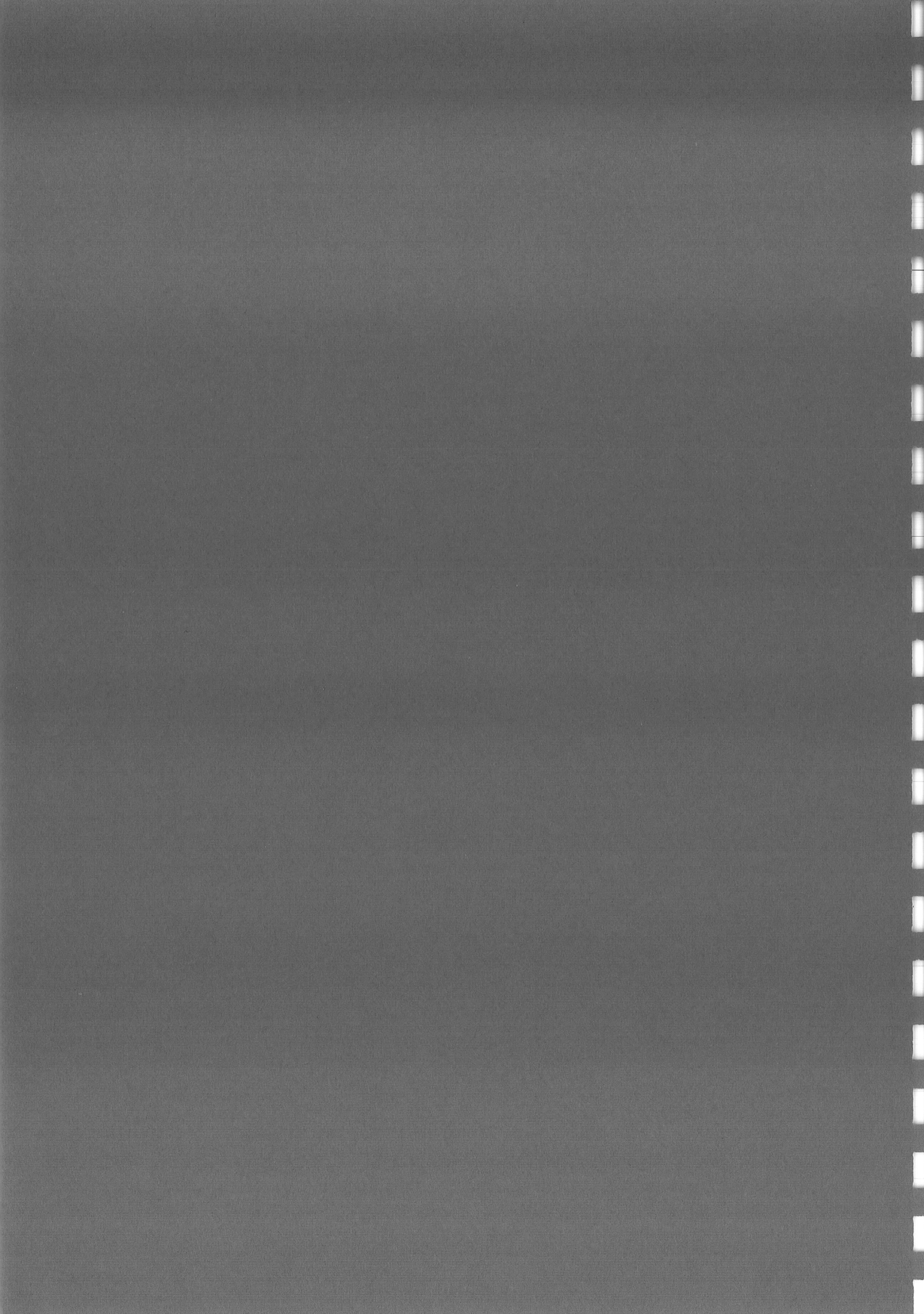


Projets spatiaux
utilisant des bolomètres
à très basse température

Jean-Michel LAMARRE



Projets spatiaux utilisant des bolomètres à très basse température

Jean-Michel Lamarre

Institut d'Astrophysique Spatiale, bât. 121, 91405 Orsay cedex, lamarre@ias.fr

3ème école sur la détection de rayonnement très basse température.
Aussois, 24-29 novembre 1996.

Résumé

Les bolomètres à très basse température sont les détecteurs de rayonnement électromagnétique les plus sensibles en large bande (photométrie) dans le domaine de longueurs d'onde 0,2-5mm. En dessous de 1mm, l'atmosphère constitue à la fois un écran et une source de rayonnement qui rendent impossibles certaines observations. C'est donc depuis l'espace que le domaine sub-millimétrique doit être exploré. Les satellites COBE et IRTS ont utilisé des bolomètres refroidis à 1,8K et 0,3K et ont permis en particulier d'obtenir les premières cartes du ciel submillimétrique. Ce domaine de longueurs d'onde permet d'explorer la matière froide (le milieu interstellaire) dans les galaxies, dont la notre, ainsi que la formation de l'univers et de ses grandes structures, accessibles par l'observation du corps noir cosmologique et ses distorsions.

Le projet COBRAS-SAMBA est la troisième mission moyenne (dite M3) du programme scientifique "Horizon 2000" de l'Agence Spatiale Européenne. Sa fonction est de cartographier la plus grande partie du ciel dans 9 bandes spectrales, dont 5 couvertes par des bolomètres et quatre par des détecteurs cohérents. La résolution angulaire d'une fraction de degré et des sensibilité en température de brillance de quelques micro-Kelvin sont rendues possibles par un gain en sensibilité de trois ordres de grandeur par rapport à l'expérience DMR de COBE. Ce gain est obtenu grâce à des bolomètres refroidis à 0,1K par un système à dilution en circuit ouvert (A. Benoît). L'objectif majeur de cette expérience est de discriminer entre les multiples modèles de formation de l'univers et de la structure dans l'univers laissés libres par COBE du fait de sa résolution angulaire (7 degrés).

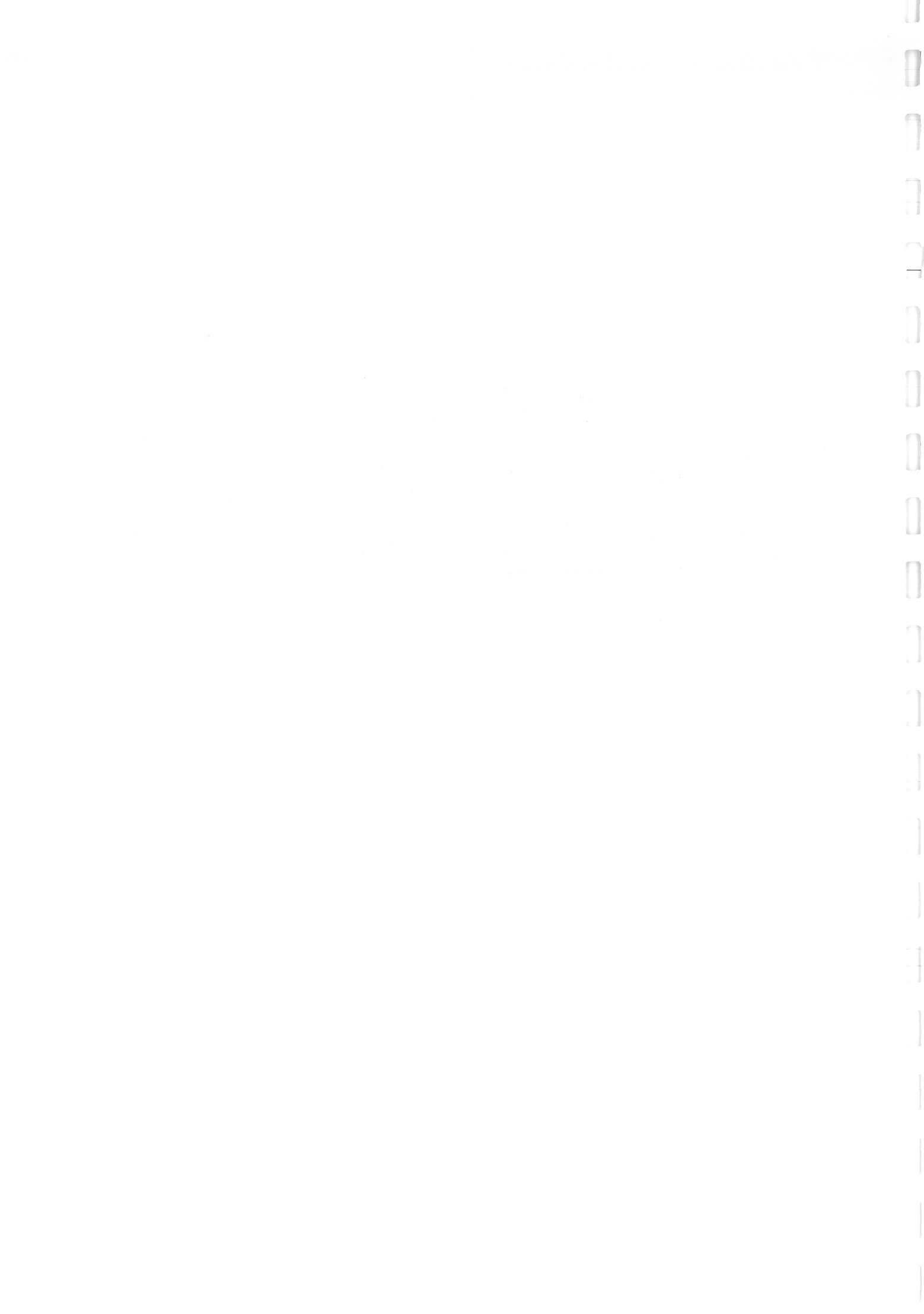
Le projet FIRST (Far Infrared Space Telescope) est la quatrième "pierre angulaire" d'Horizon 2000. La meilleure résolution angulaire autorisée par le diamètre du télescope (3m) permettra d'observer plus en détail les nombreux objets froids ou très lointains déjà répertoriés ou devant l'être par COBRAS/SAMBA. Il s'agit donc d'un projet de type observatoire, comprenant trois instruments focaux : un spectromètre hétérodyne (détection cohérente) et deux spectrophotomètres, dont un utilisant des photoconducteurs et l'autre des bolomètres. Ces instruments utilisent trois parties différentes du plan focal.

