

# “DARSS” とその基礎特性

—自己掃引型光ダイオード・アレイを使った撮像装置—

石 井 久 司\*

## 半導体検出器、天文学に登場

光学領域に於ける天文学の観測的研究は、今日迄、写真術と光電測光技術によって支えられてきたと言つても良いだろう。写真は 2 次元的像を同時に記録でき、その分解能も乳剤粒子に応じて高い。短所は、絶対感度が低くダイナミック・レンジも狭いこと、波長域がかなり制限されることなどで、またスペースで使う場合には回収したり現像したりしなければならないことも難点の一つとなる。一方光電管類は、高感度でダイナミック・レンジも広く、波長域を選択する余地がかなりあって、また遠隔測定も可能である。しかし、1 回では像やスペクトルの 1 点分に対応する情報しか得られず、この点写真にはるかに劣る。

以上の様に、写真と光電管とは対照的特徴を持っており、当然のことながらこの両者の長を合わせて短を補う工夫もまた行なわれてきた。例えば多くの光電管を並べた測光装置などがその一つであるが、そうした努力の方向での究極的可能性を持って登場してきたものが種々の電子結像装置、またその中心的存在としての半導体光検出器である。半導体自身の歴史はかなり古いが、天体観測用検出器として取り上げられたのはここ 10 年位のようである。この間アメリカを中心にして実用化へ向けていろいろのテストが試みられ、観測の論文もまた発表されてきている。一方我が国の天文学でも半導体検出器の活躍している装置は幾つかあるが、光学領域での天体観測用検出器として直接利用しようという動きが出てきたのは極く最近のことである。その一翼を担うべく、この手の装置には群盲の我々（筆者、それに助手の田村眞一氏、大学院研究生の有本信雄氏、大学院生の谷口義明氏、柴田克典氏）が何とかものにしようと恐る恐る能力テストを行なってきたのが “DARSS” なる装置である。正式の名を米国 Tracor Northern 社製の Diode Array Rapid Scan Spectrometer、一台でも略して “ダース” と言う。このシステムに使われている半導体検出器の商品名がレチコン (Reticon)。このレチコンは、同じ固体撮像装置でもビジコンや SIT カメラなどが電子ビーム走査によって素子に蓄積された電荷を読み出してくるのと違って、多くの撮像素子に相当するものを含む一片のシリコン板中に読み出し回路も組まれている検出器であり、

また同類の固体配列撮像板である CCD、BBD や CID とも違つて特に読み出しのための FET スイッチとビデオ・ラインとが備えられている。これだけでも多少おわかりのことと思うが、どうもこの世界もいろいろと略号をつけることを好むようで、アルファベット 3、4 文字との格闘もまた我々の戦いの一部である。それぞれ特徴があつて略称の便利は確かであるが、知識や言葉の独占化に加担する危険を感じないでもない。

## “ダース” についてもう少し

DARSS の様子を信号の捕えられる経路に沿つてもう少し説明しておく。分光器の焦点面に置かれる検出器が今述べたレチコンであり、現在手にしているのはそのモデル RL 512 EC/17 というものである。このモデルは、1 素子縦  $500 \mu$ 、横  $50 \mu$  に相当する光ダイオードが横一列に 512 素子分並んで全長約 25 mm となっている。逆バイアスされた各ダイオード兼コンデンサーに電荷の形で蓄えられた信号は、事前に設定された積分時間の後に順次ビデオ・ラインに読み出され、プリ・アンプ、アンプを経て 12 ビット A/D 変換器によってデジタル量におされる。このデジタル変換された信号は、データ・メモリーの各素子に対応する場所にしまわれた後、解析装置の CRT 画面上に、横軸が素子位置、縦軸がカウントの形で表示される。装置では、1 回の積分時間と掃引の回数等の設定が可能である。また、データを処理するための幾つかの演算機能（加算、減算、平滑化、積分、微分等）があり、CRT の種々の制御等も行なえる。他にデータ記録のための周辺機器として、今のところテレタイプとカセット・テープレコーダーとを備えてある。

装置の概要はこの位に留め、以下ではこの間群盲の撫でたり叩いたりして少しづつ得られてきた “ダース” システムの諸特性について紹介する。種々の実験は、室温及びドライアイス冷却による低温環境下で行なわれた。

