

12. Cours d' introduction à l'observation astronomique

- 12.1 Télescope VMC 260: présentation
- 12.2 Monture CGE
- 12.3 Mise en station de la monture CGE
- 12.4 Fonctionnement simplifié d' un CCD
- 12.5 Avantages du CCD
- 12.6 Observations avec un CCD
 - 12.6.1 bruits et rapport S/B
 - 12.6.2 réduction des données
- 12.7 Camera SBIG STL 4020M
- 12.8 Projets de travaux de groupe

8/12/2006

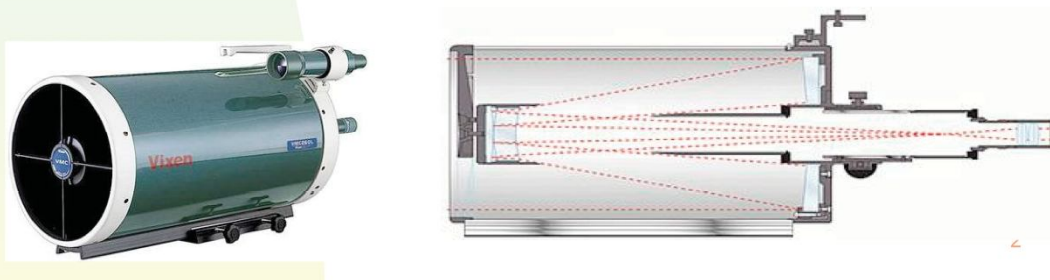
1

12 Le détecteur CCD

- 12.1 Télescope VMC 260: présentation
- 12.2 Monture CGE
- 12.3 Mise en station de la monture CGE
- 12.4 Fonctionnement simplifié d' un CCD
- 12.5 Avantages du CCD
- 12.6 Observations avec un CCD
 - 12.6.1 bruits et rapport S/B
 - 12.6.2 réduction des données
- 12.7 Camera SBIG STL 4020M
- 12.8 Projets de travaux de groupe

12.1 Télescope VMC 260: présentation

Caractéristique	Valeur
Type	Klevtsov
Diamètre	260mm
Focale	2990mm
Rapport F/D	11.5
Pouvoir séparateur	0.45''
Magnitude limite (visuelle)	14.2



Télescope VMC pour Vixen Maksutov Cassegrain
Monture Célestron CGE

12.2 Monture CGE



- Monture équatoriale de type allemande
- Motorisée en RA, DEC
- Système de pointage GOTO

8/12/2006

3

12.3 Mise en station de la monture CGE

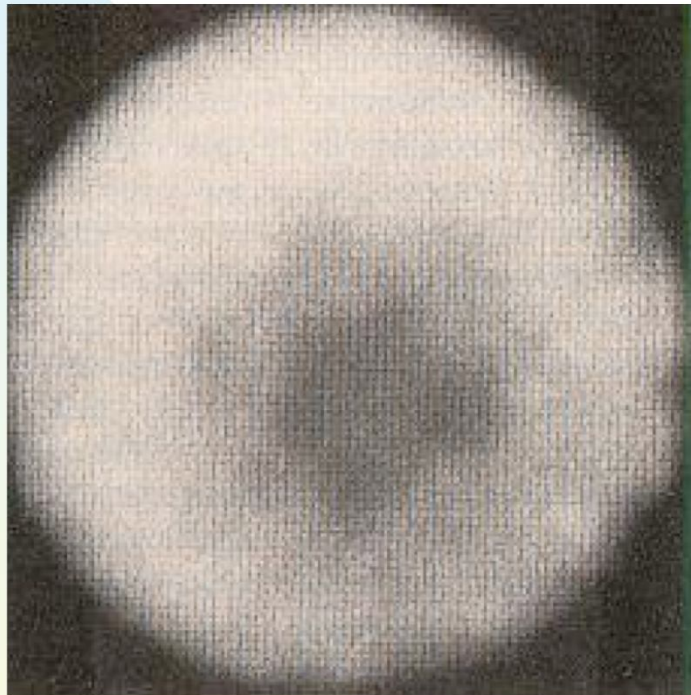
- Mise à niveau
- Equilibrage de l'ensemble tube+monture en RA,DEC
- Calibration du système GOTO
- Aide à la mise en station sur l'étoile polaire

8/12/2006

4

12 Le détecteur CCD

12.1 Introduction



8/12/2006

Il semble qu'Uranus soit le premier astre à avoir été photographié au moyen d'un CCD en 1975 par des chercheurs du JPL et des astronomes de l'Université d'Arizona. Ce cliché a été obtenu au foyer d'un télescope de 61 pouces situé sur les montagnes de Santa Catalina près de Tucson (Arizona). Cette image d'Uranus a été prise à la longueur d'onde de 8900 Å dans le proche infra-rouge. La région sombre correspond à une région d'absorption prononcée par des bandes de méthane, proche du pôle sud d'Uranus. ⁵

12 Le détecteur CCD

12.1 Introduction

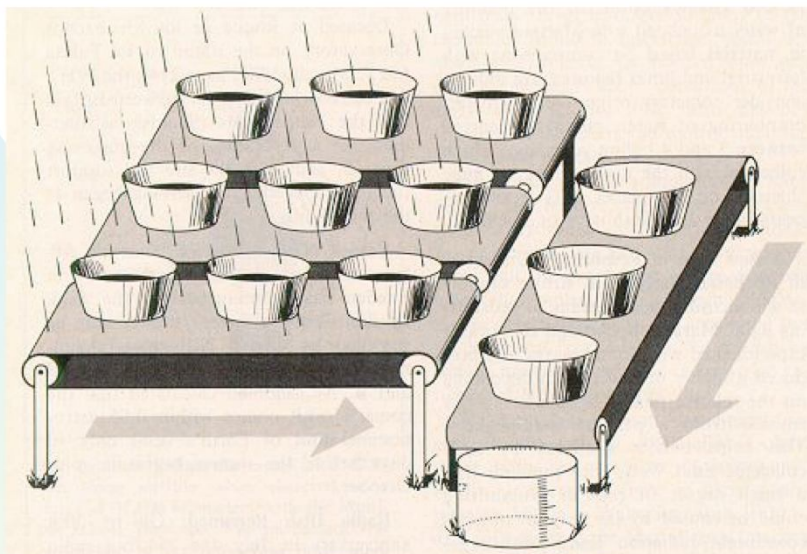
La plupart des télescopes des années 1980 n'étaient pas beaucoup plus grands que ceux qui étaient déjà utilisés il y a plusieurs décennies. Pourtant, les astronomes pouvaient désormais étudier des objets qui sont des centaines, voire des milliers de fois, plus faibles que ceux observés dans les années 30. L'explication est simple: des améliorations très importantes de la sensibilité des détecteurs de photons ont été réalisées au cours de ces dernières décennies. Ces améliorations s'avèrent être aussi importantes que celles qui ont affecté le développement du télescope au XVII^{ème} siècle ou celui de la plaque photographique au XIX^{ème} siècle.

Parmi l'ensemble des détecteurs modernes de photons, un de ceux-ci se distingue de façon particulière parce qu'il semble presque parfait. Il s'agit du CCD (de l'anglais "charge-coupled device" que l'on peut traduire en français par "dispositif à couplage de charge"). Il a la réputation de permettre la détection d'une grande fraction (typiquement $\geq 80\%$) des photons dont la longueur d'onde est comprise entre celles des rayons X mous et du proche infra-rouge. En comparaison, les clichés photographiques les plus sensibles ne permettent la détection que d'environ 2 à 3% des photons qui les impressionnent, et ceci, dans un domaine de longueurs d'onde beaucoup plus restreint.

12.2 Historique

Le développement des CCDs remonte à la fin des années 60 lorsque deux chercheurs du "Bell Telephone Laboratories", Williard S. Boyle et George E. Smith, cherchaient à mettre au point un nouveau type de circuit à très grande capacité de mémoire pour les ordinateurs.

12.4 Le détecteur CCD : Fonctionnement simplifié



Déterminer la distribution de brillance d'un astre céleste au moyen d'un CCD est fort semblable à la mesure des précipitations de pluie sur une plantation. Dès que la pluie a cessé, les seaux sont déplacés horizontalement sur les tapis roulants. Dès que les seaux d'une colonne arrivent en fin de course, leur contenu est déversé dans un des seaux situés sur le tapis roulant vertical. Le contenu de cette rangée de seaux est ensuite déversée, un à un, dans le récipient de mesure (pesée ou volume).

8/12/2006

6

12 Le détecteur CCD

En plus de cette caractéristique essentielle, il est très vite apparu que leur nouveau circuit, construit sur un substrat semi-conducteur à base de silicium, était très sensible à la lumière visible. Ceci allait révolutionner la technologie des détecteurs de lumière, surtout dans le cadre d'applications astronomiques.

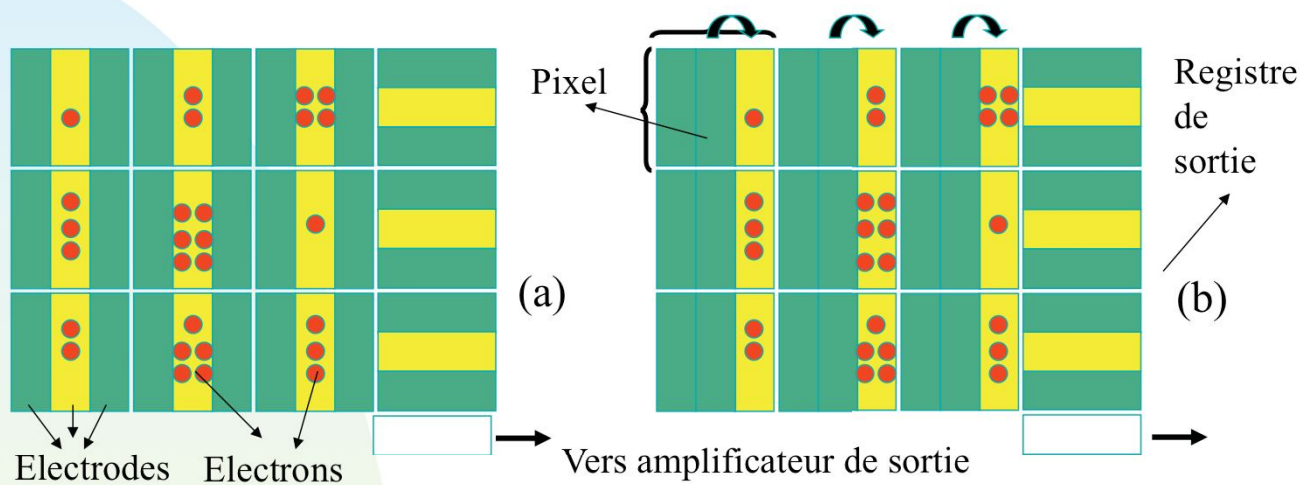
Aujourd'hui, les CCDs sont présents dans tous les instruments qui touchent à la photographie électronique (cf. télévision, systèmes vidéo, caméras, etc.).