Les dates de lancement prévisibles pour ces instruments sont respectivement 2004 et 2007, mais les appels d'offre pour la réalisation des instruments devraient être lancés dès 1997.



Commentaires aux transparents du cours:

- 2) Amas de galaxies
- 6) Spectre mesuré par l'expérience FIRAS du satellite COBE
- 7) Cartes obtenues par l'expérience COBE-DMR en ondes millimétriques. En haut : en enlevant le fond à 2.73K, on voit la composante dipolaire. Au milieu : En enlevant la composante dipolaire, on voit principalement la galaxie. En bas : En enlevant la galaxie, on voit principalement le bruit des détecteurs, et pour une part les fluctuations primordiales du rayonnement fossile.
- 8) Pour mettre en évidence les fluctuations du fond, il faut corrélérer les signaux entre quatre voies de mesure.
- 10) prédictions du spectre des fréquences spatiales selon deux modèles proposés pour expliquer les anisotropies du corps noir cosmologique. Sur la même courbe ont été portés les fonctions de filtrage de COBE-DMR et des 9 canaux de COBRAS/SAMBA.
- 11-13) Allure du lobe de sensibilité d'un cornet corrugué, et télescope assurant la directivité du faisceau, et donc la résolution angulaire de l'instrument COBRAS/SAMBA.
- 15) Rayonnement parasite contaminant la mesure des fluctuations primordiales.
- 16) Acte de naissance du concept SAMBA
- 19) Schéma-bloc de l'instrument haute fréquence (HFI) de COBRAS/SAMBA
- 20) Données sur l'architecture cryogénique du HFI
- 26) Programme scientifique de l'agence spatiale européenne. Le projet sélectionné comme troisième mission moyenne (M3) est COBRAS/SAMBA.
- 32-32 bis) Domaines de meilleure sensibilité des trois types de détecteurs utilisés dans le domaine submillimétrique. Leur utilisation dans FIRST
- 35-37) FIRST dans son option cryogénérateurs (l'autre option est basée sur l'utilisation de d'hélium liquide).



Projets spatiaux utilisant des
bolomètres à très basse température.

J.-P. Lamarre

Inst. d'Astrophysique Spatiale - Orsay.

- Le ciel Sub-millimétrique
- La mesure du rayonnement fossile
- Cobras / Samba
- Le milieu interstellaire
- FIRST.



