
dapnia



saclay

Imagerie CCD en astronomie

O. Boulade

Service d'Astrophysique, CEA/DAPNIA

Les CCDs en astronomie

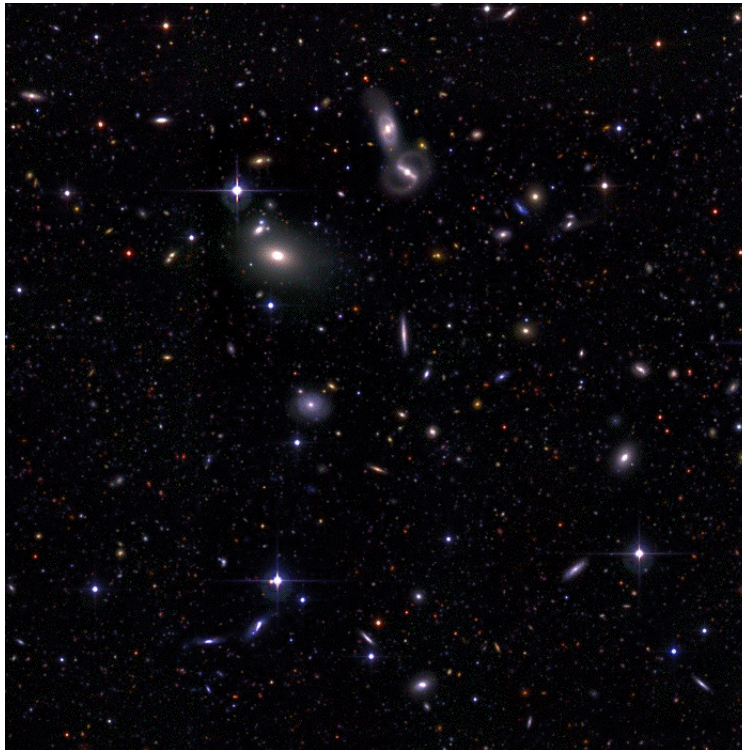
dapnia



saclay

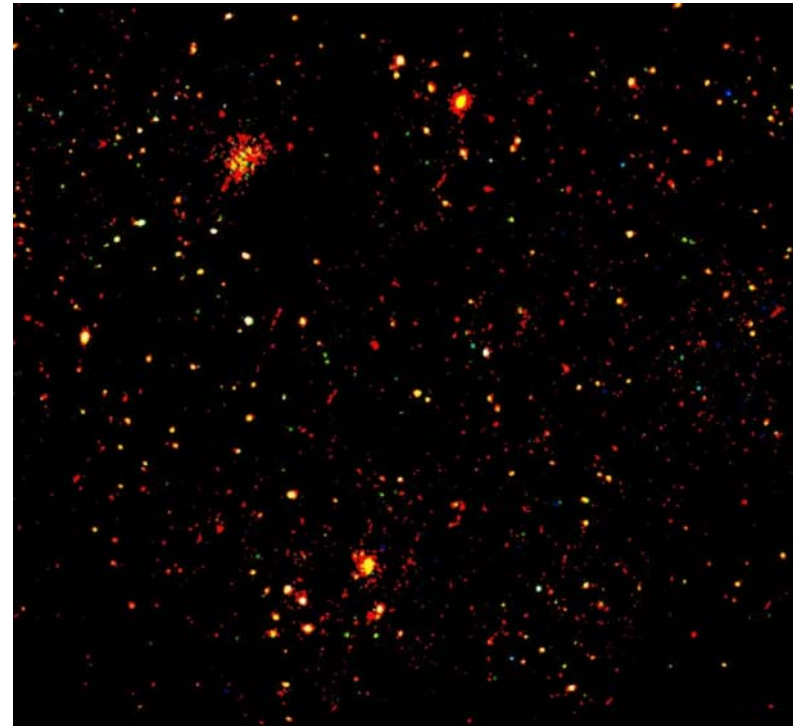
- CCDs utilisés en astronomie depuis 1980
 - Détecteurs de choix pour les longueurs d'onde du visible aux X
 - Grands plans focaux possibles

CFHT-MegaCam 450-900 nm



Canada-France-Hawaii Telescope Corporation & TERAPIX/IAP 2004

XMM-EPIC 0.3-10 keV



Courtesy of LSS Consortium, A. Read and ESA

Plan du cours

dapnia



saclay

- 1er cours: généralités sur le détecteur CCD
 - Principes du CCD
 - Paramètres et performances
- 2ème cours: utilisation d'un détecteur CCD
 - Mesures des performances
 - Observations et traitement d'images
 - Développements récents
- 3ème cours: quelques problématiques particulières
 - CCDs et spatial
 - Utilisation des CCDs en astronomie X
 - Grands plans focaux à base de CCDs

dapnia



saclay

Introduction

Plan focal à base de CCDs

dapnia

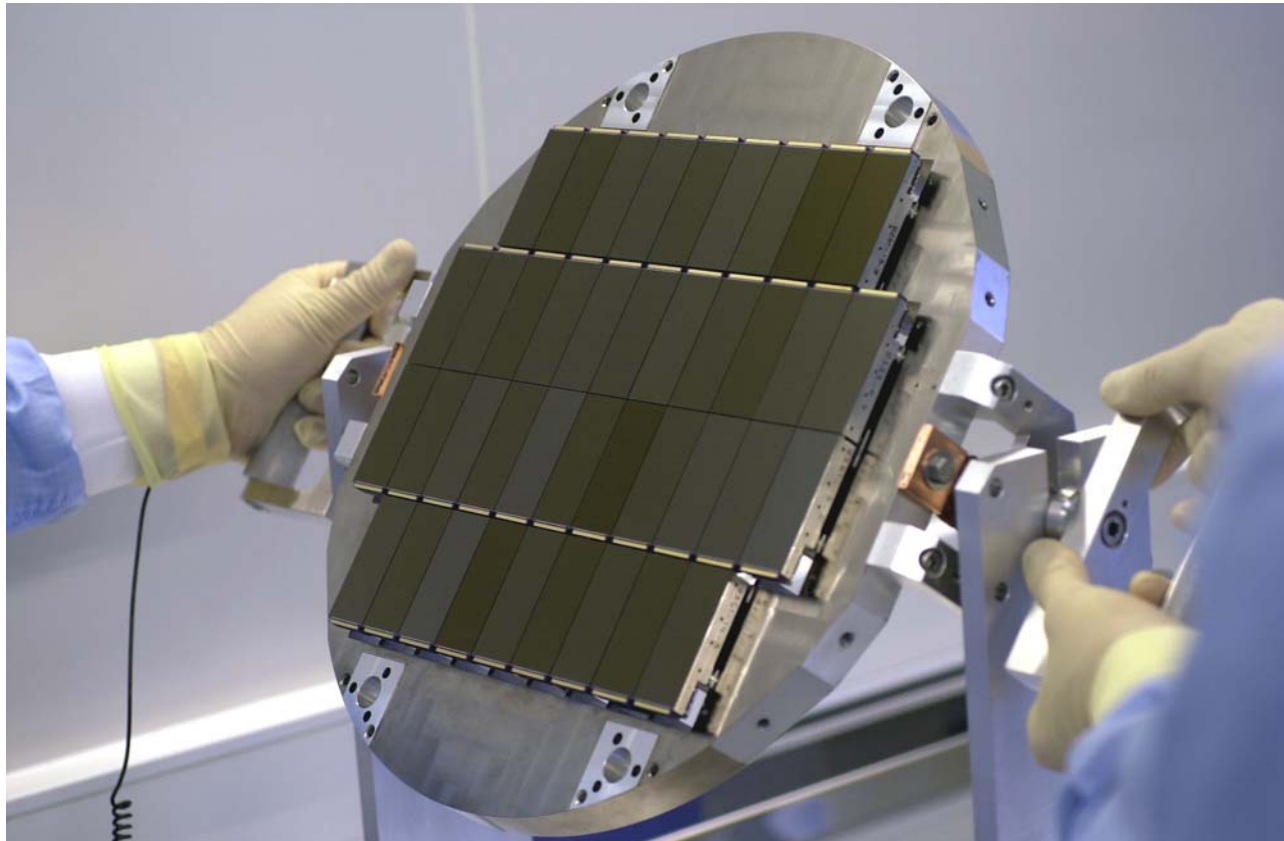


cea



saclay

- Détecteurs « aboutables »
 - Mosaïque de CCDs permettant d'obtenir quelques 10^8 pixels



© CEA-DAPNIA/J.J Bigot

Références

dapnia



saclay

- Détecteur CCD
 - Scientific Charge-Coupled Devices, J. Janesick, SPIE press, 2001
 - http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm
 - http://www.astro.psu.edu/xray/docs/cal_report/cal_report.html
 - Forum de discussion CCD-world <http://www.ctio.noao.edu/CCD-world/>
 - Conférences Scientific Detectors Workshop 1996-2005, Kluwer/Springer
- Caméras CCDs
 - <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/MegaPrime/>
 - Articles MegaCam: Boulade et al., Aune et al., Roussé et al., SPIE vol 4841, 2002; Borgeaud et al., SPIE 4008, 2000; de Kat et al., SDW, 2002
- Traitement d'images
 - <http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Elixir/home.html>
 - <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS-DATA/rawdata.html#P3>
 - <http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS-DATA/dataprocessing.html>
 - <http://terapix.iap.fr>

Glossaire

dapnia



saclay

- Back side illuminated CCD: CCD éclairé par l'arrière
- Bias: image obtenue avec un temps de pose de 0 seconde
- Blooming: débordement des charges d'un pixel à l'autre en cas de saturation
- Bruit de lecture (readout noise): bruit de l'étage de sortie du CCD
- Bruit de photons (shot noise): bruit lié à la statistique poissonnienne des photons
- Capacité pixel (full well): quantité de charges qu'un pixel peut contenir
- CCDs aboutables: CCDs qu'on peut mettre bout à bout pour former des mosaïques
- CCD frame transfer (à transfert de trame): CCD dont la moitié de la surface est photosensible, l'autre moitié servant à stocker les images
- CCD full frame: CCD dont toute la surface est photosensible
- Channel stop: volume de Si avec un dopage particulier permettant de séparer les colonnes de pixels
- Clocked anti-blooming: dispositif permettant d'éviter le blooming
- Cosmétique: caractérisation du nombre de défauts (pixels, colonnes) d'un CCD

Glossaire

dapnia



saclay

- Courant d'obscurité (dark current): signal généré par la création de paires électron-trou par effet thermique
- Cosmiques: impacts de particules du rayonnement cosmique
- Dark: image obtenue en laissant le CCD dans l'obscurité
- Effet photo-électrique: excitation d'un électron par un photon incident
- Efficacité de transfert de charge (charge transfer efficiency): fraction des charges électriques transférées d'un pixel au précédent au cours de la lecture du CCD
- Flat field: image obtenue en éclairant uniformément le CCD
- Front side illuminated CCD: CCD éclairé par l'avant
- Glitches: cosmiques
- Multi pinned phase: mode d'utilisation du CCD permettant de réduire le courant d'obscurité à température élevée
- Non uniformité pixel: dispersion de rendement quantique des pixels
- Orthogonal transfer CCD: désigne un CCD où l'on peut transférer les charges aussi bien horizontalement que verticalement
- Overscan pixels: pixels virtuels obtenus en continuant la lecture après avoir lu tous les pixels physiques

Glossaire

dapnia



saclay

- Photon transfer curve: méthode de caractérisation d'un CCD
- Pixel: brique élémentaire d'un détecteur matriciel
- Point spread function: image donnée par une source ponctuelle
- Registre série: ligne de pixels permettant le transfert vers le circuit de lecture
- Rendement quantique (quantum efficiency): rapport entre le nombre de photons détectés et le nombre de photons incidents
- Superflat: flat field obtenu en combinant toutes les images d'une nuit dans un filtre donné
- Time delayed integration: mode d'observation particulier où la lecture du CCD se fait à la même vitesse que le défilement du champ de vue
- Zone de déplétion: volume du pixel dans lequel se passe la collecte des électrons créés par effet photo-électrique

Abréviations, acronymes et autres sigles

dapnia



saclay

- ADC: analog-to digital converter
- APS: active pixel sensor
- CCD: charge coupled device (DTC, dispositif à transfert de charges)
- CDS: correlated double sampling (double échantillonnage corrélé)
- CEA: commissariat à l'énergie atomique
- CFHT: Canada-France-Hawaii Telescope
- CFHTLS: CFHT Legacy Survey
- CMOS: complementary metal oxyde semiconductor
- CNES: centre national d'études spatiales
- CTE: charge transfer efficiency
- DAPNIA: département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et d'instrumentation associée
- DUNE: dark universe explorer
- EMCCD: electron multiplying CCD
- EPIC: European Photon Imaging Camera
- ESA: agence spatiale européenne
- LBNL: Lawrence Berkeley national laboratory

Abréviations, acronymes et autres sigles

dapnia



saclay

- MIT: Massachussets institute of technology
- MPP: multi pinned phase
- OTA: orthogonal transfer array
- OTCCD: orthogonal transfer CCD
- Pan-STARRS: panoramic survey telescope & rapid response system
- Pixel: picture element
- PRNU: pixel response non uniformity
- PSF: point spread function
- QE: quantum efficiency
- SNAP: supernova acceleration probe
- TDI: time delayed integration
- XMM: X-ray Multi-Mirror satellite

Historique

dapnia



saclay

- 1970 : principe du CCD (Boyle et Smith, Bell Labs)
- 1974 : 1^{ère} image astronomique (CCD Fairchild 100x100)



Janesick p.10

- 1979 : CCD RCA 512x320 aminci (3.5'x2' sur le ciel)
- 1981 : 1^{ères} caméras CCDs en France (B. Fort, L. Vigroux)
- 1990 : 1^{ers} CCDs « grand format » 2Kx2K (7'x7')
- 1994 : 1^{ères} caméras mosaïque
- 1999 : caméra CFH12K, 12 CCDs 2Kx4K, 12Kx8K pixels (42'x28')
- 2002 : caméra MegaCam, 40 CCDs 2Kx4.5K, 20Kx18K pixels (1°x1°)

dapnia



saclay

Principes du CCD

Principes de fonctionnement du CCD

dapnia



saclay

- CCD: charge coupled device (DTC: dispositif à transfert de charges)
- 4 étapes
- Détection des photons incidents
 - Génération de paires électron-trou par effet photo-électrique
- Accumulation des charges
 - Capacité MOS (métal-oxyde-semiconducteur)
- Transfert des charges vers circuit de lecture
 - Transfert de proche en proche
- Lecture de l'information
 - Génération d'une tension au niveau du CCD puis transfert vers électronique externe et digitalisation
- Le terme CCD se réfère au mode de lecture de l'information, non à la génération de cette information.

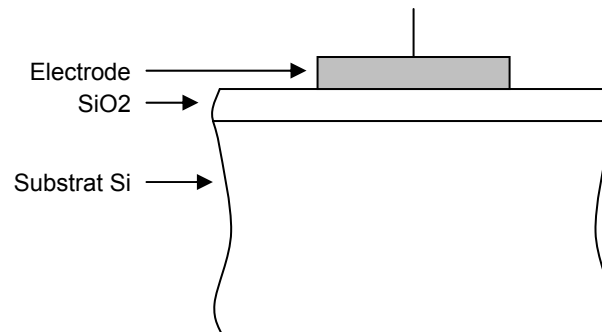
Détection des photons

dapnia



saclay

- Effet photo-électrique dans un semiconducteur (Si)
 - Gap entre bande de valence et bande de conduction: 1.14 eV
 - Un photon incident d'énergie > 1.14 eV crée une paire e-/trou
- Accumulation des charges: capacité MOS (métal-oxyde-semiconducteur)
 - Un substrat Si, un isolant SiO_2 , une électrode
 - Si dopé « p »: porteurs majoritaires trous
 - Tension > 0 : création zone vide de trous (zone de déplétion)
 - Les photo-électrons ne se recombineront pas
 - Accumulation des e- dans la zone de déplétion



Collecte des photons

dapnia

cea

saclay

- CCD canal en surface (surface channel)
 - Pb: les e^- s'accablent à l'interface Si-SiO₂
 - Mauvaises performances: pièges, faible transfert, ...
- CCD canal enterré (buried channel)
 - Une couche de Si dopé n entre le SiO₂ et le Si dopé p
 - Analogue à une diode p-n
 - Les e^- s'accablent en profondeur

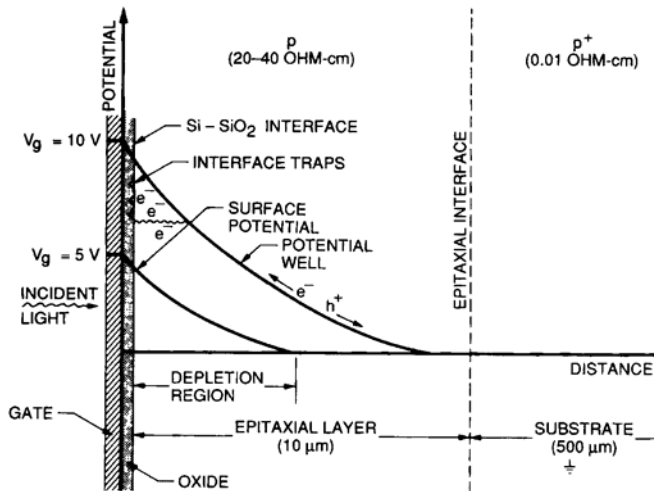


Figure 1.18 Surface channel potential well.

Janesick p.64

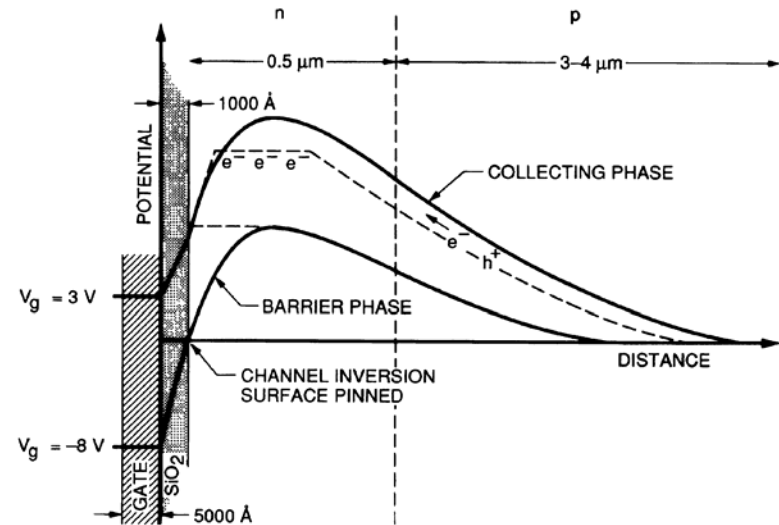
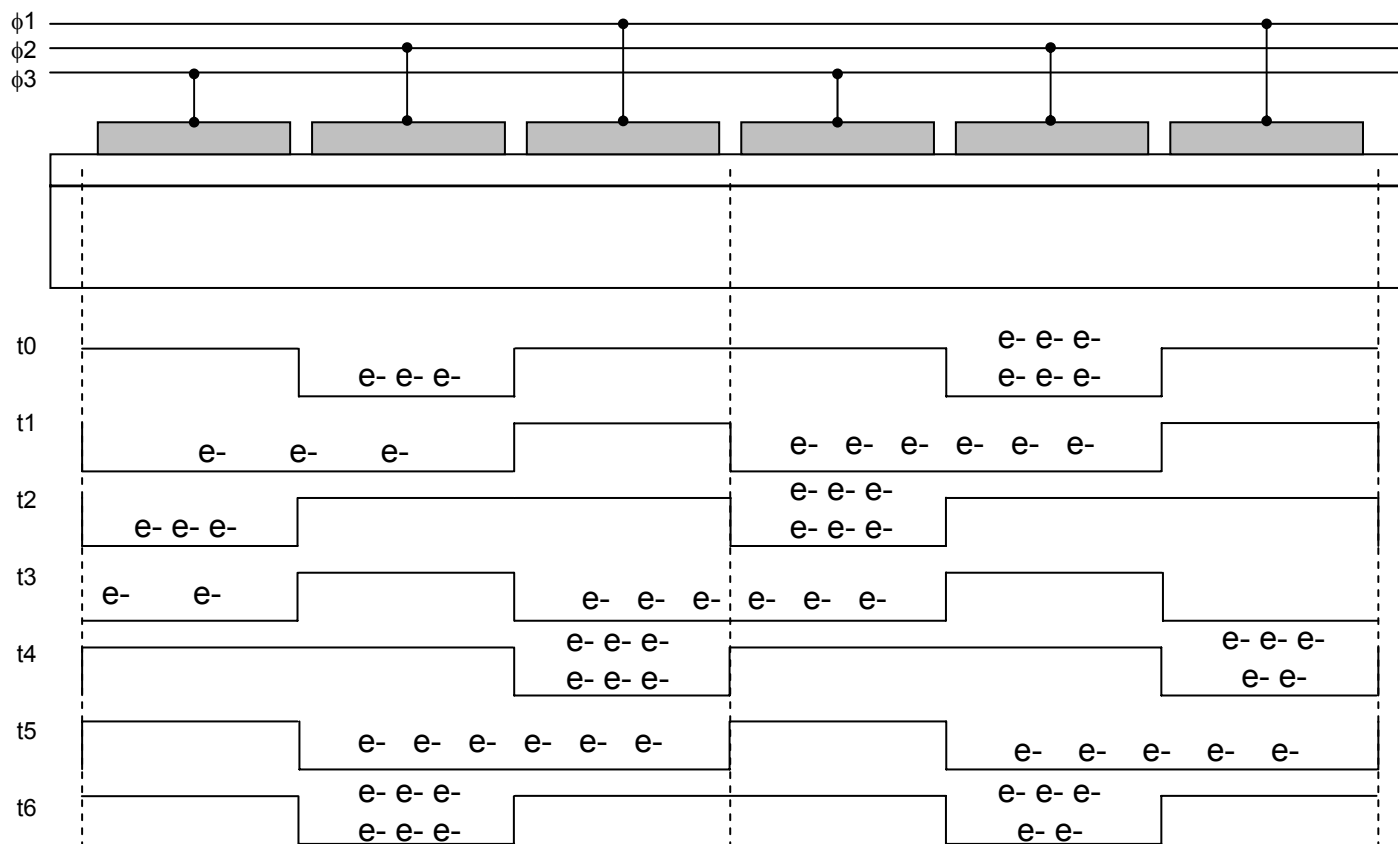
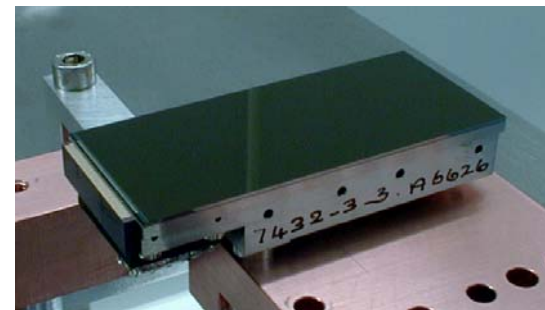


Figure 1.19 Buried-channel potential well.

Janesick p.70

Transfert des charges

- Plusieurs (3) électrodes par pixel
- Une électrode de collecte, et deux de barrière
- Transfert des charges de proche en proche
- Couplage des charges entre pixels



Organisation matricielle des pixels

dapnia



saclay

- Le long d'une colonne, les paquets de charges sont séparés les uns des autres par les différents potentiels générés par les électrodes
- Les colonnes de pixels sont séparées les unes des autres par un dopage p spécifique (« channel stop ») qui évite la diffusion des charges
- Une ligne supplémentaire de pixels, le registre série, est connectée au circuit de lecture

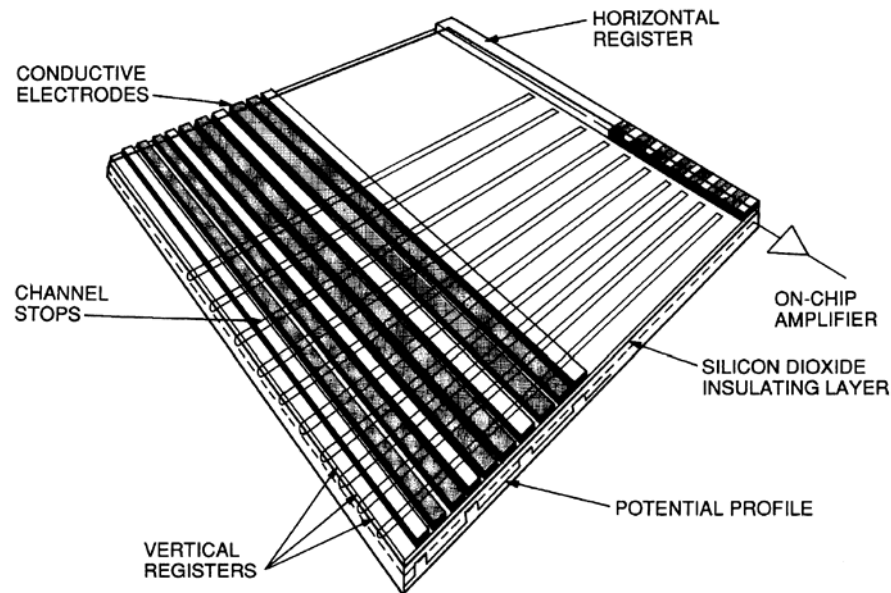


Figure 1.7(b) Primary components that make up a three-phase CCD.

Janesick p.24

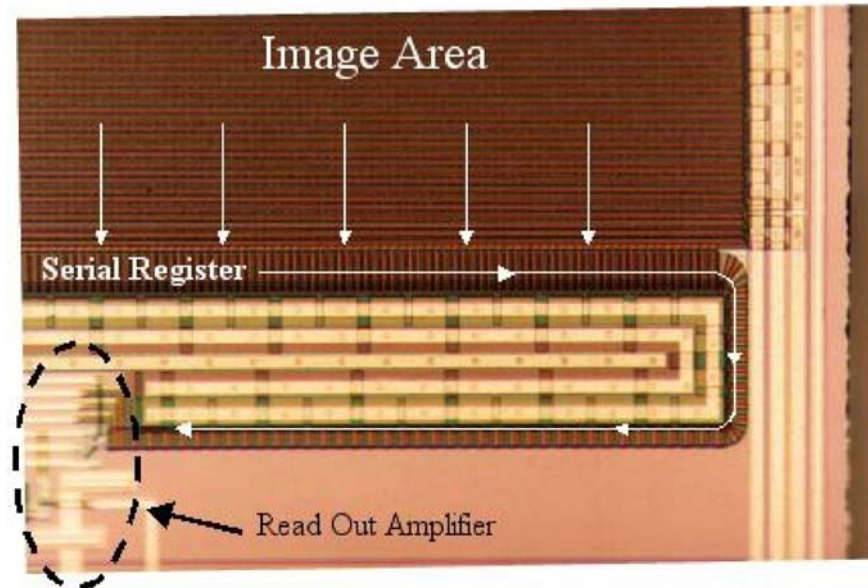
Lecture de l'information

dapnia



saclay

- Transferts successifs du contenu des pixels
 - De la 1ère ligne dans le registre série
 - De chaque ligne dans la précédente
 - Du 1er pixel du registre série dans le circuit de lecture
 - De chaque pixel du registre série dans le précédent



© e2v technologies

- Génération d'une tension aux bornes de la capacité de lecture
- Envoi vers l'électronique externe: échantillonnage, digitalisation, transfert vers ordinateur d'acquisition, stockage

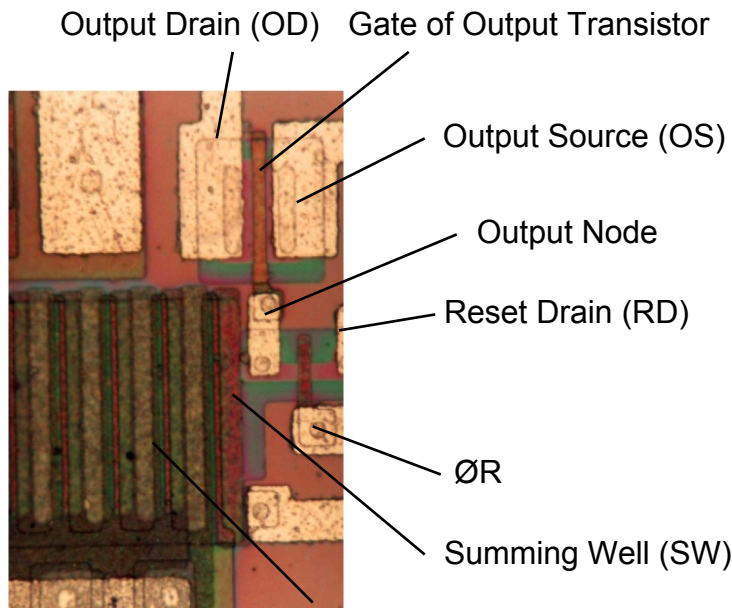
Séquence de lecture

dapnia



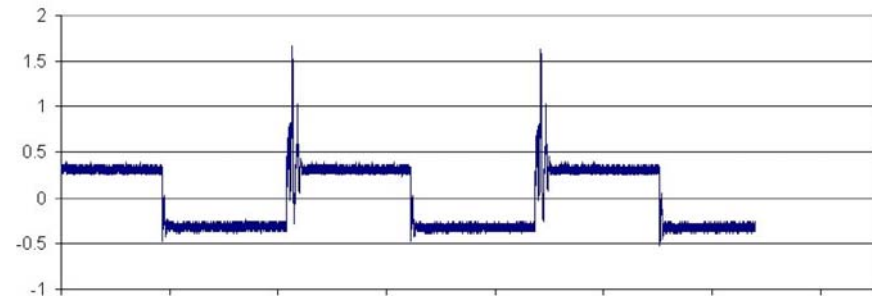
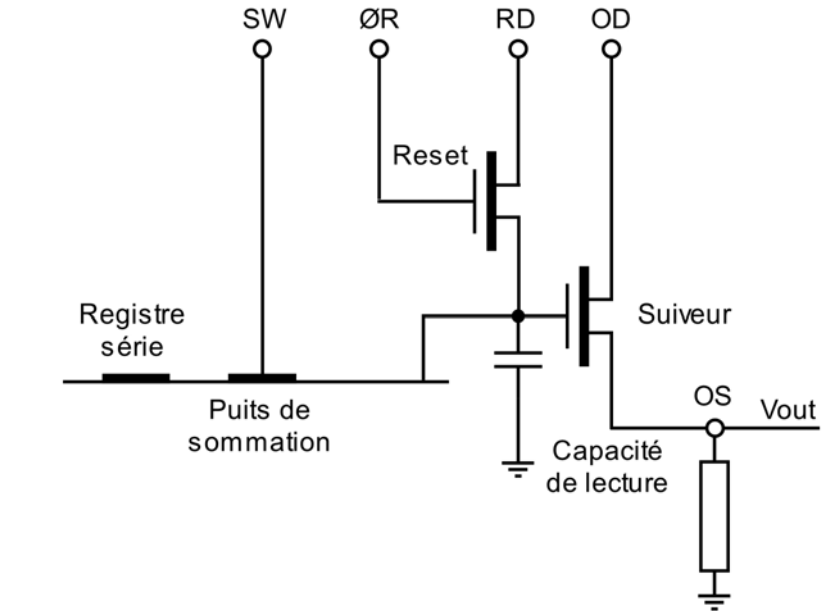
saclay

- Reset du niveau de sortie
- Transfert du pixel dans le « summing well » et mesure du niveau reset
- Transfert du « summing well » sur la capacité de lecture et mesure du niveau signal



Last few electrodes in Serial Register

http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm



dapnia



saclay

- CCD « full frame »
 - Toute la zone du CCD est photosensible, et on commence la lecture à la fin de la pose
 - Principale architecture utilisée en astronomie
- CCD « frame transfer »
 - Une moitié du CCD est masquée et à la fin de la pose, on transfère les charges de la zone photosensible dans la zone masquée
 - La lecture de la pose n se fait en même temps que la pose $n+1$
 - Parfois utilisé en astronomie (COROT)
- CCD « interline transfer »
 - Une colonne de pixels sur 2 est masquée, et on transfère chaque colonne photosensible dans la colonne masquée lui correspondant
 - Utilisation en cadence video (télévision)

dapnia



saclay

Paramètres et performances

Paramètres d'un CCD

dapnia



saclay

- Détection des photons
 - Rendement quantique (quantum efficiency QE)
- Collection des charges
 - Nombre de pixels
 - Capacité du pixel (full well)
 - Non uniformité pixel (pixel response non uniformity PRNU)
 - Diffusion
 - Courant d'obscurité (dark current)
 - Cosmétique
- Transfert de charges
 - Efficacité de transfert (charge transfer efficiency CTE)
- Lecture de l'information
 - Linéarité
 - Bruit de lecture (readout noise RN)
- Rapport signal à bruit

