

「あかり」近赤外グリズム分光観測の二次光を考慮したフラックス較正

馬場 俊介 (東京大学大学院 理学系研究科、宇宙科学研究所)

Abstract

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された Infrared Camera (IRC) の近赤外チャンネルは、ゲルマニウム製のグリズムを用いた波長範囲 2.5–5.0 μm の分光観測機能を持つ。この観測モードにおいて、赤いスペクトルをもつ天体の観測データを解析する場合、レスポンスを介して求めたフラックスが波長 4.9 μm 以上で急激に減少する不自然な結果になるとわかった。この現象は、二次光の混入が原因だと考えられる。そこで、2種類の標準天体を用いて、グリズムの波長ごとのレスポンスを一次光と二次光について連立的に求めた。これらのレスポンス曲線により、二次光の混入を定量的に扱ったフラックス較正が可能になる。

1 背景

活動銀河核を取り巻く分子トラスの物理状態を調べるうえで、一酸化炭素 (CO) の回転振動遷移による吸収は強力な手段である (Shirahata et al. 2013)。

CO の回転振動遷移が起こる波長 4.7 μm 付近は大気の影響で地上観測が困難だが、赤外線天文衛星「あかり」に搭載された Infrared Camera の近赤外チャンネルが、ゲルマニウム製のグリズムを用いた波長 2.5–5.0 μm の分光観測を行っている (NG グリズムモード)。波長分解能は 3.6 μm において $\lambda/\delta\lambda \sim 120$ である (Ohyama et al. 2007)。NG グリズムによる分光観測は、CO 回転振動遷移の吸収線を調べるうえで非常に貴重なデータとなっている。

ところが、このモードのフラックス較正には、活動銀河核のような赤いスペクトルの解析において、NG グリズムのレスポンスを介して求めたフラックスが波長 4.9 μm 以上で不自然に減少するという問題があった。この現象は、長波長側の一次光に短波長側の二次光が混入しており、赤いスペクトルではレスポンス較正の基準とした標準星に比べて二次光の混入が少ないため、フラックスを過小評価しているのだと考えられる。

CO 回転振動吸収は二次光が影響するこの領域に現れるので、二次光の混入を定量的に評価し、より正確なフラックス較正を行う必要がある。

2 較正の方法

青いスペクトルと赤いスペクトルの 2 つの標準天体を同時に用いることで、一次光のレスポンスと二次光のレスポンスとをコンシステントに求めることができる。その方法を以下で説明する。

図 1 は、ツールキットにより出力される 2 次元スペクトルの例である。このような 2 次元スペクトルから、波長方向のピクセル位置 X と各 X での Analog-to-Digital Unit (ADU) $N(X)$ の関係がわかる。まず、赤

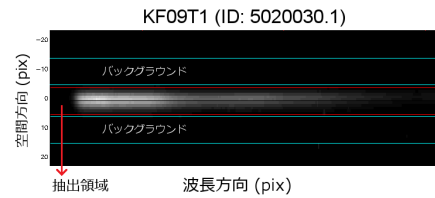


図 1: ツールキットで出力される 2 次元スペクトルの例 (天体は KF09T1)。

い標準天体と青い標準天体の観測結果を、 $N^{\text{red}}(X)$ 、 $N^{\text{blue}}(X)$ の形で出力する。また、それらの天体のモデルスペクトル $F_{\nu}^{\text{red}}(\lambda)$ 、 $F_{\nu}^{\text{blue}}(\lambda)$ を用意する。各 X に入射する一次光、二次光の波長 $\lambda_{1\text{st}}(X)$ 、 $\lambda_{2\text{nd}}(X)$ が与えられれば、各 X について連立方程式 (1) 解くことで、一次光、二次光のレスポンス $R_{1\text{st}}(\lambda)$ 、 $R_{2\text{nd}}(\lambda)$ を求められる。

$$\begin{cases} N^{\text{red}} = R_{1\text{st}}(\lambda_{1\text{st}})F_{\nu}^{\text{red}}(\lambda_{1\text{st}}) + R_{2\text{nd}}(\lambda_{2\text{nd}})F_{\nu}^{\text{red}}(\lambda_{2\text{nd}}) \\ N^{\text{blue}} = R_{1\text{st}}(\lambda_{1\text{st}})F_{\nu}^{\text{blue}}(\lambda_{1\text{st}}) + R_{2\text{nd}}(\lambda_{2\text{nd}})F_{\nu}^{\text{blue}}(\lambda_{2\text{nd}}) \end{cases} \quad (1)$$

