

宇宙の観測と技術

第9章 ディテクタ

2 4. 光電効果

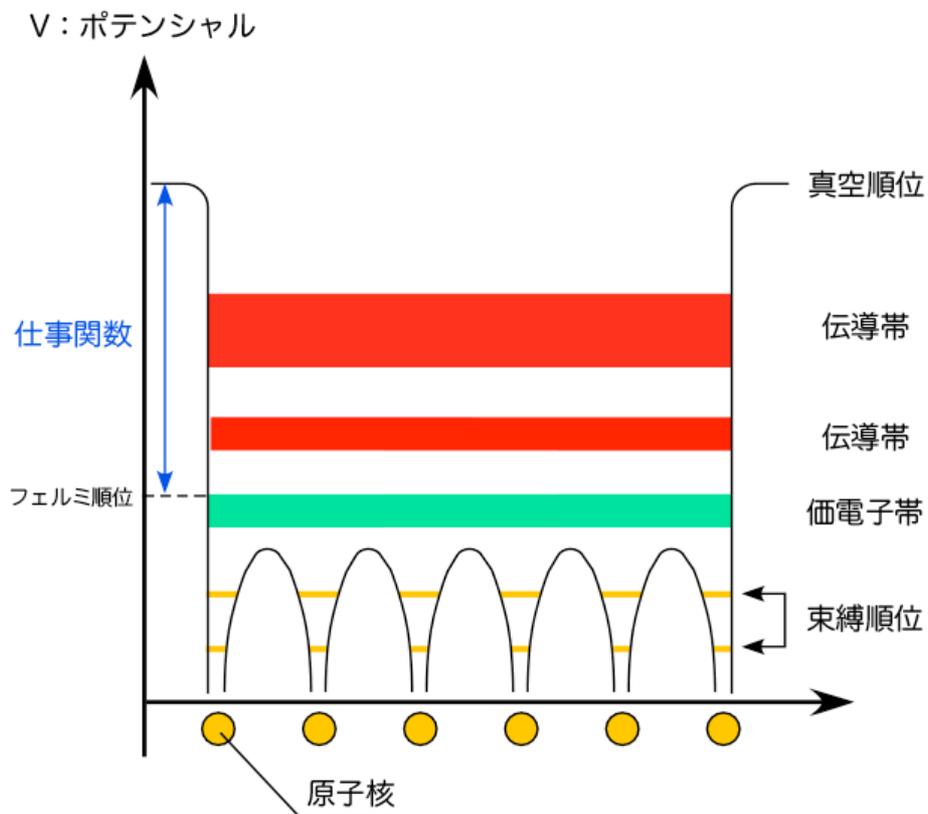
現在、画像（光量とその空間分布）の記録は殆どが電氣的に行われていると言って良い。それは天体観測でも同様である。受けた光の量を電荷に変えることを光電変換と言う。光電変換を行うための固体デバイスは数多く発明されているが、その根底にある物理現象が光電効果である。光電効果は

- 1) 外部光電効果
- 2) 内部光電効果

の2種類に大別される。まずは、この二つの光電効果について解説する。

2 4-1. 外部光電効果

固体表面にある電子が、入射した光子からエネルギーを得て、固体表面から自由空間に飛び出す現象を外部光電効果という。電子は固体を構成する原子間結合のために束縛されている状態（価電子帯と呼ばれる量子力学的なエネルギー順位）から真空レベルとのギャップに相当するエネルギーを光子から受け取って初めて固体表面から飛び出すことができる。この状態変化に必要なエネルギーを仕事関数と言う。仕事関数は固体物質によって異なる。

