

## 論文の内容の要旨

論文題目 Wavelet-Based Method for Detecting Gravitational Wave Bursts  
(ウェーブレットを基礎としたバースト重力波の検出方法)

氏名 端山和大

地上のレーザ干渉計型重力波検出用望遠鏡は、主にコンパクト連星合体の際の重力波や、超新星爆発で生じる数ミリ秒から数百ミリ秒という短時間バースト性重力波などをターゲットとしている。超新星爆発は発生機構が複雑なためにモデルの不定性が残っている。その結果生じる波形不定性を避けるためにスペクトルパワー等、Quadratic form での検出理論が中心に研究されている。提案されている検出方法の多くは信号のエネルギー情報で検出を試みるという戦略のもので、波形を直接に推定するものはほとんどない。重力波の波形を雑音下から推定し波形解析することは、将来重力波から天体現象の新しい情報を引き出したり、未知の天体現象を発見する上で大きな役割を果たすことが期待できる。特に、重力崩壊型超新星爆発からの重力波は、他の宇宙線では伺い知ることができないコアの崩壊による重力場の変動など非常に興味深い情報を持っている。これらの情報を得るためには波形の解析が有効である。

そこで、雑音の中から超新星爆発からのバースト性重力波形を推定する方法を考察した。我々は 1) non-parametric に波形を推定、2) 事前に波形情報を用いないで最適に近い波形推定が可能、という性質を持つ検出方法を考察し、その条件を満たす Wavelet 解析を用いたバースト検出用フィルタを提案した。我々は、wavelet 空間上では Gauss 性雑音すべての基底に分散され 1 基底あたりの寄与が非常に小さくなり、また、局所性の高いバースト信号が少数の基底に大きな寄与を及ぼすことに注目した。我々の提案するフィルタは、Gauss 性雑音の wavelet 基底への寄与を推定し、除去する事によって、事前の波形情報を用いずに高い精度でバースト信号波形を抽出するというものである。このフィルタは wavelet shrinkage method を基礎としたものである。

論文では、バースト信号として Dimmelmeier 等の計算した超新星爆発からの重力波形カタログを用い、ガウス性白色雑音下での波形推定性能を調べた。データには 20kHz のサンプリング周波数で、1.6 秒に相当する 32768 点のデータを用いた。まず、Wavelet 空間上でのバースト信号の表現を調べた。その結果、wavelet 空間上ではバースト性重力波を表現するために必要な基底の数が

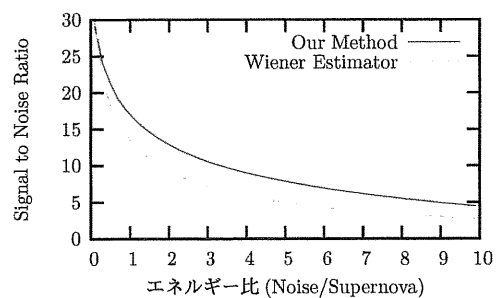


図 1: バースト信号と雑音のエネルギー比を関数とした、我々の方法と Wiener filter による波形推定の信号-雑音比。

100 程度、Fourier 空間上では 10000 程度必要であり、Fourier 空間で展開するよりも 100 倍ほど少ない基底に集中することがわかった。一方ガウス雑音に関しては、wavelet 空間、Fourier 空間ともにすべての基底に一律に分散された。次に我々の手法を用いてガウス雑音を見積もり、雑音を除去し、バースト性重力波形を推定した。推定性能の評価に、バースト信号を  $f$ 、推定値を  $\hat{f}$  として、フィルタ後の信号雑音比  $S/N := E[|f|^2]/E[|f - \hat{f}|^2]$  を用いて行った。また、比較対象としては、Fourier 空間上で定式化された Wiener filter による推定を用いた。Wiener Filter を用いる際、雑音スペクトルは、雑音の分散で見積もった。我々の方法を Wiener filter で推定を行った結果を表したものが図 1 である。横軸はバースト信号と雑音のエネルギー比で、縦軸が、重力波カタログ中のすべての波形に対して計算した信号雑音比の平均をとったものである。この図より、平均して、我々の用いた Wiener filter よりも高い精度で波形推定できることがわかった。論文中では、カタログ中のすべてのバースト信号に関して別々に信号-雑音比を計算しており、それぞれのバースト信号に関して、大部分の (バースト信号/雑音エネルギー比) で優れた結果を得た。

