

Proposition **COMPLEX**
An Imaging PIXIE

COsmic **M**icrowave **PO**Larized
Emission **EX**plorer

Jean-Pierre Maillard, IAP

Objectifs

1. Sensibilité suffisante afin d'obtenir un S/B significatif sur les modes B pour $r \approx 10^{-3}$
2. Couverture du plus champ utile pour la cosmologie
3. Séparation par la spectroscopie de l'émission du CMB de celle des avant-plans
4. Rendre compatible la résolution utile pour la polarisation du CMB ($\approx 1 \text{ deg}^2$) et la résolution de quelques minutes souhaitable pour les poussières, voire améliorer la résolution du CMB
5. Caractériser avec précision les distorsions du corps noir du CMB

Solution

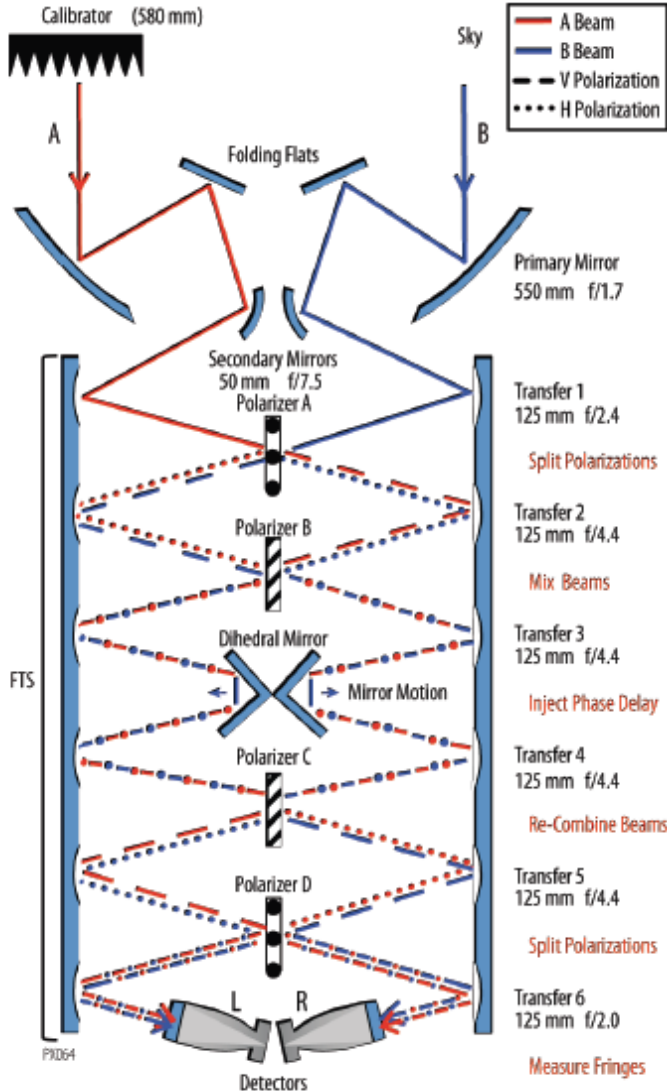
Un FTS différentiel à polarisation imageur



Transposer l'instrument PIXIE mono-pixel en instrument imageur

The optical concept of PIXIE

A dual-input, dual output polarizing interferometer:



- dual input: two off-axis telescopes (550 mm primary mirror), pointing in the same direction, co-aligned with the spacecraft spin-axis
- dual output: 2 bolometers on each port with a square feed horn in front. One detector for each polarization at 90° to separate E and B-mode
- a blackbody calibrator : (2.6 – 3.5 K range, temp. precisely adjustable 5 mK). Can fully cover entrance A or B or be stowed to let A and B open
- thermal control of the full instrument : at 2.725 K by cryocoolers (no cryogenic fluid)
- sky FOV : 2.6° (diffraction at 30 GHz)
- pixel size : 0.9°
- limit of spectral resolution : 15 GHz
- modulation of the interferometric signal : by spin-axis rotation of the spacecraft (4 RPM)
- Overall size of the spectrometer : height = 80 cm, basis $\approx 115 \times 115$ cm , non-deployed payload $\Phi \approx 2$ m

