重力波業界のPonderomotive squeezingの考え方とその直観的理解

長野 晃士

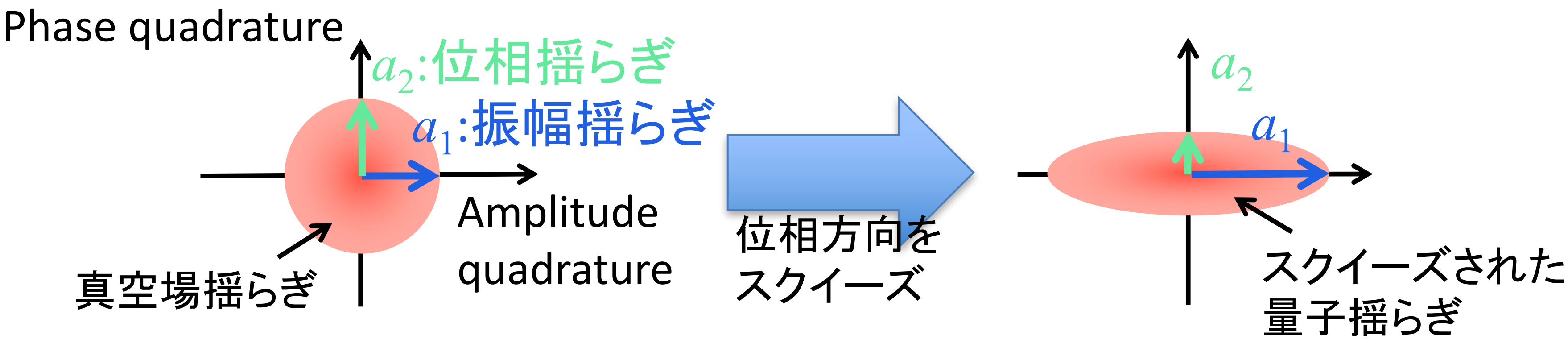
目次

目次

1. Ponderomotive squeezing
2. 重力波望遠鏡における量子雑音
3. 量子雑音の低減
4. まとめ・議論

Squeezingの理解

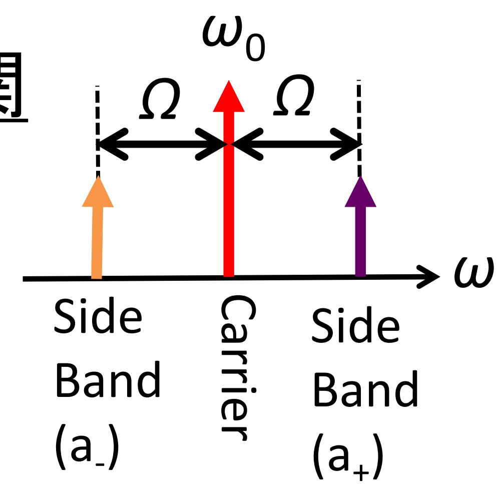
- 直交位相振幅による理解



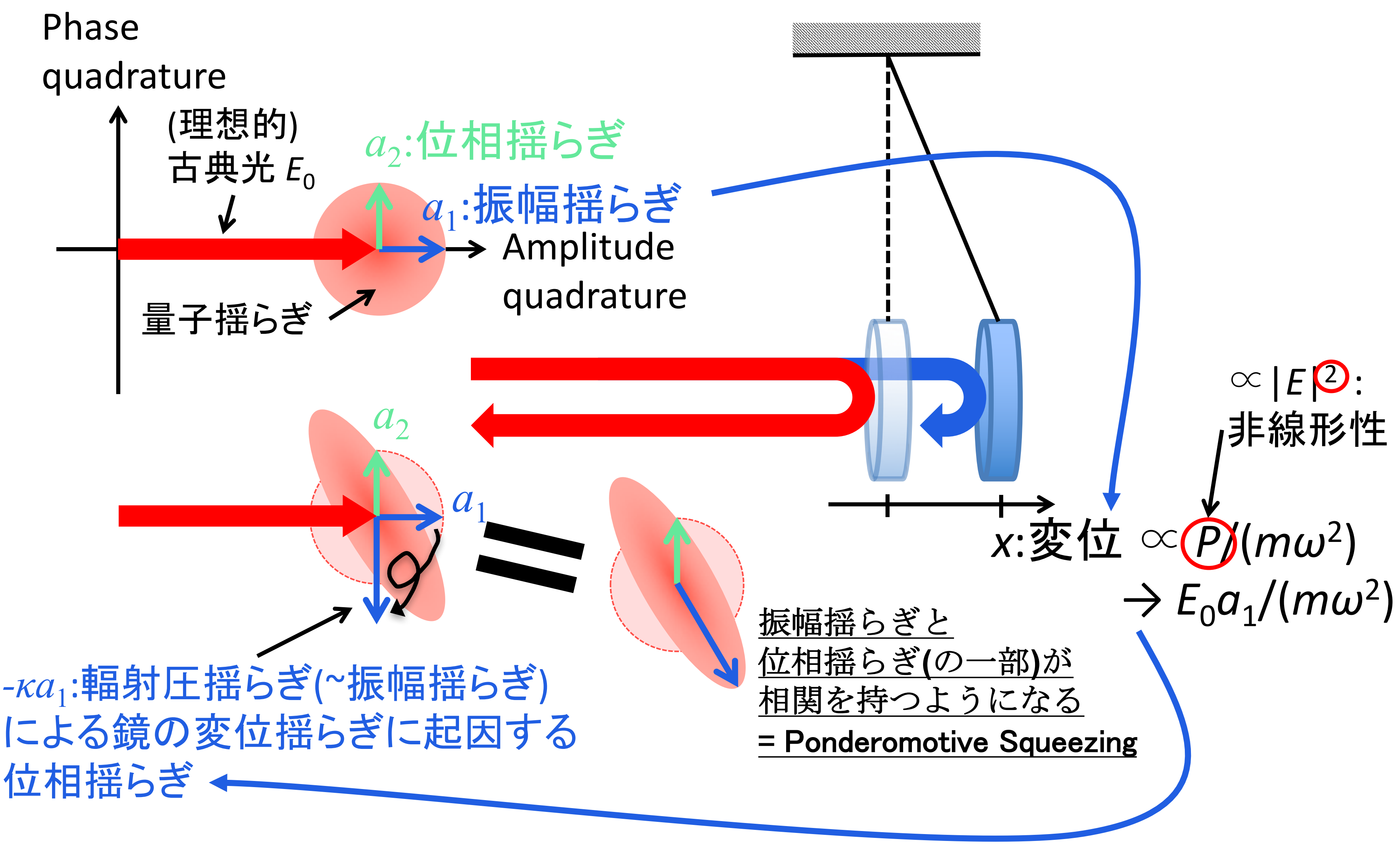
- 2-photon formalism による理解