## 暗電流

信号を受けていない場合にも検出器の温度に応じて熱的に励起された自由電子が存在するためある程度の電流を生ずる。これが暗電流として検出されるものであり、受光している信号に対する背景として現われてくる邪魔物である。これがどうしても現われてしまう場合には適当に引き去る他はないが、こんな物はないにこしたことない。

\* 東北大・理 Hisashi Ishii: The DARSS System and its Basic Properties

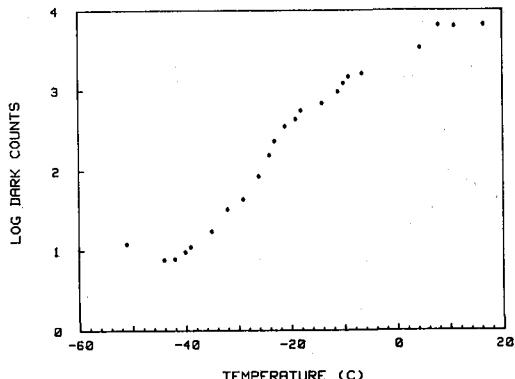


図 1 暗電流の温度に伴う変化。この実験は、1回の積分時間約6秒を10回繰り返して計60秒積分で得たものである。

#### —その温度依存性—

半導体素子の最大の特徴の一つは温度に敏感なことであるが、この暗電流も温度依存性が激しく、低温になると程小さくなる。この様子を示したもののが図1である。温度範囲  $-51^{\circ}\text{C}$  から  $+16.5^{\circ}\text{C}$  に亘って得た結果は、ほぼ対数的とも言えそうな暗電流の急激な増加を示している。温度測定の不確かさのために、横軸には2~3度の誤差があり得る。低温での変化率が鈍っているように見えるのは、有限の最小カウントが1であることと、図が各素子の平均をとったものであることによる。また、このカウントは、1回6秒の積分を10回行なった計60秒積分の結果であり、この場合には $-40^{\circ}\text{C}$ 程度で暗電流は約10カウント、つまり0.2カウント/秒以下に抑えられていることになる。12ビットA/D変換器では1回の掃引で4096カウント迄のA/D変換が可能だから、今の条件では単純に計算して約5時間半位迄かけてなお信号のカウントされる余地がある。従って微弱光の検出には有利となり、光の強い場合なら短時間積分では暗電流を無視し得ることもあるという利点もある。これが例えれば $0^{\circ}\text{C}$ 位だと暗電流は約40カウント/秒にもなり、2分も経たぬうちにカウントは暗電流分だけで一杯という具合である。

#### —その積分時間依存性—

以上の勘定はしかし余りに単純である。温度に伴う平均的振舞とは別に、温度を一定とした場合にも暗電流は積分時間に比例して増加するわけではない。従って単位時間あたりのカウントもまた時々刻々と変化する。この辺の事情を示すのが図2である。この結果は $+6.5^{\circ}\text{C}$ でのものである。図から明らかのように、暗電流は積分時間の短いうちはその増加率が時間とともに変化していく、次にはほぼ一定となり、A/D変換の最大カウントに近くなってくるとまた増加率は落ちてカウントは飽和現象の様相を呈してくる。カウントを積分時間でわった1秒

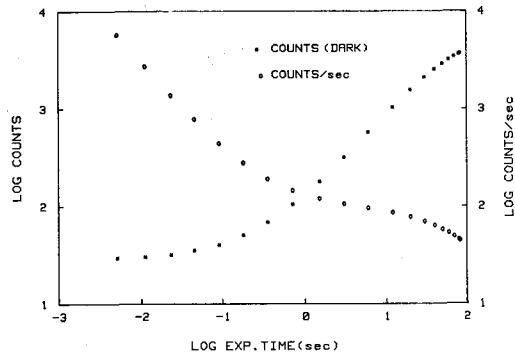


図 2 暗電流及びその単位時間あたりのカウントの積分時間に伴う変化。\*が暗電流カウントを、○がそれを積分時間でわった結果を示す。実験は $+6.5^{\circ}\text{C}$ で行なわれた。

あたりの暗電流は、カウント自身の変化とは全く対照的な傾向を示すことになる。今の温度では、1秒から10秒の積分時間でみる限りでは、暗電流はほぼ100カウント/秒あたりにおさまっているが、観測で1回の積分時間を設定する場合とか、限界等級を評価する場合には、暗電流のこうした振舞を考慮する必要がある。