$$Y_{obs} = \frac{Y_{emis}}{1+z}$$

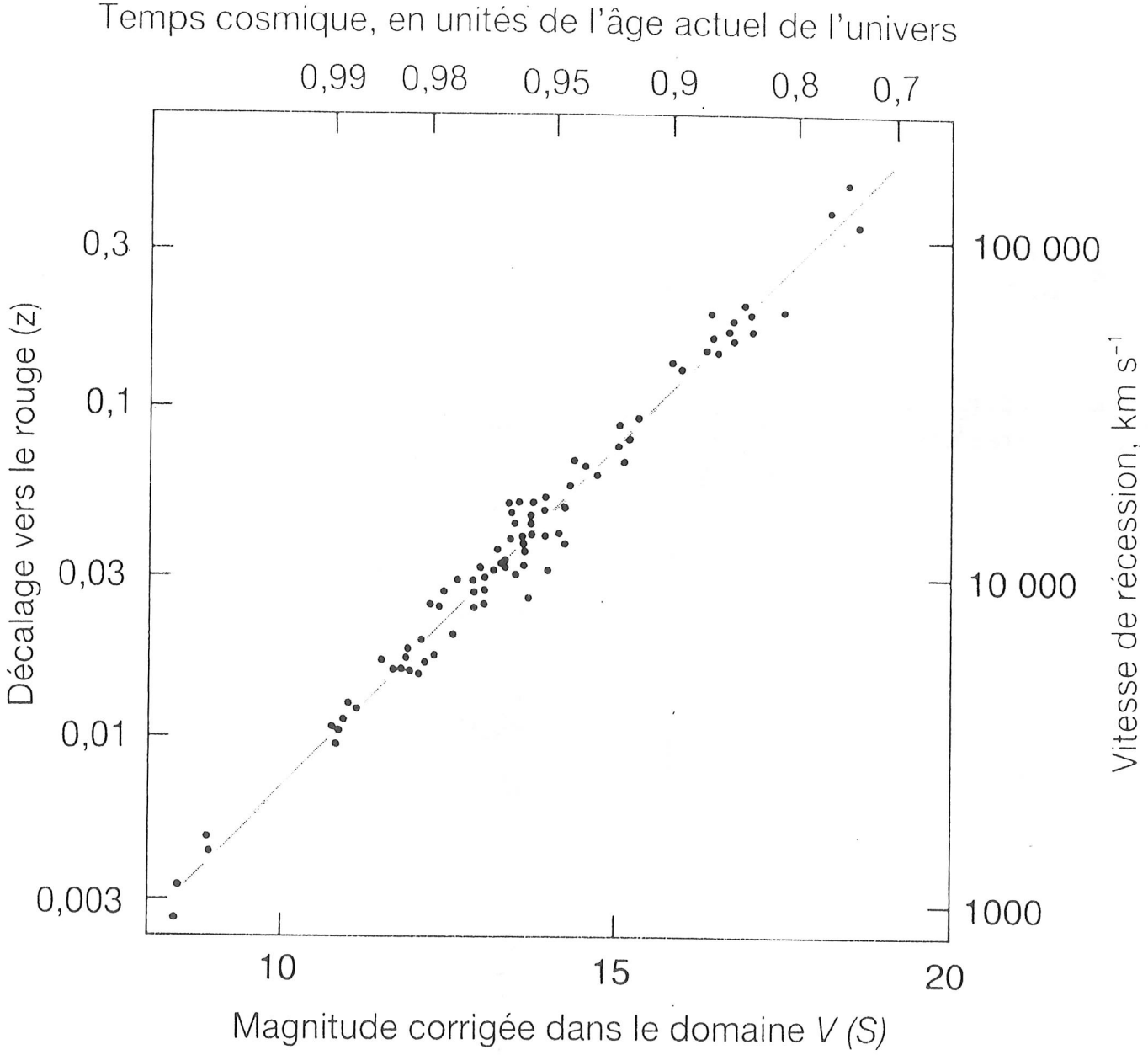
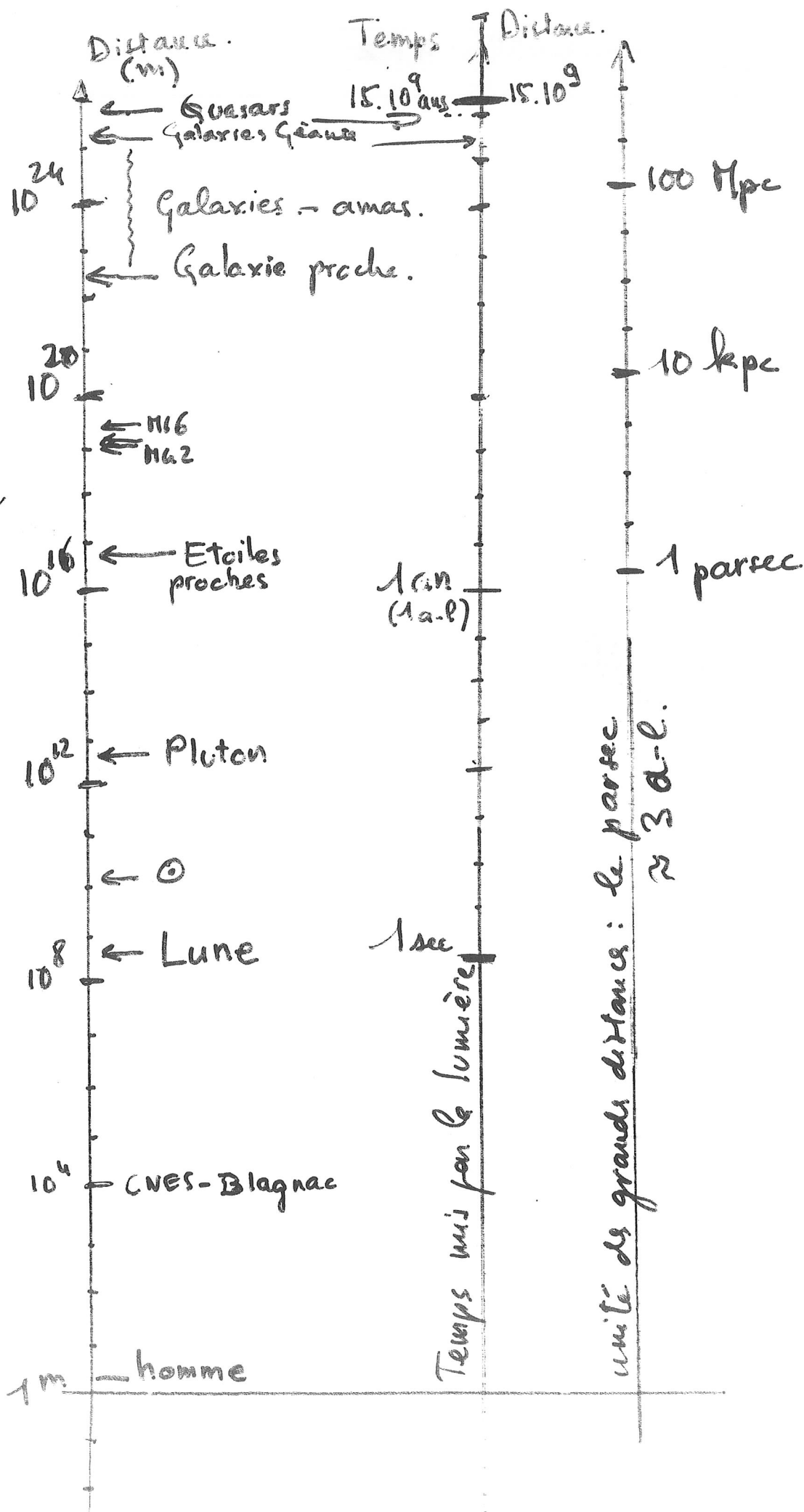
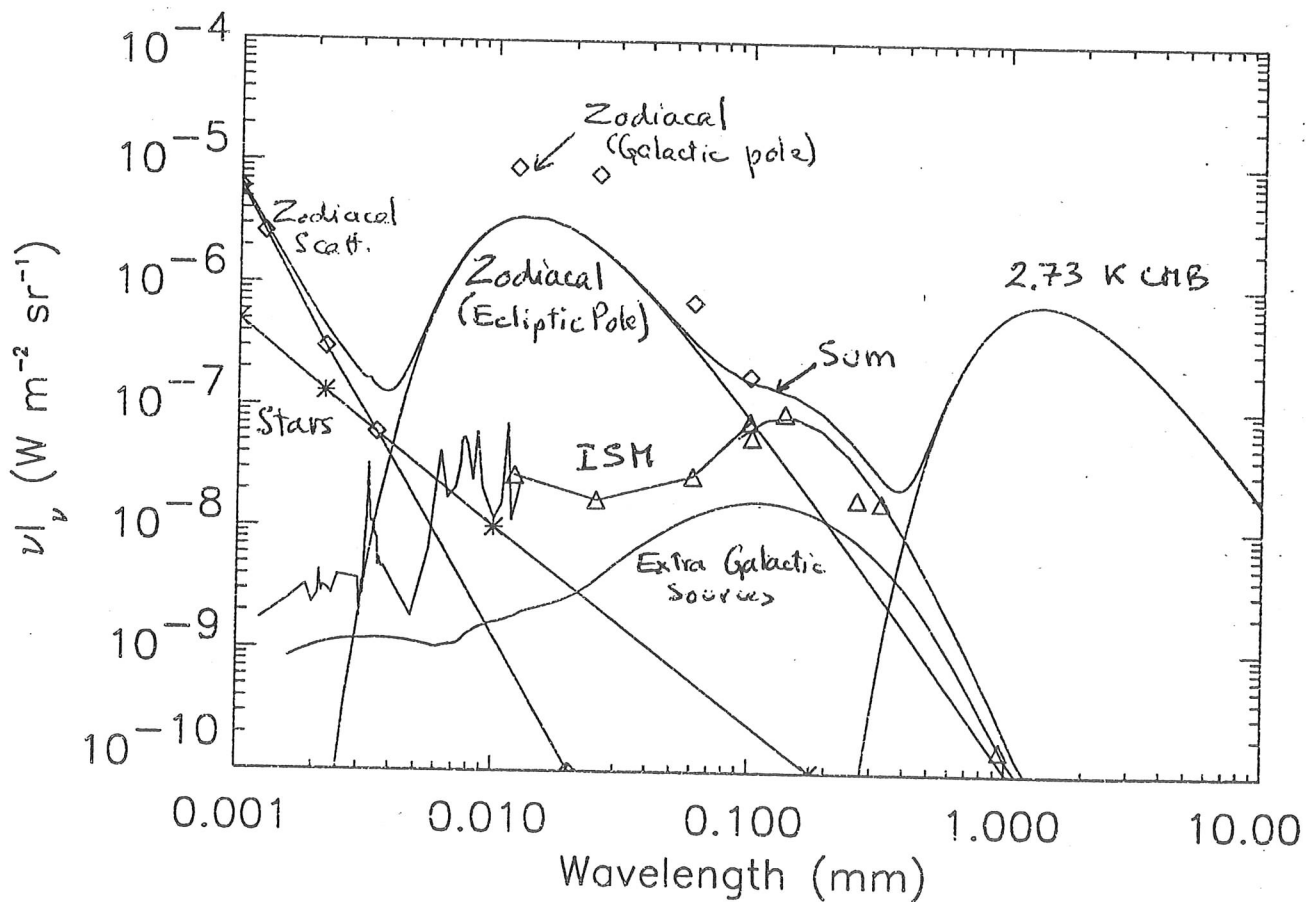


