

McLean 輪読第 7 回 p.315-331

学籍番号 05-162003 理学部天文学科 4 年 小川貴士

2017 年 6 月 14 日

9. Characterization and calibration of array instruments

9.1 From photons to microvolts

$$V_0 = \frac{A_{SF}\eta GN_p e}{C} \quad (1)$$

- V_0 : 検出される電圧 (small voltage)
- N_p : 積分時間 t の間に吸収された光子
- η : 量子効率 (< 1)
- G : photoconductive gain (~ 1)*1 *2
- C : 検出器の出力電極 (output node) の電荷容量
- A_{SF} : 出力増幅器 (out put amplifier) のゲイン。通常はソースフォロワーで、 $A_{SF} \sim 0.8$

実際には $A_{SF}\eta G/C$ の値が分かっているだけで、それぞれの値が求まっていることが望ましい。

*1 CCD では

$$G = 1 \quad (2)$$

*2 ηGN_p が検出される電子数となる

9.1.1 QUantum efficiency and DQE

量子効率の測定には、既知の spectral passband を用いる。^{*3} 光源:白熱灯または grating spec-

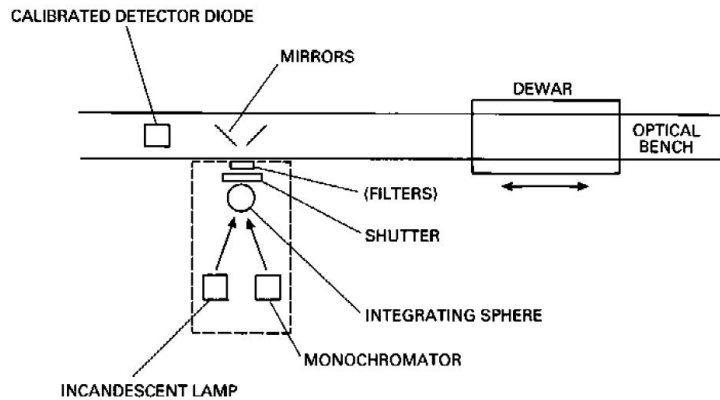


図1 量子効率の測定

trometer ^{*4}

→integrating sphere でランダム化して (randomize) 一様な光源にする

→ フィルターを通す

→ 検出低温槽 (detector cryostat) と校正済みフォトダイオード (calibrated photodiode) に光が分かれる。

→ フォトダイオードからの信号を記録する。 / dewar を通過した先は逆二乗則を使えるように前後に距離を調節できる系を設置する。^{*5}といった手順を踏む。^{*6}この設定では相対的な量子効率は用意に測定ができるが、絶対的な量子効率を測定するにはピクセルに対する正確な立体角の決定が必要となる。^{*7}

赤外線の場合

- 低温では passband が短波長を広げたり動かししたりするため、赤外線フィルターの場合は operating temperature (e.g., 77K) で行うべきである。
- 赤外線では黒体を用いることでより簡単に照射の程度を知ることができる ($B_{\lambda}(T)$ とエネルギーが温度だけで決まることによる)。

実際の測定

波長 VS 量子効率 η と $1 - R$ (R :反射率) のグラフは図3。短波長と長波長側を除いて η と $1 - R$ に良い一致が見られる。短波長側では吸収された光子が欠乏領域からかなり遠いところで電子-

^{*3} その他の光学系は最小限にする。

^{*4} 長波長では黒体放射源を用いることができ、integrating sphere が不要となる

^{*5} 検出器が照らされる程度を変えることができるようになる

^{*6} 測定は望ましい波長帯で行うが、波長帯と passband 次第では波長依存性のないフィルターを用いることもできる (neutral density filter)。これはダイオードでフィルターを通したときの減衰を正確に測定することができるからである。