波長 $2.5\ \mu\text{m}$ 付近の一次光と同じピクセルに入射する二次光の波長は $1.3\ \mu\text{m}$ 付近であるが、これは NG グリズムに施工されたオーダーソートフィルターのカットオン波長よりも十分短い。したがって、波長 $2.5\ \mu\text{m}$ 付近の一次光に二次光の混入は無いと考えられる。よって、波長 $2.5\ \mu\text{m}$ 付近の ADU とその波長での一次光と二次光のレスポンスの比から、どれだけの二次光光子が長波長側に混入しているかが分かる。この混入分を差し引いた ADU を一次光レスポンスで割れば、二次光の寄与を除いてフラックス較正を行える。

3 較正の準備

3.1 標準天体

青い標準天体には、Ohyama et al. (2007) と同様に、K0III タイプの標準星 KF09T1 を用いた。モデルスペクトルには Choen Template (Cohen 2007) を使った。

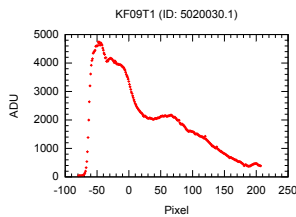


図 2: ピクセル対 ADU で表した標準星 KF09T1 (観測 ID: 5020030.1) の観測結果 ($N^{\text{blue}}(X)$)。

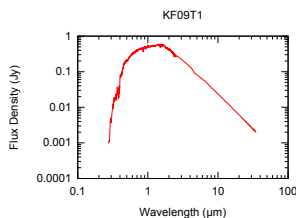


図 3: KF09T1 の Choen Template ($F_{\nu}^{\text{blue}}(\lambda)$)。

赤い標準天体としては、超光度赤外銀河 IRAS 05189-2524 を用いた。IRAS 05189-2524 は近赤外領域で輝線や吸収の小さいフィーチャーレ

スなスペクトルをしている (Yano et al. 2014, in preparation)。そこで、2MASS、WISE の測光観測と Spitzer IRS の分光観測結果に波長の 2 次関数をフィットし、これを $F_{\nu}^{\text{red}}(\lambda)$ として用いた (図 5)。WISE のフラックス較正、color correction は Wright et al. (2010)、Jarrett et al. (2011) に従った。2MASS のフラックス較正、color correction は Rieke et al. (2008) に従った。フィットに用いたデータ点は、2MASS、WISE の測光結果と Spitzer の波長 $7\ \mu\text{m}$ 以下の点である。

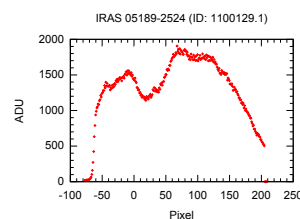


図 4: ピクセル対 ADU で表した IRAS 05189-2524 (観測 ID: 1100129.1) の観測結果 ($N^{\text{red}}(X)$)。

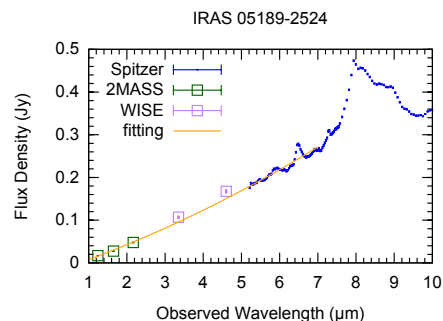


図 5: IRAS 05189-2524 の、2MASS、WISE による測光観測、Spitzer IRS による分光観測の結果。オレンジ色の実線は、2MASS、WISE の測光結果と、波長 $7\ \mu\text{m}$ 以下のデータ点にフィットした、波長の 2 次関数 ($F_{\nu}^{\text{red}}(\lambda)$)。

3.2 波長とピクセルの関係

屈折率 n 、ブレイズ角 α 、溝間隔 d のグリズムであれば、出射角を θ とすると、図 6 より、波長 λ の

光の次数 m での強め合いの条件は式 (2) になる。

$$m\lambda = d[n(\lambda) \sin \alpha - \sin(\alpha - \theta)] \quad (2)$$

NG グリズムは材質がゲルマニウム、溝間隔が $d = 21 \mu\text{m}$ 、ブレイズ角が $\alpha = 2.86^\circ$ である (Ohyama et al. 2007)。