なお、同様の検討を $-62^{\circ}\text{C}$ でも行なおうとしたが、暗電流が非常に小さくて1時間かけても十分なカウントを得られなかった。1秒あたりの暗電流カウントは $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 位であった。

#### 信号読み出しに伴う雑音及びS/N比のこと

図3に、100番目の素子について、一定の信号を与えた時に得られたカウントとその相対頻度とを調べた結果を示す。この実験は $-62^{\circ}\text{C}$ の下で行なわれたもので、暗電流は十分無視し得る。A/D変換の際の選択的な効果のためと思われる出現カウントの系統性が見うけられるが、全体的にみれば対称性の良い分布となっている。この分布の標準偏差をとつてみると約5カウントとなる。

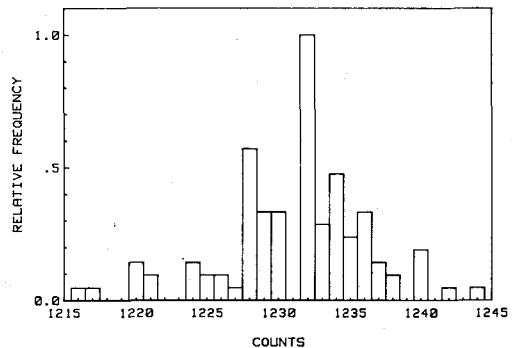


図 3 一定の信号を与えた時の出現カウントとその相対頻度。ここには100番目の素子による結果のみ示す。

これを雑音とみる場合、その成分として、信号自身の伴う散射雑音と信号読み出しに伴って回路各部で生ずる雑音とが考えられる。散射雑音は、信号の大きさを  $S$  とする時  $\sqrt{S}$  のように増加するゆらぎで信号に固有のものであるが、読み出し雑音の方は装置に固有で読み出しごとにふえてゆく雑音である。今ここで得た約 5 カウントの雑音は、そのかなりの部分が散射雑音と思われるが、見方を変えれば読み出し雑音は高々 5 カウントということになる、この数字は他の素子でもまた同程度である。実はもっと弱い信号の場合でも検討してみたが、そうした結果も総合すると、どうやら読み出し雑音は 2~3 カウント以内に抑えられているとみて良いと思っている。普通は A/D 変換の際の変換単位を読み出し雑音の  $1\sigma$  より少し大きい程度にしているようだから、これでもまだ大き過ぎる結果のようでもある。しかし逆に  $1\sigma$  をはるかに上回る単位が設定されてしまっていたとすると、今度は微弱信号検出能率の悪くなる心配が出てくる。

さて、ここで少し読み出しに伴う雑音に関連して S/N 比の問題を取り上げておく。今、暗電流が無視できるとすれば、 $S/N$  比は  $S/(S+2n\sigma^2)^{1/2}$  と表わせよう。 $S$  は信号、 $\sigma$  は読み出し雑音、 $n$  は読み出し回数である。 $S$  を大きくすれば  $S/N$  比を大きくできるのは当然であるが、一定の  $S$  を得ようとする時即ち一定の積分時間をかけようとする時には二通りのやり方がある。1 回で実現する手と数回に分けてとる方法である。この二者の差違が読み出し雑音の存在で生じてくることは今の  $S/N$  比の表現で明らかであろう。つまり 1 回の積分で十分な情報を得てしまうに越したことはない。我々の実験の方向は、その多くをフォクト達(1978 年)の詳細な報告に依存している。この  $S/N$  比の問題も彼らの示唆を受けたもので、彼らの論文では最小回数の掃引によって  $S/N$  を増すという考え方を单一読み出しの原理(single-read-out philosophy)と称している。この考え方には従えば、1 回の積分に最大限の時間をかけ、しかる後に次の積分を同様に実行してゆくというようにして信号をかせいいでゆくことになる。しかし、最長の時間といつても、特に微弱光の場合には再び暗電流の問題がでてくる。従って、実際には、この暗電流に関してがまんできる程度の積分時間が 1 回の上限を決めるだろう。

#### ダイナミック・レンジ及び線型応答性

レチコン自体のダイナミック・レンジは約  $2.5 \times 10^4$  ということである。しかし、システム全体としてのレンジとなると、A/D 変換の条件及び雑音が大きな制限となる。この装置の場合 12 ビット A/D 変換器が使われており、仮にその 1 単位が雑音に等しいとすればレンジは 4096、1 単位が  $1.2\sigma$  なら 5000 という数字になる。こ

