

スリットマスクの冷却温度について (その2)

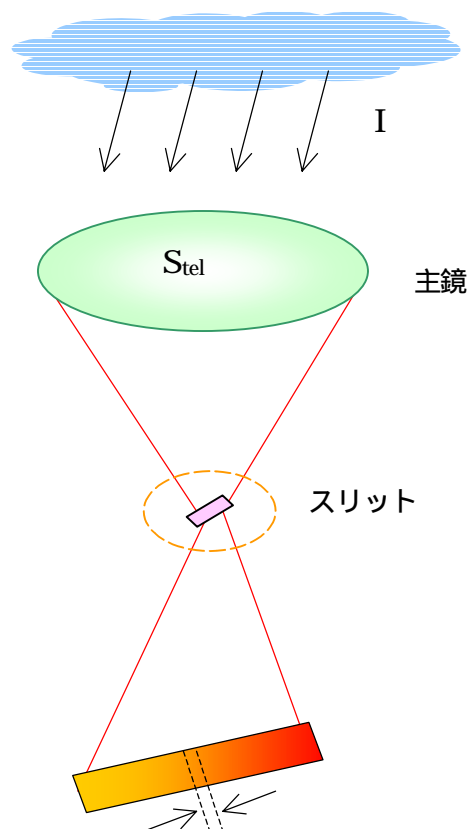
Jan,2001 tokoku

1、はじめに

以前に、スリットマスクを 150K まで冷却すれば、マスクからの熱輻射によるノイズが、スカイからの熱輻射によるノイズに比べて十分小さくなるという見積もりをしました。ところが改めて計算しなおしたところ、冷却温度はもっと高くてもよいことがわかったので、見積もり方法も併せて報告します。考え方に間違いがあるようでしたら、ご指摘ください。

2、スカイからの輻射

近赤外領域の撮像では、スカイの明るさが限界等級を決める、いわゆるバックグラウンドリミテッドになることが多い。しかし分光においては必ずしもそうはならない。まずは、スカイからの単位時間あたりに 1 ピクセルに入射する光子数を求める。



ある波長 $[\mu\text{m}]$ でのスカイの放射強度を I [$\text{photons}/\text{m}^2/\text{s}/\mu\text{m}/\text{arcsec}^2$]、スリットが見込む天球上の角度面積を A [arcsec^2]とすると、スリットに入る単位時間、単位波長あたりのエネルギー量は、 $I \times S_{\text{tel}} \times A$ となる。 S_{tel} は望

遠鏡の受光面積である。こうしてスリットに入ってくる光のうち、分光して得られるある波長 λ_0 のエネルギー量は、分解能 R で決まる波長幅 $\Delta\lambda$ をもつので、

$$I_{\lambda} \times S_{\text{tel}} \times A \times \Delta\lambda = I_{\lambda} S_{\text{tel}} A \times \frac{\lambda_0}{R}$$

と表せる。このエネルギーが、検出器上で n_{pix} 個のピクセルに入るので、単位時間あたりに 1 ピクセルにはいる光子数 N_{sky} は以下のように求まる。