Rendement quantique (QE)

dapnia



saclay

- Mesure de l'efficacité de conversion photon - électron
 - Un photon d'énergie $<$ gap Si (1.14 eV) ne peut pas créer de paire électron-trou
 - QE = 0% pour une longueur d'onde $>$ 1.1 μm
 - Pour observer en IR, il faut utiliser un autre semiconducteur, ex Ge (gap 0.66 eV, longueur d'onde $<$ 1.6 μm), mais mauvaises performances
 - Un photon d'énergie comprise entre 1.14 et 3.1 eV crée une paire électron-trou: domaine visible (4000 - 11000 Å)
 - Un photon d'énergie $>$ 3.1 eV crée plusieurs paires électron-trou: un photon X d'énergie 5.9 keV (longueur d'onde 2.1 Å) génère 1620 e-
 - Au delà de 10 keV, la probabilité d'interaction d'un photon avec un électron est trop faible: pas de détection

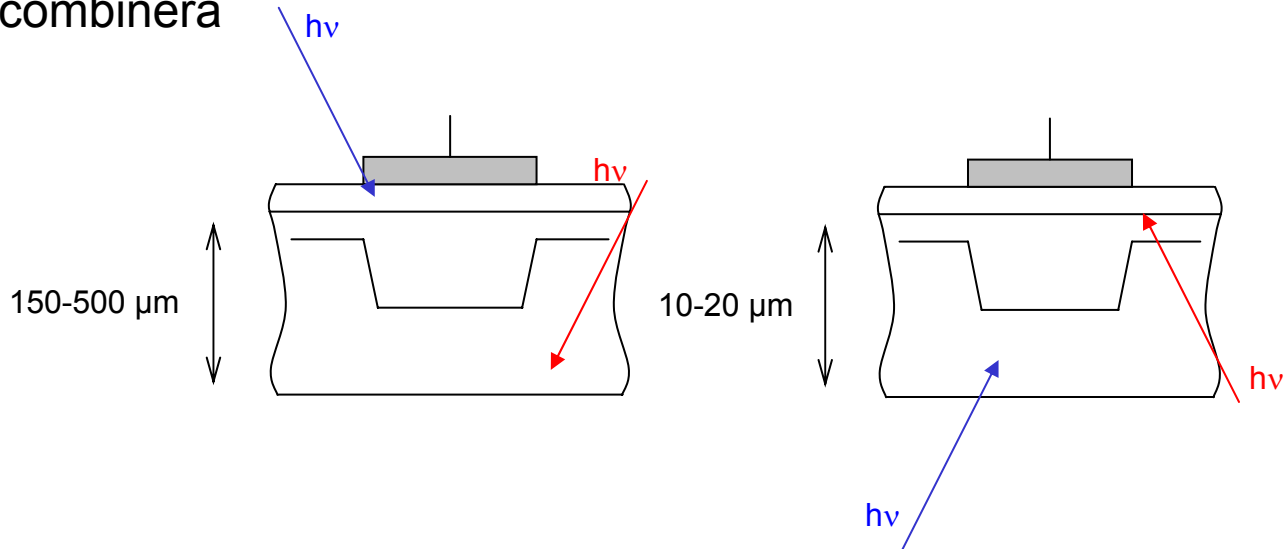
Dépendance en longueur d'onde du QE

dapnia



saclay

- La profondeur de pénétration du photon dépend de son énergie
 - Pour un photon « bleu » (400 nm): $\sim 0.2 \mu\text{m}$
 - Pour un photon « rouge » (800 nm): $\sim 10.5 \mu\text{m}$
- Pb: si l' e^- est créé dans une zone trop éloignée du champ électrique, il se recombinera



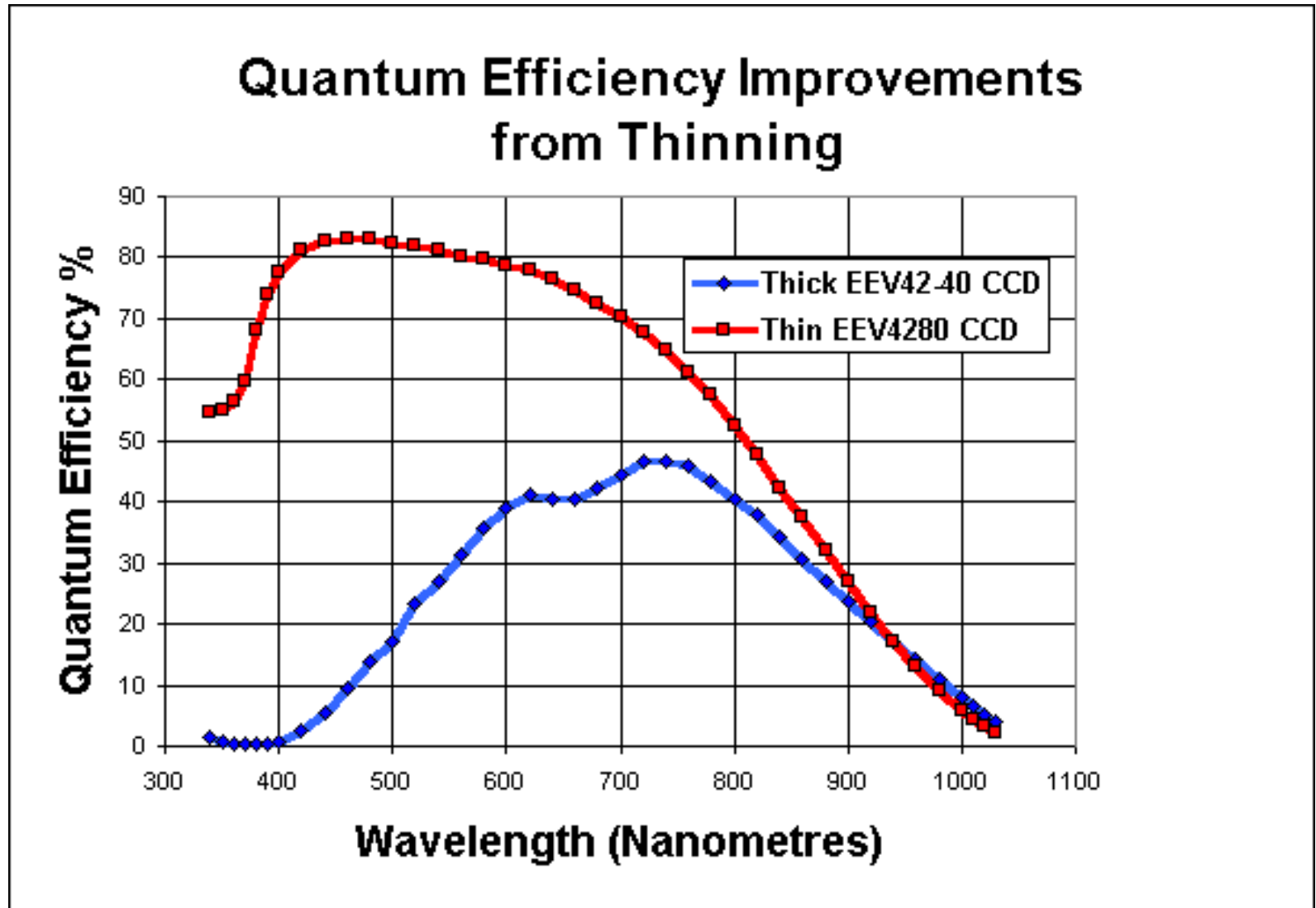
- CCD épais et éclairé par l'avant: rendement quantique très faible dans le bleu, moyen dans le rouge (QE max $\sim 50\%$)
- Pour avoir un bon QE dans le bleu, il faut un CCD aminci et éclairé par l'arrière (QE $> 80\%$), mais faible rendement dans le rouge
- CCD aminci très délicat à fabriquer: beaucoup plus cher

CCD épais vs CCD aminci

dapnia



saclay



http://www.ing.iac.es/~smt/CCD_Primer/CCD_Primer.htm

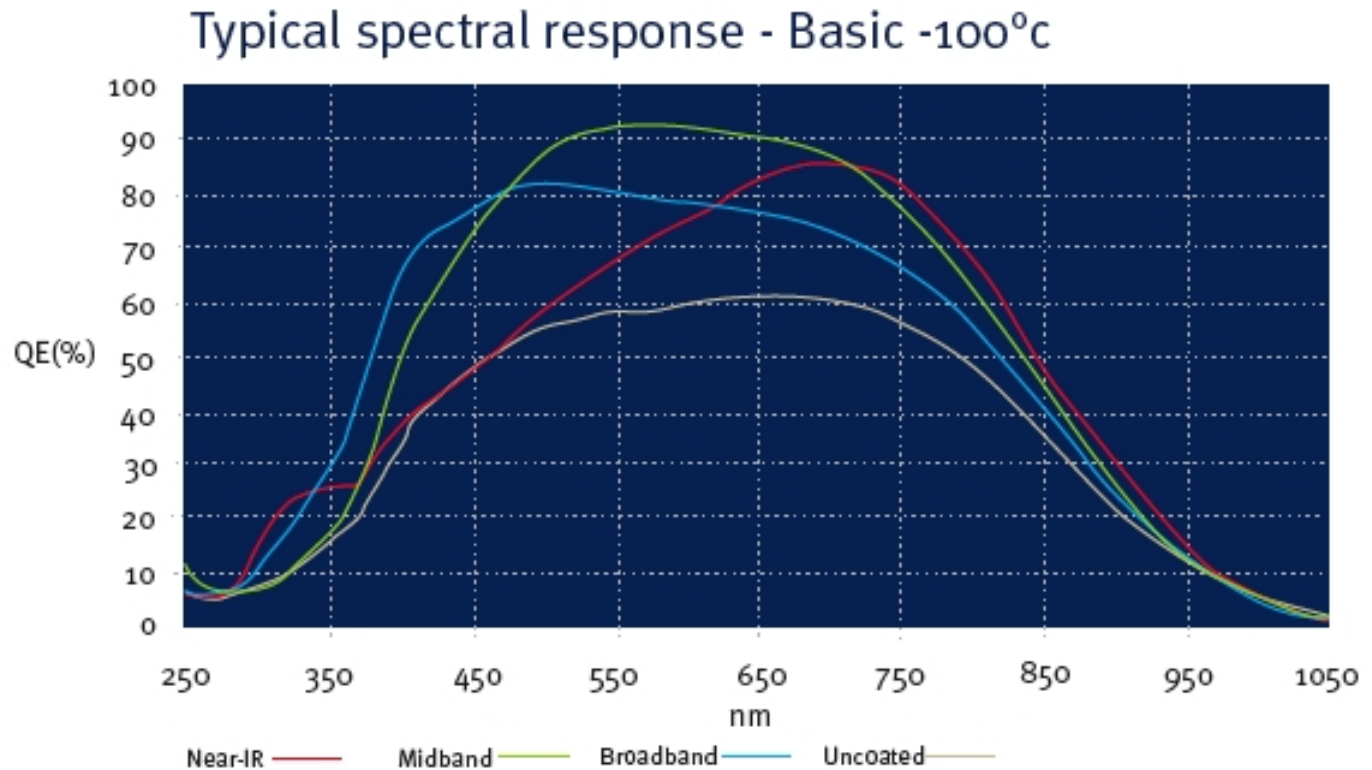
Traitement AR

dapnia



saclay

- Indice de réfraction du Si: 3.6
- Coefficient de réflexion = $(1-n_{\text{Si}})^2/(1+n_{\text{Si}})^2 = 0.32$
 - Un CCD éclairé par l'arrière nécessite un traitement anti-reflet pour maximiser le QE



© e2v technologies 2003

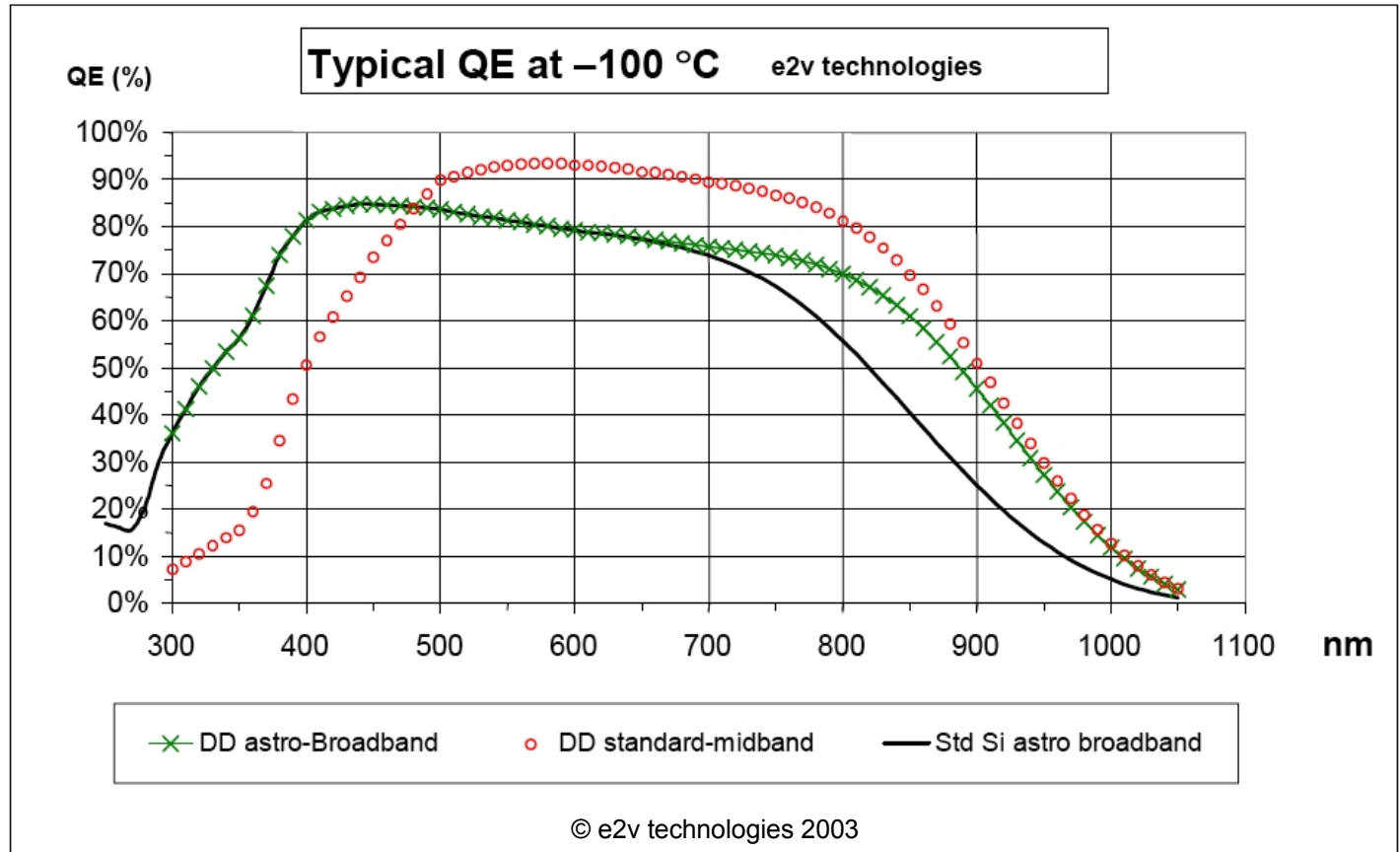
CCD « deep depletion »

dapnia



saclay

- CCD aminci éclairé par l'arrière
- Epaisseur substrat augmentée pour détecter dans le rouge: 40 μm
- Zone de déplétion augmentée pour détecter dans le bleu: Si haute résistivité ($\sim 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$)



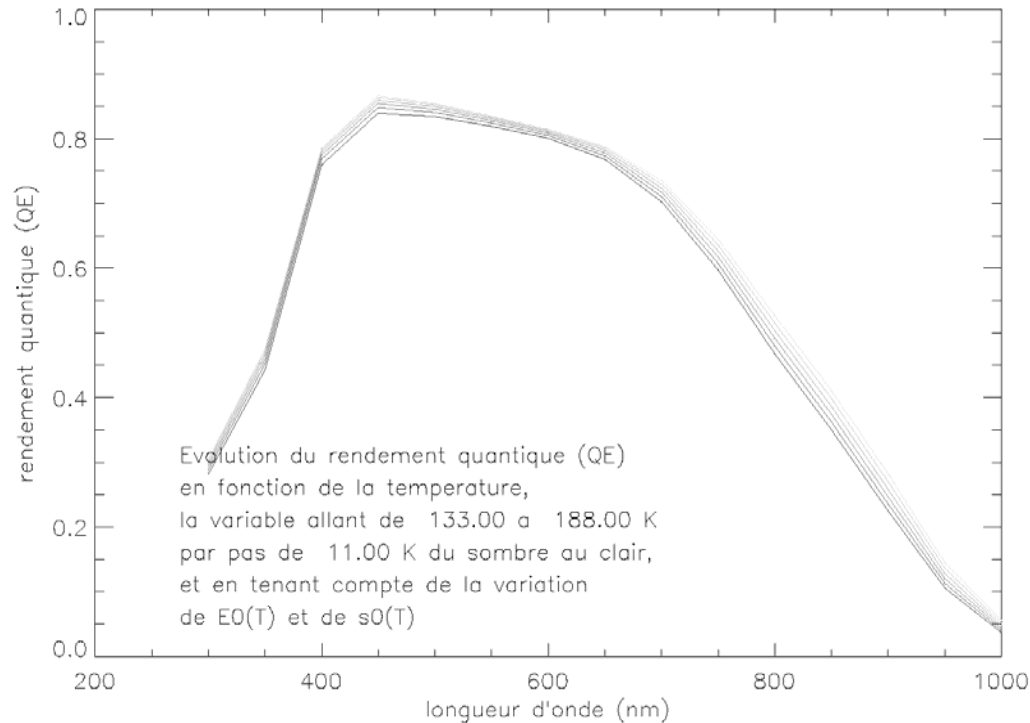
Dépendance en température du QE

dapnia



saclay

- Plusieurs paramètres dépendent de la température
 - Energie de gap du Si
 - Profondeur d'absorption des photons
 - Champ électrique dans le Si
 - Taux de recombinaison des e^-
- Le QE augmente avec la température: $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ par degré



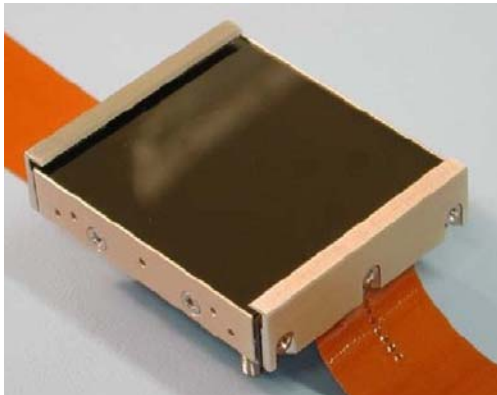
Evolution de la taille des CCDs

dapnia

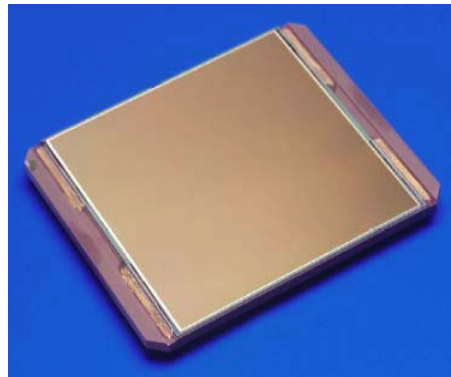


saclay

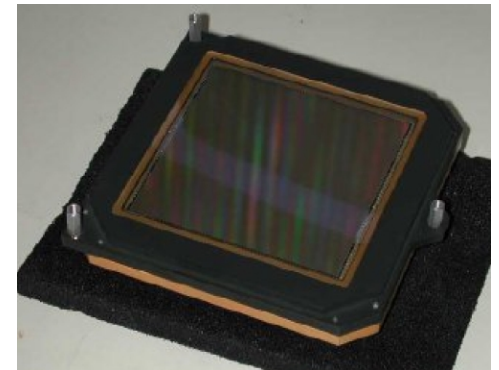
- 1er CCD astronomique: Fairchild 100x100
- 1979: CCD RCA 512x320, pixels $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
- 1990: premiers CCDs 2Kx2K
- Le standard astronomique est un CCD 2Kx4K, pixels de $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$
- Les CCDs géants (4Kx4K à 9Kx9K) commencent à être utilisés en astronomie mais:
 - Temps de lecture longs
 - Taille des wafers limitée donc petits pixels, peu efficaces
 - Grand nombre de transferts
 - Rendement de fabrication faible, donc coût élevé



e2v 4Kx4K $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$



Fairchild 4Kx4K $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$



Fairchild 9Kx9K $8.75\mu\text{m} \times 8.75\mu\text{m}$

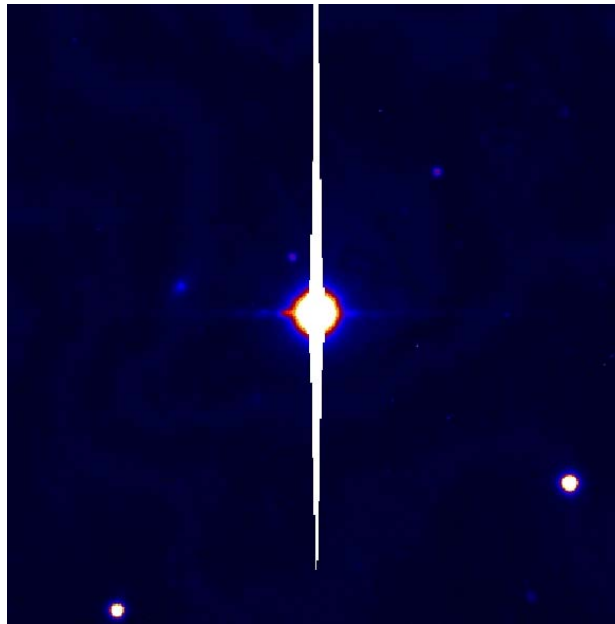
Capacité pixel (full well)

dapnia



saclay

- Nombre maximum de charges qu'un pixel peut contenir
- Dans un CCD actuel avec un pixel de $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, on atteint une capacité $\sim 200\text{-}250 \text{ ke}^-$
- Détermine la dynamique possible du CCD (rapport entre les signaux min et max détectables)
- Quand le pixel est plein, il y a saturation (blooming): les charges débordent sur les pixels adjacents le long de la colonne
- La technique du « clocked anti blooming » permet de limiter cet effet



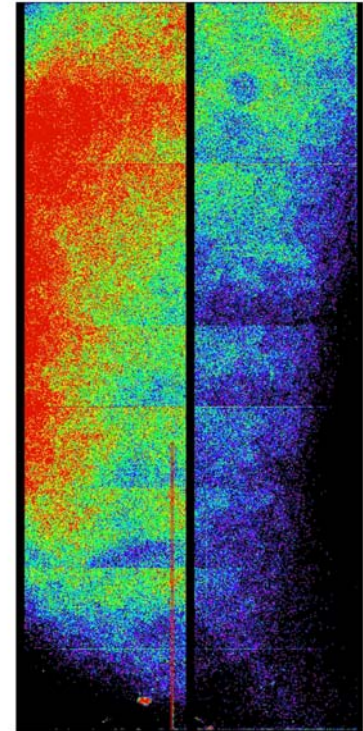
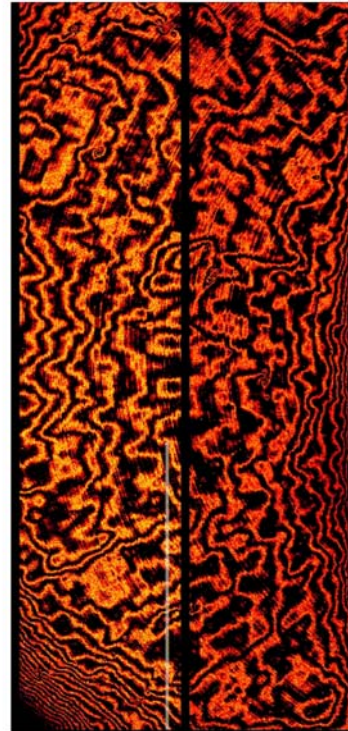
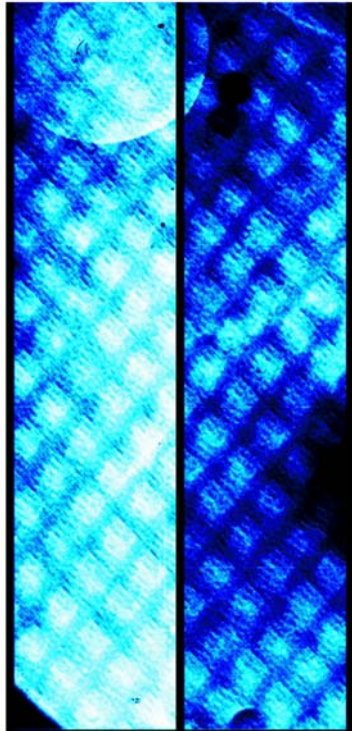
Non uniformité pixel (PRNU)

dapnia



saclay

- Variation de sensibilité de pixel à pixel
- Origine liée au process: précision de la lithographie, amincissement, franges d'interférence dues à des réflexions internes, ...
- Non uniformité dépendante de la longueur d'onde
- Niveau typique: 1-2%, corrigeable par la technique du champ plat (flat field): on illumine la surface du CCD avec une source uniforme



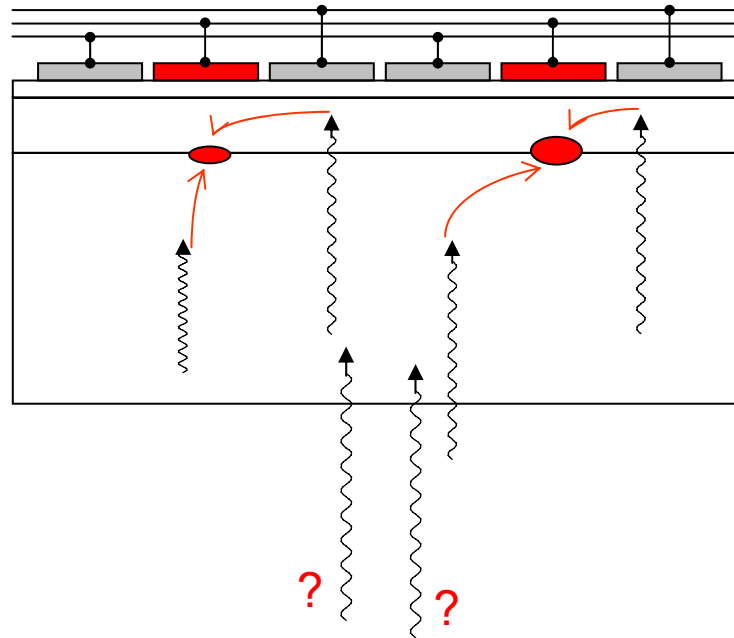
Diffusion des charges

dapnia



saclay

- Les e^- qui « voient » le champ électrique s'accumulent à la jonction p-n
- Ceux qui sont générés trop loin (à la frontière de 2 pixels, trop loin dans le substrat, sous les channel stops, ...) diffusent et peuvent être collectés dans différents pixels: dégradation de la résolution spatiale



- En pratique: CCD e2V 4280, pixels de $13.5 \mu\text{m}$, taille effective $16 \mu\text{m}$
- Problème potentiel pour les CCDs très épais ($\sim 300 \mu\text{m}$)

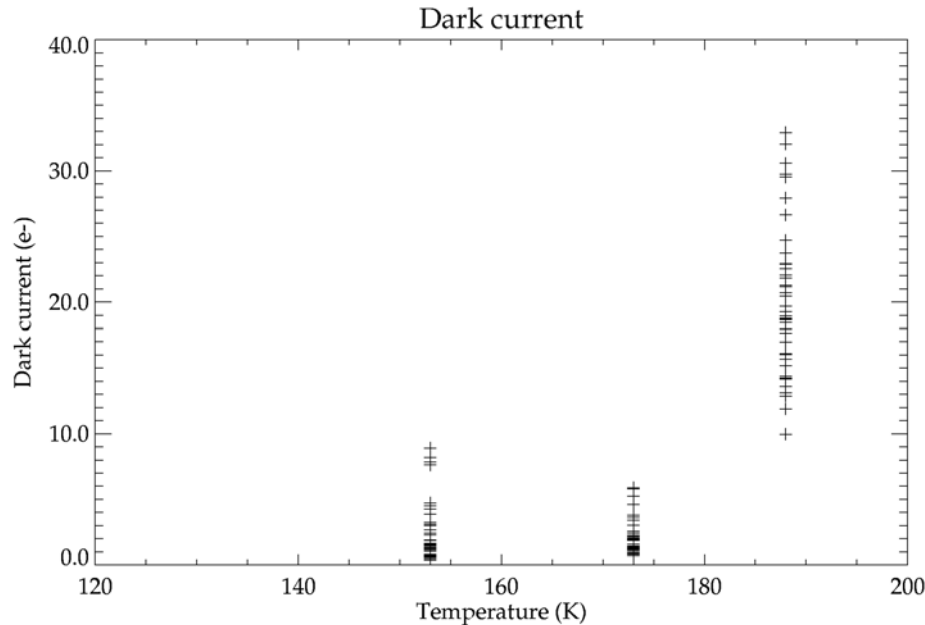
Courant d'obscurité (dark current)

dapnia



saclay

- Charges parasites créées par agitation thermique
- Pour diminuer le niveau de courant d'obscurité, il faut refroidir le CCD
- CCD e2V aminci: $Q_d/Q_{d_0}=122T^3e^{-6400/T}$, Q_{d_0} dark à l'ambiante
- A 150-160K, courant de l'ordre de quelques e-/pixel/heure



- Mode « multi-pinned phase » (MPP): permet de réduire le courant d'obscurité à haute température (-40°C) d'un facteur ~ 100 (élimine le courant d'obscurité généré à l'interface Si-SiO₂)
 - Le mode MPP diminue aussi le full well d'environ 1/3

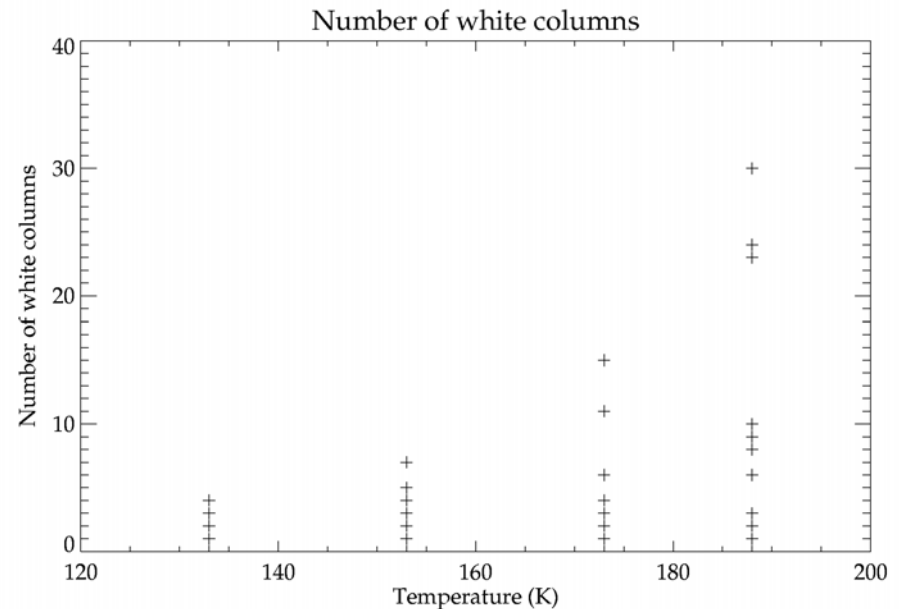
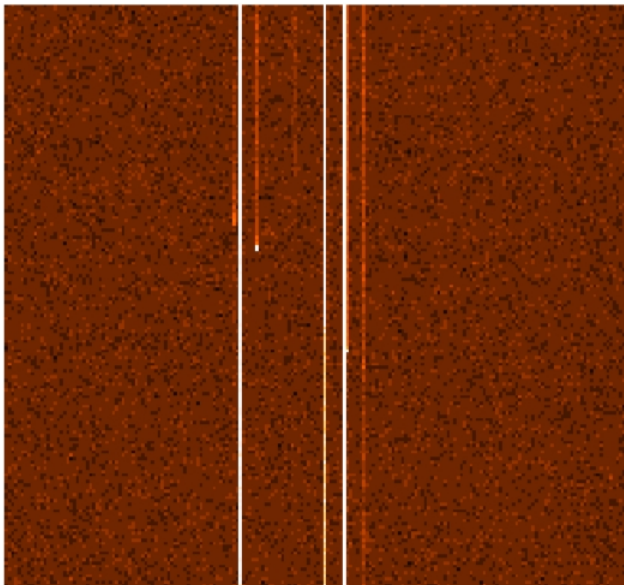
Cosmétique

dapnia



saclay

- Proportion de pixels défectueux (« hot » pixels, « white » pixels)
- Courant d'obscurité très élevé généré par des défauts locaux d'un pixel
- Le principe du CCD fait qu'un pixel chaud génère une colonne chaude
- En particulier, le registre série ne doit comporter aucun pixel défectueux
- La qualité cosmétique limite le rendement de fabrication et la taille des CCDs, et détermine le prix!
- Cosmétique fortement dépendante de la température
- CCDs MegaCam (e2V 4290): 0.1% de colonnes chaudes à 153K



