

# 重力波検出器における低周波防振

東京大学大学院理学系研究科修士1年 関口貴令

発表日：2010年8月3日(火)

## 1. 重力波

### 1.1. 重力波直接検出への期待

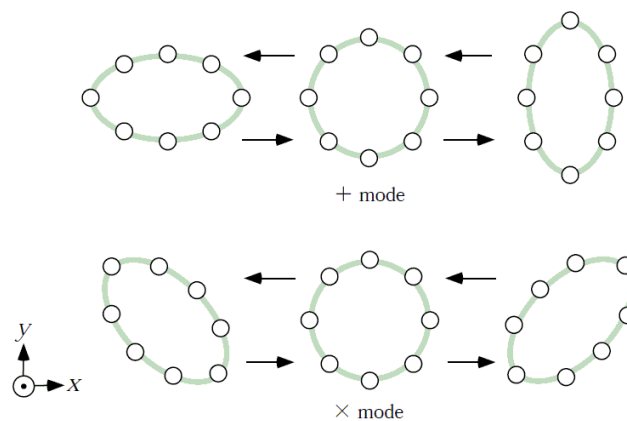
重力波とは、Einstein が一般相対性理論の中でその存在を予言した、光速で伝播する「時空のさざなみ」とも呼べるものである。荷電粒子が加速度運動を行うことで電磁波を発生させるのと同じように、質量を持った粒子が加速度運動を行うことにより重力波が放出される。

重力波の存在は間接的には証明されていて、PSR1913+16 という連星パルサーの公転周期が減衰する原因について、重力波がエネルギーを持ち去るためであると仮定すると観測結果とほぼ一致することが J.H.Taylor らによって示されている[1]。しかし実際に重力波の直接検出が成功された例はこれまでのところなく、重力波検出は一般相対性理論の検証実験の中で残された課題の一つとなっている。

もちろん重力波の直接検出は一般相対性理論の検証以外の意義もある。もし重力波が検出できるようになると、天体現象に関して、電磁波からは得ることのできない様々な情報が重力波によって得られると考えられている。中性子星やブラックホールといったコンパクトな天体の内部構造、宇宙の晴れ上がり以前の初期宇宙の様子などが重力波によって見るとされており、「重力波天文学」によって新たな宇宙観が得られる可能性も少なくはない。重力波の直接検出に対する期待は非常に大きいと言える。

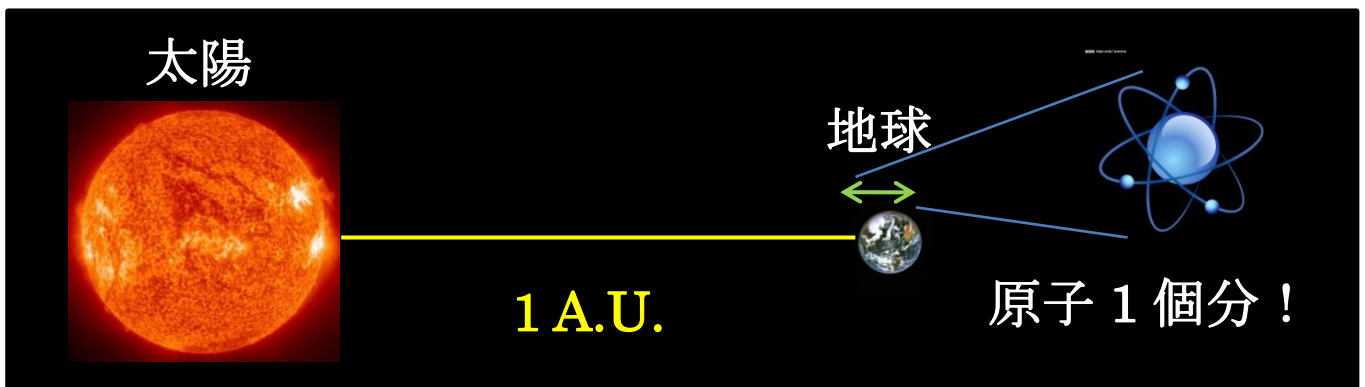
### 1.2. 重力波の影響と検出の難しさ

重力波が入射すると時空の計量変動し、自由質点間の固有距離が変化する。ここで自由質点とは重力以外の力を受けない仮想的な粒子のことである。重力波には+モードと×モードという2つの偏光が存在し、x-y平面上に環状に配置された自由質点群にz軸方向から重力波が入射すると、それぞれ下図に示すような固有距離変動が促される[2]。