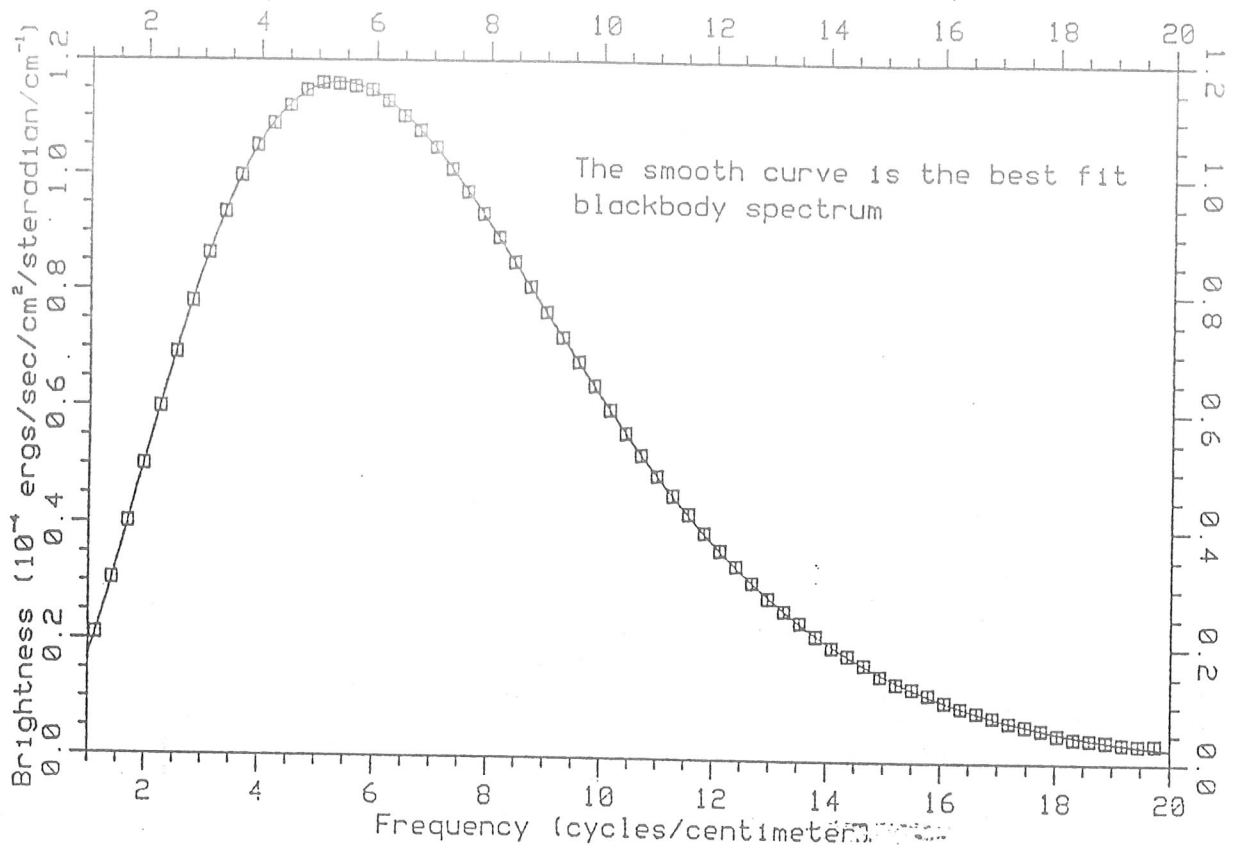
Figure 6.74. Une version moderne du diagramme de Hubble pour les galaxies les plus brillantes des amas (D'après A. R. Sandage (1968). *Observatory* 88, 99). Dans ce graphe en coordonnées logarithmiques, on a représenté la densité de flux observée S des galaxies les plus brillantes des amas en fonction du décalage vers le rouge z . La ligne droite correspond à ce qu'on attendrait pour S variant comme $S \propto z^{-2}$. Ceci indique que les galaxies les plus brillantes des amas ont des propriétés remarquablement uniformes, et que la distance des galaxies est proportionnelle à leur décalage vers le rouge, ce qui implique, pour les petites valeurs du décalage, que la vitesse est proportionnelle à la distance.



SKY Brightness (minimum)



