

基礎レクチャー 9/9 の分 (世界の地上重力波検出器)

東京大学理学系研究科天文学専攻 M1 チン タン

2010/9/26

1 GEO600, TAMA300, CLIO

GEO はドイツにあり、一回折り返して、600m の干渉計である。ディテクターの前の Signal Recycling Mirror を動かすことで、最高感度の周波数帯を変化させることができる。

TAMA300 は三鷹の天文台にある。(一回は見よう!)30 億円かかっている。2000-2002 年の間は世界の最高感度を保持した。2003 年から 2008 年への感度の向上は SAS の導入のためである。

CLIO は神岡にある 100m の干渉計である。低温と静かさが特徴で、ワシントンの LIGO と比べて、 $10^0 - 10^1, 10^2 \text{ Hz}$ の間では CLIO の方が感度が高い。10Hz のところは感度がよくないが、ここは防振するから別に気にしないでいいのだそう。

2 ファイトクラブ

川村先生が神技でノイズを減らしたっていうやつについて。

重力波観測装置には鏡が使用されており、その振動を抑えるために、コイルマグネットによる力を使って、鏡の揺れを抑えている。ここで起こる熱雑音について考える。

2.1 コイルマグネットとは

重力波観測装置では鏡に棒状の磁石をとり付けて、外部にその磁石にかぶさるようにコイルを非接触で被せ、コイルに電流を流し電流による誘導磁場を利用して磁石(鏡)に力を与え、制御する。

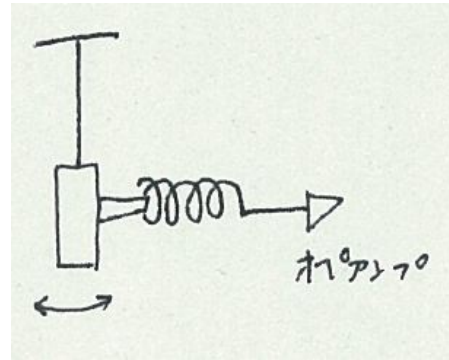


図 1: コイルマグネット。鏡には磁石がくっつけられており、外部に固定されたコイルで磁石に力を与える。

鏡の揺れが 1Hz で $10^{-7} [m/\sqrt{Hz}]$ であったとすると、アクチュエーターであるコイルマグネットも同じ力が必要である。このコイルマグネットの性質として、10V をコイル流したときに、 10^{-7} m 動かせるとする。(1Hz) でこのときのコイルのノイズを $10 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$ とする。

この状態で 100Hz のときにコイルマグネットの力がいくら必要かを計算する。以下のようなノイズの曲線を考える。

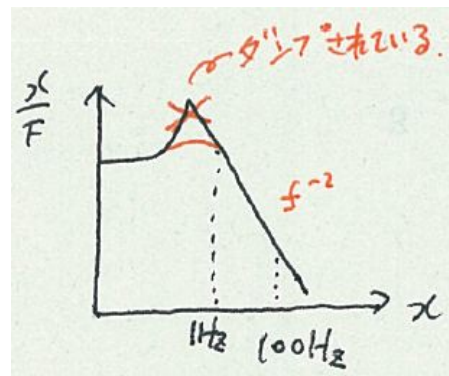


図 2: 鏡の揺れのノイズ曲線。ダンピングされているとして、共振部分は均されているとする。共振以降は f^{-2} でノイズが落ちる。

先の仮定より 1Hz で力が 10^{-7} m 必要なので 100Hz では $10^{-7-4} \text{ m} = 10^{-11} \text{ m}$ の力が必要となる。表

f	V	力
1Hz	10V	$10^{-7}m$
100Hz	10V	$10^{-11}m$

コイルマグネットで 10V で $10^{-11}m$ の力がでるならば、コイルのノイズである $10nV/\sqrt{Hz}$ が引き起こす力のノイズは 100Hz で $10^{-20}m$ となる。つまり、コイルのノイズはこの値以下でなくてはならない。

