

# 強度安定化とショットノイズ

道村唯太

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 博士課程 1年

2012年4月8日

## 1 はじめに

強度安定化のショットノイズ限界で議論が白熱したので、まとめておく。強度安定化では位相は関係ないので、以下では two photon formalism の位相雑音成分を無視する。

## 2 相対強度雑音

レーザー光の電場を  $a + \delta a$  とすると、その強度は

$$P = (a + \delta a)^2 = a^2 + 2a\delta a \quad (2.1)$$

となるので、相対強度雑音は

$$RIN = \frac{2a\delta a}{a^2} = \frac{2\delta a}{a} \quad (2.2)$$

と表すことができる。

ここで、真空場の揺らぎを  $\delta b$  とすると、一般に  $\delta a \geq \delta b$  が成り立つが、 $\delta a = \delta b$  であるとき、レーザーの強度はショットノイズ限界まで安定であると言える。

## 3 強度安定化のショットノイズ限界

レーザー光の電場を  $a + \delta a$  とし、強度安定化用のピックオフミラーから入る真空場を  $\delta b$  とする。ピックオフミラーの振幅反射率、振幅透過率をそれぞれ  $r$ 、 $t$  とし、ピックオフした光を用いて強度安定化を行うことを考える。ピックオフミラーでのロスが無視すると、強度安定化用 PD に入る強度は

$$P_{\text{ref}} = [-r(a + \delta a) + t\delta b]^2 = r^2 a^2 + 2ra(r\delta a - t\delta b) \quad (3.1)$$

となる。

強度安定化では  $\delta a$  を操作することで、 $P_{\text{ref}}$  の変動成分である  $r\delta a - t\delta b$  をゼロに近づけることを行う。したがって、強度安定化のゲインが十分大きい場合、強度安定化によって  $\delta a$  は

$$r\delta a - t\delta b = \delta b \quad (3.2)$$

$$\Leftrightarrow \delta a = \frac{t}{r}\delta b \quad (3.3)$$

まで安定化される。このとき、 $t < r$  の時は  $\delta a < \delta b$  となる。また、PD に入る強度の変動成分もゼロになるが、これは in-loop なので許されるらしい [1]。実際に in-loop がショットノイズ以下になっている実験結果が報告されている [2]。

さて、ピックオフミラー透過光の強度は

$$P_{\text{trans}} = [t(a + \delta a) + r\delta b]^2 = t^2 a^2 + 2ta(t\delta a + r\delta b) \quad (3.4)$$

となる。レーザーの強度がショットノイズ限界まで安定な場合は  $\delta a$  は  $\delta b$  と同雑音レベルになるので、透過光の相対強度雑音のショットノイズ限界は

$$RIN_{\text{trans,SNL}} = \frac{2\sqrt{t^2 + r^2}\delta b}{ta} = \frac{2\delta b}{ta} \quad (3.5)$$

となる。ここで二乗和をとっているのは、ここではフィードバックを考えていないため、レーザー側からの真空場とピックオフミラーから入る真空場に相関がないからである。

フィードバックを考えるとレーザーの強度揺らぎ  $\delta a$  とピックオフミラーから入る真空場  $\delta b$  に相関が生まれる。ショットノイズ限界まで強度安定化したとき、 $\delta a$  と  $\delta b$  の間には式 (3.3) の関係が生まれるので、強度安定化後の透過光の相対強度雑音は

$$RIN_{\text{trans,ISS}} = \frac{2[t \cdot t/r + r]\delta b}{ta} = \frac{2\delta b}{rta} \quad (3.6)$$

となる。

つまり、強度安定化によって達成される透過光の強度雑音は、ショットノイズ限界に比べて

$$\frac{RIN_{\text{trans,ISS}}}{RIN_{\text{trans,SNL}}} = \frac{1}{r} \quad (3.7)$$

だけ悪い。

## 4 具体例

そのうち書く。

## 参考文献

- [1] M. S. Taubman, H. Wiseman, D. E. McClelland, and H.-A. Bachor: J. Opt. Soc. Am. B **12** (1995)1792.  
*Intensity feedback effects on quantum-limited noise*
- [2] F. Seifert, P. Kwee, M. Heurs, B. Willke, and K. Danzmann: Opt. Lett. **31** (2006) 2000.  
*Laser power stabilization for second-generation gravitational wave detectors*
- [3] P. Kwee, B. Willke, and K. Danzmann: Opt. Lett. **34** (2009) 2912.  
*Shot-noise-limited laser power stabilization with a high-power photodiode array*