Cosmic Background Spectrum at the North Galactic Pole



Temperature of the Cosmic Background versus Wavelength

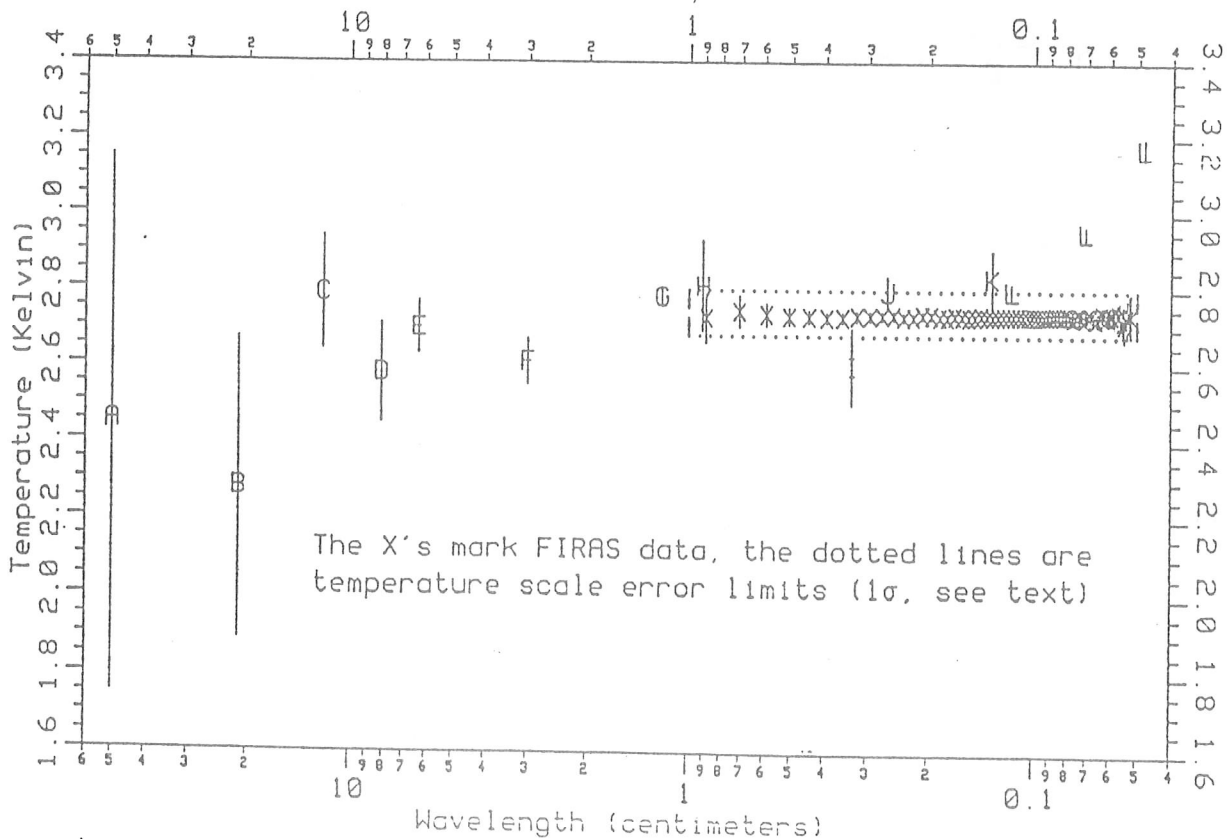
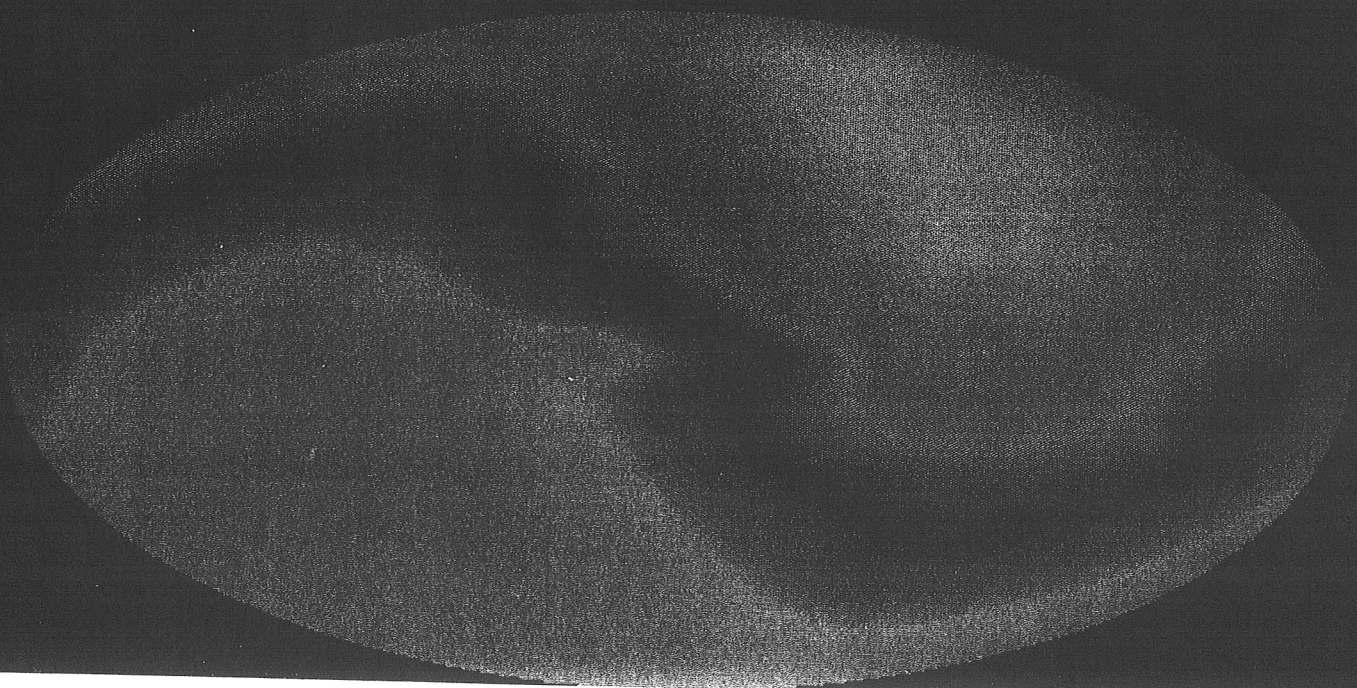
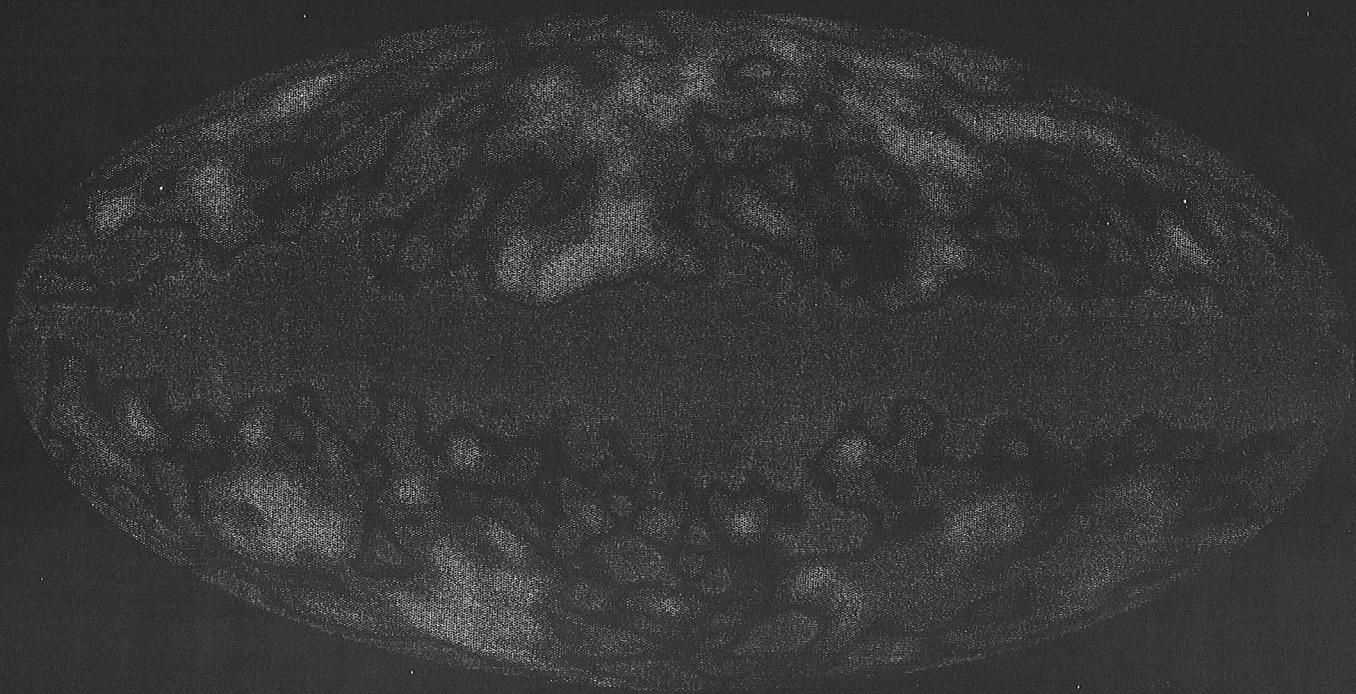
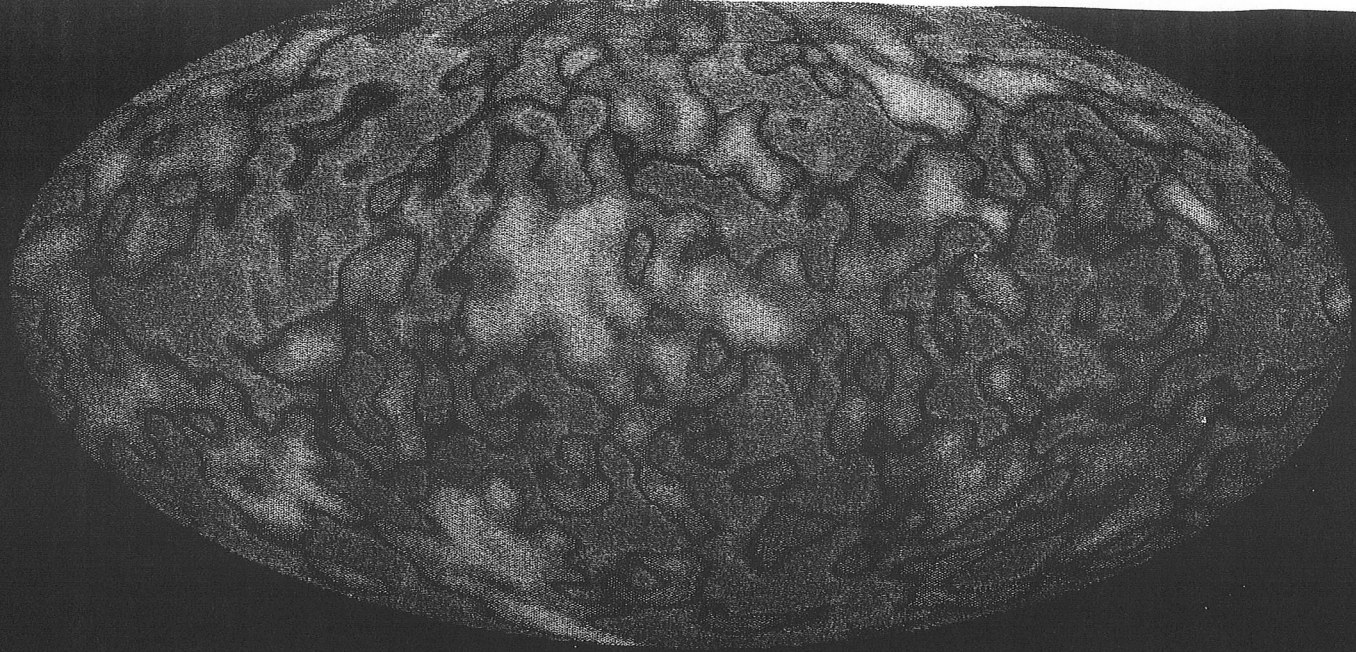
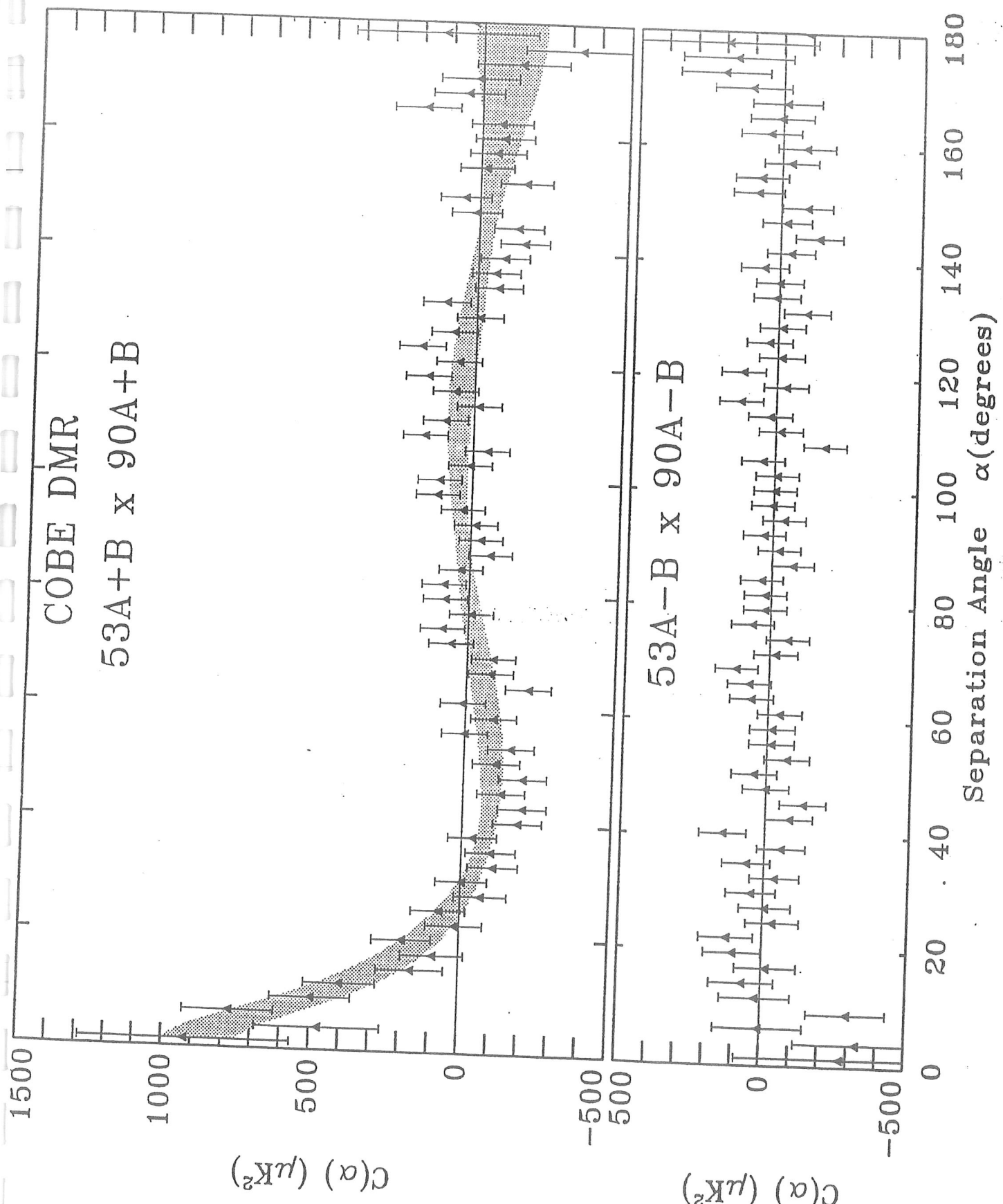


