

なゆた可視分光器 MALLS 検出器の特性

松田 健太郎、鳴沢 真也、内藤 博之

兵庫県立西はりま天文台

The characteristics of the detector for MALLS, the optical spectrograph for NAYUTA Telescope

Kentaro MATSUDA, Shin-ya NARUSAWA, and Hiroyuki NAITO

Nishi-Harima Astronomical Observatory, Sayo, Hyogo, 679-5313, Japan

E-mail: matsuda@nhao.go.jp

(Received)

概要

2006 年秋に、なゆた望遠鏡可視分光装置 MALLS の検出器の修理を行った。修理後の検出器を観測に使用するにあたって我々は、冷却時間、バイアスの安定性、線形性、読み出し雑音の調査を行った。検出器の冷却は、液体窒素注入開始からの時間に対してダーク画像における熱雑音の大きさを調査し、注入開始からおよそ 30 分で十分な低温が得られることがわかった。バイアスの安定性は、器械フラット画像を用いて、入射光の照射量が最も少ないと思われる領域及びオーバースキャン領域について、CCD のカウント値の時間変化を調べた。結果、CCD の物理的な実領域では一見光が当たっていないようでも散乱光の影響でカウントが高くなりバイアスと見なすことは出来ないこと、バイアスの値は数 10 分の間にも読み出し雑音レベルを上回る変動を示すことがあり、安定しているとは言えないことが確認された。線形性については、検出器露出時間を変えた発光ダイオード像を複数枚取得して、そのカウント値が時間に比例するかどうかを調べた。結果としては、露出時間が 2 秒以下では線形から有意にカウント値が高くなる方向へずれること、露出時間 4 秒以上ではサチュレーションを起こす直前までまずまずの線形性が得られていることがわかった。読み出し雑音はバイアスレベルのばらつきとゲインから $10.8 e^-$ と見積もられた。

Abstract

In the autumn of 2006, we repaired the detector of MALLS, which is the optical spectrograph attached to the NAYUTA telescope. We examined some characteristics of the detector such as the characteristic of cooling, the stability of BIAS, linearity and read-out noise. We measured the dark counts of CCD images, consecutively obtained after the beginning of the injection of liquid nitrogen, to know the characteristic of the cooling. We found that it takes 30 minutes to make the dewer cold enough. We checked the time variation of the counts in the background and overscan region of CCD images. In the background region, counts are higher than those in the overscan region. Therefore, the background region is affected by photons of the scattered light, and we can't regard them as the bias levels. On the other hand, we found that counts in the overscan region largely varied with the time. The bias level of the detector is not steady. To examine the linearity of the detector, we obtained many images of the light emitting diode with various exposure times. And we checked the correlation between the exposure times and counts in ADU. In the case of the short time exposure, the exposure time is shorter than 2 seconds, counts systematically shifted from linear, they increased from the predicted values. If we set the exposure time longer than 4 seconds, the correlation shows so-so good linearity up to the 50000 ADU. And, the read-out noise of the detector can be estimated at 10.8 electrons from the standard deviation of the bias level and the gain of the CCD.

Key words: NAYUTA Telescope — Spectrograph — CCD Camera

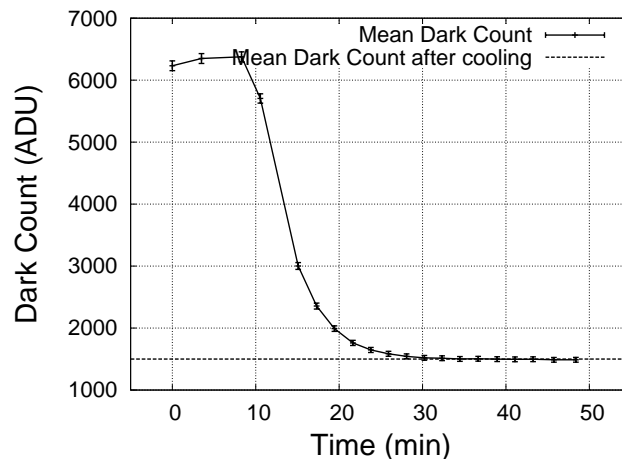


Fig. 1. 液体窒素注入開始からの経過時間と検出器のダークカウントの関係。液体窒素注入開始からおよそ 30 分で暗電流が十分に抑えられることがわかる。

1. はじめに

なゆた望遠鏡ナスミス焦点には、低分散及び中分散のロングスリット分光を行える可視光分光装置 MALLS (Medium And Low-dispersion Longslit Spectrograph) が備え付けられている。

