

写真の限界等級をはるかに上まわる 冷却CCDで23等星をキャッチ

東京大学東京天文台 家 正則

●限界等級に挑む

天文ファンのあなた。あなたは何等星まで見たことがありますか？裸眼での限界は6等星といわれていますね。モチロン、望遠鏡を使えば肉眼でももっと暗い星が見えます。どこまで見えるかは、望遠鏡の口径、焦点距離、倍率、夜空の暗さ、シーイング、それと観測者の経験（根性？）に大きく左右されます。写真に撮るとさらに暗い星まで見ることができます。ではいったい、観測できる一番暗い星とはどんな星でしょう。そもそも限界等級には限界があるのでしょうか。

街明りが全く届かないところで、月の無い夜空の明るさを測ると、“真暗な”夜空も実はわずかに輝いていることが分かります。このような光を夜天光といいます。夜天光は、大気光（地球上層大気中の分子や原子が発する光）、黄道光（太陽系内の塵が太陽光を散乱した光）、それに星野光（遠くの星や銀河の発する光）からなります。3成分は大ざっぱには同じくらいの強さで、夜天光の輝度は全体で約21.5等／平方秒角ぐらいです。普通のシーイングでは、星像は10平方秒角ぐらいに拡がってしまうので、例えば21.5等星の面輝度は夜天光の輝度の1/10程度になってしまいます。従ってそのような暗い星を見つけるには、空の明るさの

わずかの増加を精度良く測る必要があるのです。

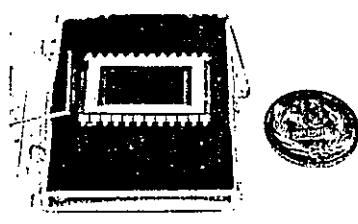
写真観測での限界等級は約21.5等といわれています。切れ味の良いパロマー掃天写真集もその程度です。日本での限界等級のきちんとした記録は、筆者の知る限りでは、東京天文台木曾観測所の105cmシェミット望遠鏡で検出された20.8等星です。

ところが最近この限界を破る観測が、新しい観測装置の登場で可能になってきました。私達のグループでも冷却CCDカメラという装置を使って、日本では初めて23等星を確認することができました。その様子をお話しましょう。

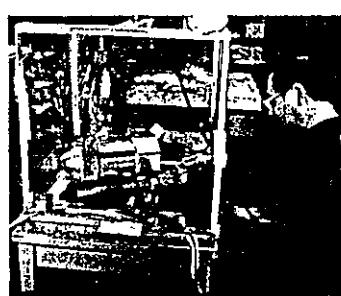
●CCDってナダ？

CCD（電荷結合素子）はシリコン半導体の固体素子で、普通約20万個の画素から成っています。CCDは、この各々の画素に入射した光を吸収して電子に変えて蓄える働きと、各々の画素にたまたま電子の量を順番に正確に測る働きとを合わせています。従ってCCDは、光の像を測定する撮像素子として使えるのです。

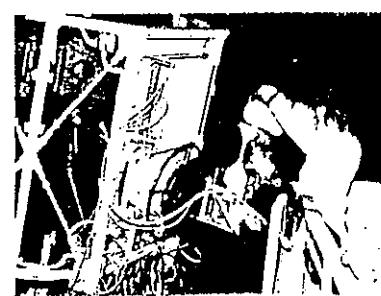
CCDの最大の利点は、光の検出率（量子効率といいます）が高いことです。CCDは入ってきた光の約70%を電子に変えて蓄えます。一方、写真乳剤を用いたフィルムでは、この効率は1%以下しかありません。またCCDでは入射光量を蓄



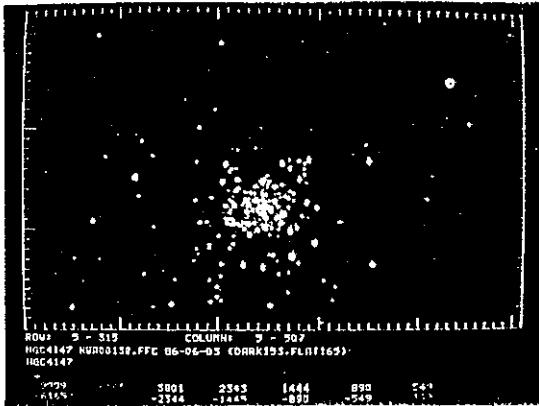
【写真1】RCA社のCCD素子、SID 501EX。画素数は512×320個。特殊加工を施したもので、お値段は1画素あたりに換算すると約10円。