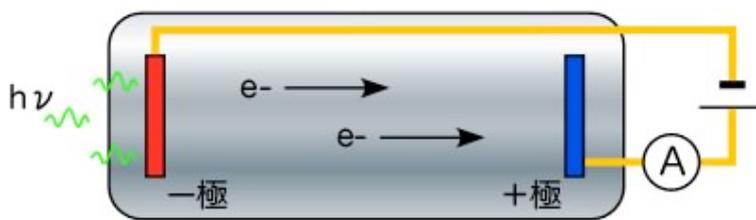


2 4-1-2. 光電面と光電管

外部光電効果はどんな物質でも起こるが、光量を測定するための物質としては、測定したい波長の光子に対して効率よく光電効果を起こす物質が必要である。木材や鉄では可視光を当てても光電効果は起こらない。光量を測定するのに適した光電効果物質としては仕事関数の小さいアルカリ金属化合物が用いられる。

物質	波長
Cs-I	300nm 以下 (紫外)
Sb-Rb-Cs (バイアルカリ)	可視光
Ag-O-Cs	750nm 以上 (近赤外)

このような物質をガラスなどの透過物質表面にコーティングしたものを光電面という。光電面を真空管に封じ電圧をかけるとマイナス極から光量に応じた電流を取り出すことができる。これが光電管である。

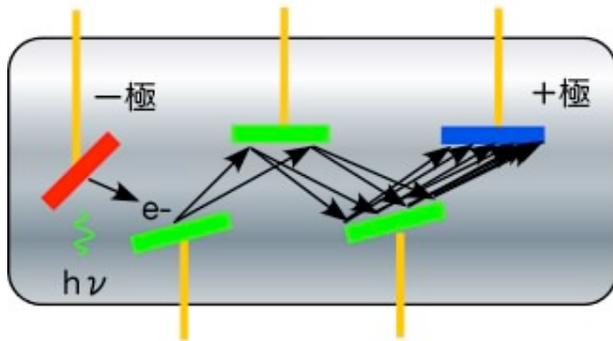


画像 (右) は下記 (真空管「光電管」物語) より引用

<http://homepage2.nifty.com/kawoyama/tubestoryphoto.htm>

2 4-1-3. 光電子増倍管

光電管の光電面 (-極) と +極の間に中間電極を設け、光電面から出てきた光電子を衝突させて2次電子を発生させて、信号強度を増幅させる光電管のことを特に光電子増倍管と言う。微弱光でも光量を測ることができる。光電子増倍管では光電面と+極の間に1000V程度の高電圧をかける。



西はりま天文台の光電測光器（星の明るさを測るのに使われる）

2 4-2. 内部光電効果

ある種の半導体（Si 単結晶）では価電子帯よりも高いエネルギー状態に、電子が物質内を自由に動き回れる伝導帯と呼ばれる順位ができる。基底状態（エネルギー的に最も安定で低い状態）では伝導帯に電子は存在しない。しかし、

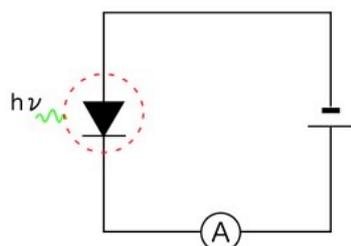
このような半導体に光が入射し吸収されると価電子帯にある電子が光子のエネルギーを受け取って、伝導帯へと励起する（エネルギー準位を移す：電子遷移）現象が起こる。固体内部で起こる伝導帯への電子遷移を内部光電効果と言う。

2 4-2-1. フォトダイオード

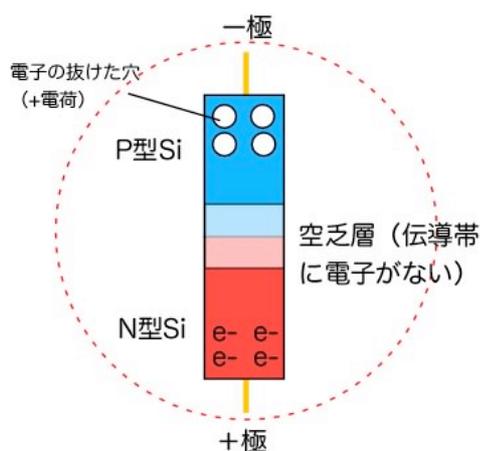
フォトダイオードは内部光電効果を使って光電変換を行うデバイスである。光電面の場合と同じく、光量を測定したい波長によって適切なバンドギャップ（価電子帯と伝導帯とのエネルギー差）を持つ材料が使われる。

