

## 量子雑音と重力波検出器

小仁所 志栞 (東京大学大学院 理学系研究科)

### Abstract

重力波は TAMA300 や LIGO など、世界中で干渉計を用いた検出が行われている。重力波は微小な波動であるため、観測するためにはさまざまな雑音を除去しなければならない。雑音源として地面振動や熱雑音、量子雑音などさまざまな雑音が検討され、除去するための研究がなされてきた。

以下では特に量子雑音について考える。量子雑音は不確定性関係から標準量子限界を持つ。より高い感度で重力波を検出するためには、標準量子限界を超える必要がある。そのための装置が QND 干渉計である。(i) スクイズド光の入力 [1]、(ii) さまざまな物理量の出力、(iii) 鏡の位置の変調、(iv) 交換する物理量の測定、を満たす [2]。

### 1 背景

重力波は TAMA300 や LIGO など、世界中で干渉計を用いた検出を行っている。現在、日本でも低周波数域の重力波を検出するため、神岡鉱山に KAGRA が建設中である。しかし、重力波は微小な波動であるため、観測するためにはさまざまな雑音を除去しなければならない。雑音源として地面振動や熱雑音、量子雑音などさまざまな雑音が検討され、除去するための研究がなされてきた。

以下では特に量子雑音について考える。量子雑音は不確定性関係から 0 になることはないため、標準量子限界という限界値がある。重力波に対してより良い感度を出すためには標準量子限界を超える必要がある。そのためにどのような装置や制御を行うべきかについて取り上げる。

### 2 雑音について

量子雑音にはショット雑音と輻射圧雑音の 2 種類がある。ショット雑音とは出力場へレーザーの光子数が不確定性原理により揺らぐことである。感度  $S_{SN}$  はレーザーのパワー  $I_0$  に反比例する。

$$S_{SN} \propto \frac{1}{I_0} \quad (1)$$

輻射圧雑音はレーザー光の輻射圧によって鏡の位置が変化することで光路差が生じることである。感度

$S_{RP}$  はレーザーのパワーに比例し、鏡の質量  $M$  や測定する重力波の角周波数  $\Omega$  に反比例する。

$$S_{RP} \propto \frac{I_0}{(M \Omega^2)^2} \quad (2)$$

2 つの量子雑音を合わせたものを標準量子限界という。各比例式からわかるように低周波数域では輻射圧雑音が、高周波数域ではショット雑音が主な量子雑音になっている。

重力波検出の感度を高めるためには、この標準量子限界を超えた感度を出す必要がある。次の章でそのための装置について紹介する。

### 3 干渉計について

重力波はマイケルソン干渉計を基本的な形としている。(図 1) しかし重力波は微小な波動であることから、地上で検出装置を作るためには大きさの上で大きな条件が課せられる。このことから、干渉計には波動を共振させて増幅したり、重力波の信号成分のキャンセルを抑えたりするために、いくつかの技術が加えられている。

波動の増幅：ファブリペロ共振器 (AC)、パワーリサイクリングミラー (PRM)

信号のキャンセルの抑制：シグナルエクストラクショ

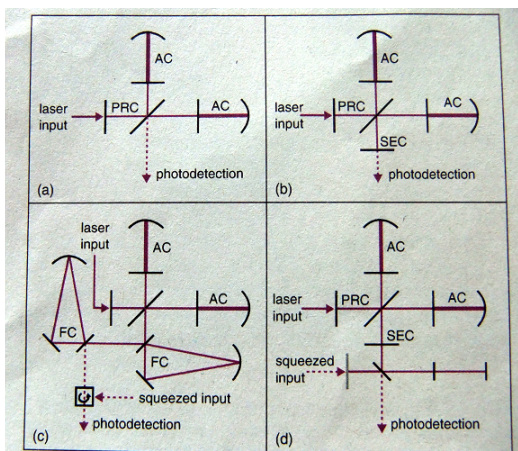


図 1: 干渉計の配置方法 [1]

### ンミラー (SEM)

また、スクイズド光を用いることにより雑音を抑えることもできる。一方の雑音を抑える代わりに、もう一方の雑音を大きくするという、不確定性関係に基づく (図 2)。雑音を抑える方向を調節することで重力波の信号を高め、量子雑音を抑えることができる。スクイズド光の性質はスクイズ角度  $\eta$  によって与えられる。

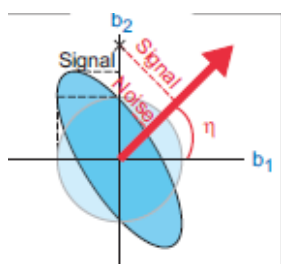


図 2: スクイズド光の様子 [2]

重力波信号に対する感度は、干渉計の配置方法に依存する [1]。そのため以下では、これらの技術を利用した干渉計を挙げ、それらの感度を比較、検討する。

## 4 干渉計の配置方法

今回比較する干渉計の配置方法は次の 5 種類である。それぞれの特徴をまとめる。

(1) conventional 干渉計の形は図 1(a) である。ファブリペロ共振器の中で 100Hz まで光を増幅させる。そのため、ビームスプリッターでのレーザーパワーは  $I_0 = I_{SQL}(100Hz) \approx 10kW$  となる。

(2) squeezed input / (3) FD squeezed input 干渉計の形は図 1(c) である。(1) の干渉計の配置のほか、出力ポートでスクイズド光を入力する。スクイズド光は、スクイズ角度が周波数依存性 (FD) を持たない場合 (2) と、依存性を持つ場合 (3) を分けて考える。