Figure 2. A. *COBE* FIRAS spectrum measurement results. The boxes are the data points and the line the best fit Planckian (2.735 K). The data are from near the north galactic pole. B. Plot of Temperature versus wavelength of recent CMB spectrum measurements.





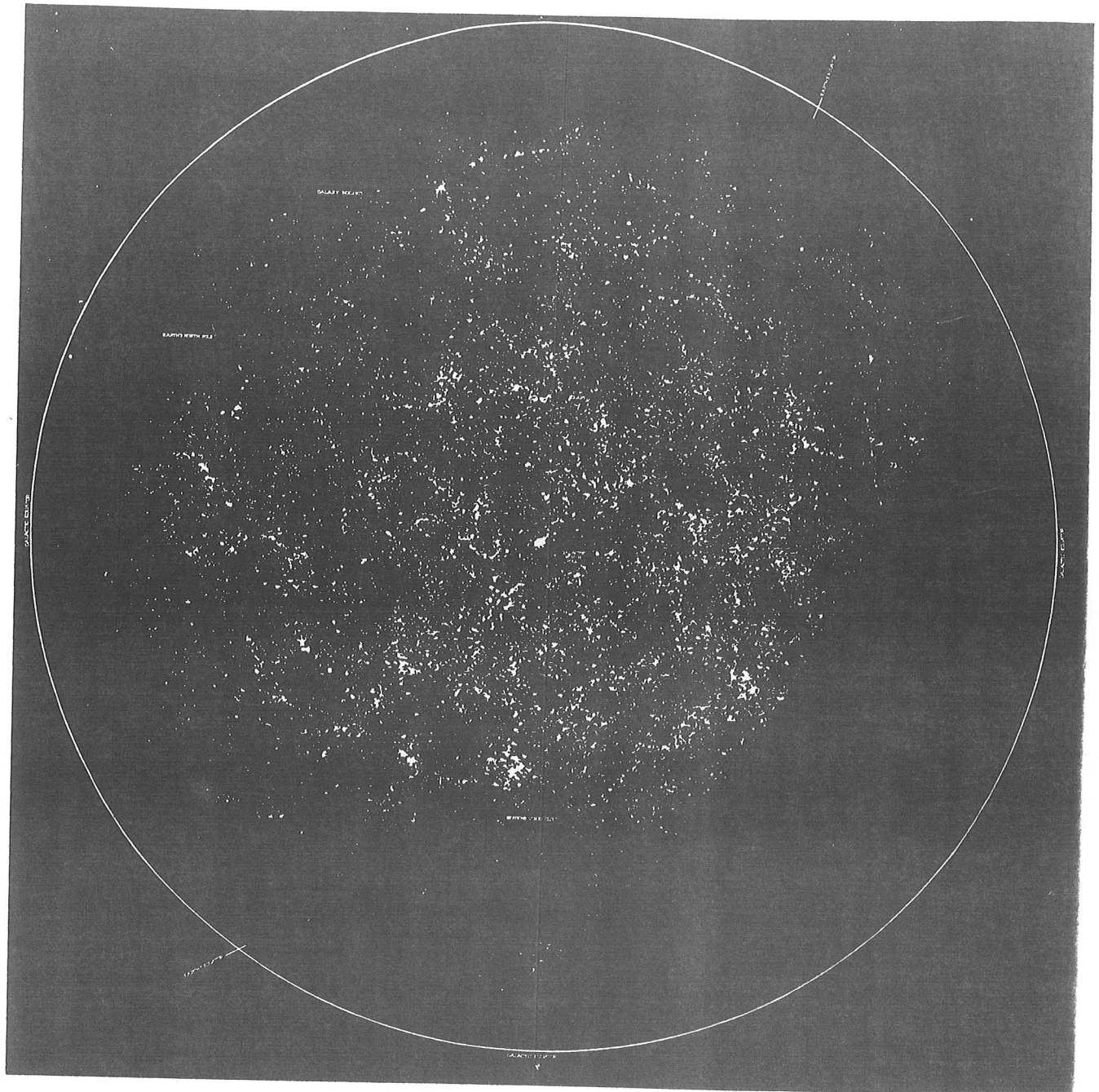
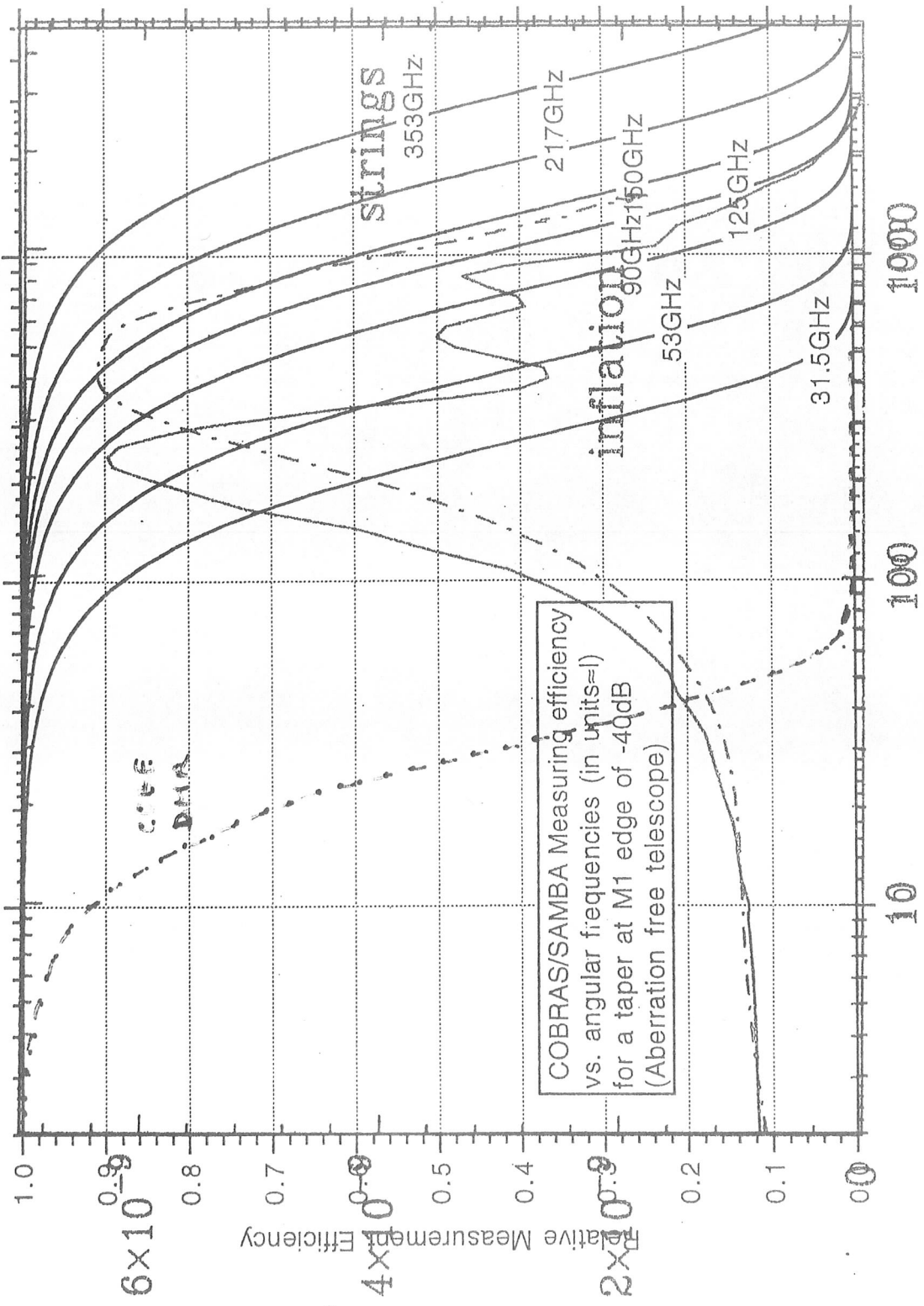


