6

天体観測用カメラ

宮崎 聡†

キーワード 天文学, 観測, CCD, CMOS

1 ま え が き

天体の観測手法には、天体のイメージを取得する撮像観測と、スペクトルを取得する分光観測がある。図1に中心波長660nm(幅100nm)の赤色の光を通すフィルタで7.5分間積分した撮像例を示した(視野1.7分角X1.1分角)。白い斑点のように写っているのが、銀河(100億個以上の星の集団)である。中心にある大きな銀河は約47億光年の距離にあり、その他の暗い天体はさらに遠方にあると考えられている。天体が写っていない部分は真っ暗ではなく、空の発する光(宇宙の背景光と大気が発する光)が載っている。むしろこのバックグラウンド光のほうが、ここでぎりぎり撮影できている暗い天体(通常研究対象はこのように暗い)よりも、100倍以上も明るい。

より暗い天体を検出するために、露出を複数回重ねて空のショットノイズを下げる。このような観測においては、主なノイズ源は空のショットノイズであり、イメージセンサの雑音はほとんど効かない。露出時間は、空が発する光が、画素の飽和電荷量より小さくなるように設定される。典型的には数分から10分程度であるので、センサはそれほど高速で読出す必要はない。

分光観測は望遠鏡の焦点の後にコリメータを置き、これで得られた平行光を分光器に導く。分光された光は再度カメラレンズで集光され、焦点面上にスペクトル像が形成される。通常、スペクトルの取得にはラインセンサが用いられることが多いが、天体観測の場合は、焦点面上に複数スリットを配置して多天体同時分光を行うことが多いため、分光器の分散と垂直方向にも画素が必要で、イメージセンサが用いられる。空の光も分散されるので、1画素に入る光はそれだけ減少し、分光観測では撮像観測より1回の露出時間を長く取れる。積分時間は、環境ガンマ線や宇宙線(ミュオン)の残す軌跡が解析の邪魔にならない程度に抑えられ、典型的には長くても30分程度である。また、分散を大きくすると、1画素に入る光子が10~数十個程度にな

図1 天体撮像データの例

ることもあるため、分光器用のイメージセンサは低ノイズ(数電子以下)であることが要求される。

大望遠鏡では、上記のような読出し速度があまり重視されない観測が主流のため、イメージセンサとしては構造として最も単純なフルフレーム転送型CCD(Charge Coupled Device)が用いられる。次章で述べるように、幅広い波長域において高感度であることがより重視されるからである。マイクロレンズは、CCD冷却時(後述)に剥がれてしまう可能性があるため通常使用しない。フィルタは観測目的に応じて各種(中心波長・幅)用意し、これを単板外付けとする。

本解説では天文観測用可視光CCDの特徴を解説し、CCDカメラの実例としてわれわれのグループで開発中のすばる望遠鏡用主焦点広視野カメラ, Hyper Suprime-Cam(HSC)とその要素技術について紹介する。

2 天体観測用CCDの特徴

2.1 大面積

すばるのような大型反射望遠鏡では、主鏡で集光した光を透過型の前置光学系に通し、諸収差を補正してから光センサに導く。必要な結像性能を得るには、望遠鏡の大型化とともに、この補正光学系も大型化するため、光センサもあわせて大型なものが必要になる。典型的には1mmあた

†自然科学研究機構 国立天文台 先端技術センター/HSCプロジェクト
"CCD Cameras for Astronomical Observations" by Satoshi Miyazaki
(National Astronomical Observatory of Japan, Tokyo)

図2 Loral社と共同で開発された2K×4K(15 μ m角画素)CCD(1994年)

り10～15秒角のスケールで設計される場合が多く、満月一つ分(直径約30分角)をカバーするためには約15cmのCCDが必要である。また、画素の大きさは星像の大きさの半分程度に設定されるが、これはおよそ10～20 μ m程度になる。

CCDが天文観測に用いられはじめた1980年代前半には1cm角程度以下の素子がほとんどであった。このため、写真乾板に比べて高感度ではあるものの、観測視野は非常に狭くなってしまった(乾板は10～50cm角程度の大きさのものが用いられていた)。当時民生用としては素子の大きさに対する要求がそれほど強くなかった。そこで、大型素子を切望した天文学者は、米Loral社などの半導体ベンダーと共同で大型CCDの独自開発を始めた。

図2に、1994年にハワイ大学等と共同で作られた2,048×4,096画素(15 μ m角画素)表面照射CCDの外観図を示した⁵⁾。CCDはシリコンと線膨張率の近いモリブデンの削りだしブロックにシートエポキシで接着され、これが冷却のため、コールドプレートの上に置かれる。素子上の一辺に配線用のパッドが集められ、三辺はデッドエリアが最小になるようにレイアウトされている(Three Side Buttable)。垂直・水平とも3相駆動、底辺にある水平転送レジスタの両端に出力アンプ(Floating Diffusion)が配置されている。この形状はしばらくの間、天体観測CCDの標準フォーマットとなり、後にSITe社、MIT/LL、e2Vなど複数のベンダーより供給されるようになった(これらは次章で述べる裏面照