Efficacité de transfert de charges (CTE)

dapnia



saclay

- Fraction des charges transférées d'un pixel au précédent pendant la lecture
- Pour n transferts, $S_{out} = CTE^n \times S_{in}$
- Paramètre fondamental qui détermine la qualité des images:
 - Avec une CTE de 99.99%, il n'y a plus que 90% du signal dans un pixel après 1000 transferts, et 67% du signal après 4000 transferts
- La CTE dépend de nombreux paramètres: température, vitesse de transfert, quantité de charges à transférer, ...
- La CTE est dégradée par la présence de pièges (dus au design, à la fabrication ou aux radiations), qui relâchent les charges après un certain délai:
 - CCD à canal en surface: CTE ~ 0.99 (après 100 transferts, il reste 36.6% du signal)
 - CCD à canal enterré actuel: CTE ~ 0.999999 (après 4000 transferts, il reste 99.6% du signal)

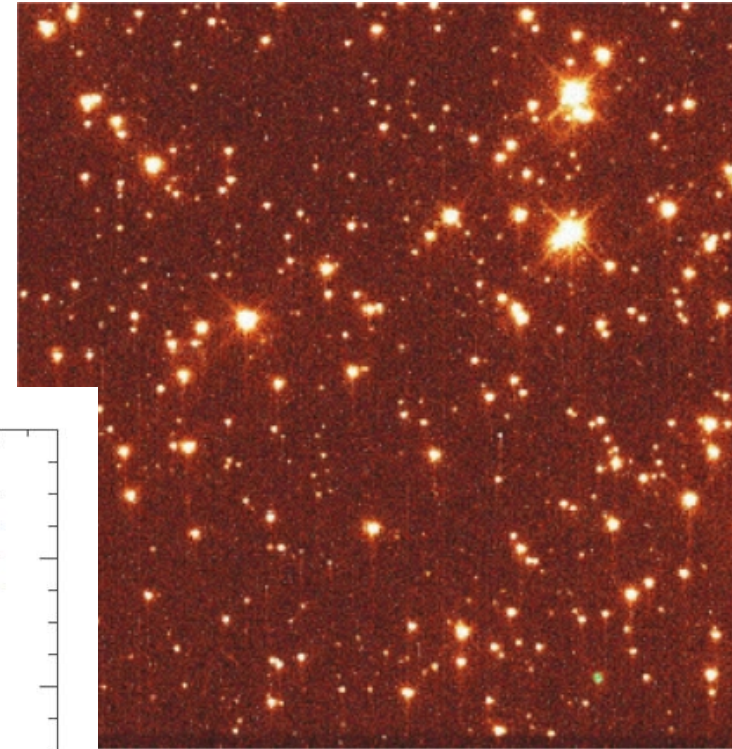
Dégradation de la qualité image par la CTE

dapnia

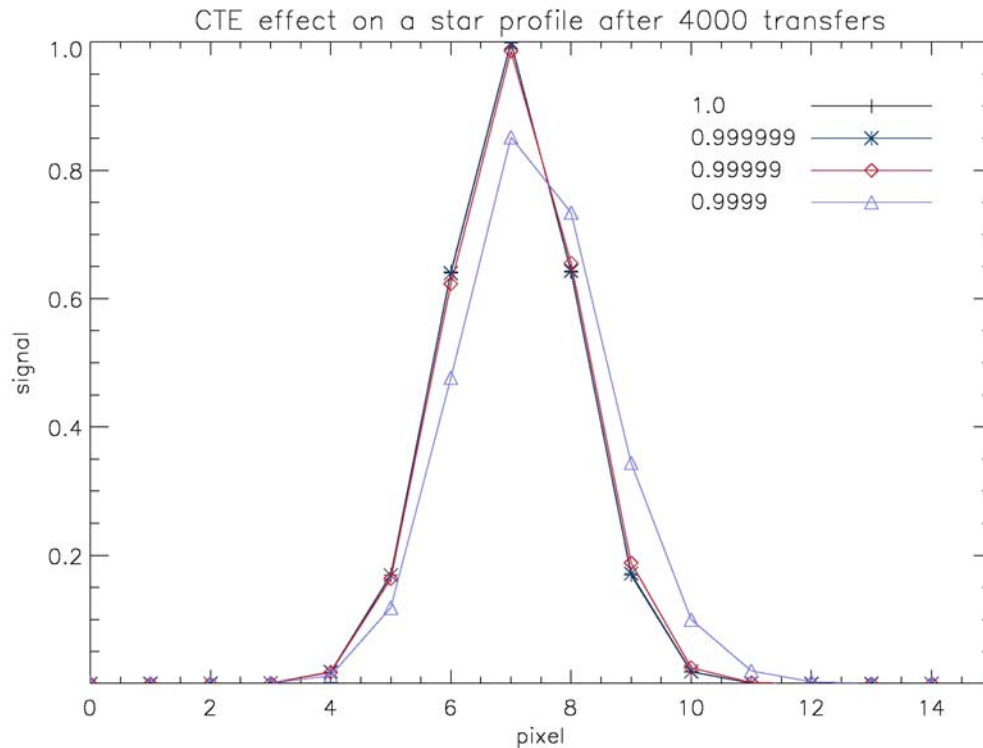


saclay

- La CTE génère une traînée des images
 - Pas très gênant en photométrie
 - Beaucoup plus gênant en imagerie



NASA HST/STIS



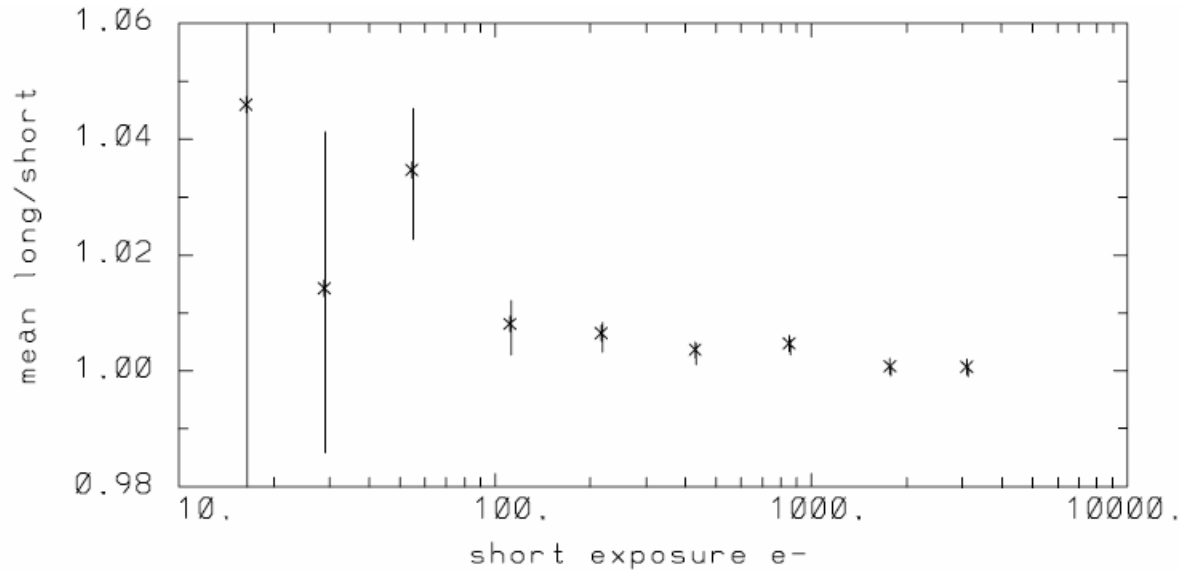
Linéarité

dapnia



saclay

- La génération, la collecte et le transfert des charges sont linéaires par construction
- La conversion charges-tension du circuit de sortie est linéaire sauf à très bas signal



Gilliland, ACS ISR0401, 2004

- Typiquement un CCD est linéaire sur une très grande plage: 100 - 200ke-, avec une non linéarité <1%

Bruit de lecture

dapnia

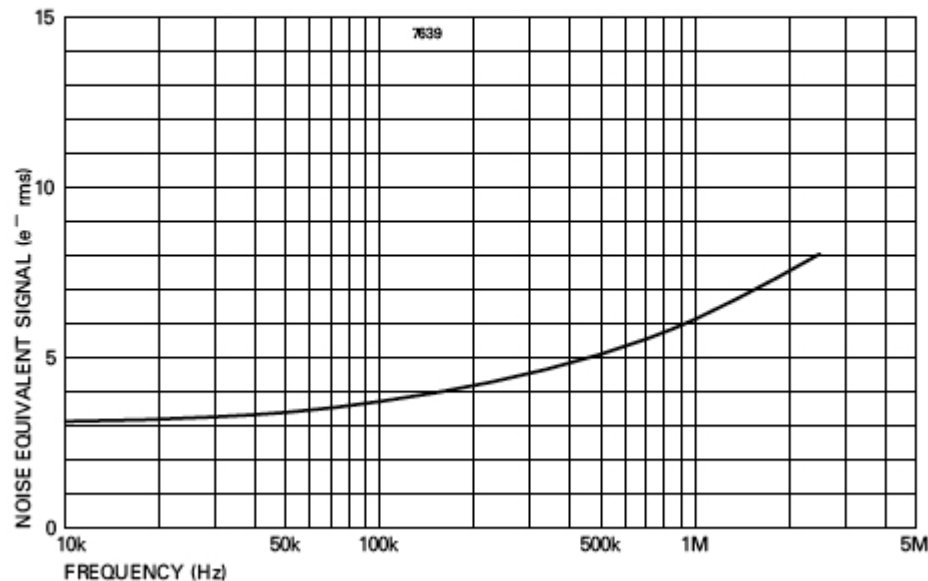


saclay

- Bruit blanc de l'amplificateur du circuit de sortie
- Dépend de la vitesse de lecture

TYPICAL OUTPUT CIRCUIT NOISE

(Measured using clamp and sample, temperature range 140 - 230 K)



© e2v technologies 2003

- Il faut trouver un compromis entre la vitesse de lecture (et le temps de télescope perdu) et le niveau de bruit
- Typiquement, bruit ~4-5 e⁻

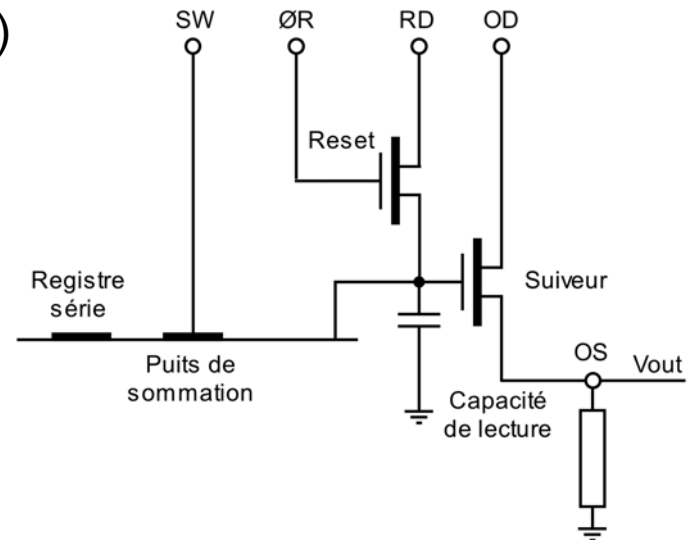
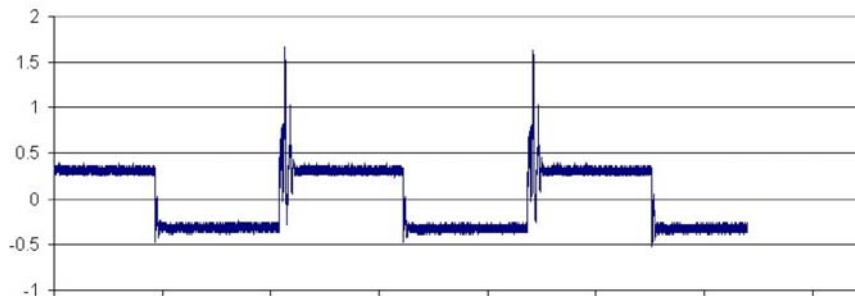
Double échantillonnage corrélé

dapnia



saclay

- Il faut une capacité très petite pour une bonne sensibilité: $V = Q/C$
- Le bruit associé au niveau de reset est un bruit blanc (bruit « kTC »):
$$N(V) = \sqrt{kT/C} \text{ ou } N(e^-) = \sqrt{ktC}/q$$
- Pour $C=40\text{fF}$, on a $S_V=4\mu\text{V}/e^-$ et $N=57e^-$: bruit beaucoup trop élevé!
- On supprime ce bruit en mesurant à la fois le niveau référence et le niveau pixel: double échantillonnage corrélé (« CDS »)
 - « Clamp and sample », « Dual slope integrator »
 - CDS digital (Gach et al., PASP 115, 1068, 2003): niveaux échantillonnés 100 à 200 fois, puis traitement digital du signal: nécessite des ADC rapides ($\geq 10\text{MHz}$)



« On-chip binning »

dapnia



saclay

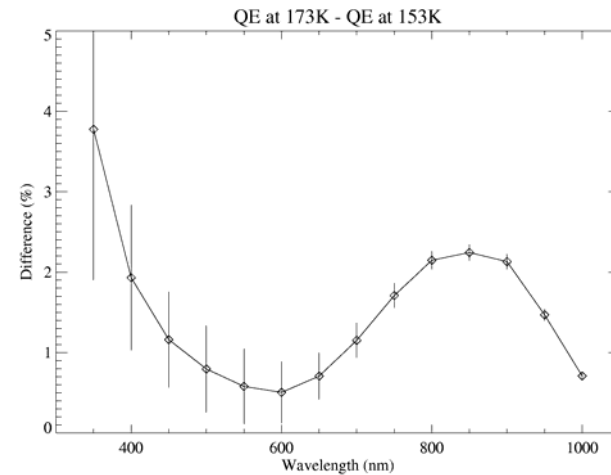
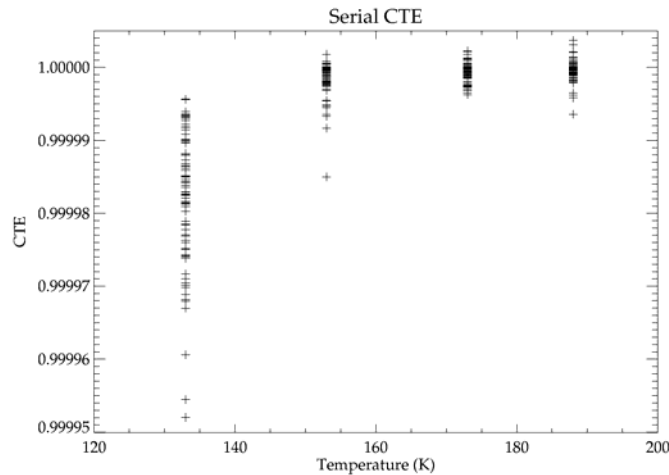
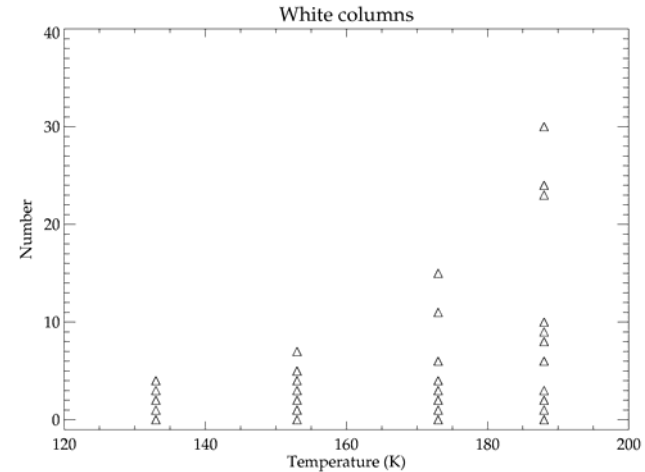
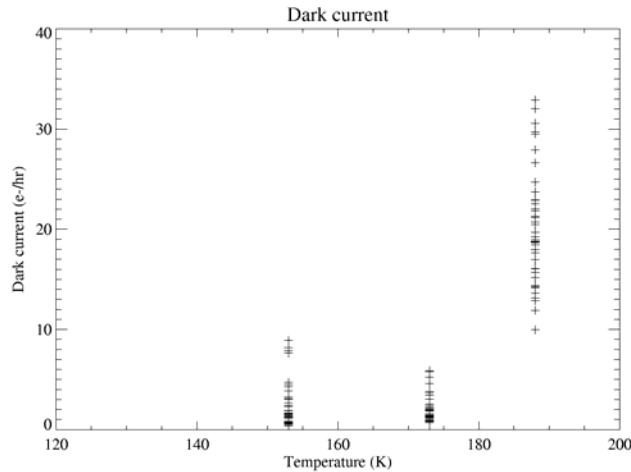
- On peut additionner le contenu de plusieurs pixels avant la lecture
 - Transfert de la 1ère ligne de la zone image dans le registre série
 - Transfert de la 2ème ligne de la zone image dans le registre série
 - ⇒ Addition des contenus des 2 premières lignes
 - Transfert du 1er pixel du registre série dans le summing well
 - Transfert du 2ème pixel du registre série dans le summing well
 - ⇒ Addition du contenu des pixels (1,1), (2,1), (1,2) et (2,2)
 - Transfert du summing well dans le circuit de lecture

- Augmentation du rapport signal à bruit
- Augmentation de la vitesse de lecture
- Baisse de la résolution spatiale

- On peut transformer un CCD 4Kx4K avec pixels de $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ en un CCD 2Kx2K avec pixels de $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$...

Température optimale de fonctionnement

- Certaines performances varient avec la température
 - Il existe une plage de températures optimales vers 150-170K



Sources de bruit

dapnia



saclay

- Bruit de photons (shot noise)
 - Statistique de Poisson: $N_{\text{ph}} = \sqrt{S_{\text{ph}}} = \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}}}$
- Bruit du courant d'obscurité
 - Même statistique que les photons: $N_{\text{dc}} = \sqrt{S_{\text{dc}}}$
- Bruit de non uniformité de réponse des pixels
 - Proportionnel au signal: $N_{\text{ff}} = \text{ff} \times S_{\text{ph}} = \text{ff} \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}})$
- Bruit de lecture
 - Constant: $N_{\text{rn}} = \text{RN}$
- Bruit total = somme quadratique des différentes sources de bruit
 - Bruit total:
$$N_{\text{tot}} = \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}} + S_{\text{dc}} + \text{ff}^2 \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}})^2 + n_{\text{pix}} \times \text{RN}^2}$$
 - Rapport signal à bruit:
$$\text{SNR} = S_{\text{sc}} / \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}} + S_{\text{dc}} + \text{ff}^2 \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}})^2 + n_{\text{pix}} \times \text{RN}^2}$$

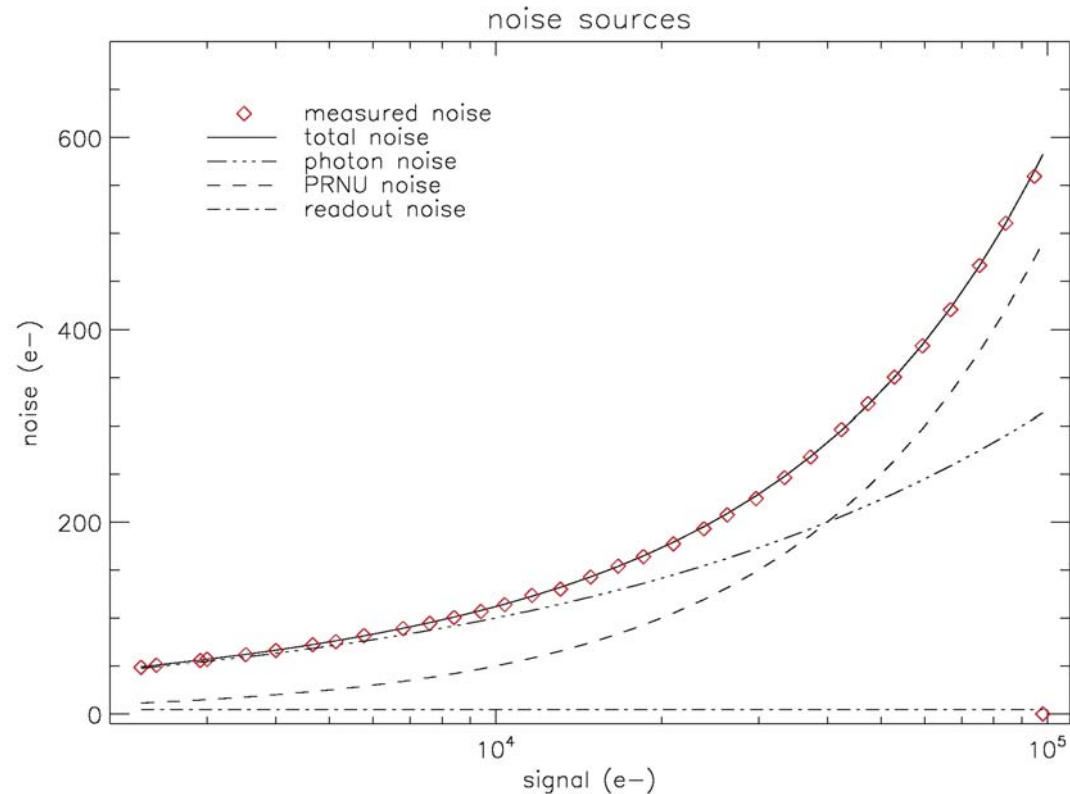
Rapport signal à bruit

dapnia



saclay

- 3 régimes de fonctionnement
 - A très bas signal, SNR dominé par le bruit de lecture: $N_{\text{tot}} \approx \text{cte}$
 - Puis par le bruit de photons: $N_{\text{tot}} \approx \sqrt{S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}} + S_{\text{dc}}} \propto \sqrt{t_{\text{pos}}}$
 - Puis par la PRNU: $N_{\text{tot}} \approx \text{ff} \times (S_{\text{sc}} + S_{\text{bg}}) \propto t_{\text{pos}} \Rightarrow \text{SNR constant!}$
- La courbe bruit vs signal est appelée « photon transfer curve »



Temps de pose et rapport signal à bruit

dapnia



saclay

- En pratique
 - Courant d'obscurité négligeable: $S_{dc} \sim 5-10 \text{ e}^-/\text{heure}/\text{pixel}$
 - Bruit de lecture: $RN \sim 4-5 \text{ e}^-$
 - PRNU: $\sim 1-2 \%$
 - Fond de ciel dans le visible: de quelques $\text{e}^-/\text{s}/\text{pixel}$ au sol (CFHT/MegaCam) à quelques $1/100 \text{ e}^-/\text{s}/\text{pixel}$ (HST/ACS)
- Au sol, chaque pose dure le temps juste nécessaire pour travailler dans un régime dominé par le bruit de photons: 5-20 minutes par pose, en fonction du domaine de longueur d'onde et de la largeur du filtre
- Dans l'espace, on arrive rarement à ce régime, et le bruit de lecture peut contribuer significativement au bruit total

dapnia



saclay

Mesures des performances

Banc de caractérisation des CCDs

dapnia

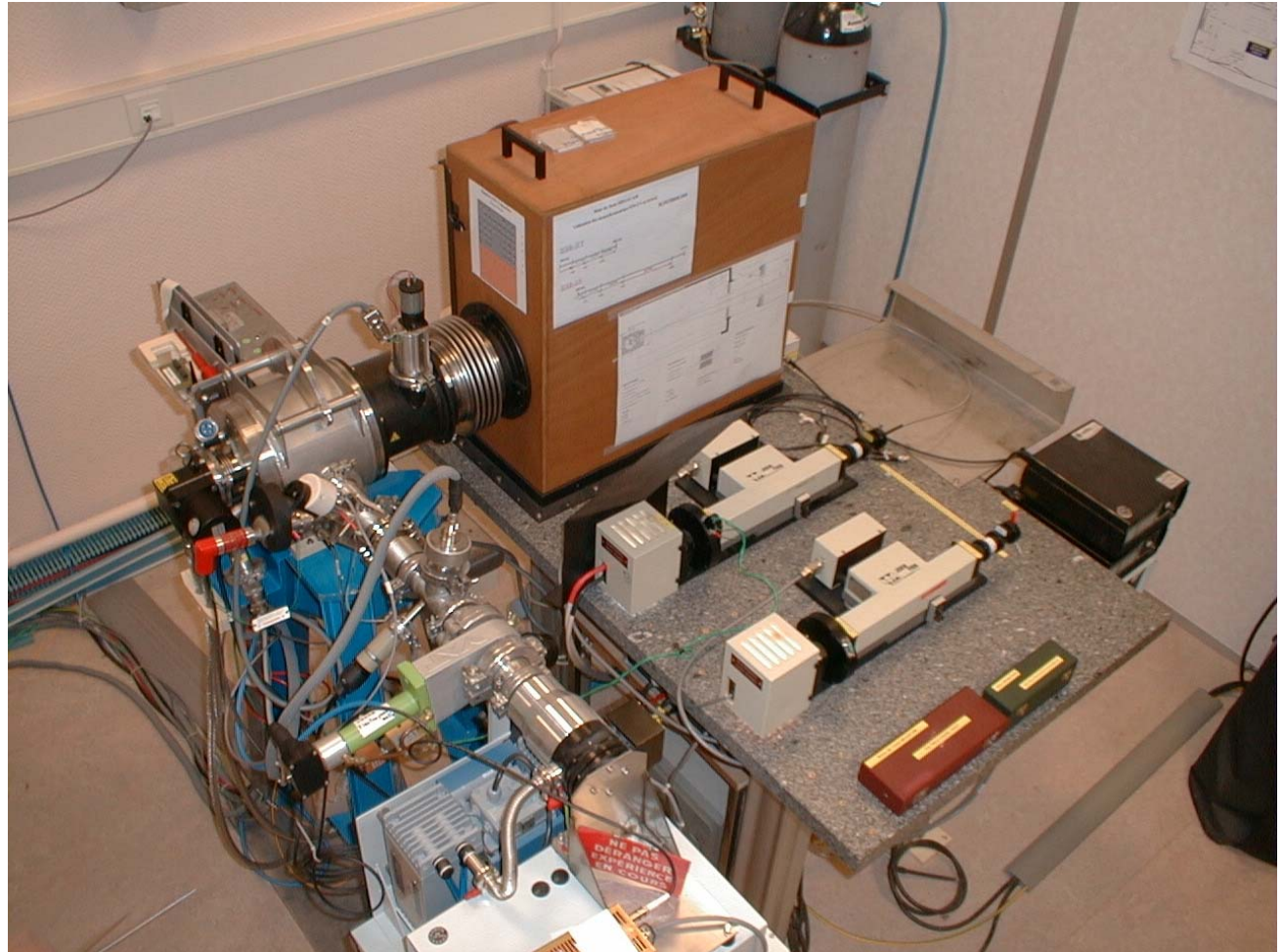


cea



saclay

- Dark + cosmétique
- Linéarité +full well
- QE + PRNU
- Gain
- CTE
- RN



CEA-DAPNIA

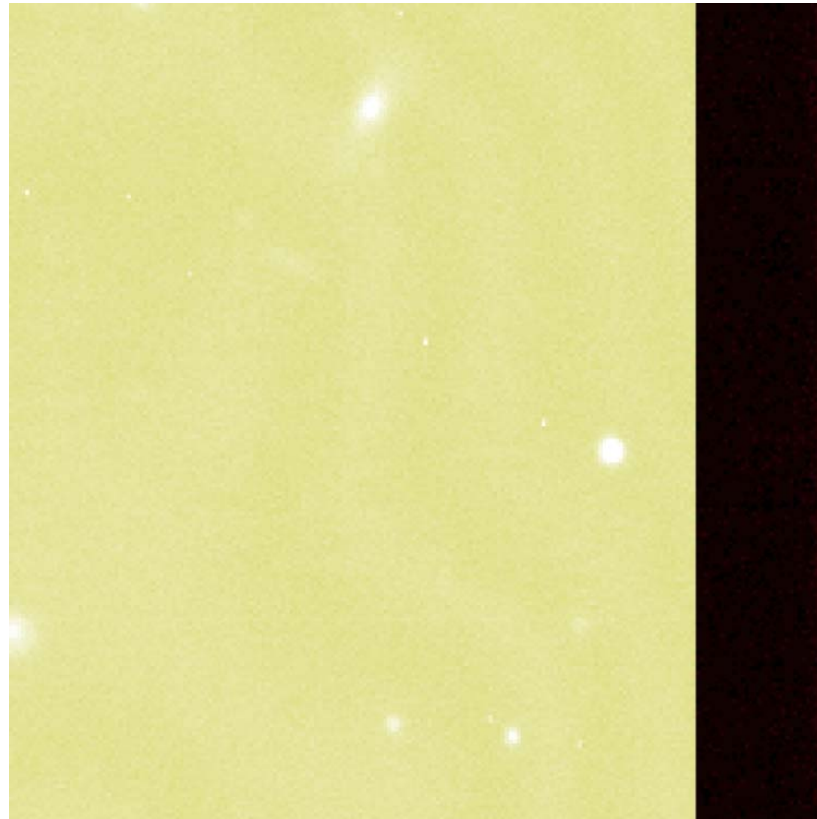
Mesure du bruit de lecture

dapnia



saclay

- On fait une série de bias (lecture immédiate du CCD à temps de pose 0s), et la dispersion des valeurs des pixels donne le bruit de lecture
- On peut mesurer le niveau de bias (zéro de l'électronique) et le bruit de lecture sur chaque image scientifique en continuant la lecture après avoir lu tous les pixels physiques (« overscan pixels »)



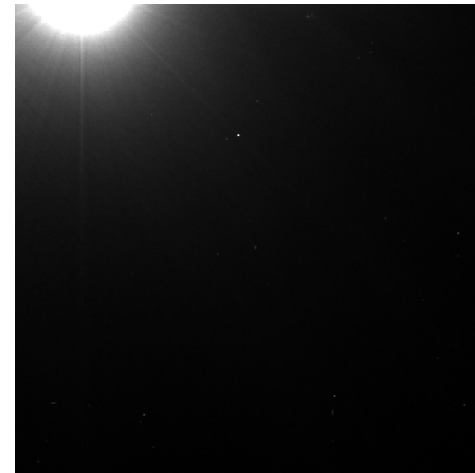
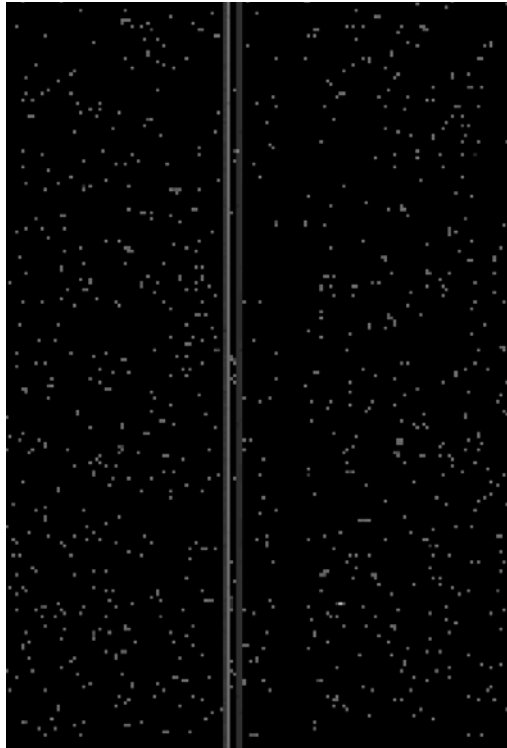
Mesure du courant d'obscurité et cosmétique

dapnia



saclay

- 2 possibilités:
- Poses courtes à température élevée et extrapolation en utilisant un modèle de dépendance en température
 - On gagne du temps mais mesures non précises (e2v)
- Poses longues (1 heure) à basse température
 - Permet de détecter des effets à faible niveau