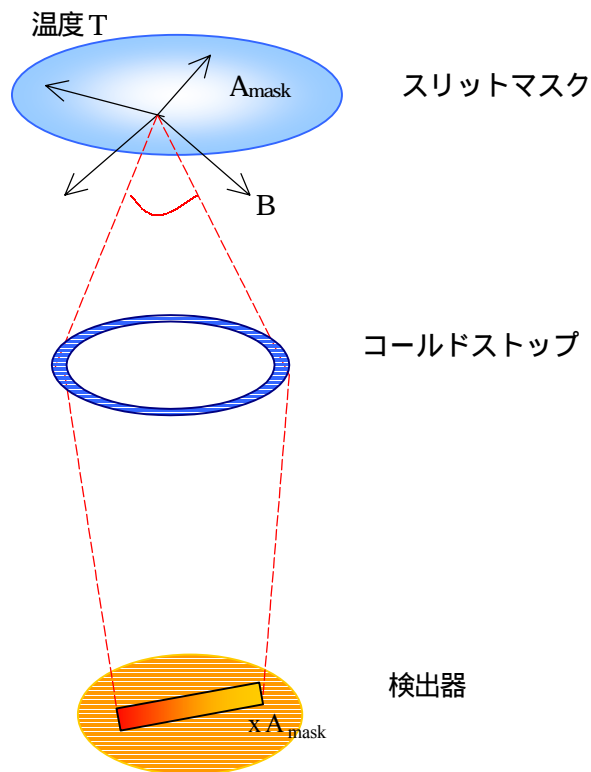
$$N_{\text{sky}} = \frac{I_{\lambda} S_{\text{tel}} A \lambda_0}{R} \times \frac{1}{n_{\text{pix}}} [\text{photons/s /pix}^2]$$

MOIRCS での分光は OH 夜光をソフト的に取り除くとして、スカイの放射強度は連続光の値を用いる。これには、McLean のテキスト「Electronic Imaging in Astronomy」にある背景輻射の図より読み取った値を使用し、 $1.25 \mu\text{m}$ で $8 \times 10^3 [\text{photons/m}^2/\text{s}/\mu\text{m}/\text{arcsec}^2]$ 、 $1.63 \mu\text{m}$ で 2×10^2 、 $2.2 \mu\text{m}$ で 2×10^2 とした。スリットの大きさは視野にして $0.2' \times 15'$ 、サンプリングレートは $0.117' / \text{pix}$ 、分解能 $R=2000$ とした。

	$1.25 \mu\text{m}$	$1.63 \mu\text{m}$	$2.2 \mu\text{m}$
スカイからの光子数 $N_{\text{sky}} [\text{photons/s/pix}^2]$	9.08×10^{-2}	1.18×10^{-1}	6.39

3、温度 $T[\text{K}]$ のスリットマスクからの熱輻射

次に、スリットマスクからの熱輻射によって、単位時間あたりに 1 ピクセルに入射する光子数を求める。



温度 T[K]の黒体から波長 λ で放射されるエネルギーは、プランクの式

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad [\text{W/m}^3/\text{sr}]$$

で表されるマスクのある一点から放射率 ε で出た波長 λ_0 [m]の光のうち、立体角 $\Delta\Omega$ [sr]分がコリメータ、コールドストップ、カメラを通過して、分解能 R で決まる $\Delta\lambda$ をもって、拡大率 (もしくは縮小率) x で検出器に入射する。よって、マスク全体から検出器に入ってくるエネルギーは

$$\frac{B_{\lambda} \varepsilon}{hc/\lambda_0} \times \Delta\Omega \times \Delta\lambda \times A_{\text{mask}}$$

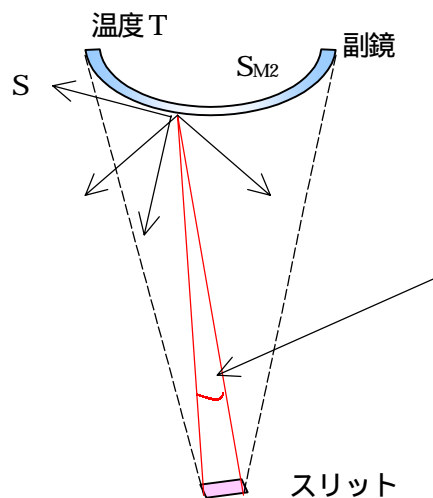
となる。実際の検出器上では、マスクのほかの点から出た光のスペクトルもその上に重なってスペクトルをつくるので、ある有効波長 λ_0 を中心としたひとつのスペクトルには、バンド幅 $\Delta\lambda_{\text{band}}$ に相当するエネルギーが入ってくることになる。またここでは立体角の定義より、望遠鏡の F 値を F_t として $\Delta\Omega = \pi/4F_t^2$ とする。像の拡大率は、望遠鏡の F 値を F_t 、カメラの F 値を F_c として、 $x = F_c/F_t$ で与えられる。MOIRCS は $F_t = 12.41$ 、 $F_c = 3.926$ で、つまりマスクの大きさは検出器上で $x = 0.316$ に縮小されている。こうして求めた波長 λ_0 のエネルギーを検出器の 1 ピクセルの大きさ ($18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$) で割ることによって、マスクから 1 ピクセルに 1 秒あたりに入射する光子数 N_{mask} が求まる。この光子数 N_{mask} は、マスクの温度 T[K]によって変化する。結果は図 1 に示す。

