

エシエル型回折格子のゴーストについて その2

池田 優二

2000年5月15日

1 はじめに

前回(3/31)のレポートでは、我々の装置に使用する予定のエシエル型回折格子(74 lines/mm, 44° blaze)のレプリカからは、1%以上にもなる非常に大きなゴーストが存在することを報告した。それはまた、偏光測定精度 $\delta P/P < 0.1$ を達成する上で影響があることも確認した。

ハードの面からゴーストを消去するには、新たに精度を上げたルーリングを行なうしかないが、非常に費用がかかる仕事であり現実的ではない。したがって、問題となるゴーストをソフトの面から何らかのモデル化によって較正してやらなければならない。ゴーストを再現する理論は存在するが(3/31のレポート参照)、それらは非常に簡単化したものであり、現実のゴーストを完全に再現できるとは限らない。較正のためのゴーストのモデル化と、ゴースト理論をモデル化に適用できるかの確認ためには、前回の単波長(632.8 nm)でのデータのみならず、他(多)波長でのゴーストの実験データが必要である。したがって今回、さらに2波長で実験を行なったので以下に報告する。

2 準備

実験は、2000年5月10-11日に東北大学理学部物理学科後藤研実験室にて行なった。実験者は池田。

2.0.1 セッティング

1. 光源 (He-Cd レーザ 波長 441.6nm、Ar⁺ レーザ 波長 514.5nm)
2. 平面ミラー (レーザ導入用)
3. 拡散板 (30mmφ)
4. ピンホール 0.5mm¹
5. コリメータレンズ (f=300mm)
6. エシエル型回折格子 (72 本/mm、ブレイズ角 44°、RGL 製、本番同様に $i=6.0^\circ$ 、 $\gamma=0.0^\circ$ で使用。)

¹前回の実験では、矩形スリットを用いた。

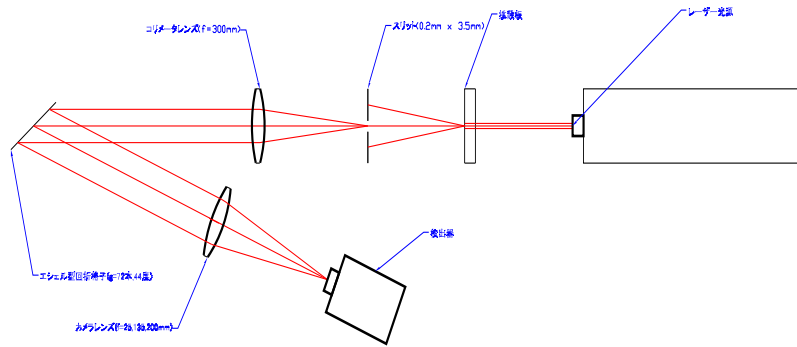


図 1: 光学素子の配置図。ただし、導入用ミラーは省いてある。

- 7. カメラレンズ (135mm)
- 8. 冷却 CCD (TI-CCD、1018×1000 pix、24×24 μm^2)

光学素子の配置図を図 1 として示す。

3 結果

今回行なった 2 波長においてもやはりゴーストの存在が確認された。しかし、それらは 3/31 のレポートで報告した結果と矛盾するものであった。以下、詳しい解析結果をのべる。

3.1 ゴーストの位置

本来のピンホール像のまわりに合計 3 組 (対称形) のゴーストが確認された (図 2)。本来のゴーストからの波長のずれ ($\Delta\lambda$) を表 1 にまとめてある。

単純化された回折格子のゴースト理論によれば、一次のゴースト像は本来の像から $\Delta\lambda = \lambda/mg$ だけずれる。ここで、 m は本来の像の次数で g はゴーストの原因となるルーリングエラーの周期である。上式を回折格子の分散の式 $\Delta\beta/\Delta\lambda = m/d \cos\beta$ と比較すると、