  - スクイーズ=<u>上下のサイドバンドの相関</u>

$$\frac{1}{2}\left(\langle|\boxed{\Delta a_1}|^2\rangle - \langle|\boxed{\Delta a_2}|^2\rangle\right) = \mathrm{Re}\,\langle\boxed{\Delta a_+}\boxed{\Delta a_-}\rangle$$

$$(\Omega \ll \omega_0)$$



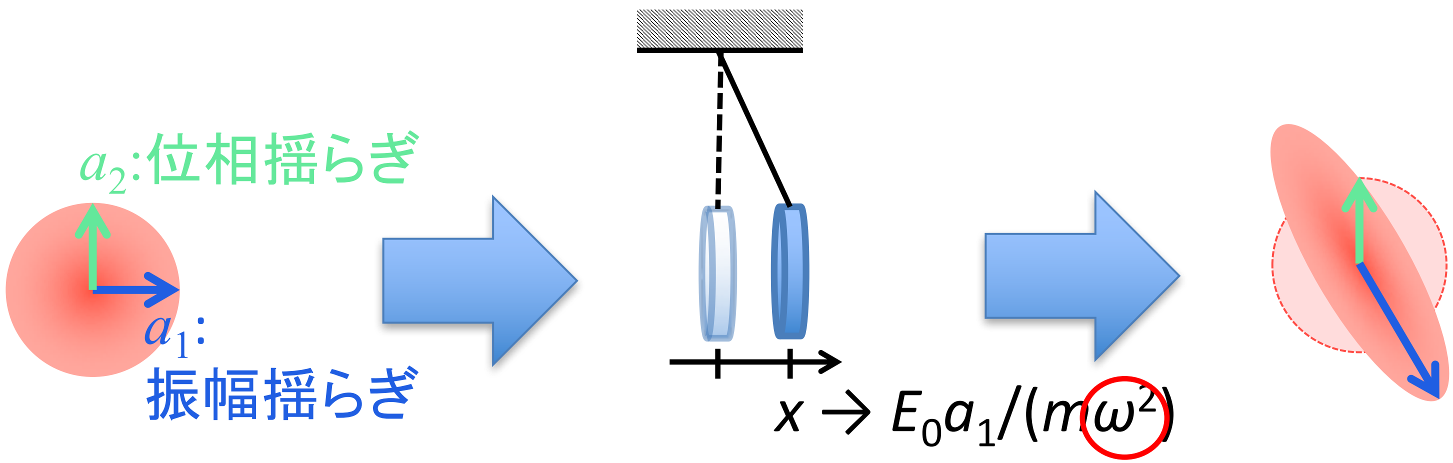
Ponderomotive squeezing (PS)



Ponderomotive squeezing (PS)

