

# 光・赤外線観測の原理

家 正則

## 4.1 天体からの放射

天体はそのエネルギー状態に応じて、ガンマ線から X 線、紫外線、可視光、赤外線、電波に及ぶさまざまな波長の電磁波を放射している。そのうち地球大気を透過して地表にまで達するのは、可視光、一部の赤外線と電波だけである。

48

天体からの電磁波を波長についてスペクトル分解すると、放射強度が波長に対して連続的に緩やかに変化する連続スペクトル、特定の波長でのみ放射強度が著しく増す輝線スペクトル、逆に特定の波長でのみ放射強度が著しく減少する吸収線スペクトルの 3 種類があることがわかる。可視光と赤外線領域では、連続スペクトルは自由自由遷移と自由束縛遷移からなる熱的放射が主であり黒体放射で近似されるが、シンクロトロン放射などの非熱的放射成分が認められることもある。熱放射の場合、可視光では概ね 1 万度程度の恒星からの放射が主であるのに対し、赤外線ではより低温のガスや塵の雲からの放射が主となる。連続スペクトルはいくつかの測光帯域での放射量から決まる等級と色指数により記述することができ、天体の温度の目安を与える。赤外線領域では測光帯域は

表 4.1 測光帯域表

帯域	波長 (nm)	波長幅 (nm)	検出器
U	365	70	CCD
B	440	100	
V	550	90	
R	700	220	
I	880	240	
J	1250	380	HgCdTe InSb 他
H	1650	400	
K	2200	480	
L	3400	700	
M	5000	1200	
N	10400	5700	

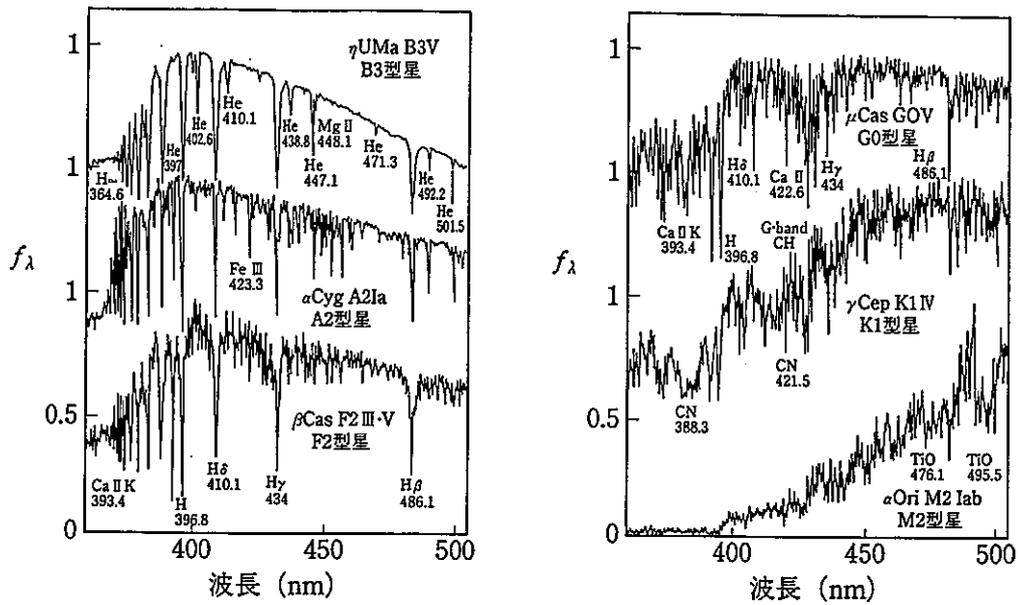


図 4.1 恒星の吸収線スペクトル。(G.Walker,1987)

地球大気中の分子による吸収の影響の少ない波長領域に設定される (表 4.1)。

#### 4.1.1 恒星と星間ガスのスペクトル

恒星のスペクトルは基本的には虹のような連続光スペクトルである。プリズムで屈折した太陽光が壁に虹になって映るのや雨上がりの空の虹を思い浮かべればよい。だが、詳しく調べると星のスペクトル (図 4.1) には数多くの吸収線が刻み込まれている。吸収線スペクトルは、星の表面大気中の原子や分子が連続光の中の特定の波長の光を吸収して、電離したり励起状態になるために生ずるものである。

