

エシエル型回折格子のゴーストについて

池田 優二

2000年3月31日

1 はじめに

回折格子を使って分光を行なう場合、回折格子のルーリングの不完全さが原因でスペクトル上にゴースト(ライマンゴースト、ローランドゴースト)が生じることがある。普通、その量は非常に小さいので、普通の分光観測では問題になることはない。しかし、強い輝線をもつ天体を非常に高いS/N比(> 100)で観測したい場合などには、考慮する必要が生じてくる。我々の新偏光器は、「輝線輪郭の偏光を高い偏光測定精度($S/N > 1000$)で観測すること」が目的であるため、まさに「考慮しなければならない場合」に相当する。

回折格子が作るゴーストが他のレンズ系などで生じるゴーストと異なる点がある。レンズ系で生じるゴーストは反射も考慮した光線追跡をしさえすればその存否は予想可能で、したがって前もっての対処が可能である。しかし一方、回折格子のゴーストは製作の際の不具合によって生じるものなので予想が困難である。よって、実際に装置に搭載される回折格子の子ゴーストの量を実験によって調査し、そこで使用に耐えうるかの判断や使用が困難であるとなった場合の対処法を考えるのが一般的な方法となる。

今回、新偏光器に搭載予定のエシエル型回折格子についてゴーストの調査を行なった。精密な偏光測定に悪影響を与え兼ねない「ゴーストの常光線と異常光線の効率比」についても調査した。また、それら実験結果をもとに、どれほど測定精度の劣化を生じるかの見積りも行なったので報告する。

2 回折格子で生じるゴースト

2.1 ローランドゴースト

ローランドゴーストは、面積の大きな回折格子をルーリングする際、一度にルーリング可能な範囲がlead-screwの長さで限られており、多数回lead-screwを使用した結果、そのパターンが刻まれることによって生じる。また、lead-screwをまわすギアの偏心によっても生じる。パターンの周期は回折格子の本来の溝の周期よりも長いので、ゴーストは本来のスリット像に比較的近く、またそれを挟んで対称の位置に発生することも特徴である。次数 m 、lead-screwが一度に掃ける長さを gd (d は回折格子の溝間の距離)とすると、ゴーストは本来のスリット像から、

$$\Delta\lambda \simeq \lambda/mg \quad (1)$$

だけ離れた位置に見られる。これは、回折格子の基本式($m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta)$)から導出できる。

ローランドゴーストは、最も強いもので1%になるものもある。しかし、近年のルーリング技術の向上により0.1%以下にまで抑えたものも可能になっているようである。

2.2 ライマンゴースト

ライマンゴーストは、ローランドゴーストよりも周期の短い (a few $\times d$) 周期パターンによって生じるゴーストである。したがって、ローランドゴーストに比べ本来のスリット像から非常に離れた場所に現れることが多く、見落とす事なく調査することは難しい。また、非常に小さな周期パターンが原因であるため、予測することも原因を追求することも困難な場合が多い。ごく一般的には、lead-screw の歯の刻みの不正確さなどが原因となる。

2.3 HIDES のエシエルに見られたゴースト

上記2つのゴーストは波長分散方向に生じるものであるが、岡山天体物理観測所の共同利用装置である HIDES に用いられているエシエル型回折格子 (31.6 本、65° プレーズ) には、空間方向にもゴーストが生じることが報告されている。このゴーストの原因は不明で、これまで知られているものとは性質がことなるものと考えられる。

2.4 ゴーストの光量

回折格子のゴーストは、ルーリングの際のエラーによって生じるものであるから、ある波長のスリット像に対して理論的にはそれは無数に存在する。実際、本来のゴーストの光量に対して 10^{-6} のレベルのゴーストまで調査した場合には、100 本ものゴーストが検出可能であるという。したがって、ゴーストを調査する上で注目すべきはその「有無」ではなく、ゴーストの「光量」である。ゴーストの光量が観測に必要とする S/N 比以下であれば、全く問題にする必要がないからである。

回折格子による一次のゴーストの光量は以下の式で表現される。

$$\frac{I_{gh}}{I_0} = \left(\frac{2\pi\epsilon \sin \theta}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{m\pi\epsilon}{d} \right)^2 \quad (2)$$

