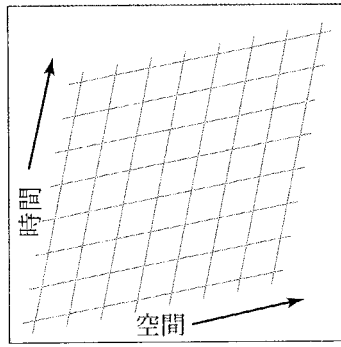
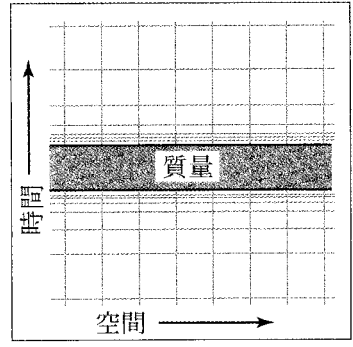


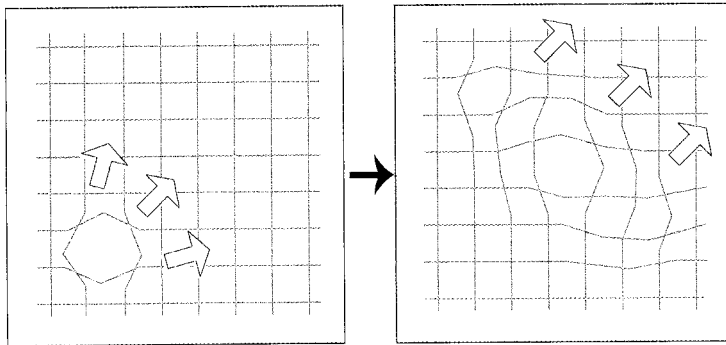
a) 平坦な時空



b) aに対して歪んだ時空



c) 重力で歪んだ時空
動かない質量がある場合



d) 局所的な歪みの伝搬

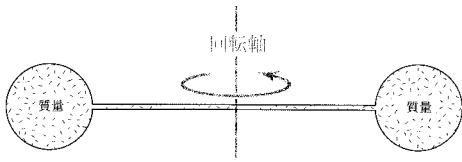
図1 時空の歪み

れば変形される。この変形は潮汐として働く。適当な物体を用意し変形によって励起される振動を調べる（共鳴型重力波アンテナ）、あるいは自由質点を2つ以上用意して間の距離の変化を厳密に測定する（レーザー干渉計型検出器）というのが重力波検出実験の原理である。共鳴型アンテナではいわば音叉が重力波によって叩かれるのを観測し、レーザー干渉計の場合は吊下げられた鏡の間の距離を測ることによって時空の歪みを捉える。実際にはレーザーを2つの光路に分けて、反射した光を干渉させる。その干渉光の強度変化を見ることによって、鏡までの距離の微小な変化を調べる。重力波が入射すれば、干渉光は重力波の大きさ、

波形に応じて変化する。

さて重力波の基本的性質を考えてみよう。質量のある物体が運動する場合に限って考えると、質量という重力相互作用の荷（チャージ）が運動して重力波を放出する。これは電荷運動による電磁波の放出をアナロジーにすれば理解しやすい。ただし重力波には電磁波とは異なった特筆すべき性質がある。

まず相互作用の結合定数の小ささである。弱さといってよい。1Cの電荷どうしに働くのと同じ大きさの力を重力で得ようとすると 10^{10} kgもの質量が必要である。電弱相互作用の無次元結合定数が1/137であるのに、重力のそれは 5×10^{-39} ととてつ