Les astronomes ont été parmi les premiers scientifiques à reconnaître les performances extraordinaires et prometteuses des CCDs. Déjà en 1972, des chercheurs du Jet Propulsion Laboratory (JPL) à Pasadena (CA) ont établi un programme de développement des CCDs pour l'astronomie spatiale. Trois années plus tard, l'équipe du JPL en collaboration avec des astronomes de l'Université d'Arizona, ont obtenu ce qui est très probablement la première image astronomique au moyen d'un CCD (voir le cliché à la page précédente).

Aujourd'hui, tous les télescopes modernes sont équipés d'instruments dont les détecteurs sont des CCDs. Ce sont, par excellence, les détecteurs des caméras visibles pour l'imagerie directe ... mais aussi les détecteurs au foyer de spectrographes. De plus, la plupart des récentes et futures missions spatiales (cf. Galileo, Télescope de Hubble, AXAF, etc.) sont équipées d'instruments dont les détecteurs sont des CCDs.

Le mode de fonctionnement d'un CCD est très simple en principe. Une très belle analogie, suggérée par Jerome Kristian, est souvent utilisée (voir Fig. ci-dessus): il faut imaginer un réseau de seaux répartis de façon régulière sur un grande plantation. Après une forte averse, les seaux remplis d'eau sont déplacés sur des tapis roulants vers une station de pesage où la quantité d'eau déversée sur la plantation peut être mesurée avec précision.

12.4 Le détecteur CCD : Fonctionnement simplifié



Le fonctionnement d'un CCD est illustré au moyen d'un CCD simplifié constitué par 9 pixels, un registre de sortie et un amplificateur. Chaque pixel est divisé en 3 régions (électrodes servant à créer des puits de potentiel). (a) au cours d'une pose, l'électrode centrale de chaque pixel est portée à un potentiel plus élevé (en jaune) que les autres (en vert). Il y a collection des charges. (b) à la fin de la pose, les potentiels des électrodes sont changés et les charges transférées d'une électrode à l'autre.

8/12/2006

7

12 Le détecteur CCD

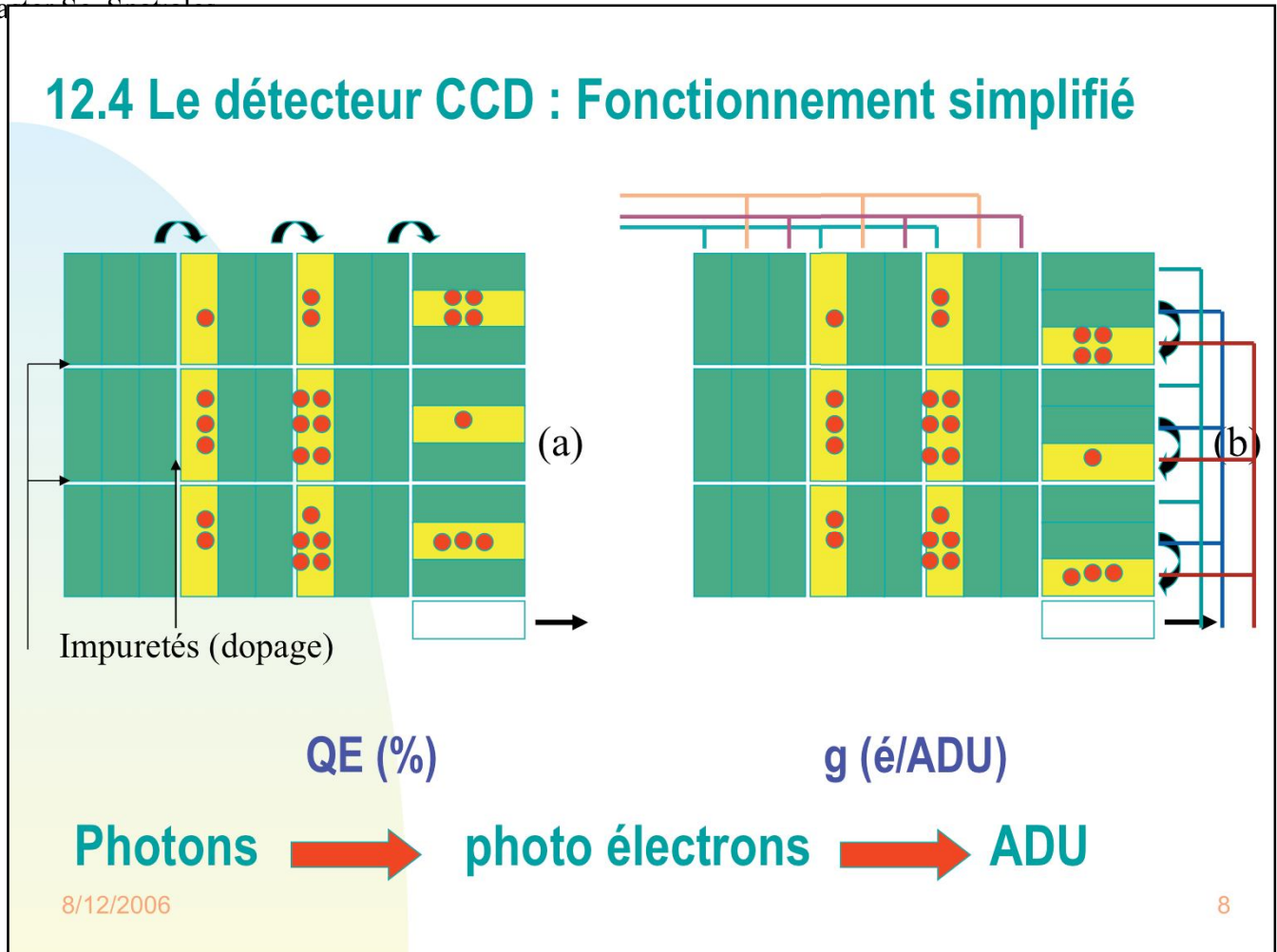
Non seulement il devient possible de connaître la quantité d'eau totale déversée sur le champ mais aussi sa répartition spatiale. Un CCD fonctionne suivant le même principe: les gouttes d'eau étant remplacées par les photons, les seaux par les pixels, etc. (cf. Figures ci-dessus et suivantes).

12.3 Fonctionnement simplifié d'un CCD

En vue de produire une image, un CCD doit réaliser quatre fonctions:

- 1) générer des photoélectrons (cf. la pluie),
- 2) collecter les électrons (cf. les seaux),
- 3) transférer les charges collectées (cf. les tapis roulants),
- 4) lire ces charges (cf. station de mesure).

La première fonction est basée sur l'effet photo-électrique. L'absorption de lumière dans le réseau de silicium du CCD génère ces photoélectrons, proportionnels en nombre aux photons incidents. Ceux-ci sont immédiatement collectés dans des sites bien définis, les plus proches. Ces sites (cf. les seaux) sont appelés pixels (de l'anglais "picture elements"). Ces pixels sont définis au moyen d'un réseau d'électrodes disposées à la surface du CCD. Les électrodes forment de véritables puits de potentiel, pour empêcher que les charges collectées ne s'échappent. Lorsque la pose est terminée, le transfert des charges (cf. déplacement des seaux sur les tapis roulants) est assuré en changeant de façon coordonnée les potentiels aux bornes de chaque triplet d'électrodes de telle façon que les électrons puissent se déplacer horizontalement d'un pixel à l'autre. A la fin de chaque rangée de pixels se trouve le registre de sortie (cf. tapis roulant vertical),



12 Le détecteur CCD

rangée d' électrodes extérieure à la région photosensible du CCD et disposée à angle droit avec celle-ci. Ce registre transmet un à un les paquets de charges vers un amplificateur de sortie où, à la fin de cette chaîne d' opérations, les charges sont mesurées et converties en une suite de chiffres enregistrés sur le disque d' un ordinateur. Le signal enregistré peut en-suite être traité, calibré et analysé. On peut restituer sous forme d' une image numérique la distribution de brillance de l' astre observé (cf. distribution spatiale des précipitations sur le champ).

12.4 Avantages du CCD

Afin de comprendre pourquoi les CCDs sont si utiles et puissants, il est bon de rappeler les caractéristiques essentielles d' un excellent détecteur astronomique. Celles-ci sont:

- 1) une bonne *résolution spatiale* afin de permettre de voir des détails fins sur l' astre étudié,
- 2) une *efficacité quantique* aussi élevée que possible, en vue de pouvoir détecter des astres très faibles. On veut donc que la fraction de photons détectés soit très grande,
- 3) une *réponse spectrale* très large. Le détecteur doit être sensible à la radiation dans un grand domaine de longueurs d' onde,
- 4) un très faible *bruit*. Le bruit doit rester très petit devant les très faibles signaux d' astres qu' on veut détecter,
- 5) une *dynamique* de signaux détectés très grande. Le rapport des flux entre les objets détectés les plus faibles et les plus brillants doit être aussi grande que possible,
- 6) une *précision photométrique* élevée. On veut pouvoir déterminer les magnitudes des différents astres détectés avec une précision photométrique optimale (e.g. $\leq 0,01$ mag.),

■ 12.5 Avantages du CCD

- 1) bonne *résolution spatiale*
- 2) *efficacité quantique* aussi élevée que possible
- 3) *réponse spectrale* très large
- 4) très faible *bruit*
- 5) *dynamique* des signaux détectés très grande
- 6) *précision photométrique* élevée
- 7) irréprochable *linéarité*
- 8) une *rigidité* fiable

8/12/2006

9

12 Le détecteur CCD

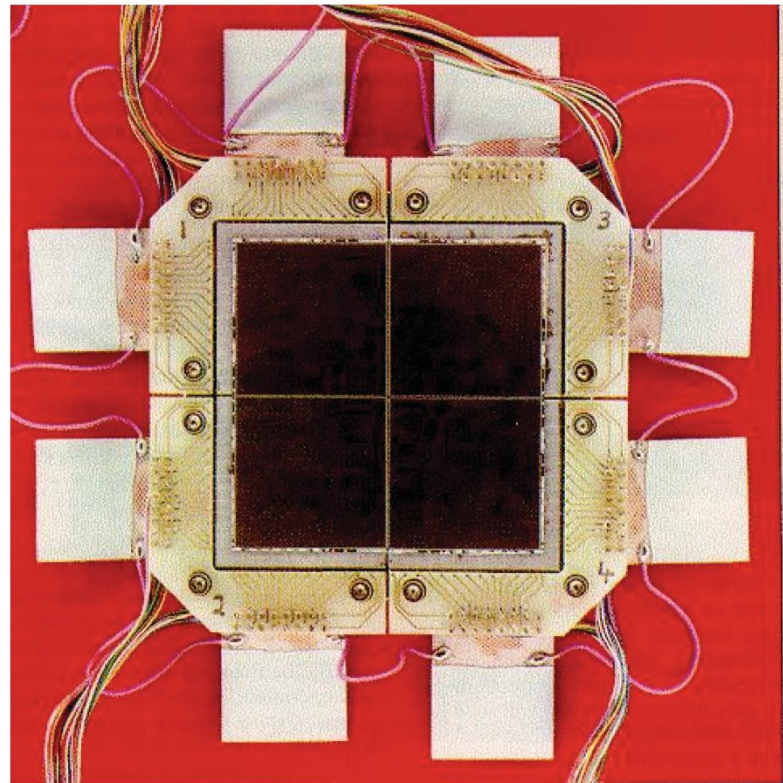
- 7) une irréprochable *linéarité*. On veut que le signal mesuré soit proportionnel au flux des astres observés.
- 8) une *rigidité* fiable pour permettre des mesures astrométriques de qualité.