I_{gh} 、 I_0 はゴーストの光量および本来のスリット像の光量、 ϵ はエラーパターンの振幅、 θ は分散角である。ただし、この式は Littrow-condition を仮定して得られたものである。式を見ると、ある波長に固定すると分散角が大きいほどゴーストが大きくなる傾向があることが分かる。したがって、分散角の大きい波長帯の多いエシエル型回折格子などはゴーストが問題になるケースが多い。

3 実験

3.1 準備

実験は、2000 年 3 月 23-24 日 (川端& 池田)、および 28 日 (池田)、国立天文台三鷹の天文機器開発実験センター・オプトショップで行なった。

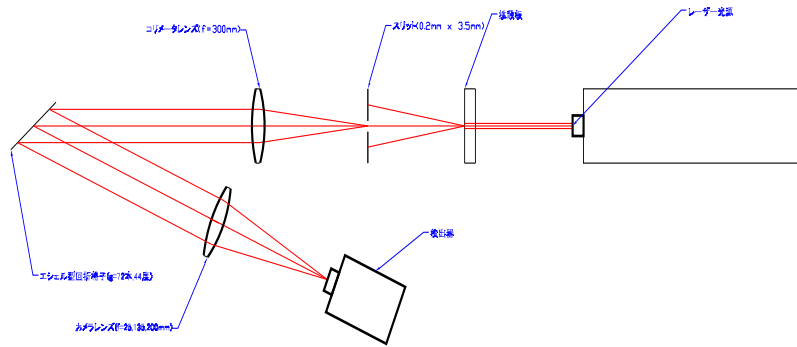


図 1: 光学素子の配置図。

3.1.1 セッティング

1. 光源 (He-Ne レーザ、波長 632.8nm)
2. 拡散板 (30mm ϕ)
3. (必要であれば) 偏光板
4. カーボンスリット 0.2mm \times 3.5mm (FOCAS で使っているものと同じもの)
5. コリメータレンズ (80mm ϕ 、 $f=300$ mm、二枚アクロマート)
6. エシエル型回折格子 (72 本/mm、ブレイズ角 44 $^\circ$ 、RGL 製、本番同様に $i=6.0^\circ$ 、 $\gamma=0.0^\circ$ で使用。)
7. カメラレンズ 3 種 ($f=24$ mm, 135mm, 200mm のものを必要な視野によって使い分ける。)
8. 冷却 CCD (武藤工業製 CV-04、768 \times 512 pix、 $9\times 9 \mu\text{m}^2$, 3/23-24) (TI-CCD、1018 \times 1000 pix、 $24\times 24 \mu\text{m}^2$, 3/28)

光学素子の配置図を図 1 として示す。

		a	b	c	d	e
常光線	強度	1.19 ± 0.07	1.17 ± 0.07	0.47 ± 0.04	0.46 ± 0.04	1.34 ± 0.07
	ピーク	1.16 ± 0.06	1.18 ± 0.06	0.43 ± 0.04	0.49 ± 0.04	1.32 ± 0.07
異常光線	強度	0.78 ± 0.16	0.58 ± 0.14	0.35 ± 0.11	0.28 ± 0.10	0.95 ± 0.18
	ピーク	0.73 ± 0.15	0.57 ± 0.12	0.32 ± 0.10	0.24 ± 0.08	0.82 ± 0.16

表 1: 本来の輝線強度に対する各ゴーストの輝線強度比 (単位は%)。強度は、輝線全体の積分値、ピークはピーク値を示す。ゴーストの記号 (アルファベット) は図 2 のものに対応する。常光線に対しても異常光線に対しても、ほぼ同じ強度比を与えている。

3.2 結果

図 2 には、エシエル回折格子を反射した単色スリット像が示されてある。エシエルによって分散された本来のスリット像の周りに、光量は小さいものの非常に多くのゴースト像が現れているのが分かる。スリット像の左側 (長波長側) に強いゴーストが集中している。スリットの右側にもゴーストは生じているが、それらは比較的弱い。どれがどちら (ローランドもしくはライマンゴースト) に対応するか判別するのは困難であるが、スリット像から近く強い 2 本 (図 3 の d と e) はローランドゴースト、強くとも離れている 3 本 (図 3 の a、b、c) はライマンゴーストであると考えられる。光量は最も強いもので 1% にも達している。

