ は、双曲型の偏微分方程式(非線型)ですから、特性曲面が存在して、これが波動の伝播面を表わす事になります。それでは、理論から導かれるから必ず実在するかといいますと、必ずしもその必要はないのです。いわゆる物理的に意味のない解かも知れないからです。重力波は、あったとしても何ら不思議はないけれど、無いからといって理論全体を否定する事にはなりません。結局、実際に存在を確かめるのが一番大切です。アインシュタインの予言以来、半世紀以上経過した現在でも、まだ重力波が本当にあるかないかの実験的検証にケリがついていません。米メリーランド大のウェーバー教授は過去 10 数年間世界でただ 1 人、重力波を検出しようと実験を続けています。そして 1969 年夏、いちおう重力波の存在が確認されたと発表しました。しかしながら、本来重力波の信号が非常に弱いために、熱雑音とほとんど等しい信号を取り出すという技術的困難

と、データの統計的処理の理解しにくさのために、ほとんどの学者が重力波の存在を認めるという段階にはまだ達していません。しかし、ウェーバー以来、重力波を検出しようとするグループが続々と名乗りをあげています。分かっているグループだけで、米 4、英 3、伊独ソ日各 1 グループが実験を計画しています。この中で特徴あるのは米のフェアバンクたちが、超伝導磁石の上に装置全体を浮かばせて(日本の国鉄が「夢の超特急」を浮かせようとしているのと同じ技術)、極超低温 $\sim 10^{-8}^{\circ}\text{K}$ まで冷やして熱雑音を落そうと計画している事です。大加速器と同じ規模だそうです。また、変わり種としては、テル・アビブの砂漠で、地球が重力波によってふるえるのを地震計でとらえようとしているグループもあります。これらのグループのうち、今年中にも結果が出るであろうグループが 2~3 あります、我が国でも、東大理学部物理学教室の平川研究室で検出装置を作製中で、この冬か来春に検出を開始できそうです。重力波の存在有無について、今年中にある程度の見通しが立つだろうと期待されます。

3. 重力波は銀河中心核から？

ウェーバーはひきつづき、その重力波が我々の銀河の中心部分から多く来ているらしいことを示しました。それは検出されたパルスの回数を太陽時で分類した時と恒星時で分類した時とで分布が異なるという事実です(第 1 図)。これは、パルスの原因が太陽系内の現象によるものではないことを意味します。それに、ちょうど検出器の感度が銀河の中心方向を向いている時に著しくパルスが増えています。だからパルスは銀河中心部から出てい



第 1 図 我々の銀河の中心核から重力波パルスが年間約 100 発来しているというウェーバーの観測。

* 東京大学理学部天文学教室
Can Gravitational Waves Change Astronomy?

るのだらうと推測できます。天文学でよく用いられる手法です。

4. 銀河は1億年で消える？

ウェーバーの装置の受信可能最低エネルギー流量は、 10^4 エルグ/cm²·sec ($\omega > 1,660$ Hz, $\Delta\omega \sim 0.1$) で、パルスが平均 2~3 日に1発の割合で受かっています。重力波の発生源が銀河中心核にあるとして、振動数の拡がり幅を適当に取り、等方放射を仮定すると、年間に重力波として出るエネルギーが約 10^{57} エルグ、つまり1年間に4個以上の太陽に相当する質量が失われていることとなります。我々の銀河は1億年でなくなってしまう！このエネルギー放出は天文学的に言っても大きいものです。例えば、準星が光で出すエネルギーが1年間で約 10^{55-56} エルグ、セイファート銀河が赤外線でも1年間に約 10^{52} エルグ、我々の銀河は年間約 10^{48} エルグなのですから。

5. 力学的情報にない手

エネルギーの考察から、重力波の持つ意味が大きいことが分かりましたが、重力波が力学的情報をもたらすという事は、天文学にとって大きな意味を持っています。天文的スケールの現象では常に重力(万有引力)が重大な役割を果している事はよく知られています。しかしながら今まで我々が得ていた宇宙の情報は、ほとんどが電磁気力についての情報でした。光の他、電波、ミリ波、赤外、紫外、X線、 γ 線これら全て電磁波です。我々はこれらの電磁気現象を基にして力学的構造を類推したり、核反応を予想するのがせいぜいでした。ところが最近ニュートリノ検出の試みによって核反応の直接的証拠が得られる可能性が出ています(天文月報1965年5月号解説、杉本大一郎)。重力波によって力学的情報が直接的に得られる可能性があるということは、天文学にとって非常に重大なことなのです。