Ponderomotive squeezing

- 振幅揺らぎと(同じ三角関数成分で)相関を持つ位相揺らぎが生じる。(∵変位 $x \propto 1/\omega^2$)
  - 鏡の機械的反応が異なる場合（例：共振付近 $x \propto 1/\omega^1$）は違った効果を生む。

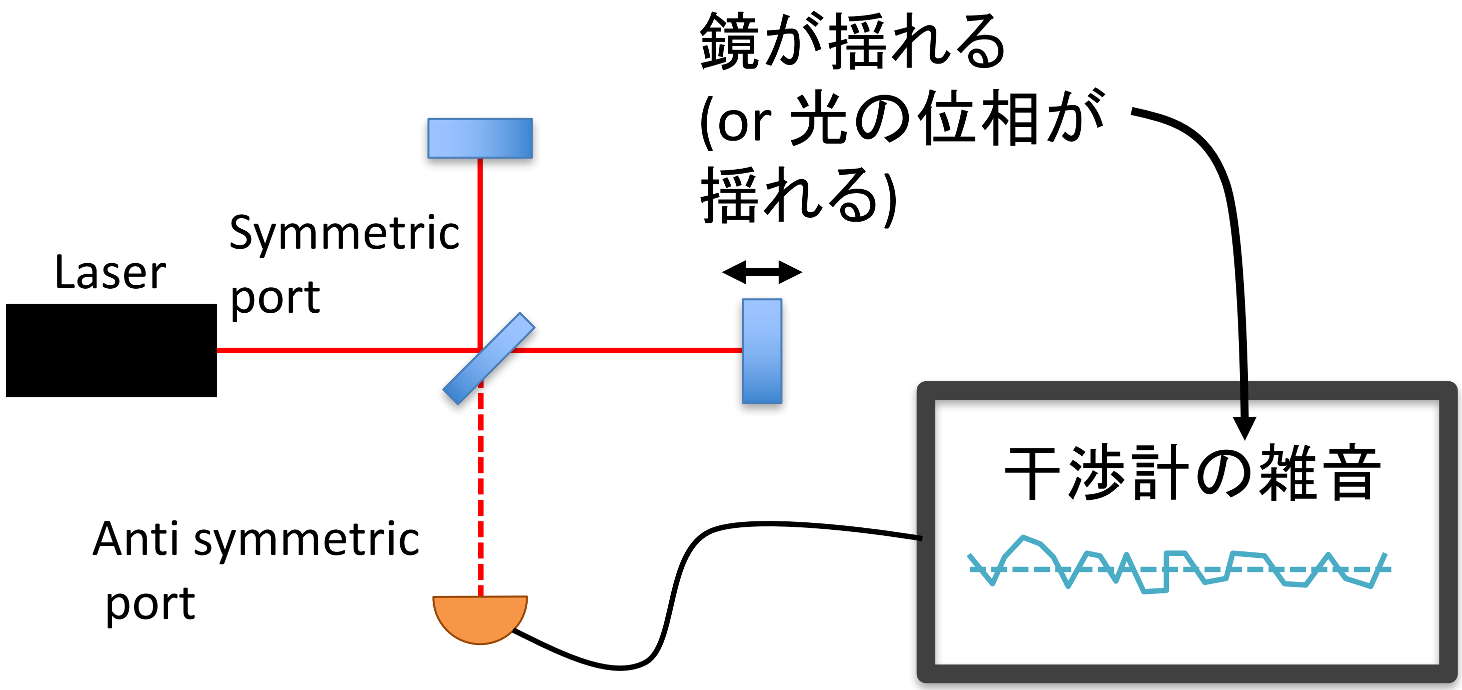


目次

1. Ponderomotive squeezing
2. 重力波望遠鏡における量子雑音
3. 量子雑音の低減
4. まとめ・議論

重力波望遠鏡における量子雑音

- マイケルソン干渉計
  = 位相変化を強度変化として読みだす装置
  = 腕の中での位相揺らぎが干渉計の雑音になる



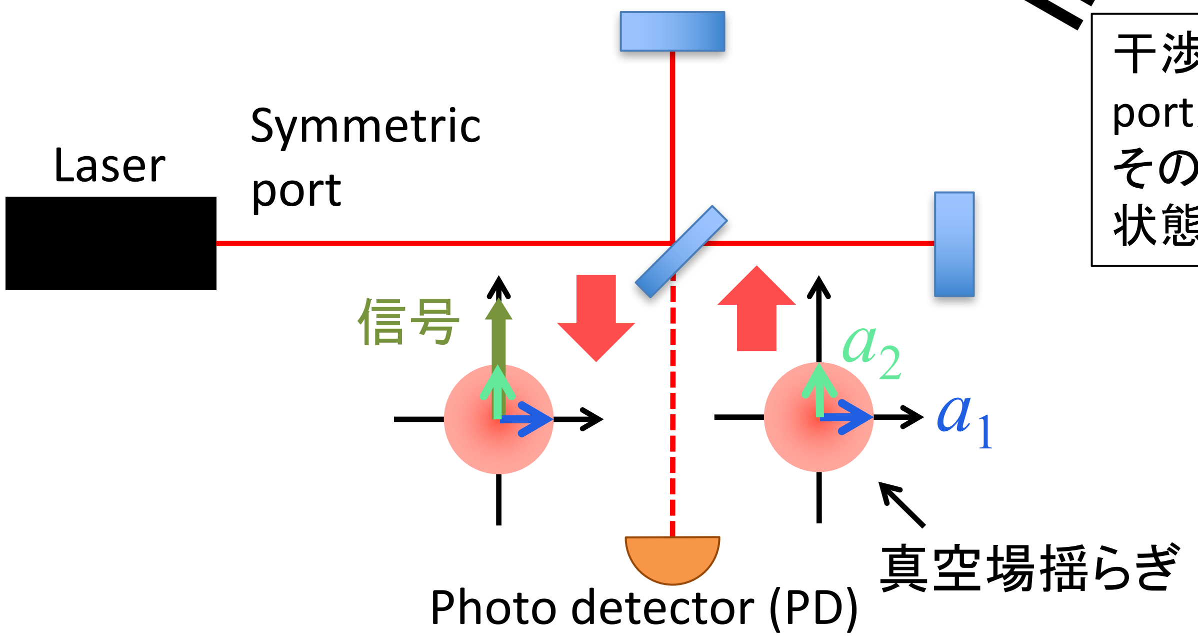