HIDES のエシエルで報告されたゴーストは、スペクトル上下に現れる。そうしたゴーストは今回の実験では検出できなかった。素直に結果に従えば、存在していたとしても強度にして 0.01% 以下ということになる。

図 3 は、スリットの前に偏光板を挿入したときのスリット像を分散方向に一次元化したものである。電場ベクトルの振動方向がエシエルの溝に沿った方向に対して平行になる場合を「常光線」、垂直になる場合を「異常光線」と呼ぶことにする。常光線でも異常光線でも偏光板を挿入しなかった場合と同じゴーストが現れている。また、それらゴーストの本来の輝線に対する強度は、測定精度の範囲で常光線/異常光線で同じといってよい (表 1)。これは、偏光観測にとっては比較的素性のよいことを示している¹。

4 議論と考察

4.1 偏光測定精度に与える影響

4.1.1 定式化と仮定

今回実験で検出されたゴーストが実際の偏光測定精度にどれほどの影響を与えうるかを見積もってみる。今、既に一次元化された常光線および異常光線のスペクトルを考える。これは、空間方向には回折格子のゴーストの影響がないということを仮定していることになる (その妥当性については後述)。検出器まで届く常光線/異常光線のフラックス F_o, F_e

¹絶対強度は、異常光線と常光線で 3-4% の異なりを示している。これは、常光線と異常光線での回折効率の違いによって生じるものである。波長帯によっては、30% 以上も効率の差が現れる場合もある。