Comme nous allons le montrer, le CCD est actuellement le détecteur qui présente les meilleures performances pour toutes ces caractéristiques. En effet:

1) La résolution d'une image prise avec un CCD et le champ d'une telle image dépendent bien entendu du nombre de pixels total dont le CCD est constitué. Les premiers grands CCDs fabriqués en 1973 par la firme Fairchild Semiconductor comprenaient 10 000 pixels (100 colonnes et 100 rangées). Aujourd'hui, très courant sont devenus les CCDs 2048 × 2048 pixels (environ 4 millions de pixels). Des CCDs de taille encore supérieure (cf. 4096 × 4096 pixels, 4096 × 8192 pixels), voir 10000 × 10000 pixels, existent mais ne sont pas courants et restent très chers.

■ 12.5 Avantages du CCD

Mosaïque de 4 CCDs, contenant chacun 2040 x 2048 pixels. Ce détecteur composite mesure environ 6 cm de côté et contient un total de 16 millions de pixels (Kitt Peak National Observatory, Arizona).



8/12/2006

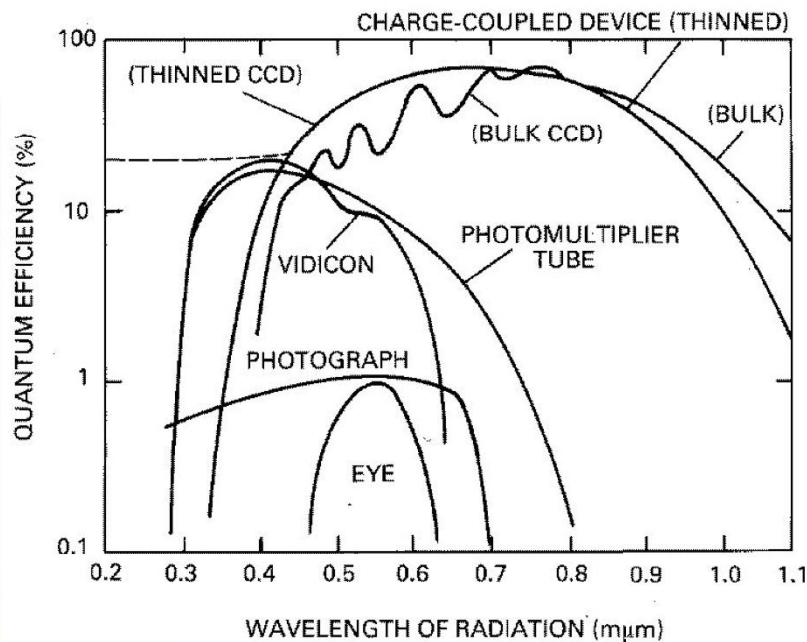
10

12 Le détecteur CCD

On pallie au problème de la taille des CCDs, qu'on veut toujours plus grands, en fabriquant des mosaïques de CCDs (cf. Figure suivante). La taille des pixels est couramment de l'ordre de 15×15 ou 25×25 microns.

Bien que ces nombres soient impressionnants, la taille des CCDs reste très petite, surtout lorsqu'on compare les CCDs aux clichés photographiques. Ainsi, un CCD de 2048×2048 pixels, dont la taille individuelle vaut 15 microns, mesure seulement environ 3×3 cm. Une plaque photographique pour un télescope de Schmidt peut mesurer 30×30 cm, c'est-à-dire qu'elle est environ 100 fois plus grande que le CCD envisagé, ou encore, une telle plaque contient l'équivalent d'environ 400 millions de pixels.

12.5 Avantages du CCD



Courbes d'efficacité quantique de divers types de CCD en fonction de la longueur d'onde, comparées à celles d'autres détecteurs. On remarquera le très grand domaine de longueur d'onde pour la réponse spectrale des CCDs (McLean 1997). 11

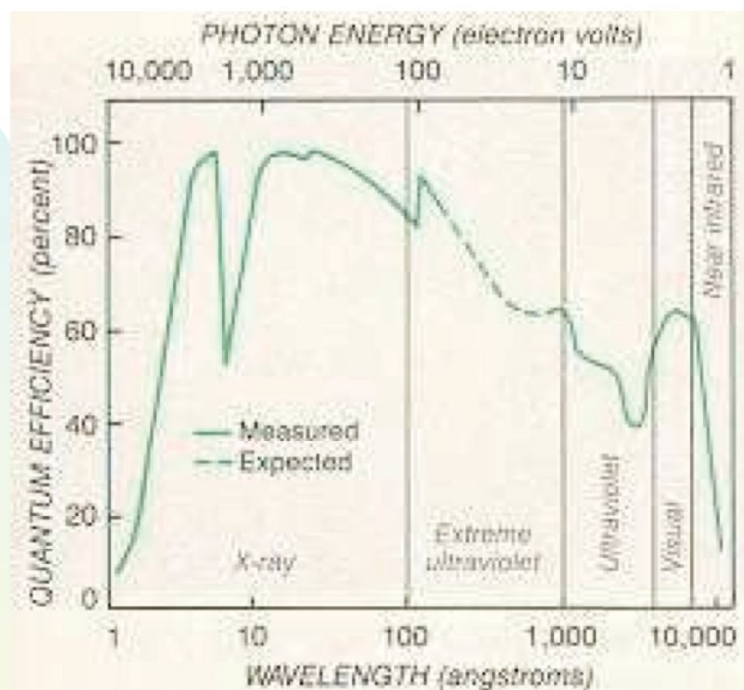
12 Le détecteur CCD

Cependant, les CCDs possèdent d'autres avantages qui les différencient nettement de la plaque photographique, et d'ailleurs de tous les autres détecteurs en général. 2) La figure ci-dessus compare l'efficacité quantique d'un CCD avec celle d'autres détecteurs. Ainsi, l'œil - le tout premier détecteur astronomique - possède aux longueurs d'onde visibles une efficacité quantique qui est proche du pourcent. En d'autres termes, nous ne parvenons à détecter qu'un seul photon parmi une centaine qui touchent notre œil. En revanche, plus de 50% (> 80% à certaines longueurs d'onde) des photons tombant sur la surface d'un CCD sont détectés par celui-ci.

3) De plus, le domaine de la réponse spectrale de notre œil est beaucoup plus restreint en comparaison avec celui d'un CCD. Cette même limitation affecte les autres détecteurs tels que les photocathodes, le film photographique, et les détecteurs TV tels que le vidicon.

Remarquons que lorsqu'un CCD est illuminé par le dessus, il est plutôt insensible à la lumière ultraviolette et aux rayons X, les électrodes qui entourent les pixels individuels étant opaques à ces photons. On améliore d'environ 20% l'efficacité quantique des CCDs dans l'ultraviolet en recouvrant la surface du dessus par une mince pellicule de phosphore dont la fonction principale est de convertir les photons ultraviolets en des photons possédant une plus grande longueur d'onde à laquelle le CCD est sensible. Une méthode beaucoup plus performante consiste à amincir le CCD et à l'illuminer par dessous. Les photons incidents peuvent alors entrer en contact avec les régions sensibles du CCD, sans être absorbés par les électrodes. Cependant, on observe sur la nouvelle face d'entrée du CCD l'apparition d'un puits de potentiel qui tend à piéger les photoélectrons sur la surface du dessous. Les ingénieurs ont trouvé deux façons de parer à ce problème. La première méthode (appelée en anglais "back side charging") consiste à flasher au moyen de lumière ultraviolette le CCD avant son utilisation. De cette façon, on crée un excès de photoélectrons qui détruisent le puits de potentiel sur la surface arrière du CCD.

■ 12.5 Avantages du CCD



Les CCDs amincis sont caractérisés par une très grande couverture spectrale.

8/12/2006

12

12 Le détecteur CCD

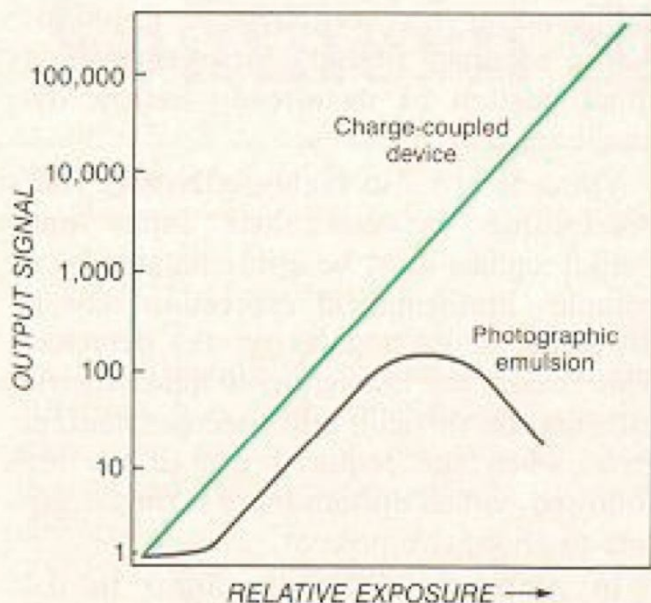
C'est cette méthode qui est employée à bord du Télescope Spatial de Hubble. Dans la seconde méthode (appelée en anglais "flash gate"), une mince couche d'or ou de platine est déposée sur la surface arrière du CCD. Il devient alors possible de détruire le puits de potentiel indésirable en appliquant une différence de potentiel électrique entre la surface arrière et le semi-conducteur du CCD.

Il est courant aujourd'hui de fabriquer de tels CCDs amincis dont la réponse spectrale s'étend du domaine des rayons X mous (i.e. $\sim 1 \text{ \AA}$) jusqu'au proche infra-rouge ($\sim 10\,000 \text{ \AA}$, voir Figure ci-dessus). Aucun autre détecteur ne possède une aussi grande couverture spectrale. Les CCDs amincis constituent des détecteurs idéaux pour des missions spatiales car, pour celles-ci, le problème de l'absorption atmosphérique est inexistant et il est dès lors possible d'avoir accès à l'observation des rayons X et du proche infra-rouge au moyen d'un seul et même détecteur.

4) Une des caractéristiques essentielles d'un détecteur est le bruit généré par celui-ci, surtout lorsque ce dernier devient comparable au signal d'un astre très faible qu'on essaie de détecter. Les électrons collectés dans chaque pixel du CCD sont en fait comptés par un seul transistor qui fait partie intégrante du circuit de sortie. La précision du comptage des charges électriques dépend du bruit (de lecture) induit par ce transistor (anciennement 30 à 40 électrons par pixel). Aujourd'hui, le bruit des CCDs s'avère être très petit. Il peut être de l'ordre de seulement 2 à 3 électrons par pixel, comparable au signal enregistré au moyen d'un télescope de 1,5m, chaque seconde, en provenance d'une étoile de 24^{ème} magnitude.

5) Un des autres avantages des CCDs est leur très grande dynamique. Cette dynamique représente en quelque sorte le rapport maximum qu'il est possible de mesurer entre les flux des objets les plus faibles et les plus brillants. Plus grande est la taille des pixels individuels, plus grande est leur capacité à collecter des photoélectrons, avant d'être remplis (saturés).