重力波望遠鏡における量子雑音

- 重力波望遠鏡における量子雑音

  = 干渉計のAnti-Symmetric (AS) port から入射する真空場揺らぎ

  (AS portがダークになるように制御されている場合)

干渉計のそれぞれのportから入った光は、そのportに返ってくる状態



重力波望遠鏡における量子雑音

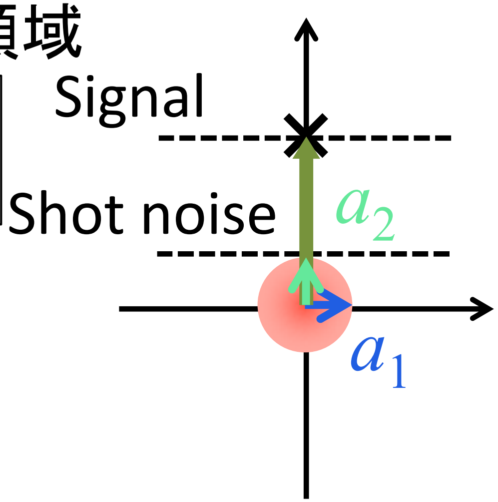
- 重力波望遠鏡における量子雑音
  - 散射雑音　= 元々の位相揺らぎ
  - 輻射圧雑音 = ポンデロモーティブスクイージングよって生じた位相揺らぎ

振幅→変位→位相

(信号 $\propto P^{1/2}$、散射雑音 $\propto P^{0}$、輻射圧雑音 $\propto P^{1}$ $(= P^{1/2} \times P^{1/2})$)