$$\Delta\beta = k\lambda / \cos\beta \quad (1)$$

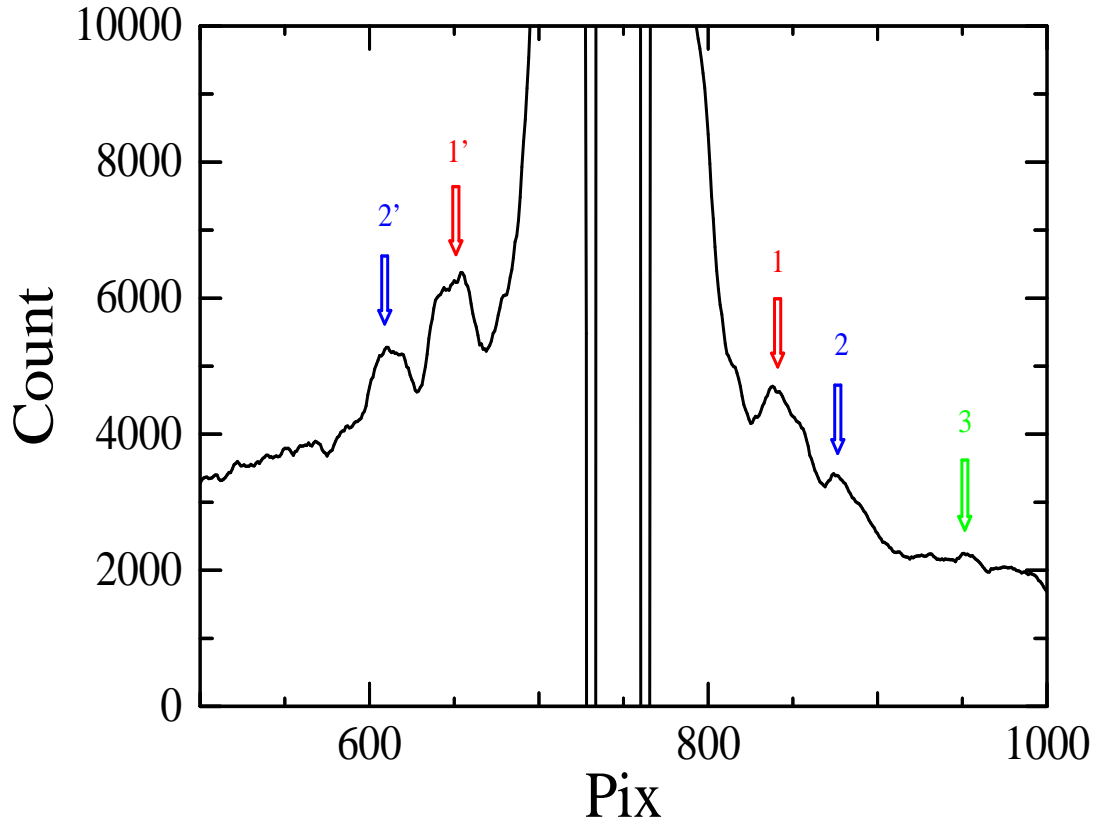


図 2: 検出されたエシエルのゴースト (矢印)。図中の番号は、表 1,2 の番号と対応する。波長は、514.5 nm。

	ghost 1	ghost 2	ghost 3
441.6nm	0.47mm ($3.49e^{-3}$ rad)	1.19mm ($8.85e^{-3}$ rad)	2.26mm ($1.68e^{-2}$ rad)
514.5nm	0.49mm ($3.65e^{-3}$ rad)	1.14mm ($8.47e^{-3}$ rad)	1.59mm ($1.18e^{-2}$ rad)

表 1: 各ゴースト像の本来のピンホール像からの距離。括弧内は、カメラレンズの焦点距離を 135mm とした時の、本来の像とピンホール像の主光線のなす角度 ($=\Delta\beta$) である。

	ghost 1	ghost 2	ghost 3
441.6nm	< 0.056 %	< 0.022 %	< 0.015 %
514.5nm	0.060 %	0.029 %	-

表 2: ゴースト光の本来の像に対する強度比 ($=I_{\text{ghost}}/I_0$)。

となることが分かる (ただし、 k は定数)。つまり、本来の像とピンホール像の主光線のなす角度はおおよそ波長に比例するのである。441.6 nm と 514.5 nm のそれぞれの場合について、 $\Delta\beta/\lambda\cos\beta$ の値を求めると、4.9 rad/mm、および 4.7 rad/mm となる。測定誤差は、少なくとも 5% 以上あると考えられ、したがって両波長帯に見られた一次ゴースト像は同じルーリングエラー起源であると言える。