Figure 6.5. La distribution de galaxies dans l'hémisphère Nord galactique déduite des comptages de galaxies effectués par Shane, Wirtanen et leurs collaborateurs de l'observatoire Lick. Ils ont compté plus d'un million de galaxies au cours de leurs pointages. Le pôle Nord galactique est au centre de la figure et l'équateur galactique est situé sur la ligne circulaire entourant l'image des galaxies. La projection est une projection conservant les surfaces. Cette image photographique rassemblant les divers comptages des galaxies a été faite par le Dr P. J. E. Peebles et ses

collègues. La grande partie manquante dans le coin à droite et en bas correspond à une partie de l'hémisphère Sud qui n'a pas été pointée les gens de l'observatoire Lick. L'extinction due à la poussière interstellaire du milieu interstellaire de notre propre galaxie provoque une diminution artificielle de la densité de galaxies près de l'équateur galactique. Le gros amas près du centre de la figure est l'amas de galaxies de Coma. (M. Seldner, B. Siebars, E. J. Groth, P. J. E. Peebles (1977). *Astron. J.* 82, 249.)

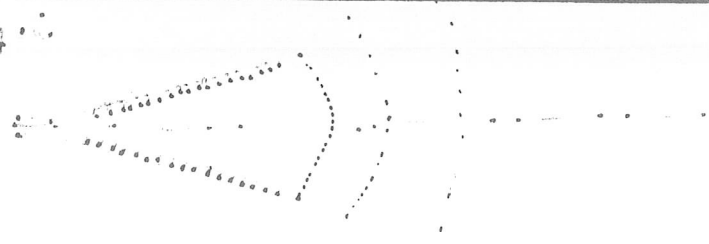


temperature power spectrum

$$l(l+1)C_l^2$$

Angular Wavenumber (periods per great circle)
l (spherical harmonic order)