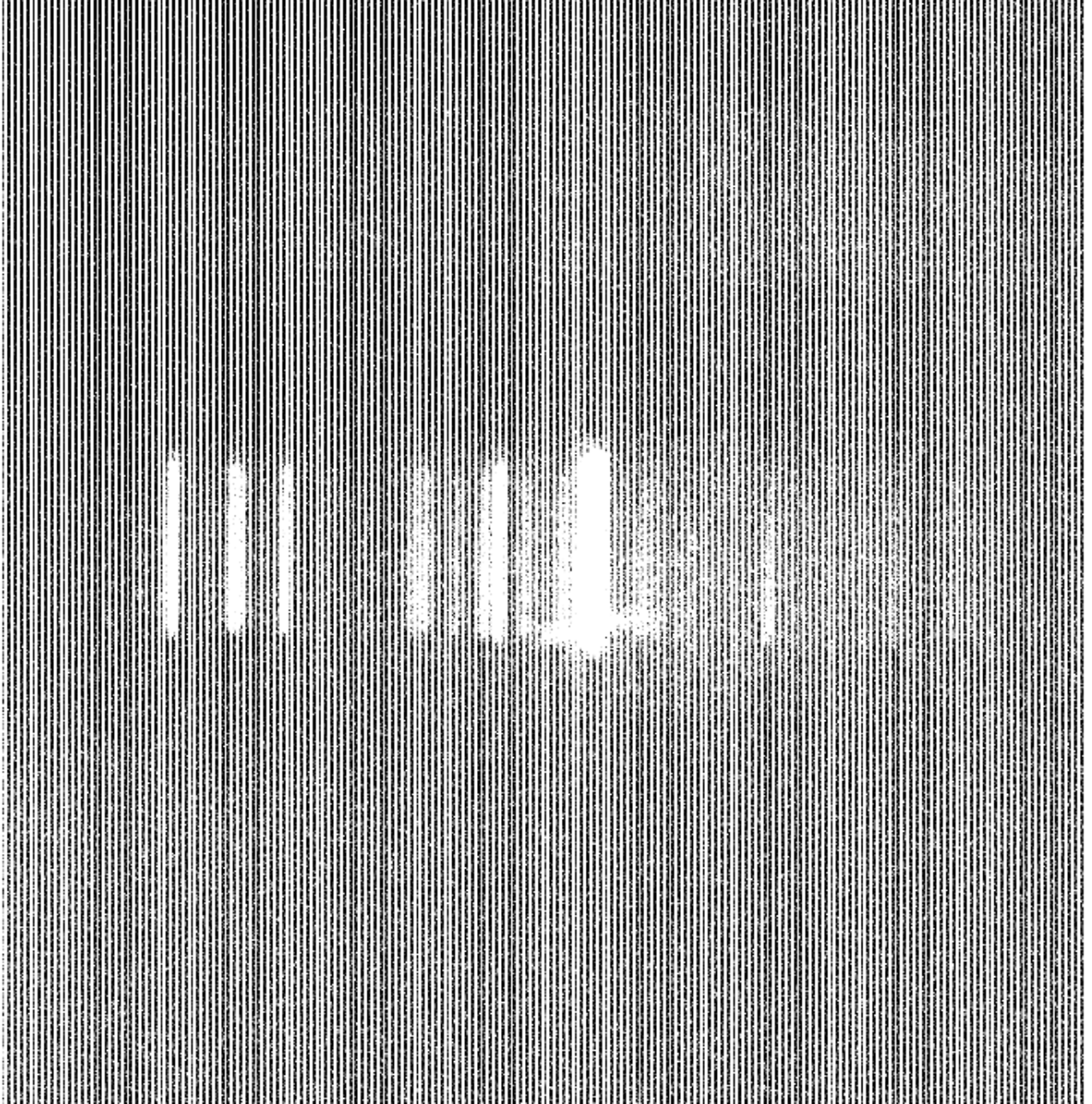


図 2: エシエルを反射させたスリット像。分散方向に多くのゴーストが見られる。空間方向にはゴーストは見えていない。

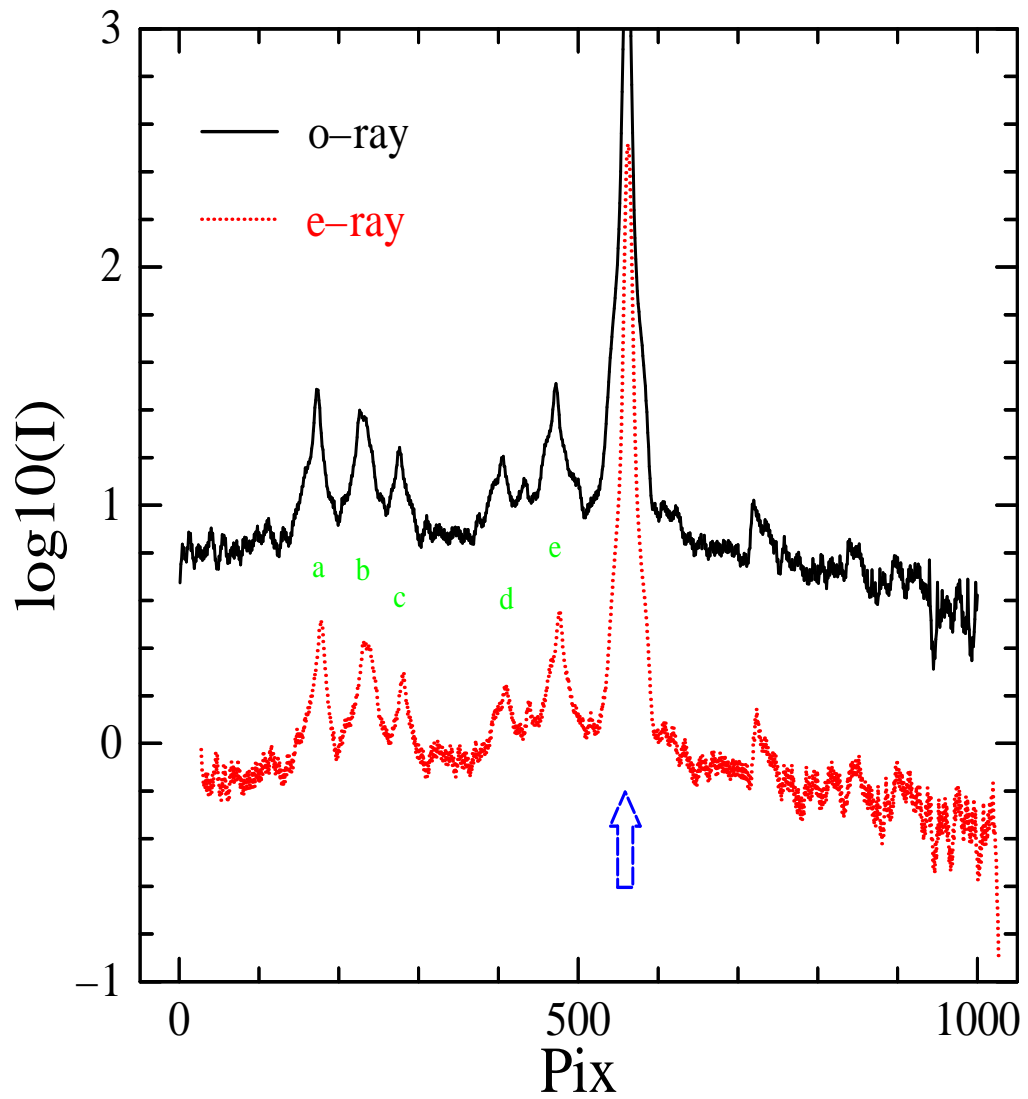


図 3: 常光線と異常光線のゴーストの比較。形状も強度も真の輝線 (図の矢印) に比較して、常光線と異常光線でほとんど変わらないことが分かる。図の 1 pix は、0.025 nm に対応する。

は以下の式で表現される。

$$F_o(\lambda) = I_{o\text{real}}(\lambda) + C_{o\text{real}}(\lambda)\Sigma k_{o_i}I_{o\text{real}}(\lambda - \Delta\lambda_i) \quad (3)$$

$$F_e(\lambda) = I_{e\text{real}}(\lambda) + C_{e\text{real}}(\lambda)\Sigma k_{e_i}I_{e\text{real}}(\lambda - \Delta\lambda_i) \quad (4)$$

ここで、 $I_{o\text{real}}(\lambda)$ および $I_{e\text{real}}(\lambda)$ はそれぞれ、輝線の常光線／異常光線のフラックス、 $C_{o\text{real}}(\lambda)$ および $C_{e\text{real}}(\lambda)$ は連続光の常光線／異常光線のフラックス、 k_{o_i} および k_{e_i} は i 番目のゴーストの真の輝線に対する割合をしめしている。つまり、ここでは真の輝線とゴーストの輪郭が同じであることを仮定している。また、 $\Delta\lambda_i$ はゴーストが真の輝線から波長にしてどの程度離れているかを示している。