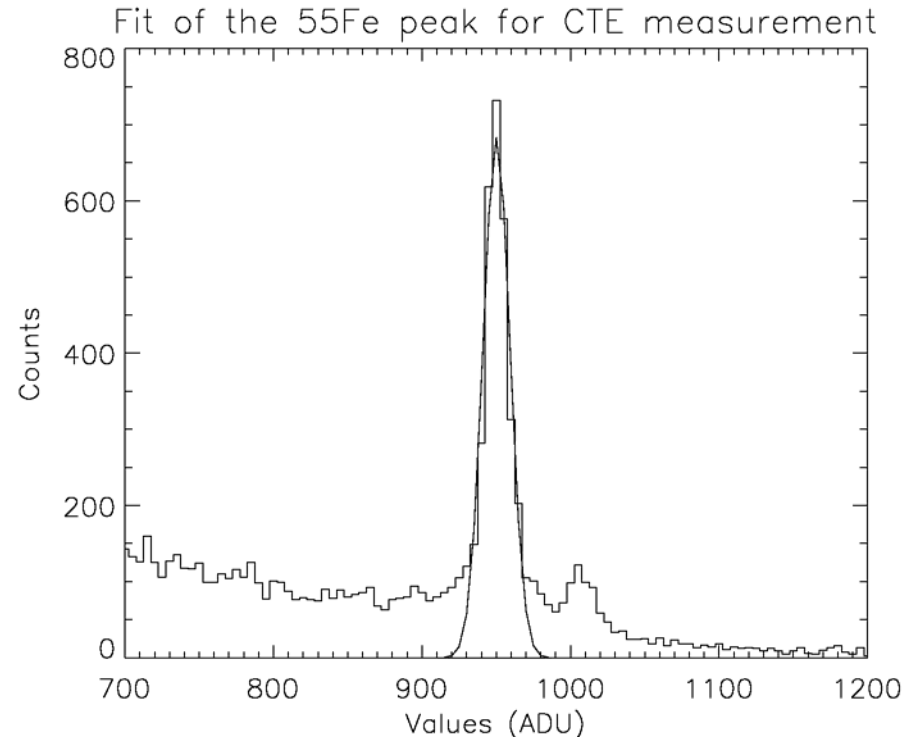
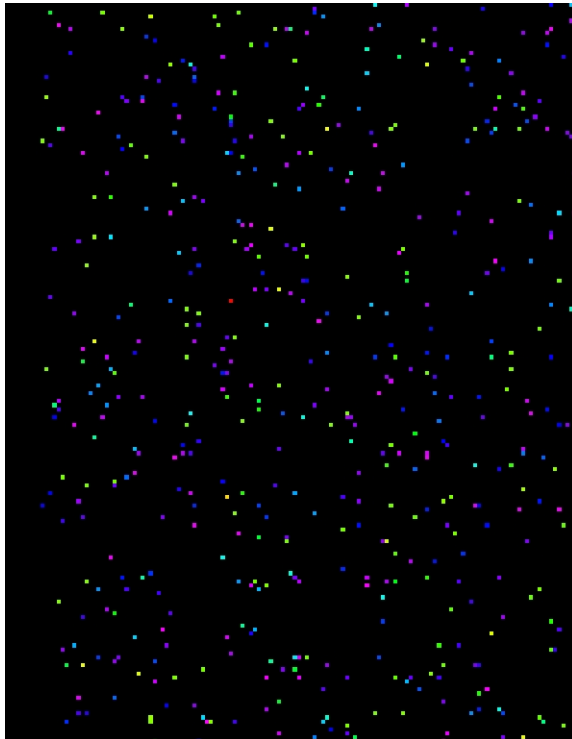
Mesure de la CTE

dapnia



saclay

- Plusieurs méthodes, la plus fiable est d'utiliser une source de Fe^{55}
 - Emission de photons X à 5.9 keV: 1620 e^- par photon
 - On illumine uniformément le CCD et on mesure la différence de signal dans une zone proche du circuit de sortie et dans les zones les plus éloignées
 - Permet également la mesure du gain de l'électronique (e^-/ADU)



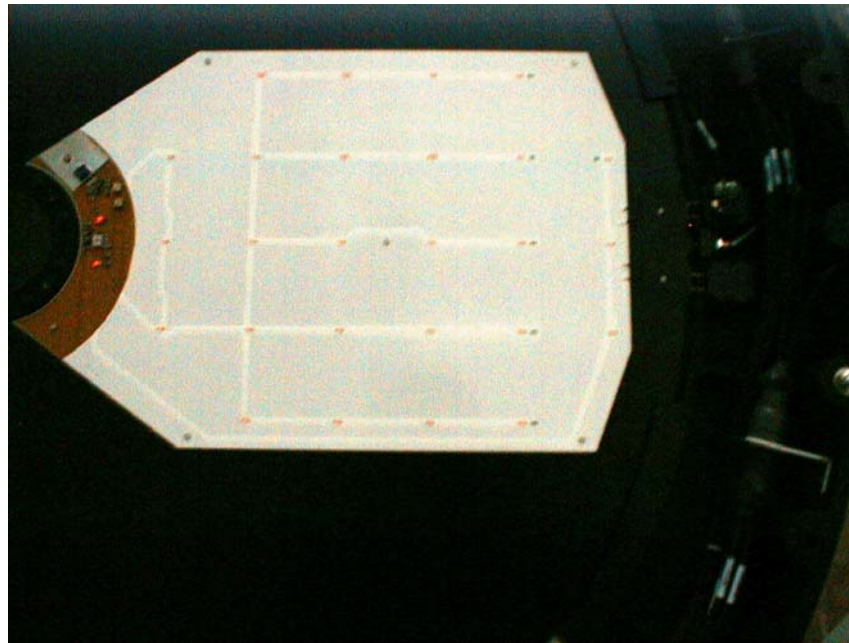
Mesure de la linéarité

dapnia



saclay

- Très simple: on mesure le signal donné par une source lumineuse stable, et on augmente le temps de pose, déterminé par un obturateur, pour explorer toute la dynamique
- On peut aussi travailler à temps de pose constant et augmenter le flux de la source
- MegaCam: matrice de LEDs rouges pulsées



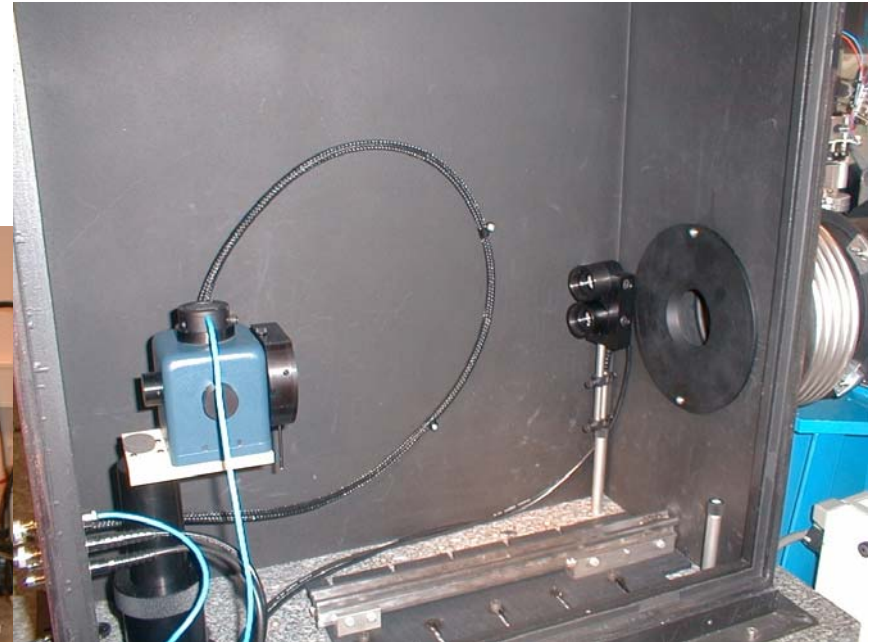
Mesure du QE

dapnia



saclay

- Rapport entre le flux émis mesuré par la photo-diode et le flux observé mesuré par le CCD
- Source de lumière monochromatique
- Photo-diode calibrée
- Sphère intégratrice



dapnia



saclay

Observations et traitement d'images

Observations en mode pointé

dapnia



saclay

- Le télescope est pointé sur la zone à observer, et reste fixe par rapport à cette zone
- CCD full frame
 - CCD standard: toute la surface est photo-sensible
 - Un obturateur s'ouvre et se ferme pour définir le temps de pose, puis lecture de l'image, et nouvelle pose
 - Pour: simple et naturel
 - Contre: efficacité d'observation non optimale
- CCD frame transfer
 - CCD dont la moitié de la surface est masquée pour ne pas être photo-sensible
 - On fait une pose, puis on transfère très rapidement le contenu de la zone photo-sensible dans l'autre moitié du CCD, puis on lit tranquillement cette moitié pendant la pose suivante
 - Pour: pas besoin d'obturateur, pas de temps de télescope perdu pendant la lecture du CCD
 - Contre: champ de vue 2 fois plus petit

Observations en mode TDI (time delayed integration)

dapnia



saclay

- On laisse défiler le ciel devant le télescope, avec un mouvement parallèle aux colonnes du CCD
- Le CCD est en lecture permanente, avec une vitesse de transfert des lignes égale à la vitesse de défilement du ciel
 - Les e^- générés par les photons issus de la source restent dans le même paquet de charges
 - Le temps de pose est égal au temps de traversée d'un CCD
- Pour: pas besoin d'obturateur, pas de temps de télescope perdu pendant la lecture du CCD, très peu de manœuvres du télescope
- Contre: il faut asservir le mouvement du télescope sur l'électronique de contrôle du CCD, et il faut assurer un mouvement du télescope parallèle aux colonnes du CCD
- Mode d'observation peu utilisé en astronomie (SDSS, Gaia, DUNE) mais beaucoup utilisé en observation de la Terre, et très bien adapté à de très grands surveys

Images et calibrations nécessaires

dapnia



saclay

- N images d'un même champ, en dépointant légèrement le télescope (mode pointé) ou en décalant les CCDs (mode TDI)
 - Elimination des impacts du rayonnement cosmique
 - Minimisation des effets des pixels défectueux
- Bias: poses à temps de pose 0s
 - Soustraction du niveau zéro donné par l'électronique
- Dark: poses à l'obscurité de durées égales aux poses scientifiques
 - Soustraction du courant d'obscurité
- Flat fields et superflats: cartes de PRNU à travers les filtres utilisés pour les poses scientifiques
 - Correction de la dispersion de QE des pixels
- Standards photométriques: mesures d'étoiles de magnitudes connues
 - Conversion du signal mesuré en unités physiques
- Standards astrométriques: mesures d'étoiles de positions connues
 - Conversion coordonnées pixel (x,y) en coordonnées ciel (α, δ)
 - Correction de la distorsion optique

Correction du bias

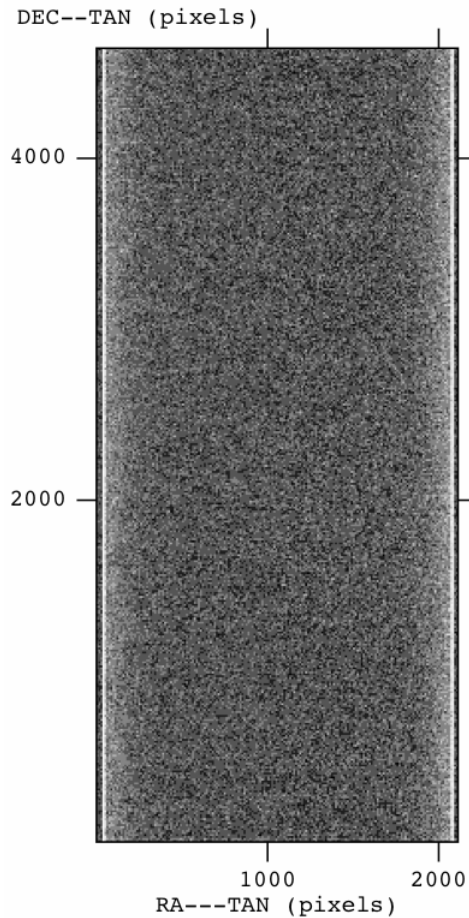
dapnia



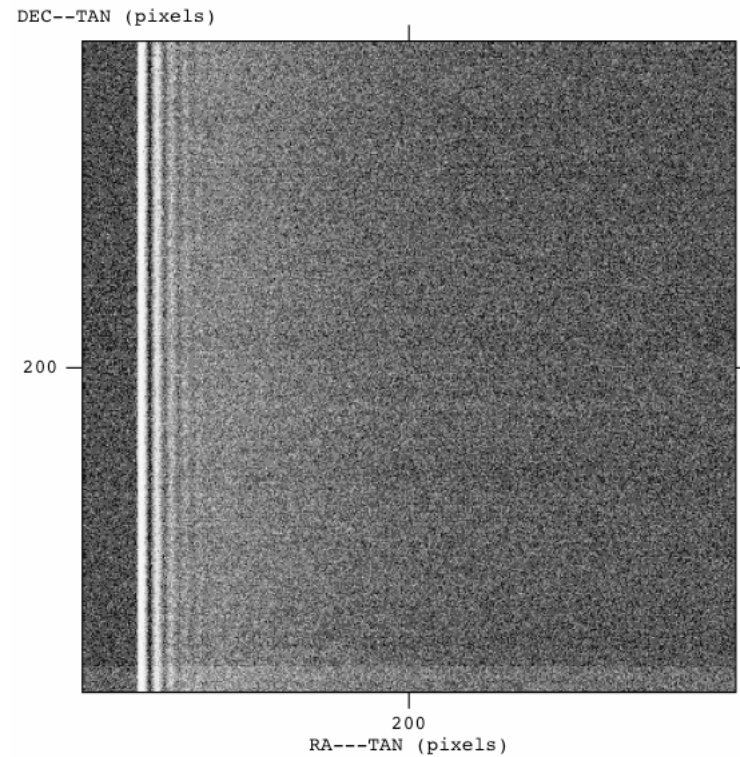
saclay

- A priori même niveau pour tous les pixels
- Soustraction pixel à pixel nécessaire pour corriger d'éventuels défauts de l'électronique de lecture

03Am06.bias.0.36.00_ccd03



03Am06.bias.0.36.00_ccd03



Correction du dark

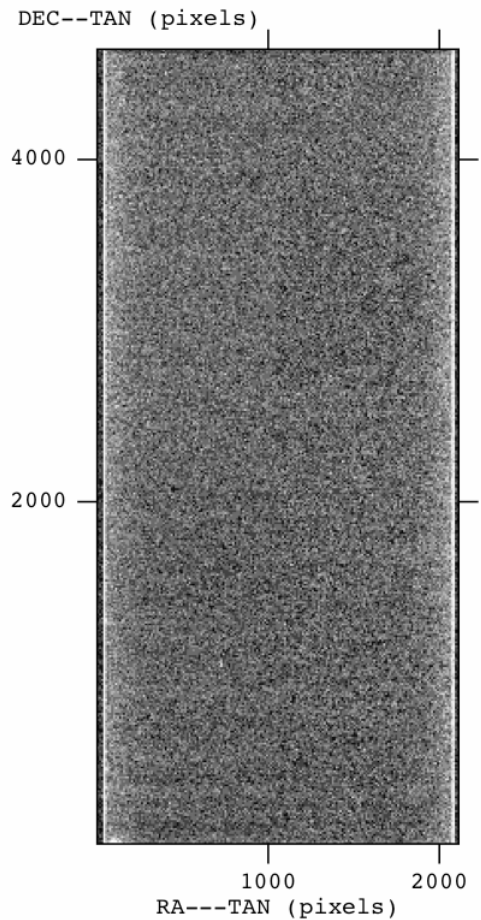
dapnia



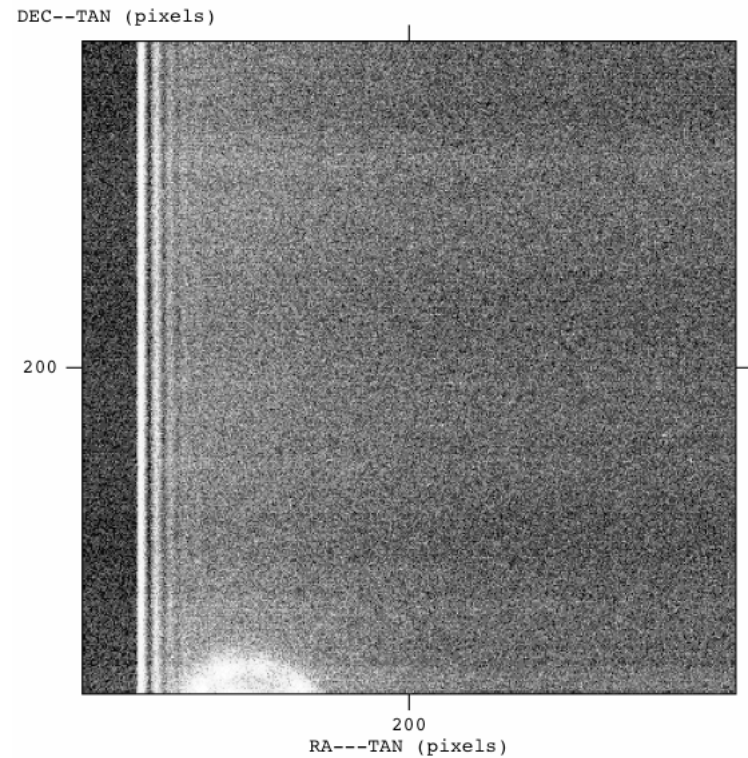
saclay

- Soustraction pixel par pixel car les images de courant d'obscurité peuvent avoir de la structure

03Am06.dark.1800.36.00_ccd03



03Am06.dark.1800.36.00_ccd03



Correction du flat field et des franges

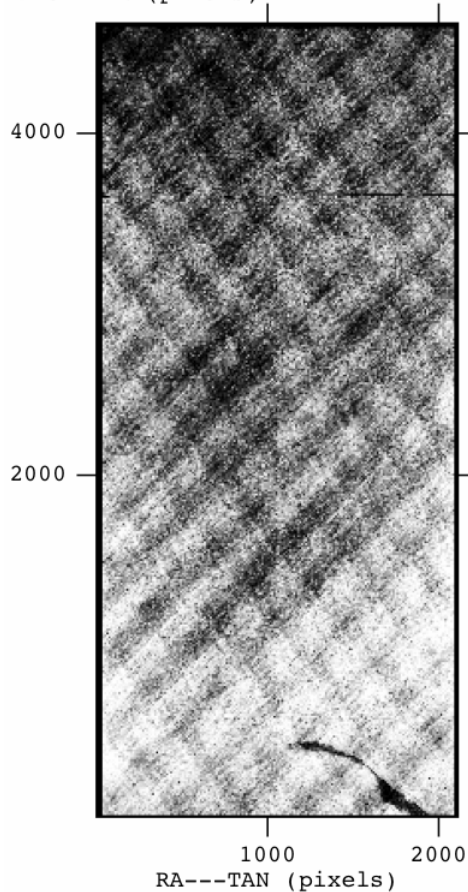
dapnia



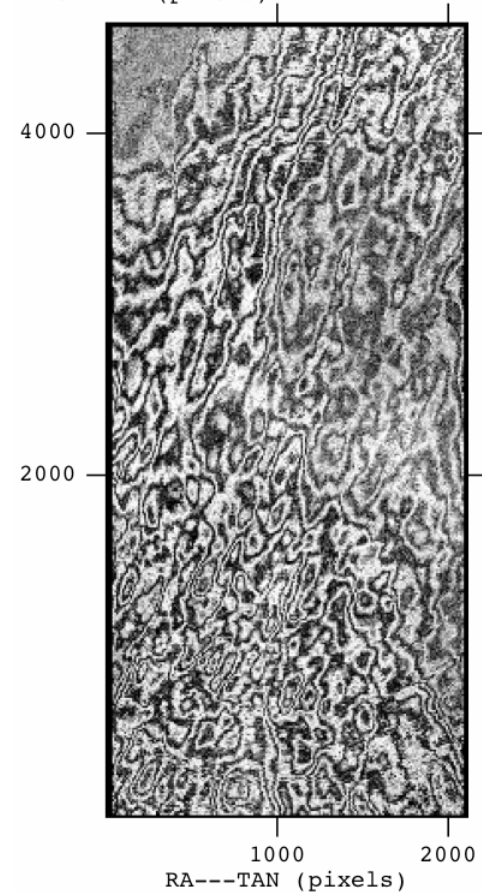
saclay

- Division par l'image de flat field et soustraction d'une image de franges. Les cartes de franges sont obtenues par « superflat » en combinant les images du ciel, elles varient avec l'atmosphère

03Am06.flat.u.36.02_ccd03
DEC--TAN (pixels)



03Am06.fringe.i.36.01_ccd03
DEC--TAN (pixels)



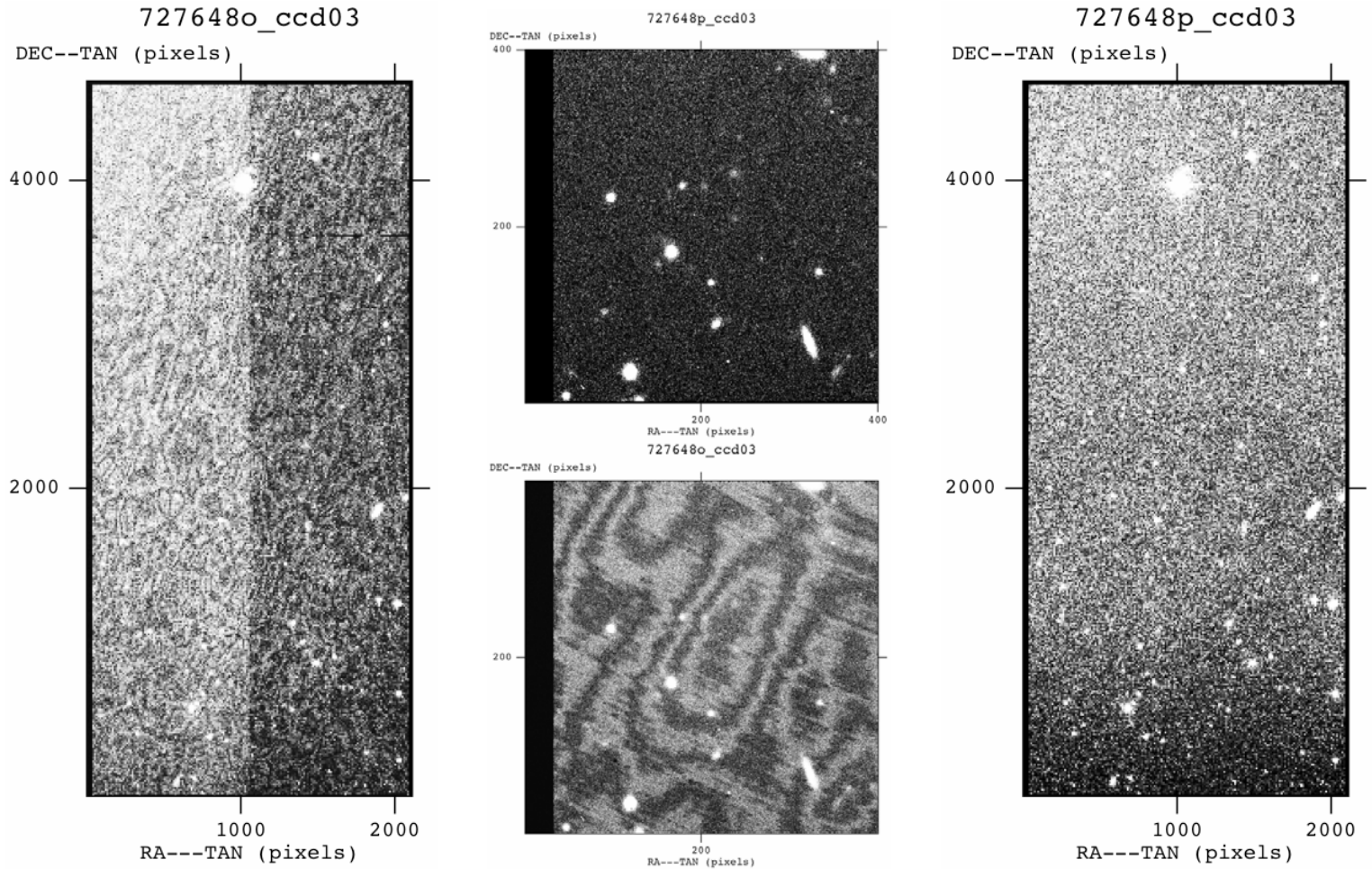
Preprocessing

dapnia



saclay

- Les opérations précédentes constituent le « preprocessing » des données, c'est-à-dire la correction des effets instrumentaux



Calibration photométrique

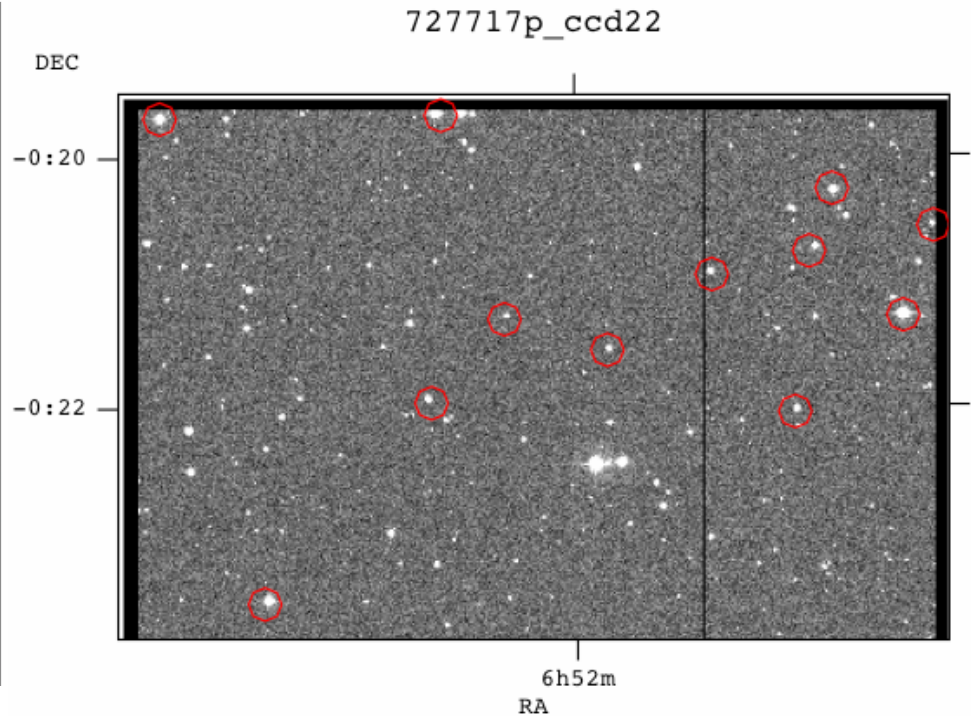
dapnia



saclay

- Observations de champs spécifiques d'étoiles de luminosités connues
- Calcul du signal mesuré sur chacune de ces étoiles
- Transformation des flux instruments (ADUs) en flux de photons (mag)
- Précision photométrique sur données CFHTLS $\sim 0.004\text{mag}$ (0.4%)

<u>Full</u>	<u>Star</u>	<u>RA2000</u>	<u>DE2000</u>	<u>Vmag</u>	<u>B-V</u>	<u>U-B</u>	<u>V-R</u>	<u>R-I</u>
		"h:m:s"	"d:m:s"	mag	mag	mag	mag	mag
<u>1</u>	98 666	06 52 10	-00 23 34	12.732	0.164	-0.004	0.091	0.108
<u>2</u>	98 652	06 52 05	-00 21 58	14.817	0.611	0.126	0.276	0.339
<u>3</u>	98 646	06 52 03	-00 21 18	15.839	1.060	1.426	0.583	0.504
<u>4</u>	98 642	06 51 59	-00 21 33	15.290	0.571	0.318	0.302	0.393
<u>5</u>	98 193	06 52 04	-00 27 18	10.030	1.180	1.152	0.615	0.537
<u>6</u>	98 627	06 51 53	-00 22 03	14.900	0.689	0.078	0.428	0.387
<u>7</u>	98 185	06 52 02	-00 27 21	10.536	0.202	0.113	0.109	0.124
<u>8</u>	98 634	06 51 56	-00 20 57	14.608	0.647	0.123	0.382	0.372
<u>9</u>	98 688	06 52 19	-00 23 34	12.754	0.293	0.245	0.158	0.180
<u>10</u>	98 626	06 51 53	-00 20 46	14.758	1.406	1.067	0.806	0.816
<u>11</u>	98 650	06 52 05	-00 19 40	12.271	0.157	0.110	0.080	0.086
<u>12</u>	98 618	06 51 50	-00 21 17	12.723	2.192	2.144	1.254	1.151
<u>13</u>	98 624	06 51 52	-00 20 16	13.811	0.791	0.394	0.417	0.404
<u>14</u>	98 675	06 52 14	-00 19 41	13.398	1.909	1.936	1.082	1.002
<u>15</u>	98 614	06 51 49	-00 20 34	15.674	1.063	0.399	0.834	0.645
<u>16</u>	98 670	06 52 12	-00 19 17	11.930	1.356	1.313	0.723	0.653
<u>17</u>	98 685	06 52 19	-00 20 19	11.954	0.463	0.096	0.290	0.280
<u>18</u>	98 676	06 52 14	-00 19 21	13.068	1.146	0.666	0.683	0.673
<u>19</u>	98 L5	06 52 16	-00 19 39	17.800	1.900	-0.100	3.100	2.600
<u>20</u>	98 682	06 52 17	-00 19 42	13.749	0.632	0.098	0.366	0.352



Calibration astrométrique

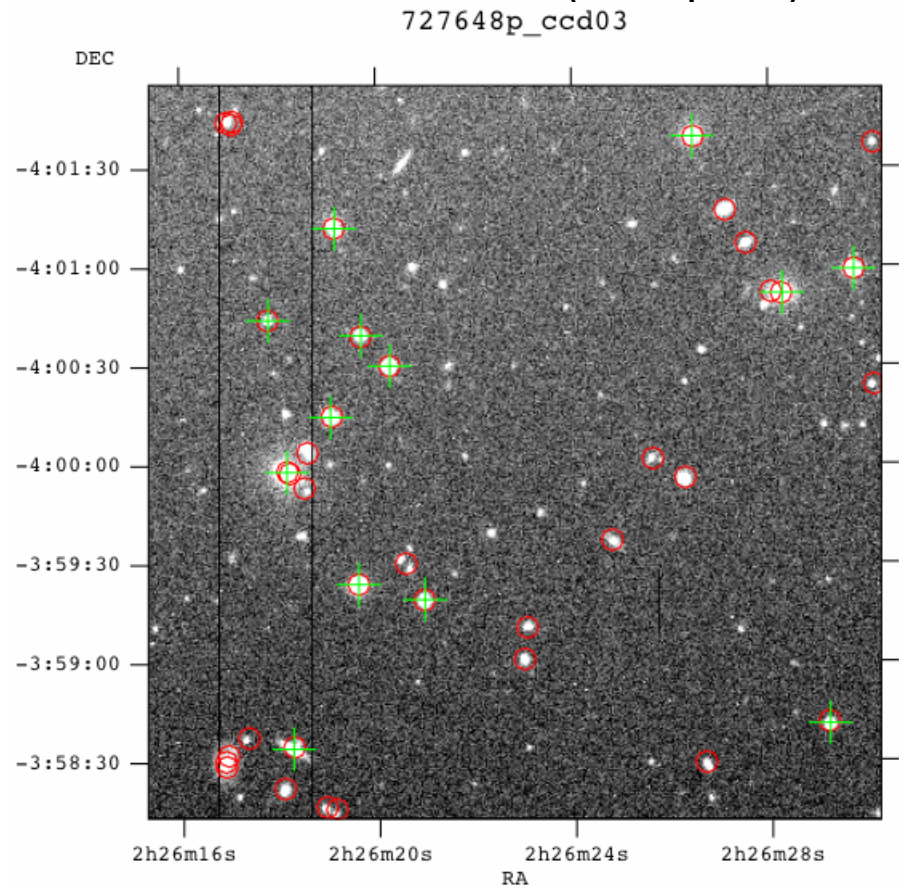
dapnia



saclay

- Extraction dans chaque image d'une liste d'objets brillants
- Comparaison avec un catalogue d'étoiles de coordonnées connues
- Transformation des coordonnées pixels (x,y) en coordonnées ciel (α, δ)
- Précision astrométrique sur données CFHTLS ~ 20mas (1/10 pixel)