^{*7} 余計な量が実験系に入ることを防ぐため、工学系よりもむしろバツフルで角度を決定する方が良い

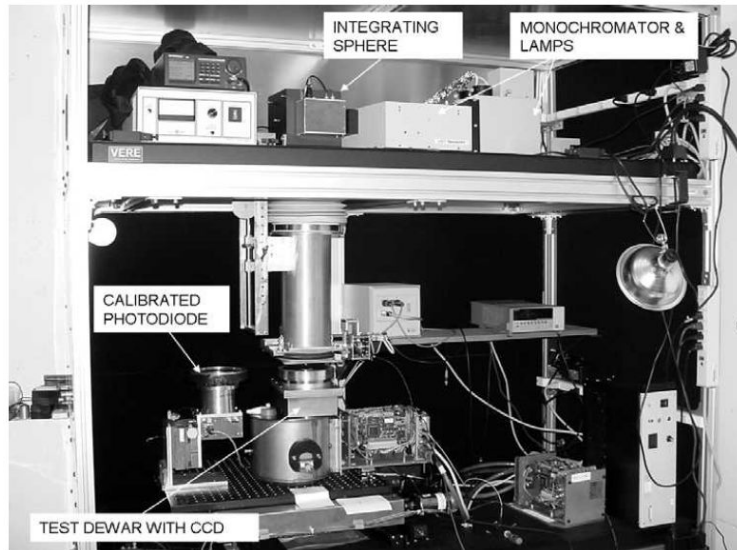


図2 UCO/Lick Observatory automated QE measurement facility

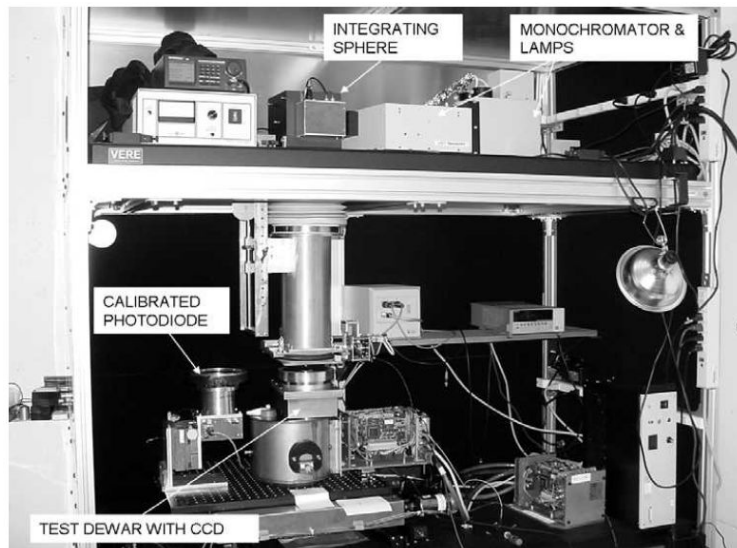


図3 Curves of the measured QE and reflectance of a deep-depletion CCD

正孔対を作り、長波長側では吸収されるまでの距離が長すぎて電子-正孔対が生成されない。

・ゲイン A_{SF}

ドレイン電圧と出力ソース電圧の比が A_{SF}

・電荷容量 C

N を集められた電荷の総数とすると、 $V = eN/C$ 、ノイズを $\sigma_V = e\sqrt{N}/C$ とすると

$$C = \frac{eV}{\sigma_V^2} \quad (3)$$

となって平均の電圧 V と分散 σ_V^2 (ノイズ) から C が求まる。

・ 透過率 τ

全体の透過率で分かっていないものの積を τ とすると、最終的に得られる量子効率 η ではなく $\tau\eta$ になる。装置の改善のためにも、どこで光が失われるか知っておくと良い。

・ detective quantum efficiency(DQE) η'

η' は、読み出しノイズがない理想的な系かつ、実際の CCD の系と S/N 比が同じときの量子効率。通常の S/N 比は

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta N_p}{\sqrt{\eta N_p + R^2}} \quad (4)$$

DQE の場合は

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta' N_p}{\sqrt{\eta' N_p}}$$

$$\therefore \eta' = \eta \frac{1}{1 + \frac{R^2}{\eta N_p}} \quad (5)$$

η' は η より小さく、DQE は N_p に依存していることが分かる。

Table 9.1. Detective quantum efficiency (DQE) as a function of readout noise R (electrons rms) and number of incident photons N_p for two values of the true QE (30% and 60%).