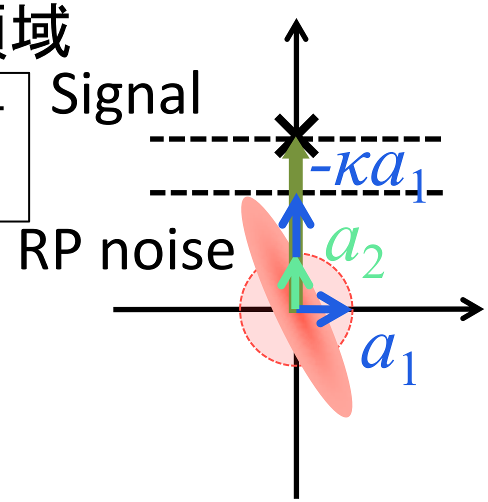
・高周波領域

散射雑音リミット

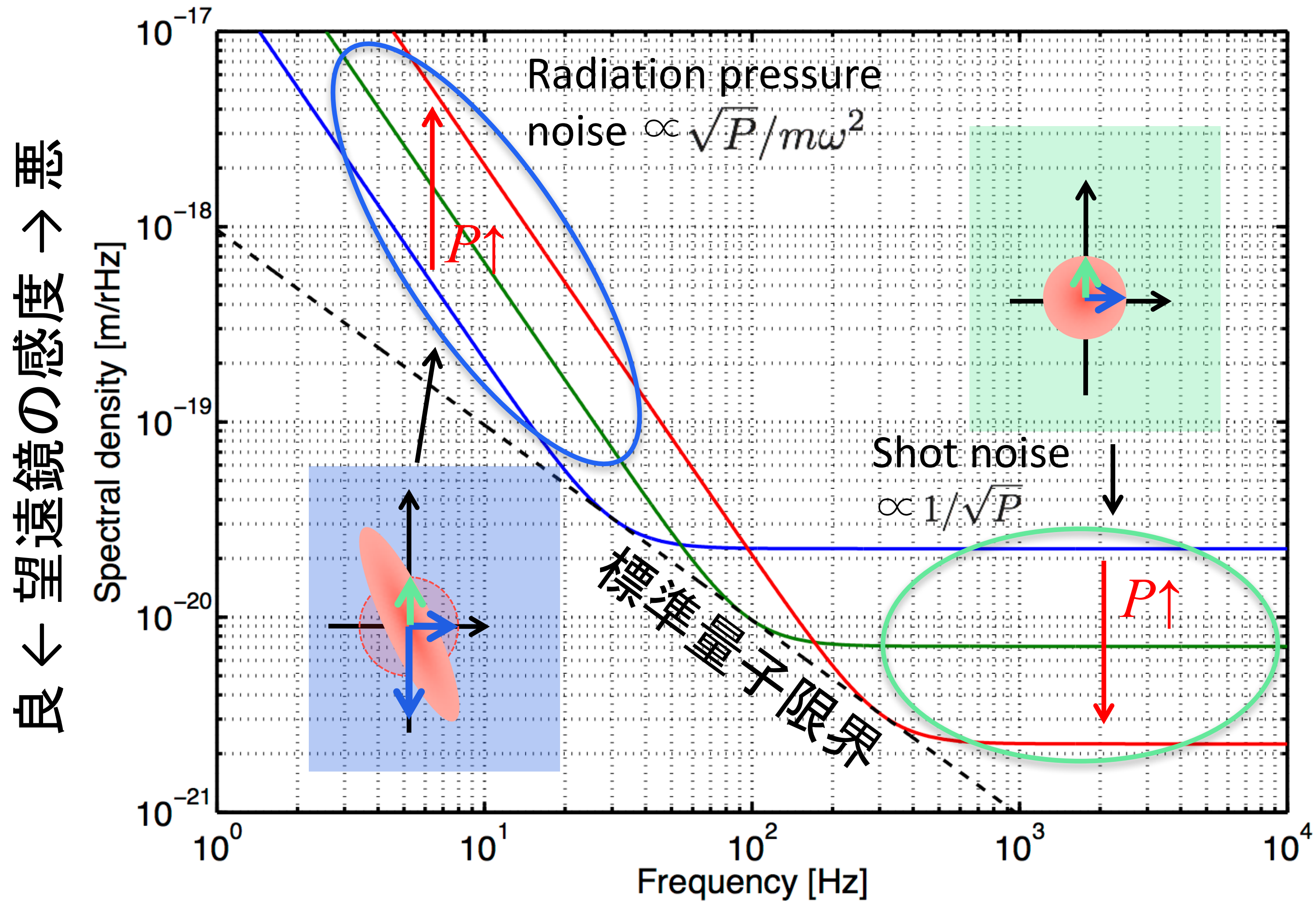


・低周波領域

輻射圧雑音リミット



重力波望遠鏡における量子雑音



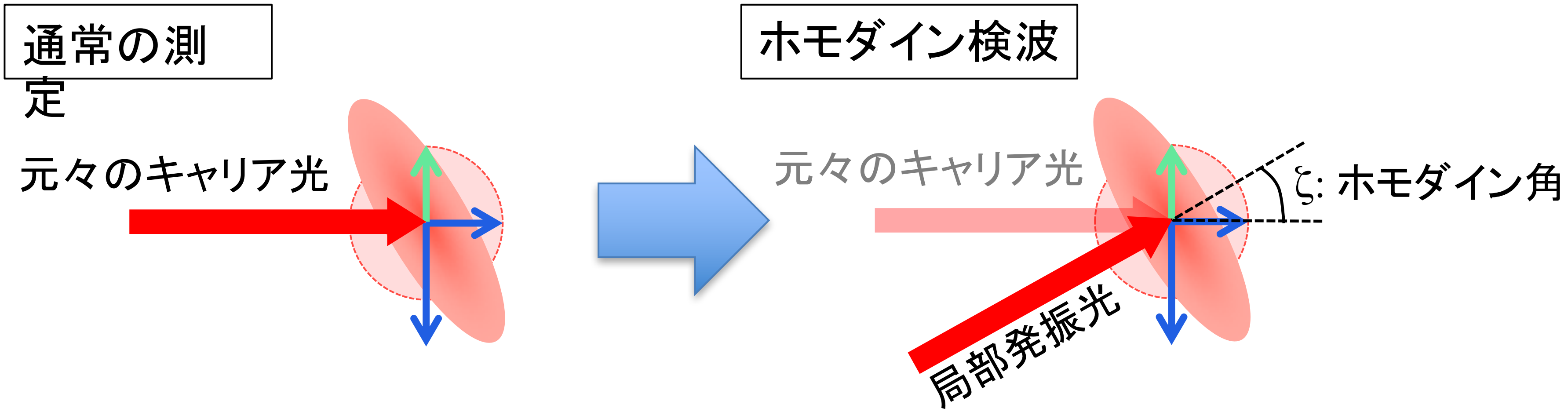
目次

量子雑音の低減

- 重力波望遠鏡の量子雑音の低減の方法
  - AS portからスクイーズド光を入射させる
    - 周波数に依存しないスクイージング