12.5 Avantages du CCD



8/12/2006

13

Les CCDs constituent des détecteurs extrêmement linéaires. Si on augmente d'un facteur 2 le temps d'exposition, le signal enregistré devient très exactement deux fois plus important. Le CCD permet ainsi la détection simultanée d'objets très faibles et très brillants. Au contraire, le cliché photographique présente un régime de linéarité très réduit. Il y a tout d'abord un seuil minimum d'exposition en dessous duquel le cliché ne forme pas d'image de l'objet photographié. A partir d'un seuil supérieur d'exposition, l'émulsion sature. Pire encore, le signal enregistré diminue.

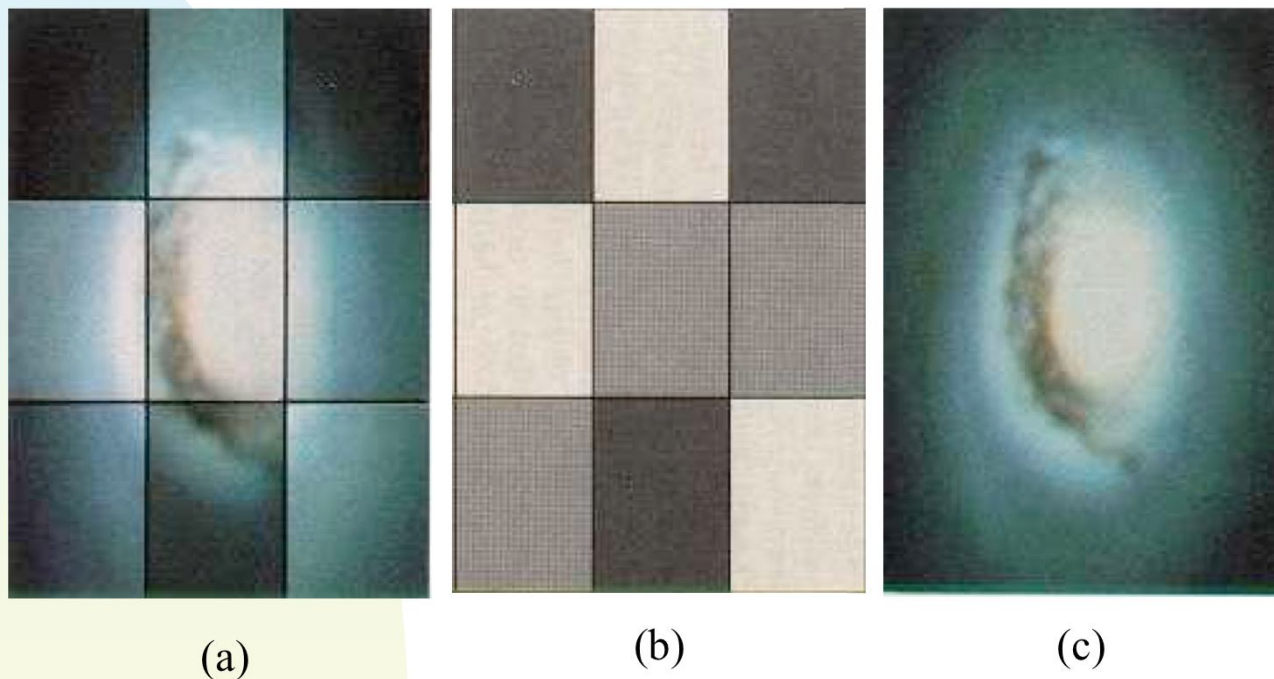
12 Le détecteur CCD

Par exemple, les pixels de 15 microns de côté des CCDs Texas de 800×800 pixels dans la caméra WFPC2 à bord du Télescope Spatial de Hubble peuvent chacun accepter environ 75 000 électrons. Des pixels deux fois plus large possèdent une capacité d'environ 1 million d'électrons. Si le bruit de lecture est de l'ordre de 10 électrons, la dynamique d'un tel CCD est proche de 100 000 ($= 1 \text{ million d'électrons} / 10 \text{ électrons}$). Cette caractéristique est très importante dans la plupart des applications astronomiques. Tout champ d'étoiles contient en effet des objets très faibles et d'autres beaucoup plus brillants. Il est important de pouvoir détecter ces objets avec une différence de magnitude aussi élevée que possible. Une dynamique de 100 000 correspond à environ 12,5 magnitudes. Pour comparaison, la dynamique d'un cliché photographique n'est que de l'ordre de 100, correspondant à une différence de seulement 5 magnitudes.

6) Certains détecteurs très sensibles s'avèrent être d'une très petite utilité pour les astronomes parce qu'ils ne sont pas stables. D'une nuit à l'autre, ou parfois au cours d'une même nuit, un détecteur avec tous ses circuits électroniques peut présenter une sensibilité variable. Grâce au fait que les CCDs sont composés d'éléments solides, ils s'avèrent être très stables. Une fois qu'un CCD a été calibré photométriquement en observant une étoile standard, on parvient à reproduire les mesures photométriques de l'étoile au cours d'une même nuit avec une précision de l'ordre du demi pourcent (correspondant à environ 0,005 magnitude).

7) Les CCDs sont aussi réputés pour leur très bonne linéarité. En d'autres mots, le nombre d'électrons collectés dans un pixel est proportionnel au nombre de photons incidents sur celui-ci (cf. la figure ci-dessus). Ni la plaque photographique, ni les détecteurs TV de type vidicon ne possèdent cette qualité. A cause des effets de non-linéarité, il est très difficile au moyen de clichés photographiques de parvenir à une précision photométrique meilleure que 5%. Cette précision ne dépasse jamais les 2% pour les détecteurs de type vidicon.

12.5 Avantages du CCD



8/12/2006

Technique du "flat field" (voir texte)

14

12 Le détecteur CCD

Les CCDs sont linéaires à mieux de 0,1%, à l'intérieur de tout leur intervalle dynamique. Il est dès lors relativement simple de corriger les différences en sensibilité (cf. surface) des différents pixels d'un CCD. En effet, grâce à la remarquable linéarité des CCDs, cette sensibilité relative reste la même entre les pixels, indépendamment du niveau du flux incident (dans le cas du vidicon, les effets de non linéarité varient d'un endroit à l'autre du détecteur et l'extraction de l'information photométrique reste une opération très compliquée, délicate et peu précise).

Pour corriger cette variation de sensibilité entre les différents pixels d'un CCD, on emploie la technique du "flat field" (une traduction peu originale est "champ plat"). Les trois figures ci-dessus permettent de comprendre le fonctionnement et l'essence de cette méthode. La figure (a) correspond à une image CCD brute (simulée) d'une galaxie, telle qu'on l'observerait au foyer d'un télescope. Dans notre exemple, le CCD est formé de 9 pixels, fictifs, panoramiques. Cette image d'une galaxie ne nous apparaît pas de façon conforme, essentiellement à cause des différences de sensibilité relative existant entre les 9 pixels. Une telle image ne peut pas être utilisée telle quelle. Il nous faut absolument la corriger des effets pervers mentionnés ci-dessus. En vue de corriger ces effets de non-uniformité, on observe en général au cours de la nuit une source de lumière uniforme, telle que la lumière du crépuscule ou de l'aurore, soit encore la lumière d'une lampe brillante projetée sur l'intérieur du dôme de la coupole. Le cliché CCD obtenu par cette technique du champ plat permet de visualiser directement la sensibilité de réponse relative de chacun des 9 pixels (cf. Figure (b)). Il ne suffit plus que de diviser le cliché CCD brut de la galaxie (cf. Figure (a)) par le "flat field" (cf. cliché CCD (b)) en vue de corriger l'image de la galaxie de la réponse relative non uniforme des pixels du CCD. Le résultat final obtenu est identique, au moins en principe, à l'image que nous aurions obtenue directement au moyen d'un CCD idéal pour lequel tous les pixels possèdent une réponse identique (cf. Fig. (c)).

12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Bruits et rapport S/B

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + \dots} \quad (12.6.5.1)$$

$$S = S_o + S_n + S_c, \quad (12.6.5.2)$$

$$B^2 = B_o^2 + B_n^2 + \ell^2 + B_c^2, \quad (12.6.5.3)$$

$$\frac{S}{B} = \frac{S_o + S_n + S_c}{\sqrt{B_o^2 + B_n^2 + \ell^2 + B_c^2}} \quad (12.6.5.4)$$

8/12/2006

15

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.5 Amélioration du rapport S/B des observations astronomiques

La connaissance du rapport S/B d'une image suffit à définir sa bonne ou mauvaise qualité (cf. figures précédentes). Si on parvient à comprendre toutes les sources de bruit affectant un cliché astronomique, on pourra définir une stratégie pour le diminuer au maximum et donc améliorer la qualité des images. Le fait que le bruit B ne croît en général pas aussi rapidement que le signal S dans un pixel va nous permettre en allongeant les temps de pose, en recherchant des sources plus brillantes, ou en additionnant de multiples clichés, d'obtenir des résultats caractérisés par un meilleur rapport S/B.

Quelle est l'origine du bruit affectant une image détectée au moyen d'un CCD? On distingue les bruits dus aux photons (bruit poissonien, i.e. si $S \sim N$, $B \sim \sqrt{N}$ et $S/B \sim \sqrt{N}$), à la lecture du CCD (bruit gaussien; $\sigma = \ell$), au courant noir (bruit poissonien $\sim \sqrt{[R_{n0} 2^{(T-T_0)/\Delta T} t]}$), au fond de ciel (bruit poissonien $\sim \sqrt{\text{Ciel}}$), aux transformations opérées sur les clichés astronomiques (cf. la soustraction des darks, la division par un flat field moyen, etc.).