Modes of data acquisition

Full sky coverage, in orbit around the Earth (or around L2)

- 1) blackbody on A, sky on B
- 2) sky on A, blackbody on B
- 3) A and B on sky

Interferometric signal in each configuration:

Modes 1) and 2) = spectral distortions of the CMB to the BB emission + the polarized components of the CMB flux + foregrounds emission

Sum of outputs from 1) and 2) → *correction of unbalance between A and B*

- Domain 30 GHz – 1 THz = **CMB residual spectrum**
- Domain 1 THz – 6 THz = **unpolarized galactic emission spectrum**

Mode 3 = all the polarized components of all the flux sources; doubling of the signals (from A + B)

Spinning of the instrument → *correction of instrumental polarization*

- Domain 30 GHz – 1 THz = **E and B modes emission spectra**
- Domain 1 THz – 6 THz = **polarized galactic dust spectrum**

To compensate the smearing of the point spread function in orbit, delicate data recording: x, y, α coordinates at each interferometric step and signal reconstitution for each observed point from the raw data of several orbits

Advantages of an Imaging FTS

An Imaging FTS: double input – double output FTS + entrance field imaged on a NxN array detector = integral field spectroscopy of the field →
N² spectra acquired simultaneously

Compared to a mono-pixel FTS at same spectral resolution, spatial resolution, total observing time → **gain of N** on the S/N ratio of spectra (photon noise-limited cond.)

For an Imaging FTS, at a spectral resolution R_{\max} at a given wavelength, capability of a wide field and high spatial resolution (diffraction and optical aberrations permitted) according to:

$$R_{\max} \times U = 2.61 \times N \times S_1$$

$$U = (\pi^2 / 16) \times \theta^2 \times D_T^2$$

U entrance beam étendue, θ F.O.V. diameter, D_T telescope size, S_1 FTS beam area

Paramètres d'un FTS Imageur pour le CMB

- **N = 100** soit des mosaïques de 10 000 bolomètres sensibles à la polarisation
- Nombre de mosaïques : 4 – deux à chaque sortie, à polariseurs orthogonaux
- Domaine spectral utile : **30 GHz – 3000 GHz** (100 μm – 10 mm)
- **R = 100 à 300 GHz** ($\lambda = 1 \text{ mm}$) $\rightarrow dv = 3 \text{ GHz} \rightarrow$
 ≈ 1000 canaux spectraux
- Différence de marche optique **$\delta = 60 \text{ mm}$**
- Instrument placé en L2; mode d'acquisition de données par **pointage du champ** observé

Paramètres (suite)