Read noise $R(e^-)$	Incident number of photons (N_p)					
	1	10	100	1,000	10,000	100,000
1	6.9 (22.5)	22.5 (51.4)	29.0 (59.0)	29.9 (59.9)	30.0 (60.0)	30.0 (60.0)
10	0.1 (0.4)	0.9 (3.4)	6.9 (22.5)	22.5 (51.4)	29.0 (59.0)	29.9 (59.9)
100	0.001 (0.004)	0.009 (0.215)	0.1 (0.4)	0.9 (3.4)	6.9 (22.5)	22.5 (51.4)

図 4 DQE

9.1.2 Photon transfer function

$$S = \frac{N_e + N_d}{g} + b \quad (6)$$

- S : 出力信号のデータ数 (DN)
- N_e : 電荷パケットの電荷数 ($= \eta N_p$)
- b : バイアス
- g : ゲイン (electrons/DNs)

g は計算か測定によって得る。

計算

$$g = \frac{V_{fs}C}{2^n A_g e} \quad (7)$$

- V_{fs} : A/D 上での電圧の振れ幅の最大 (full-scale voltage)
- n : 変換ビット数 $\rightarrow V_{fs}$ が 2^n 分割される
- A_g : $A_{SF}, A_{pre}, A_{post}$ (チップ上のアンプ、プリアンプ、ポストアンプ) の合計。
- C : CCD の電荷容量 (~ 0.1 [pF])

上記の式から g が得られる。 V_{SF} を 10 [V] とすると、 $g = 95.3/A_g$ 。 g が小さすぎると、CCD からの大きな信号が A/D のインプット許容量を超える。 g が大きすぎると、誤差の影響を受ける。典型的には g は (電子数でみた) CCD 読み出しノイズの 0.5 - 0.25 倍程度に設定する。

測定

感度差によって生じる誤差を除去するために最初に flat-fielded された小さなピクセル列に一定の照射を少ない回数行う。

$$S_M = \frac{1}{n} \sum X_i$$
$$V_M = \frac{\sum (X_i - S_M)^2}{n - 1} \quad (8)$$

- X_i : 測定値
- \sum : ピクセル全体で合計する
- S_M : 平均値
- V_M : 分散

*8 ノイズは

- 光電子信号からの光子ノイズ (p)
- CCD 出力増幅器の電子の読み出しノイズ (R)

p と R は独立してランダムなので、

$$(noise)^2 = p^2 + R^2 \quad (9)$$

*9 これを DN に変換すると

$$\left(\frac{noise}{g}\right)^2 = \left(\frac{p}{g}\right)^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2 \quad (10)$$

*8 DN

*9 DN ではなく光電子

左辺は V_M に等しく、光電子数の平均は gS_M 、光電子数のノイズは $p = gS_M$ なので

$$V_M = \frac{1}{g}S_M + \left(\frac{R}{g}\right)^2 \quad (11)$$

となる。グラフにプロットして、 g, R を求める (variance method, photon transfer method)。ノ

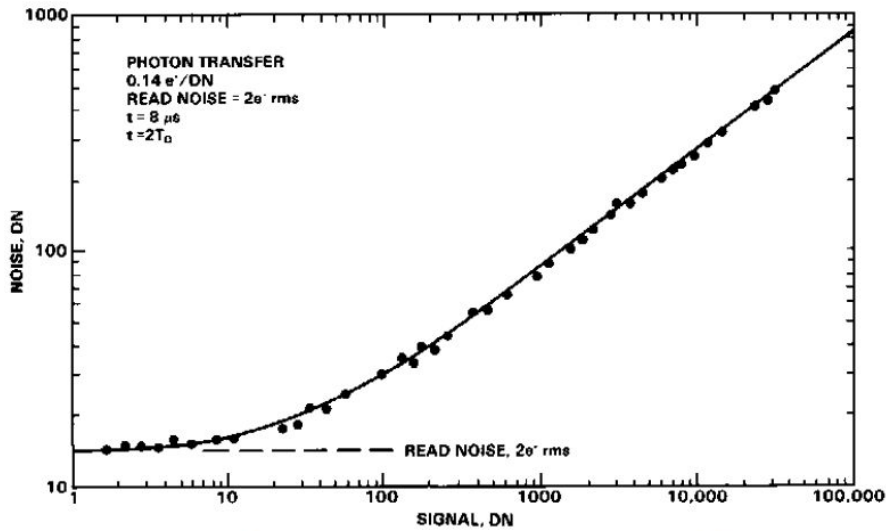


Figure 9.5. A plot of noise vs. signal on a logarithmic scale.

