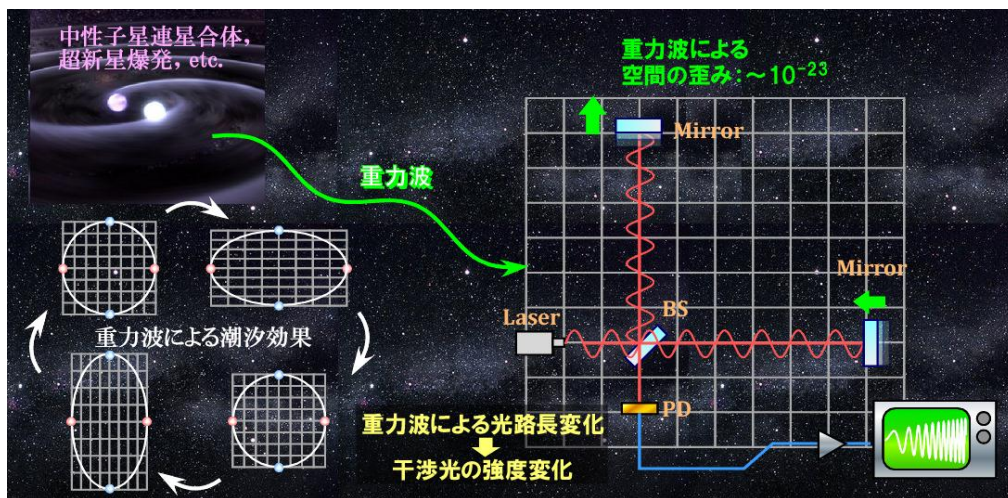


# 地上重力波検出器における地面振動雑音対策

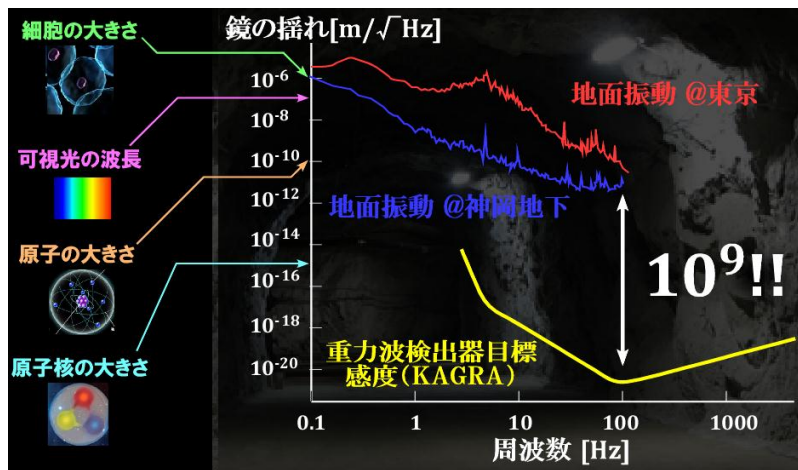
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
博士1年 関口貴令

## 1. 地上重力波検出器と地面振動

レーザー干渉計型重力波検出器は、重力波による時空の歪みをレーザー光の干渉を利用して検出する装置である。重力波は質量の加速度運動により生じ、その伝播方向と垂直な面内の空間を潮汐的に伸縮させる。マイケルソン干渉計においてビームスプリッターで分けられた2本のレーザー光の位相は重力波により変化し、その結果干渉光の強度が変化する。この干渉光強度の微小な変化を測定することにより重力波を検出することが可能である。

