

SAS シミュレーションによる低周波防振評価と低周波重力波検出

小野 謙次 (東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻)

Abstract

KAGRA において検出できる重力波信号は、様々なノイズによる検出限界値が存在する。それらの感度の制限において、低周波帯の感度は主に輻射圧雑音と鏡の振動により決定され、特に鏡の振動は低周波の感度に強い制限を与えてしまう。KAGRA は鏡を防振するため低周波防振装置 SAS を導入することが計画されている。これにより、より低周波側に重力波の感度が伸び、パルサー等低周波における重要な重力波信号が検出できるようになることが期待されている。

今回、KAGRA に導入される SAS のモデルをつくり、シミュレーションを行うことにより、低周波域においてノイズをどのくらい軽減できるのかを見た。それにより、防振系をなす倒立振子、GAS フィルターはより良く低周波数帯において防振されていることがわかったが、パルサーの周波数帯域においてヒートリンクの雑音が大きくなり、感度が悪化してしまうという結果を得た。

1 Introduction

現在、日本において建設されている重力波望遠鏡である KAGRA は干渉計型重力波検出器と呼ばれており、これまで観測が行われてきた金属共振型重力波観測装置よりも非常に幅広い帯域の重力波が検出できるものとして期待されている。しかし、干渉計を構成する部品等による様々な雑音により、検出できる重力波の振動数や振幅には制限が与えられてしまう。観測装置の感度を制限する雑音の種類として代表的なものを挙げると、高周波部分を制限するショットノイズや鏡の熱雑音、さらに低周波部分を制限する輻射圧雑音や地面振動雑音などが存在する。これらによって制限される重力波の検出限界を感度曲線と呼ぶ。

この内、低周波部分の検出限界を決める主な要因である地面振動雑音は輻射圧雑音よりも傾きが急であり、この雑音を低周波側に移動させることにより、この帯域の重力波放出天体を多く捉えることができると期待されている。そのためには鏡を低周波領域において防振しなければならない。低周波において防振を得る方法として、KAGRA において導入することが計画されている低周波防振装置 SAS が研究されている。

今回、低周波防振装置 SAS のシミュレーションを行い、SAS を導入したことにより感度曲線はどう与

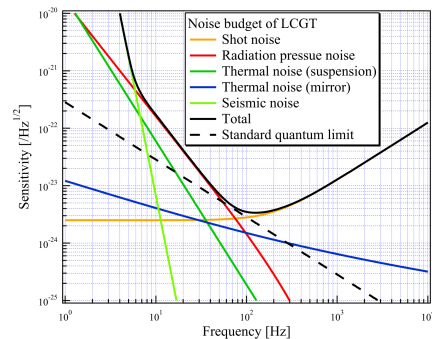


図 1: KAGRA の目標感度曲線

えられるのか。それによりどのような重力波放出源を捉えることができるのかについての解説を行う。第 2 章では低周波数帯において検出が期待されている天体のレビューを行い、第 3 章では低周波防振装置 SAS の簡単な説明を行う。第 4 章では SAS のシミュレーションの条件、結果を示し、第 5 章において本論のまとめを行う。

2 Target

この項では、主に低周波数において検出が期待されている重力波の放出源のレビューを行う。

2.1 パルサー

低周波数帯における重力波の源としてパルサーが存在する。重力波は軸対象な系からは放出されないことが知られているが、もしパルサーが軸対象でない場合、すなわち、中性子星の表面に凹凸が存在する場合、もしくは連星の軌道が楕円系である場合には、パルサーの回転の周波数と同じ周波数の重力波が放出される。図 2 は、電磁波により観測されているパルサーの総数を周波数を大きい周波数帯から積分して表したものである。

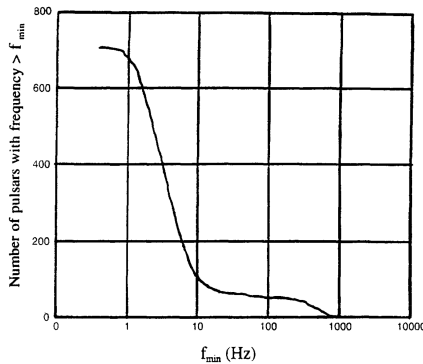


図 2: パルサーの周波数

この図を見ても分かるように、パルサーは1～10Hz付近に多く分布していることが分かる。この事は、防振の周波数制限を低周波数方向に広げることにより、振幅の大きい重力波を放出しているパルサーを捉えられる可能性が高まる事を示している。