On peut raisonnablement supposer que ces différentes sources de bruit sont indépendantes et donc que les bruits s'ajoutent en quadrature suivant la formule

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + \dots} \quad (12.6.5.1)$$

Si o représente l'attribut objet, n celui du courant noir, c de la brillance du ciel et ℓ du bruit de lecture du CCD, on trouve alors pour le signal S et le bruit B de chaque pixel, les relations suivantes

12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Bruits et rapport S/B

$$\frac{S}{B} = \frac{S_0 + S_n + S_c}{\sqrt{S_0 + S_n + S_c + l^2}} \quad (12.6.5.5)$$

$$\frac{S}{B} = \frac{\sqrt{C_0}}{\sqrt{1 + \frac{C_c}{C_0} + n \frac{l^2}{C_0}}} \quad (12.6.5.6)$$

$$\frac{S}{B} = \sqrt{C_0} \quad (12.6.5.7)$$

8/12/2006

16

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.5 Amélioration du rapport S/B des observations astronomiques

$$S = S_0 + S_n + S_c, \quad (12.6.5.2)$$

$$B^2 = B_0^2 + B_n^2 + l^2 + B_c^2, \quad (12.6.5.3)$$

$$\frac{S}{B} = \frac{S_0 + S_n + S_c}{\sqrt{B_0^2 + B_n^2 + l^2 + B_c^2}} \quad (12.6.5.4)$$

On peut simplifier cette dernière expression en tenant compte du caractère poissonien du signal objet, courant noir et fond de ciel. Il vient que

$$\frac{S}{B} = \frac{S_0 + S_n + S_c}{\sqrt{S_0 + S_n + S_c + l^2}} \quad (12.6.5.5)$$

Supposons tout d'abord que les clichés dark et flat-field possèdent un rapport S/B très élevé, qu'on parvienne à effectuer une estimation du bruit de fond de ciel très précise avant de le soustraire du cliché astronomique et incluons la contribution du courant noir dans celle du fond de ciel. Soit n le nombre de pixels impliqués lors de la mesure du signal dans l'objet, l le bruit de lecture du CCD, C_0 le nombre total de coups (i.e. d'électrons détectés) dans l'objet et C_c le nombre total de coups dans le ciel. On trouve alors facilement que

$$\frac{S}{B} = \frac{\sqrt{C_0}}{\sqrt{1 + C_c/C_0 + nl^2/C_0}} \quad (12.6.5.6)$$

En l'absence de bruit de lecture et de bruit de fond de ciel (incluant le bruit de courant noir), on retrouve le résultat idéal attendu, à savoir que

$$\frac{S}{B} = \sqrt{C_0}$$

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Bruits et rapport S/B

$$S_1 = \sum S_i = NS_i \quad B_1 = \sqrt{\sum S_i} = \sqrt{NS_i} \quad \frac{S_1}{B_1} = \sqrt{NS_i} \quad (12.6.5.8)$$

$$S_2 = NS_i \quad B_2 = \sqrt{S_2} \quad \frac{S_2}{B_2} = \sqrt{NS_i} \quad (12.6.5.9)$$

8/12/2006

17

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.5 Amélioration du rapport S/B des observations astronomiques

En présence de bruit, le rapport S/B diminue (cf. Eq. (12.6.5.6))! L'importance du fond de ciel, du nombre n retenu de pixels et du bruit de lecture interviennent tous dans son estimation. On peut améliorer le S/B en minimisant le dénominateur dans l'équation (12.6.5.6).

Une façon supplémentaire de diminuer ce facteur consiste à binner les pixels, c'est-à-dire à lire en une seule fois le contenu des charges dans 2×2 , ou 2×1 , ou 3×3 , etc. pixels. On peut aussi profiter des meilleures conditions d'agitation atmosphérique en vue de concentrer un maximum de lumière de l'astre à l'intérieur d'un minimum de pixels, en vue de diminuer le bruit de fond de ciel (y compris le bruit de courant noir).

Nous avons établi en (12.6.2.3) que le fait d'ajouter N poses permet d'améliorer le rapport S/B d'un facteur \sqrt{N} . On peut dès lors se poser la question suivante: vaut-il mieux obtenir et additionner N poses identiques de t secondes ou prendre une seule pose de $N t$ secondes? La réponse à cette question est simple. Si le bruit des poses individuelles est limité par le bruit de photon (et non par le bruit de lecture), alors il est presque équivalent de faire l'un ou l'autre. En effet, on trouve dans les premier et deuxième cas que

$$S_1 = \sum S_i = N S_i, \quad B_1 = \sqrt{\sum S_i} = \sqrt{N S_i}, \quad S_1/B_1 = \sqrt{N S_i} \quad \text{et} \quad (12.6.5.8)$$

$$S_2 = N S_i, \quad B_2 = \sqrt{S_2}, \quad S_2/B_2 = \sqrt{N S_i}. \quad (12.6.5.9)$$

En vue d'éviter la saturation des objets brillants, de pouvoir éliminer les rayons cosmiques, etc. on aura plutôt intérêt à opter pour la solution des N poses.

12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Bruits et rapport S/B

$$S_1 = \sum S_i = NS_i, \quad B_1 = \sqrt{\sum (S_i + l^2)} : \sqrt{Nl^2}$$

$$\frac{S_1}{B_1} = \sqrt{NS_i} \frac{\sqrt{S_i}}{l} \quad (12.6.5.10)$$

$$S_2 = NS_i, \quad B_2 = \sqrt{S_2}, \quad \frac{S_2}{B_2} = \sqrt{NS_i} \quad (12.6.5.11)$$

$$\frac{S_1}{B_1} = \frac{S_2}{B_2} \frac{\sqrt{S_i}}{l} = \frac{S_2}{B_2} \quad (12.6.5.12)$$

8/12/2006

18

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.5 Amélioration du rapport S/B des observations astronomiques

Si on suppose maintenant qu'au cours d'une pose individuelle, le bruit de lecture l domine le bruit de photons, i.e. $l \gg \sqrt{S_i}$, mais qu'après un temps d'intégration $N t$ on a $l \ll \sqrt{NS_i}$, il vient alors pour les premier et deuxième cas précédents

$$S_1 = \sum S_i = N S_i, \quad B_1 = \sqrt{\sum (S_i + l^2)} \sim \sqrt{N l^2}, \quad S_1/B_1 = \sqrt{N S_i} (\sqrt{S_i} / l) \text{ et} \quad (12.6.5.10)$$

$$S_2 = N S_i, \quad B_2 = \sqrt{S_2}, \quad S_2/B_2 = \sqrt{N S_i}. \quad (12.6.5.11)$$

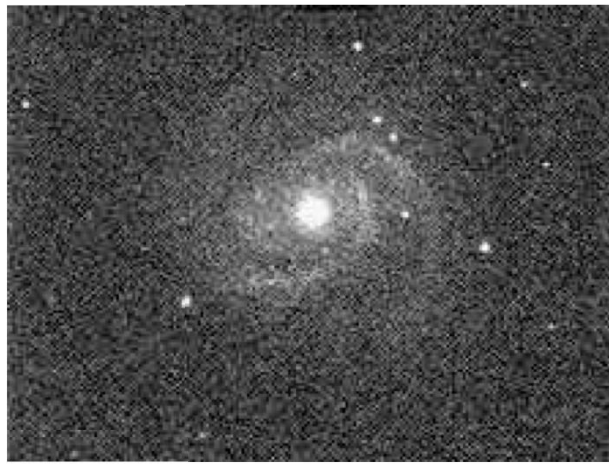
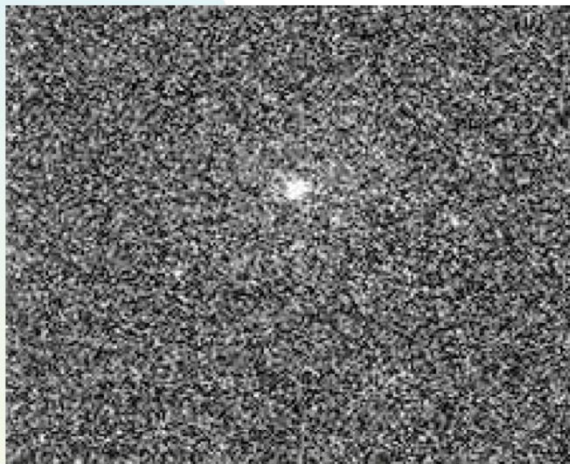
On trouve donc dans ce dernier cas que

$$S_1/B_1 = S_2/B_2 (\sqrt{S_i} / l) \ll S_2/B_2. \quad (12.6.5.12)$$

On a donc intérêt lorsque le bruit de lecture est trop important d'intégrer suffisamment longtemps pour se retrouver dans le régime dominant du bruit de photons. A partir de ce moment, il redevient justifié d'additionner des poses individuelles.

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Bruits et rapport S/B



Comme on peut le voir sur cette série de 4 expositions de 1, 10, 100 et 1000 sec. de la galaxie M100, obtenues au moyen d'un télescope Célestron de 11 pouces de diamètre ouvert à $f/6,2$, le rapport signal sur bruit (S/B) augmente de façon significative en fonction du temps d'intégration ... (suite page suivante)

8/12/2006

19

12 Le détecteur CCD

8) Les vidicons et autres détecteurs présentent encore d'autres défauts par rapport au CCD qui limitent sérieusement leur intérêt pour des observations astronomiques. Beaucoup de détecteurs forment en effet des images sur une substance qui est sensible à la lumière. Cette dernière est ensuite lue par le balayage d'un faisceau d'électrons, comme dans le tube d'une caméra de télévision. Un premier problème est de déterminer de façon précise la localisation du faisceau d'électrons à tout instant, car sa position ne peut pas être mesurée directement. Les positions relatives de points dans cette image peuvent ne pas correspondre exactement à celles de ces mêmes points dans l'objet observé. D'autres distortions d'image induites par l'application de champs magnétiques au faisceau d'électrons rendent assez incertaines les déterminations précises des positions d'objets parmi d'autres. Nous dirons que la précision des mesures astrométriques des astres observés est compromise. Ces problèmes n'existent pas pour les images obtenues au moyen de CCDs. La position de chaque pixel est fixée de façon rigide lors de la fabrication du CCD.

12.5 Le CCD comme détecteur à trois dimensions

Les photons des domaines ultraviolet ($\lambda \sim 1200-3500 \text{ \AA}$), ultraviolet lointain ($\lambda \sim 120-1200 \text{ \AA}$) et X mous ($\lambda \sim 1,2-120 \text{ \AA}$) sont beaucoup plus énergétiques que les photons visibles. Lorsqu'ils sont absorbés dans le réseau de silicium du CCD, ces photons de grande énergie génèrent beaucoup d'électrons; leur nombre exact dépendant de la longueur d'onde du photon. Par exemple, un photon X possédant une longueur d'onde de $2,1 \text{ \AA}$ est capable de générer, en moyenne, 1620 électrons. Pour des longueurs d'onde typiquement plus courtes que 100 \AA , un seul photon à la fois peut être détecté et son énergie (ou longueur d'onde) déterminée en mesurant directement la quantité de charges générées.

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Bruits et rapport S/B



En plus de l'amélioration du rapport S/B en fonction du temps d'exposition, on voit aussi très clairement le changement de régime de bruit, principalement causé par le bruit de lecture du CCD dans la pose la plus courte, au bruit de photons du ciel dans la pose la plus longue.

8/12/2006

20

12 Le détecteur CCD

De très intéressantes applications astronomiques deviennent dès lors envisageables: l'obtention d'un très grand nombre de courtes poses au moyen d'un CCD permet non seulement de localiser la position d'une source émettrice mais aussi de mesurer l'énergie (le spectre!) qu'on en reçoit. Dans ce mode d'observation, le CCD est utilisé en quelque sorte comme détecteur à trois dimensions.

Des chercheurs de l'ESA sont actuellement en train de mettre au point un nouveau type de détecteur, appelé en anglais le "Super-conducting Tunnel Junction", qui offre un mode d'observation allant du proche infra-rouge jusqu'au domaine des rayons X- très analogue au CCD qui reste cependant limité à la détection de l'énergie des photons dont la longueur d'onde est inférieure à 100 Å.

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données



Image brute ...