【写真2】冷却用真空デュワーにCCD素子を取り付けるところ。静電気が発生しないよう慎重に作業。



【写真3】東京天文台岡山天体物理観測所の188cm反射望遠鏡のニュートン焦点に取り付けた冷却CCDカメラ。冷却用液体窒素を入れているところ。



[写真4] 冷却CCDカメラでとらえた球状星団NGC 4147。1986年4月1日25時20分。露出1分間視野は5'×3'。

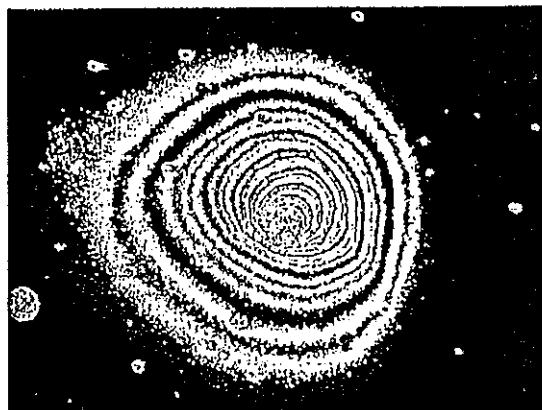
えられて電子の量が正確に比例しますが、写真フィルムでは入射光量と銀粒子の還元量（つまり写真の黒みの度合）とが、一定したきれいな比例関係にはなりません。つまりCCDは写真フィルムに比べると、ずっと高感度で高精度な光検出器なのです。

CCDの唯一の弱点は、大きさが小さいということでしょう。従ってシュミット、望遠鏡のような広角カメラ用の検出器には向いていませんが、狭い視野で良ければ、CCDは写真フィルムよりはるかに優れた検出器なのです。実はあなたもCCDをお持ちかもしれません。CCDは小型軽量なので、ビデオ用ハンディカメラに最近よく用いられています。また自動焦点カメラで測距用に、一次元CCDセンサーが用いられている例もあります。

●岡山天体物理観測所の冷却CCDカメラ

私達は欧米の天文台でこの2~3年使われはじめ、最も実績あるRCA社のSID501EXという型のCCD素子を使うことにしました（写真1）。CCDには、画面転送方式と行間転送方式の2種類がありますが、天体観測に適しているのは画面転送方式です。SID501EXは画面転送方式で、しかも青い光に対する感度を上げるために、特殊な技術でシリコン層の厚みをわずか10μmにしたもので、というわけで、天体撮像にうってつけのCCD素子なのです。

実はRCA社は私達の注文を最後にCCDの製造を中止してしまいました。RCA社のCCDは値段が高く、安い日本製のCCDにかなわなくなつたからです。家庭用のカメラにはどの方式でも大差はないのですが、天体観測用に秀れた性能を示したRCA社のCCD製造中止は、世界中の天



[写真5] ハレー彗星の中心部。1986年4月1日28時59分。露出30秒間。

文台を驚かせ、残念がらせました。

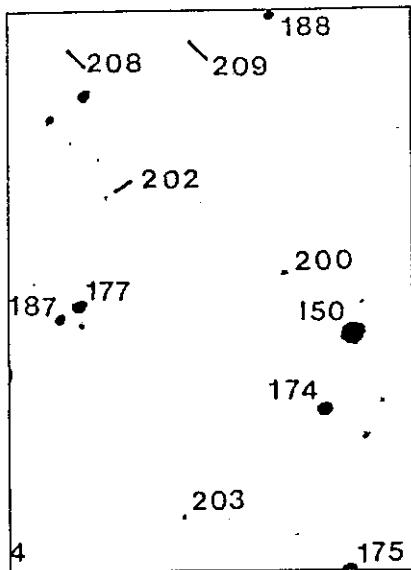
ともあれ、人手したSID501EXを用いて作られた冷却CCDカメラは、いくつかの点で市販のCCDカメラとは異っています。まず、市販のカメラは毎秒30コマの画像を撮るようになっていますが、これでは光を1/30秒しかためられません。そこで私達のカメラは、露出中は光を電子に変えてどんどんためてゆき、露出終了後に電子量を各画素ごとにまとめて読み出し、コンピュータに記憶させるように設計されています。露出時間の制御や電磁シャッターの制御など、ほとんどの機能もコンピュータにやらせます。

ところが常温のままでは、CCDに光があたらなくとも熱電子がたまってゆき、数秒で電子があふれてしまいます。そこで熱電子を減らすため、液体窒素でマイナス120℃に冷却できるようにします。こうすれば1時間でも2時間でも露出して、微弱な星の光を重ね合わせられるのです。冷却のため、CCDは真空の魔法瓶の中に取り付け、窓から光を取り込むことになります（写真2）。

●188cm反射望遠鏡でのテスト観測

1986年4月上旬、準備がととのい、待望の冷却CCDカメラによる初観測を行ないました。所は今治市の西約15kmにある東京天文台岡山天体物理観測所。口径188cmの反射望遠鏡のニュートン焦点(F/4.9)に冷却CCDカメラを取り付け、夜を待ちました（写真3）。