物質	波長
Si	190～1100nm（紫外～可視）
Ge	400～1700nm（可視～近赤外）
InGaAs	800～2600nm（近赤外）

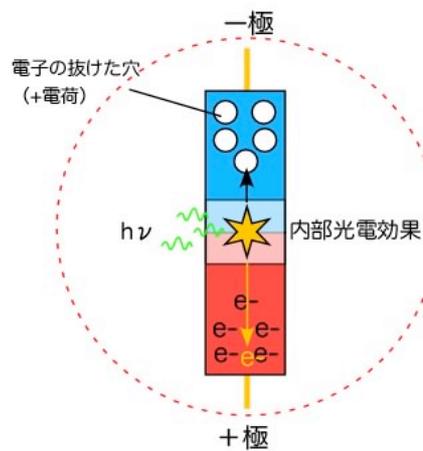
フォトダイオードも電圧をかけることで吸収した光量に応じた電流を取り出すことができる。



フォトダイオードに逆バイアス（電流が流れないように+/-を反対にして電圧）をかける



逆バイアスをかけると分極する
→電流は流れない



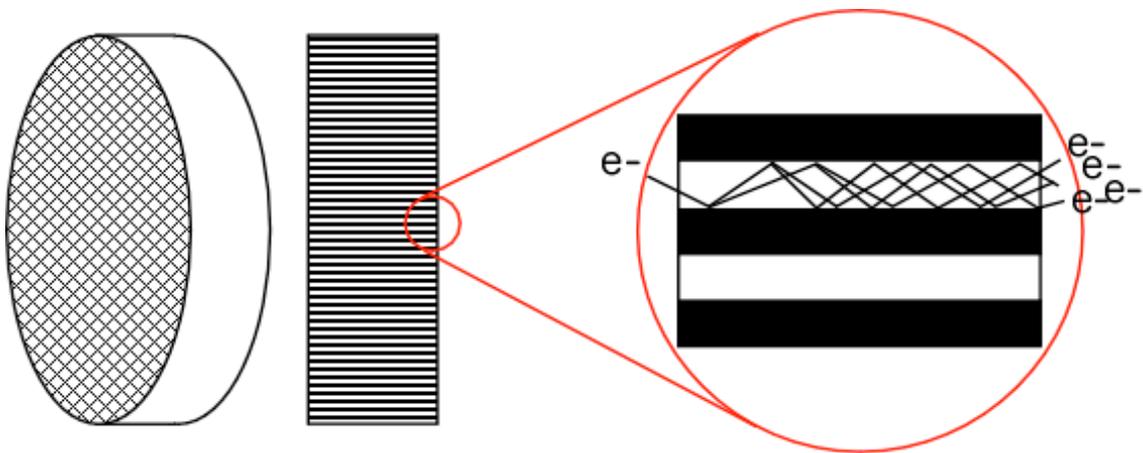
伝導帯に励起された電子が発生
→電流が流れる

25. 2次元ディテクタ