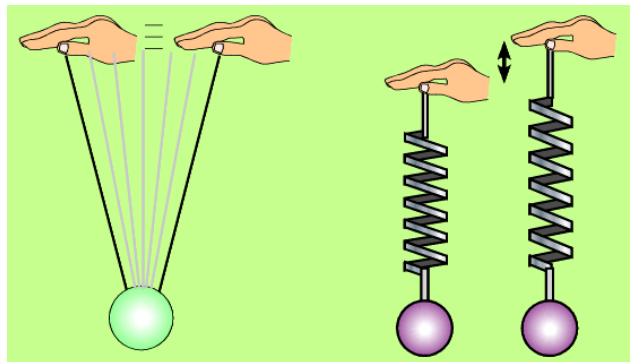


現在地上に建設されている大型のレーザー干渉計型検出器は中性子星連星合体から来る重力波（周波数は  $10 \sim 10000$  Hz 程度）を主なターゲットとしており、期待される重力波振幅は  $10^{-23}$  程度である。現在地上に建設されている検出器は km クラスの基線長を持つレーザー干渉計を利用しているが、それでも重力波による鏡間の距離変化は  $10^{-20}$  m 程度しかない。一方、干渉計を構成する鏡は地面から何らかの方法で保持されており、地面振動のレベルは 100 Hz の周波数で  $10^{-11}$  m 程度と、重力波による影響に比べて極めて大きい。ゆえに重力波検出器では、地面振動によって干渉計を構成する鏡が揺れないような防振機構が必要となる。

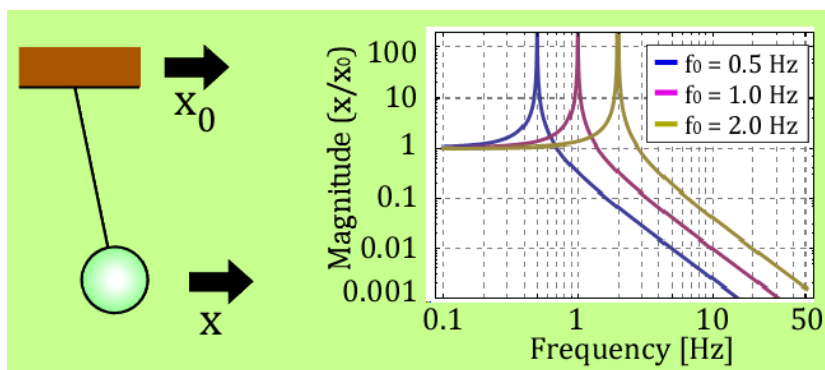


## 2. 防振の基本原理

振り子の上端を左右に素早く振ると、慣性の法則により振り子の玉は静止したままであろうとする。この振り子の性質を利用し、鏡を多段の振り子で吊ることにより高周波で水平方向に鏡が揺れないようにすることが可能である。鉛直方向も同様に多段のばねを用いて防振することができる。

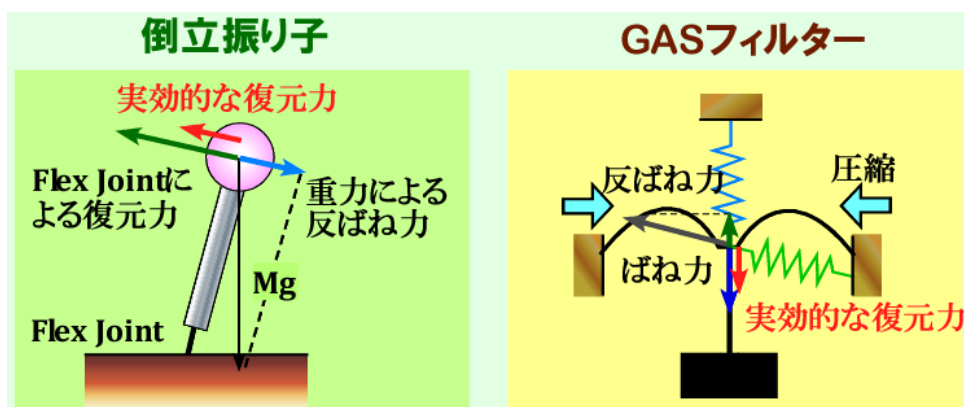


より詳しく言うと、振り子やバネはそれらが持つ共振周波数よりも高い周波数の振動を伝えないという性質を持っている。下図は様々な共振周波数の振り子の防振性能を比較したグラフとなっており、振り子は共振周波数に極を持つ 2 次のローパスフィルターとして働くことがわかる。



このように共振周波数が低いほど、より低周波から防振することができ、かつ同じ周波数で見た時の防振性能が上がるため、防振性能を高めるには振り子やばねの共振周波数を下げればよいことがわかる。