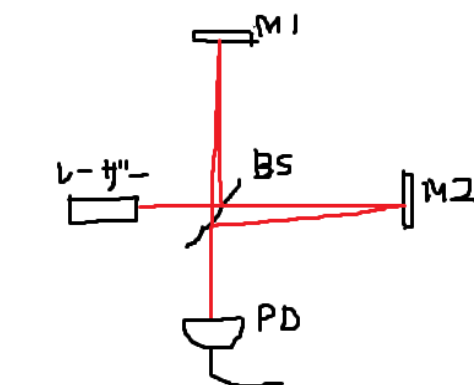
図はかなり強調して書かれていることに注意されたい。質量が加速度運動すれば重力波は生じるので、我々の身の回りでも重力波は常に放出されていると考えられる。しかし地球上の物体に対して我々が万有引力を感じることはないように、そこから放出される重力波はあるとしても非常に微弱なものである。よって実験室で重力波を発生されてそれを検出するといったことはほぼ不可能であり [3]、重力波検出のためには膨大な質量の加速度運動を伴う天体現象に目を向ける方が現実的である。

現在考えられている重力波源としては連星中性子星、超新星爆発、初期宇宙における量子ゆらぎなどがある。しかし上に挙げたような非常に重い天体が加速度運動したとしても、そこから放出される重力波の振幅は非常に小さい。例として 200 Mpc 離れた連星中性子星が合体衝突する際に放出される重力波の振幅を見積もると  $10^{-21}$  程度になることが示される [4]。これは 1 m の距離にある自由質点間の固有距離をおよそ  $10^{-21}$  m 変化させることに相当する。もう少しわかりやすい例でいうと、地球-太陽間の距離がおよそ  $10^{11}$  m なので、その距離を  $10^{-10}$  m、すなわち原子 1 個分変化させる程度である (下図)。このように重力波と物質の相互作用は非常に小さく、それを検出するのは至難の業であると言える。



### 1.3. 重力波の検出法

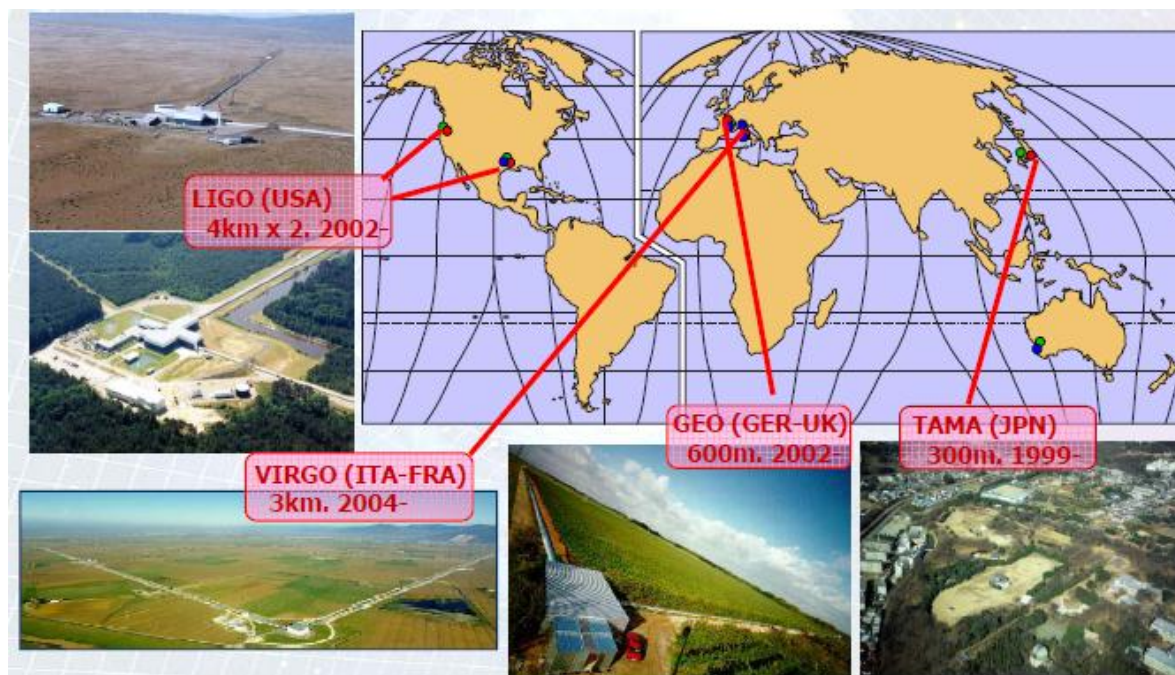
このような非常に微小な変位を捕えることのできる (と期待されている) 装置として、Michelson 干渉計がある。その装置の概略図を以下に掲載する。



