

Instruments, Missions, Capteurs II Trier les photons

Emmanuel Marcq

LATMOS, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines

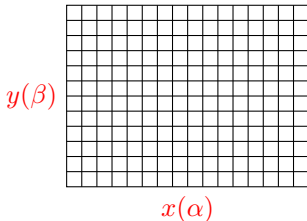
M2 NewSpace – 2022-2023

Problématique

- Photons organisés selon 3 dimensions : 2 angulaires, 1 spectrale.
 - En négligeant la polarisation.
 - Mais capteurs (matrices de pixels) selon 2 dimensions seulement.
- ⇒ **Nécessité de faire des choix** sur ce qui sera conservé.

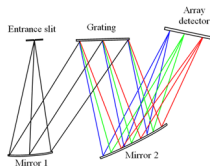
Imageurs

- Ne conservent que les 2 dimensions angulaires.
- Souvent filtrés en longueur d'onde (globalement ou par pixels)

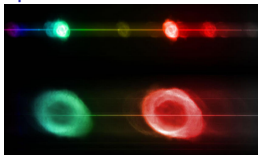


Spectromètres

- Utilisent au moins un élément **dispersif**
 - prismes, réseaux, etc.
- comportent souvent une **fente**
 - limite le champ de vue dans une direction.

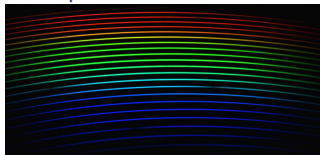


Spectromètre sans fente



- mélange entre une dimension spatiale et la dimension spectrale
- ⇒ utile pour sources ponctuelles

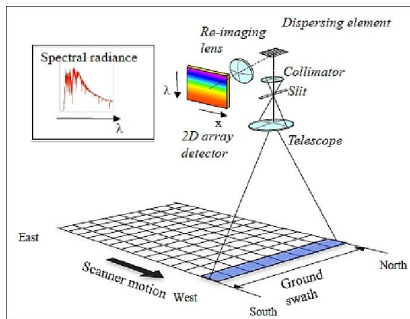
Spectromètre échelle



- Gamme spectrale plus large grâce à l'utilisation de plusieurs ordres de diffraction.
- Information spatiale limitée

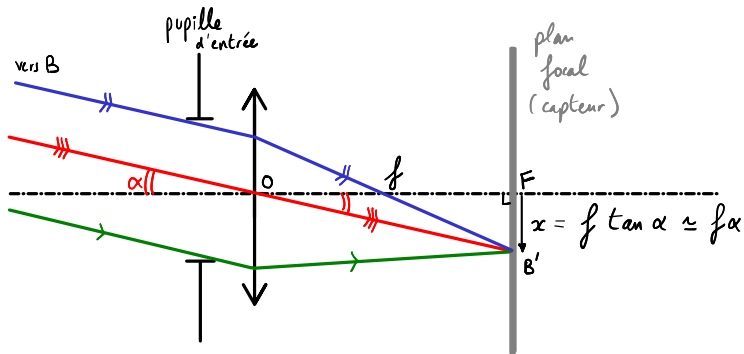
Spectro-imageurs

- Combinent sur le capteur une dimension purement spatiale et une dimension purement spectrale ;
- Nécessité d'utiliser une **fente étroite** qui élimine une dimension spatiale (selon l'axe étroit).
- Autre dimension spatiale éventuellement accessible : *scanning* avec pièces mobiles, *pushbroom*, *whiskbroom*, etc.



Principe d'un imageur

Un imageur convertit un **angle** α (dans le champ de vue) en **distance** x (sur le capteur).



En deux dimensions, l'imageur convertit un **angle solide** (portion du champ de vue) en **surface** (portion du détecteur).

Photométrie

- En un pixel donné du détecteur convergent tous les rayons passés par la **pupille d'entrée** (surface collectrice)
 - diamètre D , surface $S = \pi(D/2)^2 = \pi D^2/4$.