これに対して、オリオン星雲などのスペクトルは連続スペクトルでは

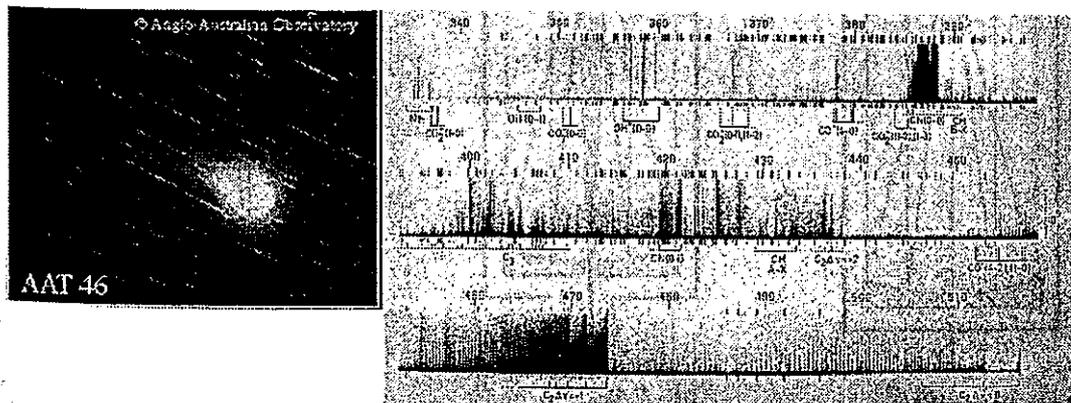


図 4.2 ハレー彗星の輝線スペクトル。(ESO Messenger,1986)

なく、特定の波長でだけ、強い光が出ている。密度が低くて温度が高い星間ガスからの放射スペクトルは、吸収線ではなく輝線スペクトルになる。色とりどりのネオンサインは輝線スペクトルの代表例である。ネオンは赤、ナトリウムはオレンジ、カリウムは紫、と元素によって決まった色で発光する。図 4.2 はハレー彗星のスペクトルである。さまざまな分子の輝線スペクトルが確認できる。

## 4.2 光を集める

### 4.2.1 望遠鏡

望遠鏡の発明は 17 世紀初めにさかのぼると言われている。ガリレオ・ガリレイ (Galileo Galilei) が望遠鏡を天体観測に初めて用い、木星の 4 大衛星、土星の輪、太陽黒点、天の川が無数の星からなること、などを発見した。レンズを用いた屈折望遠鏡は、ガラスレンズの色収差の除去が困難なことから、望遠鏡筒が長大になるため使いにくく、大型化には限界があった。色収差がない反射望遠鏡はアイザック・ニュートン (Isaac Newton) が初めて開発したが、研磨したガラス表面に銀やアルミニウムをメッキする技術が開発されて、19 世紀後半には実用化された。

反射望遠鏡の光学系には、主焦点、カセグレン焦点、ナスミス焦点、などの形式がある (図 4.3)。望遠鏡の架台は一軸定速駆動の赤道儀が主流であったが、コンピュータの発達により、二軸変速駆動が可能となり、最近では構造が対称で安定な経緯儀が主流となってきた。望遠鏡の姿勢