観測される偏光度 ($= q_{\text{obs}}$) は、

$$q_{\text{obs}}(\lambda) = \frac{F_o(\lambda) - F_e(\lambda)}{F_o(\lambda) + F_e(\lambda)} \quad (5)$$

であるので、真の偏光度 ($= q_{\text{real}}$)

$$q_{\text{real}}(\lambda) = \frac{I_{o\text{real}}(\lambda) - I_{e\text{real}}(\lambda)}{I_{o\text{real}}(\lambda) + I_{e\text{real}}(\lambda)} \quad (6)$$

と比較することによって、ゴーストが偏光測定精度に与える影響を推定することができる。

簡単のため、輝線から最も近く最も強度の大きいゴーストのみの影響を考えることにする。また、連続光の影響は無視する ($C_o = C_e = 0$)。連続光は輝線のゴーストを薄める働きをするので、ゴーストによる精度への影響が最大になる場合を考えていることになる。これら仮定により式 (5) は、以下のようになる。

$$q_{\text{obs}}(\lambda) = \frac{I_{o\text{real}}(\lambda) - I_{e\text{real}}(\lambda) + k_o I_{o\text{real}}(\lambda - \Delta\lambda_i) - k_e I_{e\text{real}}(\lambda - \Delta\lambda_i)}{I_{o\text{real}}(\lambda) + I_{e\text{real}}(\lambda) + k_o I_{o\text{real}}(\lambda - \Delta\lambda_i) + k_e I_{e\text{real}}(\lambda - \Delta\lambda_i)} \quad (7)$$