※マイケルソン型レーザー干渉計

Michelson 干渉計は光の干渉を利用して、鏡の微小な変位を捕える装置である。鏡を自由質点と見なせば、前節で説明したように、重力波が入射すると片方の腕（ビームスプリッターと鏡を結ぶ線分）が縮むときにもう片方の腕が伸び、片方の腕が伸びるときにもう片方の腕は縮む。これにより 2 つのレーザー光の光路長が変化し、それが 2 つの光が合わさるところにおける干渉縞の変化、すなわちフォトディテクターの出力の変化を引き起こす。これが重力波検出の原理である。

重力波の影響（固有距離の変化）は光路長が長ければ長いほど大きい。もし腕の長さが 1 m しかなければ  $10^{-21}$  m の変位を見なければならないが、腕の長さが 1 km あれば  $10^{-18}$  m の変位を見るだけで済む。よって重力波検出のためには大規模な干渉計建設が不可欠である。実際、現在世界で建設されている干渉計型重力波検出器の多くが km クラスの腕を持つものである（下図[5]）。



現在、アメリカに 4 km の腕を持つ干渉計が 2 台あり、ヨーロッパに 3 km および 600 m の腕を持つ干渉計が 1 台ずつある。日本には現在のところ（試作機を除けば）300 m の腕を持つ干渉計 1 台しかないが、3 年後、岐阜県神岡鉱山に 3 km の腕をもつ干渉計型重力波検出器 LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)が建設される予定である[6]。

#### 1.4. 重力波検出の困難

重力波検出の原理は上で述べた通りであるが、これを実現するためには鏡が自由質点として動作する必要がある。実際には地球には重力があるため鏡を支えるためにワイヤー等で懸架する必要があるが、その際地面からの振動を拾ってしまうなど、重力波以外の原因で鏡が動いてしまう可能性がある。また光源であるレーザーの周波数が不安定だと鏡が静止していても干渉縞が変化してしまう。このように重力波検出は常に雑音との戦いとなっている。

## 2. 重力波検出器の防振

重力波検出器には様々な雑音が存在し、その中でも地面振動は地上検出器に特徴的な、非常に大きな雑音源である。この章では重力波検出器において地面振動をどのように防振するかについて説明し、その中で自分が現在どのような研究を行っているかについて簡単な紹介を行う。

### 2.1. 地面振動と重力波検出

地面は揺れていないように見えても、常に  $1 \mu\text{m}$  程度振動している。そのため鏡をそのまま地面の上に置いたのでは、 $10^{-6} \text{ m}$  のオーダーで振動してしまうことになる。前章で述べたように重力波による影響は  $10^{-18} \text{ m}$  のオーダーであるから、そのままでは重力波信号は地面振動に埋もれてしまい見ることができない。正確には、地面振動は低周波領域 ( $< 1 \text{ Hz}$ ) に集中しており、重力波検出器がターゲットとしている周波数 ( $\sim 100 \text{ Hz}$ ) と異なることから、周波数の違いによってある程度地面振動と重力波信号を区別することは可能であり、地面振動を  $10^{-18} \text{ m}$  のオーダーにまで防振しなければならないということはない。しかし地面振動は重力波検出器がターゲットとしている周波数においても十分大きな振幅を持っており、かつ低周波であっても鏡が大きく揺れていると干渉計が機能しなくなることから、地面振動の防振は重力波検出において必須であると言える。