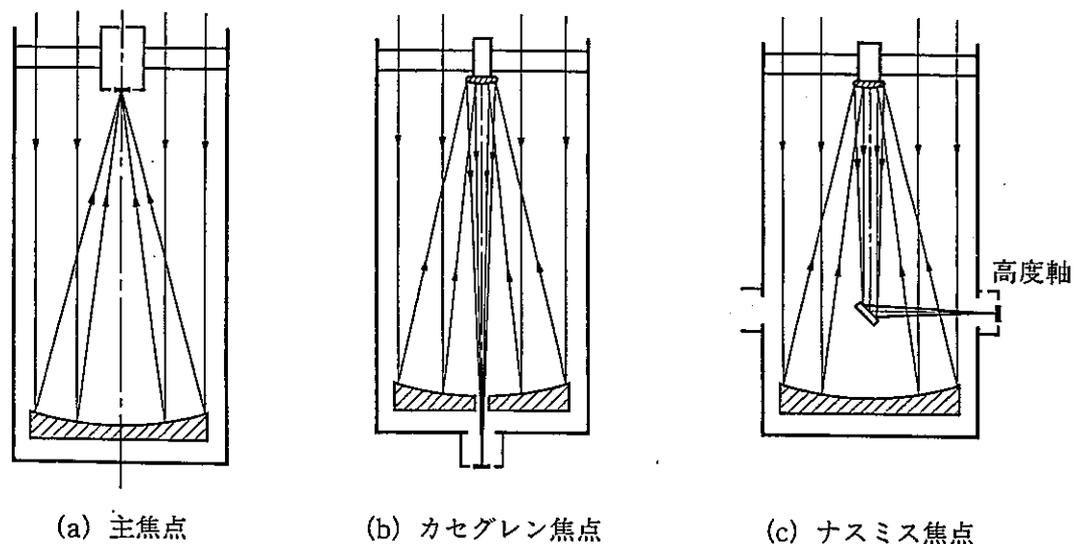


図 4.3 反射望遠鏡のさまざまな焦点。

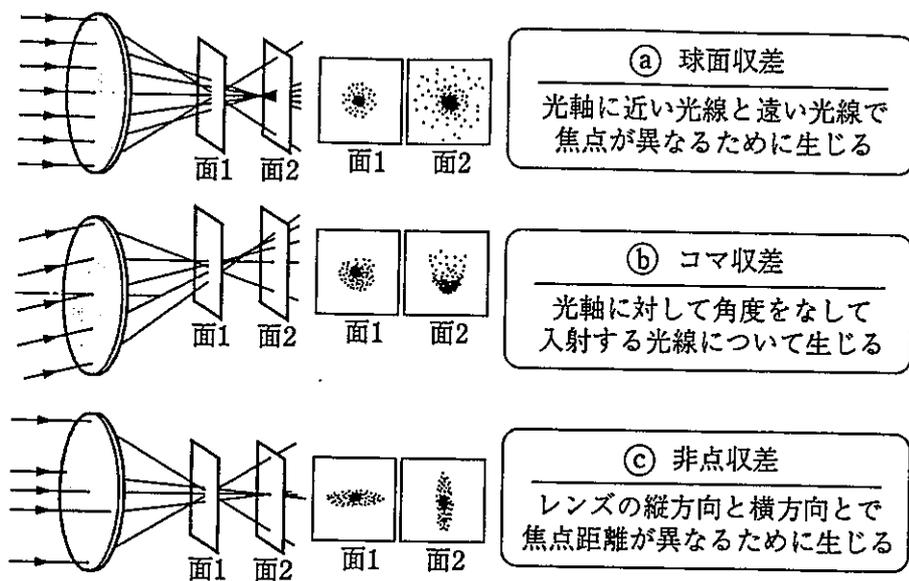


図 4.4 ザイデル収差。

の変化による主鏡と副鏡の位置関係の狂いが最小になるように、望遠鏡のトラス構造を設計する。望遠鏡の光学性能と並んで重要なのは追尾駆動精度であり、ここにもさまざまな技術が織り込まれている。

#### 4.2.2 光学収差

光学系はザイデルの五収差といわれる球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、像面歪曲（図 4.4）を必要に応じて除去するように設計する。光軸上で完全な結像が得られる放物凹面主鏡と双曲凸面副鏡を組合わせた古典的カセグレン望遠鏡が当初主流であったが、近年は近似双曲凹面主鏡と近似双曲凸面副鏡の組合わせでコマ収差と球面収差を除去できるリッチ・クレチアン式望遠鏡が主流となっている。いずれの場合も、主焦点を用いるには通常 3 枚組レンズからなる補正光学系を装着する必要がある。

## 4.3 撮像と分光

### 4.3.1 撮像

望遠鏡の焦点面に画像検出器を配置すれば撮像観測ができる。撮像観測では天体の位置、形状、明るさなどを測定する。さらに数種類の色フィルターを用いて順次撮影すれば、天体の色からさまざまな情報を推定することができる。特殊な撮像観測としては、特定の波長の光だけを通す干渉フィルターや、特定の偏光成分のみを通す偏光フィルターを用いる例もある。