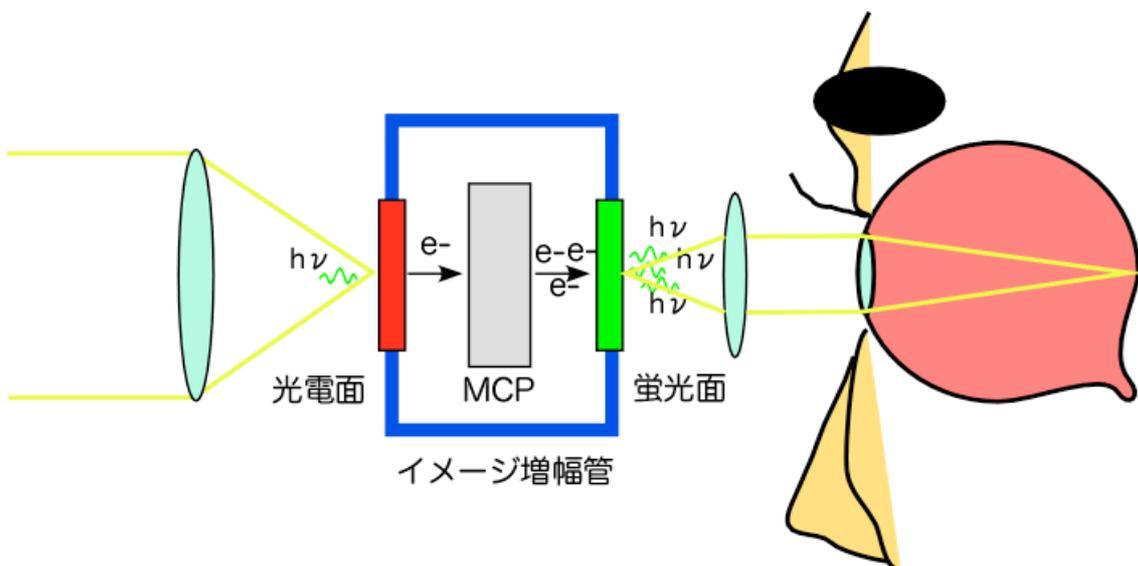
画像を記録するには、像面に投影される光量の分布を2次元の位置情報と一緒に測る必要がある。基本的に光電子増倍管やフォトダイオードを2次元に並べたものが2次元ディテクタである。

25-1. イメージ増幅管 (Image Intensifier)

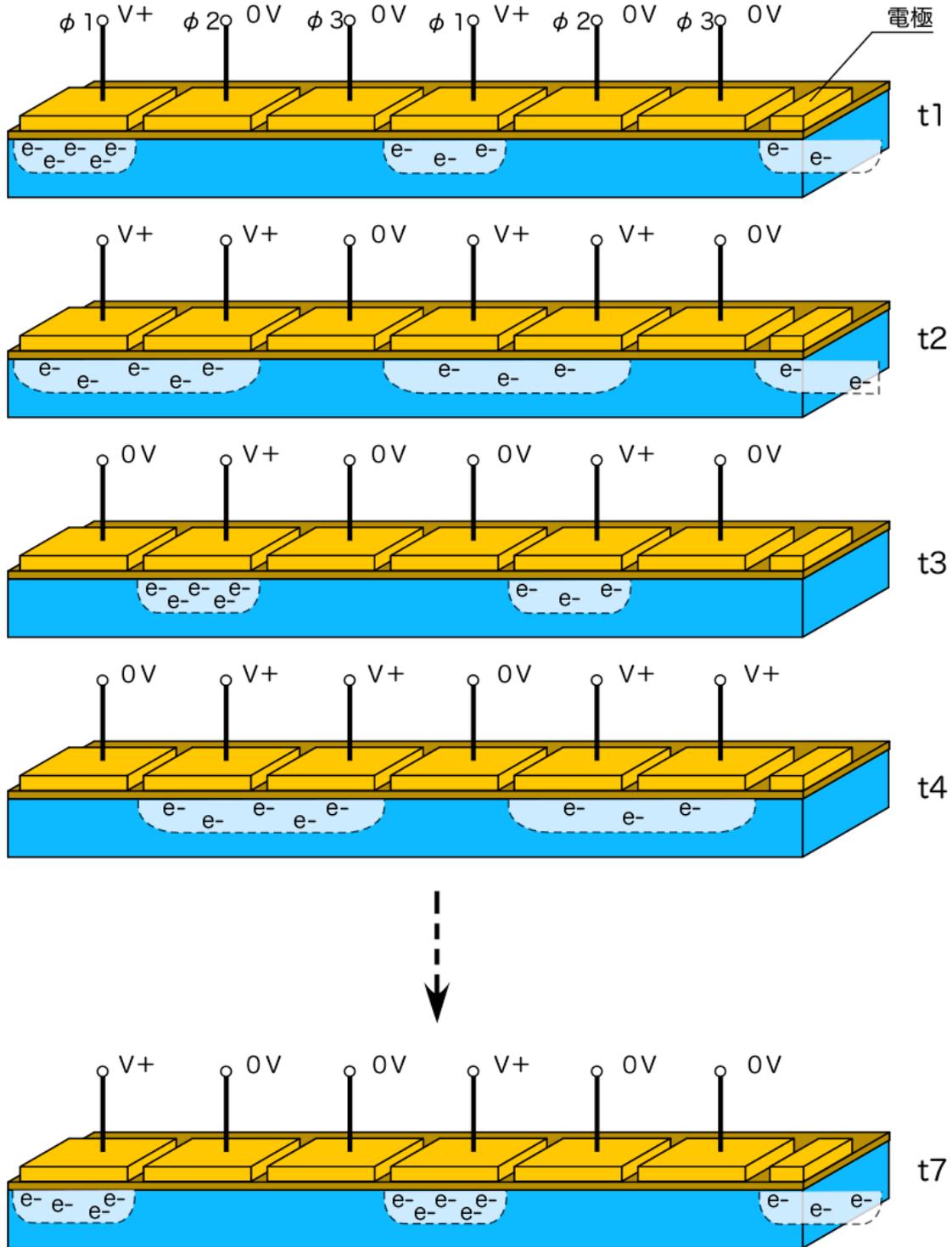
光電子増倍管を2次元配置するため中間電極として発明されたのがマイクロチャンネルプレート (MCP) である。これは多数の穴がレンコンのように通ったパンケーキ状の電極になっている。