3.2 ゴーストの強度

本来の像に対するゴーストの強度 (ピーク値) を表 2 に示してある。得られたゴーストの強度はどれも 0.1% 以下であり、 $\delta P/P < 0.1$ の偏光測定精度を達成するには全くもって問題がない (3/31 のレポートを参照。)

ゴーストの位置の場合と同様に、回折格子のゴーストの初等理論によってゴーストの強度の本来の像に対する強度比は以下のように表現される。

$$I_{\text{ghost}}/I_0 = \left(\frac{m\pi\epsilon}{d}\right)^2 \quad (2)$$

m は次数、 ϵ は周期的ルーリングエラーの振幅、 d はルーリングの周期である。つまり、ゴースト光は次数の自乗に比例する。今回実験に使用した 2 波長の次数はそれぞれ $m_{441.7} = 44$ と $m_{514.5} = 37$ である。したがって、441.6 nm のゴースト光の強度比は、514.5 nm のものに比較して約 70 % になっているはずである。表 2 の結果は、式 (2) の予想に矛盾していない。

4 考察

今回の実験実験の結果によれば、検出されたゴーストはどれも 0.06 % 以下で我々の求める観測精度の範囲においてはほとんど考慮に値しないものである。しかしながら、3/31 のレポートによれば 1.0 % 以上ゴーストがあると述べている。式 (2) が示す通りゴーストは波長が長くなれば (次数が小さくなれば)、小さくなる傾向があるので、例えば今回の結果を信用すると、今回より長い波長 (=632.8 nm) のレーザを使用した前回のゴーストの強度は、0.05 % 以下になるはずである。また、一次ゴーストの生じる位置 ($\Delta\lambda$) も、今回の 2 波長の結果から推測されるものとは大きな隔りがある。前回と今回の実験の結果の違いを確かめるためには、追実験を行なう必要があるが、ここでは現時点で可能性として考えられる事を述べたい。

前回と今回の実験で波長以外に異なるのは、スリットである。前回は矩形スリットを用いたが、今回はピンホールを用いた。スリットに平面波に近い波を照射すると、スリットを通過した波動は回折を起こして回折像を形成する。回折像の形状は、スリットの形状によ

るため、矩形スリットとピンホールを用いた場合でそれぞれ異なった回折像が得られる。ピンホールを用いた場合は、円環状の回折像が得られるが、一方に長い矩形スリットの場合はスリットの短い方向(分散方向)に回折像が生じる。つまり、もしゴースト光と回折像の両方が生じたとするとその区別がつかなくなってしまうことが予想される。前回の実験では、ゴースト光であると認識したものが実は回折像であったということは考えられないだろうか？

幅が a のスリットによって生じる n 次の回折像が現れる角度を θ は以下の様に表される。

$$\theta = \theta_0 + 1.43 \frac{n\lambda}{a} \quad (3)$$

ここで、 θ_0 は入射角度である。今、波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 、入射角度 $\theta_0 = 0$ とし、また 3/31 のレポートで n 次のゴースト光であるとされた像がスリットによる一次の回折像であるとすると ($\theta = 8.0e - 3 \text{ rad}$ 、実測値)、 $a = 112n \text{ }\mu\text{m}$ の値が得られる。実際は $\theta_0 \neq 0$ なので、 a は異なった値になるはずだがそれにしてもスリット幅として妥当な値が得られている。また、回折像の強度は理論値では一次で 4.7 % 二次で 1.6 % となっており、実験値とそれほどかけ離れた値ではない。

いずれにしろ、追実験によって確認を急ぎたい。

5 まとめ

441.6 nm と 514.4 nm の二波長についてエシエル型回折格子のゴーストの検出を試みた。どちらの波長においてもゴーストが検出され、それらは波長と強度において回折格子の初等ゴースト理論に矛盾しないものであった。また、強度はもっとも大きなもので 0.06 % 以下で、これは我々の求める偏光測定精度には全く影響がないものであることが分かった。

しかしながら、今回の結果は前回の 632.8 nm の波長で行なった結果とは大きく異なっていた。原因としては、前回ゴーストであると同定したものが実は矩形スリットの回折像であった可能性があるが、その仮説を確認するためにも追実験が必須である。

以上。