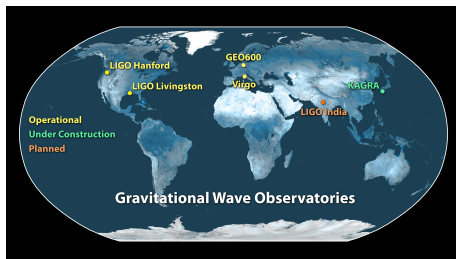


地球規模の雷活動を起源とした大域的磁場が重力波検出器に与える影響について

日大生産工 ○ 姫本 宣朗 京大・基研 樽家 篤史

1. 研究目的

米国の重力波検出器 LIGO(ライゴ: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) による史上初の重力波直接検出 (GW150914) 以降も、新たな重力波直接検出の報告が次々と世界を駆け巡っており、イタリア・ピサにある重力波検出器 Virgo もこれらの発見に貢献している。程無くして、日本の KAGRA もこの輪に加わり、より信頼性の高い情報を含んだ重力波観測が、今後さらに行われていくことは間違いない。



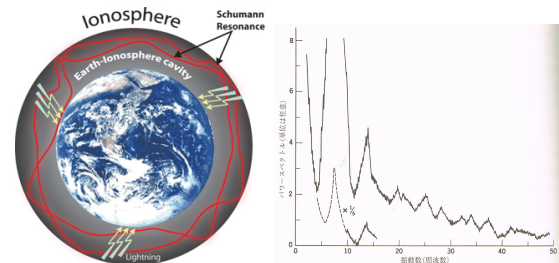
世界の重力波検出器

©2016 Caltech/MIT/LIGO Lab

このような複数台の検出器から得られる観測データを用いたグローバルな相関解析は、検出効率を上げるだけでなく、精度の高い重力波源の位置特定ができるなど、重力波物理学・天文学の発展の一翼を担うデータ解析手法である。また、GW150914 のような特徴的なパルス的な波形をもつ重力波信号とは別に、背景重力波と呼ばれる宇宙背景輻射のような宇宙全体を満たす重力波の存在も指摘されており、その検出には相関解析が本質的かつ唯一の方法である。なぜなら、背景重力波は、ランダムな位相と振幅をもった重力波が重ね合わさった結果として存在しているものであるため、特徴的な波形をもたず、一台の検出器ではノイズとの区別が原理的に不可能

だからである。背景重力波には、インフレーションのような初期宇宙の高エネルギー現象によって宇宙論的にはほぼ一様に生成された時空の揺らぎに起源をもつものや、数多くのコンパクト連星系から放出された重力波の重ね合わせに起源をもつものが考えられていることから、宇宙をより深く知る上で非常に重要な重力波ターゲットである。

このように重力波検出のデータ解析にとって、相関解析が非常に重要な解析手段であることは明白である。しかしながら、何らかの擾乱場が地球規模で存在する場合、たとえ距離的に十分に離れた 2 台の重力波検出器であっても、重力波以外の相関 (相関ノイズ) を持つことになり、結果として、相関ノイズによる重力波誤検出を誘発してしまうおそれがある。このような深刻な問題を引き起こす原因の一つとして挙げられるのが、シューマン共鳴と呼ばれる大域磁場である¹⁾。

シューマン共鳴とそのパワースペクトル²⁾

LIGO、Virgo、さらには KAGRA も含めたいいわゆる第二世代以降の重力波検出器においては、この大域磁場による重力波検出への影響が軽視できないことが指摘されている³⁾。

本研究では、シューマン共鳴を原因とした相関ノイズが重力波検出 (特に背景重力波について) に与える影響について具体的に評価を行った⁴⁾。

Impact of Schumann resonance originating from global lightning activity on gravitational wave detectors