### 4.3.2 分光

分光観測では、プリズムや回折格子などの光分散素子を内蔵した分光器を用いて、天体の光をスペクトル分解する（図4.5）。回折格子には平行な溝が多数刻まれている。格子溝で回折された光は、隣合う溝からの光路長の差が光の波長の整数倍になる方向では重なって強め合い、半整数倍となる方向では打ち消し合って弱まってしまう。従って、回折の方向により、出てくる光の波長が連続的に変化し、スペクトルが観察できる（図4.6）。

$$\text{光路長差} = \overline{CB} + \overline{BD} = d(\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda(\beta)$$

原子や分子の電子準位や分子の振動・回転準位は量子化されていて離散的であるため、2つの異なるエネルギー準位間での転移に応じて、そ

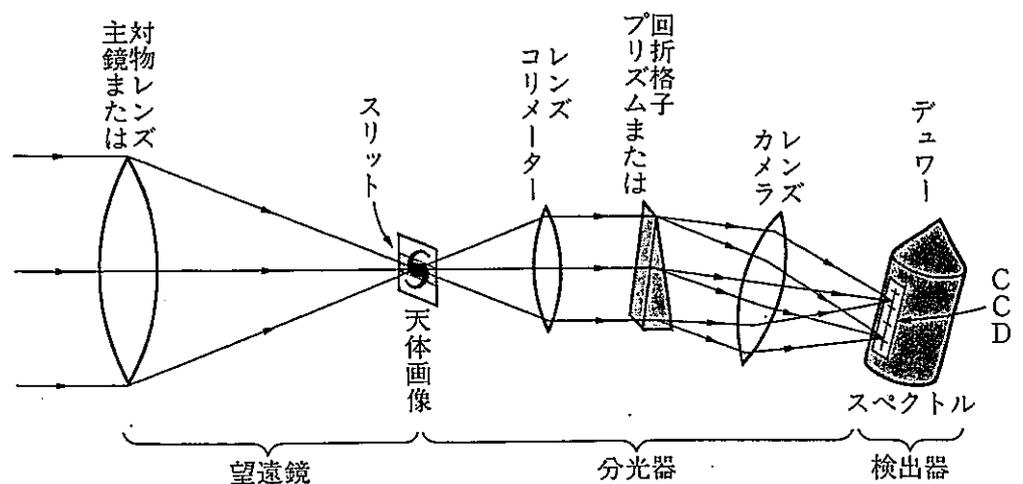


図4.5 望遠鏡、分光器、CCD。

のエネルギー差に相当する光子が放出あるいは吸収され、輝線スペクトルあるいは吸収線スペクトルが現れる (図 4.7)。実際、星のスペクトルには熱的な連続スペクトル中に星の表層の大気中の原子やイオンによる