典型的な4重極モーメントをもつ形状とその変化の大きい運動

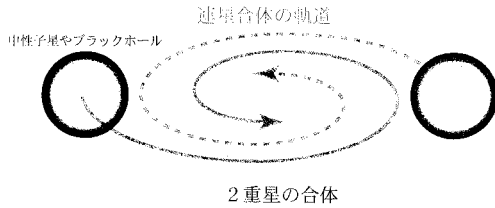


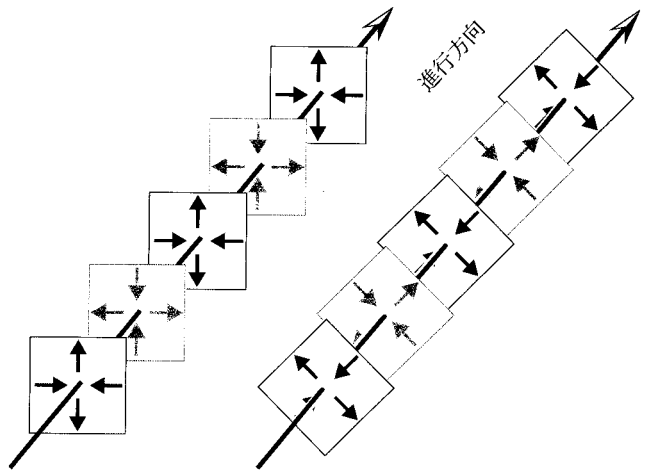
図2 典型的な重力波源

もなく小さい²⁾。弱い相互作用ですら 10^{-5} 程度と強力におもえてしまう。したがって検出器は微かな相互作用で重力波をとらえねばならないし、かなり重い物体でないと観測可能な重力波源たりえない。一方で結合定数が小さいということは、透過性が高いということである。重力波は電磁波よりも、ニュートリノよりも、天体の深部の情報をもったまま外に出てくる。

つぎに、重力波は電磁相互作用と違って、放射の最低次が4重極である。電磁波の場合は、電荷分布に位置ベクトルをかけて積分すれば電気双極子モーメントが求まり、その時間についての2階微分に比例して双極子放射が出る。重力波の場合は電荷分布を質量分布に変えればよいのであるが、質量分布に位置ベクトルをかけたものは1階微分すれば運動量である。重力の場合は双極子モーメントの2階微分というのは系の運動量の時間変化のことであり、これは孤立系ではゼロになる(な

んのことはない、運動量保存則のことである)。同様に磁気双極子に相当するものは角運動量保存則でやはり消える³⁾。したがって双極子放射はなく、質量4重極分布の2階微分に比例する項、すなわち4重極放射が最低次となる。4重極の質量分布が大きな形というのは両端の重いダンベルのような形をイメージすればよいだろう(図2)。電荷とちがって負の質量がないので、電荷の4重極の負電荷を除いた形と思えばよい。これがぐるぐる回れば4重極放射がなされる。電磁波の場合もそうであるが、高次モーメントの成分は一般に安定した形状では大きくない。球対称や回転楕円体ではこの成分はない。またキネマティックに概算予想できない場合が多い。重力波源の候補たちも、どれほどのエネルギーが重力波に転換するかモデル依存が大きく、確かな予想が成り立つものがすくない。

もうひとつ4重極波の重要な性質がある。先の波動方程式の解は、ある座標系(正確には座標でなくゲージ。TTゲージと呼ばれる時間と波の進行方向が歪まないようなゲージ)を選ぶとどのように