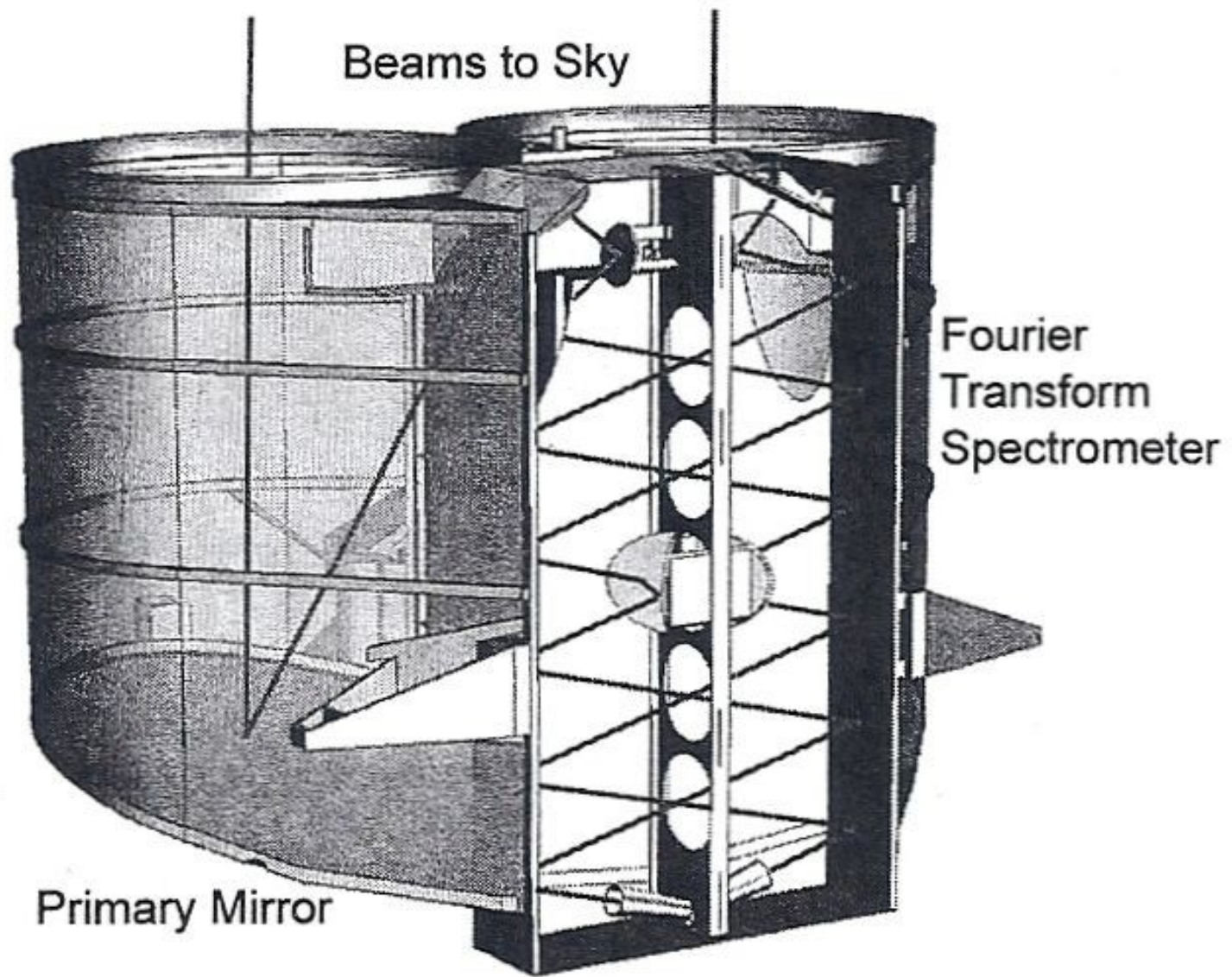
- $D_i = 20 \text{ cm}$ Diamètre des 4 séparatrices (wire-grid)
- $D_T = 175 \text{ cm}$ dimension des télescopes \rightarrow champ maximum $\theta_{\max} = 0.1318 \text{ rd}$ soit $7.55^\circ = 453'$
- 2 télescopes Cassegrain hors axe, primaire carré 175x175 cm
- $\theta = 5^\circ$ champ effectif $5^\circ \times 5^\circ$ - diagonale du champ = 7° ($< \theta_{\max}$)
- Résolution spatiale/pixel = **3'**
- Largeur du pic de diffraction à $\lambda = 1 \text{ mm}$: **3.90'**
- Pixel rempli par le lobe de diffraction pour $\lambda = 0.764 \text{ mm}$ (392 GHz)
- Largeur du lobe de diffraction à $\lambda = 10 \text{ mm}$: **39'** - 13x13 pixels
- Température télescope + FTS souhaitable $\approx 1.5 \text{ K}$ ($< 2.7 \text{ K}$)

Paramètres (suite et fin)