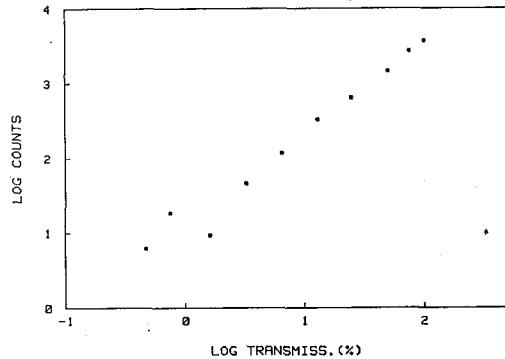


図 4 装置の線型応答性。実験は ND フィルターを組み合わせて行なったので、横軸には透過率の % 値の対数を目盛ってある。

の原理的な数字がどこ迄実現されているかは疑問であるが、今、前の結果を用いて雑音に相当する量を 4 カウント位にとり、上限はある程度の飽和現象を考慮しておくことになると、それでも 1000 に近い数字はでてきそうである。

ここ迄はしかし、有意に受かる最小信号と、区別し得る最大信号との範囲を算出しているに過ぎず、測光上の質の良さとはまた別の話である。たとえ信号は受かっても、大きさの近い信号同志の区別が十分つかなくては困るし、更に二つのカウントの比が信号そのものの比に等しくなるような応答性の実現していることが重要である。こうした線型応答性も含めて調べようとした結果が図 4 である。この実験では、入射光量の調節に ND フィルターを利用している。それで横軸には % 単位の透過率の対数を目盛ってある。透過率 100% から始めて順次落として 0.475% 遍調べて行ったところ、1% を切ったあたりから既に線型応答の失なわれてゆく傾向が認められ、カウントの減少率が落ちた。カウントにして 10 あたりである。透過率にある程度の不確かさが伴うこと、上限の飽和量迄はもう少し伸ばせそうなことを考慮しても、線型応答を示す範囲はせいぜい 200~300 というところで、もちろんダイナミック・レンジが十分生かされているとは思われない。この辺の数字には、しかしながらの幅があり得、特に数値を導く際の最小信号に対応する量の評価に敏感に左右される。また、システムの電子回路のつくりにも大きく依存しているはずである。

#### 512 素子の分光感度の均質性

ここ迄の話は全て 512 素子が同じ特性を持つという前提で進め、その平均的振舞を示してきたおり、それでそういう差し支えない。512 素子の均質性の問題は、実際観測された生の分光データを整約してゆく時に重要な、各素子の絶対感度が異なれば、これを補正して一つの尺

度に揃えたデータとしなくてはならない。加えて分光感度分布まで異なれば、極端な場合、素子一つ一つに対してそれぞれの分光感度分布を知り、それらを補正しなければならない。こうした問題、特にその分光感度分布の均質性の問題を検討するために、色フィルター B 440, G 530, RT 830 を使って調べたのが図 5 である。フィルターの透過する光はそれぞれ 4400 Å (青), 5300 Å (緑), 8300 Å (近赤外) 付近の波長にピークを持つ。なお 512 素子のうち、512 番目は全く異常で役に立たず、1 番目もまた具合が悪いので、この 2 素子は検討からはずし、結局のところ 510 素子が実用の対象である。結果は御覧の通りでいささかたちが悪い。この図では、3 つのフィルターに対する結果をいずれも 96 番目の素子 (B と RT とでは最大感度を示す) を 1 として示してある。近赤外と青との感度の各素子に渡る様子は類似しているのに、間の緑ではそれらと異なる。つまり、絶対感度もさることながら各素子の分光感度分布もさまざまというわけである。これは 205 番目付近の素子の場合、近赤外と緑とで 10% 以上の相違に達する。この結果は  $-62^{\circ}\text{C}$  のものだが、事情は  $+8^{\circ}\text{C}$  で調べた場合でも変わらないようである。

分光感度分布の不均質を較正する手は幾つか考えられる。一つは始めに述べたように事前に各素子の分光感度分布を調べておくことである。また、波長域の狭い高分散分光なら、観測とは別に適当な光源を用いて同じ条件