6. ウェーバーの観測結果と真の発生エネルギー

現在のところ得られている情報は、① 1,660 Hz の周波数で、その10万分の1の周波数幅についてエネルギー流束が約 10^4 エルグ/cm²·sec、② ひん度は2~3日に1発で、継続時間0.4秒以下、③ 円筒型振動子(東西方向において)の指向性が銀河中心をふくむ方向にむいた時ひんばんに現象をとらえる事、ぐらいですが、これから天文学的重要性を議論するのは、相当たくさん仮定を加えなければできません。考えるべき事をまとめていくと、

i) 源の位置; 局所的に太陽近傍とは考えにくい。銀

河中心に局在しているか銀河全体に一樣分布しているかであるが、中心局在とした方が現象のエネルギーは小さくて済む。……重力波源は10キロパーセク(kpc)離れた銀河中心部にあるのだらうと仮定しましょう。

ii) エネルギースペクトル; 測定しているのは1,660 Hzのところ(幅 $\Delta\omega=0.1$)だけだが、1,660 Hzがたまたま狭い有効幅の中に入っているという事は考えにくいので、周波数スペクトルの有効幅は少なくとも 10^2 、多分 10^3 Hz以上あるのだらう。有効幅 10^3 Hzとするとエネルギー流束は 10^9 エルグ/cm²·secとなります。

iii) 重力波発生の指向性; 発生源は波を等方的に出しているかという問題……何らかの機構が働いて、太陽系をふくむせまい立体角 4ω にだけ重力波を放出していると等方的な場合は $4\omega/4\pi$ ですむことになります。これはまた輻射機構を通じてつぎの偏光ともかかわってきます。

iv) 偏波; 電磁波と同じように重力波にも2つの独立な偏波が存在し、非等方輻射の場合たぶんに偏波の可能性がある。……そのような偏光した波に対する振動子の感度は一般に異なりますから、ウェーバー式の振動子でも、方向とひん度を考えれば偏波の度合いがわかります。また平川研で現在製作中の四重極型の振動子だと、たがいに45°回転した方向に振動子をおくことによって各現象ごとの偏波までわかります。

これだけの準備をしておいて、まず等方輻射か、または各源は指向性あるが全体としてランダムなため等方輻射と同じである、場合を考えましょう。この場合に1回の現象は1~10太陽質量分で、数日に1回ですから、結局 10^8 年間のうちに銀河系全体がなくなってしまうこととなります。銀河の年齢 10^{10} 年といういまの考えに矛盾しますし、またシアマ、リース、フィールドが示したように、太陽近傍の星の運動(K項)から過去 10^8 年間に平均して $70 M_{\odot}$ /年以上の質量損失のないことにも矛盾しています。この矛盾から逃れるには、重力波についてどう考えたらよいでしょう。観測に重大な欠陥がある? それはもちろん完全に否定はできません。しかし、今まで天文学の歩んできた道をふりかえってみますと、理論的に予想されるよりはるかに奇妙な事が観測で見つかり、それが天文学の大きな進歩を促しています。今の場合も早とちりであることを恐れずに、少し理論的な検証を試みたいと思います。ウェーバーの観測を正しいとします。すると検討を要する仮定は、1つは輻射の指向性の有無、1つはスペクトル、さらに1つは「重力波活動性が 10^8 年にわたって定常的に続いているかどうか」です。ウェーバー以後、多くの理論家が前の2つの仮定

について検討し、重力波のあまりに大きい影響を少しでもへらそうとしていますので、以下にこれらの説を紹介しましょう。我々が考えている活動の再起性という3つめの仮定にも最後に少しふれたいと思います。

1つの現象で大きな重力波エネルギーを出す機構の捜査が行なわれました。星と星との衝突、巨大星のつぶれ、ブラックホール同志の衝突、星の脈動、星同志の合体、連星系の陥没などの可能性の研究です。もっとも、相対性理論の数学的複雑さのため、重力波放射のおきるほど相対論的効果大のところでは、厳密な計算はありません。しかし大体的見当はつけられているといつてよいでしょう。そして「星の質量に相当する大きなエネルギーを重力波として放出することは可能」であると考えられています。つぎに、観測される現象のひん度の問題です。相当星密度の高い恒星系が必要ですが、そのような系として、準星や銀河中心核のモデルとして考えられている星系よりもっと高密度な恒星系——グレイパーとよばれています——が考えられました。これは寿命が 10^{5-6} 年しかありませんから何らかの補給があります。しかし星にしるガスにしる大量に連続的に（定常的に）局所集中させることは非常に困難で、重要な役割を果すだろう角運動量輸送には、何か特に新しい機構でもない限り、 10^8 年以上はたっぷり時間がかかります。