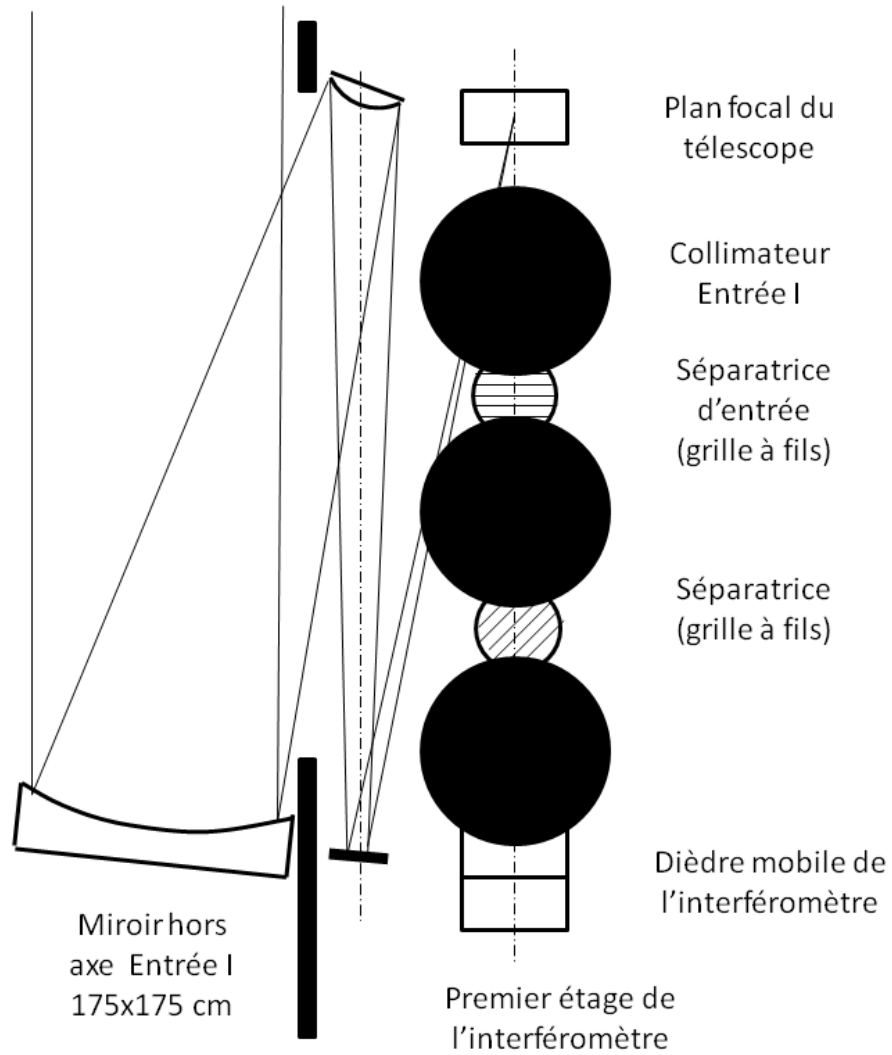
- Secondaire des télescopes = pupilles d'entrée
- Image de chaque pupille formée sur la séparatrice d'entrée et de sortie
- Angle d'incidence maximum dans l'interféromètre : $2.50^\circ \times 175/20 = 21.87^\circ$