図3 天体観測用CCDが目指す量子効率

射型)。

現在市場にあり単一で最大のCCDは、米Semiconductor Technology Associates社のSTA1600Aである²⁾。フォーマットは10,600×10,600(9 μ m角)画素であり、6インチウェハに載せられる最大の大きさである。素子全体を16のセクション(1セクションは5,208×1,320)に分けて、それぞれのアンプで読出される。大型素子では電荷転送効率が重要であるが、デモ用素子の評価結果によると0.999999レベルを達成しているようで、問題ない。なお、STAはかつてLoralでCCD開発を引き受けていた技術者が設立した会社で、CCDの設計を行い、製造は加DALSA等に委託している。

2.2 高量子効率

大型望遠鏡を建設する最大の目的は、天体の光を、より多く集めることにある。大望遠鏡建設にかかる膨大なコストを考えると、イメージセンサの量子効率に要求されるレベルは極めて高い。また、表面照射型素子では、波長が450nm以下の短波長域ではポリシリコン電極による光の吸収が大きく、量子効率はほぼゼロになってしまう(図3)。一方、それまでの写真乾板はこの波長域まで観測でき、多くの天体データが蓄積されており、これらとの比較は研究上重要であった。これらの理由により、CCD導入後の比較的初期から天体観測においては裏面照射型CCDが必須であった。

裏面照射型に転換する標準的な工程は以下の通りである。FT(Frame Transfer)型CCDを電極側を下向きにサポート基板に接着する。上側のバルクシリコンをエピ層を残して除去する通常機械研磨とケミカルエッチングを組合せて行う。エッチング処理後の光の入射面となる裏面は、格子欠陥が生じて、電子をトラップする準位ができています。これを矯正するためにプラスイオンを光の入射面に注入し、さらに、熱をかけてイオン原子をアニールする。その

図4 完全空乏型CCD周辺部の断面図

後適切な反射防止膜を施す。単層の酸化シリコン膜や2層のHfO+MgF等がよく用いられる。

米アリゾナ大学のスチュワート天文台では、Loral社などのシリコンファウンドリーで製造されたウェハを裏面照射化する工程の研究を長きにわたり行ってきた³⁾。これらのCCDは多くの天文台で実際の観測に使われてきた。現在でもSTA社のSTA1600Aを裏面照射化する工程を請け負い、少量ではあるが高性能品を求める需要に答えている。

シリコン内での光の吸収長は、長波長側で急速に長くなる。このため長波長における量子効率、光が空乏層で吸収されずに透過してしまうことにより低下する。量子効率を改善するためには、空乏層を厚くする必要がある。近年素材技術の向上により、欠陥が非常に少ない高抵抗(10kΩ・cm以上)のN型ウェハが得られるようになってきた。これを用いてシリコン全体を完全に空乏層とする、200μm厚の完全空乏型CCDが、国立天文台と浜松ホトニクスとの共同で開発された⁴⁾⁵⁾。N型ウェハにP型の埋め込みチャネルを形成し、CCDを作る。このため信号キャリアが通常の電子ではなく正孔になる。電子に比べて移動度に難があるが、読出し速度が限定される天体観測用であるので、問題はない。

完全空乏化を達成するには、逆バイアスがかかる必要がある。また、光正孔(Photo Hole)がCCDのゲート下に集まるまでに長い距離移動するため、シリコン内における横方向の拡散が問題になる。電荷に速度を与えて、拡散を最小にするためにも、十分なバイアス電圧を要する。図4は完全空乏型CCDの周辺部の構造を示している。素子最外周に配置された電極に+バイアス電圧をかけることで、光入射面からCCD側に向けて電場を形成する。200μm厚の素子で+50V程度かけると、電荷の拡散が15μmピクセルの半分以下にでき、かつ、完全に空乏化することができた。

なお、技術的にはより厚いCCDも製作可能であるが(～

500μm厚程度まで)、厚すぎると光の場合、焦点位置が定まらなくなり結像性能に影響がでる。口径比(F値)が2と小さい(焦点深度が浅い)すばる主焦点の場合は、これを考慮して200μm厚として設定したが、口径比が大きい場合は、それに比例して厚く設定できる。