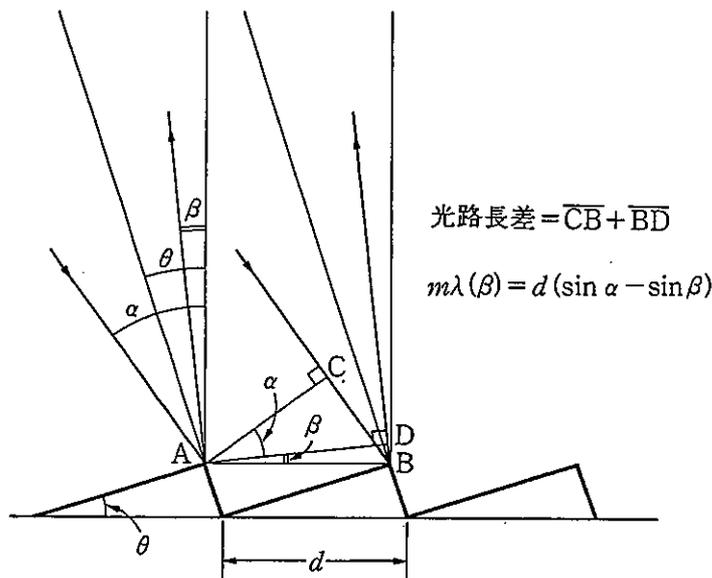


図 4.6 回折格子の原理。

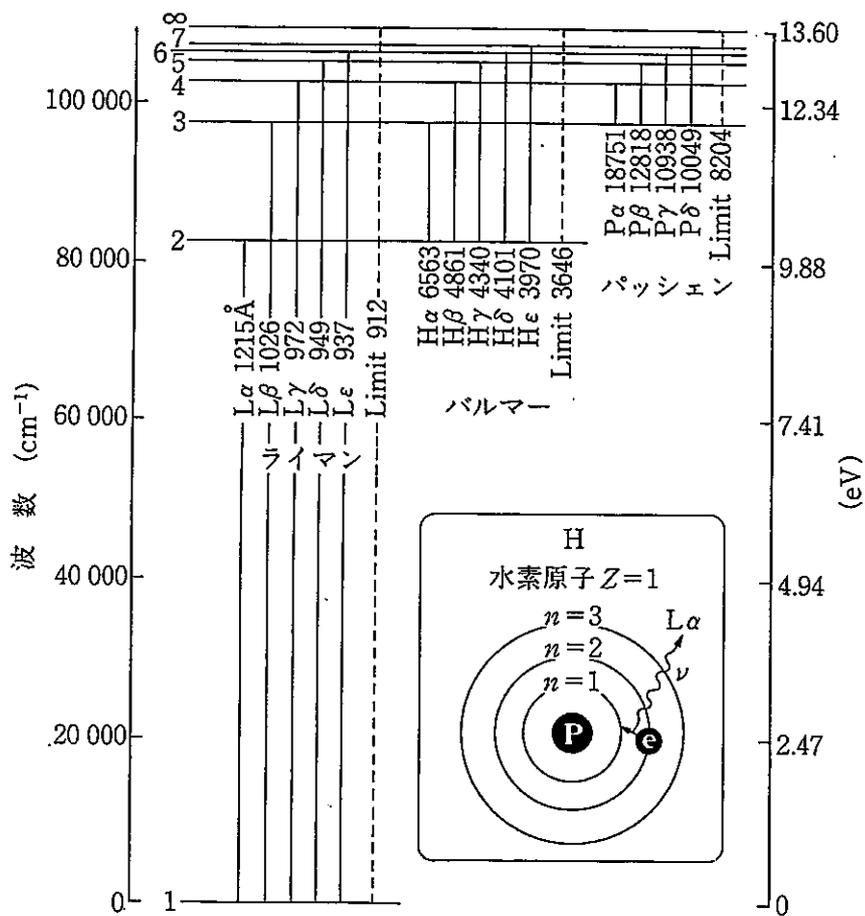


図 4.7 水素原子の電子エネルギー準位。(Moore & Merrill, 1968)

吸収線スペクトルが重なって見られる。一方、星間空間の希薄なガスからは励起状態にある原子や分子からのさまざまな輝線スペクトルが見られる。これらの線スペクトルの波長とその強さはスペクトル線の吸収または放射を起こす原子、イオン、分子の状態とその量に依存する。吸収線の強さを表す等価幅は、原子や分子の量に依存して図4.8のように変化する。この依存曲線を成長曲線と呼ぶ。線スペクトルを調べると、天体の密度、温度、圧力、元素組成、運動速度、乱流速度などの物理状態を診断することができる。

#### 4.3.3 視線速度

救急車のサイレンの音は、近づく時は高く、遠ざかる時は低くなる。これは音波の波長がドップラー効果により、近づく時には短く、遠ざかる時には長くなるためである。一様に膨張する宇宙では、遠い天体ほど大きな速度で遠ざかっている。我々から遠ざかっている天体の発する電磁波も、ドップラー効果のためその波長が長くなる。波長の長くなる割合を赤方偏移  $z$  という。赤方偏移の大きさは、視線速度  $v$  が光速  $c$  に比べて小さいうちは、視線速度と光速の比に等しい ( $z = v/c$ )。

