

# Investigation of radiation pressure effect in a frequency-detuned interferometer and development of the readout scheme for a gravitational-wave detector

(帯域特化型干渉計における輻射圧効果の検証と重力波検出器における信号取得法の開発)

17109 宗宮健太郎 指導教官 三尾典克

## 1 イントロダクション

アインシュタインが一般相対性理論の提唱と共に存在を予言した重力波は、遠方での時空のひずみが光速で伝播してくる現象であるが、物質への影響は非常に小さく、いまだ検出されていない未知の物理である。重力波の検出にはマイケルソン干渉計を用いるが、両腕の長さが数キロメートルあっても、重力波による伸縮はわずか  $10^{-19}$  メートルと小さく、雑音を減らして検出器の感度を向上することが不可欠となる。

現在、日本の TAMA300 やアメリカの LIGO など第一世代の重力波検出器が稼働している。それらの検出器の感度を制限するのは最終的に光学素子の熱雑音と地面振動と量子雑音であるが、2007年に完成を予定している第二世代の重力波検出器は、低温化や防振系の向上などの先進技術により、ほぼ量子雑音だけが感度を制限することになる予定である。

本研究では、次世代型重力波検出器における量子雑音の低減化を目指し、国立天文台内に4メートルの帯域特化型プロトタイプ干渉計を建設し、技

術開発を行ってきた。特に輻射圧による信号の増幅効果の観測は世界初であり、次世代の検出器で帯域特化技術を導入するためには必要不可欠なものである。また、信号の読み取り方法を工夫することで、量子雑音を大幅に軽減する手法を提案した。これらの先進技術を導入することで、重力波検出器の感度向上を実現することができる。

## 2 重力波検出器と量子雑音

重力場が大きく変動する天体現象により重力波が発生すると、地球上のマイケルソン干渉計型重力波検出器で片方の腕が伸び、もう片方が縮むという現象が起こる(図1)。そして入射側と反対のポートに設置した光検出器で干渉縞が変化する。この際、信号と無関係な光を入射側に返すように制御すると、信号を持った光は全てこの信号ポート(ダークポート)に抜けてくることになる。

干渉計の両腕にファブリーペロー共振器を組み込むと、光が折り返す間に信号が増幅される。この折り返し回数は共振器を構成する2枚の鏡の反射率で決まり、フィネスという値で表される。フィ

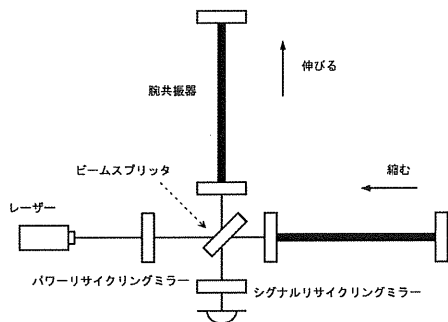


図 1: 重力波検出器の構成。第一世代では腕共振器とパワーリサイクリングが、第二世代ではさらにシグナルリサイクリングが導入される。

ネスをあまり高くすると、共振している間に高周波の信号が相殺するので、周波数を横軸にとって感度を計算すると、図 2 のように帯域が制限される。いま熱雑音などを無視すると、感度を制限するのはショットノイズと呼ばれる量子雑音である。

重力波の予想される帯域に合わせて腕のフィネスを定めたとして、さらに感度を上げるためには、入射光のパワーを上げればよい。安定なレーザーの出力には限界があるので、信号以外の光が戻るブライトポート側に鏡を置いて再入射させ、干渉計での実効的な光量を上げるパワーリサイクリングという技術が用いられる。

ここまでは第一世代の重力波検出器ですすでに実現されている。およそ 10 ワットのレーザーを用い、腕共振器内のパワーはおおよそ 2 キロワットになる。第二世代検出器では、次章で説明するように、ダークポート側に鏡を配置し信号をリサイクリングさせる構造になっており、レーザーも 100 ワットに上げて、共振器内パワーはおおよそ 400 キロワットになる。最高感度はおおよそ 20 倍になる。

しかしこのとき、第一世代の干渉計では問題にならなかった輻射圧雑音というものが低周波の感度を制限し始める。ショットノイズと輻射圧雑音というものを合わせて量子雑音と呼ぶ。これらは光の波動性と粒子性の不確定性原理から生じ、パワーを上げて波動性を高めると、粒子性の揺らぎが効いてきて輻射圧雑音という形になって表れ、パワーを下げると波動性の揺らぎが効いてきてショットノイズが大きくなってしまふ。直感的に言えば、光を量子化したときに、1つの光子がビームスプリッタ

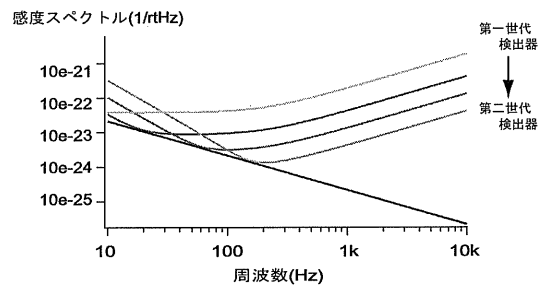


図 2: 異なる共振器内パワーにおける量子雑音。おおよそ 200 ヘルツより高周波では腕共振器内で信号が相殺して感度が落ちることと、パワーを上げても標準量子限界よりは感度が上がらないことが分かる。