$$N_{\text{mask}} = \frac{B_{\lambda} \varepsilon}{hc/\lambda_0} \times \frac{\pi}{4F_t^2} \times \Delta\lambda_{\text{band}} \times A_{\text{mask}} \times \frac{1}{\frac{A_{\text{mask}} \times x}{(18 \times 10^{-6})^2}}$$

$$= \frac{B_{\lambda} \varepsilon}{hc/\lambda_0} \times \frac{\pi}{4F_t^2} \times \Delta\lambda_{\text{band}} \times \frac{1}{x} \times (18 \times 10^{-6})^2 \quad [\text{photons/s/pix}^2]$$

4、望遠鏡からの輻射

次に、望遠鏡の副鏡からの熱輻射を求める。望遠鏡からの輻射がノイズとして効くとは考えにくいですが、比較・確認のために見積った。MOIRCS ではコールドストップを置くため、その外側からの輻射は入ってこないと考え、副鏡からの輻射だけを考える。



副鏡が温度 T [K]で平衡状態にあるとする。波長 λ [m]の放射エネルギーを S [W/m³/sr]、副鏡の面積を A_{M2} [m²]、副鏡の放射率を ϵ 、副鏡の一点がスリットを見込む立体角を $\Delta\Omega$ [sr] (スリットの実面積を A_{slit} [m²]、副鏡とスリットの距離を D [m]として、 $\Delta\Omega = A_{slit}/D^2$ を用いる) とすると、副鏡のある点からスリットに入る光子数 N は、

$$N = \frac{S_{\lambda} \times \epsilon}{hc/\lambda} \times \Delta\Omega \times \Delta\lambda \times A_{M2} \quad [\text{photons/s / pix}^2]$$

各数値は、 $\epsilon = 0.01$ (すばる赤外副鏡のコーティングは銀のため)、 $D = 15.652$ [m] (焦点面からの瞳位置) $= 1.265$ [m] (副鏡の直径) $T = 273$ [K] (副鏡の温度) を用いた。

これを検出器上でスペクトルがのるピクセル数で割ってやると1ピクセルあたりに入射する光子数が求まる。ここで、検出器上のスペクトルの広がり $\Delta\lambda$ は、分解能 R を用いて $\Delta\lambda = \lambda/R$ で決まる。この $\Delta\lambda$ が N_{slit} ピクセルにおちるような光学系の場合、1ピクセルにおちる波長幅は $\Delta\lambda / N_{slit}$ [$\mu\text{m}/\text{pix}$] となる。ここでは N_{slit} は 2[pix]とした。一つのスペクトルはバンドの波長幅 $\Delta\lambda_{band}$ 分広がるから、バンド幅が占める波長方向のピクセル数 N_{band} は、以下のように表せる。

$$N_{band} = \frac{\Delta\lambda_{band}}{\Delta\lambda / N_{slit}}$$

一方、スリットの空間方向のピクセル数は、視野をサンプリングレートで割ったものとなる。こうして求めたスペクトルがおちるピクセル数は、Jバンドで約 67000pix、Hバンドで約 93000pix、Kバンドで約 70000pix となった。副鏡から出てスリットを通った光子数 N をスペクトルがおちるピクセル数で割ると、1ピクセルあたりに入射する光子数 N_{M2} が求まる。