4重極の重力波と2つの偏波
 → や ← が潮汐力方向を、 が等位相面を示す。
 2つの偏波は互いに45度潮汐方向が傾いている

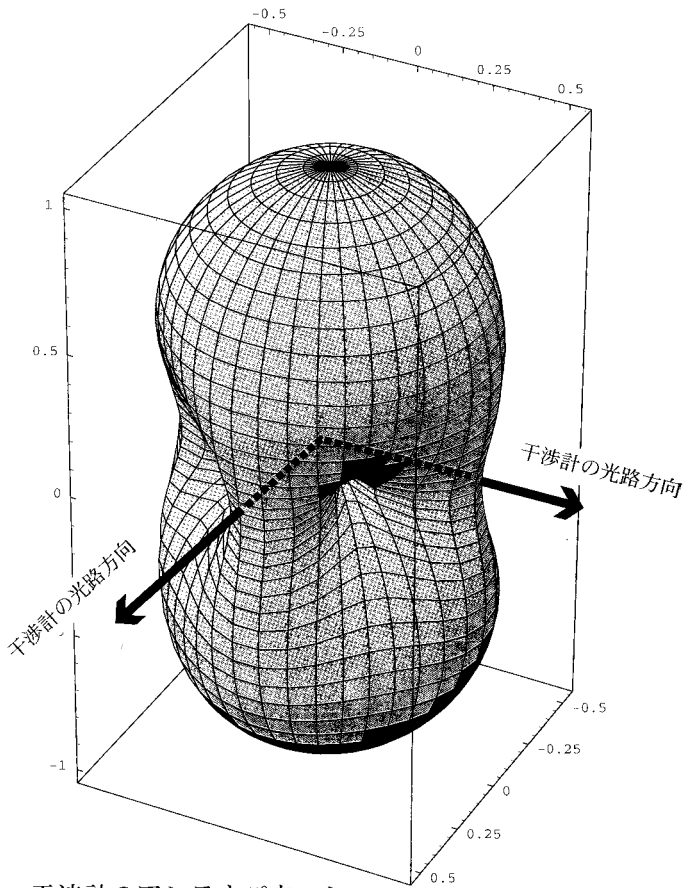
図3 4重極の重力波

作用するか良く分かる。4重極放射がある方向を伸ばせば、それと直行する方向を縮める。さらに2つの偏波成分がある(図3)。この性質は重要で、共鳴型ではこのような変形を固有振動にもつ弾性体をアンテナにし、我々のTAMA300のようなレーザー干渉計型では、2本の直行した光路を設置する。一つの光路が縮むとき、もう一方の光路は伸びる。これで差引すれば小さい重力波信号を2倍にすることができる。これが重力波検出器が土地効率の悪いのを承知でL字型に設置している理由である。光路を並行に置いては重力波はみつからない。入射する重力波にたいする干渉計の相対感度パターンを図4に示す。

2. 期待される重力波源

いったいこのような重力波、すなわち非常に小さい結合定数、高次のモーメントのみによる放射の波で、観測可能な大きさの放射源はどのようなものが考えられるであろうか。答えは大質量の天体のドラスティックな現象になるだろう。現在考えられるものとしては、

- ・超新星爆発(II型)
- ・中性子星やブラックホールなどのコンパクトな連星の合体
- ・パルサー
- ・銀河中心の大質量 (10^6 - 10^8 太陽質量) ブラックホール
- ・Wagoner星や伴星から質量が降着しているX線連星
- ・背景輻射(宇宙論的な過程、コズミックストリングなども)
- ・まだ人類の予想していない重力波源などである^{4), 5)}。地上の観測機器は地面振動などの影響があり、レーザー干渉計型検出器のターゲット



干渉計のアンテナパターン
(膨らんでいるほどその方向に対して高感度)

図4 干渉計アンテナパターン

ットとなるのは周波数にして10~100 Hz以上の成分を持つものである。大質量ブラックホールや背景輻射は、ずっと周波数が低くて(mHzなど)観測が難しい。TAMA300やレーザー干渉計の感度が周波数によりどう異なるかは、この後の記事を参照されたい。

<II型の超新星爆発>

超新星爆発はI型とII型に分けられるが、重力波の期待されるのは最後に中性子星を残すII型のものである。これは爆発(星のコアからみれば爆縮だが)時にコアの質量分布が、先に説明したよう

な4重極モーメントを持って時間変化する可能性があるからである。質量分布のどれだけが重力波のエネルギーに寄与するかはコア形状の時間変化によってきまり、たとえば完全に球対象に爆縮すれば重力波は出ない。爆縮時のコアのダイナミクスという傍証の少ないモデルを進めるしかなく、当然この見積りにはかなりの不定性がある。現在考えられている超新星の重力波の大きさは、我々の銀河内の事象であっても時空の歪みが 10^{-20} 程度と予想されている^{6), 7)}。つまり1mの距離がたったの 10^{-20} m伸び縮みするにすぎない！（おどろくなかれ、ほかの候補の重力波もとんでもなく小さい。それよりも特筆すべきことは、TAMA300の感度が既にこのレベルに達しているということである。）