でマイケルソン干渉計のどちらの腕に行くかを予想することはできない。そしてその 1つの光子がその他の古典的光に対してどのような相対位相を持つかも予想することができないのである。

図 1 を見ると、ショットノイズと輻射圧雑音のどちらかに制限され、重力波検出器の感度は通常、標準量子限界と呼ばれる感度限界を超えられない。しかし、より遠方の微弱な重力波信号までも検出するためには、この限界を超えてさらなる高感度化を目指すことが必要となる。これまでもいくつかの理論的アプローチがこの限界を超える量子非破壊計測の手段として提唱されてきたが、近年ようやく具体的な形となってきたのである。

第二世代検出器のいくつかで導入する帯域特化という技術は量子非破壊計測を実現する技術の一つで、本研究ではその物理の確認が主題である。

### 3 シグナルリサイクリング

ブライトポート側に鏡を置くパワーリサイクリングと比べ、ダークポート側に鏡を置くシグナルリサイクリングは、信号の周波数により共振状態が変わる。信号の DC 成分を共振状態に保つブロードバンドシグナルリサイクリング (BSR) では、低周波で信号が増幅する一方で高周波では信号が相殺し、信号の DC 成分を反共振状態に保つブロードバンドレゾナントサイドバンドエクストラクション (BRSE) では、逆に高周波で信号を増幅できる (図 3)。腕共振器で増幅した信号をさらに増やすの

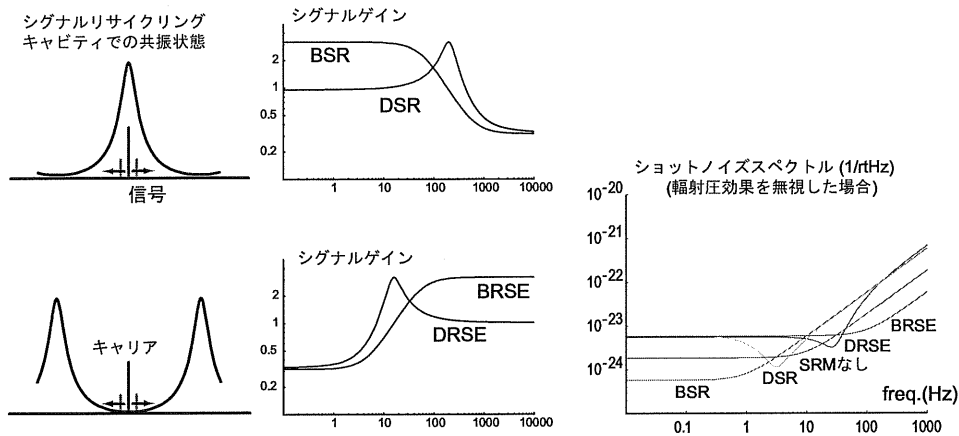


図 3: シグナルリサイクリングキャビティでの共振状態によるシグナルゲインの違い。

が BSR で、腕共振器内で相殺する高周波信号を増やして結果的に帯域を拡張するのが BRSE である。

また、共振から少しずらした非共振状態に保つと、中間の狭帯域で信号が増幅され、ある周波数に特化して感度を向上させることができる。これをデチューニングと呼び、BSR および BRSE から少しずらしたものを各々デチューンドシグナルリサイクリング (DSR)、デチューンドレゾナントサイドバンドエクストラクション (DRSE) と呼ぶ。

デチューンするとダークポート側のシグナルリサイクリングミラー (SRM) で反射されて干渉計に再入射した光が入射レーザーとカップリングする。この成分は共振器内のパワーの変動となり、輻射圧で鏡を動かし、再び信号としてダークポートに漏れてくるという循環をする。このように輻射圧信号は複合共振器内で光のバネを形成し、ある周波数で特に信号を増幅することになる。

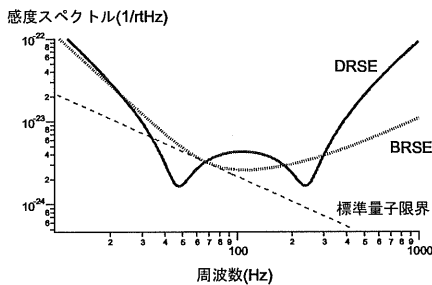


図 4: デチューンしたときの感度曲線。

この光バネの効果をふまえて感度を計算したものが図 4 である。2つの周波数で信号が増幅しており、高周波の方がシグナルリサイクリングされたもの、低周波の方が輻射圧信号によるものである。輻射圧信号は輻射圧雑音よりも大きくなりえるので、標準量子限界を超えることができる。