	Jバンド	Hバンド	Kバンド
副鏡からの光子数 N_{M2} [photons/s/pix ²]	1.32×10^{-8}	1.01	0.176

5、装置から検出器へ入る熱輻射

次に、フィルタより検出器側の全ての部分からの熱輻射による光子数を見積もる。検出器は $0.8 \sim 2.5 \mu\text{m}$ に感度を持つので、この波長域にわたってスリットマスクからの放射と同じように計算する。ただし、1ピクセルの見込む立体角は $\Delta\Omega$ とする。検出器 HAWAII-2 の最適駆動温度は約 80K なので、検出器とその周辺は全て 80K に冷却されるとする。

$$\begin{aligned} N_d &= S_{\lambda} \times \Delta\Omega \times \epsilon \times A_{pix} \\ &= 4 \pi c \epsilon A_{pix} \int_{0.8 \mu\text{m}}^{2.5 \mu\text{m}} \frac{\lambda^{-4}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda \\ &= 5.06 \times 10^{-17} \quad [\text{photons/s / pix}^2] \end{aligned}$$

この輻射による影響は他の熱輻射に比べて十分小さいことがわかる。同様に、フィルタより望遠鏡側にある光学マウントなどからの輻射も、80K 程度まで冷却すればノイズとしての影響は十分小さくなるとして無視する。

マスクの温度による光子数の変化と、スカイの輻射によるノイズを図1にまとめた。

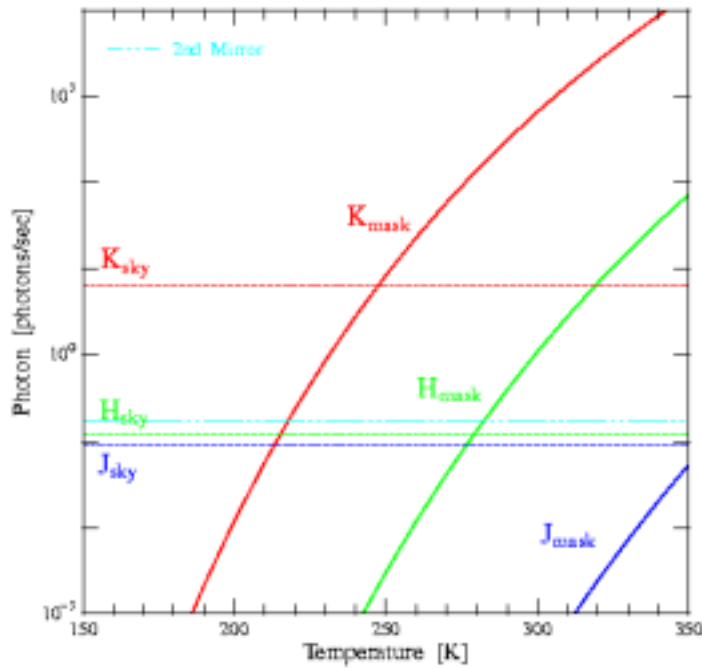


図 1 マスクの温度による光子数の変化とスカイからの光子数

積分時間と各種のノイズ量の変化をまとめると、図 2 のようになる。Readout(100)は、100 回露出を行ったときのリードアウトノイズを意味する。HAWAII-2 のリードアウトノイズは $10 e^-$ (カタログ値) だが、それを含めた読み出し回路のリードアウトノイズを $20 e^-$ とした。これは読み出し駆動系の目標値でもある。最も輻射の影響を受けるのは K バンドである。スカイからの輻射に比べてスリットマスクからの輻射を 10 分の 1 以下に抑えるためには、スリットマスクを 227K 以下に冷却すればよいことがわかる。