分光観測は撮像観測以上に重要な情報をもたらすことが多いが、光を細分するため暗い天体ほど困難となり、大型の望遠鏡が必要となる。

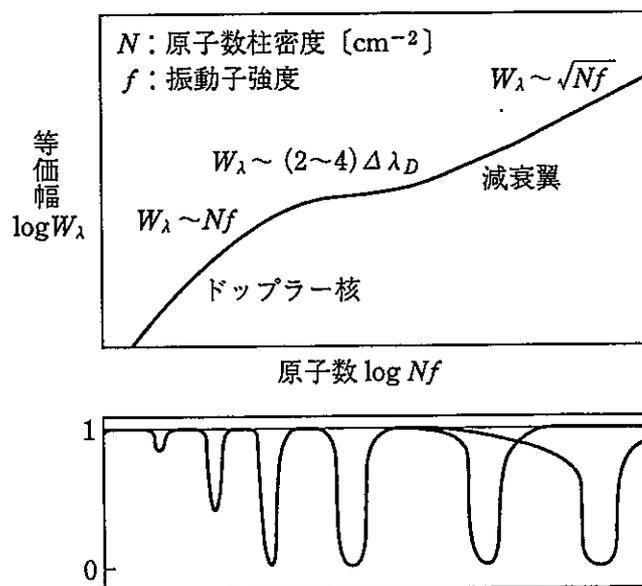


図 4.8 等価幅の成長曲線。

## 4.4 光検出器、背景放射

### 4.4.1 CCD

1980年代には、光検出器としてそれまで主流であった写真乾板やフィルムがCCD（電荷結合素子）に置き換わった（図4.9）。光化学反応を利用した従来の写真乾板やフィルムでは、光を捕える効率は1%程度でしかなかった。半導体内部での光電効果を利用したCCDは、入射光子の最大約80%を捕えて電子（光電子）に変換することができる。通常のCCDは約100万個の画素からなり、各々の画素には発生した電子を数十万個まで蓄えられる電気的なバケツがついている。動画用の通常のCCDとは違い、低照度で用いる天体観測用のCCDでは、各画素に光電子を蓄積し、露出終了後に各画素に貯まった電子をバケツリレー（電荷転送）して読み出す。CCD内部の熱的ゆらぎにより発生する電子（熱電子）を抑制するため、CCDは真空容器の中で通常 $-120^{\circ}\text{C}$ 程度に冷却して用いる。

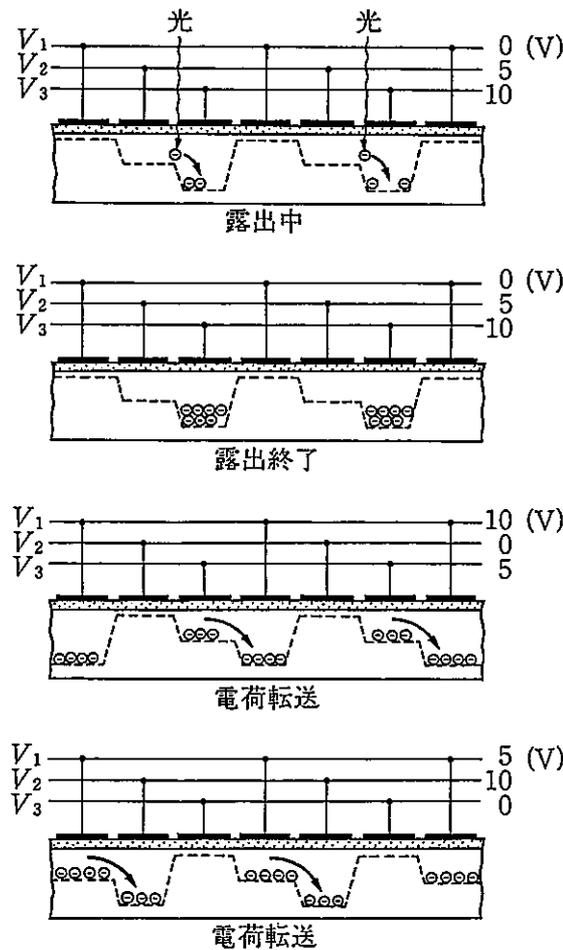
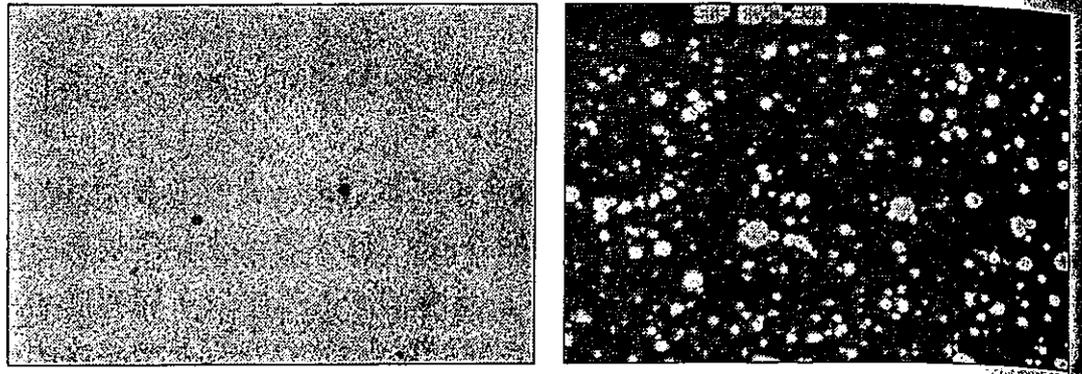