図5 variance method

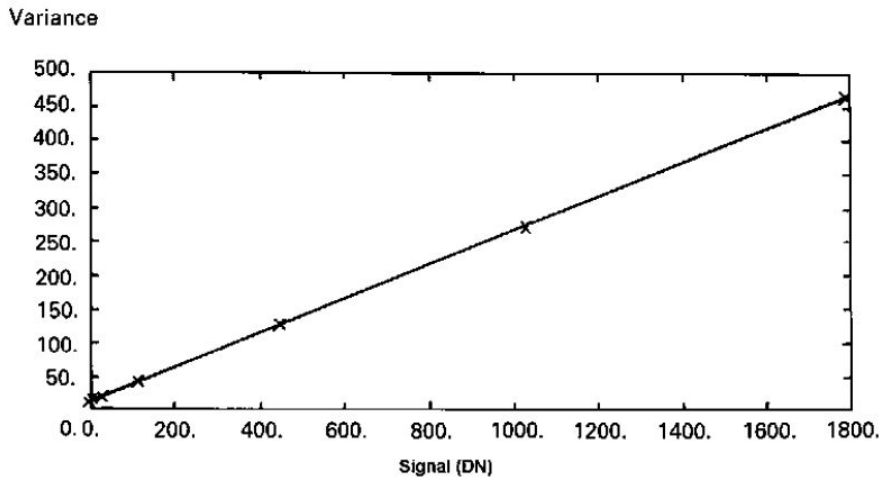


図6 variance method(logarithmic scale)

イズが小さいときは読み出しノイズが支配的で、ノイズが大きいたきは光子ノイズ (光子検出率の統計的な変動) が支配的となる。最終的には線形関係ではなくなって飽和し、(それぞれのピクセルの電子数が) 一定値をとるのでノイズは急落する。

実際の注意事項

- いくつかの*¹⁰flat-field exposure の際、たくさんの照射レベルで測定を行う。*¹¹それぞれの暗電流の効果 (dark frame) を記録する。
- 不均一性をほとんど示さず、近くに人工物のないピクセルまたは配列を選ぶ
- それぞれの照射レベルに対して平均の像が作成され、pixel deviation を得るために個々のイメージから差し引かれる
- または、平均の (暗電流を差し引いた) イメージが個々の (暗電流を差し引いた) イメージを割るのに用いられることもある
- 分散 (σ) が計算され、いくつかのフレーム間で平均される
- 平均化された像と dark frame の平均の違いから mean bias-corrected signal value が求められる

9.2 Noise, bias, and dark current

バイアス

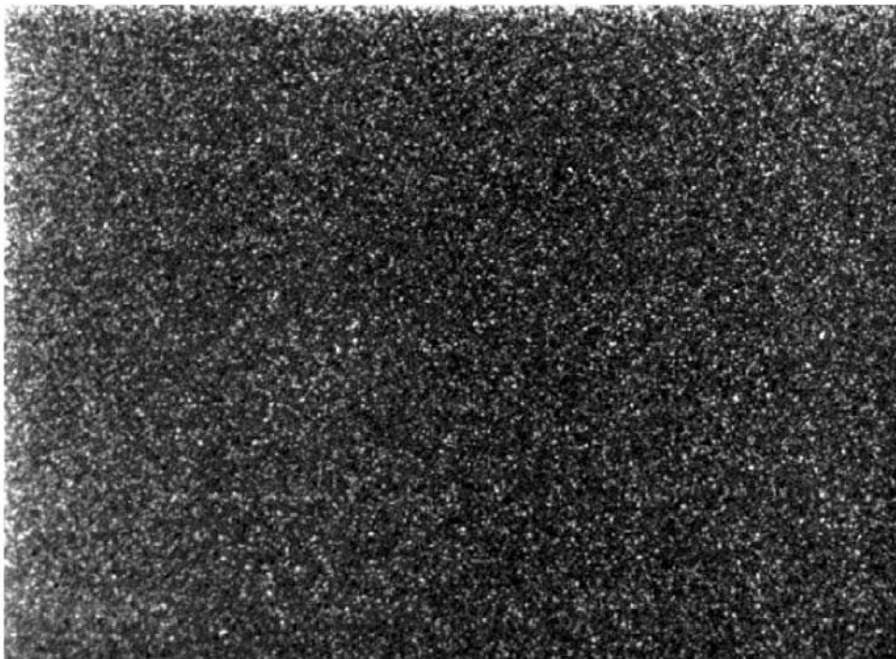


図 7 bias

- 9.1.2 節の b に等しい
- シャッターを閉じて、露出時間 0 で測定する
- いくつかの bias frame を平均してノイズを減らす
- exposure frame から mean bias frame を引く