これを真空管に封じ光の入射窓に光電面を、増幅された電子の出射側に蛍光面を置いたものがイメージ増幅管である。軍用にも使われるナイトビジョンはイメージ増幅管を使った道具である。

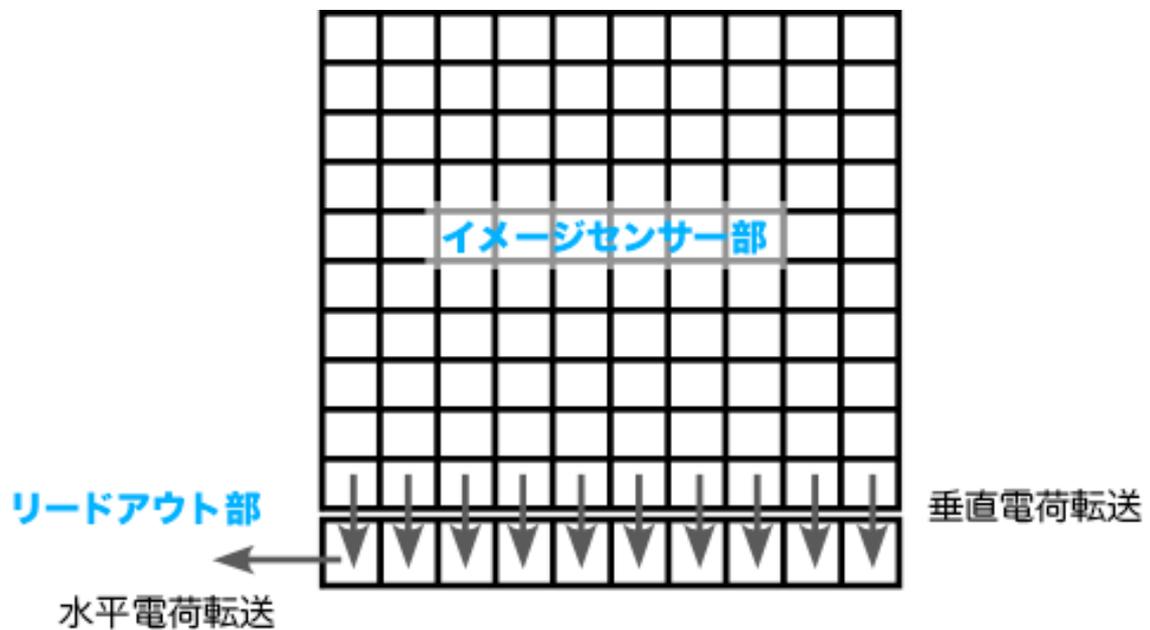


ただし、このままでは入射光子によって生じた電荷を信号として読み出すことができない。CCD ではピクセル毎に用意された電極にかかる電圧を交互に制御して隣のピクセルへと次々と電子を移動させ、信号としての読み出し口へと運んでゆく。CCD はこの電荷転送の仕組みのことを指す。



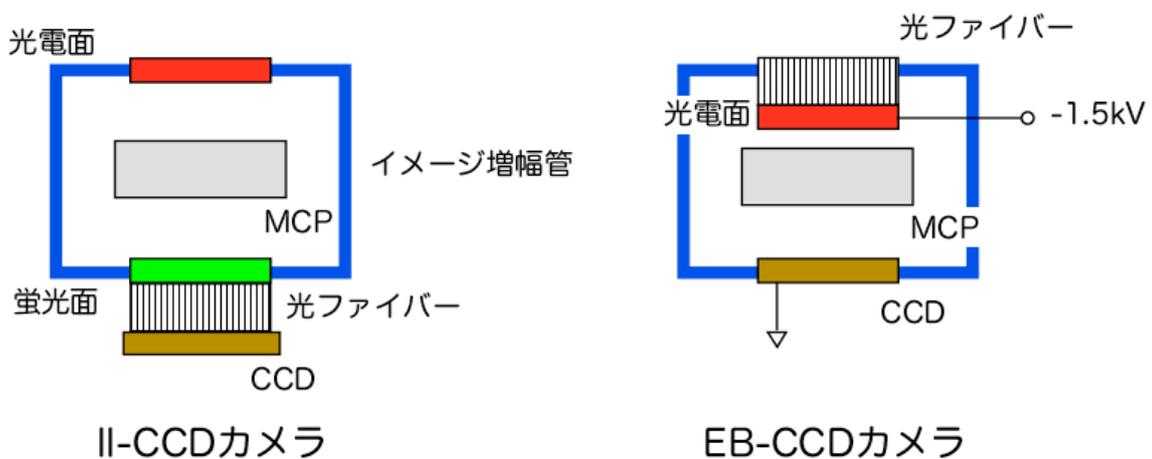
CCD 電荷転送動作の一例 (3 相)

CCD 電荷転送の動作や仕組みは幾つかあるが、基本的には横一列を一度に転送する垂直電荷転送と、取り出した横一列を1画素ずつ読み出すための水平電荷転送の2段階で構成されている。



2 5-3. 超高感度カメラ

CCD カメラは電荷蓄積（露出）ができるため、天体や暗闇で被写体を撮影できる。しかしビデオカメラのように秒間30枚以上の連続（動画）撮影する需要もある。このような場合では露出時間が限られ、さらなる高感度が要求される。CCD と電子増倍とを組み合わせたものに超高感度（暗視）カメラがある。



イメージ増幅管に CCD を付けた II-CCD と、画質を改善した EB-CCD とがある。EB-CCD では光電子を加速して CCD 面を爆撃して2次電子を発生させる。

26. カメラとノイズ

どんな測定器でもあるようにカメラにもノイズがあり、観測データの精度に関わっている。ここでは CCD など固体撮像素子および光電面を使ったイメージ（電子）増幅管で発生するノイズについて解説する。

26-1. 2次元ディテクタ受光面の感度ムラ

光電面でも CCD でも面積を持ち、その場所毎に光量を測定する2次元ディテクタでは、受光面での光電変換の効率（量子効率）にムラが生じる。これは製造上の問題で個体差として現れる。ただし、一般に固定パターンであるため、受光面全面に対して、このムラを測定しておけば補正が可能である。