<u>Full</u>	<u>USNO-B1.0</u>	<u>RAJ2000</u>	<u>DEJ2000</u>	<u>Bmag</u>	<u>Rmag</u>
		<u>deg</u>	<u>deg</u>	<u>mag</u>	<u>mag</u>
<u>1</u>	0860-0022504	036.603214	-03.993614		
<u>2</u>	0859-0022973	036.606706	-04.000450	21.00	
<u>3</u>	0860-0022494	036.585689	-03.991700		
<u>4</u>	0860-0022508	036.609456	-03.998848	20.85	19.75
<u>5</u>	0860-0022502	036.595948	-03.986273		
<u>6</u>	0859-0022963	036.584395	-04.008348	19.58	16.87
<u>7</u>	0860-0022495	036.587245	-03.988631	18.95	17.08
<u>8</u>	0860-0022501	036.595717	-03.983603		19.92
<u>9</u>	0859-0022956	036.579481	-04.004120	20.71	19.08
<u>10</u>	0860-0022492	036.581653	-03.989970	16.42	15.01
<u>11</u>	0859-0022958	036.581964	-04.010831	20.45	18.46
<u>12</u>	0859-0022955	036.577378	-04.001053	20.42	19.73
<u>13</u>	0860-0022488	036.577114	-03.998103		20.37
<u>14</u>	0860-0022486	036.575878	-03.999312	20.59	
<u>15</u>	0860-0022485	036.575662	-03.999478	19.36	17.17
<u>16</u>	0859-0022952	036.574073	-04.012231		20.03
<u>17</u>	0859-0022984	036.616825	-04.014487		19.55
<u>18</u>	0859-0022957	036.579764	-04.019962	20.67	18.91
<u>19</u>	0859-0022988	036.617698	-04.014348	19.80	17.86
<u>20</u>	0859-0022979	036.614734	-04.018581		20.33



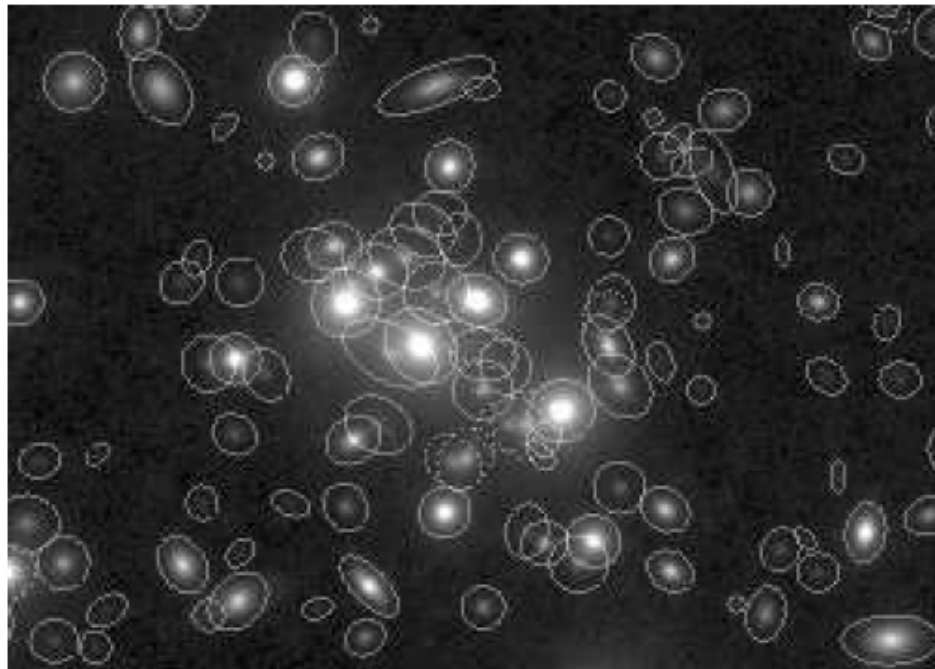
Coaddition et Cataloguage

dapnia



saclay

- Une fois les N images d'un même champ « astrométrées », on peut les coadditionner pour obtenir la sensibilité voulue
- Enfin on extrait toutes les sources contenues dans les images (logiciel SExtractor, Bertin et Arnouts, A&A 117, 393, 1996)
 - Calcul de position, magnitudes, formes, ...
 - Génération de catalogues d'objets



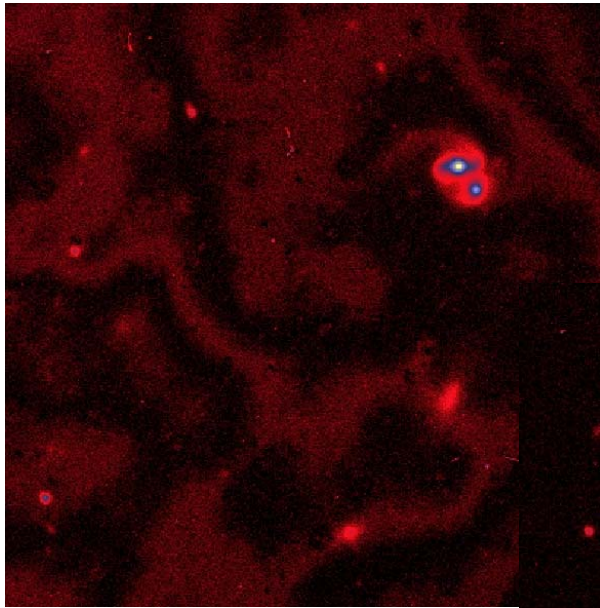
Bertin, Gretschi 2005, pp299-302

Exemple de traitement d'un champ

dapnia

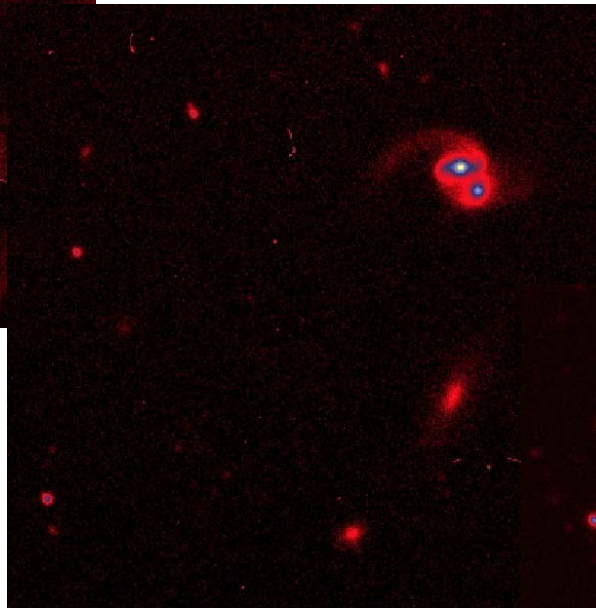


saclay

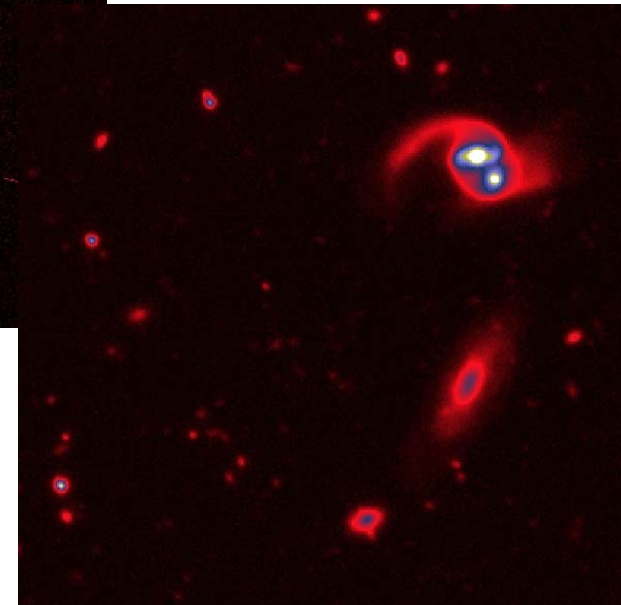


⇐ Image brute pose 520s, filtre i'

Image processée ⇒



100 images coadditionnées, total 52000s ⇒



dapnia



saclay

Développements récents

Récapitulatif des CCDs actuels

dapnia



saclay

- Détecteurs quasi parfaits!
 - QE élevé
 - Linéaire
 - Grande dynamique
 - Faible bruit
 - Grande taille

Détecteur	Plaque photo Kodak	Kodak 5 Mpixels	e2v 42-90
Nombre pixels		2600x1970	2048x4608
Taille pixels (μm)	4x4	6.8x6.8	13.5x13.5
Taille détecteur (mm)	350x350	18x13	28x62xMxN
QE (BGR)	0.02 0.03	0.32 0.40 0.32	0.85 0.80 0.75
Linéarité (%)	Non (log)	16	0.5
Full well (ke^-)		30	250
PRNU (%)		15	2
Dark (e^-/s)		200	0.003
Colonnes chaudes		0	2
CTE		0.999995	0.999995
Bruit (e^-)		30	5
Data rate (MHz)		25	0.166
Prix (€)	100 par plaque	< 900	22 k

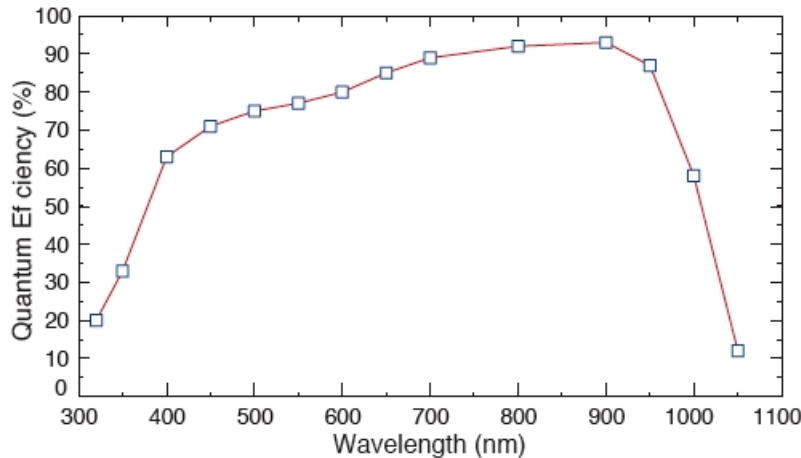
CCDs « fully depleted »

dapnia

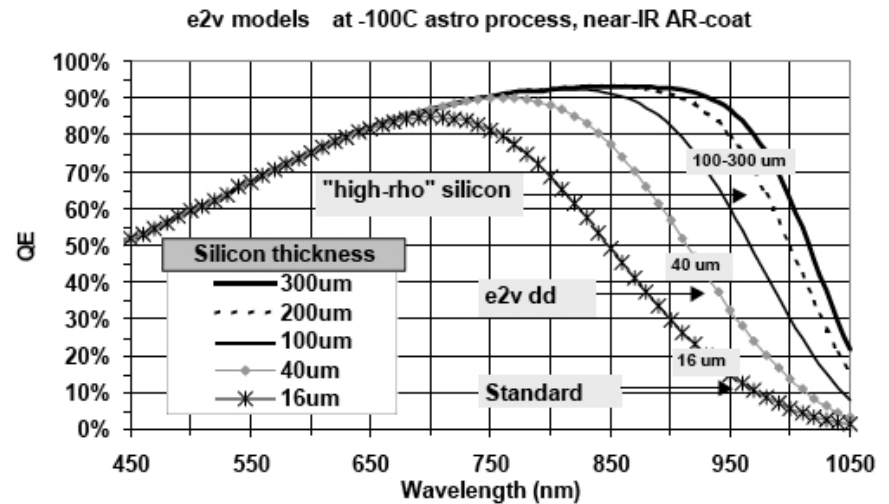


saclay

- Même idée que les CCD à deep depletion mais sur une plus grande épaisseur pour avoir un grand QE dans le rouge et le bleu
- Développement au LBNL dans le cadre du projet SNAP
 - CCD épais (100 - 300 μm), Si dopé n avec canal enterré p
 - Résistivité 10 $\text{k}\Omega\text{-cm}$ au lieu de 20 - 40 $\Omega\text{-cm}$
 - Tension de substrat 20 - 70 V au lieu de 10 V
- Développement similaire chez e2v



Bebek et al., SPIE vol 5167, 2003



Jorden et al., SPIE vol 6276, 2006

CCDs « Low light level (L3) »

dapnia



saclay

- EMCCDs: electron multiplying CCDs
- Problème: la turbulence atmosphérique varie à l'échelle de quelques dizaines de milli-secondes, et défléchit les rayons lumineux
 - ⇒ Une image résultant d'une pose de plusieurs secondes est donc dégradée par rapport à la limite théorique (diffraction)
- But: on veut augmenter la qualité image en réduisant l'effet de la turbulence atmosphérique (alternative à envoyer un télescope dans l'espace)
 - ⇒ Il faut donc faire des poses ultra-courtes et lire le CCD à cadence très élevée (quelques MHz)
 - ⇒ Or le bruit de lecture augmente très vite avec la cadence: 4-5 e⁻ vers 100 kHz, quelques dizaines d'e⁻ vers 10 MHz
- Solution: un registre de gain entre le registre série et le circuit de lecture
 - C'est un registre série où une des tensions appliquées pour le transfert des charges est très élevée (40-50 V au lieu de 10 V) pour accélérer les e⁻ et déclencher un phénomène d'avalanche
 - Le signal multiplié est ensuite converti par un circuit de lecture standard

CCDs « Low light level (L3) »

dapnia



saclay

- Collaboration e2v - université Cambridge
- CCD e2v 97-00: 512x512 pixels plus un registre gain de 536 éléments
- Multiplication du signal: x250 - x3000
⇒ Cadence lecture 11 MHz
- Haute résolution spatiale
- Comptage de photons

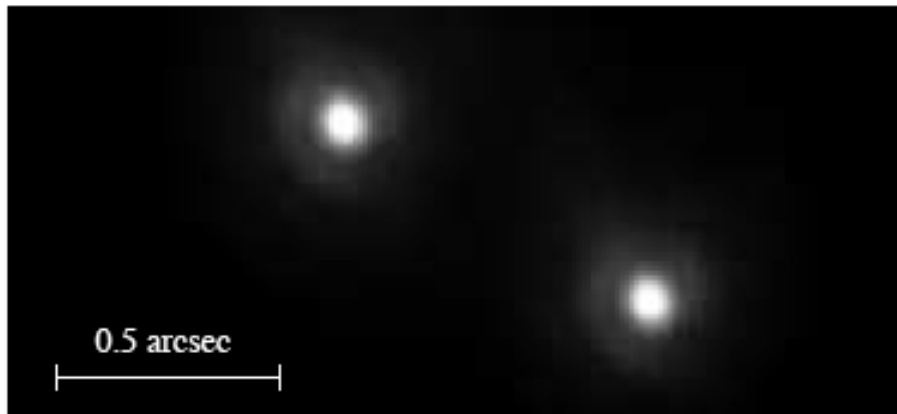
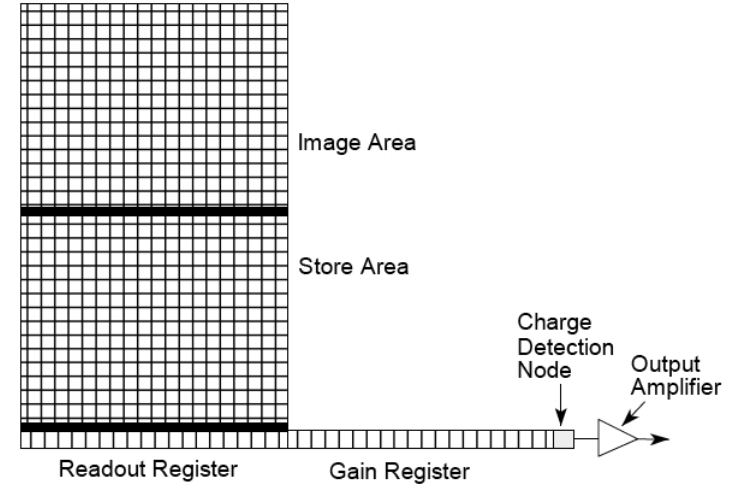
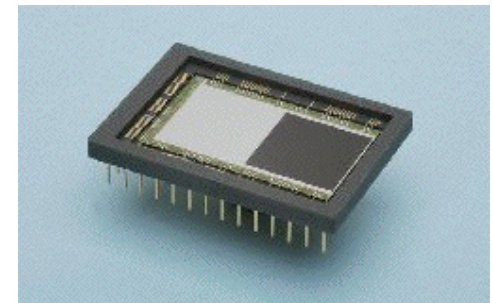


Fig. 5. A 1% selected image of ζ Boötis with a Strehl ratio of 0.26 and a FWHM of $\sim 0.1''$, taken in $0.42''$ seeing.

Law et al., A&A 446, 739, 2006



Jerram et al., SPIE vol 4306, 2001



CCD201 1Kx1K, © e2v technologies 2005

OTCCDs

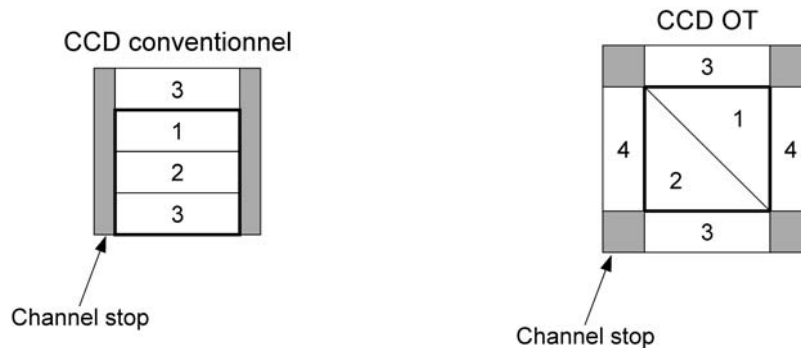
dapnia

cea

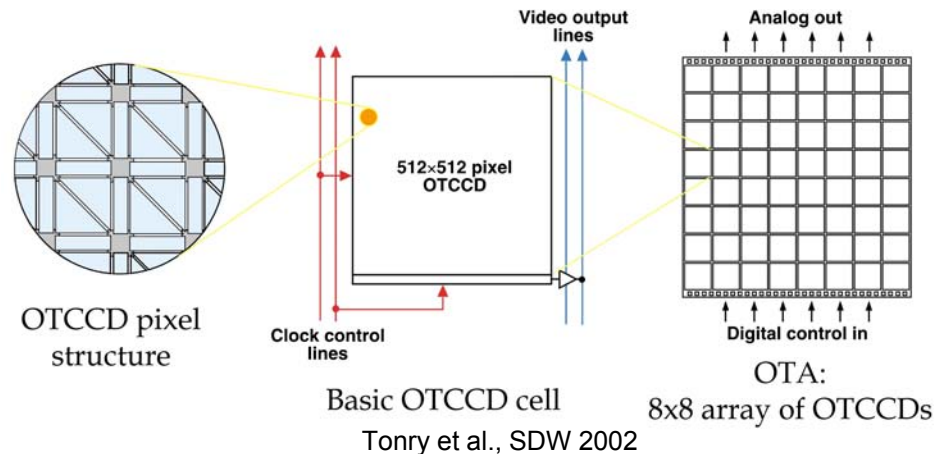
saclay

- CCDs à transfert orthogonal, i.e. dans les 2 directions lignes et colonnes

- Les channel stops sont remplacés par une 4ème électrode permettant de transférer horizontalement les charges



- Les petits OTCCDs (512x512) sont assemblés en mosaïque de 8x8 (OTA)



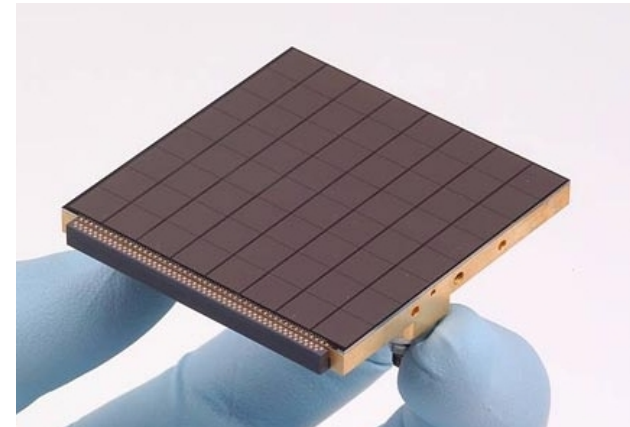
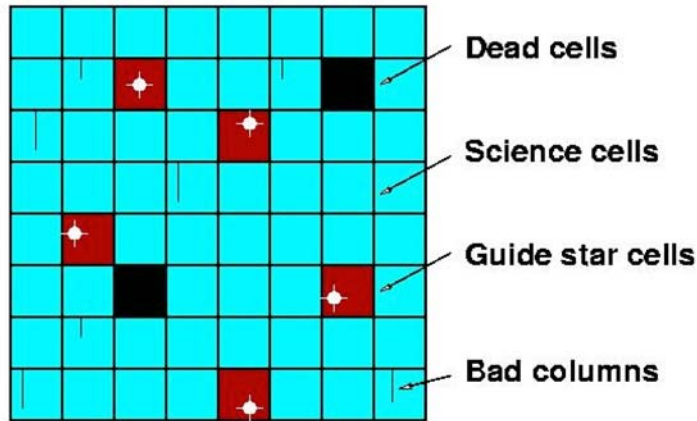
OTCCDs

dapnia



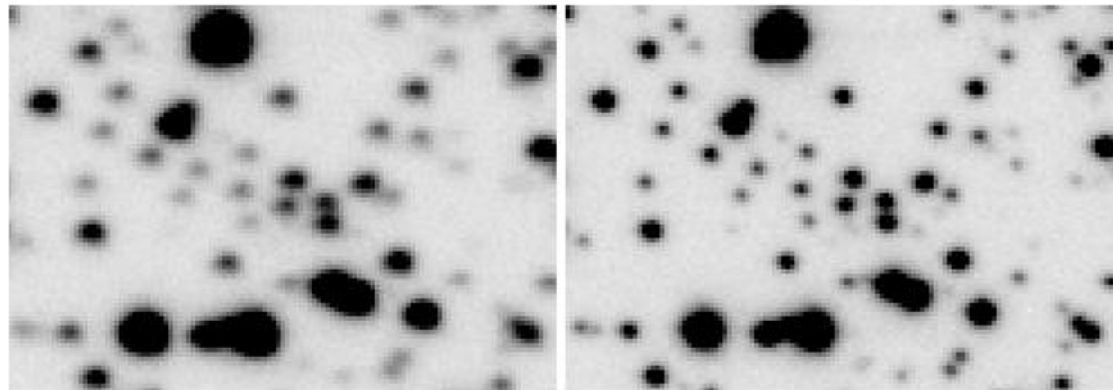
saclay

- Les étoiles brillantes servent à décaler les charges en temps réel et corriger du « tip-tilt » (mouvements du télescope générés par le vent)
- Projet Pan-STARRS Lincoln Lab MIT - université Hawaii



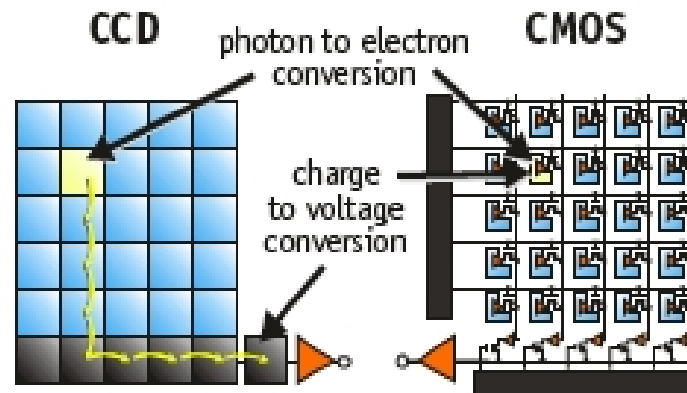
Normal guiding (0.73")

OT tracking (0.50")



Tonry et al., SDW 2002

- La principale limitation d'un CCD tient à son principe: la lecture par transfert des charges de proche en proche
 - Génération de colonnes chaudes à cause de pixels ayant un fort courant d'obscurité
 - Dégradation de la qualité image à cause d'une plus ou moins bonne efficacité de transfert
- Pour y remédier on a développé les APS (active pixel sensor) ou CMOS (complementary metal oxide semiconductor)
 - Chaque pixel contient sa propre électronique de lecture
 - Plus de problèmes de transfert
 - Possibilités d'adresser chaque pixel individuellement



Litwiller, Photonics Spectra, 2005

APS monolithiques

dapnia



saclay

- Technologie récente
 - Difficultés dans l'amincissement
 - Faible QE (la partie active n'est pas photosensible)
 - Pas de CMOS sur substrat haute résistivité
 - Circuits de lecture plus bruyants que pour les CCDs
- L'idée de départ était d'utiliser les technologies CMOS en cours chez les fabricants de composants électroniques pour réduire les coûts
- Or un APS performant coûte aussi cher à développer qu'un CCD
 - ⇒ Peu utilisés pour l'instant en astronomie
 - ⇒ Pointage et guidage des satellites (« star trackers »)
- Développements en cours au CNES et à l'ESA

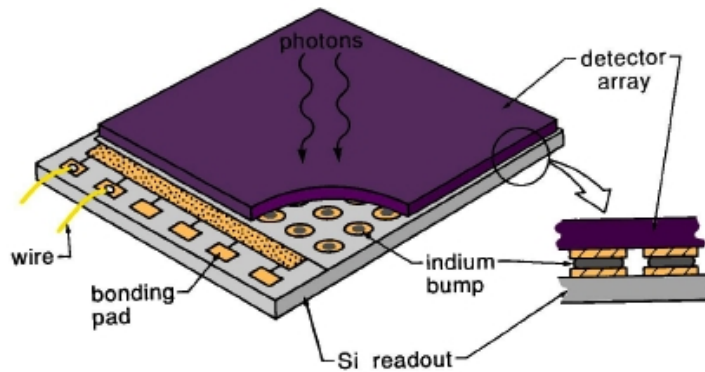
CMOS hybrides

dapnia

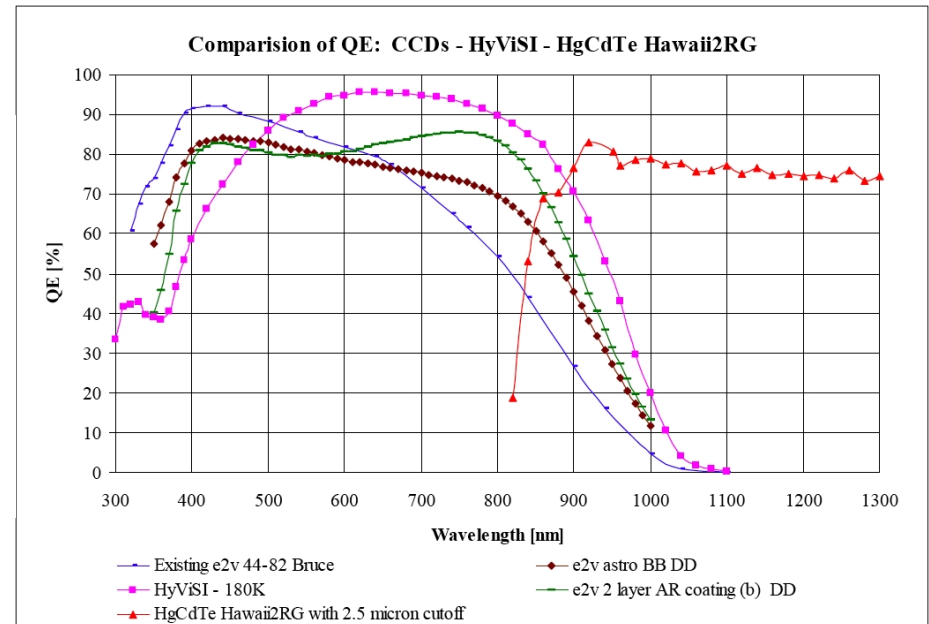
cea

saclay

- Hybridation d'un plan de détection en Si type CCD avec un plan de lecture CMOS
 - A priori on a les avantages des CCDs et des APS sans les inconvénients
 - Rockwell « Hyvisi » 2Kx2K en cours d'évaluation



Figer et al., AAS 205, 2005



Dorn et al., SPIE vol 6276, 2006

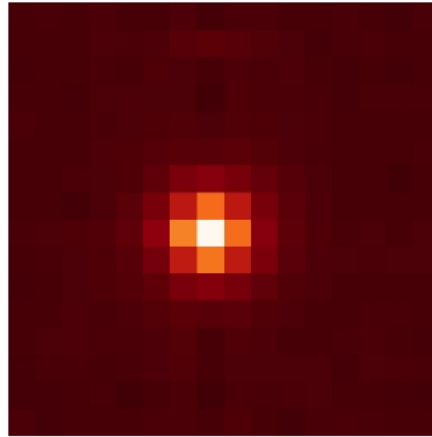
CMOS hybrides

dapnia



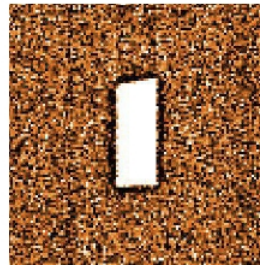
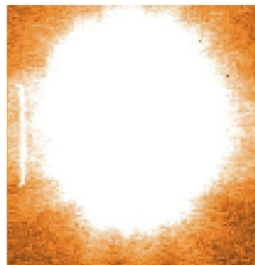
saclay

- Nouveaux problèmes: diaphonie et rémanence
 - Diaphonie Hyvisi: 42% dont 8 à 10% dans chacun des 4 pixels les plus proches

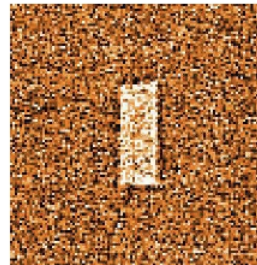


Dorn et al., SPIE vol 6276, 2006

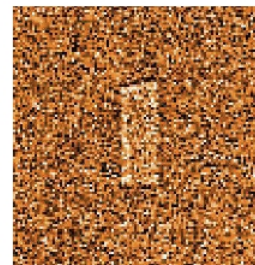
- Rémanence Hyvisi: très importante avec des objets surexposés



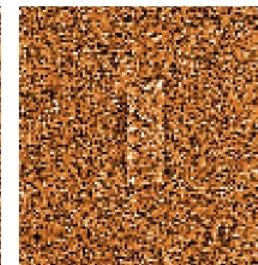
25s



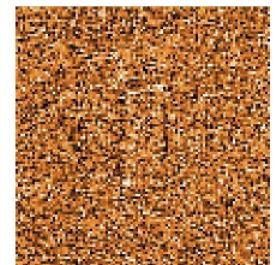
75s



150s



225s



475s

Dorn et al., SPIE vol 6276, 2006

dapnia



saclay

CCDs et spatial

Pourquoi observer dans le spatial?