*¹⁰ 恐らく 5 か 7

*¹¹ 通常 factor で 2 ずつ増やしていく

オーバースキャンを用いるとき

- 実際の CCD サイズに相当するより大目に clock pulse を送る (1024 × 1024 のところを 1034 × 1034 など)
- 実際に CCD が存在しない箇所はバイアスの信号しかない*12
- 通常、median frame が作成され object frame から差し引かれる

ノイズ

- 系が完璧に作動しているとき、bias frame はランダムな読み出しノイズの変動によって支配されている ($R/g[\text{DN}]$)。
- 何らかの避けがたい一定のパターンが生じている場合は 2 つのフレームの差をとる (ノイズは $\sigma = \sqrt{2R/g}$)

その他

- いくつかの CCD では、出力トランジスタへの電流を弱めるか切る必要がある：膨大な電荷が溜まってしまう
- 電荷を放出して安定するまで待つ必要がある
- 近赤外線配列 (infrared array) ではドレイン電圧は最小値に保つ必要がある
- このような事情により、正確に暗電流を測定するには 1 時間ほどかかるかもしれない
- この間に宇宙線やその他の放射性のイベントが生じるかもしれない

9.3 Flat-fielding strategies

- ピクセル間の感度の差を修正することは大事
- ドームの内側を観測するか、ドーム内で白板を観測する → 近すぎて焦点が合わない → flat であることが保証される
- 通常使われるタングステンの光は夜空の光のスペクトルとは程遠い
- "read leaks": 長波長での僅かな漏れ (1%) くらい → その波長帯を追加のフィルターでロックする
- ドーム内を見たときの光の入り方は、空からの光の入り方のそれとは少し異なる
- 暗い天体では空自体を flat-field として用いる
- 明るい天体では空もドームも星特有の色とはよく合わない
- color-dependent な不均一性の影響を減らすため狭い passband を使うのが望ましい

X は測定値、 i, j はピクセルの番号 (row, column)、 I_{FF} は flat-field source の一定値 (electrons)。

$$(X_{ij})_{FF} = \frac{1}{g} \eta_{ij} I_{FF} \quad (12)$$

*12 装置の熱膨張率 (CTE) が”良い”場合

平均をとると

$$S_{FF} = \frac{1}{g} \eta_M I_{FF} \quad (13)$$

実際の観測では

$$X_{ij} = \frac{1}{g} \eta_{ij} I_{ij} \quad (14)$$

η を除去すると

$$\frac{X_{ij}}{(X_{ij})_{FF}} = \frac{I_{ij}}{I_{FF}} \quad (15)$$

となる。よって

$$\frac{X_{ij}}{(X_{ij})_{FF}} S_{FF} = \left(\frac{1}{g} \eta_M \right) I_{ij} \quad (16)$$

左辺 = flat-fielded rescaled image が I_{ij} から与えられる。 η_M/g は既知の光源の観測から求める。

- flat-field もいくつかの平均をとる
- 色 (波長) もなるべく同じ方が良い
- より暗い光源の観測にはより複雑な方法：異なる露光レベルで flat-field を得て、多項式近似でそれぞれのピクセルの反応を決定

drift scan technique

- dome flat 用の光源は secondary mirror support ring に設置/または独立したプロジェクター
- 空よりも暗い光源 → 光子の統計学的誤差より装置の誤差の方が大きい
- 解決法：drift scan technique (Sec.4.1.4) / time delay and integration (TDI) (Sec.7.4.3)
- drift scan は CCD の fixed pattern noise を平均化してシステムエラーを夜空の background level の 1% 未満にする

0.1% に誤差を抑えるには

- 色 (color) が合っていないことが主要因
- いくつかの薄い CCD ではブロックされていない夜空からの輝線のフリッジによる影響
- 頑張れば sky の 0.03% まで誤差を抑えられる