3 天体観測用カメラの例

イメージセンサは近年大型化してきたものの、大型望遠鏡用天体観測機器の焦点面をカバーするには充分ではない。このため、複数素子を焦点面上に並べる「モザイクCCDカメラ」が開発されてきた。米国等では上述のLoral製の素子を利用した例が多かった¹⁾。日本では国立天文台のグループが、日本TI社製のTC-215(1,000×1,018 12μm角)を用いて、最初のモザイクCCDカメラを開発した⁶⁾。-100℃の冷却環境下でも、10μm程度の設置誤差を維持する機械系、10個以上のCCDを同時に読出す電子回路技術等を独自に開発・蓄積していった。このモザイクCCDカメラの最終型では、40個の素子が搭載され、東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡、スペインカナリー諸島にある口径4mのハーシェル望遠鏡など、多くの望遠鏡に搭載され研究に供された。後にこの開発グループは米国のスローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)用カメラの開発グループに招かれ、蓄積された技術を活かすことになる。SDSSカメラは、2,048×2,048(24μm角)ピクセルのCCDを30個モザイクしたもので、完成した1998年当時、世界最大の天体観測用カメラであった⁷⁾。また一方、国立天文台では引き続き、MITのリンカーン研究所の2,048×4,096(15μm角)ピクセルを10個使用した、すばる用主焦点カメラ(Suprime-Cam)も開発され、2000年から観測に使われている⁸⁾。さらに、われわれのグループはその後継機であるHyper Suprime-Cam(HSC)の開発を行っている⁹⁾。

本章ではHSCを天体観測用カメラの一例として紹介する。

3.1 すばる望遠鏡の主焦点

すばるは他の大型望遠鏡にはない「主焦点」を持つ。主焦点とは主鏡からの一回反射で結像させるため、焦点距離が他焦点に比べて短かく、広視野を実現しやすい。主鏡のみで得られる像はあらゆる種類の収差が載り、実用に耐えない。そこで収差を補正する、透過型の「補正光学系」を用いる。このため実際には補正光学系の大きさが、視野の広さを規定する。今回新たに作られた、HSC用補正光学系は初代の3倍の直径1.5°を有する。これは視野面積では3×3=9倍の改善になり、観測効率が飛躍的に向上する。これにともない、焦点面の大きさも拡大し、1.5°は約50cmに相当する。

3.2 焦点面の構成

図5にHSC焦点面の様子を示した。浜松ホトニクスの完全空乏型CCD(2,048×4,096画素)が、撮像用104個、ガイド用4個、フォーカスズレ計測用8個の計116個並べてある。

図5 Hyper Suprime-Camの焦点面（口絵カラー参照）

このCCDは、素子間ギャップを最小にして並べられるように、パッケージに工夫がされている。素子の電極は短辺の一つに集められており、他の3辺の不感領域の幅を最小にしている。裏面照射素子なので電極は受光面と反対側にあるが、相対するパッケージ側に小穴が空いていて、ボンディングワイヤーを通す。接合される電極はセラミックパッケージ内部に設けられている。これらの信号線は、パッケージ底部のPGA (Pin Grid Array) に導かれている。これにより、不感領域の幅は、電極が並ぶ短辺で5mm、その他の3辺では0.4mmとなっている。

すばる焦点深度はおおよそ $\pm 30 \mu\text{m}$ である。図5に示した116個の素子全面にわたりこの程度の平面度を達成している必要がある。部材を接着する際に、厚さに精度がある薄い金属箔を挟み込むことにより、高さの精度を高めている⁸⁾。この光軸方向の許容値に比べ、焦点面内の素子の配置精度はそれほど厳しくない。光学系の歪み (Distortion) を補正するために、ピクセルを再サンプルして計算機上で画像を再構成するのだが、その際、素子の焦点面内での位置ズレは星の位置を用いて精度良く計測して補正できるからである。

厚くかつピクセルが大きいCCDは、シリコンの体積が大きいため、暗電流が高くなる。室温では、読出し時間 (4出力それぞれ200kHz読出しで約10秒) 中に飽和してしまい、まったく使えない。そこで、真空容器にCCDを封入し、機械式冷凍機 (パルスチューブ冷凍機) を用いて、 -100°C 程度まで冷却して使用する。この時、暗電流は、1~2電子/画素/時と、ほとんど無視できるようになる。CCDは -130°C 程度以下に冷却すると電荷転送効率 (CTE) が極端に悪化するが、CTEは温度の単純な関数ではないことも知られていて、例えば -100°C より -60°C の方がCTEが悪い場合もある。CCDを低温で動作させる時には注意を要する。真空容器への熱流入は約60Wで、その6割は常温の入射窓と低温のCCDとの熱交換で流入する。採用したクーラー (富士電機製) は -100°C で50W程度の能力を持つので、これを2台搭載し、余裕を持たせてある。