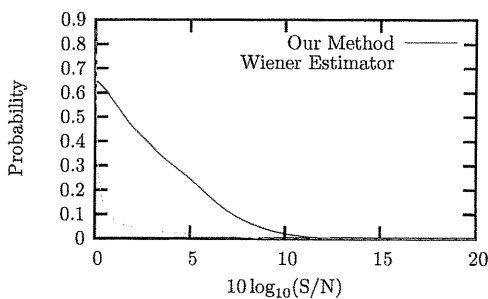


図 2: 地球から 100pc の超新星爆発からの重力波を TAMA300 で検出する際に得られる信号-雑音比の確率

さらに、TAMA300 の観測データを用いて現実のデータに対しても最適に近い精度で波形推定できるように、フィルタを考察した。Wavelet shrinkage method では、Wavelet 空間上で正しく雑音レベルを見積もる必要がある。TAMA300 のように短時間的には安定だが、時間と共に変動するような雑音に適した雑音レベルを決めてやることで観測データからバースト性重力波を検出するフィルタを構成し、シミュレーションを行って性能評価をした。

地球から 100pc の超新星爆発からの重力波信号を TAMA300 で検出するという状況を考察した。TAMA300 のデータとして、2003 年の始めに行われた第 8 回 Data-Taking run の比較的安定なデータ 1 時間分用いた。TAMA のデータにランダムにバースト重力波信号を埋め込み、それらがどの程度の信号-雑音比で検出されるかを、我々の方法と、Wiener filter を用いて調べた。ここでは、雑音スペクトルは観測データから推定している。結果が図 2 である。横軸は信号-雑音比で、縦軸は指定した信号-雑音比以上で検出できる確率を表している。この図では用いた重力波カタログ中のすべての波形で別々に計算した信号雑音比の確率の平均をとっている。図からわかるように、現実の観測データからのバースト信号検出に関して、我々の用いた Wiener Filter よりも高い信号-雑音比で波形推定する性能を持つことがわかった。

現在、LISA、DECIGO 等のレーザ干渉計型宇宙重力波望遠鏡が計画されている。これら望遠鏡を用いた観測では、地上望遠鏡で大きな障害となっている地面振動から解放され、地上では不可能な低周波領域の観測が可能となり、宇宙論的な現象の発見、解明が期待される。宇宙望遠鏡は地上のものとは状況が異なり、銀河系内外に存在する中性子星連星からの重力波は、その数が多すぎて単離できず 3 – 0.1mHz の周波数領域の望遠鏡の感度を制限する雑音として振舞う現象が起こると考えられている。この重力波雑音を Binary Confusion Noise(BCN) という。また、T. Nakamura et al. らの提案する black hole MACHO binary や、系外 binary の分布などの研究から、BCN が

広い周波数帯で望遠鏡の性能を大きく制限する可能性も示唆されている。そのため、低周波の重力波を検出する際に、BCNを定量的に評価し、その影響を低減する方法を開発する必要がある。

そこで我々はBCN中に出現するバースト性の重力波の検出に際して、BCNを低減する方法として、我々が提案するフィルタを用いたものを提案した。

フィルタ構成の際に、フィルタが正しく機能するために、wavelet空間上で、BCNの基底係数への寄与を正確に見積もる方法を提案した。次に構成したフィルタの性能を評価するシミュレーションを行った。我々の方法はBCNのモデルに依存するものではなく、BCNの定常性に依存するものである。従ってシミュレーションとしては、単離できない程度にするために10

万個のbinaryからの重力波でBCNモデルを構成し、バースト重力波としては巨大BlackHoleの時空の減衰振動で生じるリングダウンを用いて、我々の方法の性能を調べた。その結果が、図3である。縦軸は信号-雑音比( $S/N$ )で、横軸は、Binary Confusion Noiseのエネルギー $E_{BCN}$ とringdownのエネルギー $E_{ring}$ をそれぞれ振幅の自乗和とすると、横軸は $E_{BCN}/E_{ring}$ である。図より、我々の低減法は、Wiener Filterよりも高い精度でBCNを低減し、ringdownを検出できるという結果を得た。以上の考察では、望遠鏡の検出器雑音を加えていない。この状況はBCNが望遠鏡本来の持つ感度を大きく越える、非常にやっかいな雑音として存在する場合を想定している。しかし、検出器雑音を加えたときに我々の方法が正しく機能するかどうかは興味深い。そこで、LISAの検出器雑音をシミュレーションした雑音信号を加えることによって性能を評価した。その結果、検出器雑音を加えても、それを考慮した閾値を定めれば機能することを示した。

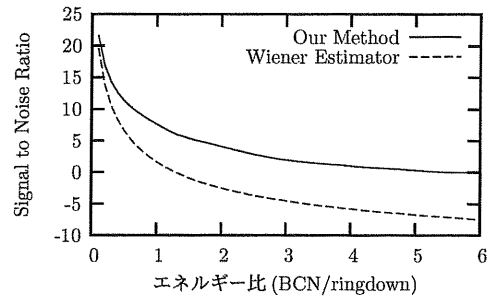


図 3: 信号波形推定の精度の比較図。