dapnia

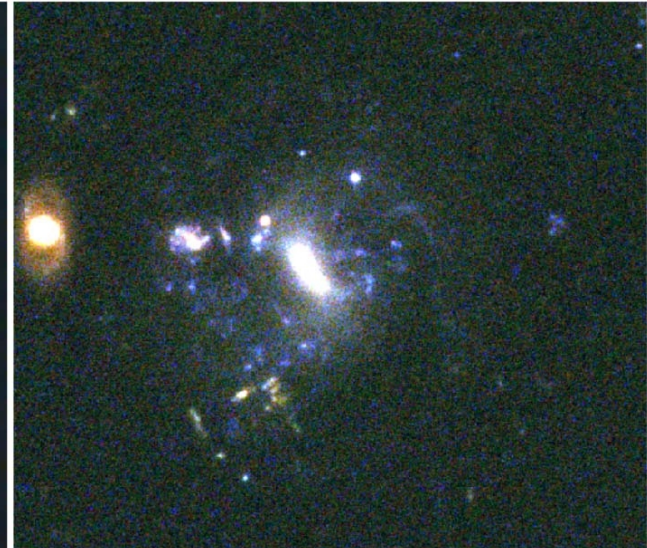


saclay

- L'atmosphère terrestre limite les observations
 - Qualité image dégradée par la turbulence atmosphérique
 - PSF 0.5" - 1.0" au sol, 0.1" dans l'espace: HST



SUBARU



HST

- L'atmosphère terrestre absorbe la majeure partie du rayonnement électromagnétique
 - γ , X, UV, IR, sub-mm: Integral, XMM, IUE, ISO, Herschel

Environnement spatial et CCDs

dapnia



saclay

- Environnement beaucoup plus contraignant qu'au sol
 - Tenue aux radiations
 - Tenue aux vibrations
 - Fiabilité
 - Budgets (masse, volume, puissance électrique, ...) limités
- Fond de ciel plus faible
 - ⇒ Très peu de flux
- Niveau de radiations élevé
 - Dépôt d'énergie dans le détecteur
 - Création de paires e-trou
 - Déplacement des atomes dans la structure du silicium
 - ⇒ Pollution des images par les impacts de particules
 - ⇒ Vieillissement accéléré des détecteurs

Fonds de ciel

dapnia



saclay

- Au sol
 - CFHT/MegaCam
 - Miroir 3.6m + pixels 0.19"
 - ~ 10 e⁻/s/pixel dans la bande i'
- Dans l'espace
 - HST/ACS/WFC
 - Miroir 2.4m + pixels 0.05"
 - $\sim 0.03 - 0.1$ e⁻/s/pixel dans la bande i'
 - Quelques dizaines d'e⁻ au plus à la fin de la pose
 - ⇒ Problèmes de non linéarité, efficacité de transfert, pièges

Rayonnement cosmique et images

dapnia

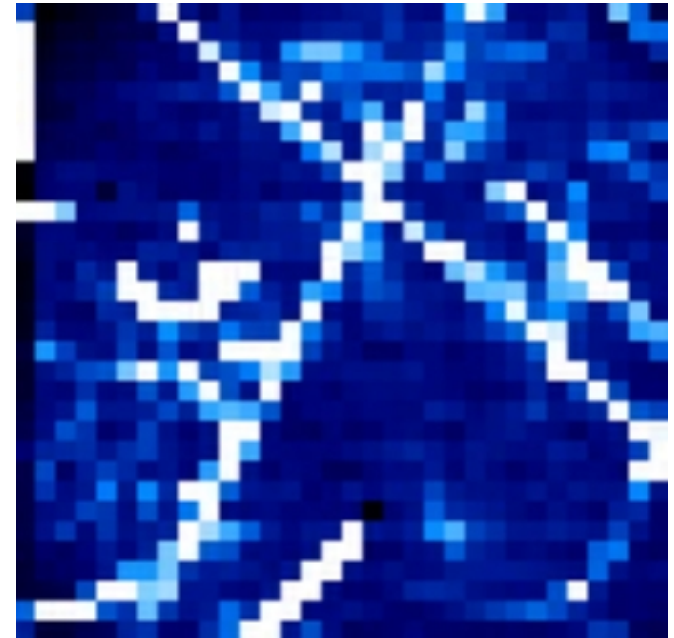


saclay

- Ionisation du silicium par les protons et ions lourds
- Fonction de l'orbite, de l'énergie des particules, de la géométrie des pixels
- Très gênant avec des détecteurs épais, moins avec des CCDs amincis
- Les « cosmiques » ou « glitches » sont transitoires et s'éliminent par comparaison d'images successives (« deglitching »)
 - ⇒ Blindage des détecteurs
 - ⇒ Limitation du temps de pose



NASA HST/ACS



ESA ISO/ISOCAM

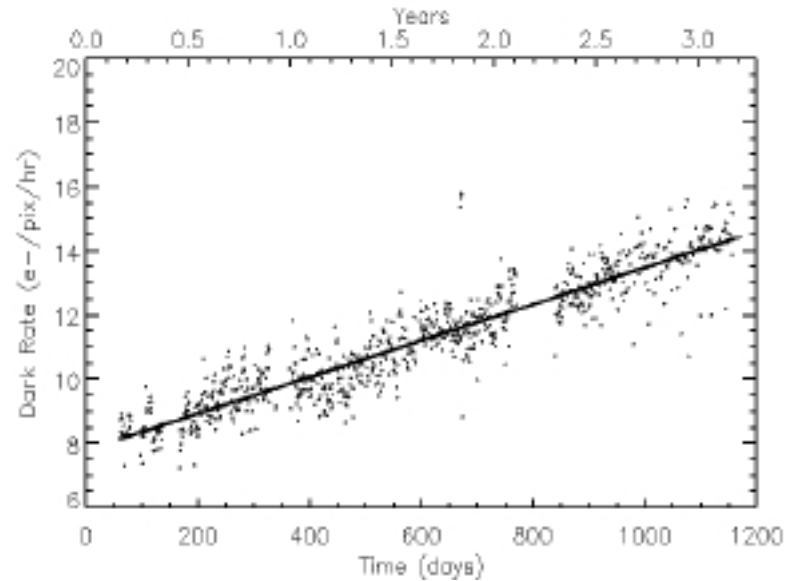
Courant d'obscurité et pixels chauds

dapnia



saclay

- Déplacement des atomes dans la structure du silicium
- Augmentation du courant d'obscurité et du nombre de pixels chauds



From left to right: before launch, and after 1, 2 and 3 years on orbit.

Pavlovsky, C. et al., Advanced Camera for Surveys Instrument Handbook for Cycle 16, STScI 2006.

Récupération des pixels chauds

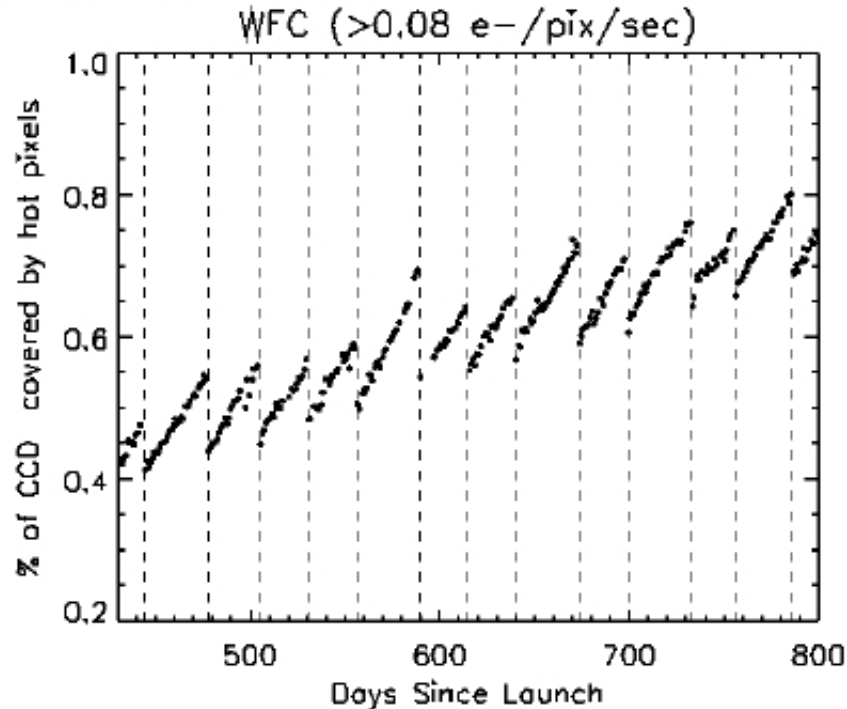
dapnia



saclay

- Technique de l'« annealing »: on chauffe les CCDs à intervalle régulier pour permettre à la structure cristalline de se remettre en place
- Caméra WFC de l'instrument ACS du Hubble Space Telescope: un recuit par mois à +19°C pendant 6h
 - Permet de récupérer ~60% des pixels chauds

Figure 4.6: Hot pixel growth in the WFC CCDs.



Pavlovsky, C. et al., Advanced Camera for Surveys Instrument Handbook for Cycle 16, STScI 2006.

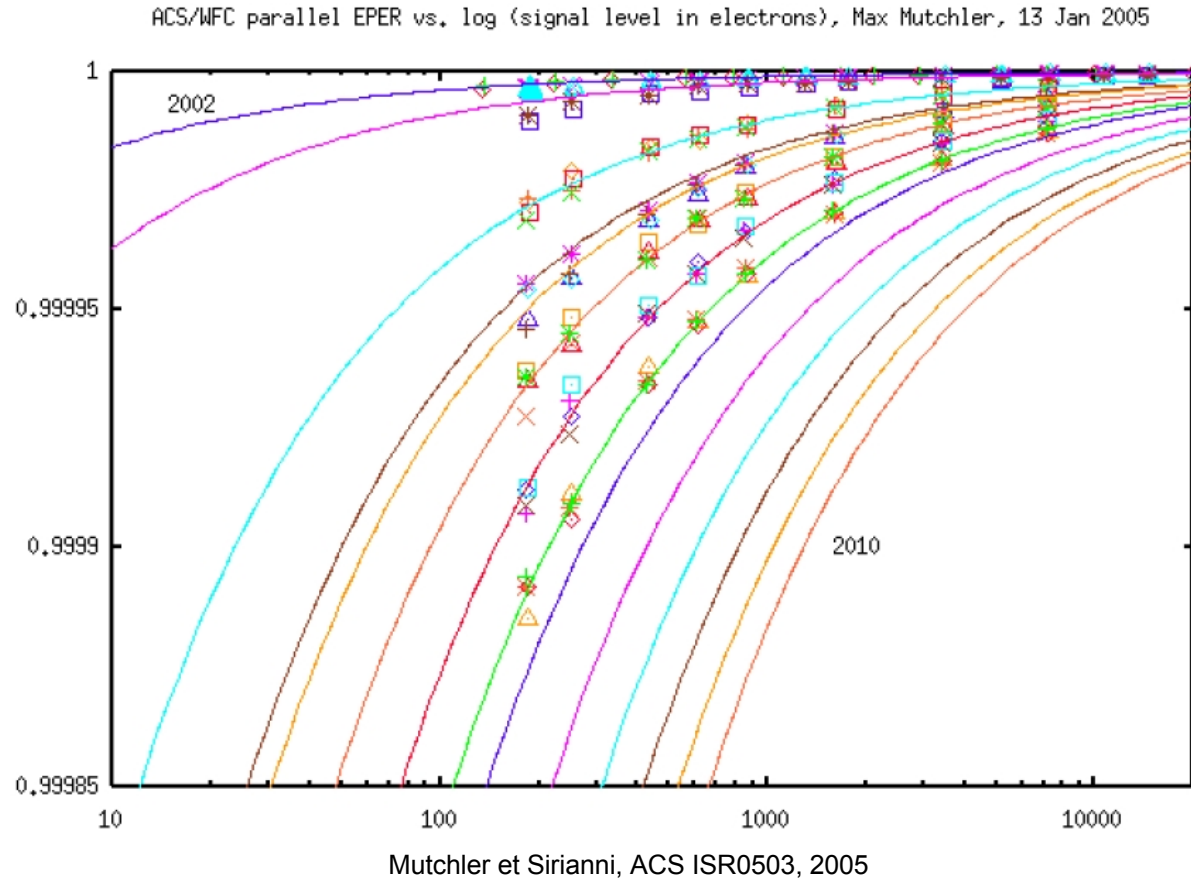
Dose cumulée et dégradation du CCD

dapnia



saclay

- Déplacement des atomes dans la structure du silicium
- La dose cumulée augmente le nombre de pièges
- Les charges sont piégées et relâchées après un certain délai
⇒ Dégradation de la CTE



Comparaison CCD sol - espace

dapnia



saclay

- MegaCam
 - e2v 42-90 2048x4608 13.5 μ m \times 13.5 μ m
 - CCD aminci grand format 3 phases: produit standard
 - Sur catalogue
 - 22 k€ pièce (2,30k€ le Mpixel)
- DUNE
 - e2v 91-72 3330x4370 13.5 μ m \times 13.5 μ m
 - Développement spécifique par le fabricant (e2v) pour GAIA
 - 4 phases (pour le mode TDI)
 - Injection de charges (pour remplir les pièges)
 - Drains à différentes hauteurs le long du CCD (pour moduler le temps de pose)
 - Canaux enterrés spécifiques (« notch » et « super notch », permettant de réduire les effets des radiations, en particulier pour les petites quantités de charges)
 - 220 k€ pièce (15,10k€ le Mpixel)

dapnia



saclay

Utilisation des CCDs en astronomie X

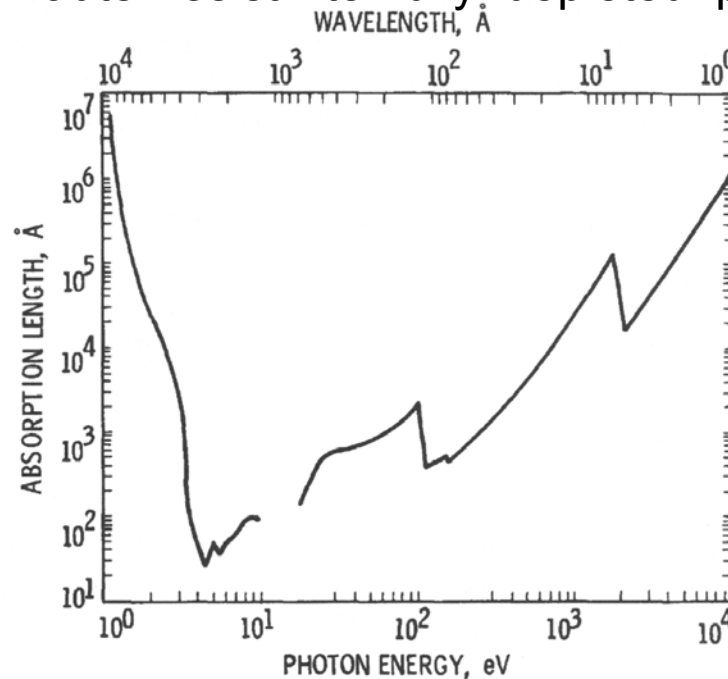
CCDs et photons X

dapnia

cea

saclay

- Les photons X « mous » ont une longueur d'absorption dans le Si comparable à celle des photons visibles
 - Un CCD ne détecte pas en UV (1000-2500Å) car la longueur d'absorption est trop petite
- Même problématique que dans le visible: il faut adapter la profondeur de la zone déplétée à la longueur d'absorption des photons
 - Substrat haute résistivité fully depleted pour détecter jusqu'à 10keV



Janesick p.171

Fonction de redistribution

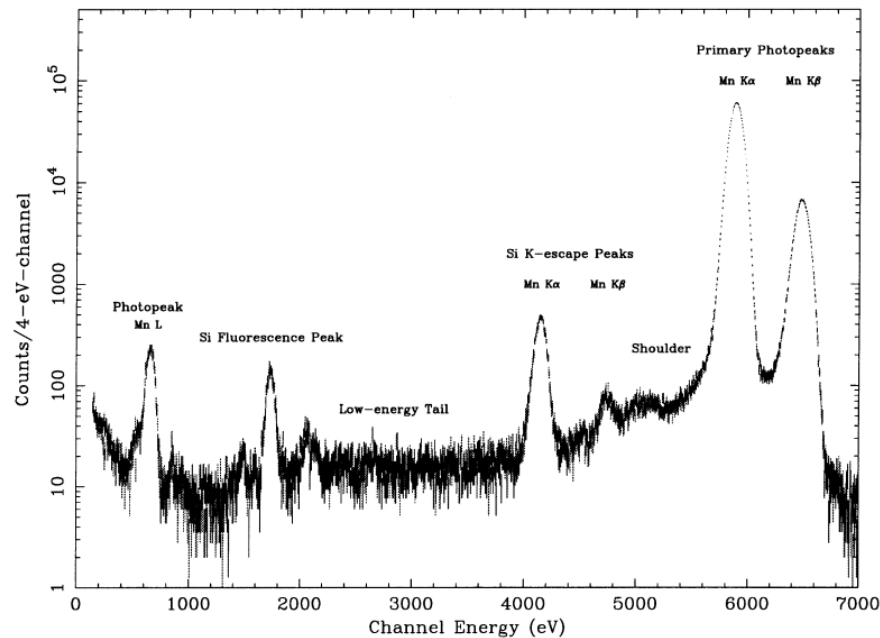
dapnia



saclay

- Un photon X expulse un électron d'une couche profonde de l'atome Si. Cet électron ionise les atomes voisins, et l'atome Si se désexcite par fluorescence ou émission Auger
- Une source de Fe^{55} (photons à 5.9 et 6.5keV) génère au moins 5 raies: Mn $K\alpha$ (5.9keV) et $K\beta$ (6.5keV), pics d'échappement Mn $K\alpha$ (4.1keV) et $K\beta$ (4.7keV), et fluorescence Si (1.7keV). La fraction de signal en dehors des raies Mn $K\alpha$ et $K\beta$ est de quelques %

X-ray CCD Spectral Response Function Components



Bautz et al., NIMA 436, 40, 1999

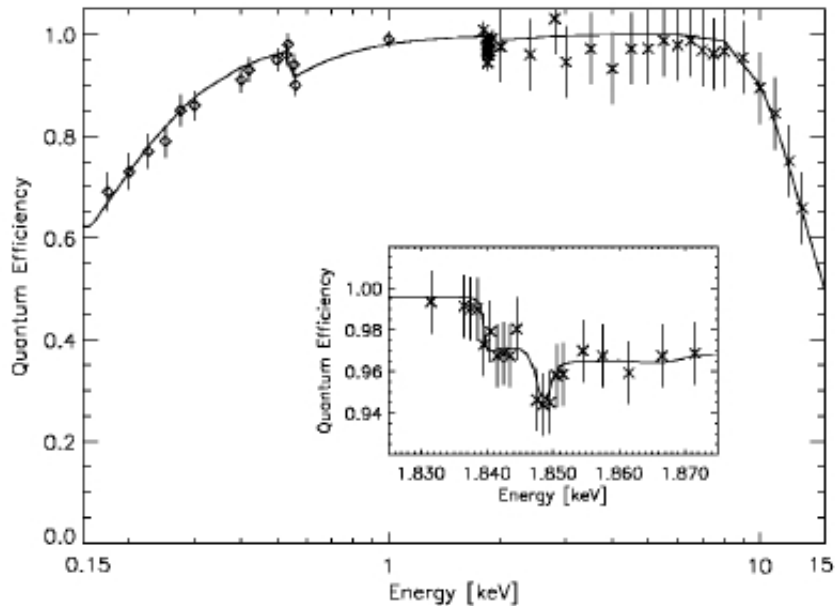
QE des CCDs X

dapnia

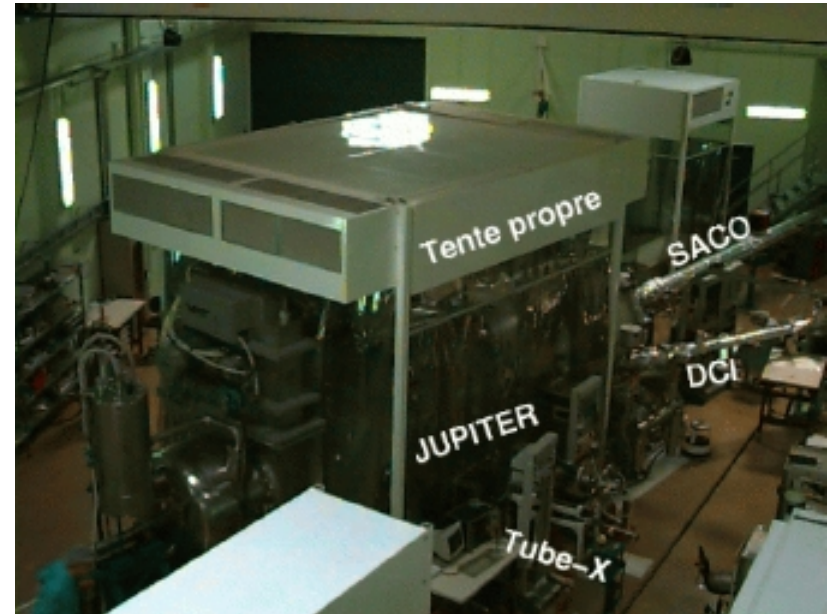


saclay

- On obtient des QE très élevés avec des CCDs très épais:
 - CCD PN XMM/EPIC 300 μ m fully depleted BI
- La calibration nécessite l'accès à un synchrotron
 - LURE (SACO et DCI), Orsay et BESSY, Berlin pour la caméra EPIC



XMM-SOC-CAL-TN-0018, 2006



Marty, thèse Paris XI, 2003

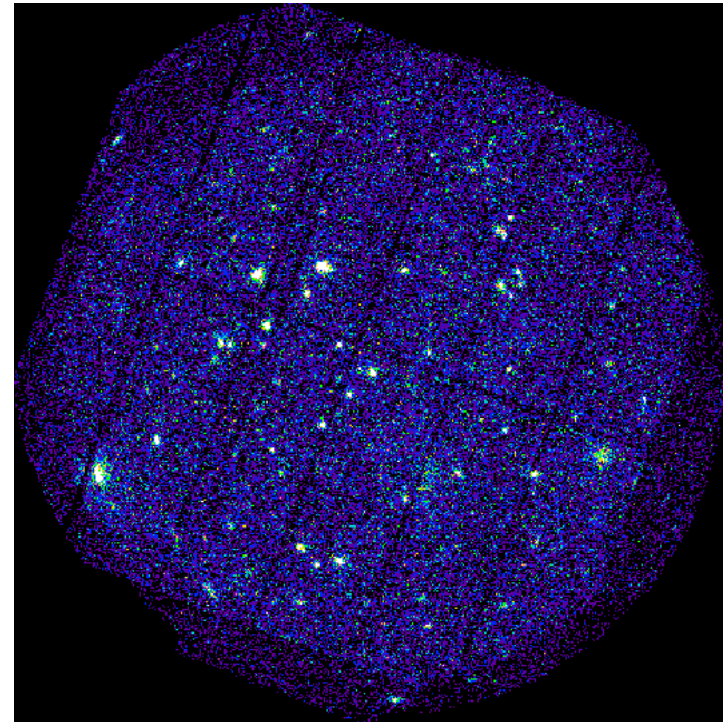
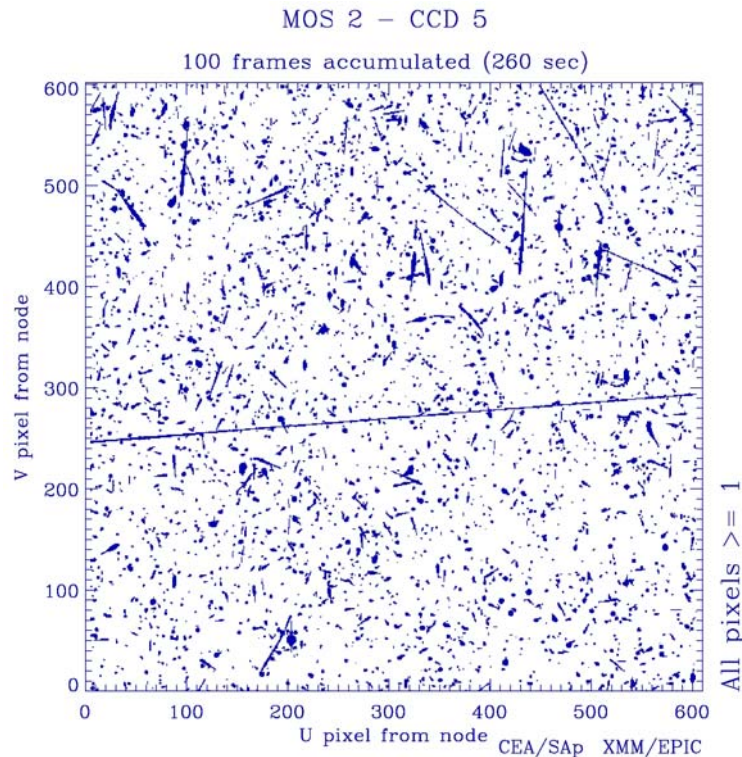
Observations en X

dapnia



saclay

- Les flux sont très faibles (~ 1 photon/pixel/min pour un amas de galaxies observé avec XMM): on peut travailler en comptage de photon
 - Dans le visible on mesure le flux de photons, en X on mesure directement l'énergie de chaque photon
- Pour obtenir suffisamment de sensibilité, on coadditionne des milliers d'images (poses 10 à 20ks), très polluées par les impacts de cosmiques



ESA XMM-Newton

dapnia



saclay

Grands plans focaux à base de CCDs

Imagerie grand champ

dapnia



saclay

- Constat
 - Temps de télescope fini et rare
 - Temps de télescope = temps de pose moyen x nombre de poses
 - ⇒ Si on veut observer des objets très faibles, le temps de pose est long donc on ne peut pas faire beaucoup d'images et couvrir une grande surface du ciel
 - ⇒ Si on veut couvrir une grande surface du ciel, il faut beaucoup d'images et on ne peut pas observer d'objets très faibles
 - ⇒ Pour couvrir un grand champ et y observer des objets faibles, il faut un grand détecteur
- Une solution consiste en la fabrication de mosaïques de CCDs, avec plusieurs dizaines (voire centaines) de détecteur dans un même plan focal

Evolution des caméras CCDs à l'observatoire CFHT

dapnia

cea

saclay



RCA1 1981-1986
1 CCD, 320x512
champ 2'x3.5'



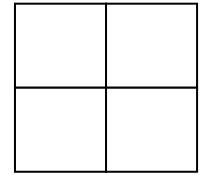
RCA2 1986-1995
1 CCD, 640x1024
champ 2'x3.5'



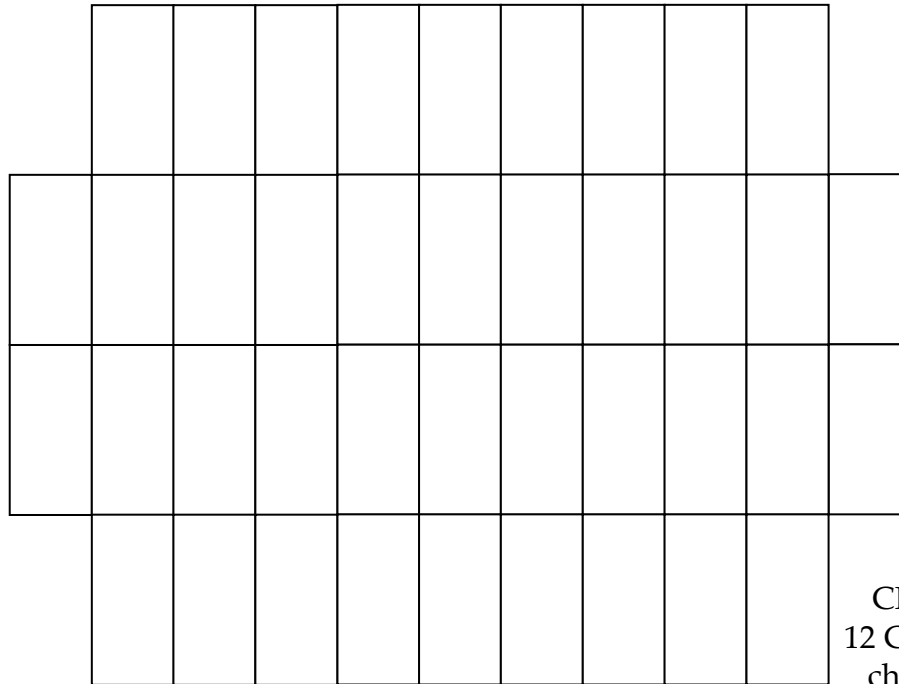
SAIC1 1990
1 CCD, 1Kx1K
champ 4.2'x4.2'



Lick2 1992
1 CCD, 2Kx2K
champ 7'x7'

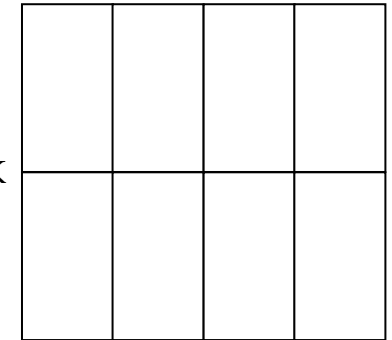


MOCAM 1994
4 CCDs, 4Kx4K
champ 14'x14'

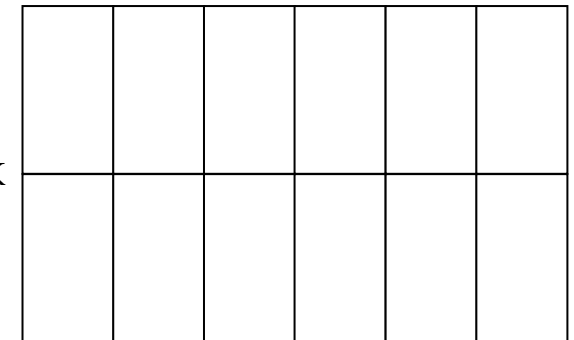


MegaCam 2002
40 CCDs, 20Kx18K
champ 1°x1°

UH8K 1996
8 CCDs, 8Kx8K
champ 28'x28'



CFH12K 1999
12 CCDs, 12Kx8K
champ 42'x28'



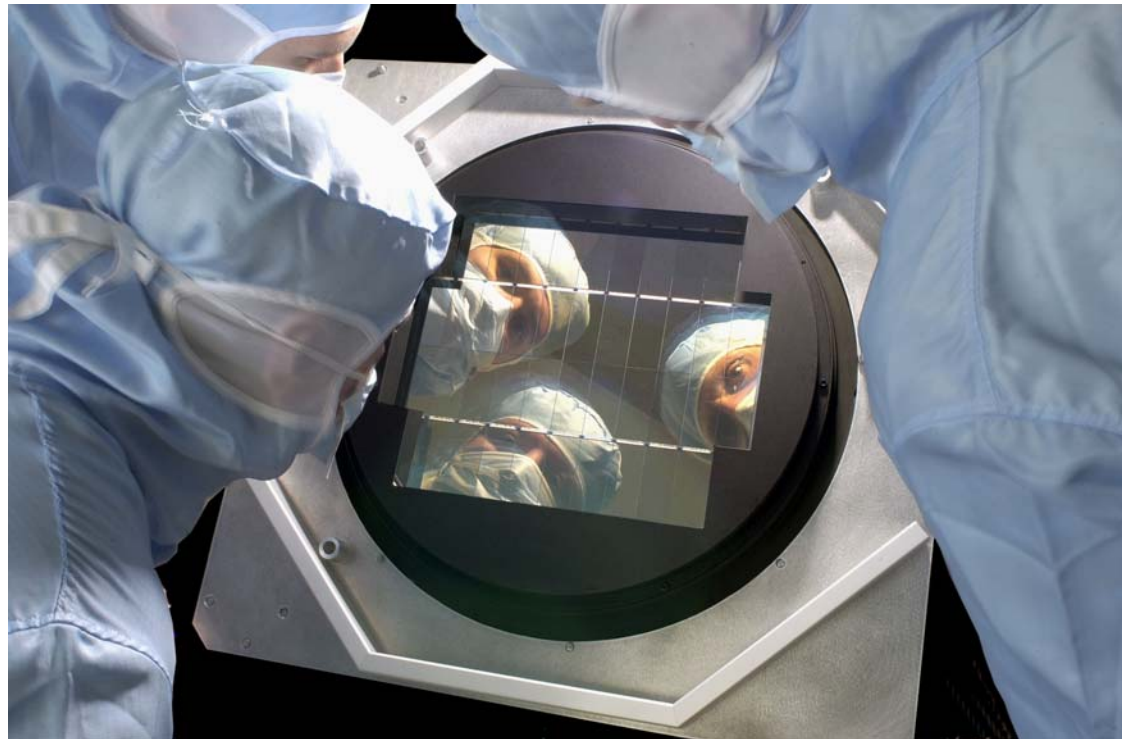
La caméra MegaCam

dapnia



saclay

- Développée au CEA/DAPNIA
- Installée au foyer primaire du télescope de 3.60m Canada-France-Hawaii depuis Décembre 2002
- Plan focal de 40 CCDs e2v 42-90 2Kx4.5K
- Champ de vue de $1^\circ \times 1^\circ$