さらに、輝線はローレンツプロファイルをなすとする (図 4)。これは、ゴーストは輝線のウイングの部分でより影響が見られると予想される。そのウイング部分を見るためには、ガウシアンに比べてウイングがより卓越したローレンツプロファイルが適当であると考えたからである²。また、真の輝線の偏光プロファイルは P Cyg 型をなしているとする (図?)。波長に対する偏光度の変動が大きい程、精度に与え得る影響は大きくなるわけであるが、その中で実際に観測される可能性が高いものの例として採用した。また、前述の実験結果によれば、最も近いゴーストは輝線から速度にして 1130 km/s 離れた位置に存在し、その peak での強度比は常光線／異常光線に区別なく 0.9 % であった。よって、計算においては $\Delta v = \lambda/\Delta\lambda c = 1130 \text{ km/s}$ 、 $k_o = k_e = 0.009$ に固定する。

4.1.2 結果

図 6 に計算結果を示す。図は上から、真の偏光度 q_{real} 、観測される偏光度 q_{obs} 、そしてそれらの差 (エラー) $\Delta q = q_{\text{obs}} - q_{\text{real}}$ を示している。線の違いは、輝線輪郭の速度幅の違いを示している。

全体の傾向としては、輝線幅が大きくなるほど測定精度への影響が小さくなる。これは、輝線幅が大きいと真の輝線の強度が十分に大きい波長域へゴーストは生じるため、真の輝

²実際に観測される輝線も広いウイングを持つものは、ガウシアンでは再現できないものが多い

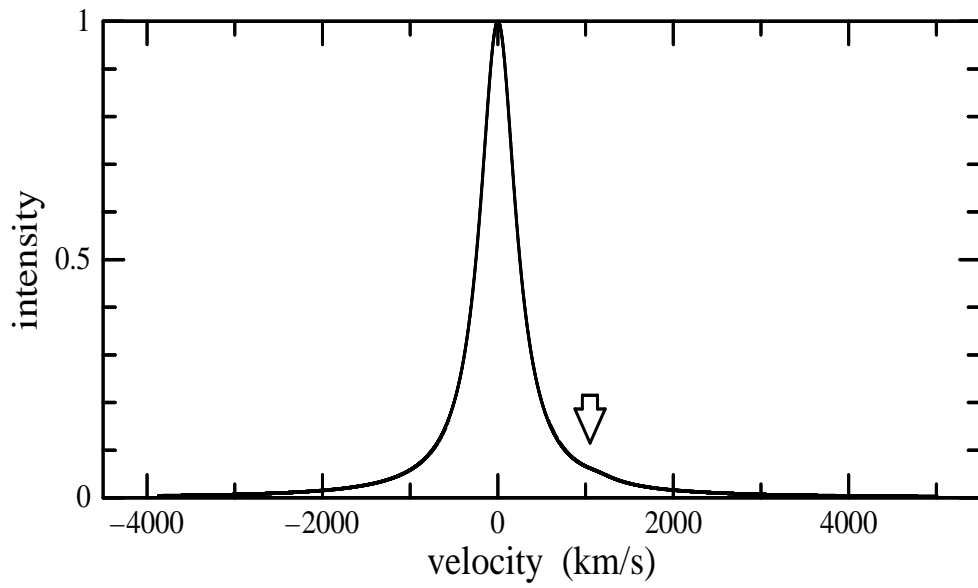


図 4: モデル計算に使用した輝線輪郭 (常光線、輝線幅 500 km/s の場合)。図の矢印はゴーストを指し示している。

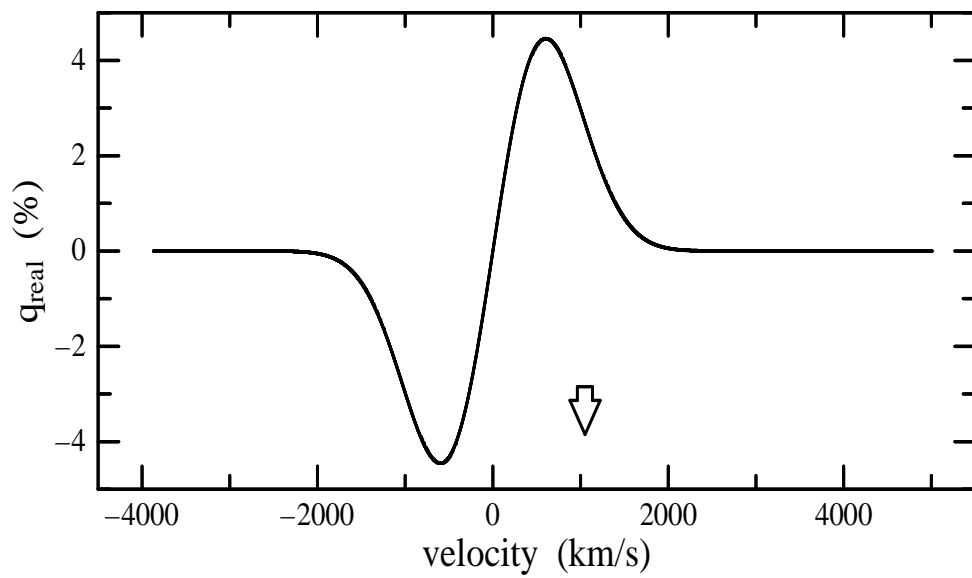


図 5: モデル計算に使用した偏光度の波長依存性 (輝線幅 500 km/s の場合)。

輝線	H α	H β	HeII4686	[OII]3726	[OIII]5007
推定されるゴースト量(%)	1.2	2.2	2.5	3.8	2.1

表 2: 主な輝線におけるゴーストの推定量。