以上の議論から分かるように、100Hz の雑音は 1Hz の雑音と関係しており、1Hz での雑音を抑えることが必要である。

2.2 コイルマグネットにおける熱雑音とその抑制方法

実際のコイルマグネットにおいては、コイルの回りにはコイルを支えている金属があり、この金属が抵抗が大きいのがいいのか (つまり絶縁体)、小さいのがいいのかを考える。

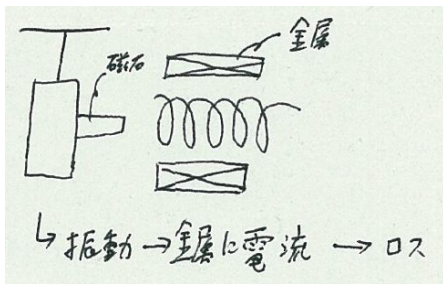


図 3: コイルマグネットとコイルのまわりについている金属。

鏡が揺れると、金属に電流が誘導される。ここで金属にはいくらか抵抗があるのでロスが生じ、(揺動散逸定理より) ノイズが発生する。このノイズを考える。

下の図のように、ノイズの形があり、その周波数成分の積分は $k_B T$ である。つまり、 f_0 で振動が大きければ、大きいほどに他の周波数での振動が下がってくる。

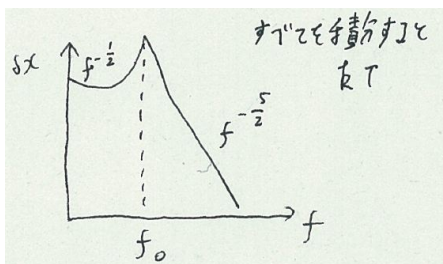


図 4: 偏差の曲線全領域を周波数で積分すると、その値は $k_B T$ となる。

ここでロスが小さいと考えると、共振周波数で大きく揺れつづけることを意味し、他の周波数での揺れが小さくなる。

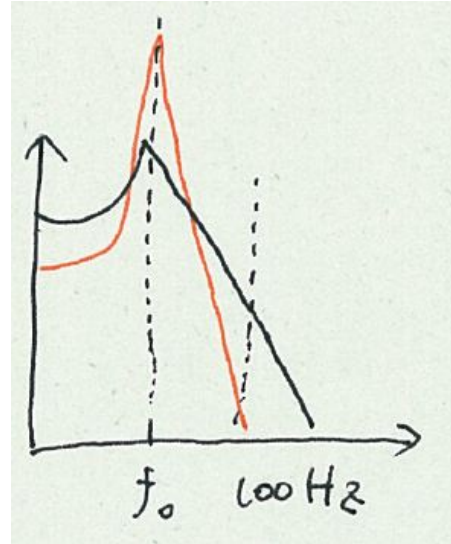


図 5: 共振周波数 f_0 での振動が大きくなったときの偏差の曲線。 f_0 での揺れが大きくなると例えば 100Hz での揺れは小さくなる。

ロスが少ないということは、 Q 値が大きいことを意味している。またロスが少ないということは観測領域での熱雑音が少ないことを意味している。ここで熱雑音とは観測振動数領域で起こった雑音のことをいう。

$$\text{ロス大} \rightarrow Q \text{ 値小, 熱雑音大} \quad (1)$$

$$\text{ロス小} \rightarrow Q \text{ 値大, 熱雑音小} \quad (2)$$

ロスを小さくするために Q を上げるには、コイルを支えているものを金属でないものにすればよい。なぜなら、ジョイソンノイズによる電圧 V は、

$$V = \sqrt{4k_B T R} \quad (3)$$

であるが、その電流 I は、

$$I = \frac{\sqrt{4k_B T R}}{R} = \sqrt{\frac{4k_B T}{R}} \quad (4)$$

であるから。 I が小さければ、磁場が少なくなり、雑音が小さくなる。つまり雑音を小さくしたければ、 I を小さくすればよい。つまりは R を大きくすることになる。

2.3 まとめ

誘導電流による熱雑音は、ロスが小さければ Q 値が高いということなので、熱雑音は小さくなる。ジョysonノイズも同様で、実はこのふたつは同じものらしい。