8/12/2006

... Image traitée



21

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.1 Soustraction du biais

Pour éviter, à cause de différentes sources de bruit (bruit dû au courant noir, bruit de lecture, bruit de photons, etc.), que le signal S_i enregistré dans un pixel donné i du CCD puisse avoir une valeur négative, une valeur constante B (le biais) est systématiquement ajoutée par voie électronique (hardware) au signal de chaque pixel. Lorsqu'on réduit des clichés CCD, la première chose à faire est donc de soustraire ce biais B de chaque valeur S_i du signal pour chaque pixel individuel. Pour s'assurer que c'est bien une valeur constante B de biais qui a été ajoutée au signal de chaque pixel, il est coutumier d'obtenir, au tout début d'une mission d'observations, un certain nombre d'images biais, prises à l'abri de toute lumière, pour lesquelles le temps d'exposition est négligeable (cf. 1 sec. ou moins). L'analyse de la moyenne de tels clichés nous permet de vérifier que le biais est constant sur tout le CCD et, si c'est bien le cas, de déterminer avec une très grande précision une valeur moyenne B du signal à partir d'un grand nombre de clichés et aussi de pixels. Nous supposons dans la suite, lorsque nous parlerons de clichés "dark", de clichés "flat field", de clichés de champs célestes (appelés dans la suite clichés astronomiques) que le biais a été systématiquement soustrait de chacun d'eux. Nous ne mentionnerons plus cette soustraction du biais ... nous supposerons désormais qu'elle a été effectuée de façon implicite!

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données: les biais



1/1000 s à -20° C

8/12/2006

22

- Valeur constante B (le biais) systématiquement ajoutée au signal de chaque pixel
- Première étape de la réduction des données: soustraction de ce biais
- Obtention de plusieurs biais pris à l'abri de toute lumière et avec un temps d'intégration le plus court possible (typiquement 1/1000 s ou moins).

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Les darks

La soustraction d'un dark (cliché CCD non exposé à la lumière, de même durée d'intégration) de tout cliché astronomique constitue une étape nécessaire, surtout lorsqu'on s'intéresse à l'étude (cf. photométrie, etc.) d'objets très faibles détectés sur des poses très longues. En effet, même en l'absence de lumière, les pixels d'un CCD continuent à accumuler des charges, proportionnellement au temps d'exposition t . Ce courant noir $S_n(t)$ est dû au bruit produit par les mouvements aléatoires des électrons dans le CCD (en surface et à l'intérieur). Le courant noir par unité de temps, R_n , pour un pixel donné, dépend de la température T , suivant une loi logarithmique (pour un CCD de la série Kodak KAF, le courant noir est diminué d'un facteur 2 lorsque la température T diminue de $\Delta T = 6^\circ$ C). Si R_{n0} représente le courant noir par unité de temps, à une température de référence T_0 , on peut écrire la relation générale

$$S_n(t) = R_{n0} 2^{(T - T_0) / \Delta T} t. \quad (12.6.2.1)$$

On a donc tout intérêt à travailler à une température T suffisamment basse.

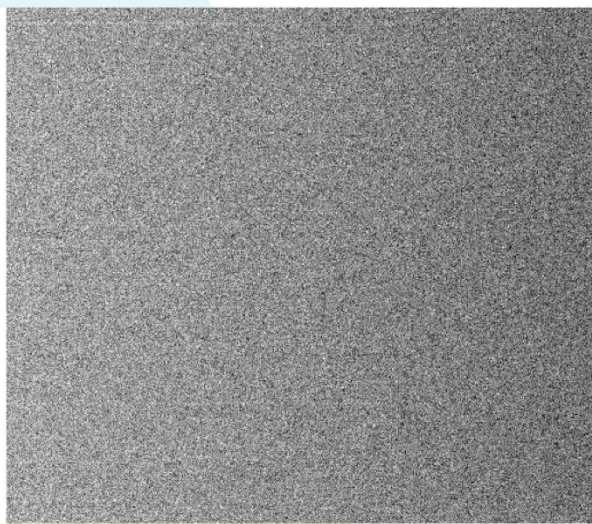
La prise de poses multiples, à l'abri de toute lumière, avec différents temps d'intégration t doit permettre de déterminer la quantité R_{n0} ou $R_n = R_{n0} 2^{(T - T_0) / \Delta T}$ pour chaque pixel individuel. De nombreuses poses seront cependant nécessaires en vue de déterminer des valeurs moyennes significatives. Si on soustrait d'une image scientifique un seul dark de même durée, cela aura pour effet de diminuer appréciablement le rapport signal sur bruit (S/B) de l'image originale.

En effet, si S représente le signal d'un dark individuel obtenu au cours d'un temps d'intégration t et B le bruit associé, on trouve que l'addition de N darks identiques sera caractérisé par un signal total S_T et un bruit B_T

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données: les darks

$$S_n(t) = R_{n0} 2^{(T - T_0) / \Delta T} t. \quad (12.6.2.1)$$



- Même en l'absence de lumière les pixels d'un CCD accumulent des charges proportionnellement au temps d'intégration. C'est ce que l'on appelle le bruit thermique.
- Ce bruit thermique diminue lorsque la température baisse
- Obtention d'un dark (cliché non exposé à la lumière) à la même température que le cliché image et avec le même temps d'intégration.

8/12/2006

60s à -20° C

23

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Les darks

La soustraction d'un dark (cliché CCD non exposé à la lumière, de même durée d'intégration) de tout cliché astronomique constitue une étape nécessaire, surtout lorsqu'on s'intéresse à l'étude (cf. photométrie, etc.) d'objets très faibles détectés sur des poses très longues. En effet, même en l'absence de lumière, les pixels d'un CCD continuent à accumuler des charges, proportionnellement au temps d'exposition t . Ce courant noir $S_n(t)$ est dû au bruit produit par les mouvements aléatoires des électrons dans le CCD (en surface et à l'intérieur). Le courant noir par unité de temps, R_n , pour un pixel donné, dépend de la température T , suivant une loi logarithmique (pour un CCD de la série Kodak KAF, le courant noir est diminué d'un facteur 2 lorsque la température T diminue de $\Delta T = 6^\circ$ C). Si R_{n0} représente le courant noir par unité de temps, à une température de référence T_0 , on peut écrire la relation générale

$$S_n(t) = R_{n0} 2^{(T - T_0) / \Delta T} t. \quad (12.6.2.1)$$

On a donc tout intérêt à travailler à une température T suffisamment basse.

La prise de poses multiples, à l'abri de toute lumière, avec différents temps d'intégration t doit permettre de déterminer la quantité R_{n0} ou $R_n = R_{n0} 2^{(T - T_0) / \Delta T}$ pour chaque pixel individuel. De nombreuses poses seront cependant nécessaires en vue de déterminer des valeurs moyennes significatives. Si on soustrait d'une image scientifique un seul dark de même durée, cela aura pour effet de diminuer appréciablement le rapport signal sur bruit (S/B) de l'image originale.

En effet, si S représente le signal d'un dark individuel obtenu au cours d'un temps d'intégration t et B le bruit associé, on trouve que l'addition de N darks identiques sera caractérisé par un signal total S_T et un bruit B_T

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données: les darks

$$S_T = N S \text{ et } B_T^2 = (N B^2), \quad (12.6.2.2)$$

$$\frac{S_T}{B_T} = \sqrt{N} \frac{S}{B} \quad (12.6.2.3)$$

$$S = S_a - S_T \text{ et } B = \sqrt{B_a^2 + B_T^2} \quad (12.6.2.4)$$

$$\frac{S}{B} = \frac{S_a - S_T}{\sqrt{B_a^2 + B_T^2}} \quad (12.6.2.5)$$

8/12/2006

24

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

$$S_T = N S \text{ et } B_T^2 = (N B^2), \quad (12.6.2.2)$$

tel que le rapport signal sur bruit

$$S_T / B_T = \sqrt{N} (S / B). \quad (12.6.2.3)$$

Le rapport signal sur bruit du dark résultant est donc \sqrt{N} fois meilleur que celui d'un dark individuel. Lorsqu'on soustrait d'un cliché astronomique ayant pour signal S_a et bruit B_a un dark caractérisé par S_T et B_T , on trouve facilement pour le cliché résultant

$$S = S_a - S_T \text{ et } B = \sqrt{(B_a^2 + B_T^2)}, \quad (12.6.2.4)$$

$$S / B = (S_a - S_T) / \sqrt{(B_a^2 + B_T^2)}. \quad (12.6.2.5)$$

On comprend donc toute l'importance d'utiliser un dark caractérisé par un rapport signal sur bruit aussi élevé que possible (i.e. $B_T \rightarrow 0$).

Il existe (malheureusement) plusieurs populations de pixels présentant, chacune, un courant noir moyen du même ordre de grandeur. Les pixels chauds constituent une de ces populations pour laquelle le courant noir est très élevé, tout au moins en comparaison avec la population dite normale. De plus, les pixels chauds peuvent s'avérer avoir une valeur de R_n variable au cours du temps.

Pour un CCD donné, il sera toujours très utile d'obtenir de très nombreux darks et de surveiller leur évolution au cours du temps.

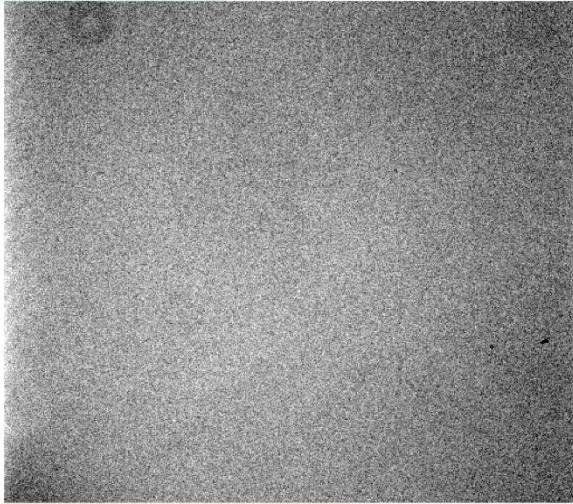
Pour information, citons que pour des CCDs de type MPP (multi-phase-pinned), les températures de refroidissement recommandées se situent entre -10 et -40°C ; pas plus bas sous risque d'affecter l'efficacité du transfert des charges lors de la lecture du CCD.

12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données: technique du flat field

$$S = S_o / S_f,$$

$$\frac{S}{B} = \frac{1}{\sqrt{(B_o / S_o)^2 + (B_f / S_f)^2}} \quad (12.6.3.2)$$



8/12/2006

0.5s à -20° C

- ❑ Correction nécessaire des effets de la réponse variable des pixels individuels ainsi que de l'irrégularité d'illumination du CCD (poussières, vignettage,...)
- ❑ Obtention d'un flat field (plage de lumière uniforme): obtenir cliché image d'un fond éclairé uniformément (lumière du crépuscule, dome éclairé,...).
- ❑ Série de flat field pour augmenter autant que possible son S/B

25

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.3 Technique du flat field

La division de tout cliché CCD qui a été exposé à la lumière par un cliché de type "flat field" est rendue nécessaire en vue de corriger des effets de la réponse variable des pixels individuels ainsi que de l'irrégularité d'illumination du CCD. Celle-ci, aussi en général variable de pixel en pixel, est induite par des poussières pouvant être déposées sur la fenêtre d'entrée de la caméra, sur un filtre ou par des effets d'obstruction (en anglais "vignetting") prenant place le long du chemin de propagation de la lumière.

En vue de construire un flat field, on prend une série de clichés CCD, dans des conditions aussi semblables (cf. même filtre, orientation de la caméra, température, etc.) à celles existant lors de l'obtention des clichés astronomiques, d'une source de lumière uniforme (cf. lumière du crépuscule ou de l'aurore, lumière du fond de ciel, lumière artificielle éclairant l'intérieur du dome, etc.).