こうした困難に直面して登場したのが、輻射の等方性に対する疑問でした。もちろん検出器の感度の再検討などもありましたが、エネルギー流束を大きくかえるのは不可能のようです。等方性を疑う輻射機構というのは、重力波シンクロトロン輻射の提案です。電磁波の場合、シンクロトロン輻射とは、超相対論的な（静止エネルギーにくらべて十分大きなエネルギーをもつという意味）荷電粒子が、磁場中をらせん状に運動するとき、粒子進行方向の極わめて小さな立体角に、回転周波数に比べて高い周波数の波を出す現象ですが、重力波の場合にも同様な効果が期待されるというのがミズナー（メリーランド大学）の提案です。彼によると、銀河中心部には大質量の早く回転しているブラックホールがあって、そこに星がそのまわりを回転しながら落ちこむ時に、重力波シンクロトロン輻射を發するだろうということです。銀河ではほとんどの星は同一平面内を同方向に回転していますから、發生する輻射も強く銀河面に集中することになります。太陽系の銀河面からのずれは1/1000以下ですから、球対称に出す場合の1/1000のエネルギーで足りる事になり、結局銀河系の質量損失は1年間に $1M_{\odot}$ 程度になって先ほどのべた矛盾はなくなります。さらにシンクロトロン輻射は高調波が効いているため、大きなブラックホールのまわりの回転からでも高い振動数の波が出せる

という利点があります。たとえば $10^7 M_{\odot}$ のブラックホールを1周するのに約1.1分かかりますが、それでも立体角 10^{-8} に絞ると $\omega \sim 10^4$ という波が出るということです。

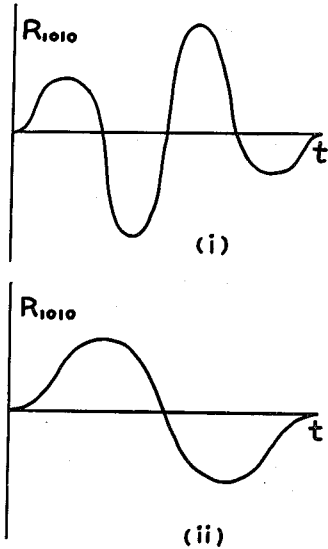
こうしてメデタシメデタシという事になりそうですが、まだよこぶのは早すぎます。ミズナー達が重力波シンクロトロン輻射の存在のデモンストレーションとして導いた計算は、実は重力波に対するものではありません。重力波というのは量子力学的描像でいいますとスピンの2の場合（粒子）です。ミズナー達の計算はスカラー場のスピン0の場合に対するもので、ベクトル場やテンソル場（重力場はこれ）に対しても類似がなりたつと期待しています。ところがプリンストン大学のデイビスやルフィニらが計算したところでは、シンクロトロンの状況においても低い多重極の輻射への寄与が大部分であって、「しぼりの効果は期待されない」。この計算結果はミズナーたちの予想を裏切るもので、再びエネルギー大の矛盾が出てきます。しかし二転三転、シンクロトロン輻射の可否に決着がついたわけではなく、現在もより詳細な計算がアメリカを中心にして進行中です。

次にスペクトルに関してですが、質量 M の星の特徴的な時間尺度は $\tau \equiv (\text{重力半径})/(\text{光速}) = 10^{-5} (M/M_{\odot})$ 秒ですから、 $1 \sim 100 M_{\odot}$ の星が関係した現象では、1,660 Hzの周波数は、ほぼもってもらしく思われます。ところが $10^7 M_{\odot}$ 以上のブラックホールのようなものが関係しているとすると、基本振動数はずっと低くなって、1,660 Hzから遠くへだたります。この点重力波シンクロトロンでは、 $\omega = m\omega_0$ なる関係で m の大きな高調波のモードを考えて指向性が狭くなるだけでなく、振動数も高くなります。スペクトルの形そのものは發生機構によって変わるでしょうし、詳しい相対論的効果の入った計算は今後の課題ですが、昨年の暮にイギリスのギボンとホーキングが指摘しているように衝突によって出る重力波と、星の重力つぶれによって出る重力波とでは、信号のふるまいが異なるかも知れないのです。このふるまいまで観測されるようになると、發生源についての重要な情報がえられることとなります（前述の力学的情報の一例）。