Compatibilité polarisation du CMB, spectroscopie des avant-plans

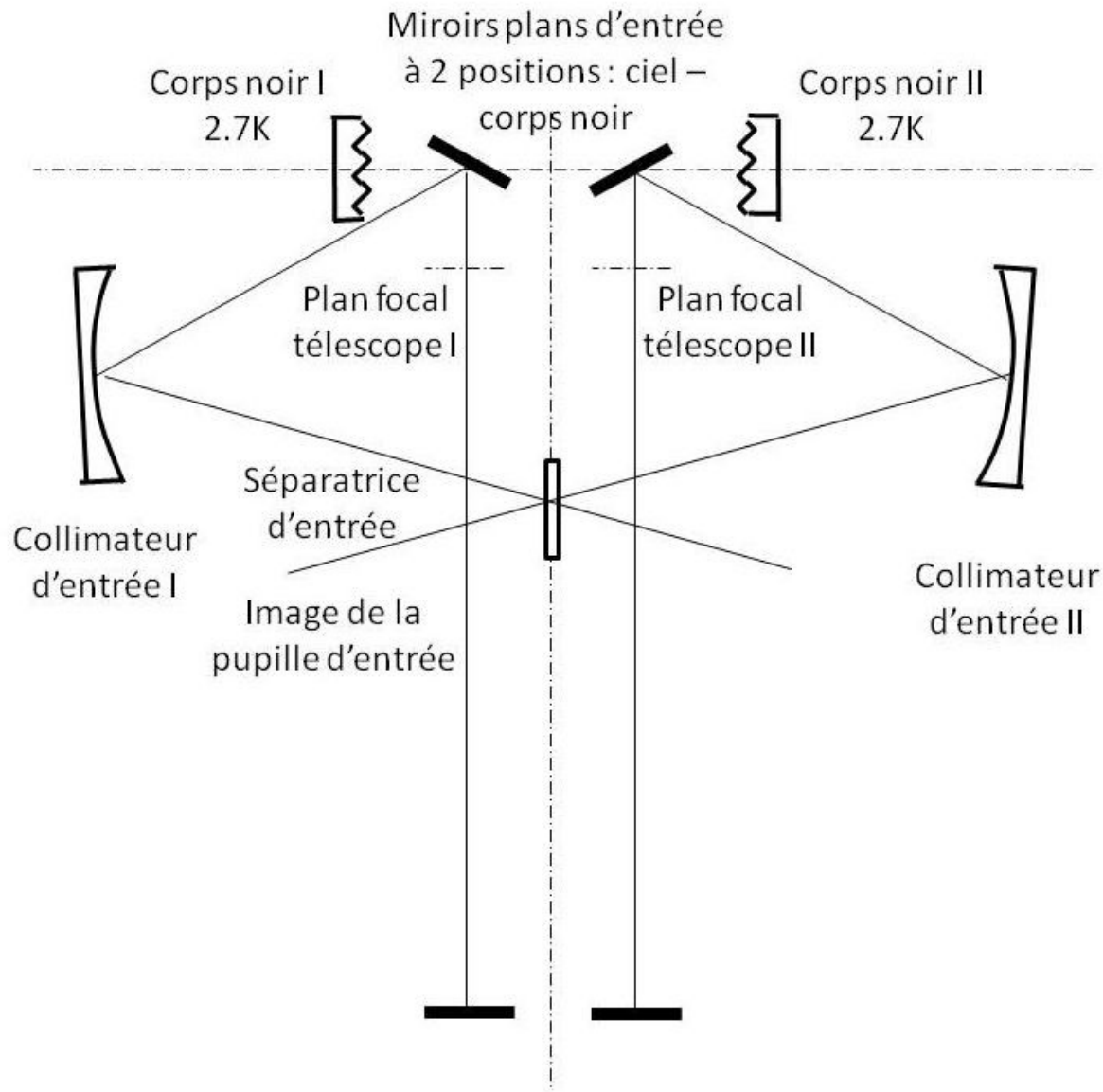
- Pour le CMB : couverture d'un champ de $\sim 10^4 \text{ deg}^2$ autour de chaque pôle galactique ($l \geq 45^\circ$) à résolution spatiale $0.9^\circ \times 0.9^\circ$ et spectrale 15 GHz (paramètres PIXIE). Possible à plus haute résolution spatiale et spectrale.
- Acquisition en mode "2 entrées ouvertes sur le ciel" de **416 champs adjacents** (recouvrement de 4% d'un champ au suivant) par pôle, en 6 mois. En principe, soustraction de la polarisation instrumentale par 2 acquisitions en opposition de phase par retournement de 180° autour de l'axe de l'instrument.
- Pour ISM ($l < 45^\circ$) : champs choisis à résolution spatiale **3'x3'**, spectrale **3 GHz**, sur domaine **390 GHz – 3 THz** (CO, Cl, CII, OI ...)



