

McLean ゼミ資料 (pp.315–323)

天文学科 4 年 山口淳平
(学生証番号 05-142009)

2015 年 5 月 27 日

9 Characterization and calibration of array instruments

9.1 FROM PHOTONS TO MICROVOLTS

観測において、観測量は光子数であるが検出するのは小さな電圧を増幅してデジタル化した量である。検出器に到達した光子数が N_p であるとき、検出される電荷の数は ηGN_p となる。ここで η は量子効率、 G はフォトコンダクティブゲイン (検出器固有の増幅率) である。よって、検出器の出力ピンでの電圧は

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

となる。 e は素電荷、 C は静電容量、 A_{SF} は出力アンプ (ソースフォロワ回路) のゲインである。以下、 A_{SF} 、 η 、 C の値を得る方法を述べる。

9.1.1 Quantum efficiency and DQE

量子効率 η は実験室で適切に設計された光学系を用いて測定される。光源としては白熱球か分光器による単色光が用いられ、積分球に光を通すことで一様な光とする。長波長では黒体炉が用いられ、この場合は積分球は必要ない。この光を鏡を用いて、検出器と校正用フォトダイオードにそれぞれ入射させて測定を行う。この装置を用いることで相対的な量子効率の波長依存性を得ることができ、絶対量子効率を計算するにはは光の強度の正確な校正や波長に対するフィルター透過率を正確に得る必要がある。

量子効率は短波長、長波長側でそれぞれ急激に減少する。短波長では光子が空乏層のはるか手前で吸収されてしまうため、長波長では光子のエネルギーが低いために吸収確率が低くなるためである。

A_{SF} は回路での測定によって得られる。電気容量 C は、主なノイズ源がポアソンノイズに従う程度に十分な光を検出器に入射させ N 個の電荷を検出したとき、測定した電圧が $V = eN/C$ と書け、ノイズが $\sigma_V = e\sqrt{N}/C$ と書けることから、

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

となることで、平均の電圧測定値 V と分散 σ_V^2 から計算できる。

読み出しノイズのある検出器では、検出量子効率 (DQE) を考えるのが良い。DQE は、対象の検出器と同じ S/N 比を持つが、読み出しノイズを持たない理想的な検出器の量子効率として与えられる。読み出しノイズのある検出器では、量子効率 η 、光子数 N_p 、読み出しノイズの RMSR に対して

$$\frac{S}{N} = \frac{\eta N_p}{\sqrt{\eta N_p + R^2}} \quad (3)$$

となる。理想的な検出器では量子効率 η' に対して $S/N = \sqrt{\eta N_p}$ であるため

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

より、DQE は

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

となる。この表式より DQE は常に量子効率より低い事がわかる。

9.1.2 Photon transfer function

CCD に実際に蓄積される信号はデータ数 (カウント)DN や Analog to Digital Unit (ADU) と呼ばれる。DN と CCD の出力電圧の関係はアンプの増幅率に依存し、電圧と CCD に溜まった電子の関係を得るには静電容量を得る必要がある。実際の DN と CCD 上の電荷の関係は次の式で表される。

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

S はカウント数、 N_e は検出した光子による電子の数、 N_d は暗電流ノイズによる電荷の数である。 g は CCD のゲインであり、何個の電子をまとめて 1 カウントとするかを表す量である。 b はバイアスと呼ばれ、CCD の読み出しノイズの 10–100 倍のカウントを予めカウントに上乘せしておくことでカウントが負にならないようにするためのものである。バイアスと暗電流ノイズは光を当てずに撮影したフレームを用意することで差し引くことができる。

ゲイン g を得るには 2 つの方法がある。1 つはアンプの増幅率や静電容量をすべて得て計算する方法であり、もう 1 つは一樣な光を強度を変えて照射して複数回測定する方法である。それぞれについて以下に述べる。

まずは計算により得る方法である。 V_{fs} を A/D 変換における最大の電圧振幅とし、 n を変換でのビット数とする。このとき、1DN に相当する電圧は $V_{fs}/2^n$ となる。また全体の増幅率を A_g とすると、電圧をこの値で割ることで CCD 上の 1 カウントに対応する電圧が得られる。また、CCD の 1 カウントに対応する電圧は ge/C とも表されるので、

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

よりゲインは

$$g = \frac{V_{fs} C}{2^n A_g e} \quad (8)$$

となる。 g が小さすぎると強い信号があったときにサチュレーションを起こしてしまい、 g が大きすぎると変換の際の誤差 (量子化誤差) が強くなるので g は適切に設定する必要がある。大雑把には、 g を読み出しノイズの 0.25–0.5 倍の [電子数/DN] とするのが良い。

次に測定により得る方法である。これには 2 つの方法が存在するが、よく用いられているのは、個々のピクセルの感度の違いを取り除くためにフラット処理を施した後に、わずかに露光をして CCD の一部分のピクセルの平均のカウントを測る方法である。

個々のピクセルのカウントを X_i 、ダーク、バイアス引きをしたあとの平均のカウントを S_M 、分散 (不偏標本分散) を V_M とすると

$$S_M = \frac{1}{n} \sum X_i, \quad V_M = \frac{\sum (X_i - S_M)^2}{n - 1} \quad (9)$$

となる。測定におけるノイズ源は 2 つ存在する。

1. 光子を電子に変換するときのノイズ p
2. CCD の出力増幅器での読み出しノイズ R

2 つのノイズ源は独立なので、ノイズの量は足し合わせることで

$$(\text{noise})^2 = p^2 + R^2 \quad (10)$$

となる。この式の単位は電子数であるため、カウントに変換すると

$$\left(\frac{\text{noise}}{g}\right)^2 = \left(\frac{p}{g}\right)^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2 \quad (11)$$

となる。この式の左辺は V_M に一致し、また p がポアソン分布に従うとすると $p^2 = gS_M$ であるため

$$V_M = \frac{1}{g}S_M + \left(\frac{R}{g}\right)^2 \quad (12)$$

となる。この結果より、光の強度を変えて測定を行い、 S_M を x 軸、 V_M を y 軸にとってプロットするとプロット点は直線となり、傾きから $1/g$ 、 y 切片から $(R/g)^2$ を得られる。これによって g 、 R を得る方法を variance method または photon transfer method という。CCD のカウント数が非常に大きくなるとサチュレーションを起こし、どのピクセルもほぼ同じ値を取るようになるため、分散の値は小さくなって直線の関係は崩れる。