© CEA-DAPNIA/J.J Bigot

Cohabitation des détecteurs

dapnia



saclay

- Tous les points du champ de vue doivent être imagés avec la même sensibilité

⇒ Performances identiques pour tous les détecteurs: à prendre en compte dans le cahier des charges

- MegaCam: spécification de dispersion des 40 CCDs de 10% sur chaque paramètre

⇒ Une fois intégrés dans le plan focal, tous les détecteurs doivent avoir le même point de fonctionnement

- Tous les pixels au foyer du télescope: contraintes sur la planéité de la mosaïque
- Tous les détecteurs doivent être à la même température: contraintes d'homogénéité spatiale et de stabilité temporelle de la température plan focal

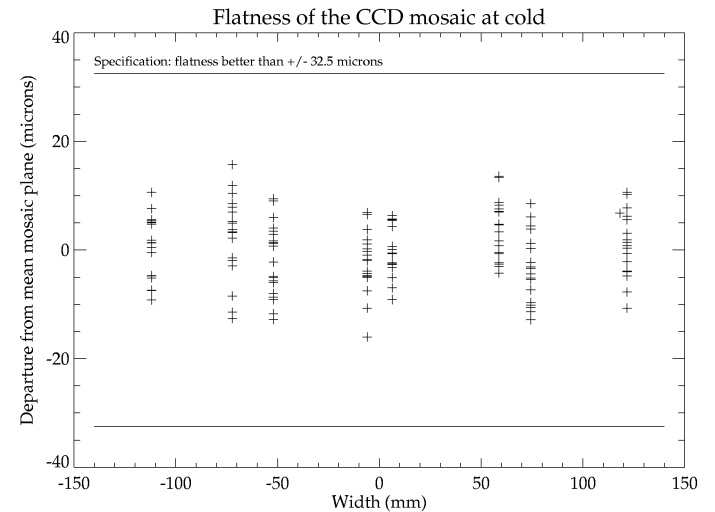
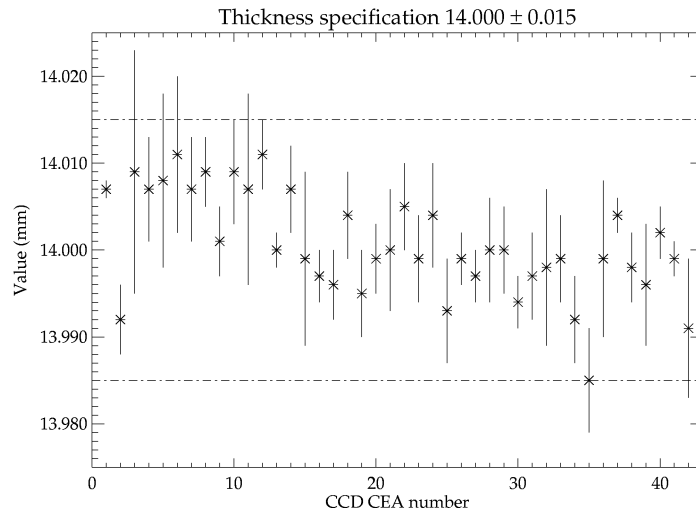
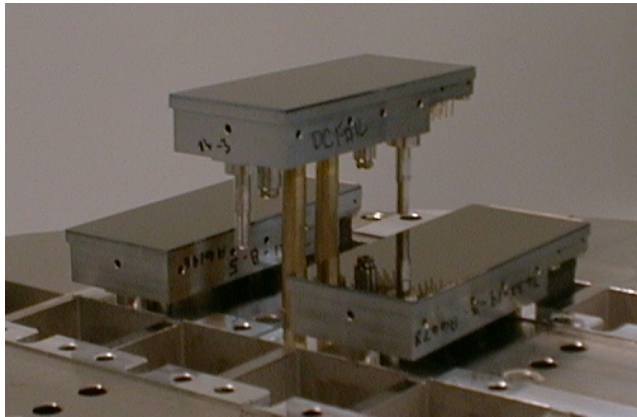
Planéité de la mosaïque CCD

dapnia



saclay

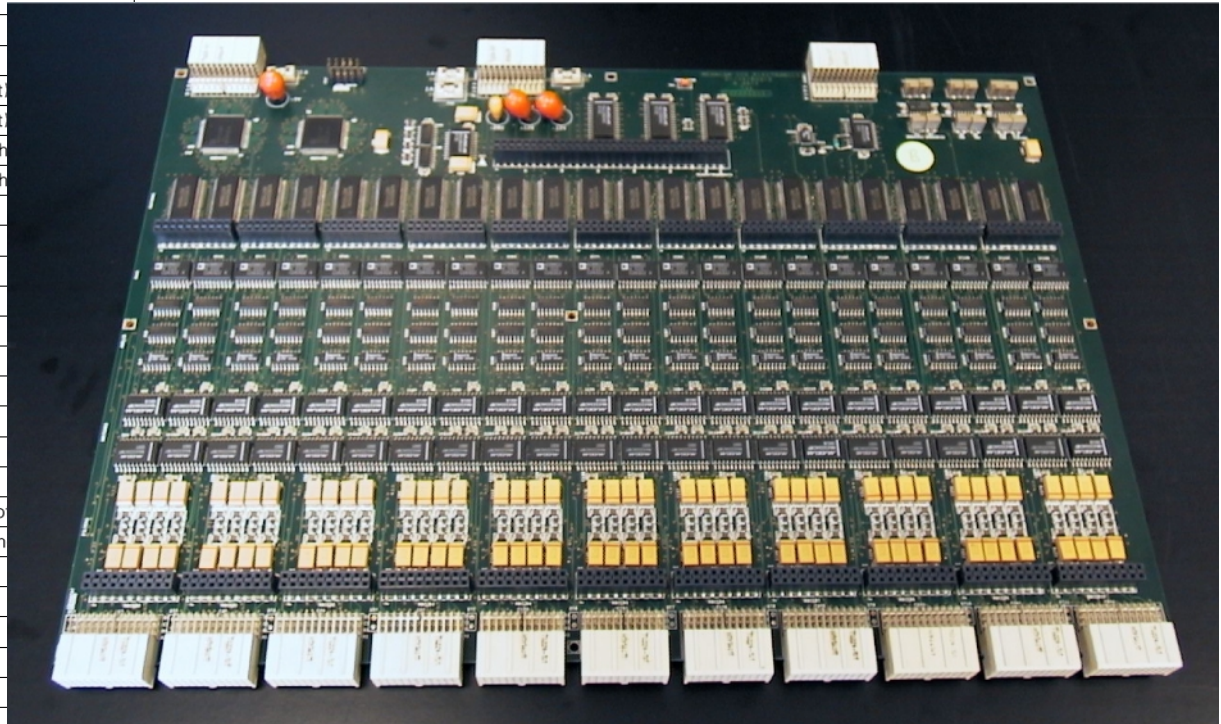
- Obtenue par « design »: spécification sur l'épaisseur des boîtiers CCDs et sur la planéité de la plaque support des CCDs



Le contrôleur CCD MegaCam: carte de pilotage

- 26 bias et horloges par détecteur, 40 détecteurs
- 1 carte pour piloter 1 rangée de détecteurs (de 9 à 11 CCDs)

PGA PIN	REF	DESCRIPTION
A1, A8, C1, C8, F2, F7	V _{SS}	Substrate
D8	IØ1	Image area clock, phase 1
E8	IØ2	Image area clock, phase 2
F8	IØ3	Image area clock, phase 3
D4	RØ1(L)	Register clock phase 1 (left)
E4	RØ2(L)	Register clock phase 2 (left)
D5	RØ1(R)	Register clock phase 1 (right)
E5	RØ2(R)	Register clock phase 2 (right)
F6	RØ3	Register clock phase 3
E3	ØR(L)	Reset gate (left)
E6	ØR(R)	Reset gate (right)
E2	ØSW(L)	Summing well gate (left)
E7	ØSW(R)	Summing well gate (right)
F3	DG	Dump gate (see note 8)
D3	OG1(L)	Output gate 1 (left)
D6	OG1(R)	Output gate 1 (right)
B2	DD(L)	Dump drain (left)
B7	DD(R)	Dump drain (right)
D2	OG2(L)	Output gate 2 (left) (see note 8)
D7	OG2(R)	Output gate 2 (right) (see note 8)
B1	OD(L)	Output drain (left)
B8	OD(R)	Output drain (right)
A2	OS(L)	Output source (left)
A7	OS(R)	Output source (right)
C2	RD(L)	Reset drain (left)
C7	RD(R)	Reset drain (right)

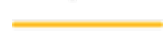


© e2v technologies 2004

CEA-DAPNIA

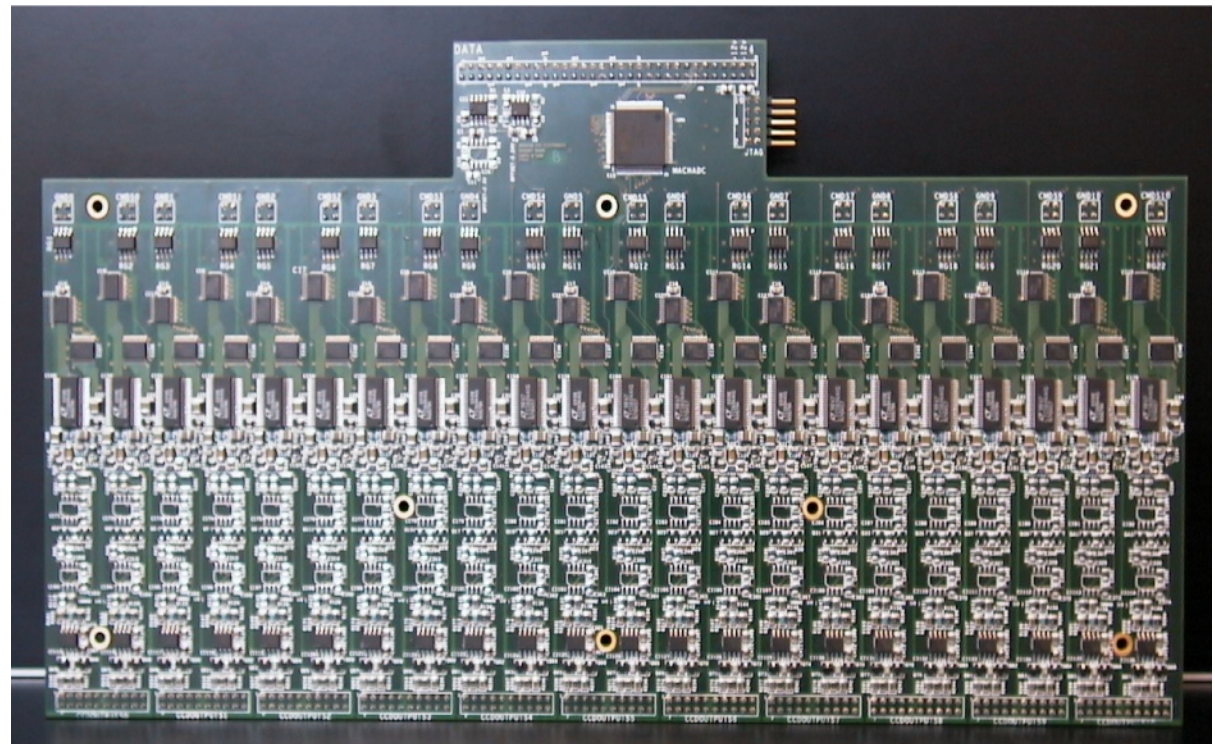
Le contrôleur CCD MegaCam: carte de lecture

dapnia



saclay

- Spécifications: 30 secondes pour lire toute la mosaïque avec moins de 10 e⁻ de bruit
- Solution: 30 secondes pour lire un demi-CCD et 80 chaînes d'acquisition fonctionnant en parallèle
- 1 carte pour lire 1 rangée de détecteurs (de 18 à 22 sorties)



CEA-DAPNIA

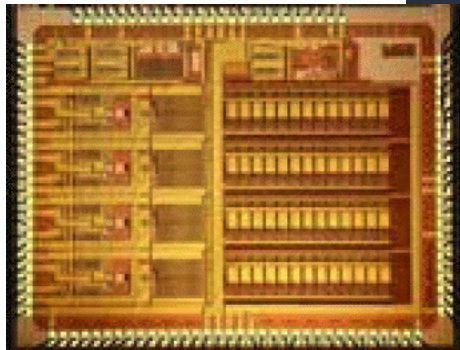
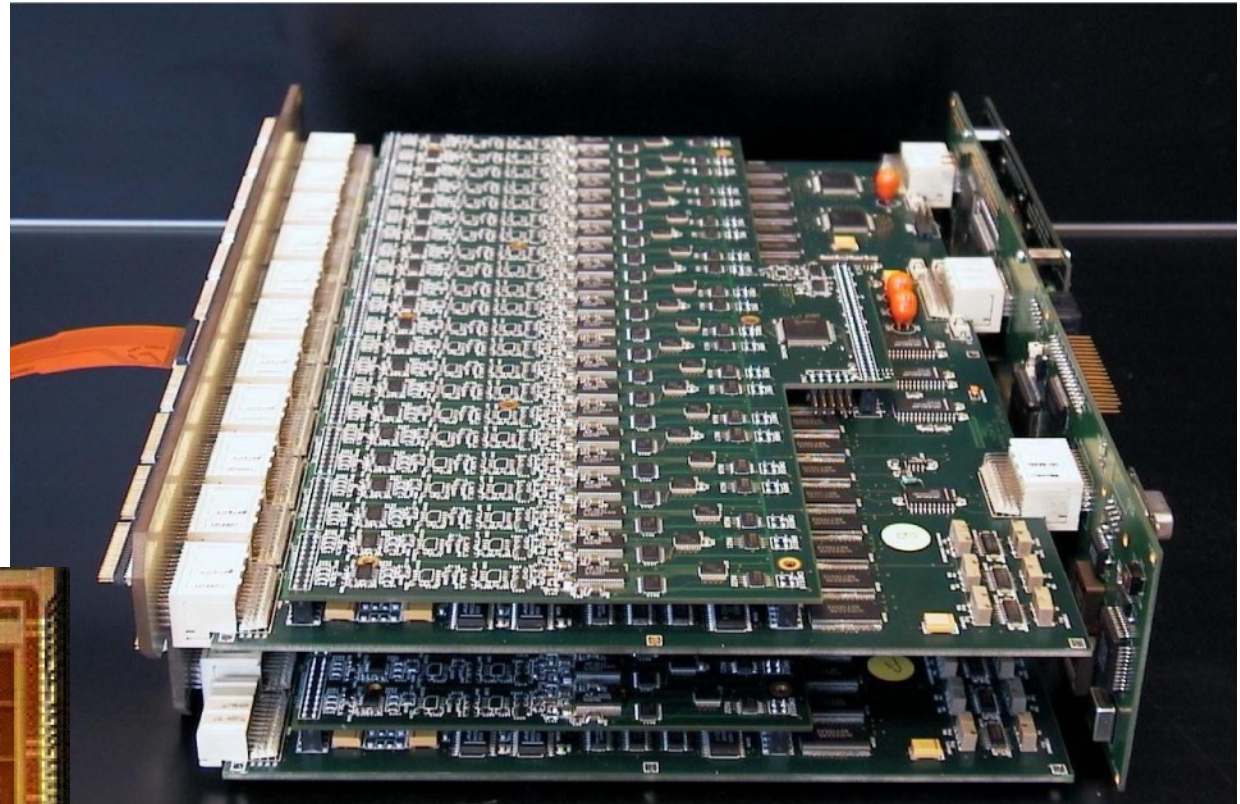
Le contrôleur CCD MegaCam

dapnia



saclay

- 2 cartes pilotage, 2 cartes lecture et 1 carte DSP pour contrôler une demi-mosaïque
- Faut-il passer à des ASIC? (eg CLIC/CRIC pour SNAP)



Karcher et al., SDW 2005

CEA-DAPNIA

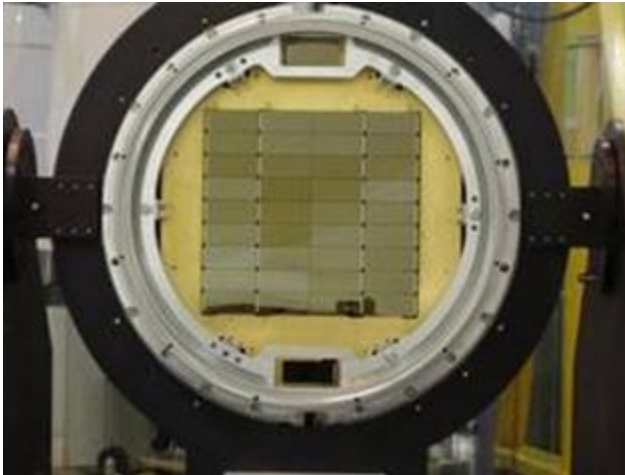
Autres caméra grands champs en développement

dapnia

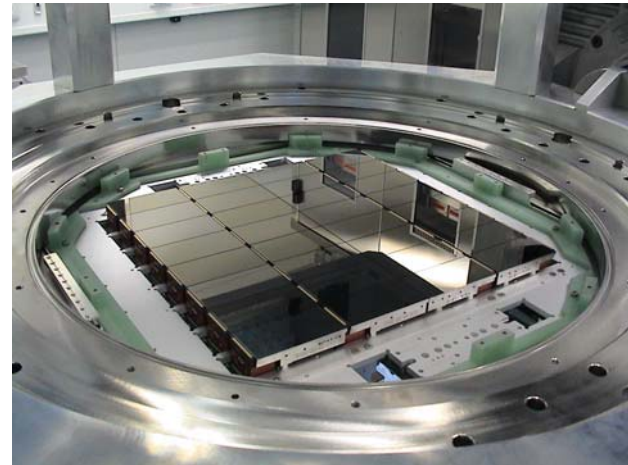


saclay

- MMT/Megacam: 36 CCDs e2v 42-90 2Kx4.5K, Novembre 2003
- ESO/Omegacam: 32 CCDs e2v 42-80 2Kx4K, 2007?
- LAMOST: 32 CCDs e2v 4Kx4K, 2008?
- WIYN/ODI: 64 OTA 4Kx4K OTCCDs, 2009?
- DES: 62 CCDs LBNL 2Kx4K, 2009?
- DCT: 40 CCDs e2v 44-82 2Kx4K, 2010?
- Pan-STARRS: 4x64 OTA 4Kx4K OTCCDs 2007-2010?
- Subaru/HyperSuprimeCam: 170 CCDs 2Kx4K Hamamatsu, 2011?
- LSST: 200 détecteurs 4Kx4K CCDs (e2v?) (+CMOS hybrides?), 2013?



© MMT/B. McLeod



© ESO

Plan focal LSST

dapnia

cea

saclay

- Besoin dérivé de la science: $3 \cdot 10^9$ pixels à lire en 2s avec un bruit de $6e^-$ rms...

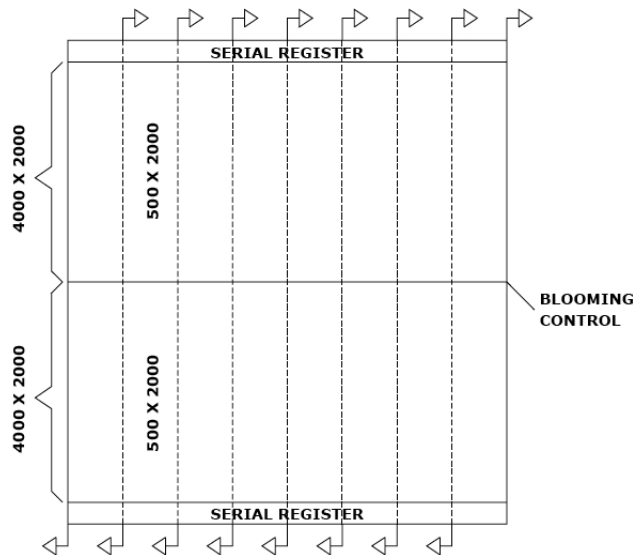
- Bruit $6e^- \Rightarrow$ cadence de lecture max $\sim 500\text{kHz}$

- Temps de lecture 2s \Rightarrow 1Mpixels par sortie

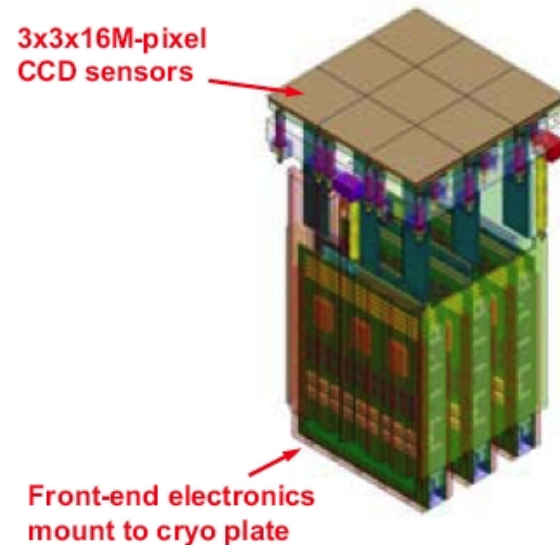
- Taille de la mosaïque $3 \cdot 10^9$ pixels \Rightarrow 3000 sorties

\Rightarrow Brique de base: 1 CCD $4\text{K} \times 4\text{K}$ organisé en 8 « sous » CCDs 4000×500 à 2 sorties chacun

\Rightarrow 200 CCDs pour une mosaïque de $3 \cdot 10^9$ pixels et 3200 sorties



Geary et al., SPIE vol 6276, 2006



Kahn AAS 209, 2007

Caméras grand champ spatiales

dapnia



saclay

- Contraintes encore plus grandes que pour un CCD spatial:
 - Puissance électrique pour piloter des dizaines de détecteurs
 - Masse et volume de l'instrument
 - Le moins possible de mécanique (obturateur, changement de filtres)
 - Quantité de mémoire embarquée (stockage des images)
 - Débit de télémétrie (réception des données à terre)

- NASA/Kepler: 42 CCDs e2v 2Kx1K, 2008
- DoE/SNAP: 36 CCDs LBNL 3.5Kx3.5K, 2014?
- ESA/DUNE: 36 CCDs e2v 4Kx4K, 2017?
- ESA/Gaia: 170 CCDs e2v 4500x1966, 2011?

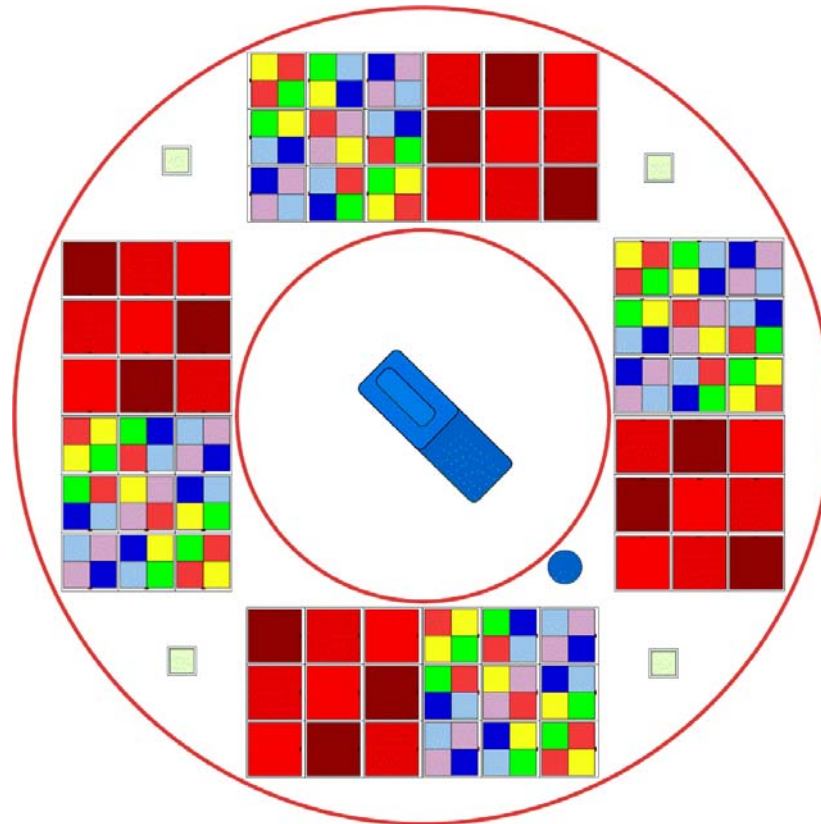
DoE/SNAP

dapnia



saclay

- Champ de vue 0.7 deg^2
- 36 CCDs custom LBNL/DALSA (3.5Kx3.5K pixels $10.5\mu\text{m} \times 10.5\mu\text{m}$)
- CCD épais (200 - 300 μm), back side illuminated, high resistivity, full depletion, full frame



ROE, SNAP technical review, 2003

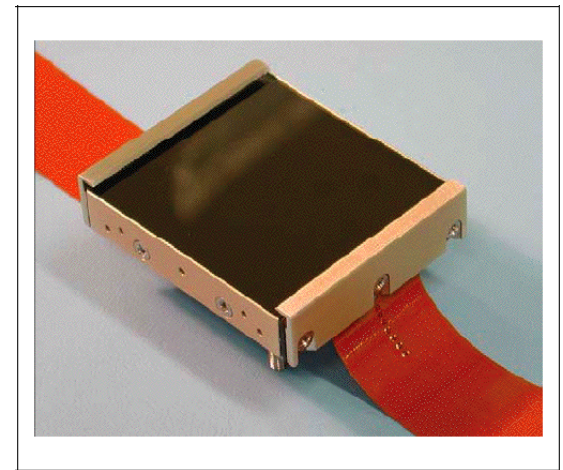
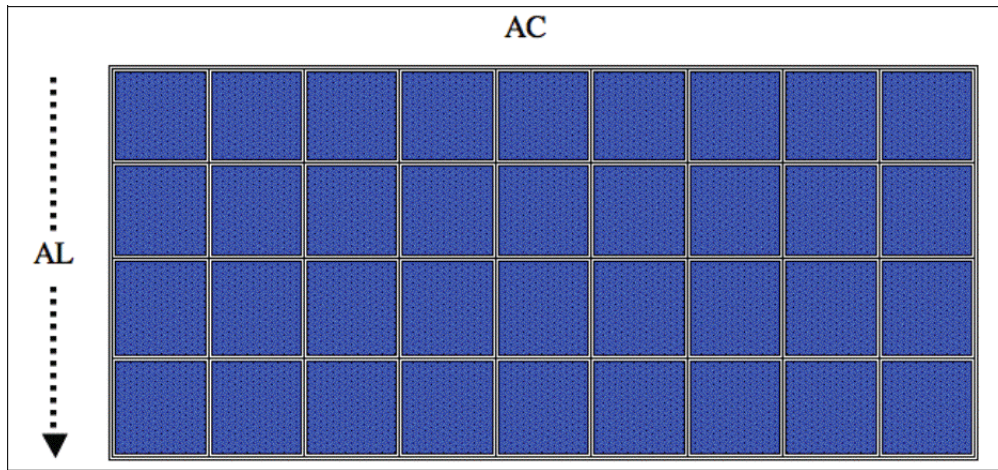
ESA/DUNE

dapnia



saclay

- Champ de vue 0.5 deg^2
- 36 CCDs e2v CCD203-82 (4Kx4K pixels $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$)
- CCD aminci back side illuminated, high resistivity, deep depletion, full frame, TDI



© e2v technologies

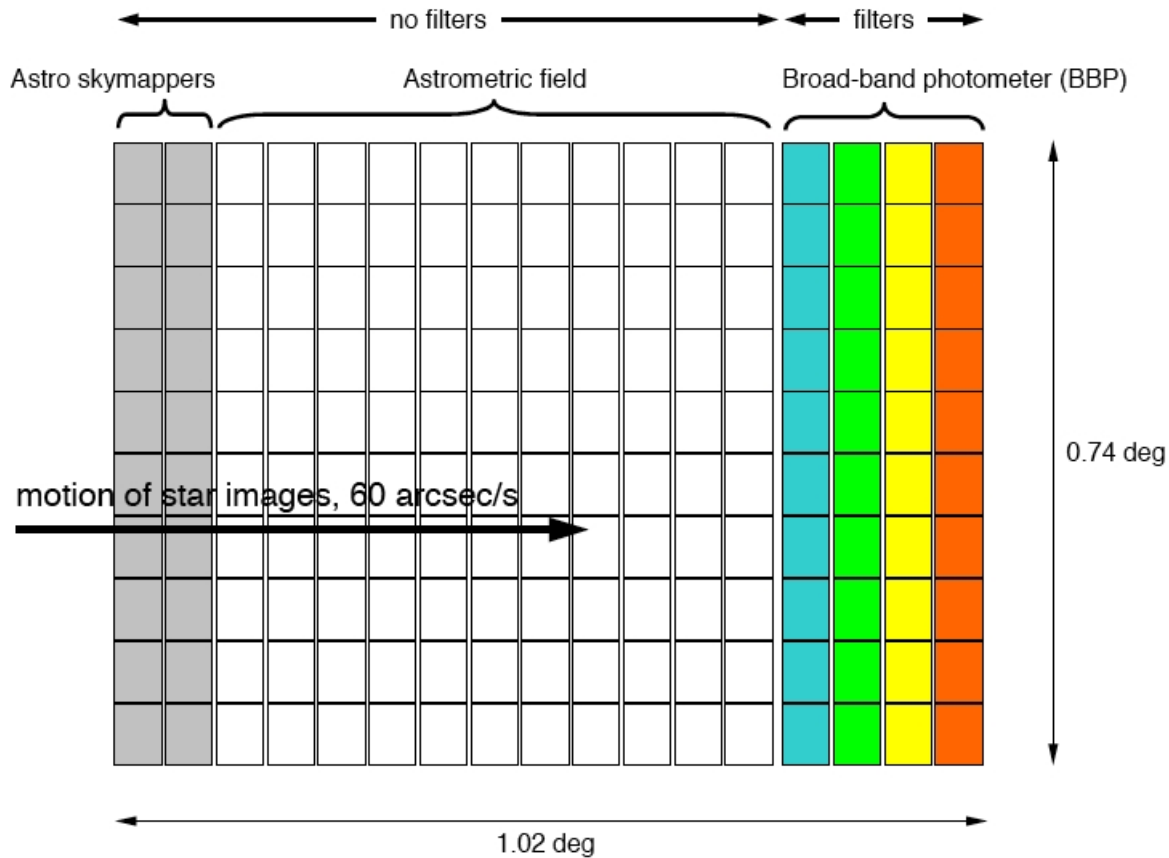
ESA/Gaia

dapnia



saclay

- Champ de vue 0.6 deg^2
- 170 CCDs custom e2v (dont 110 4500×1966 pixels $10 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$)
- CCD aminci back side illuminated, full frame, TDI