⇒ L'étendue géométrique d'un pixel dG se calcule alors comme :

$$dG = Sd\Omega = \frac{\pi D^2}{4}d\Omega$$

- Comme $dx \simeq f d\alpha$ et $dy \simeq f d\beta$ en optique paraxiale, on a $d\Sigma = dx dy = f^2 d\alpha d\beta = f^2 d\Omega$. On en tire alors :

$$dG = \frac{\pi D^2}{4 f^2} d\Sigma$$

si l'on préfère travailler avec la surface physique $d\Sigma$ d'un pixel.

Contraintes

- Nombre d'ouverture N (f -number)
 - Définition : $N = f/D$
 - On a alors : $dG = \frac{\pi}{4N^2} d\Sigma$
 - N ne doit pas être trop petit pour pouvoir conserver une qualité d'image suffisante (typiquement, $N \gtrsim 2$).
 - À pupille d'entrée fixée, donne une valeur minimale de la taille de l'instrument le long de l'axe optique ;
 - À taille d'instrument fixée, limite la taille maximale de la pupille d'entrée, et donc le flux de photons reçu.
 - *Point Spread Function* (PSF)
 - Dans un instrument réel, l'image d'un point n'est pas un point sur le capteur, mais une (petite) tache dont la forme est décrite par la PSF.
- ⇒ La PSF limite l'**échantillonnage** utile pour les pixels.
- Typiquement selon la moitié de la PSF : **fréquence de Nyquist-Shannon**.

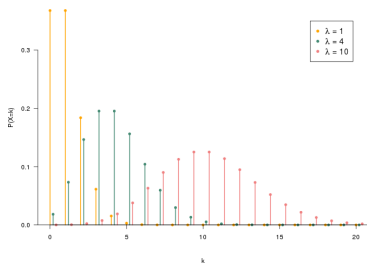
Cas des spectromètres

- **Champ de vue**
 - Limité par la **fente**, de largeur (étroite) d
- **Limites**
 - Fente trop large : luminosité ↗, mais PSF spectrale limitée par effet de **brouillage** spatial
 - Fente trop étroite : luminosité ↘, mais PSF spectrale limitée par l'optique en aval de la fente.⇒ Existence d'une **largeur optimale** de fente
- **Dispersion spectrale**
 - Les photons sont triés par longueur d'onde
⇒ moins de photons qu'en imagerie pure.
 - Photométrie d'autant plus exigeante que le **pouvoir de résolution spectrale** $R = \lambda/\Delta\lambda$ est élevé.

Statistique des photons

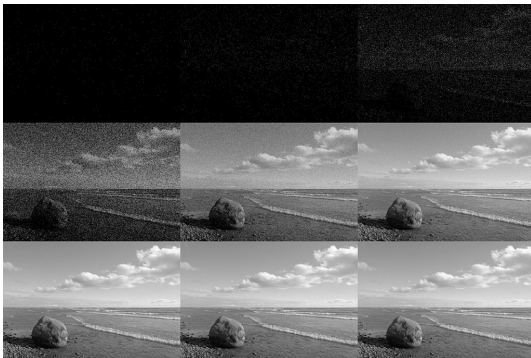
- Nombre moyen de photons par pixel
 - Durée d'acquisition Δt
 - Source ponctuelle : $\langle N \rangle = F \times S_{\text{pup}} \times \Delta t$
 - Source étendue : $\langle dN \rangle = L \times dG \times \Delta t$

- Suit une loi de Poisson
 - Typique des événements aléatoires indépendants
 - $P(k) = \frac{N^k}{k!} e^{-N}$
 - Valeur moyenne $\langle k \rangle = N$
 - Écart-type $\sigma = \sqrt{N}$
 - Tend vers une gaussienne pour $N \gg 1$



Rapport signal sur bruit (SNR)

- Bruit de photons (shot noise)
 - SNR égal à $\langle k \rangle / \sigma = N / \sqrt{N} = \sqrt{N}$
 - Limite intrinsèque, indépendante du détecteur.



Images simulées avec SNR allant de 10^{-3} à 10^5