重力波検出器KAGRAのための 量子雑音低減法の開発(5)

東大宇宙線研,東大工^A

<u>酒井譲</u>、長野晃士、榎本雄太郎、中野雅之、 古澤明^A、川村静児

目次

1. イントロダクション 2. レーザーの強度安定化 3. まとめ

目次

1. イントロダクション 2. レーザーの強度安定化 3. まとめ

KAGRAの感度

KAGRAの感度は、最終的には広い帯域で量子雑音により 制限される。KAGRAの感度向上・重力波天文学の発展の ためには、量子雑音の低減が必要不可欠。







散射雑音と輻射圧雑音はレーザー強度に対して逆の依存 性をもつため、通常の方法では標準量子限界(SQL)を超え ることはできない。

量子雑音の低減

干渉計では、輻射圧ゆら ぎによる鏡の揺れにより、 真空場がスクイーズされ る(ポンデロモーティブス クイージング)。

⇒ホモダイン検波により
 測定すると、SQLを超えて
 量子雑音(特に輻射圧雑
 音)を低減できる。



※スクイーズ状態 光の強度ゆらぎと位相ゆらぎのうち、一方がコヒーレント状態のゆらぎ よりも小さく、他方が大きくなっている状態









そのためには・・・

広い周波数帯域で輻射圧雑音に制限された測定をしたい

輻射圧雑音を際だたせるために考えられる方法

1. 軽量鏡

- ・・・輻射圧ゆらぎによる鏡の変位を大きくする
- 2. 高フィネスの共振器
 - ・・・ 共振器内のパワーを上げて鏡に与える力を大きくする
- 3. Fabry-Perot Michelson 干渉計 (FPMI) ※両腕に共振器がついた干渉計 ・・・古典強度雑音などの同相雑音を低減する





- ・エンドミラーに23mgの軽量鏡を使用
- ・主共振器は1組、フィネスは1300程度
- PDH法により共振器長を制御
- 透過光を用いた鏡の角度方向の制御も取り入れ、安定 的にロック可能



目次

イントロダクション レーザーの強度安定化 まとめ

はじめに

Fabry-Perot Michelson干渉計 (FPMI)の場合 2方向のフィネス・鏡の質量などの条件が同じとき、ダークポートでは、レーザーの古典強度ゆらぎは雑音にならない。



我々の実験系 (主共振器が1組) の場合 輻射圧雑音を見るためには、古典的な強度ゆらぎを量子ゆらぎ レベル以下まで下げる必要がある。

- ・このような事情により、FPMIにしないと輻射圧雑音を見ることはできないと思われていた。
- ・この発表は、共振器1組で輻射圧雑音に制限された測 定をするための、新しい強度安定化の方法を提案する。

通常の強度安定化の方法



新しい強度安定化の方法



クリティカルカップリングの共振器を共振状態に保ち、その 透過光を使って強度安定化を行う。

(<ポイント>
) 測定したい主共振器がIn Loopにある。
 ・透過側から入る真空ゆらぎはすべてレーザー側に抜けるため、ループ内に余計な真空場が入らない。

 この方法が可能であるということを計算で示した。

計算に使ったモデル

- ・ 共振器はcritical couplingで、共振状態に保たれている。
- ・共振器からの反射光 (aout) を測定する。
- 透過光をフィードバックして強度安定化を行う。
 (それぞれのゆらぎは振幅方向と位相方向の成分を持つが、 フィードバックは振幅成分のみにかかる。)



使用した近似・パラメータの値

- ・想定している透過率とロス: *T*~0.2%, *A*~0.03%
 →主要項に対して (*A*/*T*)²より小さい項は無視する。
- ・ループゲインは十分高いとする ($G \rightarrow \infty$)。
- その他のパラメータ:
 レーザー波長: 1064nm、エンドミラーの質量: 23mg、
 - レーザー強度: 30mW、フィネス: ~1300



計算結果

エンドミラーの変位に換算したパワースペクトル [m²/Hz]







これまでの計算結果を、 想定される熱雑音など とともにプロット $(\phi = 90^\circ, 位相方向$ の測定の場合)

100~400Hz付近で輻 射圧雑音を見ることが できる。

※フィネスなどのパラ メータは現在の共振器 の値、パワーは安定に ロックできる範囲に設 定して計算した。

今後の方針







1. 現在の強度安定化のループを改善し、出来る限り量子 ゆらぎに近いレベルまで安定化する。

・・・AOMの導入(UGFを上げる)、フィルターの改良など

2. 共振器の透過光を使う方法も導入して2段の強度安定 化を行い、輻射圧雑音に制限された測定を目指す。

現在の強度ゆらぎ



- ・In loopとOut of loopの2ヶ所でノイズを測定
- ・ PDで受け取る光の強度はともに11.5mW (PD出力で4.0V)

目次

1. イントロダクション 2. レーザーの強度安定化 3. まとめ



ポンデロモーティブスクイージングを受けた場をホモダイン検波で観測することにより、SQLを超えて輻射圧雑音を低減する技術の実証を目指している。そのために、まずは輻射圧に制限された測定を行いたい。

そのためには古典的な強度ゆらぎを抑える必要がある。
 共振器の透過光を使って強度安定化する方法により、共振器1組でも輻射圧雑音に制限された測定が可能になると考えられる。

 今後は、現在行っている通常の強度安定化の方法でで きる限り古典的な強度ゆらぎを抑えたうえで、透過光を使う安定化も導入し、2段の強度安定化で輻射圧雑音に制限された測定を目指す。

発表は以上です ありがとうございました

以下補足





位相成分 $a_{out}^{(2)} = \frac{1}{1+A/2T} \left[a^{(2)} - \frac{A}{2T} c_0^{(2)} + \sqrt{\frac{A}{T}} n^{(2)} \right] - \kappa(f) \left(1 + \frac{A}{2T} \right) a^{(1)}$

※ (1)は強度成分、(2)は位相成分を表す。 ※ ホモダイン検波により、 $a_{out}^{(1)}\cos\phi + a_{out}^{(2)}\sin\phi$ を測定できる。



critical coupling からずれた場合

- ・どの程度critical couplingであればよいかを調べるため、 $T_F = T \rightarrow T + \delta T$, $T_E = T \rightarrow T - \delta T$ ($|\delta T| \ll T$) のように 2つの鏡で透過率を少しずらして計算
- ・簡単のため cot φ = 0 (位相方向の測定) の場合



・輻射圧雑音と散射雑音で逆向きに変化する。

δT > 0 · · · · 輻射圧雑音 *¬* 散射雑音 *¬ δT* < 0 · · · · 輻射圧雑音 *¬* 散射雑音 *¬* -> パワーを少し変えたときと同じように変化する。
 -> 多少の透過率のズレはあまり気にしなくて良い。

量子雑音の低減の原理1



量子雑音の低減の原理2



个通常の測定方法(位相方向を測定)

強度安定化のループゲイン



日本物理学会2016年秋季大会(宮崎大学木花キャンパス、2016/9/22)