図4.9 CCD（電荷結合素子）の原理。



乳剤乾板

CCD

図 4.10 CCD と乳剤写真の感度比較。(A.Tyson,1988)

CCD カメラで撮影した画像と乳剤写真乾板の画像を比較すると (図 4.10)、その違いが一目瞭然となる。これは光に対する感度が良い上に、その再現性が大変良いためである。写真乳剤粒子のムラは再現性がないが、CCD の感度ムラは良い再現性がある。この違いが大きい。

#### 4.4.2 夜空の明るさ

街明かり (図 4.11) が全く届かないところでも、夜空は真っ暗ではない。地球の上層大気中の分子や原子が放つ大気光、惑星の公転軌道面上に散在する微小な塵が太陽光を散乱して光る黄道光、それに個々に

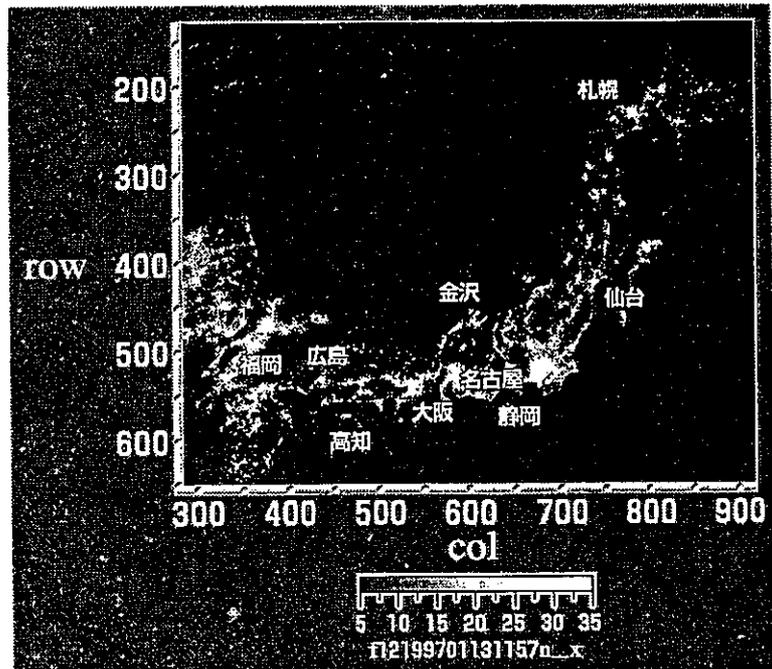


図 4.11 人工衛星から見た夜の日本列島。「リモートセンシング協会」(1997.1.13)

別できないほどの暗い星々や遠くの銀河からの背景星野光によって、夜空はほぼ一様にほのかに輝いている。その明るさは1平方秒角あたり青色域で22等星1つ程度、赤色域では20等星1つ程度に相当する。波長2ミクロン以上の赤外線では約300 Kの地球大気からの熱放射が夜空を輝かせているため、空の明るさは昼も夜も大差ない。