Etant donné que l'on va diviser les clichés astronomiques par le flat field, il est impératif que le rapport S/B de ce dernier soit aussi élevé que possible (typiquement $\gg 100$, voire > 1000). En effet, si S_o , B_o , S_o/B_o ; S_f , B_f , S_f/B_f représentent respectivement le signal, le bruit et le rapport signal sur bruit caractérisant les clichés objet (o) et flat-field (f), on trouve aisément que le résultat de la division de S_o par S_f vaut

$$S = S_o / S_f, \text{ avec} \quad (12.6.3.1)$$

$$(S/B) = 1 / \sqrt{[(B_o/S_o)^2 + (B_f/S_f)^2]}. \quad (12.6.3.2)$$

On a donc tout intérêt à ce que le rapport S_f/B_f soit le plus élevé possible. La moyenne de N clichés de type flat field améliorera bien sûr par un facteur \sqrt{N} le rapport S/B (cf. Eq. (12.6.2.3)).

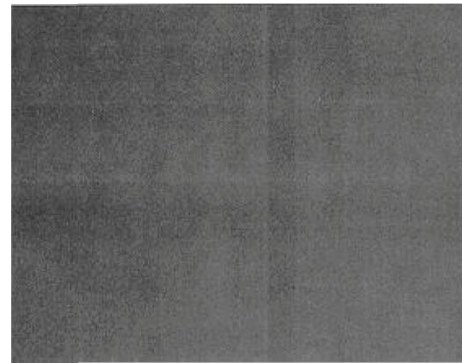
■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données



Image brute (gauche) de laquelle on soustrait l'image biais (à droite) ... et l'image dark (ci-dessous) ...

(voir suite à la page suivante)



8/12/2006

26

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.3 Technique du flat field

Toutefois, il faut éviter de sur-exposer les flat fields, en allongeant par exemple les temps d'intégration ou en augmentant le flux de la source uniforme de lumière artificielle, au risque de saturer les parties les plus brillantes des clichés et de se retrouver dans une zone de non linéarité. Par ailleurs l'obtention de plusieurs clichés CCD pour le flat field permet de se débarrasser facilement des rayons cosmiques et/ou des étoiles superposées à la lumière du fond du ciel.

Au lieu de faire des moyennes des clichés individuels, il est parfois plus avantageux d'en prendre la médiane (qui sera un nombre entier), beaucoup moins sensible à des valeurs accidentelles du signal (cf. cosmiques, etc.).

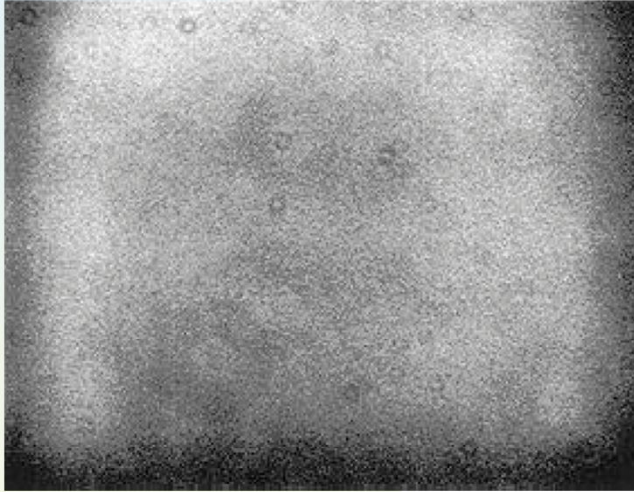
Il est de coutume de normaliser au centre du cliché le flat field ainsi construit.

Pour ce qui est de l'utilisation de sources de lumière uniformes, le fond du crépuscule ou de l'aurore présente l'avantage d'être intense mais le désavantage d'être plutôt bleu par rapport à la vraie lumière du fond de ciel. De toute façon, il est recommandé de déplacer légèrement la position du télescope entre deux poses successives, car de nombreuses étoiles invisibles risquent d'être présentes sur les clichés.

Prendre comme source de lumière le fond de ciel présente comme avantage d'utiliser une source de même couleur que le fond présent sur tous les clichés astronomiques. Cependant, si le rapport S/B désiré est de 300, et que le niveau du fond de ciel est aussi de 300 e^- , on déduit facilement qu'il faudra obtenir un total de 300 clichés. Par manque de temps d'observation, il est rarement possible d'obtenir un tel nombre de clichés.

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données



On divise ensuite le résultat obtenu par l'image flat field (ci-dessus) et on obtient l'image finale (à droite).

8/12/2006



27

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.3 Technique du flat field

Une lumière artificielle dans le dome est réglable (en intensité et couleur) à volonté. Toutefois, les conditions d'illumination du CCD peuvent être légèrement différentes par rapport à celles prévalant lors des observations astronomiques.

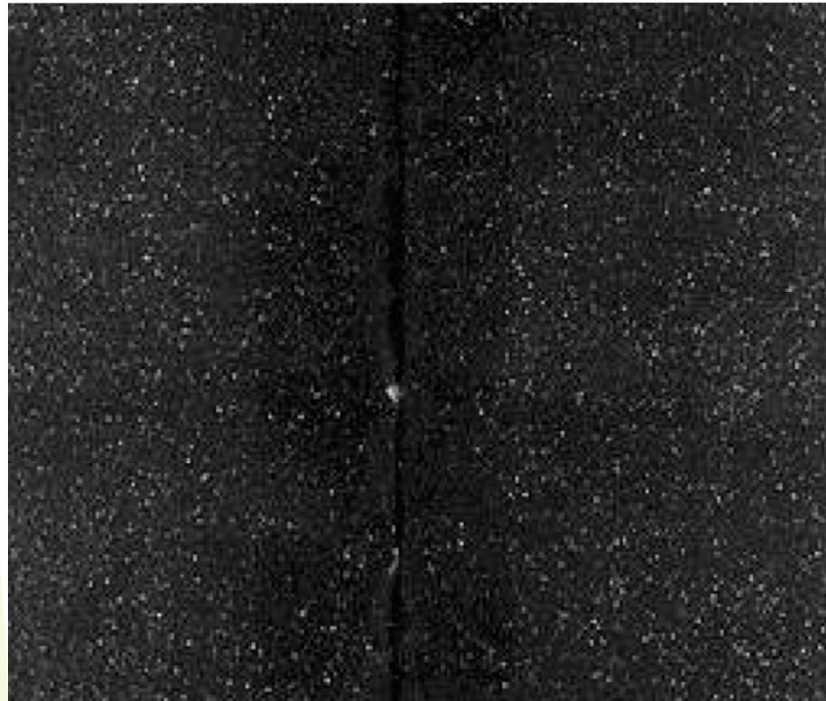
Les astronomes tentent en général de construire un flat field moyen en combinant ces différentes sources de lumière. Le flat field retenu est en général formé d'un cliché moyen qui rend compte des variations spatiales à haute fréquence (i.e. pixel à pixel) et d'un autre pour les variations à fréquence moins élevée. Celui-ci prend en compte, par exemple, l'obstruction par des obstacles situés dans le passage de la lumière, etc.

En vue de construire le meilleur flat-field, l'expérience sera ici aussi notre meilleure conseillère!

■ 12.6 Observations avec un CCD

12.6.2 Réduction des données: rayons cosmiques

Les impacts de très nombreux rayons cosmiques sont visibles sur cette image d'un dark.



8/12/2006

28

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.4 Rayons cosmiques

Les poses très longues augmentent la probabilité de voir un autre bruit se superposer au bruit de lecture: les points d'impact de rayons cosmiques, aléatoires et pouvant créer la saturation d'un ou de plusieurs pixels. Les rayons cosmiques, particules de hautes énergies, produisent en fait dans l'atmosphère terrestre des muons secondaires capables de déposer dans le CCD des charges pouvant excéder 1000 électrons dans un nombre de pixels très restreint. Ces événements se produisent au sol comme dans l'espace, particulièrement en présence d'éruptions solaires ou lors de la traversée par un satellite de l'anomalie sud-atlantique.

12.7 Camera SBIG STL 4020M : carte d'identité

Caractéristiques	Valeur
Nbre pixels capteur image	2048×2048
Taille Pixel	7.4 μ m×7.4 μ m
Taille capteur image	15.2mm×15.2mm
Nbre pixels capteur autoguidage	657×495
Taille pixel	7.4 μ m×7.4 μ m
Taille capteur autoguidage	4.9mm×3.7mm
Capacité maximale	40000 e ⁻ /pixel
Courant d'obscurité	0.07 e ⁻ /pixel/s 0°C
Numérisation	16 bits (65536 ADU)
Bruit de lecture	7.9 e ⁻ /pixel RMS
gain	0.6 e ⁻ /ADU
Refroidissement	T-38°C (\pm 0.1°C)

+ Roue à filtres de couleur intégrée: filtres R, G, B

8/12/2006

29

12.7 Camera SBIG STL 4020M :

Camera CCD+télescope 260 F/D=11.5

$$\Theta = \arctan\left(\frac{d}{F}\right)$$

Champ imagé

Sans réducteur de focale: 17.5'*17.5'

Avec réducteur de focale (F*0.62): 28'*28'

Echantillonnage

Sans réducteur de focale: 1 pixel=0.52''

Avec réducteur de focale: 1 pixel=0.83''



Critère de Nyquist: 2 pixel/élément de résolution

Seeing ~ 2'' à 4'' en imagerie

8/12/2006

30

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.1 Détermination du gain et du bruit de lecture de la caméra STL 4020 M

$$g \sim N_{\max} / 2^{16}.$$

$$B^2 = B_o^2 + B_n^2 + B_c^2 + \ell^2,$$

$$B^2 = S_o + S_n + S_c + \ell^2,$$

$$B_{\text{ADU}}^2 = S_{\text{ADU}} / g + \text{BDL}^2.$$

8/12/2006

31

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.1 Détermination du gain et du bruit de lecture de la caméra STL 4020 M

$$\left(\frac{f_1 / f_2}{\sigma_{f_1/f_2}} \right)^2 = \frac{1}{(\sigma_{f_1} / f_1)^2 + (\sigma_{f_2} / f_2)^2} : \frac{1}{2(\sigma_f / f)^2} \quad (12.6.6.4)$$

$$\sigma_f^2 = (f^2 / 2) (\sigma_{f_1/f_2})^2.$$

$$B_{ADU}^2 = S_{ADU} / g + BDL^2$$

8/12/2006

32

12 Le détecteur CCD

12.6 Observations avec un CCD

12.6.6 Détermination du gain et du bruit de lecture d'un CCD

Il est très avantageux de construire des diagrammes de variance à partir de nombreux rapports de paires différentes de flat fields (f_1 / f_2), de même temps d'exposition (et même illumination). En effet, au moyen de la relation (12.6.3.2), on trouve que

$$[(f_1 / f_2) / \sigma_{f_1/f_2}]^2 = 1 / [(\sigma_{f_1}/f_1)^2 + (\sigma_{f_2}/f_2)^2] \sim 1 / [2(\sigma_f/f)^2], \quad (12.6.6.4)$$