最初の天体は球状星団NGC4147でした。この星団には、等級がきちんと測られている星が多数あります。最初の画像からCCDの威力がうかがわれました（写真4）。次にハレー彗星も撮ってみました（写真5）。真夜中になって、いよいよ本命



▲【写真6】超増感を施した写真フィルムで、エバーハートが撮影した銀河北極方向の選択天域S A57。数字174は17.4等星であることを示す。

►【写真7】岡山天体物理観測所の冷却CCDカメラで撮影した同じ天域、1986年4月5日25時03分～26時59分の間に撮影した3枚のCCD画像を合成したもの。有効露出90分間。天体14は22.7等級。天体10は24.0等級。

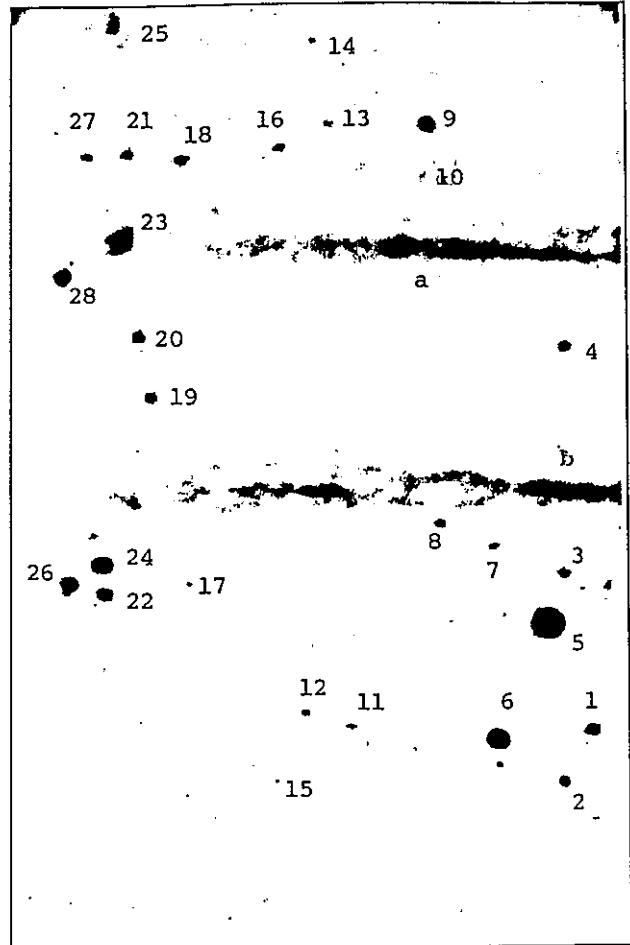
の選択天域S A57をねらいます。

●23等星が確認された選択天域S A57

このテスト観測の最大の目的は、私達の冷却CCDカメラでの限界等級を調べることでした。そのため、私達は銀河系の北極方向のS A57を徹底的に観測することにしました。S A57は銀河系の円盤に垂直な方向なので星の数が少なく、銀河系内の星間塵による光の吸収も少ないので、遠くの宇宙を見るのにも好都合な方向なのです。しかもNGC4147と同様に、S A57は世界中の天文台でいろんな人々によって良く観測されていて、限界等級を求めるのに適しています。

写真6は、デンバー大学のエバーハートが空の暗い観測所で口径41cm、F/5.5の反射望遠鏡を用いて、フォーミングガス超増感処理を施したコダック社のTP2415フィルムで、90分露光により撮影したS A57の一部です。写真観測の限界等級に近い20.9等星まで確認できます。

写真7が、私達の冷却CCDカメラで得られた同じ天域の画像です。街に近い岡山天体物理観測

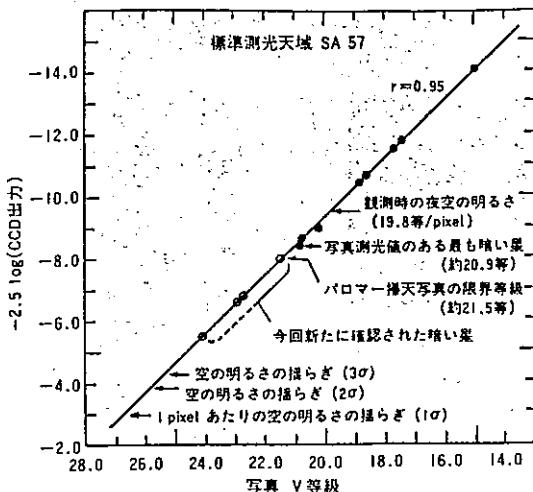


所は、残念ながら夜天光の約10倍もの市街光が夜空を輝かせています。それにもかかわらず、写真観測より明らかに暗い天体が見えていることに注目してください。

写真7は、実視に近い色特性を与えるV-バンドフィルターを用いて、各々30分間露光した3枚のCCD画像を、感度ムラの補正を施してから合成したものです。星像直径は約2.8秒角です。約16万個の画素の各々は少しずつ感度が違うので、一様な光を別にCCDに照射して感度ムラを調べておき、観測で得た天体の生画像を補正します。ここではさらに完全を期すため、実際には3枚のCCD画像を露光するときに画面中心をわざと少しずつずらせて、同じ星が異なる画素で受かるように配慮しました。画面中の2本の水平なスジは、