#### 4 プロトタイプ実験による光バネの検証

光バネは、量子雑音そのものを測定しなくても信号の増幅を検出することで存在を確認することが可能である。ただし、そのためには光学素子は振り子で吊られている必要があるし、共振器内パワーも高くないと光バネの周波数が低くなってしまい検出できない。本実験では、入射レーザーは高々500ミリワットで、パワーリサイクリングも用いていないが、40グラムという大型干渉計の1000分の1ほどの重さしかない鏡を用いることでパワーを1000倍したのと同じ効果を持たせ、輻射圧の影響を大きくしている。

干渉計は、信号側をダークポートに、両腕を共振状態に、シグナルリサイクリングキャビティをデチューン状態に、それぞれ制御する必要がある。特にデチューン状態に制御するには工夫が必要で、振り子に吊られたデチューン干渉計の制御に成功したのは本実験が世界で最初である。

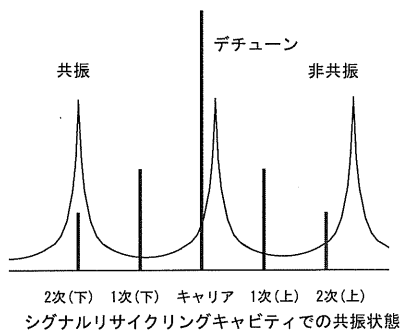


図 5: DRSE の制御方法。

まず、元々の光であるキャリア光の他に、制御用に位相変調器で  $\pm 17$  メガヘルツのサイドバンドを立て、この上下のサイドバンドが同時に共振状態に入らないように共振器長をずらしておく (図 5)。こうすることで非対称性が生じ、キャリアは共振でも反共振でもない状態に保たれる。

次に、共振状態に保つサイドバンドを 1 次ではなく 2 次の高調波にしておく。1 次のサイドバンドは、その他の自由度を制御するときに用いるので、非対称性の影響があまり出ないようにするのである。

そして、腕共振器の信号と独立に扱うために、シグナルリサイクリングキャビティの制御信号は 1 次と 2 次のビートを 3 次で復調して得る。この際キャリアと 3 次のビートが混入を防ぐため、51 メガヘルツの位相変調器で 3 次高調波が消してある。

このような独自の手法を用いて 4 自由度全てを制御した状態で、腕共振器を差動で動かし、仮想的な重力波信号を与え、伝達関数を測定する。同様の実験をシグナルリサイクリングなしで行ない、伝達関数の比から信号の増幅が分かる。国立天文台内に建設した 4 メートルのプロトタイプ干渉計で実験した結果が図 6 である。10 キロヘルツ付近に見える高周波の緩やかなピークに加え、低周波にも輻射圧信号によるピークの裾が確認でき、200 ヘルツ程までは理論曲線ともよく符合している。この輻射圧効果の観測は世界初の成果である。図の理論曲線における低周波のピークは非常に鋭くなっているのは制御等によるダンピングの影響を含んでいないからである。また、低周波は制御により抑え込まれているため、高周波は振り子の影響で信号が小さいために測定の精度が落ちているが、信号取得の積分時間を上げると改善が可能である。

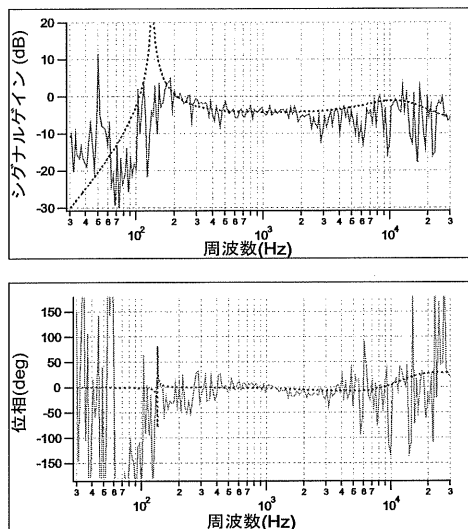


図 6: 実験結果。光バネの効果が確認できる。

## 5 アンバランスサイドバンドデテクション

最後に読み取り方法を工夫することによる量子非破壊計測方法を発案したので、それも紹介する。

デチューンするとシグナルリサイクリング共振器を上下片側のサイドバンドだけが共振し、ダークポートで上下のサイドバンドにアンバランスが生じる。このような場合、復調位相を変えることで標準量子限界を超えられる。復調というのは例えば 17 メガヘルツ周期で現れる信号をストロボスコピックに検出する手段で、従来は信号が最大になるようにしていたが、信号は最大でなくても輻射圧雑音の影響が小さい瞬間に合わせてストロボスコピックな検出をすることで、標準量子限界を超えることが可能となるのである。

ストロボスコピックな読み取り方法自体は以前から提唱されていたが、それは位相をずらした別の光をレファランスとして用いていた。復調位相を変えるという手段の最大の特徴は、光ではなく電気信号を扱うため分割してもショットノイズが不変だという点である。周波数ごとに異なる復調位相を用いて計測を最適化しそれらを足し合わせることで、広範囲での量子非破壊計測が可能となる。復調時に生じる別の量子雑音が問題となるが、これはメガヘルツ帯へのスクイーズを施すと解決することが分かっている。