Physical layout of PIXIE kept for COMPLEX



Telescope + Interferometer



Instrument entrance with 2 black bodies. Entrance mirrors with two positions: Sky or BB.
 Configuration BB on each entrance → instrumental polarization map

Gain en sensibilité/PIXIE

- Mode pointé au lieu d'un orbiteur : champ à couvrir optimisé pour $l \geq 45^\circ \rightarrow$ gain facteur 2 en temps d'observation
- Résolution spatiale assurée (limitation seulement par précision de pointage)
- Acquisition de données simplifiée
- Hypothèse d'une même efficacité optique ($> 82\%$)
- Gain en flux par la dimension des télescopes : **facteur 12.9**
- Gain en temps d'intégration à une résolution spatiale de $0.9^\circ \times 0.9^\circ$: **facteur 62** (conditions PIXIE)
- Gain final en S/B : **facteur 28.3** pour le CMB
- Sensibilité : $\approx 7 \text{ nK/deg}^2$
- Champs des avant-plans $5^\circ \times 5^\circ$: résolution spatiale $3'$, spectrale 3 GHz

Questions

- Les paramètres choisis sont-ils réalistes ?
 - dimension des télescopes (1.75 m) → dimensions de la charge utile
 - taille des mosaïques de bolomètres (10^4 pixels)
- Le mode d'acquisition de données avec priorité à la polarisation du CMB aux pôles galactiques est-il pertinent ? Distorsion du corps noir et science des avant-plans des programmes secondaires. Mais sur la durée de la mission, possibilité d'un équilibrage facile à mettre en place.
- Quelle résolution spatiale serait encore utile pour la spectroscopie des avant-plans ?
- Validation nécessaire par un tracé de rayon des télescopes au plan des détecteurs pour la longueur d'onde la plus courte (100 μm). Urgence ?
- Stratégie par rapport à PIXIE ? Le considérer comme un « pathfinder » ou aller tout de suite vers un consortium ESA – NASA autour de cette solution?

Suite à la discussion

- Résolution spatiale des cartes Planck du CMB de (5') soit $l \approx 2000$, tandis que PIXIE est limité à $l \approx 200$. Si cette résolution est nécessaire, alors CMB et avant-plans demandent une résolution de même ordre de grandeur, ce que COMPLEX rend possible
- Estimer la sensibilité de COMPLEX pour ce type de résolution spatiale ?
- A voir: avec le mode imageur, problème de la pollution d'un point par les lobes secondaires des points voisins. Conséquence pour la rotation de l'instrument sur le ciel utilisée pour corriger la polarisation instrumentale. Rotation par sauts de 90° ou de 180° , un même point du ciel pas vu par le même pixel.
- Alimentation de chacune des entrées avec un corps noir à température différente → la carte de la polarisation instrumentale à soustraire des données. Elimine la nécessité de rotation
- A voir : possibilité de déconvolution des images. Solution pour corriger la contribution des lobes secondaires
- A revoir : aspect multimode des détecteurs de PIXIE (commentaire de J. Delabrouille) sur la sensibilité
- Couverture à fréquences < 30 GHz demandée (jusqu'à 15 GHz). Possible en principe mais dépend des bolomètres.
- Intérêt d'une résolution spectrale plus élevée (facile à implanter = augmentation de OPD) → plus de canaux vers les basses fréquences
- PIXIE étant moins coûteux est un "pathfinder" indispensable
- En faisant fonctionner PIXIE en mode pointé au lieu d'un orbiteur apporterait un gain en sensibilité par la limitation du champ couvert pour un même temps d'observation. Augmentation de la résolution spectrale à proposer.