    - 周波数依存のスクイージング
  - ポンデロモーティブスクイージングを利用する
    - 輻射圧雑音の低減

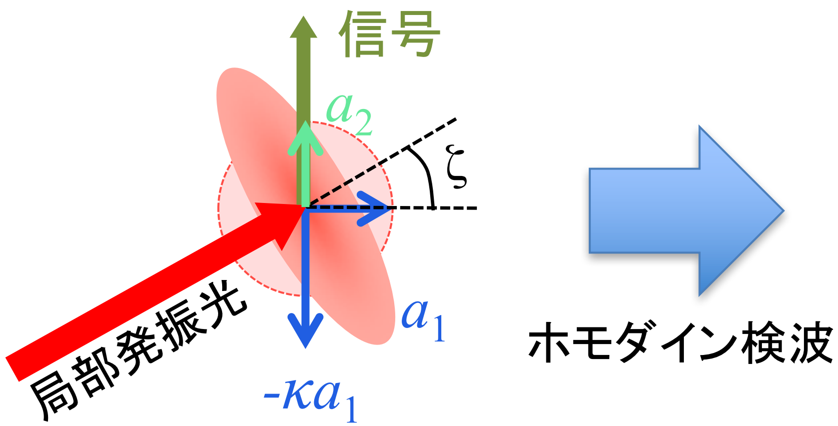
PSを利用した量子雑音の低減

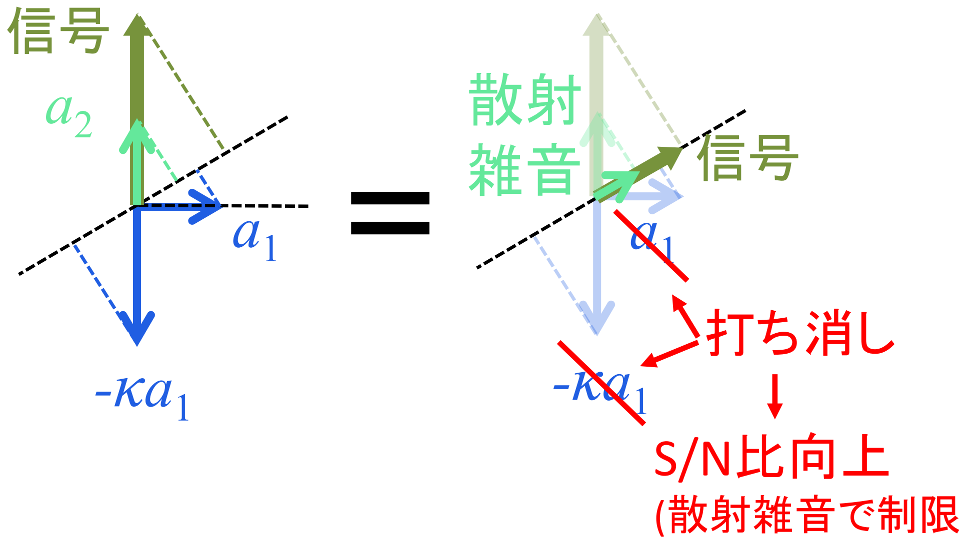
- ホモダイン検波
  - 元々のキャリア光の代わりに新たな”キャリア光” (局部発振光, LO) を導入することで、LO方向に、振幅揺らぎと位相揺らぎの線形結合成分を測定する。