et donc (puisque $f_1 \sim f_2$),

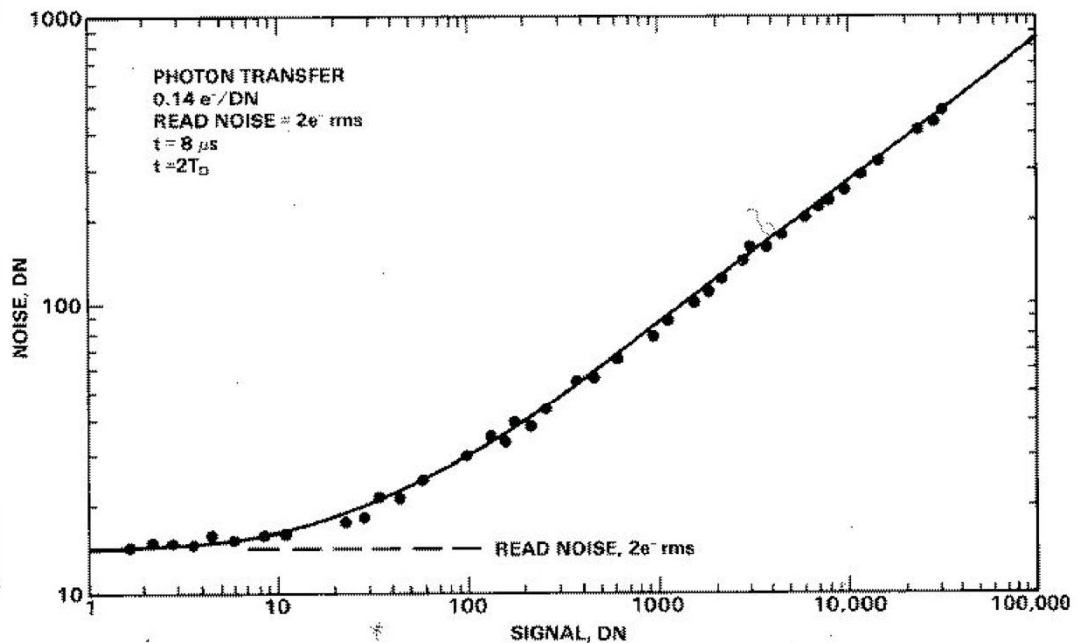
$$\sigma_f^2 = (f^2 / 2) (\sigma_{f_1/f_2})^2. \quad (12.6.6.5)$$

Il est très facile de mesurer σ_{f_1/f_2} et f ; et donc de représenter σ_f^2 en fonction de f .

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.1 Détermination du gain et du bruit de lecture de la camera STL 4020 M

Bruit (ADU)
en fonction
du signal
(ADU)



8/12/2006

12 Le détecteur CCD

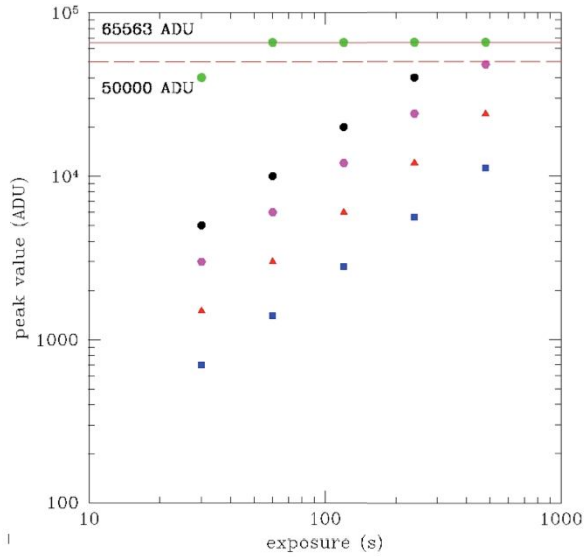
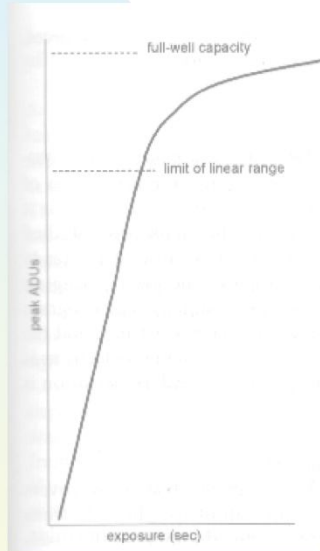
12.6 Observations avec un CCD

12.6.6 Détermination du gain et du bruit de lecture d'un CCD

Un diagramme typique représentant la variance des pixels d'un CCD en fonction du signal est représenté dans la figure ci-dessus. La pente de la droite passant par la majorité des points vaut tout simplement $1/g$ et pour $S_{ADU} = 0$, on trouve que $B_{ADU} = BDL$. Pour de grandes valeurs de S_{ADU} , on voit que la variance ne croît plus comme $\sqrt{S_{ADU}}$. Le CCD cesse d'être linéaire.

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.2 Test de linéarité de la camera STL 4020 M



8/12/2006

34

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.3 CCD : principes de la photométrie d'ouverture

ADU de l'étoile+ciel

44	48	43	45	44	46	41	39	38	39
48	42	41	47	50	49	50	49	40	41
46	48	49	50	47	78	79	69	48	47
50	47	42	45	41	79	95	75	46	45
42	39	38	39	43	77	81	74	51	48
32	43	47	42	45	49	51	43	45	43
41	44	38	50	48	50	45	51	47	39
43	47	49	42	45	42	38	44	45	40
49	50	52	47	46	50	46	42	47	43
45	47	40	39	45	44	44	42	38	41

- ❑ Choix ouverture centrée sur étoile
- ❑ Additionner ADU dans toute l'ouverture = 707 ADU
- ❑ Choix ouverture centrée sur région du ciel dépourvue d'étoile
- ❑ Additionner ADU dans toute l'ouverture = 419 ADU
- ❑ Soustraire ADU causés par le ciel de ceux de l'étoile+ciel pour obtenir les ADU intrinsèques à l'étoile = 288 ADU

8/12/2006

ADU du au fond de ciel

35

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.3 CCD : Photométrie différentielle

Les 5 étapes précédentes qui mènent au nombre d'ADU intrinsèques de l'étoile peuvent être automatisées en utilisant des programmes astronomiques de traitement d'images comme IRAF.

$$IM_{obj} = -2.5 \times \log(288) = -6$$

$$\Delta IM = (IM_{obj} - IM_{comp})$$

$$m_{obj} \approx m_{comp} + \Delta IM$$

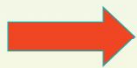
8/12/2006

36

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.3 Mesures photométriques: courbe de lumière d'étoiles variables

- ❑ La Méthode de photométrie différentielle permet de mesurer la magnitude d'étoiles variables au cours du temps (construire leur courbe de lumière) si la magnitude de quelques étoiles étalons sont connues dans le même champ que l'étoile variable.
- ❑ Le catalogue général d'étoiles variables (GCVS) contient 38000 étoiles variables de types divers. (Choisir Période pas trop longue: qqes jours au plus).
- ❑ Equipement dont on a besoin: Télescope (avec réducteur de focale) + CCD + filtre V
- ❑ Précision photométrique typique: 0.01-0.05 mag. Quel RSB faut-il?



$$\sigma_{mag} = -2.5 \times \log(1 + 1/RSB)$$

$$\sigma_{mag} \approx 1/RSB$$

8/12/2006

37

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.3 Mesures photométriques: détection du transit d'une exoplanète

Site web: www.transitsearch.org

Etoile	Période(jours)	P(%)	RA	DEC	Depth(%)	Next center(UT)	Window	Ephemeris	results
OGLE-TR56	1.212	100.0	17:57	-29:32	1.59	08:11 25/11/2008	out	Ephemeris	results
TrES-3	1.306	100.0	17:52	+37:33	2.98	09:37 25/11/2008	out	Ephemeris	results

Baisse de magnitude de l'ordre de 0.01 mag. Atteindre bruit de photon de l'ordre de 0.005. Ce qui équivaut à atteindre un S/B de l'ordre de 200.

Etoile très brillante donc temps de pose très réduit. Faire attention à la limite de linéarité pour ne pas saturer l'étoile. Besoin d'une étoile de comparaison suffisamment brillante dans le même champ pour la photométrie différentielle. Courbe de lumière de l'étoile avant, pendant et après la fenêtre du transit.

Précision à atteindre extrêmement élevée donc réduction des données doit être très soignée.

8/12/2006

38

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.3 Mesures photométriques: Détermination de la magnitude limite d'un cliché astronomique en fonction du temps de pose et du seeing

- Choix d'un champ d'étoiles avec plusieurs étoiles étalons dont la magnitude est précisément connue.
- Imager le même champ d'étoiles avec les différents filtres R, V, B; cela pour plusieurs temps d'intégration et sur différentes nuits pour avoir des conditions de seeing différentes. Attention de ne pas atteindre la limite de saturation pour ne pas saturer le détecteur et rester dans le régime linéaire.
- Mesure de la magnitude limite par photométrie différentielle
- Mesure du seeing: mesure de la FWHM (largeur à mi hauteur) d'étoiles non saturées dans le champ avec logiciel astronomique comme IRAF.

8/12/2006

39

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.4 Mesures astrométriques

- Effectuer une mesure astrométrique c'est déterminer avec la meilleure précision possible la position des astres dans le ciel (RA, DEC).
- Déterminer position précise d'un astre (étoile, astéroïde) dans le ciel sur base de plusieurs étoiles de référence dans le même champ pour lesquelles on connaît très précisément les positions (RA, DEC)
- Quelle précision peut-on espérer en fonction du S/B?

 $\sigma_{ast} = FWHM / (2.36 * S/B_{peak})$

- Rapport S/B requis en astrométrie beaucoup plus faible que celui requis en photométrie: un S/B de 10 déjà très bien.

8/12/2006

40

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.4 Mesures astrométriques: séparation angulaire et angle de position d' étoiles binaires

- Périodes d'étoiles binaires: quelques dizaines d'années ou plus. Impossibilité d'obtenir orbite sur base de mesures effectuées sur une année seulement
- Très peu d'étoiles binaires dont orbite bien déterminée. Seulement 2000 sur plus de 100000 étoiles doubles répertoriées dans le Washington Double-Star Catalog. 6400 étoiles doubles suffisamment séparées ($\text{sep} > 3 \text{ arcsec}$) et plus brillante que $m=11$.

Séparation angulaire: $\rho = \sqrt{(RA_P - RA_S)^2 \times \cos(D_P) + (D_P - D_S)^2}$

Angle de position: $\varphi = \arctan \left(\frac{D_P - D_S}{(RA_P - RA_S) \cos(D_P)} \right)$ 41

12.8 Projet de travaux de groupe

12.8.5 Dérroulement des projets de groupe

- Choix du projet de groupe à déterminer. Groupe de 3 ou 4 étudiants.
- Proposition d'un projet de travail de groupe par les étudiants et confirmation par l'assistant.
- Mise sur pied d'1 ou 2 séance(s) d'observation du ciel chapeauté(e)s par les assistants pour se familiariser avec l'utilisation du télescope et de la caméra CCD. Date(s) à fixer
- Réalisation par les groupes d'étudiants de leur projet pendant l'année.

- Présentation orale par groupe de la méthode et des résultats obtenus.

8/12/2006

42