3.3 CCD駆動・読出しエレクトロニクス

図5の焦点面下部にCCD面と垂直に取り付けられているのが、駆動・読出し回路群である。1枚のボードが4個 (一部6個) のCCDを担当する。CCDの駆動は、アナログスイッチ (DG403等) でHとLを選択する単純な方式である。CCD出力はカップリングコンデンサを通して、FET入力のおペアンプ (OPA627等) 一つで受ける。それを積分型の相関二重サンプリング (CDS) 回路で信号レベルからバイアスレベルを差し引き、この差信号をA/Dコンバータ (AD7686等) でサンプルする。これは天体観測用機器では典型的な構成で、200kpps程度の読出し速度においては、CCDそのものの雑音、4電子、に比べて十分に低雑音 (< 1 電子rms) を実現する。

ピクセルレートは現在150kppsに設定されていて、2K4Kの素子を4出力で読むのにおよそ15秒かかる。A/Dコンバータの出力は適当にマルチプレクスしてデューワー (断熱容器) 外に取出される。やや付加的な処理が加わり約100個のCCDを読出すのにおよそ20秒かかっている。

エレクトロニクスは冷却デューワー内に配置されているが、コールドプレートとは薄いアルミ板で作った放射シールドで仕切られているため、ほぼ常温で動作する。CCDとエレクトロニクスの配線材を充分細くすることで、断熱を実現している。また、エレクトロニクスの排熱効率を高めるために、基板のコアにアルミ板を入れ、それをデューワー筐体に接触させている。エレクトロニクスの消費電力は1CCDあたりおおよそ1Wで、また、部品点数が多く発生するガス量も増大したが、20 l/s程度の排気量をもつイオンポンプを採用することで、 10^{-5} Torr程度を実現できている。エレクトロニクスは通常時50W程度の発熱をしているが、これはすべて伝導で真空容器外壁に排熱されている。

3.4 全体構成

図6にHSCの全体構成を示す。HSCは直径8.2mの主鏡直上約15mの位置に設置され、図中収束光は下から入射する。最大直径82cmの補正光学系 (キヤノン製)、シャッター、フィルタを通りCCD上で結像する。フィルタは直径約60cmと大型のため、カメラ筐体 (青色で表示) 構造の外側に保持されている。望遠鏡に搭載される全重量は約3.2tであり、望遠鏡指向の変化による光軸ずれの補償は、筐体内部に設置された6本の高精度アクチュエータ (三菱電機製) で行っている。

4 む す び

CCDは、天体観測において今後も主要な検出器として使われていくだろう。その幅広い波長における高い量子効率は、微光天体の検出を考える際には重要視されるからである。一方、近年一般向けデジタルカメラ用として、CCDに匹敵する数電子レベルの低雑音、数cm角以上の大フォーマットCMOSセンサが作られるようになっている。高い

図6 Hyper Suprime-Camの全体構成（口絵カラー参照）

フレームレートが特徴である。天体像を高速（ビデオレート）で撮像して、大気ゆらぎによる像の乱れが少ないフレームのみを抽出して、画像ずれがあればそれを検出して、レジスターに一旦保持してから足し合わせる。こうして、大気揺らぎの影響を最小にすることで、天体画像の解像度を飛躍的に高めることができる。惑星などの明るく狭い視野に収まる天体にしか適用できないが、新技術が新しい観

測手法につながる好例である。

より広い天文分野で使用するには、画素の大きさ $10 \sim 15 \mu\text{m}$ 、 $2,000 \times 2,000$ 画素以上、4 side buttable、空乏層の厚さ $100 \mu\text{m}$ 程度、フレームレート 20Hz 以上、読出し雑音 2 電子程度以下、飽和電荷量 10,000 電子程度、という仕様を満たすイメージセンサがほしい。（2012年12月25日受付）

〔文 献〕

- 1) G.L. Luppino, M.R. Metzger and S. Miyazaki, IAUS (International Astronomical Union Symposium), 167, 297L (1995)
- 2) K. Boggs, R. Bredthuer and G. Bredthauer, SPIE, 6501, 650102 (2007)
- 3) M. Lesser, SPIE, 8453, 1 (2012)
- 4) H. Suzuki, M. Muramatsu, K. Yamamoto, S. Miyazaki, Y. Kamata, Proc. IEEE 4581-4585 (2007)
- 5) Y. Kamata et al, SPIE, 7021, 52 (2008)
- 6) M. Sekiguchi et al., PASP, 104, 744 (1992)
- 7) J.E. Gunn, AJ, 116, 3040 (1998)
- 8) S. Miyazaki et al., PASJ, 54, 833 (2002)
- 9) S. Miyazaki et al., SPIE 8446 (2012) より詳しい情報は、http://www.subarutelescope.org/Projects/HSC/j_index.html

みやざき さとし
宮崎 聡 1993年、東京大学理学系研究科物理学専攻修了。1994年、ハワイ大学天文学研究所（日本学術振興会海外特別研究員）、1996年、国立天文台助手、准教授を経て、現在に至る。理学博士。