のスペクトルをとり、その結果で、観測されたスペクトルをわってやればよい。広波長域の場合には光源の波長分布がわかっていないと困るが、普通行なわれる標準星を用いた較正で、ある程度は可能だろう。しかし、今の場合の感度の不均質は隣り合った素子にすら起こるというものであるから、それでは極く荒っぽくしか評価できず、やはり事前の検討が必要である。この点、より実際上の問題として、今後の課題の一つである。

### システムの感度

これ迄は、信号の大きさの定量表現として、我々の直接受けられるカウントという量を使って説明してきた。それでは 1 カウントとは一体入射光子何個分に対応するのか。逆に言うと、光子 1 個は何カウントとして計数されるのか。これがここで調べることである。この場合、波長に伴う感度の相対的変化は、ほぼシステムの入口にあたる検出器そのものの持つ特性、即ちシリコンの量子効率の波長分布で決まっているはずである。検出器に入射した或る波長の光子は、シリコン半導体中に、その量子効率に応じた割合の電子 - ホール対を発生させる。その後この情報が変形されて伝えられ、最終的に A/D 変換器によってデジタル量のカウントに変換されるところ迄くると、1 カウントにはほぼある数の電子 - ホール対が、従って入射光子数が対応しているというわけである。

この情報はもう少し前の方で述べるべきであったかも

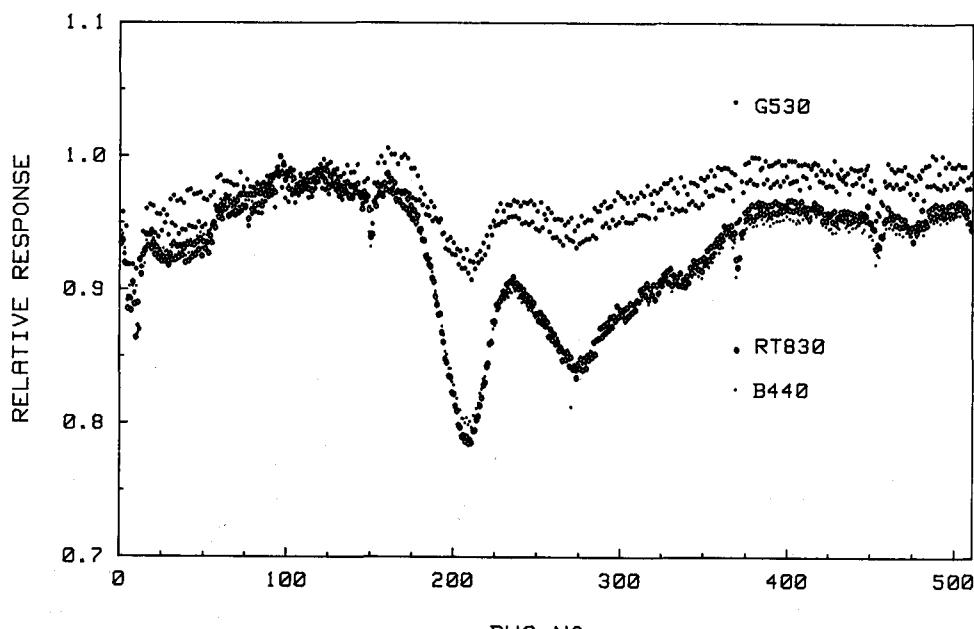


図 5 各素子の分光感度の均質性。横軸には不良な 2 素子を除く 510 素子を数え、縦軸は全て 96 番目の素子の感度を 1 とした時の相対値である。実験は  $-62^{\circ}\text{C}$  の下で 3 つの色フィルター B 440, G 530, RT 830 を用いて行なわれた。