Yoshiaki HIMEMOTO and Atsushi TARUYA

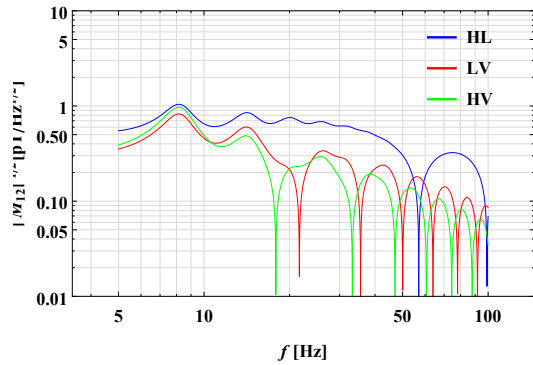
2. 研究内容

2-1. シューマン共鳴によるノイズ相関

地球には一日に約 900 万回近くの雷が発生している。この雷によって発生した電磁波は、地球表面と電離層との間を伝播し、やがてその定在波モードによってシューマン共鳴と呼ばれる大域磁場を作り出す。このとき、2 台の検出器が位置 $\hat{r}_1$ と $\hat{r}_2$ にあるときのシューマン共鳴由来の相関ノイズのパワースペクトル M_{12} は、

$$M_{12}(f_\ell) = \frac{1}{8\pi} P_B(f_\ell) \gamma_\ell^B(\hat{r}_1, \hat{r}_2) \quad (1)$$

で与えられる。ここで P_B は大域磁場のパワースペクトル、 γ_ℓ^B は大域磁場に対する位置 $\hat{r}_1$ と $\hat{r}_2$ にある重力波検出器の関係性を特徴づける関数である⁴⁾。この式は、相関ノイズは大域磁場のパワースペクトルだけではなく、検出器間の幾何学的配置や磁場に対する検出器の応答特性の関係にもよることを意味している。



相関ノイズのパワースペクトル M_{12} ⁴⁾

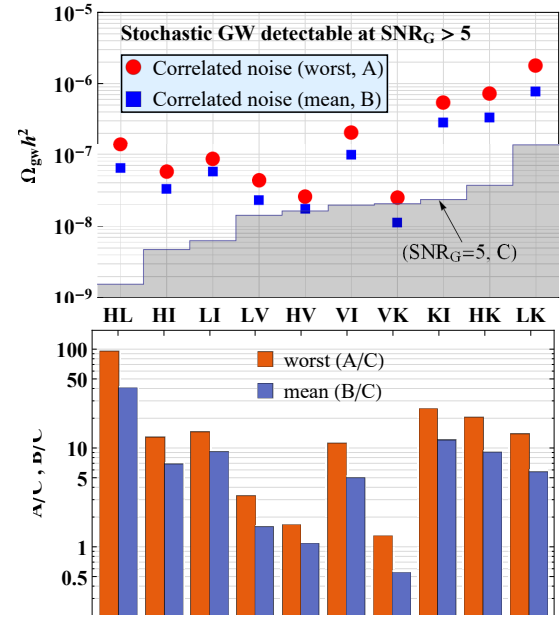
H:LIGO-Hanford, L:LIGO-Livingston, V:Virgo.

図のように、相関ノイズは検出器のペアによって変化していることがわかる。

2-2. シューマン共鳴による相関ノイズが重力波検出に与えるインパクト

以下の図は、シューマン共鳴による相関ノイズの影響を背景重力波のエネルギー密度 (縦軸) に換算したものを H, L, V に KAGRA(:K) と LIGO-India(:I) を加えた様々な検出器ペアの場合においてプロットしたものである。シグナルーノイズ比 (SNR_G) が 5 以上で、95 % 以上の確率で信号検出ができたことを意味する。図の階段状の線は、各検出

器ペアが $\text{SNR}_G=5$ を満たすときの背景重力波のエネルギー密度である。図から、ほとんどの検出器のペアにおける相関ノイズが、重力波信号を覆い隠すことがわかる。ただ特筆すべきは、Hanford-Virgo、Virgo-KAGRA のペアに限っては、他に比べて相関ノイズの影響が相対的に小さく、背景重力波の検出が可能であることを示唆している。



相関ノイズのインパクト⁴⁾

3. まとめ

本研究では、シューマン共鳴を由来とした 2 台の検出器間の相関ノイズが重力波検出に与える影響について、様々な検出器ペアに対して評価を行った。今後の目標は、本研究を発展させて、相関ノイズの低減方法を探り出し、その方法を実装したデータ解析の開発を行っていくことである。

- 1) W. O. Schumann, Z. Naturforsch. Teil A 7, 149 (1952).
- 2) J.D.Jackson “Classical Electrodynamics”, Wiley; Third Edition(1998)pp. 360-364.
- 3) E.Thrane, N.Christensen, and R.M.S. Schofield, Physical Review D87, 123009 (2013).
- 4) Y.Himemoto and A.Taruya, Physical Review D96, 022004 (2017).