"dithering" technique

- 夜空の一部を観測することを繰り返す
- そのときのポジションはランダムか、単純なパターンで良い (全く同じパターンでやるのはよろしくない)
- 複数の測定を繰り返して処理をした後の値 → sky の値と一致
- 暗い天体が入っていた場合は除外する
- 銀河や星雲といった込み入った天体には使えない → dome flat と sky flat の組み合わせが推奨される

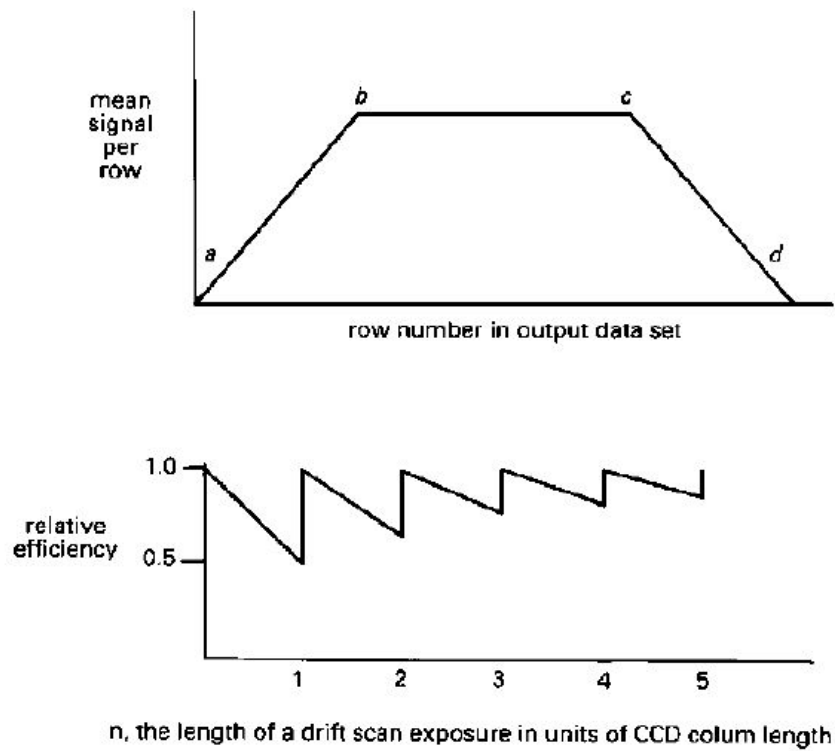


図 8 drift scan

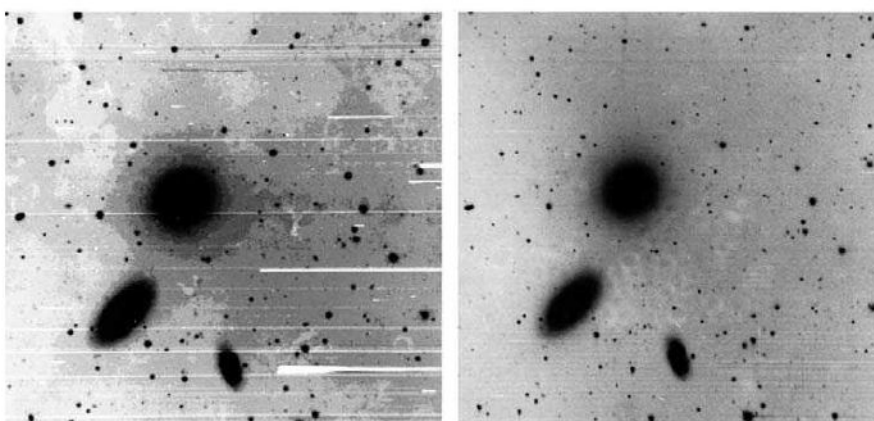


Figure 9.8. (a) A raw CCD image with many defective pixels; (b) same image flattened by using "median sky flats" by shifting the images in a "dither" pattern. Credit: Harold Ables, U.S. Naval Observatory.