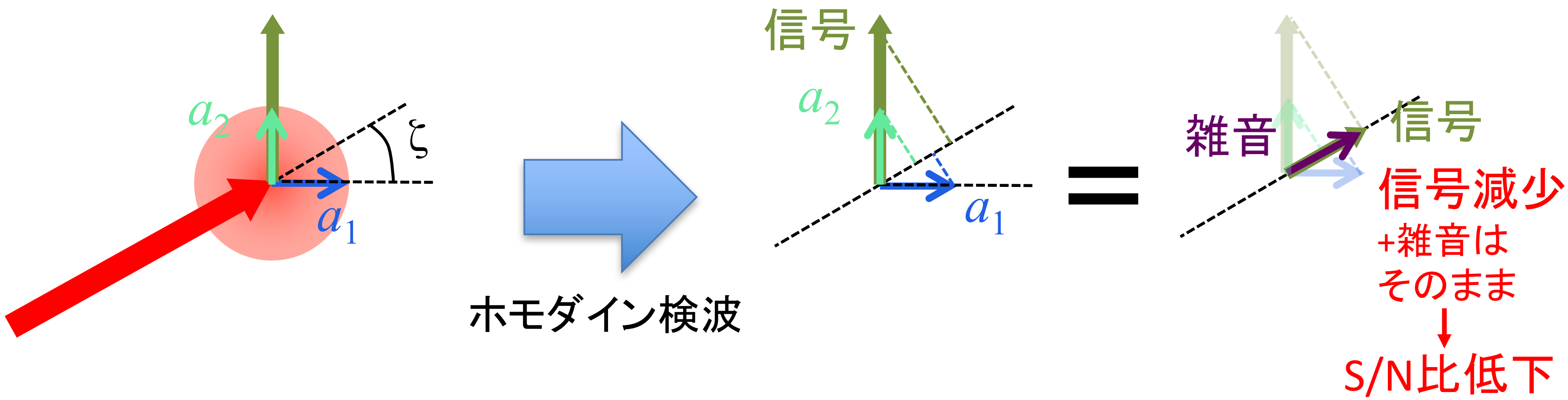
PSを利用した量子雑音の低減

- 輻射圧雑音の低減

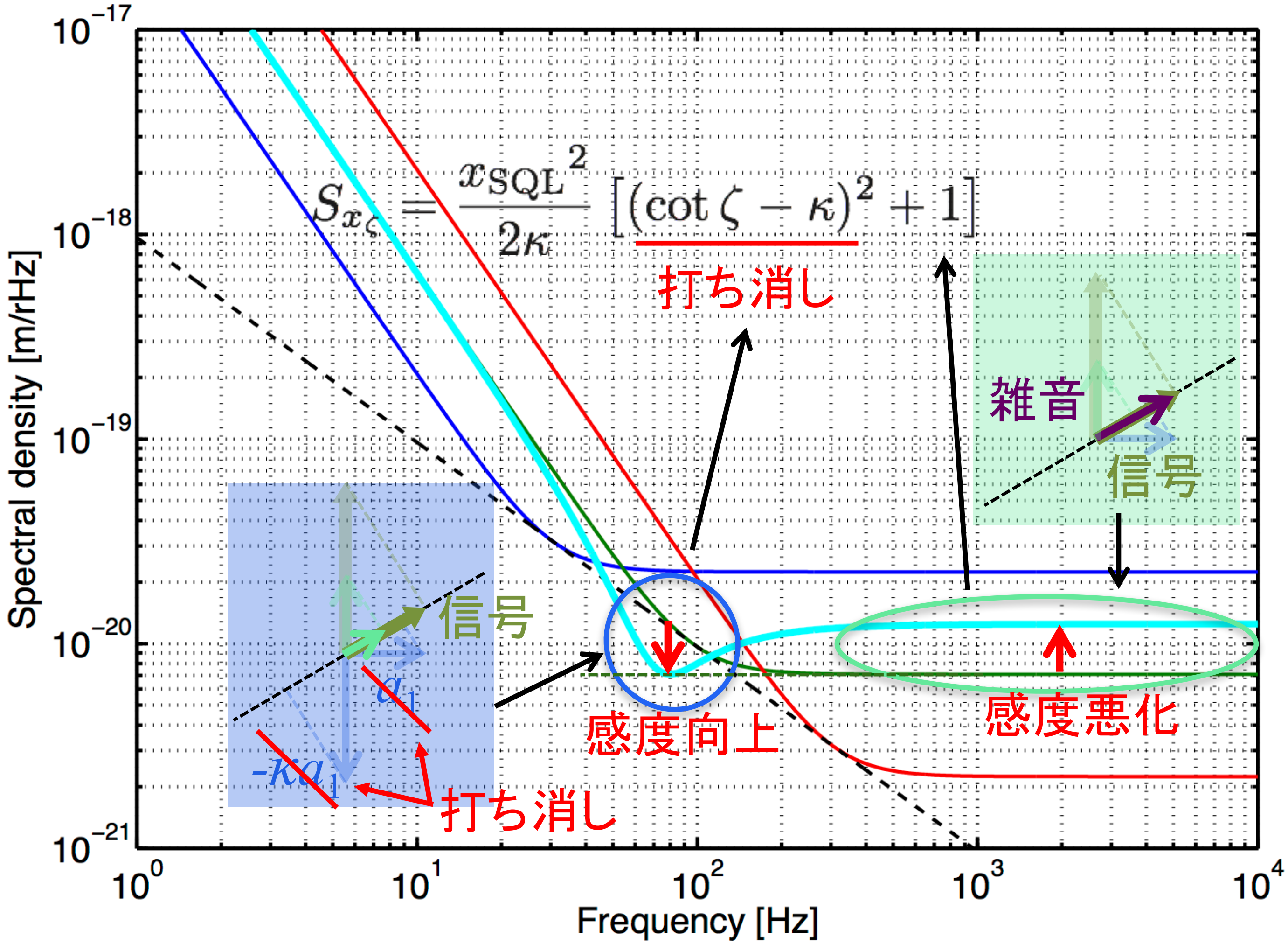




- 散射雑音の“増幅”