2006 年 10 月、同分光器の検出器に故障が発生したため、検出器の修理を行った。修理後、実際の科学的観測に MALLS を使用するに際して、把握しておくべき検出器の特性を確認するため、(1) 液体窒素による検出器デューワー冷却、(2) 検出器のバイアスレベルの時間による変動、(3) 予想される入射光子数に対する検出される光子数の線形からのずれ、(4) 検出器の読み出し雑音がどの程度低く抑えられているか、の 4 つの特性に関する試験を行った。(1) の冷却特性は、観測の効率を向上させる為、(2) のバイアス安定性、(4) の読み出し雑音は観測によって得たデータの精度を保つ為、(3) の線形性はその両方に関して重要な情報となる。

以下、2. 節では検出器デューワーの冷却特性、3. 節ではバイアス安定性、4. 節では線形性、5. 節では読み出し雑音について、行った試験の具体的内容と結果、そこから示唆される検出器使用上の注意について述べる。

2. 冷却の時間特性

MALLS では検出器に窒素冷却 CCD を採用している。この窒素冷却 CCD は、1 回の窒素充填でおよそ 1 観測夜しか十分な低温を保っていることはできず、毎観測日、観測開始前に窒素を充填する必要がある。従って、窒素注入からどの程度の時間が経てば熱雑音が充分抑えられる程度までデューワーが冷却されるかを把握することは、効率の良い観測を実施する上で大切な要素である。

そこで我々は、窒素注入開始からどの程度時間が経過すれば、デューワーが充分冷却されるかを知るための調査を行った。窒素の注入を開始してからの経過時間を計測し、ある程度の時間が経過する毎に光一切を照射せずに検出器を 30 秒露出して、ダーク画像を取得する。得られたダーク画像の素子実体部分のカウント値がほぼ暗電流によるものと考え、そのカウント値が下げ止まった所でデューワーが充分に冷えた状態に達したものと仮定し、その状態に至るまでの時間を求めた。

Fig. 1 はその測定結果を図示したものである。x 軸が液体窒素注入開始時刻を原点とした経過時間を分単位で表したものの、y 軸がある時間において測定した検出器の暗電流+バイアス由来のカウント値である。測定結果によるデータ点に加え、デューワーが充分冷えた後と考えられる経過時間におけるカウント値の平均を y 一定の直線として併記した。

この測定結果から、液体窒素注入開始から 30 分が経過すると、暗電流による CCD カウントがこれ以上は下がらない程低い値にほぼ到達することがわかる。30 分という数字は即ち、液体窒素を一杯まで注入し、更

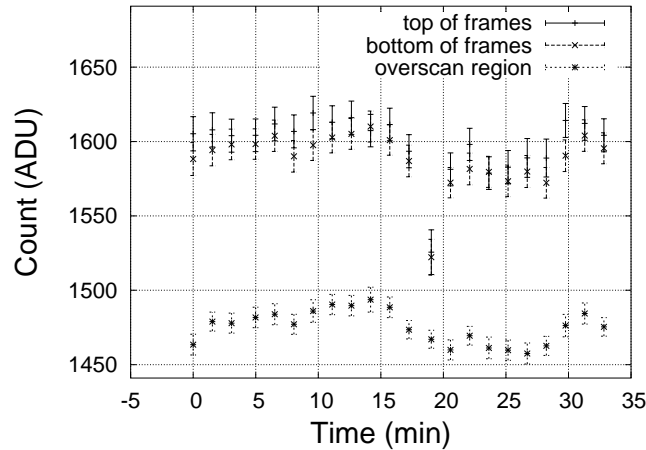


Fig. 2. CCD 実体領域の背景部分とオーバースキャン領域でのカウント値推移の比較。両者の間には 100ADU 以上の差があり、実体部分では光路外の領域でも明らかに光を感知している。