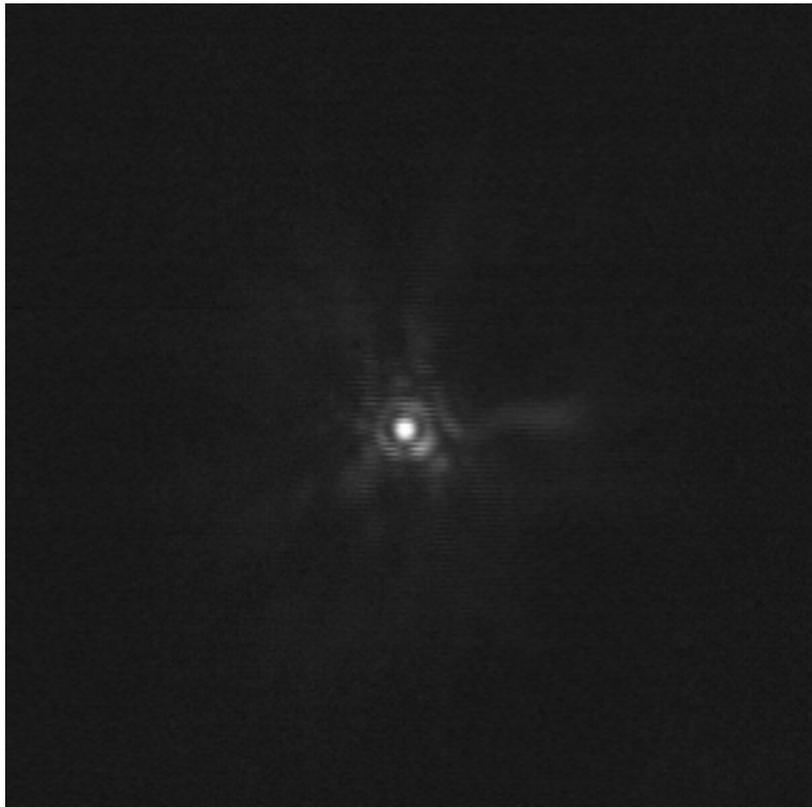
一方で受光面上では、量子効率の大きさに応じて、光電変換のゆらぎ（量子揺らぎ）が発生する。これは量子力学の不確定性原理に基づくものであり、測定毎に変化する。量子効率が低く発生電荷が少ない状態ほど統計的な揺らぎは大きくなる。ちなみにシリコンフォトダイオードで光電変換する CCD では量子効率が最大90%あり理想的なデバイスと言える。一方で光電面を使ったイメージ増幅管では、光電面の量子効率は最大数10%にしかない。高電圧をかけることによって2次電子を大量に発生させ、信号強度を上げることができても、元の量子効率の低さから信号の揺らぎは大きくなる。暗視カメラは暗闇でも写るが、階調性は低く、画像品質が良いものではないことに注意が必要である。

26-2. イメージ増幅管のノイズ

光電子増倍管やイメージ増幅管は、真空中に電極が封じ込められていて、その中を加速された電子が飛翔する。しかし真空管の中は完全な真空ではなく、内部に封じられている物質からの脱ガス成分が浮遊している。これが電子と衝突してイオン化すると、電子と一緒に加速され疑似信号（ノイズ）となる。II-CCD カメラや EB-CCD カメラでは画像全体に粒状性が目立つのは、先の量子揺らぎとイオンノイズが原因である。イオンノイズは真空管内の真空度を高めることによって改善される。また II-CCD カメラでは光電変換され増幅された加速電子が蛍光面に衝突して発光させる時に、滲みのある大きな発光点になってしまう。そのため画像解像度も落ちてしまうが、EB-CCD は直接 CCD 内部で電子増幅されるため解像度が改善されている。