PSを利用した量子雑音の低減



PSを利用した量子雑音の低減の問題点

- ポンデロモーティブスクイージングと(周波数に依存しない)ホモダイン検波を用いても、特定の周波数でしか輻射圧雑音を低減できない(+高周波数で散射雑音を“増幅”してしまう)
- 周波数に依存するホモダイン検波を用いれば広い周波数で輻射圧雑音を低減できる。

目次

1. Ponderomotive squeezing
2. 重力波望遠鏡における量子雑音
3. 量子雑音の低減
4. まとめ・議論

まとめ

- スクイージングは、直交位相振幅と2-photon formalismを用いて理解されている。
- ポンデロモーティブスクイージングは、真空場揺らぎの振幅揺らぎによる鏡の変位揺らぎに起因する、振幅揺らぎと相関を持った位相揺らぎによって起こる。
- マイケルソン干渉計は、位相変化を強度変化として読みだす装置であるので、腕の中での位相揺らぎが雑音となる。
- 干渉計の量子雑音は、AS portから入射する真空場揺らぎによって生じる。
- 真空場揺らぎの元々の位相揺らぎに起因する雑音が散射雑音、ポンデロモーティブスクイージングによって生じる位相揺らぎに起因する雑音が輻射圧雑音と呼ばれる。
- ポンデロモーティブスクイージングとホモダイン検波を利用することで、輻射圧雑音を低減することが出来る。

議論

2-photon formalismのnotation

$$(RS)_{\mathrm{sym}} \equiv \frac{1}{2}(RS + SR)$$

$$\langle (RS)_{\mathrm{sym}} \rangle \equiv \langle RS \rangle_{\mathrm{sym}}$$

$$|\Delta R|^2 \equiv (\Delta R \Delta R^\dagger)_{\mathrm{sym}} = \frac{1}{2}(\Delta R \Delta R^\dagger + \Delta R \Delta R)$$

$$\langle |\Delta R|^2 \rangle = \langle \Delta R \Delta R^\dagger \rangle_{\mathrm{sym}} = \langle R R^\dagger \rangle_{\mathrm{sym}} - |\langle R \rangle|^2$$

$$\frac{1}{2}\left(\langle |\Delta a_1|^2 \rangle - \langle |\Delta a_2|^2 \rangle\right) = \mathrm{Re}\,\langle \Delta a_+ \Delta a_- \rangle \quad (\Omega \ll \omega_0)$$

$$\tan\theta \equiv \frac{\mathrm{Re}(\langle \Delta a_1 \Delta a_2^* \rangle_{\mathrm{sym}})}{\frac{1}{2}(\langle |\Delta a_1|^2 \rangle - \langle |\Delta a_2|^2 \rangle)} = \frac{\mathrm{Im}\,\langle \Delta a_+ \Delta a_- \rangle}{\mathrm{Re}\,\langle \Delta a_+ \Delta a_- \rangle}$$

2-photon formalismのnotation

$$(RS)_{\mathrm{sym}} \equiv \frac{1}{2}(RS + SR)$$

$$\langle (RS)_{\mathrm{sym}} \rangle \equiv \langle RS \rangle_{\mathrm{sym}}$$

$$|\Delta R|^2 \equiv (\Delta R \Delta R^\dagger)_{\mathrm{sym}} = \frac{1}{2}(\Delta R \Delta R^\dagger + \Delta R \Delta R)$$

$$\langle |\Delta R|^2 \rangle = \langle \Delta R \Delta R^\dagger \rangle_{\mathrm{sym}} = \langle R R^\dagger \rangle_{\mathrm{sym}} - |\langle R \rangle|^2$$

$$\frac{1}{2}\left(\langle |\Delta a_1|^2 \rangle - \langle |\Delta a_2|^2 \rangle\right) = \mathrm{Re}\,\langle \Delta a_+ \Delta a_- \rangle \quad (\Omega \ll \omega_0)$$

$$\tan\theta \equiv \frac{\mathrm{Re}(\langle \Delta a_1 \Delta a_2^* \rangle_{\mathrm{sym}})}{\frac{1}{2}(\langle |\Delta a_1|^2 \rangle - \langle |\Delta a_2|^2 \rangle)} = \frac{\mathrm{Im}\,\langle \Delta a_+ \Delta a_- \rangle}{\mathrm{Re}\,\langle \Delta a_+ \Delta a_- \rangle}$$