超新星爆発の時間的スケールがミリ秒程度といわれているから、おそらく重力波も数kHz程度が上限周波数になるであろう。そうなるとこれは共鳴アンテナ、レーザー干渉計ともに観測ターゲットとなる。放出される重力波の波形についてはモデルによる不定性があるが、多くの結果は100Hzぐらいの低いほうの周波数にエネルギーがあるだろうとの予測である。また逆にいえば波形やスペクトルが実測されれば、超新星爆発からのニュートリノがSN 1987aで観測されたときのように、重力波によって超新星のモデルにつよい示唆をあたえるであろう。しかも重力波は形成された中性子星の形状というニュートリノよりも深い探査針としての役目を期待される。一方で波形の不確かな重力波は、検出器の雑音と識別する決め手に欠き、基本的に光学観測などと同時性を要求する信号処理をするしかない。解析する側からは少しやっかいである。

超新星爆発が起こる頻度は銀河系あたり数十年に1回程度といわれている。

<コンパクト連星の合体>

現在重力波検出でもっとも有力視されているのがこの連星合体である。連星系はちょうど前述のダンベルの回転の例そのもの（図2下）であり、重

力波の発生メカニズムとしては典型的なものだ。お互いに回りながら、4重極モーメントの変化によって重力波を放出する。放出した分エネルギーを失うから軌道半径は小さくなり、角運動量保存のため軌道の周期はだんだんと短くなってゆく。中性子星やブラックホールのようなコンパクトな天体であればミリ秒程度の周期まで達し、高速の回転は大きな重力波を最後には生み出す。そして最後には星が合体してしまう。これが「最後の3分間」のシナリオ¹⁰⁾である。

我々の銀河内で現在確認されている中性子星連星のうち3つが、 $10^8 \sim 10^9$ 年で合体すると見積もられている。このうち一つは有名なPSR1913+16である⁹⁾。Taylorらは連星パルサーの周期がドップラー効果で変化することを使ってこの連星の軌道周期を長期にわたって観測した。その結果、連星軌道は重力波に相当するエネルギーを放出し、すこしづつ合体に向かっていることがわかった。PSR1913+16は 3×10^8 年後に合体すると計算されている。合体イベントの頻度は1銀河あたり 10^6 年に1回ともいわれるが、まだ実際に合体が観測されたことはない。それでも検出器の感度が、例えば大きな銀河団まで届くようであれば、イベントが捕まえられるという考えである。

数例を基に推定しているので、理論の人には申し訳ないが、上記の頻度はあまりあてにできるものではない。では何故この重力波源が最有力候補かというと、発生する重力波の波形を精密に予想できるからである。中性子星にしろブラックホールにしろ主系列星にくらべたらずっとコンパクトな天体であり、合体の数ミリ秒前まで軌道計算はポスト・ニュートン近似計算で行われている^{11), 12)}。軌道が小さくなって合体に近づくにつれ、周波数と振幅が増大していく（図5）。可聴域の周波数なので擬音で書けばピュウと尻上がりの音である。それでチャープ（さえずり）とよばれている。