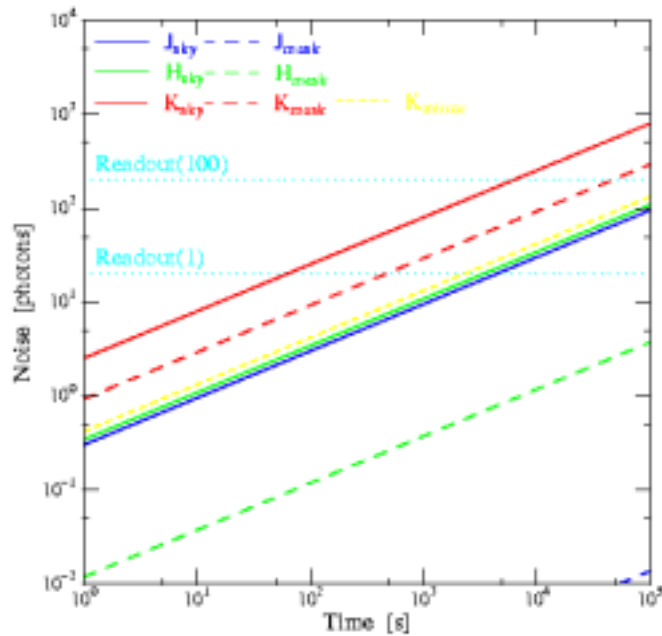


図 2 時間による各ノイズ量の変化

6、冷却温度のムラとふらつき

最後に、スリットマスクの冷却温度ムラやふらつきはどの程度まで許されるかについて見積もる。ここで、温度のムラとは、ある瞬間に一枚のマスク内にある温度勾配のことを指し、温度のふらつきとは、マスクのある点の温度の時間による変動を指している。

考えるポイントは、「各ピクセルに入射するマスクからの光子数について、1枚目のフレームから最後のフレームまでのそれぞれが ± 1 ADUに相当する温度(に相当する光子数)しか変動しなければ、各フレームのマスクからの光子数は同じ分布をしていると言えて、マスクのみの(天体の映っていない)画像を差し引くことによって、温度のムラは問題でなくなる。」ということである。つまりスリットマスクに多少の温度ムラがあっても、そのムラ具合をある精度で維持していれば問題なし、ということになる。

輻射の効果はKバンドが一番大きいので、ここではKバンドのみを考える。また、実際のゲインはまだ決まっていないので、一般的な値として $1\text{ADU} = 5e^-$ とした。

例えば、3000秒の積分(1枚のフレームで500秒露出 \times 6フレーム)を行ったとする。このとき、スカイから1ピクセルに入射する波長 $2.2\ \mu\text{m}$ の光子数は $6.39\ [\text{photons/s/pix}^2]$ で、マスクからの輻射をこの10分の1以下、つまり $0.64\ [\text{photons/s/pix}^2]$ に抑えるのに必要なマスクの冷却温度は $210.8\ [\text{K}]$ となる。各フレーム間で、マスクからの平均の光子数の変化が ± 1 ADU以下ならば温度変化として認識されない。この光子数を温度に換算すると、 $T = +0.99 / -1.15\ [\text{K}]$ となる。つまり500秒積分のとき、マスクの温度を $210.8\text{K} \pm$ 約 1K の精度で維持できればよいのである。マスクからの光子数はマスクの温度に比例するので、問題なのは温度勾配ではなく、勾配の分布形状と温度レベルの変化である。

これらは、マスクの冷却設定温度、観測する天体の光度、積分時間、ゲインの設定などによっても変わってくるが、想定される状況での上限値を確認した上で、冷却方法や温度の維持方法などをさらに検討する必要がある。200K程度の冷却であれば、ペルチェ素子での冷却という手段も考えられる。

7、まとめ

以上の結果より、一番冷やす時でスリットマスクはKバンドで約230Kまで冷却する必要がある。また要求される冷却温度の安定精度は数~数十K程度である(冷却温度、積分時間などによる)。

マルチスリットに関しては、冷却勾配によってスリットの形状への影響が大きいので、材質と冷却効率との兼ね合いをもう少し考慮した上でまだ検討が必要である。

光学マウント等に必要な冷却温度は別の機会に見積もる。