線強度にほとんど薄められてしまうからである。図?の第 3 図を見てもその傾向になっており、速度幅 2000 km/s では測定精度への影響はほとんど見られない。一方、速度幅が非常に小さい場合、最も大きい場所で真の輝線に現れる偏光度と同程度のエラーが生じる。しかし、これは連続光の寄与を含めていないことによる結果であり、逆に言えばエラーの生じる波長域ではすでに輝線輪郭は達していないということになる。したがって、輝線の偏光輪郭を測定するという装置の目的からはあまり影響はないと言える。ただ、一点影響があるとすればゴーストが生じる波長域にたまたま別の輝線が生じていた場合である。

ゴーストが測定精度に最も悪影響を与えるのは、輝線の速度幅が 500-1000 km/s の範囲のときである。そのとき、輝線のゴーストが生じる側(図では長波長側)に最大で 0.5 % ものシステムチックエラーを与えている。これを、偏光度で規格化すると、 $\Delta q/q < 0.1$ となる。装置の目標値は、 $\Delta q/q < 0.1$ なので、かろうじて安全圏であるとも言えるが、他のシステムチックエラーの可能性も考えるとやはり測定に影響を与え得ると言わざるを得ない。しかもエラーの程度は、波長に対して大きくうねっており、複雑な偏光の輪郭を取り扱う場合には注意が必要になってくるだろう。

4.2 ルーリングの正確さと他の波長域でのゴースト量

最も強度の強いゴースト ($a=1.32\%$) から、そのゴーストを生成するルーリングのエラー量 (ϵ) を見積もってみる。式 (2) を用いると、 $\epsilon = 17\text{ nm}$ という結果になる。現在のルーリングの技術では、数 nm のエラーで抑えられるという報告もあり、今回用いたエシエル型回折格子は一代前にルーリングされたもののレプリカである可能性がある。同じレプリカについてゴーストの報告がないか調査してみたい。

ϵ の量が分かれば、式 (3) によって他の波長域(次数)でのゴーストが推定できる。主な輝線についてその量を見積もったのが表 2 である。短い波長になるほど、急激にゴーストの量は増加する。

5 まとめ

高分散偏光分光装置に用いるエシエル型回折格子に生じるゴーストについて調査し、それが偏光測定に与える影響を見積もった。その結果、

- 予想されていたものよりも強い (1%) ローランドゴーストとライマンゴーストが検出された。
- HIDES で報告されたゴーストは検出されなかった。
- ゴーストの本来の像に対する強度は、偏光向きに依存しないものであった。