重力波によるパルサーの観測の利点として、まだ検出していないパルサーを検出できることが挙げられる。この銀河系だけでも、約30年に一度超新星爆発が起きていると考えられ、よって膨大な数の中性子星が存在していると推測される。電磁波で観測できるパルサーは、ビームが地球方向を向いていなければ観測できないが、重力波は非対称な系であるときに放出されるので、電磁波では観測できないパルサーが検出できる可能性がある。

以上より、パルサーは低周波数における重力波検出対象として非常に重要であることが分かる。

2.2 中性子連星合体

中性子連星は、合体直前期には典型的に10～20Hzの周波数の重力波を放出している。これが合体する際、連星が近づくに従ってケプラーの法則により連星の回転周波数は大きくなる。それに付随し、星同士が近づくことで重力の変化も大きくなるので重力波の振幅も大きくなる。周波数が大きくなり振幅が大きくなっていくシグナルのことを chirp シグナルという。

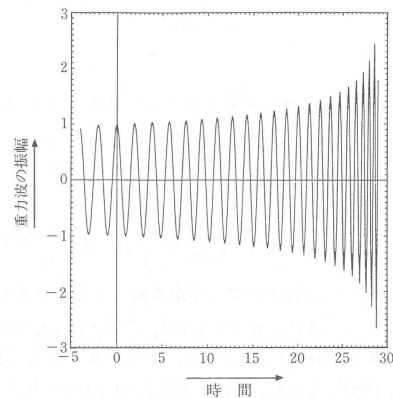


図 3: 典型的な chirp シグナル

この中性子連星の低周波数側を検出出来れば、合体までの観測時間を長くとることができ、より良く天体のパラメータと比較することができる。しかし、この周波数帯での重力波の振幅はとても小さく、かつこの重力波放出で重要になるのは重力波振幅が大きくなる中間周波数帯であるため、防振による検出可能性の改善への寄与はそこまで大きくない。

3 Instruments

SAS は、主に水平軸の防振を計る倒立振子と、垂直軸方向の防振を計る GAS フィルターの2つから構成されている。まず、低周波数帯を防振するにはどうしたらよいかを解説した後、それぞれの部分がどのように低周波数帯において防振されるかを簡単に解説する。

3.1 低周波数帯の防振

糸で吊るされている簡単な振り子を考える。この時、物体の変位を x 、天井の変位を w 、糸の長さを l 、重力加速度を g 、振り子の質量を m と置くと、運動方程式は

$$m\ddot{x} = -\frac{mg}{l}(x - w)$$

この立式において、角振動数を ω としてフーリエ変換を行うと、

$$\begin{aligned} \tilde{X} &= \frac{\omega_0^2}{-\omega^2 + \omega_0^2} \tilde{W} \\ &\equiv H(\omega) \tilde{W} \quad \omega_0 \equiv \sqrt{\frac{g}{l}} \end{aligned}$$

となる。ここで $\omega_0 = 2\pi f_0$ で表される f_0 は共振周波数を表す。この式はある周波数帯において、地面振動 \tilde{W} が $H(\omega)$ 倍されて物体に伝わり \tilde{X} で揺れることを表す。この $H(\omega)$ は、 ω が共振周波数付近において大きくなり、共振周波数よりも大きい周波数帯では

$$H(\omega) \sim \omega^{-2}$$

にしたがって落ちていくことが分かる。つまり、共振周波数が小さいほど、低周波数帯において地面振動の寄与を少なくできる。すなわち、低周波数帯における防振を実現することができる。

以上より低周波数帯における防振を計るためには共振周波数を小さく取れば良いことがわかった。それでは具体的に、どうすれば共振周波数を小さくすることができるのか。KAGRA に導入することが計画されている 2 つの方法を紹介する。

3.2 倒立振り子

倒立振り子は主に水平方向の防振に用いられる。概図は図 4 で表され、上部におもりをつけ、Flex joint により地面と接触をするという特殊な構造をしている。

これは、おもりが水平移動するに伴い、ジョイント部分の復元力とおもりにかかる重力とを打ち消しあうようにし、あたかも非常に弱いバネ定数になるようにしているためである。この時の実効的なバネ定数は、以下の式で表される

$$k_{eff} = \frac{k_\theta}{l^2} - \left(\frac{m}{2} + M\right) \frac{g}{l}$$

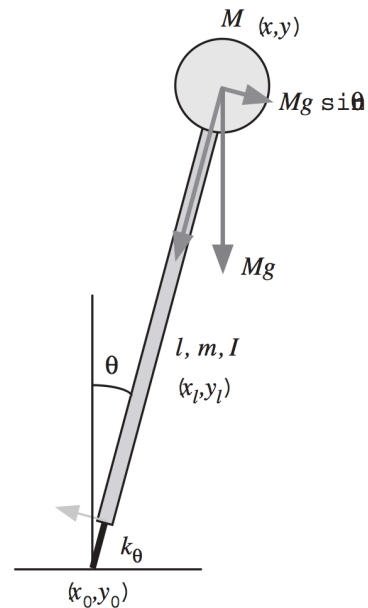


図 4: 倒立振り子の概図

バネ定数が小さくなれば、バネ系の共振周波数である $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$ を小さくすることができる。すなわち低周波数帯における防振が実現できる。