7. 重力波、赤外 100μ ピーク、3 kpc アーム

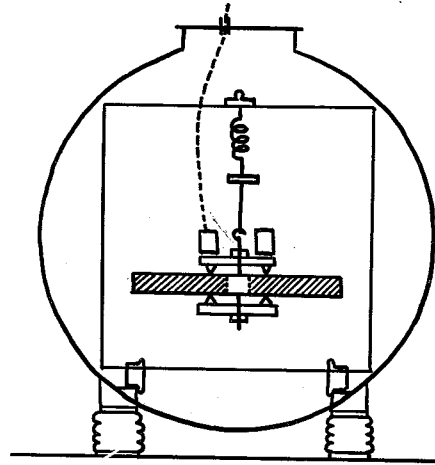
さて、重力波のエネルギーに対する矛盾を避けるもう一つの案を説明しましょう。ここでの考え方の背景には、銀河の活動は進化の各段階で異なっている、あるいは繰り返されているとする仮説があり、また一方では、銀河中心核の活動を星とガスの相互作用にその源を求めようとする日本のグループの発想方法（いわゆる原子炉模型）がその基底にあります。

数字あわせで言いますと、エネルギーが100倍以上大



第2図 (i) 重力つぶれ, (ii) 重力捕獲 (星の衝突) によって生じた重力波の波形の特徴。(ギボン, ホーキング, 1971) 波形を調べることで (i) と (ii) の区別がつく。

きすぎるのですから、重力波活動時間を過去 10^8 年間のうち $1/100$ 以下つまり 10^6 年以下とするのです。重力波で不活発の時期がその 100 倍の期間以上続くとおもうのです。この重力波活動期は 1 回限りか、何回かはわかりませんが、繰り返すためには力学的な緩和時間が必要でしょうからその活動の間隔が 10^8 年以上は開いているでしょう。それ以上の事は詳しくモデルを検討しなければ何も言えない段階ですが、ここでは一つの、面白い数字合わせを紹介するにとどめておきます。1972年8月の第2回若手夏の学校のとき、東大の銀河核グループから出された「考え方の筋道」です。——重力波発生源は中性子星の重力つぶれによるものと考えます。中性子星というのは中性子ガスの縮退圧で重力をささえている星で、そのささえきれぬ質量に上限があり、核力の扱い方によって上限の数值は多少異なりますが大体 $1 M_{\odot}$ くらいです。はじめ上限以下で安定であった中性子星も銀河核の濃いガスの海の中を走りまわっているうちにガスがふりつもってきて、質量が増してきます。上限質量を超えてのち冷えてきますと、重力を支えきれずに、重力つぶれを引きおこします。その時に大量の重力波を発生する。——これが重力波発生プランですが、もとになる中性子星は どうして生れたのかといいますが、比較的質量の大きい星がその進化の最終段階に超新星爆発をおこし、その時の中心に爆発の圧力で押しつけられて残るのです。いま重力波が頻りに観測されているという事は、何年前に超新星爆発が頻りにおこったという事です。それでは超新星爆発から重力つぶれまでの時間を決めるも



第3図 東京大学物理学教室のグループ(6人)の装置。

重力波は非常に弱いため、振動子(斜線部)は真空タンクの中につるされ、全体が空気パネで支えられて、地震などの雑音からのがれるように工夫されている。

のは何でしょう? それはガスが中性子星にふりつもる割合です。このふりつもり量は無制限に大きくなれるわけではなく、クリティカル アクリションといって、ふりつもるガスが温まって出す光の圧力のために、ふりつもるガス量に上限がある事が指摘されています。それは約 $10^{-8} M_{\odot}/\text{年}$ です。大体 $1 M_{\odot}$ 増すのに要する時間が 10^8 年という事になります。したがって今観測されている重力波活動の原因は 10^8 年昔に大量の超新星爆発があって、その時つくられた中性子星が重力つぶれを現在おこしつつあるのを見ているということになるのでしょうか。なお、クリティカル アクリションでは 100μ の電磁波(赤外光)を発生すると唱えている人がいることをつけ加えておきましょう。ただしこの重力つぶれを短期間、たかだか 10^6 年間に集めるのは少し問題がこのかもしれません。さて、それでは今から 10^8 年前に中心核で大量の超新星爆発があったとすると、そのなごりが何か見えないかという疑問がおこりますが、実はあるのです。我々の銀河の中心部近くには、拡がりつつあるリング(または腕=アーム)が観測されていますが、その内に 3 kpc のうでというのがあります。この速度から逆算すると今から約 10^8 年昔に中心核で爆発があった事になっているのです。これが超新星大量爆発の証拠にならないでしょうか。