図 9 dome flat と sky flat で上手くいった例

規格化

addictive effect(先に取り除く)

- 電子のパターンノイズ (bias effect)
- 電荷のスキミング/トラッピング
- フリンジ
- LED activity

multiplicative effect

- 量子効率
- 光学系/コーティング (被膜) の透過率
- 薄い CCD の厚さの変化

これらの効果をどうやって取り除くか？

subtract bias and bias structure

- 多くの bias frame を平均化する → bias structure image
- exposure image から bias structure image を引き算する
- その他バイアスを全て引き算する

subtract dark

- dark current または low-level light-emitting diode → 長い露光時間では”汚染”が起きる
- (バイアスを差し引いた)dark exposure の”median image”を差し引く
- 仮に露光時間が (天体の測定と dark の測定で) 一致しないときは暗電流 VS 露光時間の測定を行って線形かどうか注意深く確かめる

divide by flat-field

- バイアスの補正、暗電流の差し引き、規格化のされた flat-field の平均で割り算がされる → 量子効率のバラつきが補正される
- master flat field はスカイの星の少ない領域から求められても良い
- 中央値または最頻値はスカイの純粋な値になる

Subtract fringe frame (sky subtraction)

- sky の輝線が影響を及ぼすことがある
- fringe frame(後述:Sec9.4) で除外する (sky subtraction)

Interpolate over bad pixels

- bad pixel map

- two-dimensional displacement/dithering technique
- low-level bad pixel は取り除かれる
- 残った bad pixel は他のフレームの良いデータから持ってくる

remove cosmic-ray events

- computer algorithm か random offset technique によって (median filtering) 通常のランダムな変動の数倍のイベントを除外する

registration of frames and median filtering

- もし random offsetting technique が用いられていた場合、ソフトウェアによって一部のピクセルに対して data frame の re-registration が行われ、イメージがきれいになる。

9.4 Fringes and sky emission

- フリンジの干渉は backside-illuminated thinned CCD で遠赤外線の観測を行った際に生じる
- narrow-band では近赤外線のアレイでも OH の輝線によってフリンジのパターンが生じる
- OH の輝線は激しく変化する

adaptive modal filtering

- 平均値と中央値の値の差を全ピクセルで計算して、逸脱した値を除外する
- 差が一定値以下になるか、最大値が除外されるかしたら^{*13}やめる
- median-filter を行って除外されたピクセルを補う
- 近傍銀河や星雲などの観測には使えないが、sky が 2/3 を占めている場合などは使える

^{*13} a maximum number of values have been rejected

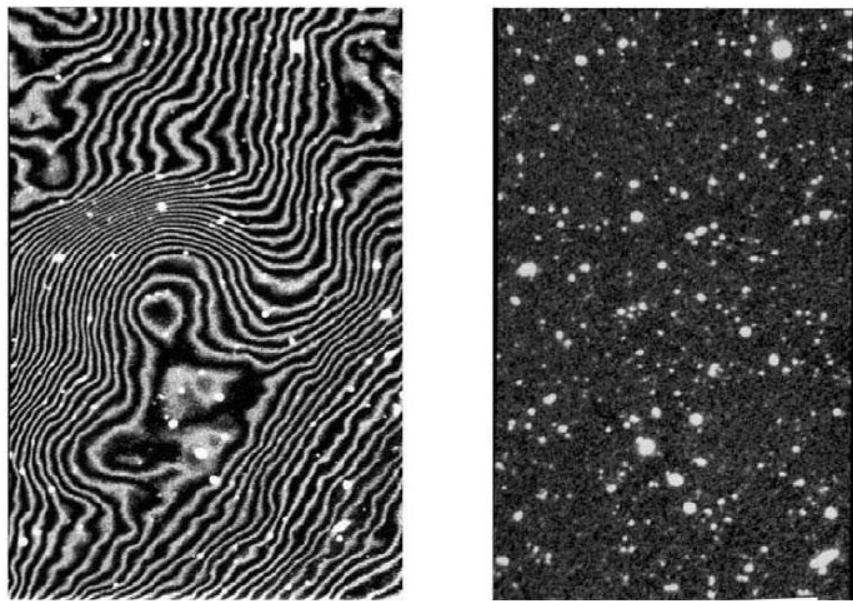


Figure 9.9. (a) A severe fringe pattern due to night-sky emission lines on a deep 4 m telescope exposure with a thinned, back-illuminated CCD. (b) The same field after processing to remove the fringes.

图 10 fringe removal