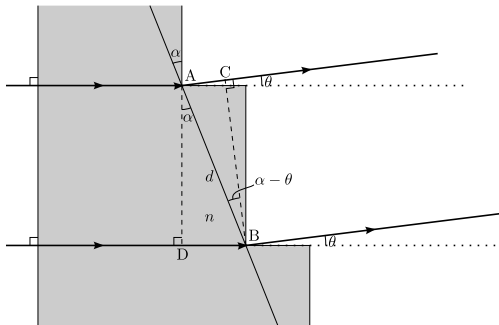


図 6: グリズム表面の拡大図。光路差は $\overline{BD} - \overline{AC}$ 。

ゲルマニウムの 30 K までの屈折率の波長依存性は、Frey et al. (2006) が測定している。しかし、観測時の NG グリズムの温度は 4 K ほどであり、その温度での結果は Frey et al. (2006) には含まれていない。そこで、観測時のゲルマニウムの屈折率 $n(\lambda)$ をツールキットの波長較正から見積もった。ツールキットの波長較正では、一次光で $\theta = 0$ となる波長は $3.12121 \mu\text{m}$ である。これが正しいと仮定すれば、波長 $3.12121 \mu\text{m}$ に対するゲルマニウムの観測時の屈折率は、式 (2) から 3.979 となる。そこで、Frey et al. (2006) で測定されたいくつかの波長に対する 30 K でのゲルマニウムの屈折をスプライン補完し、 $3.12121 \mu\text{m}$ での屈折率が 3.979 となるように定数倍したものを観測時のゲルマニウムの屈折率と仮定した (図 7)。ただし、Frey et al. (2006) で屈折率を測定しているのは波長 $1.8 \mu\text{m}$ までなので、これより短い波長での補間に精度はない。

NG グリズム、レンズ、検出器の位置関係を図 8 に示す。光は、NG グリズムに入射する前に 3 枚のレンズによって平行光になっている。レンズ中心から検出器までの距離は $L = 63.25 \text{ mm}$ で、検出器のピクセルピッチは $30 \mu\text{m}$ である。出射角 θ の光は、direct light position から $L \tan \theta$ 離れた点に入射する。

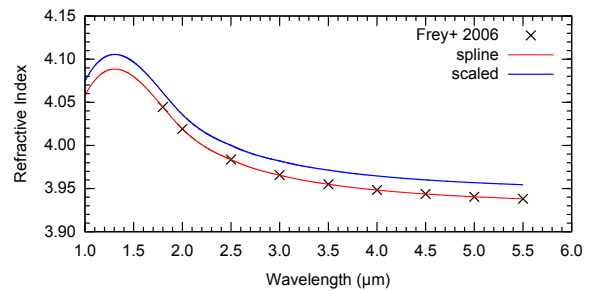


図 7: 黒の×印は、30 K での値 (Frey et al. 2006)。赤の実線はそれらの点を通るスプライン曲線。青の実線は、赤の実線を定数倍し、 $3.12121 \mu\text{m}$ での屈折率が 3.979 となるように定数倍したものの。

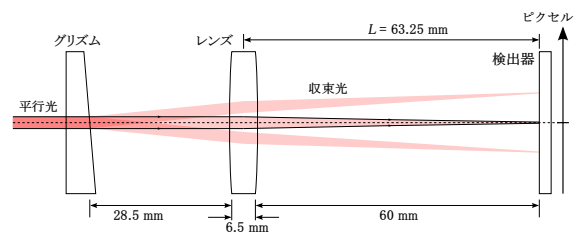


図 8: NG グリズム、レンズ、検出器の位置関係。

以上より、一次光、二次光それぞれの波長-ピクセル関係は図 9 のようになる。波長 $2.5 \mu\text{m}$ の二次光は 186.9 pix に入射し、波長 $5.0 \mu\text{m}$ の一次光は 191.5 pix に入射する。オーダーソートフィルターが波長 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の光を完全に遮断しても、長波長側で二次光の混入が起こることになる。