3.3 GAS フィルター

垂直方向の防振を計る GAS フィルターは、数枚のブレードにより鏡を吊るよう構成されている。



図 5: GAS フィルタープロトタイプ

ブレードは中心方向に圧迫されていて、糸に吊るされている物体を上方向に持ち上げる力が働く。しかし、物体には重力が反対方向に働くので、結局打

ち消し合い、倒立振子の時と同様に見かけのバネ定数が小さくなり、共振周波数を下げることができる。

KAGRA において GAS フィルターは複数導入される。フィルターは 1 つにつき ω^{-2} に従い防振されるが、これらが組み合わさるとより良く防振のべき乗を高めることができ、 n 個を導入すると ω^{-2n} という強い防振を得ることができる。しかしその分共振周波数部分において大きな振動がみられ、RMS 振幅が大きくなり、干渉計が安定的に動作しなくなる。これを改善するには、これまで議論した受動的な防振のみではなく、変位センサー、アクチュエータを用いた能動的な防振が必要となる。

4 Simulation/Result /Discussion

今回、Mathematica をもちいて SAS の感度曲線のシミュレーションを行った。シミュレーションの条件としては、KAGRA に実際導入される計画であるもの。すなわち、GAS フィルターを 5 つつなげ、かつ倒立振子を最上部に配置するモデルを作った。KAGRA では鏡を冷却するため鏡の近くにヒートリンクという糸を結ぶが、そこからの振動の導入も考慮した。地面振動としては、KAGRA が建設される神岡坑道の地面振動のデータを用いた。

以上の条件においてシミュレーションを行った結果、以下の図のようになった。

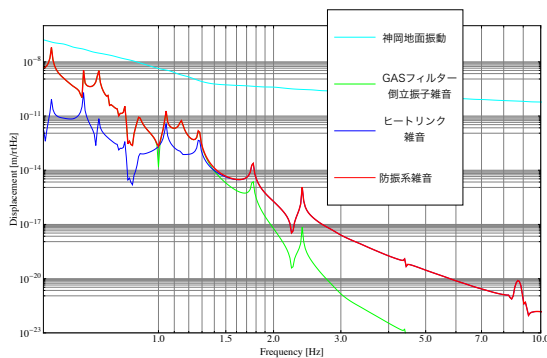


図 6: シミュレーション結果

これを見ると、KAGRA の防振装置において、約 1.5Hz 未満のところは主に倒立振子、GAS フィルターにより制限がかけられ、約 1.5Hz 以上の部分においてはヒートリンクによって制限がかけられることが分かる。

パルサーの主な周波数帯域は 1 ~ 10Hz であるので、パルサーの帯域はヒートリンクによる制限がかかってしまうことが分かる。すなわち、パルサーを観測するにあたり、倒立振子、GAS フィルターは良く防振されているが、ヒートリンクの雑音のパルサーの観測帯域にかかり検出感度を悪化させてしまうことがわかった。

5 Conclusion

今回、パルサーという低周波数帯域における重力波信号を検出するため、低周波帯域の検出限界を与える防振系の感度曲線をシミュレーションにより評価した。防振系をなす倒立振子、GAS フィルターはパルサーの主な周波数帯域である 1Hz 以上ではより良く防振されているという結果が出た。しかし、ヒートリンクの影響により 1Hz 以上に雑音を与えられ、倒立振子、GAS フィルターで得た感度が悪化してしまうという結果を得た。

Acknowledgement

The authors thank the Yukawa Institute for Theoretical Physics at Kyoto University, where this work was initiated during the WITP-W-13-07 on "Summer School on Astronomy & Astrophysics 2013".

Reference

- LCGT Collaboration. 2009.
- 中村 卓史, 三尾 典克, 大橋正健. 1998. 京都大学出版会 重力波をとらえる
- M.Beccaria et al. 1997. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 397 397-408
- 我妻一博. 2012. 修士論文 東京大学大学院理学系研究科