に望遠鏡、分光器のその他の部分についての観測準備に要する時間を考えれば、観測準備完了から然程時間を置くことなくして、科学的データ取得に足る環境が、少なくとも CCD 冷却の観点では、得られることを意味する。

3. バイアスの安定性

バイアスは、ポテンシャルの井戸を作り CCD 上の素子に電荷を蓄積するために素子にかかる電圧であり、バイアス電圧をかけることにより、得られる画像のカウント値はかさ上げされる。従って、観測される光の正味の強さを知るにはデータ処理の段階でかさ上げされた分のバイアスを差し引く必要があり、バイアスレベルを正しく見積もることは、精度の高いデータを得る為に必要不可欠となる。

そこで、CCD 画像をある程度の時間にわたって繰り返し繰り返し取得し、それによって得られた多数枚の画像においてバイアスと見なせる値が、どの程度の誤差を伴い、どの程度時間に対して安定しているかの調査を行った。調査の為にデータとしては、30 秒露出を行って得る器械フラット画像を使用した。

まず、素子実体部分で入射光の影響が最も小さいと思われる領域の平均カウント値を求め、実体の無いオーバースキャン領域の平均カウント値と比較を行い、バイアスとして見なすことができるカウント値をどこから採れば良いかを定める。そして、バイアスと見なす領域を決めたら、その場所でのカウント平均値を求める。この時、カウント値の標準偏差は読み出し雑音に相当する。求めた平均値は複数枚取得した画像の間で比較し、時間の経過に対してバイアスレベルがどの程度揺らぐかを確認する。

Fig. 2 は、取得した複数枚のフラット画像における、スリット範囲外の領域とオーバースキャン領域でのカウント値の推移を示したものである。両者のカウント値は明らかに異なり、一見光が当たっていないように見える背景でも装置内の光散乱などの影響を受けている。従って、バイアスの差し引きを行う際にバイアス値を見積もるにはオーバースキャン領域を用いなければならない。

オーバースキャン領域を用いたバイアス値推定についてもう少し詳しく見てゆく。Fig. 3 はオーバースキャン領域でのカウント平均値を、複数枚取得した画像について時間による推移として表したものである。読み出し雑音による誤差を誤差棒として併せて表示したが、その誤差を大きく上回る変動を僅か数十分の内に示していることがわかる。Fig. 2 における背景光とバイアスの時間変化の相似性からも見てとれるように、背景のカウント値の不安定性はそのままバイアス不安定性に由来するものと考えられ、このバイアス不安定性を加味してバイアス差し引きを行わなければならない。ただし、バイアス差し引きの方法としては、各画像においてオーバースキャン領域から個別に決めるのが主流であり、丁寧に処理していればこのバイアス不安定性はデータ整約の上でさしたる障害にはならない。

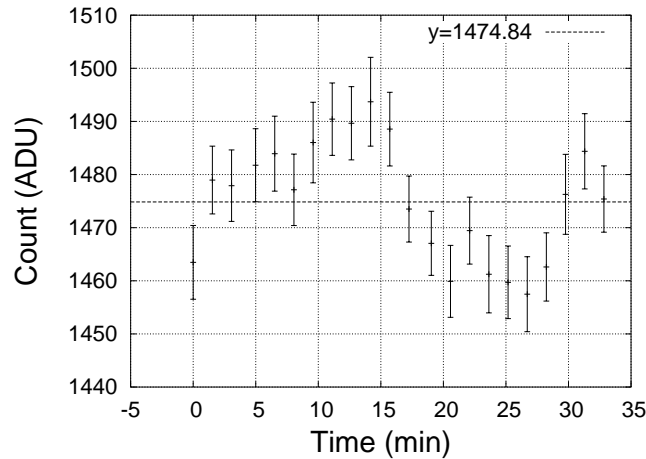


Fig. 3. オーバースキャン領域においてカウント値の平均から決めたバイアス値の時間による推移。y一定の直線は全体の平均値を採用して引いている。誤差棒は読み出し雑音に相当。時間によるバイアス平均値の変化は読み出し雑音による誤差を上回る。