都合の良いことに、このチャープは実は質量パラメータのみで決まっている。絶対的な重力波の大

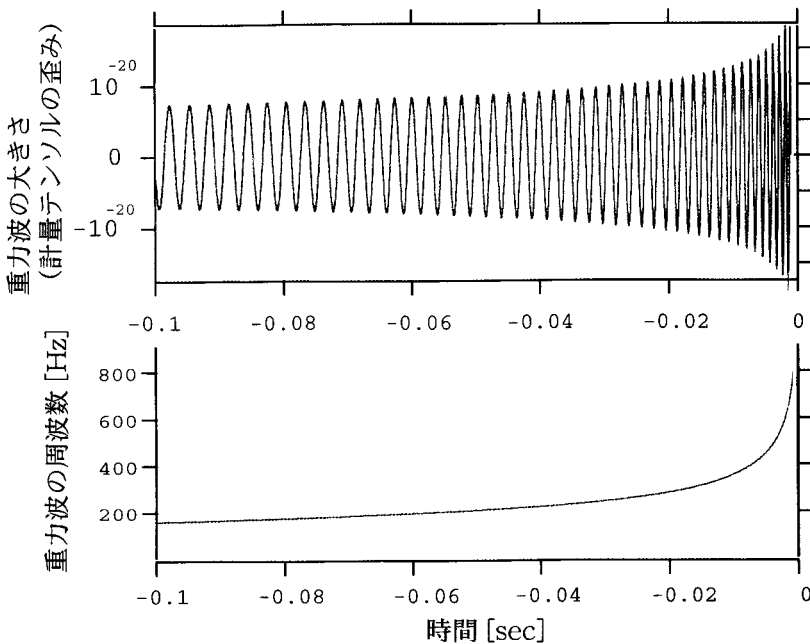


図5 連星合体の重力波波形と周波数

連星¹³⁾も考えられる。物理、天体物理、天文、原子核物理とたくさんの期待がかかる源でもある。

重力波の大きさは、200 Mpc 離れた典型的な中性子星 (1.4 太陽質量) の連星で、 6×10^{-24} くらいになる。ただしコヒーレントな信号なので、積分して周波数あたりのエネルギー密度で考えれば、 $3 \times 10^{-22} \text{ Hz}^{-1/2}$ くらいになる。最高周波数は質量に依り、0.5 太陽質量で 4 kHz、1.4 太陽質量で 1.5 kHz、10 太陽質量で 200 Hz ぐらいである。干渉計型検出器では、どこまで低い周波数から観測

できるかで測定できる質量の上限と決定精度が決まり、高い周波数の性能がよければ合体前後の物理に対して子細な情報をもたらす期待が高まる。

< パルサー >

上記 2 つとちがって、これは連続波源として期待されている。形成直後や¹⁴⁾ある種の固有振動で不安定な状態¹⁵⁾であったりすれば、自転にあわせて重力波を出す可能性がある。重力波の周期は自転の 2 倍になるから、少なくとも確認されているパルサーについては調べることが可能である。例えばカニパルサーについては共鳴アンテナで調べられてきた¹⁶⁾。レーザー干渉計でも同様に探索することができる。

合体の瞬間では中性子星も質点としてはあつかうことができず、おそらくポスト・ニュートン近似の予想からずれるであろう。そのずれを観測すれば、超新星の粘性や強重力場で有限な大きさの物体の振る舞いを調べられるだろう。合体後にはブラックホールになるが、形成直後は振動する。そのときの重力波波形を観察すると、ブラックホールのいわば堅さが判る。もし多くの観測例がたまれば、銀河の距離を正確にだせるかもしれない。中性子星の質量がきっちり決まれば、状態方程式の不定なパラメータが決まるかも知れない。あるいは MACHO