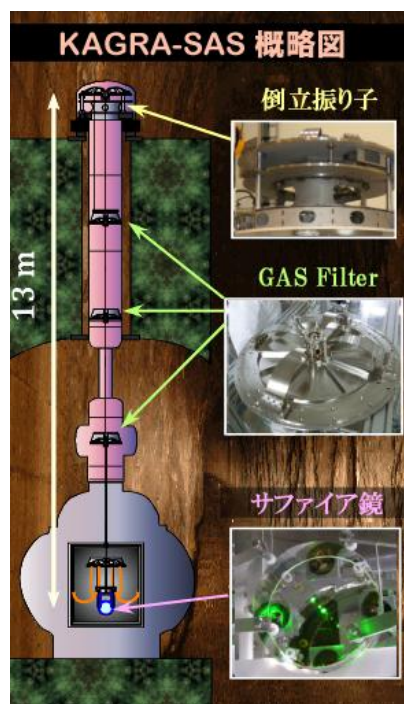
これらの防振装置は共振周波数よりも高い周波数の地面振動をカットすることができるが、共振周波数より低い周波数の地面振動はそのまま伝えてしまう。ゆえに重力波検出器の低周波の感度は地面振動により制限され、そのカットオフ周波数は防振装置の共振周波数により決まっている。一方、低周波にはブラックホール連星合体や初期宇宙など興味深い重力波源が多く存在する。検出器感度を低周波側に広げるため、低い共振周波数を持つ振動子の開発が求められており、現在重力波業界では以下の倒立振り子や GAS(Geometric Anti-Spring)フィルターなどが開発されており。

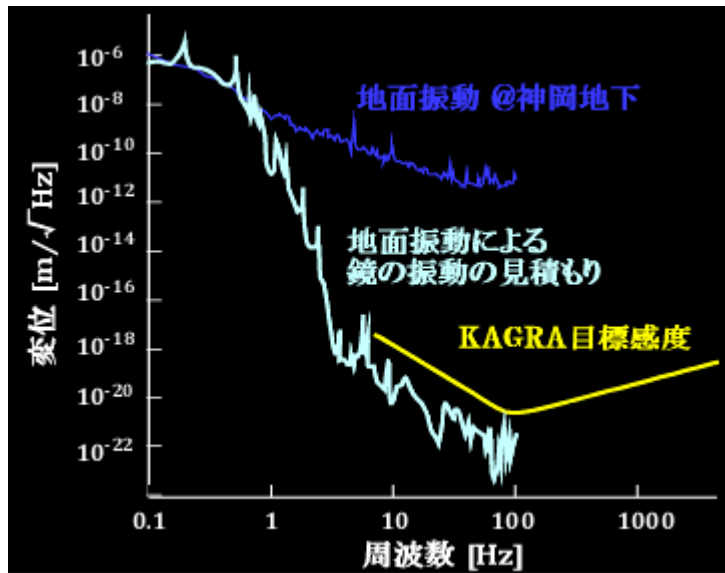


### 3. KAGRA における地面振動対策 :

#### SAS (Seismic Attenuation System)

日本の次世代重力波検出器 KAGRA では、メインの鏡（テストマス）を防振するのに 7 段の振り子と 5 段の縦バネが用いられる。鏡は上段のトンネルから 13 m もの長さの防振系により吊られる。水平方向の初段の防振には極限まで共振周波数を低く抑えた (~30 mHz) 倒立振り子が用いられ、鉛直方向の防振にはやはり低い共振周波数 (~300 mHz) を持つ板バネ装置である GAS フィルターが用いられる。防振系の最下段は鏡の熱振動を抑えるため極低温まで冷却される。防振系は、下のグラフのように 10 Hz 以上の周波数で地面振動雑音は他の雑音（熱雑音など）を下回るように設計されている。





SAS は日本の第 1 世代重力波検出器である TAMA においてその性能が確かめられ、またアメリカの LIGO やヨーロッパの Virgo 等の検出器に向けてこれまで開発が行われてきた。現在はヨーロッパ (NIKHEF、ローマ大学等) の研究者と協力しながら、倒立振り子・GAS フィルターの性能測定、また共振周波数で鏡の揺れを抑えるためのダンピング機構の開発が行われている。