また、オーバースキャン領域は CCD 実体部分の左右両側に設けられているが、その左側のオーバースキャン領域ではカウントに奇妙なパターンが乗っている為に現状バイアスの決定には用いられていない。ここで、そのパターンが収束し、ほぼバイアスに等しくなったと見なせる数カラムの領域でのカウント値を右側のオーバースキャン領域でのカウント値と比較してみる (Fig. 4) と、両者のカウント値には殆ど差が無いことがわかる。このことから、MALS 検出器のバイアスのパターンには画像の行方向 (x 軸方向) に変な傾斜が無いことがわかり、右側のオーバースキャン領域から決めたバイアス値でバイアス差し引きを行って問題無いと判断出来る。

4. 線形性

CCD は理想的には照射された光子の数に比例した電荷を蓄積し、それがそのまま、読み出して得られた画像のカウント値に反映されるはずである。照射された光子の数は、充分多ければ照射時間に比例し、結果として照射時間と画像のカウントが比例することが期待される。しかし、照射される光子が少ない場合誤差や各素子の特性の違いによって比例関係からずれることがある。また、光子を多く照射しすぎると、蓄積した電荷がポテンシャルの井戸から溢れ出し、照射された光子数を正しく反映しない数値が読み出されることになる。このような事態になると、画像を取得してもデータの精度が悪く使い物にならない。従って、どの程度のカウント値であれば線形性が維持されるかをあらかじめ把握しておき、カウント値がその範囲に収まるように観測を行わなければならない。

そこで我々は、CCD の線形性を調査すべく実験を行った。具体的な方法としては、検出器チップ上に焦点を結ばせるカメラレンズの直前に発光ダイオードを設置し、それを低電圧直流電源で発光させ、CCD の露光時間を変えて複数の画像を取得、露光時間と CCD のカウント値との相関関係を求めた。

Fig. 5 はそうして求めた露光時間とカウント値の相関である。点を線で結んだものが測定データ、それに対して線形性の関数を仮定してフィッティングを行った結果を併せて表示した。フィッティングに用いた線形性を表す関数は

$$S = a \cdot t^\gamma$$

を仮定している。S はカウント値 (ADU 単位)、a は入射光の強度に関する係数、 γ は線形性からのずれの度合いを示す指数で、露出時間と得られるカウント値の関係が完全に線形であれば $\gamma = 1$ となる。

フィッティングの結果 γ は 0.988 となった。素性の良い CCD であれば γ の 1 からのずれは概ね 0.5% 以内に収まるもので、線形性が非常に良いとは言えない。また、露出時間の短い画像ではフィッティングからの

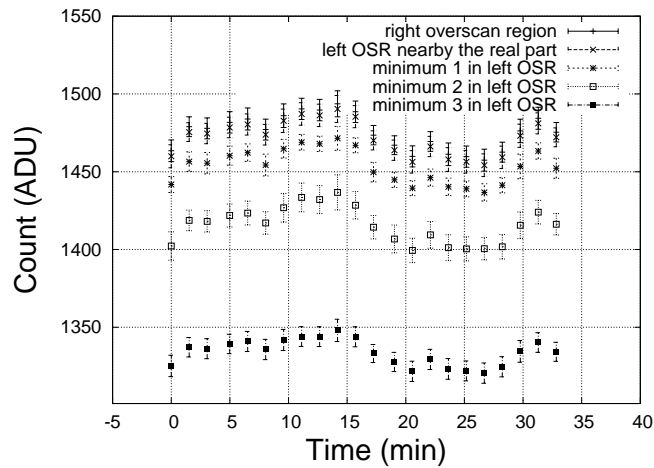


Fig. 4. 左側と右側のオーバースキャン領域でのカウント値の比較。極小部分でカウント平均値を導出しているため、奇妙なパターンの影響で右側のオーバースキャン領域から求めたバイアス値より低い値が出ているが、パターンが取束すると右側のバイアス値と殆ど変わらない値となる。

