

シューマン共鳴を起源とするノイズ相関を考慮した重力波観測について

日大生産工 ○ 姫本 宣朗 京大・基研 樽家 篤史

1 研究目的

重力波とは、重力場の時間的変動によって生ずる空間を伝播する時空の歪みであり、一般相対論によってその存在が予言されているものである。現在、その重力波を捉えようと、世界の各地で検出器の建造、または計画が活発化しており、宇宙を見る新しい窓として大いに期待されている。



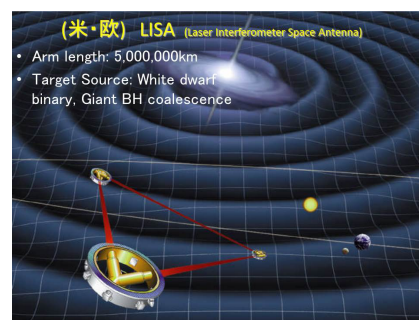
世界の重力波検出器

将来的に観測されるであろう重力波は、中性子星連星合体のような波形が特定できるものと、位相がランダムで特徴的な波形をもたず、我々の宇宙に一樣に存在しているものと考えられている背景重力波とに大別できる。背景重力波は、その特徴から、数々の天体から放射された重力波が重ね合わさって生じた天体起源のものと、宇宙誕生から間もない頃に起こったインフレーション (宇宙の急激な加速膨張) や相転移期の高エネルギー現象を通じて生成された初期宇宙起源の 2 成分によって構成されているものと考えられている。一方、重力波そのものの特徴に注目すると、その相互作用が電磁波と比べて極めて弱いことがあげられる。このことは、電磁波に対する宇宙の晴れ上がり (宇宙誕生から約 38 万年後) よりずっと以前の初期宇宙が、重力波によって直接観測できることを意味する。言い換えるならば、重力波にとっての宇宙の晴れ上がりはプランク

時間と考えられ、原理的に宇宙誕生の瞬間の情報を重力波が担っているということになる。それゆえに重力波観測、特に初期宇宙を起源とした背景重力波を観測することは、宇宙論研究、さらには素粒子論研究にまで大きな意義を与えることになる。

しかしながら、理論的に予想されている背景重力波のシグナルは非常に微弱と考えられており、その検出には、次世代の検出器の完成を待たねばならない。現在アメリカや日本では、10Hz~1kHz の周波数帯にこれまで以上の感度をもつ検出器 *advLIGO*(米) や *KAGRA*(日) の計画が推し進められており、さらにその次の世代の検出器として、宇宙を舞台に地面振動の影響がない低周波数帯に高感度を持つ、スペースレーザー干渉計 *LISA*(米)・*DECIGO*(日) の計画がすでに控えており、背景重力波の観測が日に日に現実味を帯びようとしている。

このような現状をふまえて、背景重力波観測を用いた宇宙論研究を確立していくための最重要課題は、検出器の取得データから効率よく背景重力波のシグナルを抽出することである。本研究では、シューマン共鳴を起源とするノイズ相関を考慮した場合の重力波観測についての議論を行った。



LISA(Laser Interferometer Space Antenna)

<http://lisa.nasa.gov/>

Impact of correlated magnetic noises on detection of stochastic gravitational waves

Yoshiaki HIMEMOTO and Atsushi TARUYA

2 研究内容

宇宙のあらゆる方向から定常的にやってくる背景重力波は統計量として扱われる。基本的に、検出器の雑音に埋もれてしまう背景重力波は、複数台の検出器から得られる観測データを使い、その相関関数を統計量として検出の判定を議論する。以下では、本研究における相関解析について説明していくことにする

2-1 相関統計量

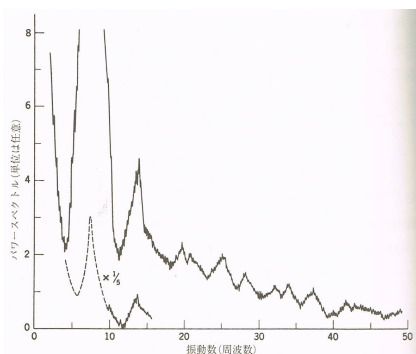
検出器が観測するデータ s_i^k は、 $s_i^k = h^k + n_i^k$ で表される。ここで、インデックスの $i = 1, 2$ は検出器のラベルであり、 k は離散的な時間ラベルである。また n_i^k はノイズ、 h^k は重力波シグナルである。

2-2 シューマン共鳴によるノイズ相関

これまで複数台の検出器のノイズ相関は、ほぼ無相関と考えられていたが、次世代の高感度検出器では、シューマン共鳴を起因としたノイズ相関が無視できないことが指摘された¹⁾。このことは、一般的な背景重力波を捉えるための以下のような相関統計量 (Standard Cross-Correlation statistic)

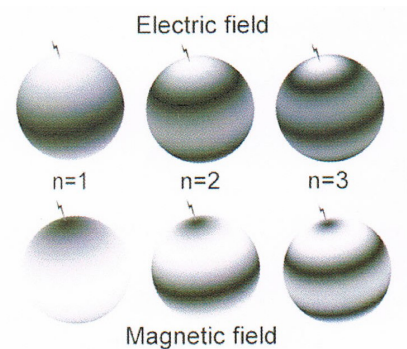
$$\Lambda_{\text{SCC}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s_1^k s_2^k \quad (1)$$

の平均値 $\langle \Lambda_{\text{SCC}} \rangle$ が、重力波信号の二乗期待値 $\langle h^2 \rangle$ だけでなく、 $\langle n_1 n_2 \rangle$ のノイズ相関が残ることを意味する。シューマン共鳴とは、雷を起源とした電磁波が地球の地表と電離層との間 (実効的な意味での空洞共振器) を反射しながら進行し、その波長が地球一周の距離の整数分の一で共鳴する現象のことである。地球の半径を特徴的なスケールとしている現象からも、事実、7.83 Hz, 14.1 Hz, 20.3 Hz, などで共振のピークが常時観測されている。



シューマン共鳴のパワースペクトル²⁾

シューマン共鳴が存在した場合には、二つの検出器の間でそれによる相関が存在し、背景重力波にとっては前景のシグナルとなるため、結果としてノイズ相関となる。シューマン共鳴は、以下のような図のような振る舞いをしていることから、それによるノイズ相関は、二つの検出器の相対的位置ならびに、それぞれの検出器の指向性など、幾何学的な量に依存した量になる。今回の発表では、このようなシューマン共鳴によるノイズ相関の評価関数を導いたことを紹介し、それについての整合性について議論する。



Electric and magnetic fields of SR modes³⁾

3 まとめ

背景重力波の観測をめざして、本研究では、2台の検出器の間でのノイズ相関について議論し、それを定量的に評価するための表式を紹介した。今後もより現実的な状況を考慮したデータ解析の開発を行っていくために、さらにこれらの研究を推し進めていく所存である。

- 1) E.Thrane, N.Christensen, and R.M.S. Schofield “Correlated magnetic noise in global networks of gravitational-wave detectors: Observations and implications”, Physical Review D87, 2013, p123009
- 2) J.D.Jackson “Classical Electrodynamics”, Wiley; Third Edition(1998)pp. 360-364.
- 3) C.Price, O.Pechony, and E.Greenberg, “Shumann Resonances in Lightning Research”, Journal of Lightning Research, V1, 2007, pp. 1-15,