3. TAMA300 の運転とそのデータ

TAMA300 は日本のレーザー干渉計重力波検出器計画で、天文台をはじめ多くの大学や研究機関から研究者が集まり 1995 年から建設がスタートし

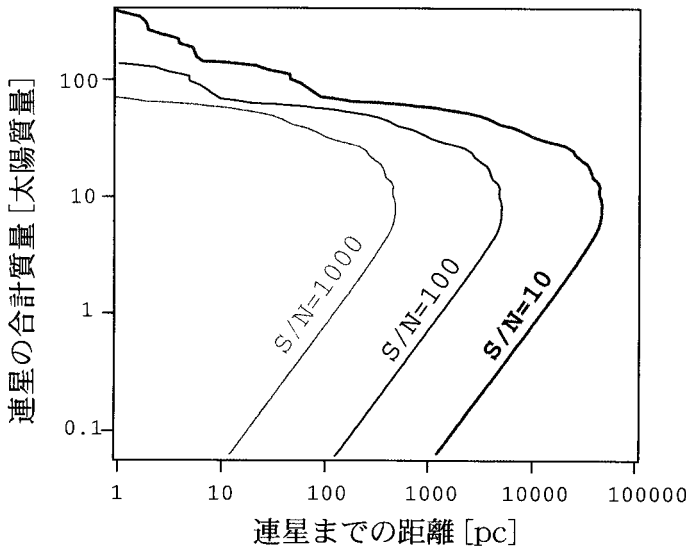


図6 連星合体の見える範囲

た。国立天文台三鷹キャンパスに一辺 300 m の L 字型に干渉計を設置し、1999 年には最初の観測を行っている。いままでに何度かの改良と観測運転を行い、総データ量は 300 時間を超えた。2001 年夏には 1000 時間の観測が予定されている（この原稿校正中に開始された）。仔細は別記事（天文台・川村氏）にお願いするが、TAMA300 はこの規模の干渉計で、安定性や運転実績の面で一歩先んじ、感度においても現在世界最高 ($5 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$) という状態である¹⁷⁾。

中性子星連星や超新星について TAMA300 の感度は、200 Mpc 向こうのイベントを見つけるには無理であるが、我々の銀河をカバーするには十分な感度である。図 6 に連星合体の重力波を観測できる範囲を、距離と連星の総質量の関係で示す。信号と雑音の比 (S/N) が大きい範囲ほどはっきりと重力波が判るということである。せいぜい $S/N \sim 10$ ぐらいが観測限界であり、現在の TAMA300 の場合は数～10 太陽質量の事象が数 10 Kpc まで、すなわち銀河ハロー程度までが観測可能ということになる。

さて申し訳ないがここから突然、少々泥臭い話になる。実際に干渉計からでてくるデータは、重力

波がなければ雑音ばかりである。僥倖にして重力波があっても、データのはほとんどは雑音であり、そこからなんらかの操作をして重力波イベントを探さなければならない。データ量は 1 時間あたり 1 GByte を超える。また干渉信号だけでなく、地面振動、音響、温湿度、真空など実験室環境なども記録されている¹⁸⁾。

こうしたデータをもとに、干渉計の動作状態の判定、感度較正がおこなわれ、記録された信号を計量の歪み相当に変換する。このデータ前処理は自動でできる部分もあるし、人間がデータを眺めながら行うものもある。TAMA300 の場合は運転中も小さ

な較正信号が加えられており、それを基に 1% 程度の精度で時空の歪みに変換できる¹⁹⁾。干渉計の雑音というのは必ずしも一定していないのであるが、そうすると信号探索の計算効率にかなり影響する。

4. イベント探索

ここでは連星合体イベントの探索に絞って紹介する。連星からの信号は、質量を仮定すれば波形が予想できること、特徴的なチャープ波形であることは既に説明した。波形が予想できるのであるから、実際の信号と予想波形で相関（時系列の信号データに波形をかけて積分する）を取ればよい。ただしどの時刻に重力波があるかわからないので、到達時刻を少しづつ変えながら計算を行う。効率化のため、一旦信号・波形をともにフーリエ変換して、周波数領域での計算におきなす。そうすると到着時刻をずらしていく操作は、実は信号×波形を逆フーリエ変換することと同じである。そこで高速フーリエ変換／逆変換（プログラムの上では同じである）をつかって、到着時刻の探索が行える。次に質量がわからないので、考えられる範囲で質量をすこしづつ変えた予想波形についてそれぞれ計算