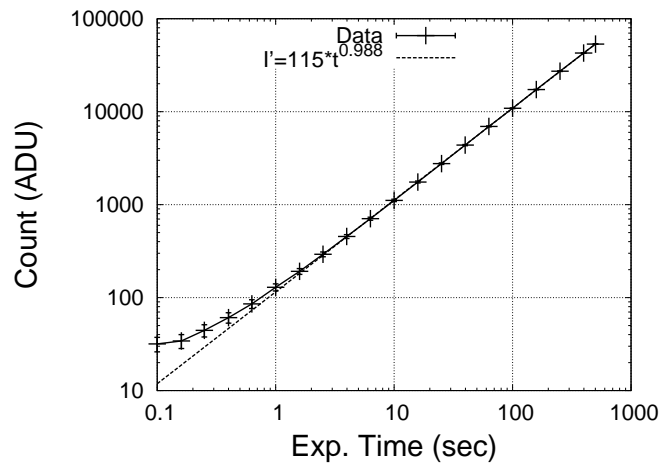


Fig. 5. 指定した検出器露出時間と得られたカウント値の関係。x 軸、y 軸ともに対数スケールで表示している。点は測定して得られたデータ、曲線は線形性を表す関数を仮定してフィッティングした結果を表す。この場合、線形性からのずれを表す指数 γ は 0.988 と求まった。

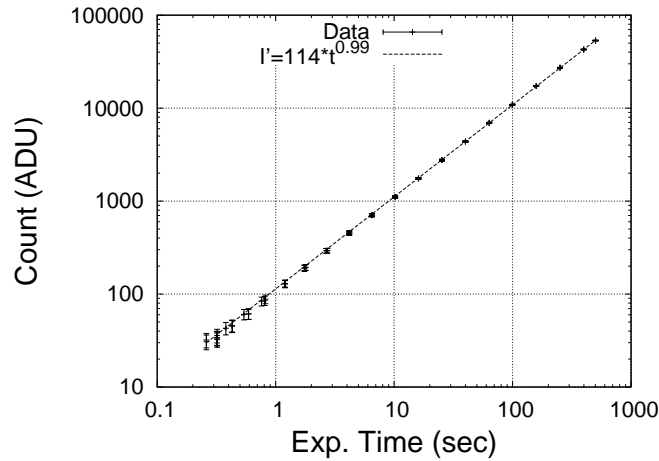


Fig. 6. 露出時間として FITS 画像ファイルのヘッダに記録された露出開始時刻と露出終了時刻の差を採用し、カウント値との関係を示した。Fig. 5 と比べ露出時間の短い画像についても、ある程度線形に近い関係が得られた。Fig. 5 同様に線形性を示す関数によるフィッティングで γ を求めたところ、 $\gamma = 0.990$ となった。

ずれが大きい。この短時間露出における線形からのずれの原因としては、カメラシャッター開閉機構の動作の特性が考えられる。それは、観測者が設定した露出時間に対し、シャッターが開き、また閉じるまでの実際の露出時間が系統的にずれるのではないかと、いうことである。それならば、短い露出時間では設定した露出時間とずれを含んだ実際の露出時間との相対的な差が大きくなり、無作為ではない誤差も考え易くなる。

別のアプローチでこの点について調査を試みる。MALLS 検出器で取得される FITS 画像は、ファイルのヘッダに露出開始時刻と露出終了時刻が記録される。両者の差が実際に CCD に光が照射されていた時間であると仮定し、観測時に指定した露出時間ではなく FITS ヘッダの記録から求めた露出時間を x 軸に採って再度プロットしたのが Fig. 6 である。

Fig. 5 と比較すると、関数フィッティングの結果が $\gamma = 0.990$ と僅かながら改善された上、積分時間が短い画像でもフィッティング結果により合致する結果となった。このことは、Fig. 5 の短時間露出画像における線形からの大きなずれが、観測者が指定した露出時間と実際に光が照射された実露出時間との差によるものであることを示す一つの証拠と考えられる。