### 2.2. 防振の原理

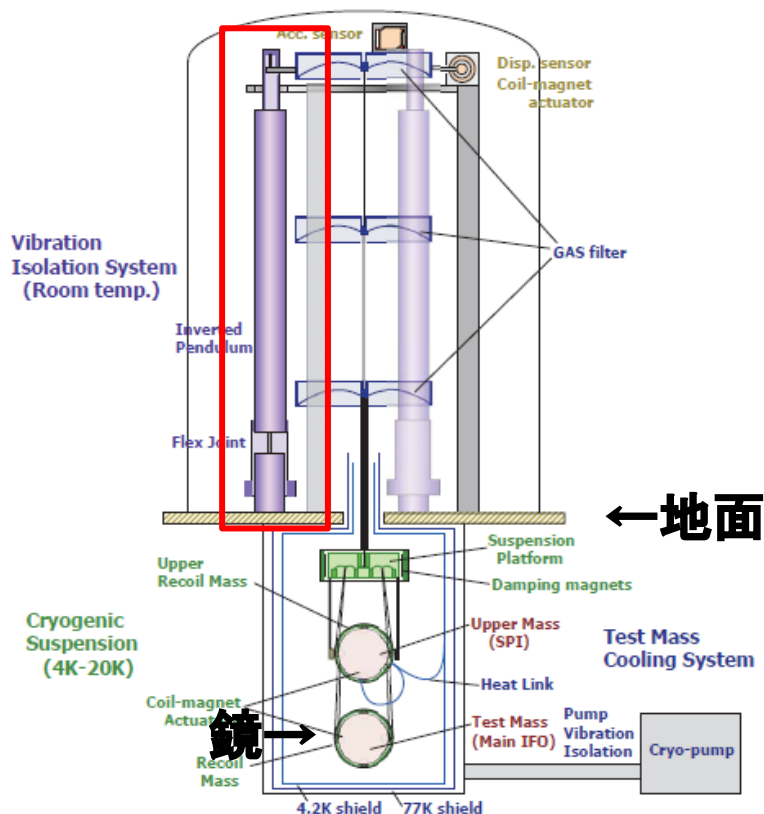
防振は基本的には振り子やばねを用いる。振り子やばねはその共振周波数よりも高い周波数に対しては高い防振特性を持つ（振り子の一端に錘を吊るし、もう一端を手を持って揺らす場合、ゆっくり動かすと振り子に吊るされた錘は手と一体になって動くが、素早く動かすと錘はほとんど動かない。これは、振り子が共振周波数よりも低い周波数の揺れに対しては防振特性を持たないが、高い周波数に対しては防振特性を持つことの証である）。よって高い防振特性を出すためには、低い共振周波数を持つような振り子（ばね）を作ればよい。

振り子の共振周波数を下げるためには紐の長さを長くすればいいが、あまりに紐の長さを長くすると、紐自体がたわんでしまい思うように防振特性が出ない。また装置が巨大になって建設が大変である。そのため、装置を大きくすることなく低い共振周波数を実現するような振り子として、例えば倒立振り子[6]が重力波検出器で使われる。

### 2.3. 防振装置

3年後に神岡鉱山に建設される予定の LCGT における、防振装置のデザインを次頁に示す[7]。図に示すように地面から鏡に至るまで何段もの防振装置を直列につなぎ合わせて高い防振特性を実現する。

## 倒立振り子



### 2.4. 装置の特性と自身の研究テーマ

上図に示したような装置によって、水平方向や鉛直方向の防振は実現できると一応見積もられている。しかしその見積もりは、上のような複雑な装置をいわば多段振り子のような簡単なモデルと見なしたときのものである。実際には装置が複雑になればなるほど、地面振動の鏡への伝わり方は複雑となっていく。例えば地面の傾きは鏡の振動に大きな影響を及ぼすと考えられるが、それは多段振り子のモデルでは説明することができない。

2.2 節で述べたように防振の原理自体は簡単なものであるが、実際に使われる装置の構造は非常に複雑であり、装置を通じて地面振動がどのように鏡に伝わるかを見極めるのは非常に困難である。そこで自身の研究では、上図のような装置を通して地面振動が鏡までどのように伝わるかを、多段振り子モデルよりもっと現実的なモデル（剛体モデル）を適用することによりシミュレーションする。開発環境としては、数値計算ソフト MATLAB®およびその関連製品（Simulink, Simmechanics）を使用する。

参考文献

- [1] J. H. Taylor, J. M. Weisberg, *Ap. J.* **345**, 434 (1989)
- [2] Michele Maggiore “Gravitational Waves Volume1: Theory and Experiments” Oxford University Press (2008)
- [3] Peter R. Saulson “Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors” World Scientific Publishing (1994)
- [4] 中村卓史、三尾典克、大橋正健「重力波をとらえる ー存在の証明から検出へ」京都大学学術出版会 (1998)
- [5] <http://aserv.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~naoshi/gakujuutsu/08ando.pdf>
- [6] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/homej/grj.html>
- [7] LCGT Collaboration 「大型低温重力波望遠鏡(LCGT)計画 ー設計文章(第3版)ー」(2009)  
<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/homej/grj.html>