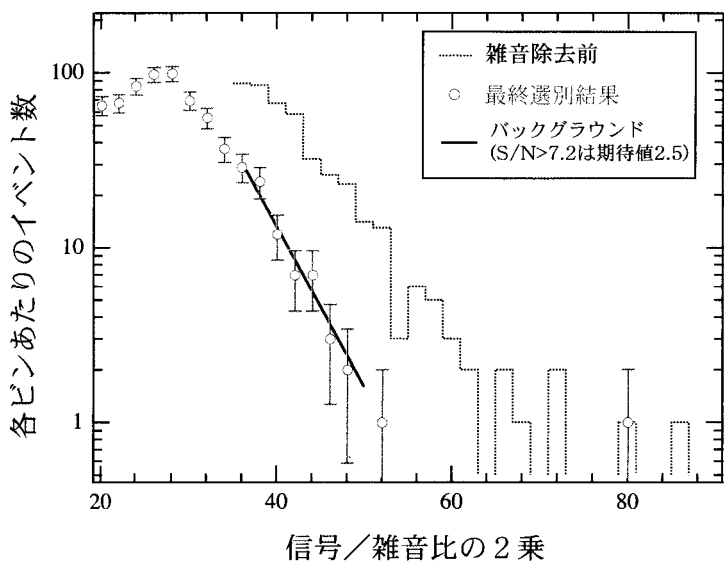


図7 TAMAの解析(1999年のデータ)で得られたイベント候補のS/N分布

を行う。用意すべき予想波形の数やパラメータステップの細かさは、探索する星の質量の範囲、選別の閾値で重力波イベントを落とす確率の設定、干渉計の雑音スペクトルで決まる。さらに、干渉計の雑音スペクトルが周波数についてフラットでないことを考慮する。周波数毎に、信号と予想波形の積を雑音スペクトルの平均値で規格化する。これによって雑音の大きな周波数帯での寄与を少なくして偽のイベントを排除し、感度のよい周波数帯で信号を探す。これをウィナーの最適フィルターといい、予想波形との相関をとるこの手法をマッチドフィルターと呼んでいる²⁰⁾。最終的に、相関値=信号/雑音比(S/N)の高い時刻・質量パラメータの組み合わせをイベント候補として選別する。

我々以前に実験データにこの方法は試されている²¹⁾が、TAMAのように長い安定したデータが溜まってくると、まともにやると計算時間が大変量になる。我々の目標の一つに、探索する質量の範囲を広く取ろうということがあった。それは典型的な中性子星連星だけでなく、MACHOやブラックホール連星も対象にしたかったからである。そうす

ると質量範囲が広い分、予想波形をたくさん用意する必要が出てくる。すると計算時間の増大を招く。そこで我々の解析では、最初広いパラメータステップに低い閾値を設定して選別し、1段階目を通して部分のデータについてのみ細かいパラメータステップとより厳しい閾値を適応するという階層サーチ²²⁾を用いた。さらに雑音の大きさの不安定性や非線形性に由来する分布テール²³⁾を避けるために、信号と予想波形の相関を時間毎にわけ、あるイベントについてはどの時刻でもおなじくらい相関がみられるという条件をいれた。こうして得られたイベント候補のS/N

分布が図7である²⁴⁾。

この分布はほとんどが雑音による偽イベントである。もし雑音の作る分布に対してずっと大きなS/Nのイベントがあればそれは重力波候補ということになる。つまりこの分布でS/Nの高いところに、突然イベントが出現したり、ピークができたりするかをみればよい。もっともピークができるほど重力波イベントがふんだんにあるはずはなく、1つか2つの高S/Nイベントを探すわけである。したがって、雑音分布のテールが無くなるあたりより大きな重力波イベントのみが見つけられる。このTAMAのデータでは非線形雑音に起因する分布テールへの影響があり、結局我々は重力波イベントがあるとは結論できなかった。

そこで観測上限値を求めた。閾値は $S/N > 7.2$ と設定し、それ以上の数を取りあえず観測数とする。ここでは2イベントを得ている。この閾値では、典型的な中性子星イベント(1.4-1.4太陽質量)では6.2kpcまでが観測できる。もちろんこれには雑音によるバックグラウンドが入っているはずで、閾値以下(ここでは S/N^2 が35~50)の分布を延長して