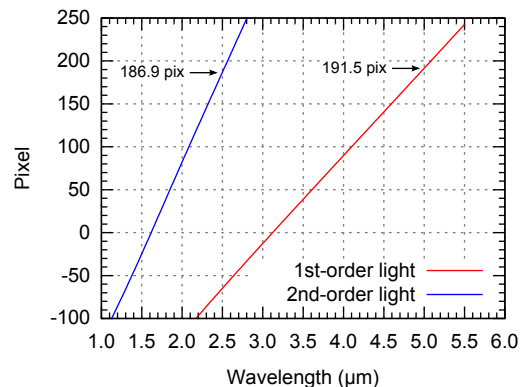


図 9: 一次光、二次光の波長-ピクセル関係 ($\lambda_{1\text{st}}(X)$ 、 $\lambda_{2\text{nd}}(X)$)。

4 結果

3 節の結果を用いて 2 節の方法で今回新しく計算した一次光、二次光それぞれのレスポンス曲線を、図 10 に示す。波長 2.5, 5.0 μm 付近で、予想に合致した結果が得られた。ツールキットのレスポンスにある 4.9 μm の折れ曲がりは、標準星の観測のとき二次光由来の ADU を余分に受けているためだと解釈できる。今回のレスポンスではそのような折れ曲がりはない。また、波長 2.5 μm 付近で二次光のレスポンスが上がっている。これは、この範囲の光が二次光として長波長側に混入していることによると考えられる。

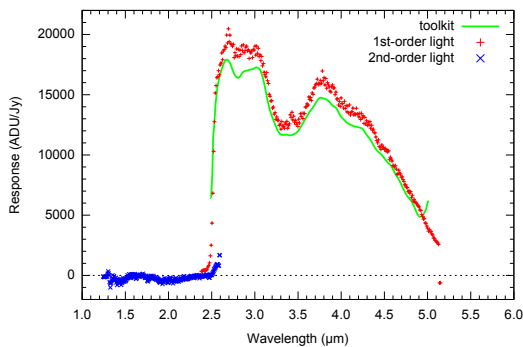


図 10: 赤、青の点が、それぞれ今回求めた一次光、二次光のレスポンス曲線。緑色の実線は現ツールキットに含まれる一次光のレスポンス曲線。

図 11 は、IRAS 05189-2524 と同様に近赤外で輝線や吸収の少ないスペクトルを持つ Mrk 231 の観測結果を、現ツールキットと今回新たに求めたレスポンス曲線でそれぞれフラックス較正した結果である。現ツールキットでの結果では波長 4.9 μm でフラックスが不自然に減少しているが、今回の二次光を考慮した較正では 5.0 μm まで滑らかな分布が得られた。ただし、この較正の際には、レスポンスを 3 点で移動平均をとって平滑化し、図 10 に見られるような二次光の負のレスポンスは全て 0 に置き換えた。

5 結論

「あかり」NG グリズム分光観測のフラックス較正の問題について、原因を二次光の混入と予想し、そ

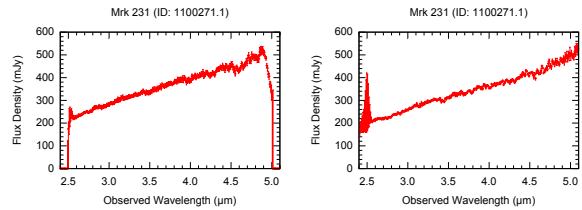


図 11: Mrk 231 の NG グリズムの分光観測 (観測 ID: 1100271.1) を、(左) 現ツールキットでフラックス較正した結果。(右) 今回求めたレスポンス曲線でフラックス較正した結果。

れを取り除く新たなレスポンス較正を行った。結果は予想に合致するものであり、今回の較正の妥当性を支持している。

今後はレスポンスの誤差を見積もるなど、より詳細な検証を行う必要がある。

Reference

- Cohen, M. 2007, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 364, *The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization*, ed. C. Sterken, 333
- Frey, B. J., Leviton, D. B., & Madison, T. J. 2006, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 6273, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*
- Jarrett, T. H., Cohen, M., Masci, F., et al. 2011, *ApJ*, 735, 112
- Ohyama, Y., Onaka, T., Matsuhara, H., et al. 2007, *PASJ*, 59, 411
- Rieke, G. H., Blaylock, M., Decin, L., et al. 2008, *AJ*, 135, 2245
- Shirahata, M., Nakagawa, T., Usuda, T., et al. 2013, *PASJ*, 65, 5
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, *AJ*, 140, 1868