そこで今度は、検出器制御ソフトウェアに命令した露出時間と、実際の露出時間の差がどの程度のものか、線形性試験で取得したデータから見積もりを行った。見積もりの方法としては、露出時間の差を $\delta(x, y)$ と表すことにして、以下の様に定義した $r(x, y)$ を求める。 (x, y) は CCD 画像上での位置を示す座標を表す。

$$r(x, y) = \frac{t\{1 + \delta(x, y)\}}{t + \delta(x, y)}$$

ここで $t[\text{sec}]$ は観測者が設定した露出時間である。この $r(x, y)$ は、1 秒露出によって得た画像のカウント値を t 倍したもの (分子) を、 t 秒露出した画像のカウント値 (分母) で割り算すれば、簡単に導出することが出来る。この $r(x, y)$ が求まったら、そこから逆に以下の式によって $\delta(x, y)$ を計算する。

$$\delta(x, y) = \frac{t\{r(x, y) - 1\}}{t - r(x, y)}$$

こうして設定した露出時間と実際の露出時間の差 $\delta(x, y)$ 秒を見積もることが出来る。

今回は、露出時間 10 秒の画像と 1 秒の画像から $\delta(x, y)$ を求めた。その結果、 $\delta(x, y) \simeq +0.18$ と求まり、CCD 制御ソフトウェアで設定した露出時間に比べ、平均して 0.18 秒長い時間露光されていることがわかった。シャッターの開閉動作そのものにかかる時間の差によって、同じ画像の上でも当然 δ に差が出てくるが、これはせいぜい 0.03–0.04 秒であり、それ以上のずれは検出器シャッターの動作アルゴリズムによる余計な露

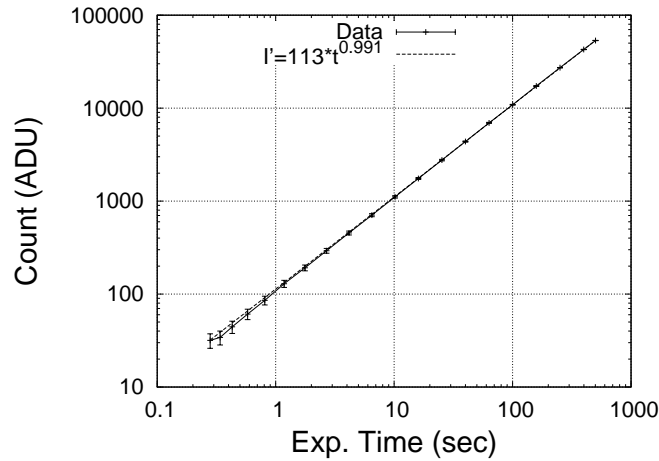


Fig. 7. 露出時間の設定値と実際のずれを補正して、露出時間とカウント値の関係をプロットした。露出時間が2秒以下ではやはり線形性からのずれが生じる。

出時間である。この $\delta \simeq 0.18$ 秒を補正した上でデータと線形性関係との比較を行うと Fig. 7 のようになる。Fig. 6 では Fig. 5 とは逆方向に線形性からずれ、しかも露出時間数秒の付近では Fig. 5 と比べても寧ろずれが目立っていたが、それらについては改善された。しかしこの場合でも、露出時間が2秒以下になると、全体の線形傾向からのずれが生じる。結局短時間露出の画像におけるこの線形性からのずれは、上述の試験で扱ったような簡単な原理に基づいた手法で十分に補正出来るような単純なものではなさそうである。やはり、短い露出時間では線形性に不安があるとして、科学的観測を行う際にはそれなりの露出時間を確保することが必要と考えられる。

5. ゲインと読み出し雑音

観測によるデータ取得にあたってもう一つ重要なのは、検出器の読み出し雑音である。これが大きいと、低いカウント値の画像を多数枚取得しても S/N 比の改善に容易に繋がらず、観測計画に影響を及ぼすことになる。読み出し雑音を調べるのによく用いられる方法としては、オーバースキャン領域のカウント値のばらつきをみるというものがある。MALLS 検出器の場合について、3. 節で扱ったデータからオーバースキャン領域のカウント値のばらつきの平均を求めると、 $\bar{\sigma}_{ADU} = 6.87ADU$ となった。