このお話は、むしろ“プランとでも”いうべき未成な不備なものですが、ここであえて紹介したのは、重力波が銀河の進化にとって重要である事の一例を示したかったのと、現在イギリス、アメリカで行なわれている、重力波とマイクロ波との同時観測、あるいはX線やニュ

ートリノとの同時観測で、同時に活動がおこっている証拠がないと報告されているのに対し、この「激しい現象を付随しないこと」が重力波の存在の否定に直接結びつく必要がない事もふれたかったからです。

8. 日本で進められている実験

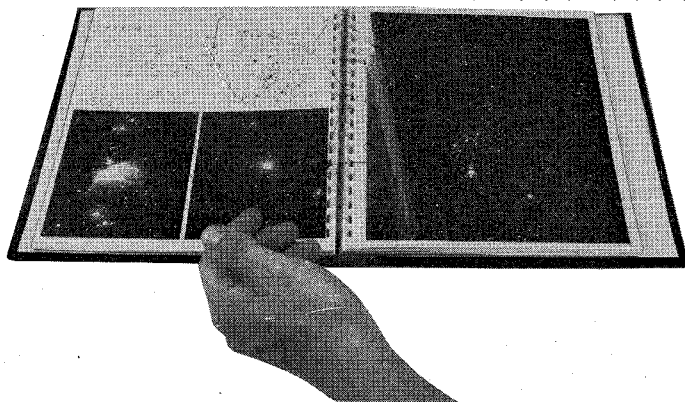
これまでの話して、重力波は天文学にとって特に銀河の研究にとって重要であること、また重力波を理解するためには、理論的研究が不可欠な事、がお分かりいただけだと思います。最後に現在日本で進行している重力波検出の実験としておそらく唯一つのグループと思われる東大物理学教室の平川研のグループが作っている装置の特徴をまとめて、ウェーバーの“2番せんじ”を各国で争っている中でも、特にユニークな点がある事を強調しておきたいと思います。装置の特徴は大きく分けて2つあります。第1は、振動子が四重極型であるという事です。第1の特徴のために、指向性がよくなっている、大きさが小さいままで振動数が低くできる、重力波の偏波に対して感度が良いという利点が得られます。第2の特

徴はウェーバーはじめ多くのグループでピエゾ素子を用いているのと比較して、異なった原理の検出方式であるという事です。さらに、平川研の計画では、このコンデンサの容量変化を検出するのに、直流型と交流型の検出器を使用する予定ですので、より偶発的な雑音が落とせると期待されます。重力波の存在の検証には、異なったグループで異なった場所で、異なった原理の検出装置で、異なった振動数でやる事が、ぜひ必要だと思います。

重力波研究は、まだ始まったばかりです。実験は、初等的な方法で始められたばかりです。理論も1960年代になって数学的方法が進歩し出したところです。これからどんな発見が待ち受けているか分かりません。あるいは、実験は失敗に終わるかも知れません。しかしながら重力の問題は、物理学の基本問題であり、重力は天文学的な規模で重要になる相互作用です。

この事を考えると、重力波が天文学にとって無縁であるとは決して言えません。必らず重力波が天文学をより広く発展させると考えています。

家庭で楽しめる“プラネタリウム、”



■10月5日発売

■定価 1,800円

藤井 旭著

透視版 星座アルバム

本書は、家族全員で星座の勉強ができるように工夫した編集です。掲載した星座は四季別に日本で見ることのできる50数星座、そのほか星座写真のとり方や広い視野の星座写真などを紹介しました。家庭ではもちろん、学校教材、学習にぜひご活用ください。

■透明ビニールシート48枚／写真48枚／B5変型判／168ページ

誠文堂新光社 東京・神田錦町1-5 振替東京6294 TEL (292) 1211