(4) variational input 干渉計の形は図 1(c) である。(1) の干渉計の配置のほか、出力ポートでさまざまな物理量をホモダイン測定を行うことで読み出す。周波数に依存したホモダイン測定をするための部分にフィルター共振器 (FC) を利用する。

(5) squeezed variational 干渉計の形は図 1(c) である。(1) の干渉計の配置のほか、出力ポートでスクイズド光を入力したり、さまざまな物理量をホモダイン測定を行うことで読み出したたりする。

## 5 比較

図 3 を見ると、すべての周波数域で (5) の干渉計の感度が良いことがわかる。スクイズド光を使った方法では、主に高周波数域において感度が (1) の干渉計よりも良いので、ショット雑音を抑えるために有効的であることがわかる。また、さまざまな出力をする方法では、主に低周波数域において感度が (1) の干渉計よりも良いので、輻射圧雑音を抑えるために有効的であることがわかる。

また同じスクイズド光を使った場合でも (2)、(3) の感度には差が生じた。両社の違いは周波数に依存したパラメーターを持つかどうかだけだったので、

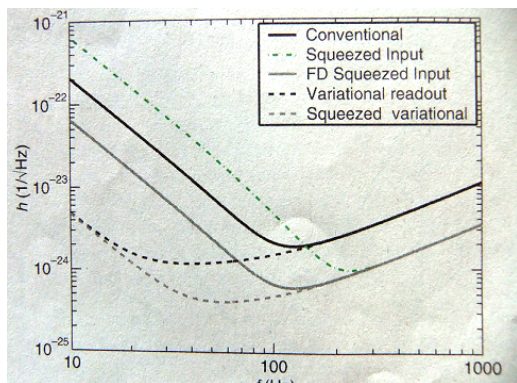


図 3: 感度と干渉計の配置方法 [1]

周波数に依存するパラメータを持つ (3) の干渉計の配置方法の方が良い感度が得られることがわかった。

## 6 考察

まず干渉計の配置方法から、感度を良くするためには、(i) 出力場へのスクイズド光の入力、(ii) 出力場でさまざまな物理量の読み出し、が必要であることがわかる。(ii) は光の量子性から、量子状態を壊すことなく測定することを意図するので、交換する物理量のみを測定 (QND 測定) を行う必要もあると考えられる。

また (2)、(3) の干渉計はショット雑音を、(4) の干渉計は輻射圧雑音を抑えるために有効的であるということがわかった。そのため、今回最も感度が良かった (5) の干渉計ではショット雑音と輻射圧雑音の間に相関が生じていると考えられる。このことから感度を良くするためには 2 つの量子雑音の間に相関が生じる必要があると考えられる。

しかし、図 3 にある感度は、ショット雑音や輻射圧雑音の感度曲線と比較しているわけではないので、高周波数域で感度が良いからショット雑音を、低周波数域で感度が良いから輻射圧雑音をそれぞれ抑えるためにどのくらい有効的であるか、一概には考えることができない。比較するためには、それぞれの干渉計の配置方法でショット雑音と輻射圧雑音がどのくらいあるか実験する必要がある。

比較、検討した干渉計の配置方法では (3)、(4)、(5) が測定のために周波数に依存した物理量を利用していた。このことから、干渉計は周波数に依存した制御をすることで感度を良くしているのだと考えられる。実際、干渉計では輻射圧雑音による鏡のずれを抑えるためにフィードバック制御が取り入れられている [2]。

## 7 まとめ

重力波の信号は微小である。量子雑音を抑え、重力波の信号に対する感度を上げる試みが長年続けられてきている。感度を上げるためには、ショット雑音と輻射圧雑音の間に相関を生じさせる必要がある。標準量子限界は干渉計の配置方法に依存し、QND 測定で行われる。その特徴は以下の通りである。

- (i) 出力場へのスクイズド光の入力
- (ii) 出力場でさまざまな物理量の読み出し
- (iii) 交換する物理量の測定
- (iv) 周波数に依存した制御

(i)、(ii) は周波数依存性を持ち、それぞれショット雑音と輻射圧雑音を抑えるために用いられる。また、(iv) にあるように測定に周波数に依存したパラメータを使うことで、制御に利用することができる。

## 8 今後の課題

今回、量子雑音として、主にショット雑音と輻射圧雑音の 2 種類を挙げた。しかし実際、輻射圧は、一方向への光路差のずれだけを起こさせるものではない [2]。レーザーの進行方向に向かって垂直方向へ振動する以外に、鏡が回転する方向へ振動する場合もある。今回は輻射圧によるこのような 2 方向への振動について深く考えることができなかったため、シュミレーションなどを用いて、解析をしたり、実験をしたりして検討していきたい。

今回のデータだけでは、干渉計の配置方法によって感度に差が生じることはわかったが、標準量子限

界を超えているかどうかを比較、検討することができなかった。比較、検討するために、それぞれの干渉計の配置方法でショット雑音と輻射圧雑音がどのくらいあるか実験していきたい。

また、同じスクイズド光を利用した場合でも、スクイズアングルが周波数依存性を持つかどうかによって、重力波感度に対して大きな差が生じた。今回、このことに関して結果で述べた以上に深く考えることができなかったため、周波数に依存したパラメーターと制御の関係性について学んでいきたい。

## Reference

Thomas Corbitt and Nergis Mavalvala. 2004. J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt. 6 S675-683

Shihori Sakata et al. 2006. Journal of Physics: Conference Series 32 464-469