CCD では読み出し雑音は電子換算で表記されることが多い。この $\bar{\sigma}_{ADU}$ を電子数に換算するにはゲインの数値が必要になる。ゲインは、カウント値-分散関係を用いて観測から見積もることが出来る。Fig. 8 は、4. 節で扱った発光ダイオード照射画像から MALLS 検出器のカウント値-分散関係を求め、プロットしたものである。このカウント値と分散が比例するものと仮定するとその比例係数がゲインに相当する。単位は ADU/e^- である。

Fig. 8 から求められるゲインは $0.634 ADU/e^-$ となり、変換係数は $1.58 e^-/ADU$ となる。

この変換係数を先に求めた読み出し雑音 $\bar{\sigma}_{ADU}$ に適用する。カウント値のばらつきは $\bar{\sigma}_{ADU} = 6.87ADU$ であったから、変換係数をかけて $\bar{\sigma}_{e^-} = 10.8 e^-$ である。読み出し雑音が低く抑えられている良質の CCD は概ね数 e^- から $< 10 e^-$ であり、MALLS 検出器はそれには及ばないまでも、読み出し雑音はますます低い状態を得ることが出来ている。必要とする S/N 比を得る為の限界等級、装置設定、露出時間や画像取得枚数など観測計画を綿密に立てる場合にはこの数字を考慮に入れるべきである。特に @site プログラムの応募などにあたっては参考にされたい。

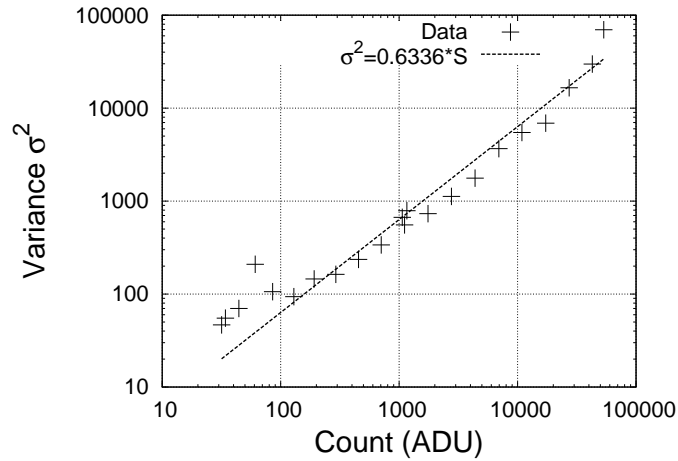


Fig. 8. カウント値-分散関係。直線は両者の比例を仮定してデータ点からフィッティングを行った結果である。この直線の比例係数が検出器のゲインを表す。

6. まとめ

我々は、なゆた望遠鏡の可視分光器 MALLS の検出器の基本的な特性について調べるべくいくつかの実験を行い、その特性を確認した。その結果、(1) 検出器デューワーは液体窒素注入から約 30 分で十分に冷却される、(2) バイアスの数値は時間に対して不安定であるが、各フレームにおいて個別にバイアスを求めれば問題ない、(3) 線形性は、短い露出時間では信頼性に欠けるため少なくとも数秒の露出時間をとるべきであるが、高いカウント値領域ではサチュレーションを起こす手前まで比較的良好である、(4) ゲインは 0.634 ADU/e^- と推定され、ゲインの値とバイアスレベルのばらつきから導かれる読み出し雑音は $\sigma_{e^-} = 10.8 \text{ e}^-$ である、以上のことがわかった。これらを総合すると MALLS の検出器は、何点か注意しなければならない点があるが、科学的観測を実施することについては概ね条件をクリア出来ている、とすることが出来る。

今後は、線形性の保証される領域を露出時間、カウント値の両面からもう少し詳細に詰める実験を行う予定である。今回の実験では数 100ADU 以下は全て露出時間が短いため線形からずれを示すことになったが、十分な露出時間をとった場合に下限として何 ADU まで線形性が保証出来るかは、特に淡い天体を観測するにあたっては気になる部分である。また、今回実施したような性能確認試験は今後も MALLS による観測結果を信頼出来るものにするために、定期的に行ってゆくべきと考える。