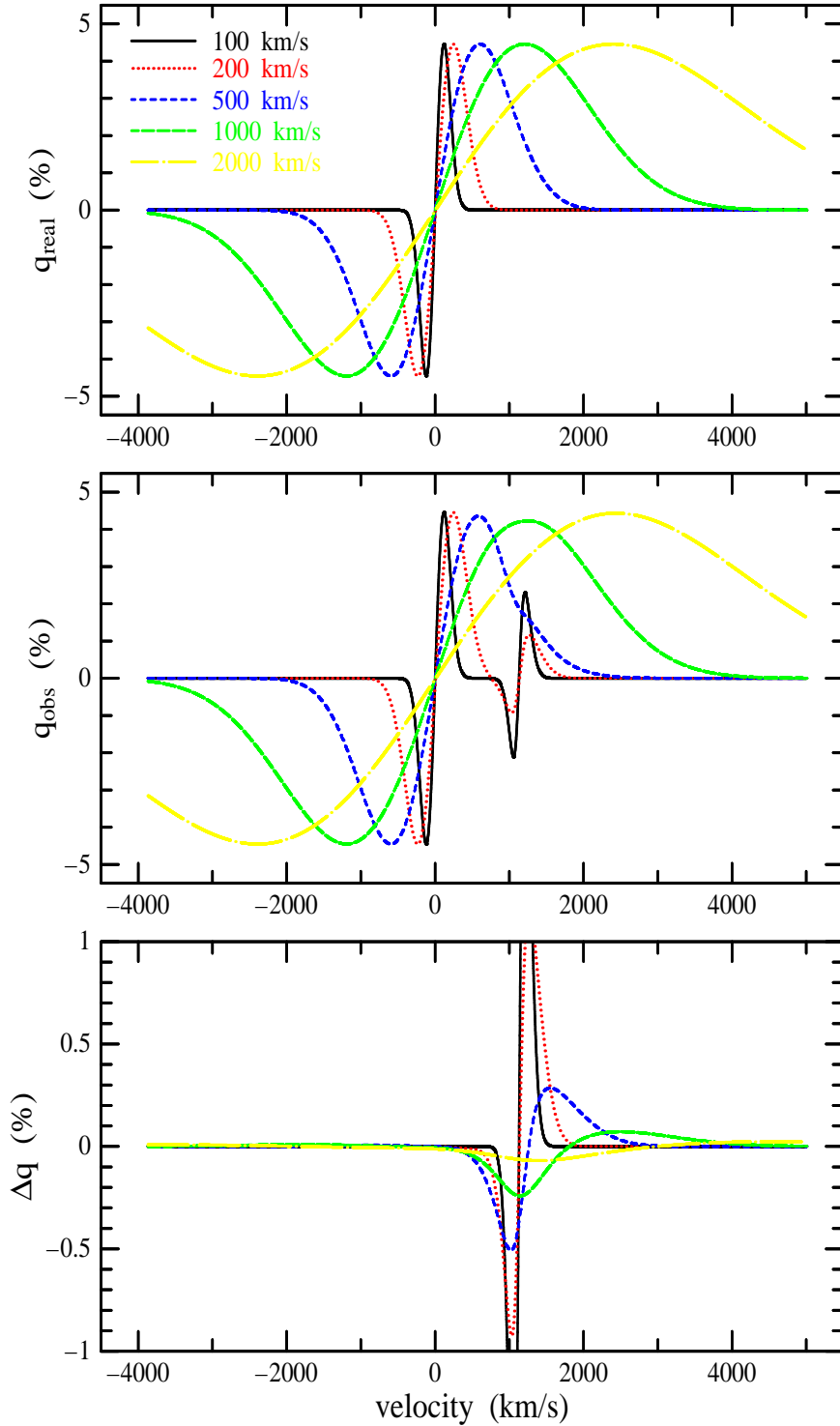


図 6: ゴーストによる測定精度への影響。図は、上から真の偏光度 (= q_{real})、観測される偏光度 = q_{obs} 、それらの差 Δq の波長依存性を示している。線の違いは輝線の速度幅の違いであり、100 km/s、200 km/s、500 km/s、1000 km/s、2000 km/s の場合を示して

- 今回、検出されたようなゴーストが生じた場合、輝線の速度幅にして 500 km/s に近い天体を対象とする場合、偏光測定精度に影響を与えうる。

ことが分かった。HIDES で見られたゴーストは、ゴーストの生じる方向を考えると、もしかしてクロスディスパーザ起源のものかもしれない。これについては、今後クロスディスパーザのゴーストの調査によって明らかになるだろう。また、偏光測定精度にゴーストが影響を与え得ることが分かったので、主な輝線でのゴースト量を見積もってソフト的に対処する必要がありそうである。その為には、多色レーザーによって今回行なった調査をもう一度行なう必要がある。