HIVISCAS (ハイビジョンカラーII-CCD カメラ) の画像例



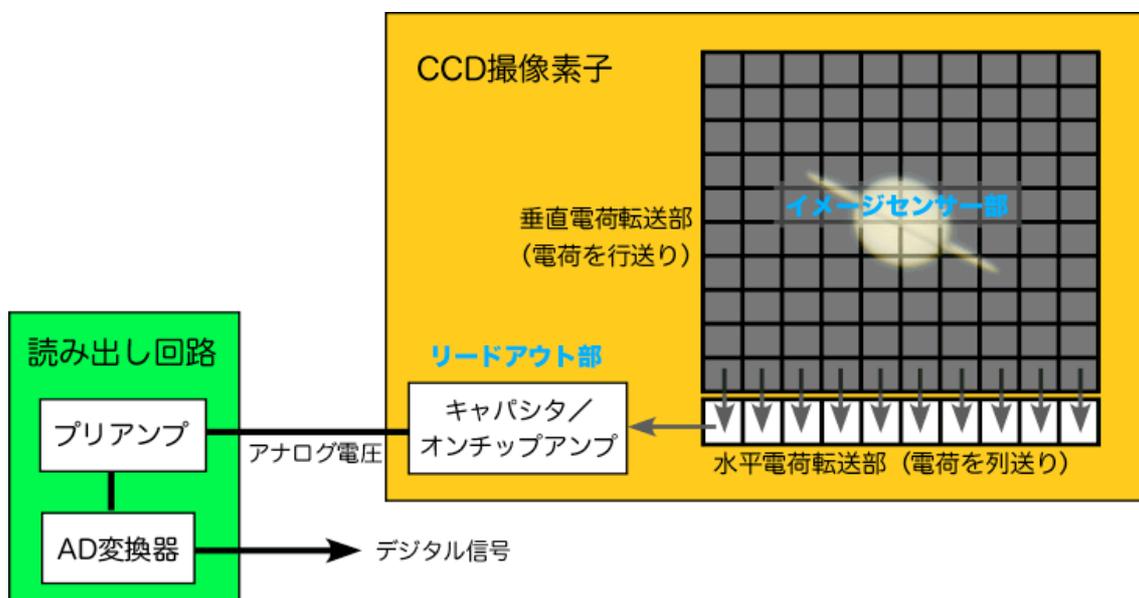
VTOS (EB-CCD) の画像例

26-3. CCDカメラのノイズ

CCD に代表される固体撮像素子を使ったカメラで発生するノイズには熱ノイズと読み出しノイズの2種類がある。

熱ノイズとは固体撮像素子の内部光電効果の仕事関数（価電子帯と伝導帯のエネルギーギャップ）が比較的小さく、量子効率が高い（遷移確率が高い）ことによって発生する。固体撮像素子である半導体物質の温度が高い（例えば常温でも）と、電子が持つ熱エネルギーも大きく、ある確率で、エネルギーギャップを越えて伝導帯に遷移する電子が発生してしまう。これは通常的环境下で高速シャッターを使用する撮影条件では殆ど目立たない。しかし天体観測など微弱光の元で長時間の露光（または超スローシャッター）を使用する場合には無視できないレベルになる。熱ノイズを抑えるには CCD を $-数十^{\circ}\text{C} \sim -100^{\circ}\text{C}$ （液体窒素の温度）まで冷却する。これが冷却 CCD カメラである。

読み出しノイズとは撮像素子からの信号（蓄積電荷量に比例する電圧）を読み出す際に発生するノイズである。CCD の出力電圧は、プリアンプを介して増幅され、AD 変換器を通してデジタル信号としてコンピュータに取り込まれる。



読み出し回路は、およそ100万あるピクセルの蓄積電荷に対して、数百 kHz（スロースキャンのステルカメラ）から数十 MHz（秒間30フレーム以上の高速カメラ）で信号増幅とアナログ・デジタル信号変換を行う「アナログ回路」

である。読み出し回路の設計は計測用カメラの性能を左右する。低ノイズで高速動作が可能な読み出し回路の設計は知識・経験・技術の集大成である。世界的な天文台や研究機関が独自にカメラを開発する理由は、このアナログ回路で最高の結果を出すためと言っても良い。