Pace, ESA SP-576, 2005

dapnia



saclay

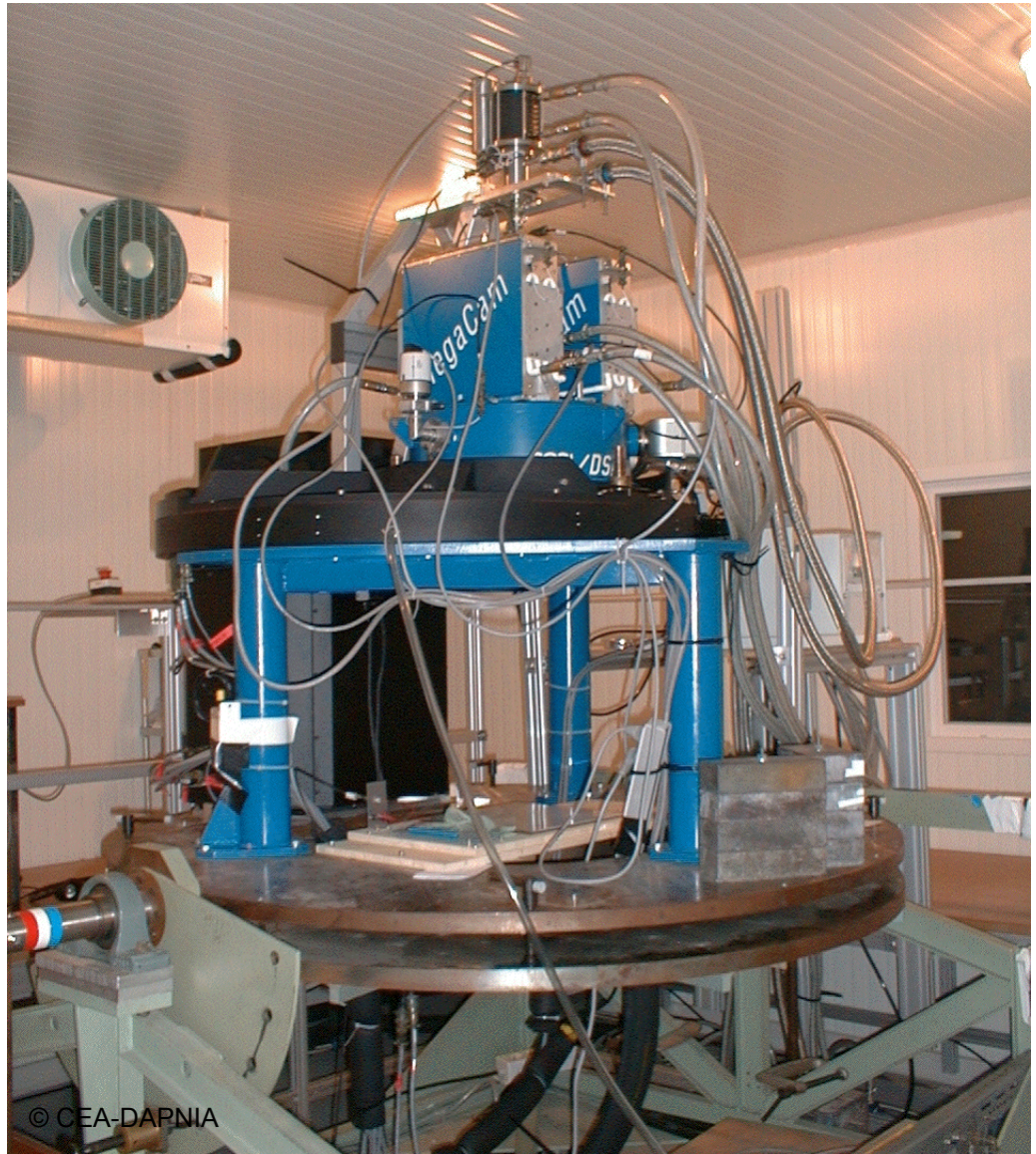
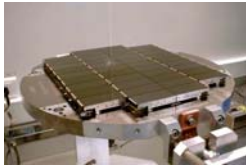
Photos

La caméra MegaCam

dapnia

cea

saclay



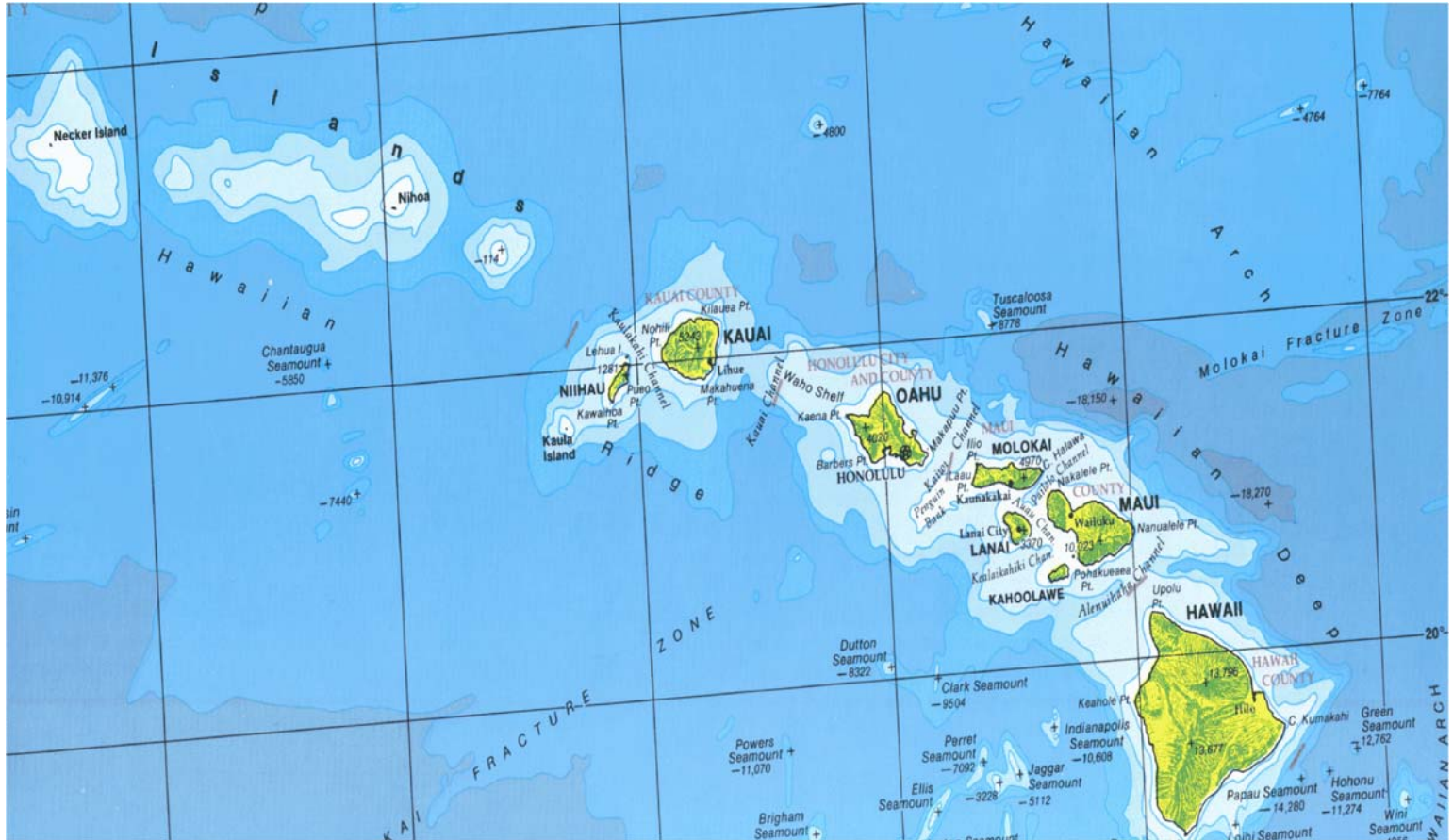
© CEA-DAPNIA

L'archipel d'Hawaii

dapnia

cea

saclay



Atlas of Hawaii, University of Hawaii Press, 1983

Le sommet du Mauna Kea

dapnia

cea

saclay



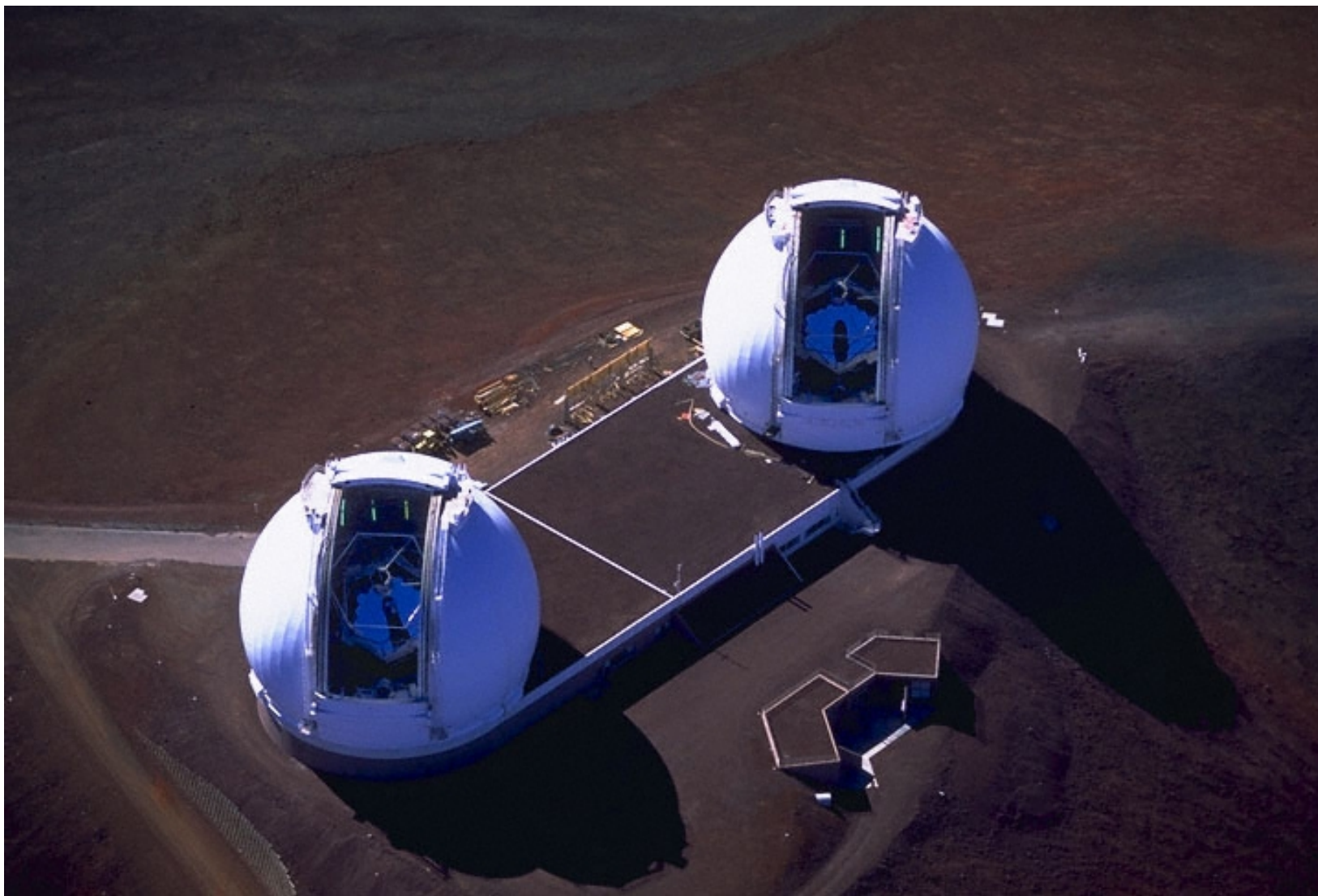
© R. Wainscoat, 1998

Les 2 télescopes Keck

dapnia



saclay



© R. Wainscoat, 1998

Le Mauna Kea sous la neige

dapnia

cea

saclay



© CEA-DAPNIA

Préparation de la caméra MegaCam

dapnia

cea

saclay



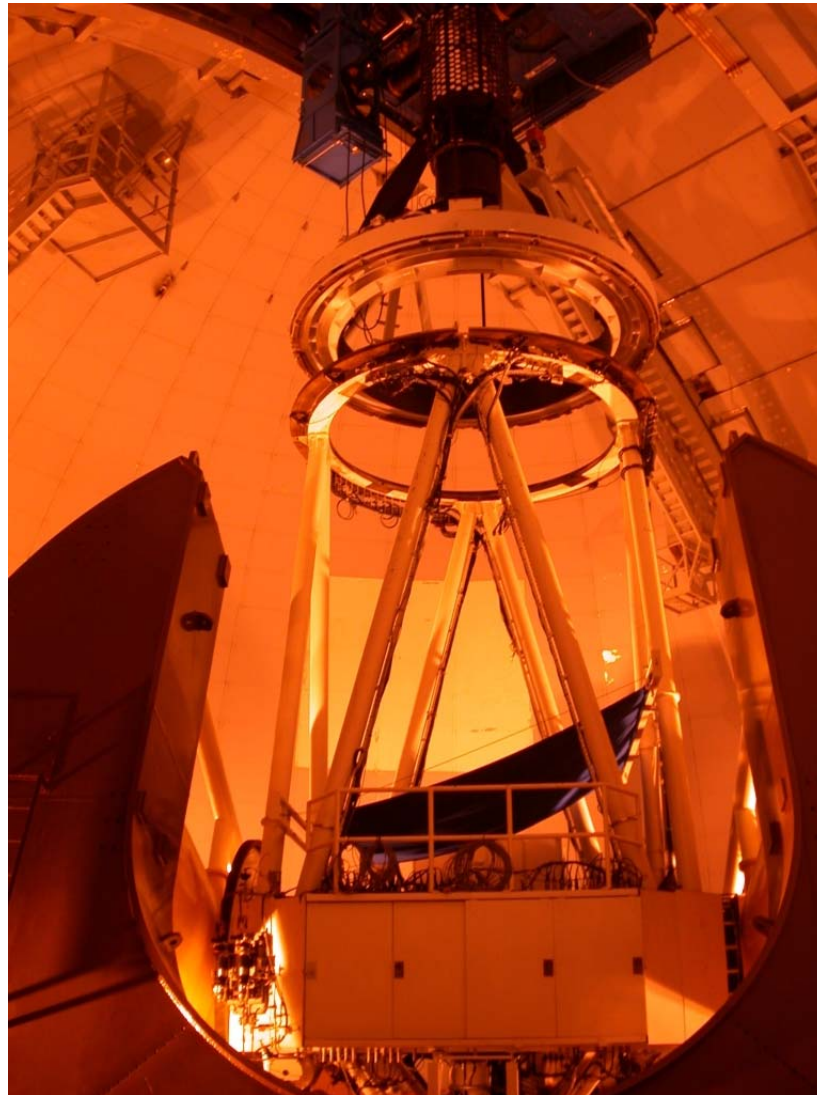
© CEA-DAPNIA

Installation au foyer primaire

dapnia

cea

saclay



© CEA-DAPNIA

Un peu d'acrobatie

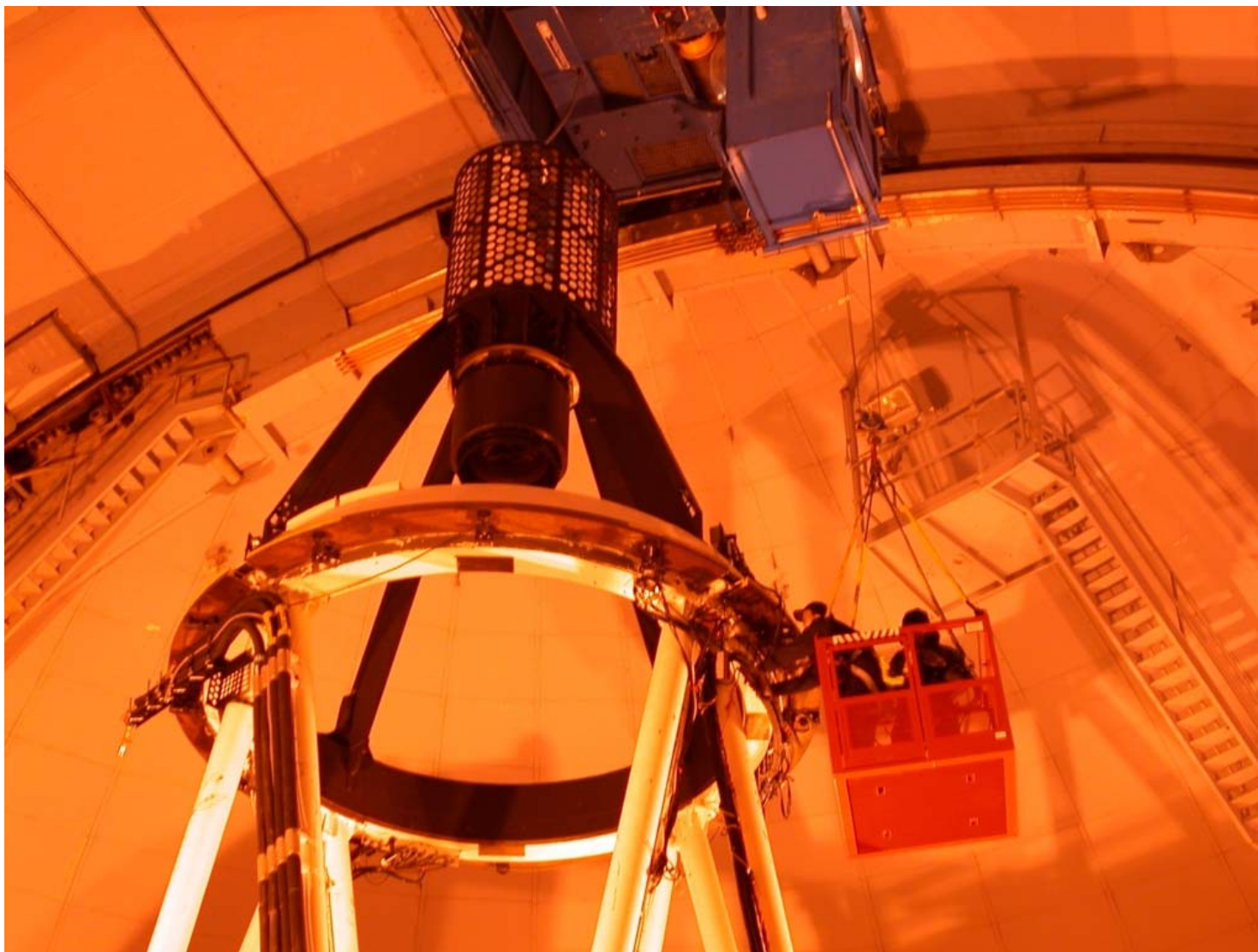
dapnia



cea



saclay



© CEA-DAPNIA

MegaCam au foyer primaire du télescope CFHT

dapnia

cea

saclay



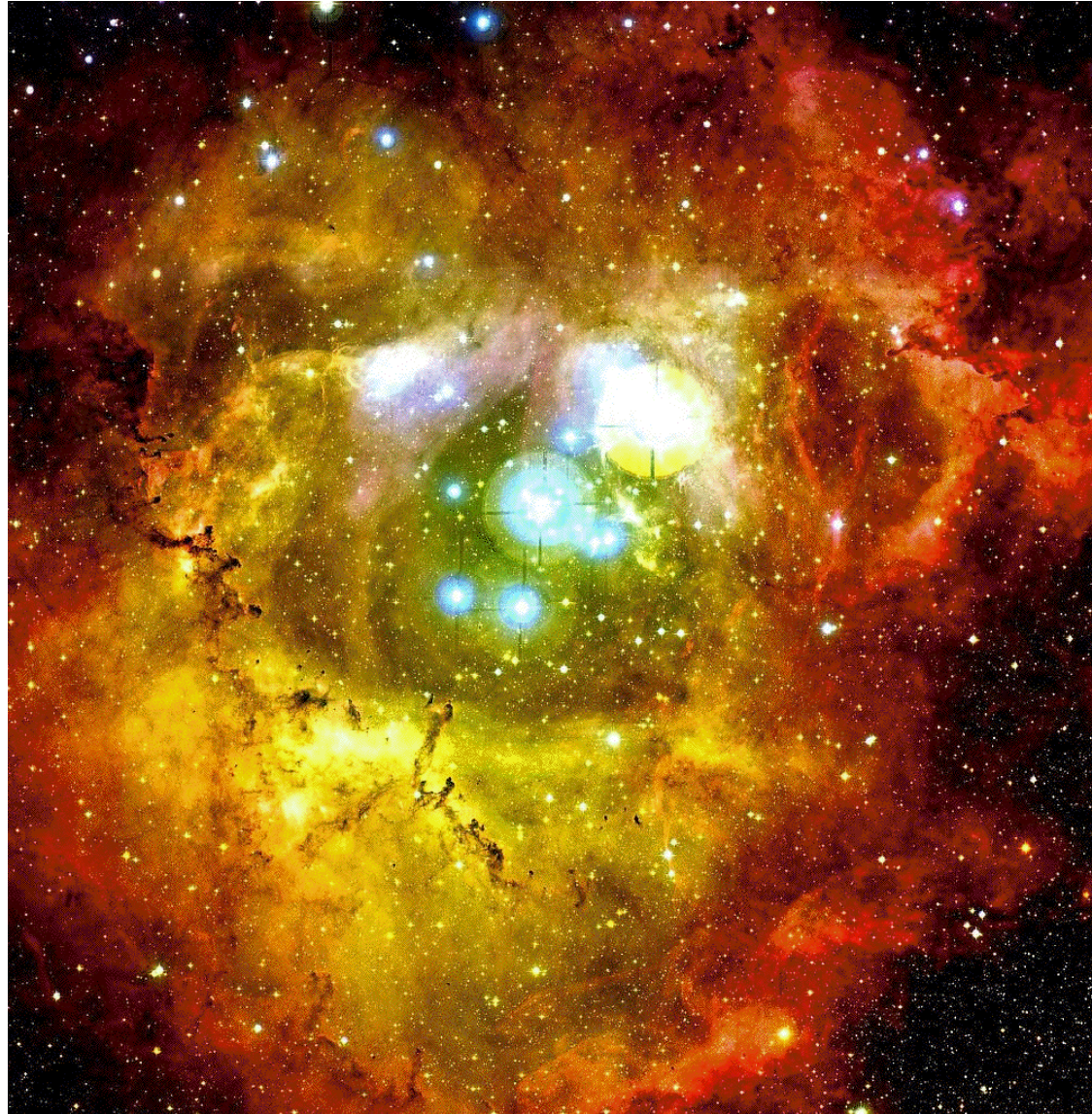
©2004 Canada-France-Hawaii Telescope

La nébuleuse de la Rosette

dapnia



saclay



©2003 Canada-France-Hawaii Telescope

Les 2 amas d'étoiles M35 et NGC2158

dapnia



saclay



©2003 Canada-France-Hawaii Telescope

Le cœur de l'amas d'étoiles M35

dapnia



saclay



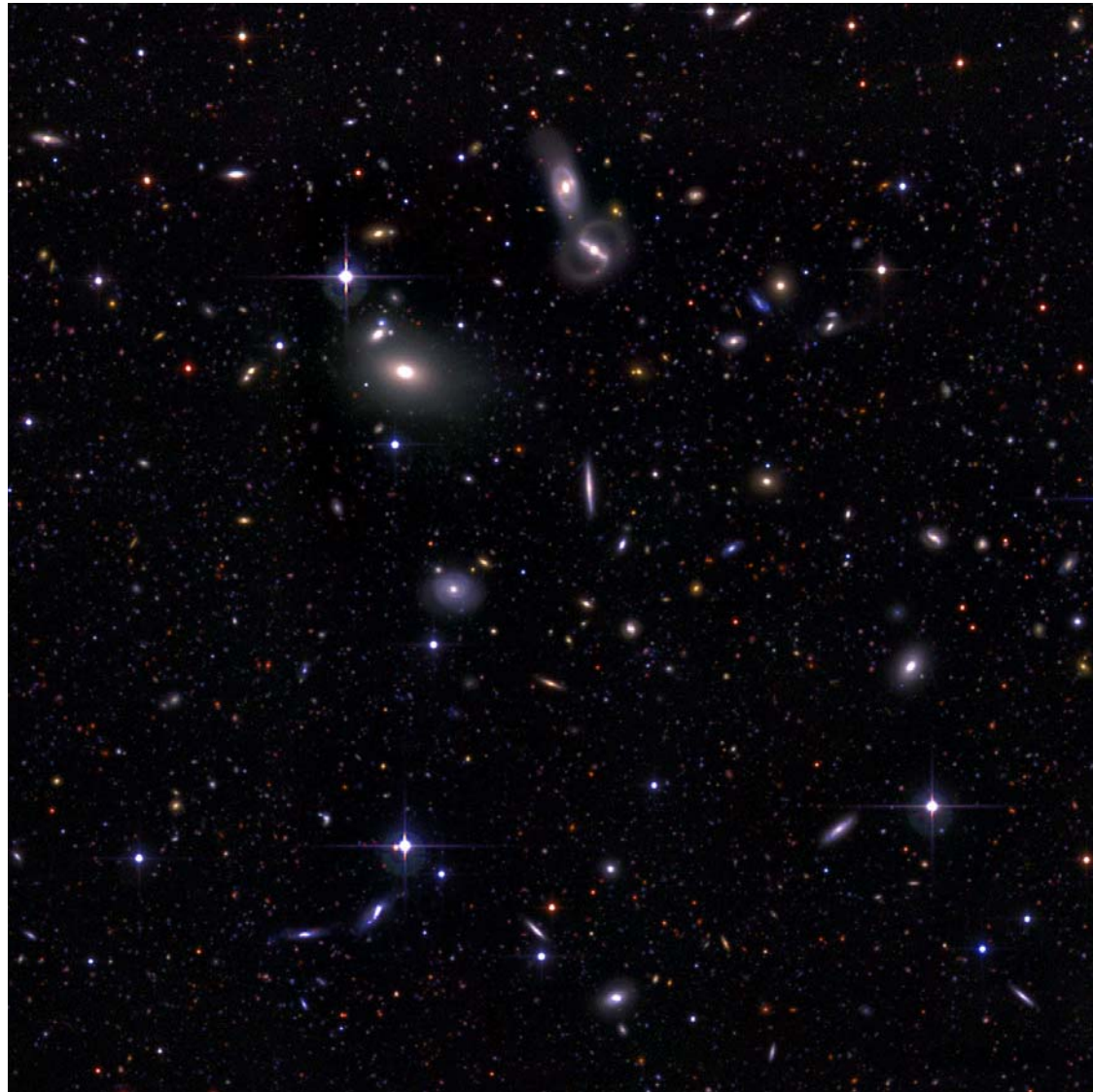
©2003 Canada-France-Hawaii Telescope

Une sous-image 8'x8' du champ profond D1 du CFHTLS

dapnia



saclay



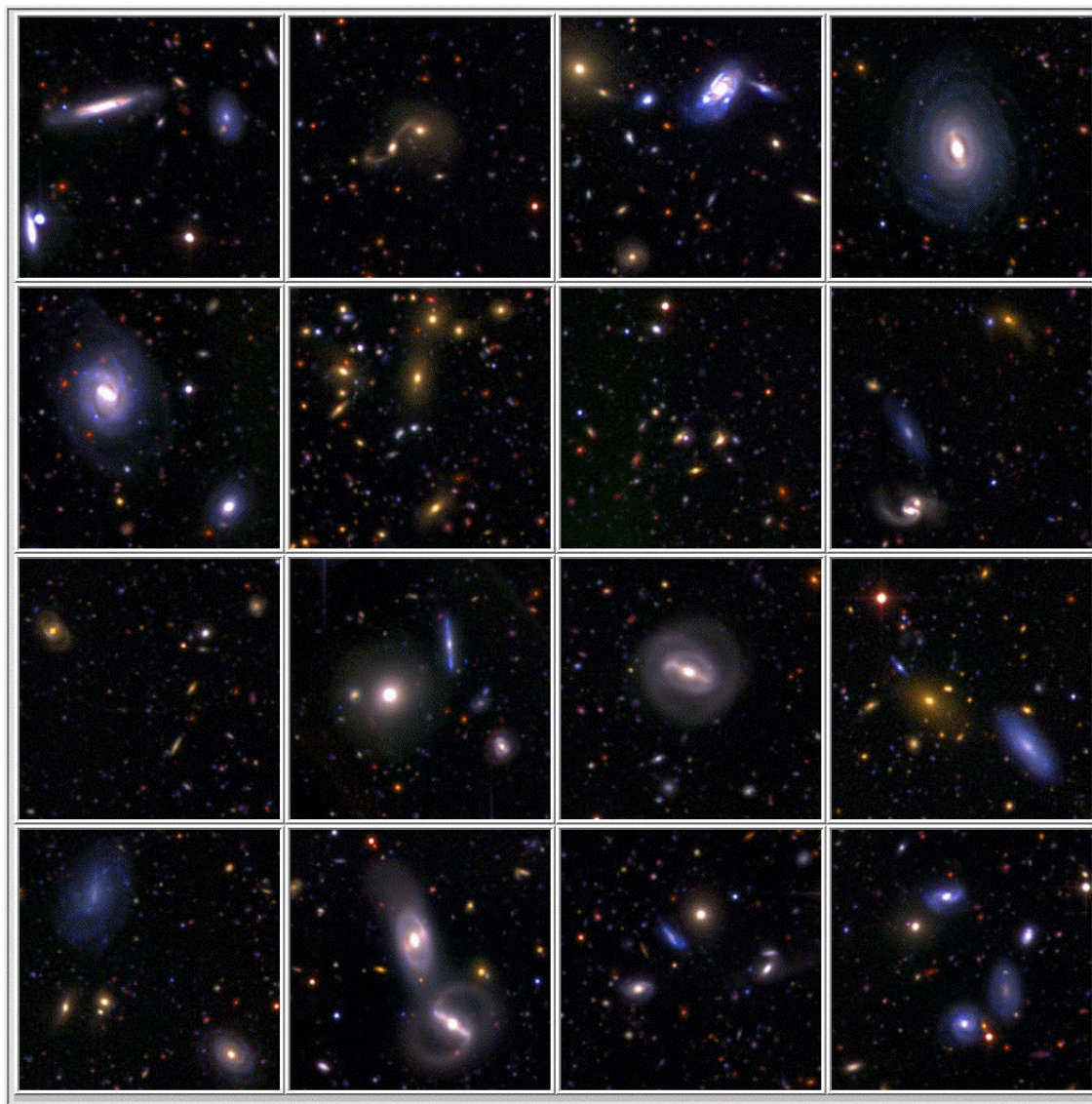
©2004 Canada-France-Hawaii Telescope

16 sous-images 90"x90" du champ D1 du CFHTLS

dapnia



saclay



©2004 Canada-France-Hawaii Telescope

Les télescopes vus de la plage...

dapnia

cea

saclay



Mai-tai et macadamia nuts

dapnia

cea

saclay



© 2005 Mauna Loa Macadamia Nut Corporation

Poissons hawaïens

dapnia

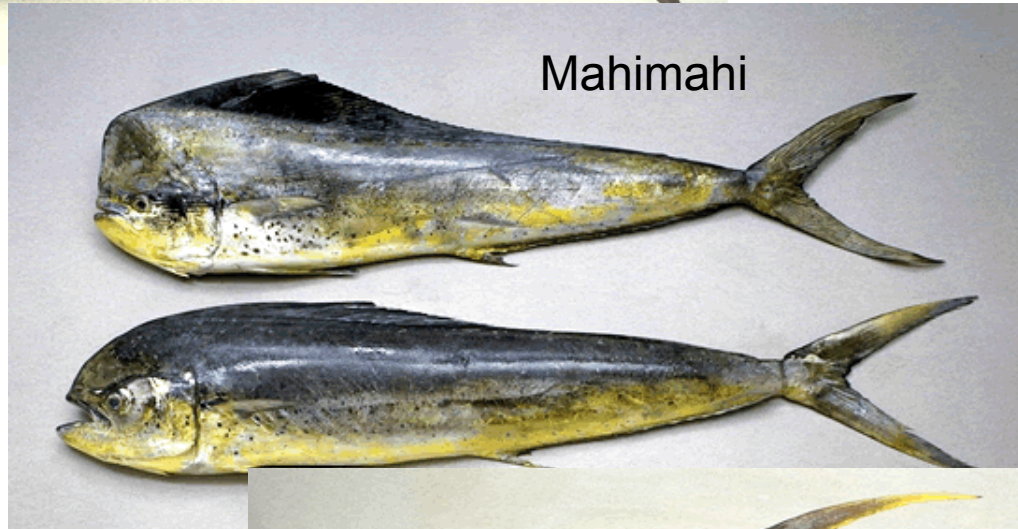
cea

saclay

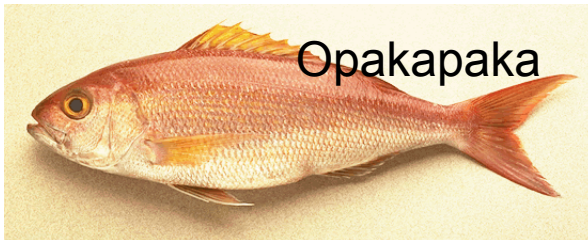
Ono



Mahimahi



Opakapaka



Ahi



© 1995, Camera Hawaii Inc.

Pêche au gros à Hawaii

dapnia

cea

saclay



© 2006, Chupu Charters Inc.

Pêche au très gros à Hawaii

dapnia

cea

saclay



© Hawaii Fishing News 2002



© 2001-2006 Black Bart International, LLC