2.5 イベントは雑音であると期待される。2-2.5 で本物は-0.5 個、などと結論してはいけない。バックグラウンドは期待値 2.5 個のポアソン分布で揺らいでいるし、観測時間中に確率的に起こるであろう本物の期待値もそうである。これらを考慮して、最終的な重力波信号に対する上限値は、信頼度 (C.L.) 90 % で1時間あたり 0.59 イベントとなった。観測中、地球を中心に半径 6.2 kpc 以内に、重力波イベントはこれ以上はなかった、ということである。もちろんこの値は予想されている連星中性子星合体の頻度よりずっと大きい、観測的に決めたという意味がある。

この雑音評価と信頼度を含む手法は素粒子実験などではおなじみのやり方だが、従来重力波実験は、いわば瞬間最大性能で上限値を表現してきたという習慣がある。これでは機械の性能を競争する域をでない、観測論的に上限やイベントを議論するようにしたいし、既に干渉計はそのような扱いをすべきところまで成熟してきている。我々の TAMA300 を含む重力波実験計画は、いよいよ最初の検出を競う期間に突入することになる。検出器ハードウェアにとってもデータ解析にとってもおそらく今からが興奮の 10 年と思われる。

参考文献

- 1) シュッツ, 相対論入門 (下), 丸善など
- 2) Perkins D. H., "Introduction to High Energy Physics", Addison Wesley Publishing Co.Ltd., p22
- 3) Saulson P. R., "Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors", World Scientific Publishing Co.Ltd.
- 4) Thorn K, "Three hundred years of Gravitation", ed. Hawking and Israel, Cambridge University Press, p375
- 5) 三尾, 中村, 大橋, "重力波をとらえる", 京都大学出版会
- 6) Monchmeyers, et al., Astron.&Astrophys. 246, 417-440
- 7) Yamada and Sato, Astrophys. J. 450, 245-252
- 8) Phinny E. S., 1991, Ap. J. 380. L17.

- 9) Taylor J. H., et al., Astrophys. J. 345, 434-450
- 10) Cutler C., et al., Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 2984
- 11) Blanchet L., Damour T., Phys.Rev. D46 (1992) 4304
- 12) Blanchet L., et al., Class. Quantum Grav. 13 (1996) 575
- 13) Nakamura T., et al., Astrophys. J. Lett., 487, L139(1997)
- 14) Andersson N., Kokkotas K., Schutz B. F., Astrophys. J. 510 (1999) 846
- 15) Andersson N., Kokkotas K., review article by Int. J. Mod. Phys. D., gr-qc/0010102
- 16) Suzuki T., Proc. First Amaldi Conf., ed. Coccia, Pizzella and Ronga, World Scientific, 1995
- 17) Ando M., et al., 2001, Phys. Rev. Lett. 86, 3950
- 18) Tatsumi D. and the TAMA collaboration, 1999, Proc. of 8th Workshop on General Relativity and Gravitation, 113
- 19) Telada S. and the TAMA collaboration, 1999, Proc. of 8th Workshop on General Relativity and Gravitation, 123
- 20) Schutz B. F., The Detection of Gravitational Radiation, ed. D.Blair, Cambridge, 1989, 406
- 21) Allen B., et al., Phys. Rev. Lett. 83, 1498, (1999)
- 22) Mohanty S. D., Phys.Rev. D57 (1998) 630-658
- 23) Kanda N. and the TAMA collaboration, 1999, Proc. of 8th Workshop on General Relativity and Gravitation, 137
- 24) Tagoshi H., Kanda N., Tanaka T., Tatsumi D., Telada S and the TAMA collaboration, Phys. Rev. D63 (2001) 062001

Expected Sources and Data Analysis on Laser Interferometric Gravitational Wave Detector

Nobuyuki KANDA

Department of Physics, Miyagi University of Education 980-0845

Abstract: The direct detection of gravitational wave has been expected for physics in strong gravitational field, and for a new deep probe for astronomical objects. Recently, some projects of large-scale laser interferometric gravitational wave detector compete for the first detection of gravitational wave. Our project TAMA300 which is placed in NAOJ, achieved worlds best sensitivity and long stable operation as a realistic observatory. In this document, we will give a brief description of gravitational wave detection, expected sources, and TAMA's data analysis.