【表1】冷却CCDカメラで求めた等級

天体番号	実視等級	天体番号	実視等級
5	15.0	13	21.9
23	17.9	15	22.6
9	18.7	14	22.7
19	20.4	10	24.0



【図1】冷却CCDカメラによる撮像限界等級。

私たちの不手際で、ガイド用のプリズムが拾ってしまった近くの明るい星からの散乱光ですので無視してください。

画面中の28個の天体のうちいくつかの等級を表します。天体13番が21.9等、天体14番が22.7等、天体10番は24.0等です。番号をつけたもの他にも、よく見るとより暗い天体の像があるようですが、まず23等星までは確実に検出されたといって良いでしょう。

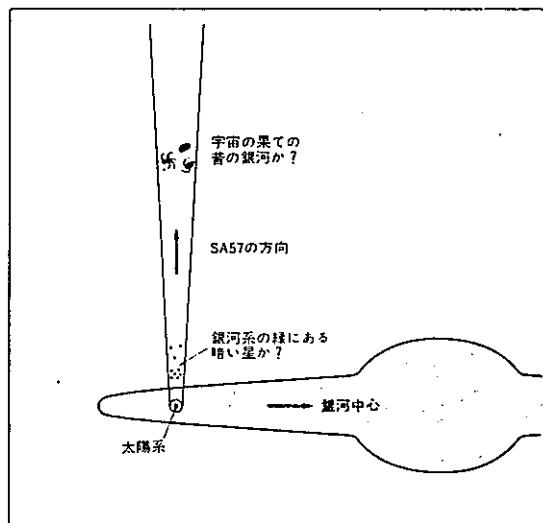
●理論的には30等星も観測可能

CCDが写真より暗い星を検出できる理由は、空の明るさをずっと精度良く測れるからです。1秒角スケールで比べたとき、冷却CCDカメラでは空の明るさを0.1%の誤差で決められましたが、写真ではその誤差は1%以上になります。この差が限界等級の差となるのです。

岡山天体物理観測所は夜空が比較的明るいため、冷却CCDカメラの限界等級は、理論的にも23~24等級ぐらいと推定されます。市街光が全くないところでは、シーディングがよければ、理論的には26~27等級ぐらいが、冷却CCDカメラの限界等級となるはずです。さらに計画中のスペーステレスコープでは、地球大気外に出ることにより、夜天光が少し減ると、星像がシャープになることにより、限界等級が30等級ぐらいになるものと期待されています。

●23等星の正体は?

写真7を見て、「ナンダ、23等星といっても別に



【図2】SA 57で発見された23等級の天体は、銀河系内の暗い星かそれとも遠くの銀河か。

普通の星と違いないじゃないか」と思られた方も多いでしょう。では、このような暗い天体の正体は何でしょうか。

23等星の暗さを想像するために、いくつかの例をあげましょう。例えば、8.7光年の距離にあるシリウスから我々の太陽系を見ると、木星の明るさが大体23等級くらいに見えるはずです。もっとも、明るい太陽（シリウスから見ると2等星）にじやまされて、検出するのは大変むずかしいでしょう。また太陽が23等星に見えるのは、14万光年の距離つまり大マゼラン星雲から見た場合です。銀河北極方向の銀河系内の星々は、せいぜい1万光年以下の距離にしかありませんから、23等星に見えるためには、それ自体ずいぶん暗い星（絶対等級で約10等以下）のはずです。太陽質量の1/3以下の赤い主系列星か、暗い白色矮星がその候補となります。多分こういう星々が見えているのでしょうか。

別の可能性もあります。極めて遠方の銀河です。宇宙論によると、遠くの銀河はそれだけ昔の姿を見せることになります。宇宙が始まって、一斉に銀河が生まれた頃を考えると、その頃の銀河が、宇宙の果てに22~28等級くらいに見えるはずだという予測があります。写真7の天体25番は、明らかに星ではなく銀河です。うんと遠くの銀河は、小さくて星と区別がつかないかもしれません。いずれにせよ、今回見つかった暗い天体の正体が明らかになるのは、もう少し先のことになりそうです。