知れぬが、話の行き挂りと実験を整理する一つのスタイルとしてこの辺にもってきてしまった。この実験で初めて天体を登場させる。もっともこれも代替策の一つで、設備さえ整えられれば室内実験の方が精度は上がるだろう。1光子あたりのカウントを求めるために用いた手段というのは、要するに通常行なわれる標準星による較正法である。つまり、エネルギーの波長分布既知の星を、視線に横たわる空気量の異なる時刻に何回か観測し、その資料をまとめて、空気の存在による減光量と、望遠鏡・分光器・検出器等を通して最終的に得られる量を導いている係数とを求めるものである。この目的で用いた標準星はシリウス ( $\alpha$  CMa) とレグルス ( $\alpha$  Leo) である。観測は、教室の日本光学製 30 cm 反射鏡カセグレン焦点にグレーティング分光器を付け、その焦点面にレチコンがくるように取り付けて行なわれた。分散は約 130 Å/mm で、1 素子あたり約 6.5 Å 程度、25 mm には約 3250 Å の幅の波長範囲を含むことになる。選んだ波長域は、水素原子の  $H_\beta$  線 (4861 Å) と地球大気の酸素分子による A バンド (7600 Å 附近) を含む部分で、ほぼ 4700 Å から 7900 Å 迄である。シリウスは明るいので積分時間約 60 秒で十分 S/N の良いデータが得られたが、レグルスの方は暗くて 200 秒かけても余り良いデータは得られなかった。しかし、シリウスの方には今見ている波長域全体に渡るエネルギー分布の資料が見当たらなかつたので、レグルスによる結果の方を図 6 に示しておく。エネルギー分布の資料はソ連のコマロフ達 (1978 年) のものを使っている。縦軸に示した 1 光子あたりのカウントは、先にも述べたように望遠鏡・分光器等の効率も含む全体としての値であり、DARSS のみの分はもっと大きい。DARSS 以外の部分で、荒っぽく評価して 1 柄から 2 柄の光の損失はあるだろうから、このあたりの波長域での 1 光子あたりのカウントは  $10^{-4}$  以上となつていい。この数字は会社提供の資料に一致し

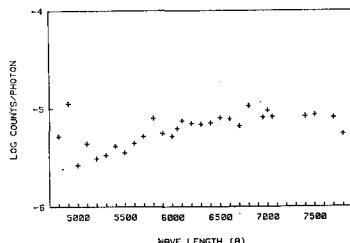


図 6 標準星レグルス ( $\alpha$  Leo) を用いて求めた、光子 1 個に対応するカウント。ただし結果は地球大気による減光のみ補正されているだけで、望遠鏡や分光器による光の損失は補正されていないから、DARSS のみで考える時には値は 1~2 柄大きくなる。なお、素子の不均質に関わる補正も行なっていない。

ているものと思われるが、だとするとこれは少々不満な数字でもう 1 柄上げたいところである。

さて、図をもう少し良く見ると、幾つか飛び離れているような点は S/N の悪さやその他種々の不確かさによるとしても、いくらか系統的な変化も現われていることがわかる。これは多分に前節で調べた素子の不均質に原因する。なお、この観測は  $-3^\circ\text{C}$  の下で行なわれたもので、もっと低温の場合にはダイオードの量子効率の低下による感度の低下が予想される。しかし、フォクト達 (1978 年) の報告によれば、これが顕著になるのは 7000 Å より赤側とのことで、今見ている波長域では余り変わらないと思われる。

### 少し細かい問題を二つ

一つは、信号読み出しの際に発生する熱の問題で、フォクト達 (1978 年) は自己加熱効果 (self-heating effect) と呼んでいる。この効果は、信号読み出しの直後にいわば暗電流の付加分のように現われると思われる。これを検討してみるために、ある読み出しの後に一定の時間をおいて次の読み出しを行ない、二つの読み出しの間にどの位の時間をおけばこの効果を抑えられるものか調べてみた。結果はそれ程明瞭なものではなかったが、15 秒以上の時間をおけば、この効果のことは気にしなくてもよい程度に一定したカウントの得られることがわかった。

もう一つは、1 回の読み出しが 100% 信号を取り出してこれないという、像の遅れ (image lag) の問題である。この遅れもまた簡単な実験の結果 0.2% 位と判断され、それ自体は気にならない。むしろ次の別の読み出しに重なつてしまつ方が心配で、とりあえず読み出しをする直前には何回かの空掃引をすることにした。そしてその後 15 秒程おいて読み出しを行なうというわけである。

以上 “DARSS”についての基本特性を幾つか述べてきた。では天体観測に対してはどのくらいの力があるのかということになると、これはまだ今後より実戦的検討に待たねばならない。この手の装置というものはいろいろとややこしい問題を持っているようだが、初めにも述べたような非常な利点を生かすべく問題は一つ一つ解決してゆかねばならない。今後は更に IDARSS (Intensified DARSS, マイクロチャンネル・プレート利用の I.I. +1024 素子レチコン) という高感度の装置を手に入れ、岡山の 91 cm 鏡を使って試験観測を重ねてゆく予定である。近い将来、これらの装置を駆使した観測的研究を皆さんの中に提出できることを期待して、この稿を閉じたい。