Const. array



Feed patterns, amplitude

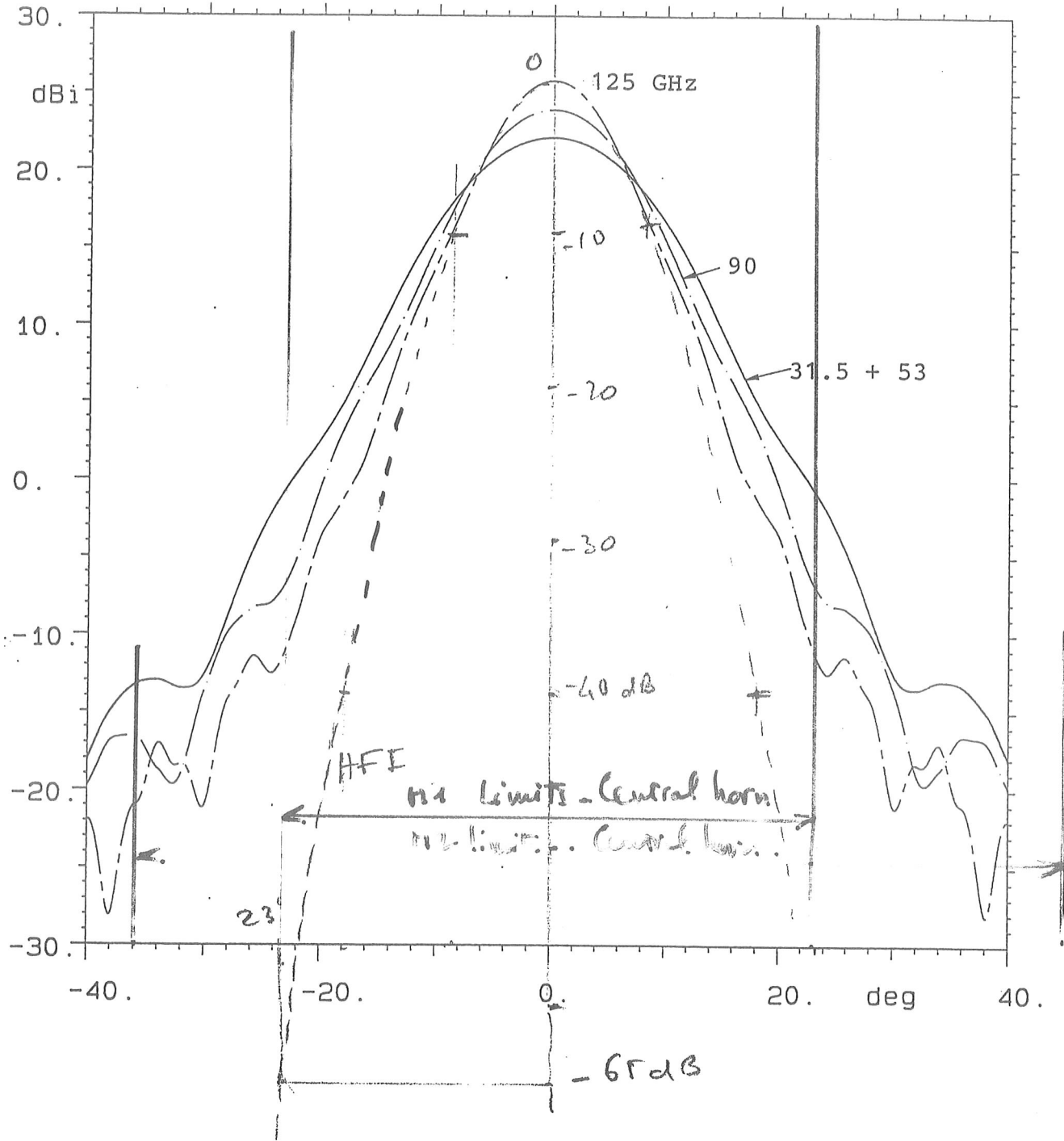


Figure 3.1 LFI feed patterns, amplitude

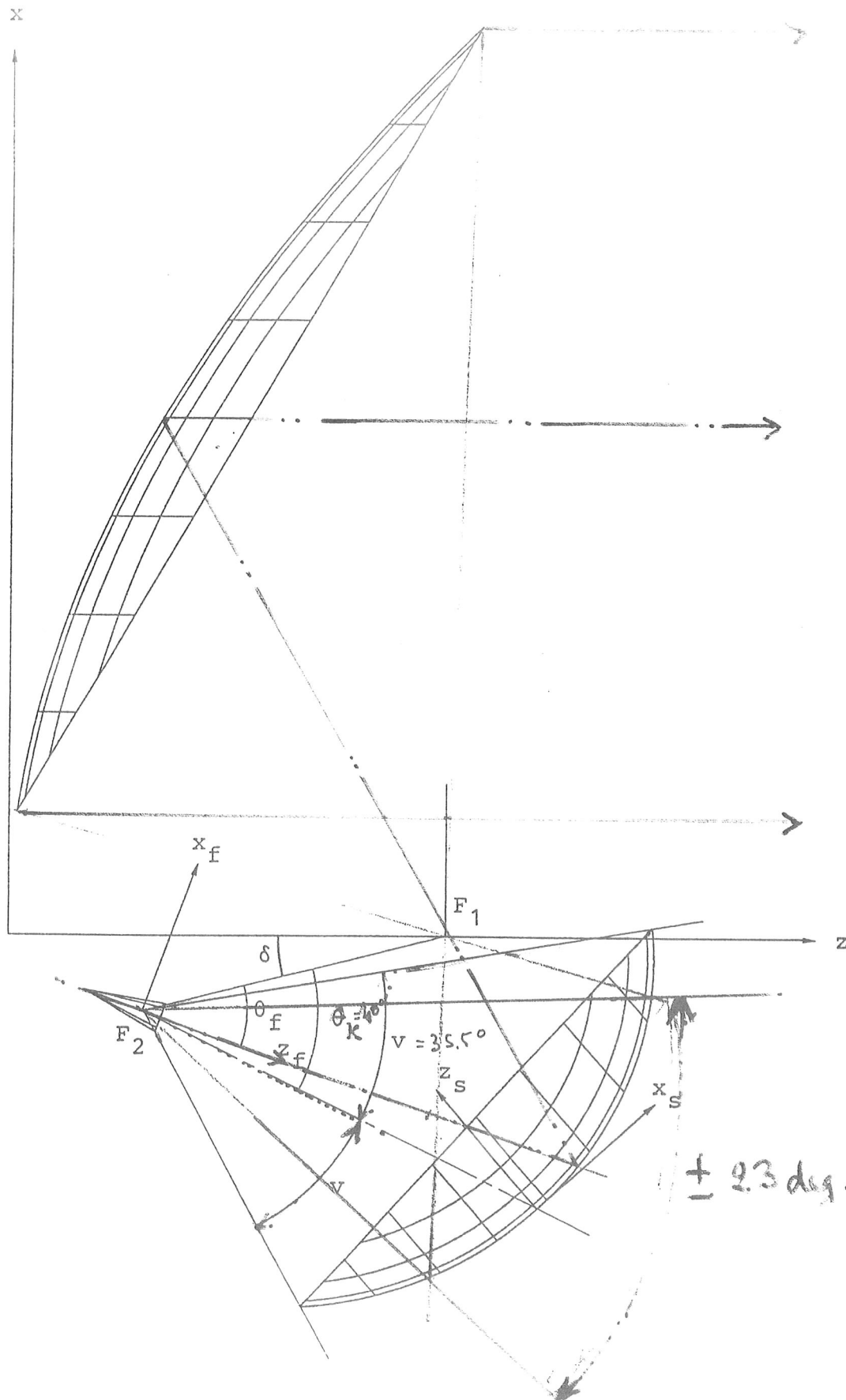


Figure 2.1 The compensated dual reflector antenna geometry

13

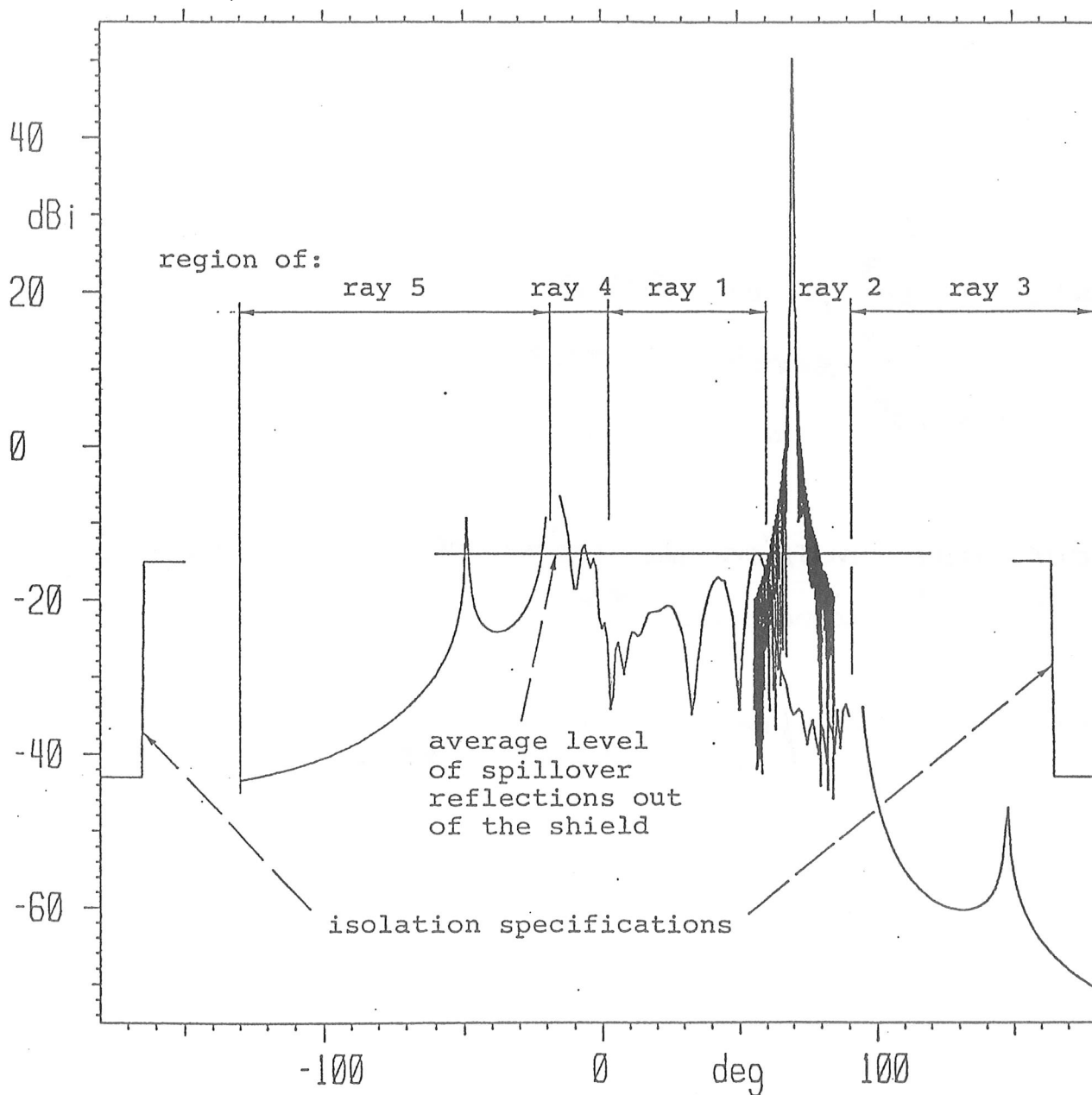


Figure 5.6 Radiation patterns showing the desired main reflector field as well as the direct contribution from the rays identified in Figure 5.5. The figure also shows the average level of -14 dBi of the unpredictable field not hitting the main reflector

Besoins en sensibilité -

(1) - COBE était à peine assez sensible \Rightarrow facteur ~ 10

(2) - Il y a beaucoup plus de pixels à mesurer.

41244 deg² sur le ciel

Soit: 10³ pixels COBE

1.3 10⁶ pixels SAMBA 12[^]

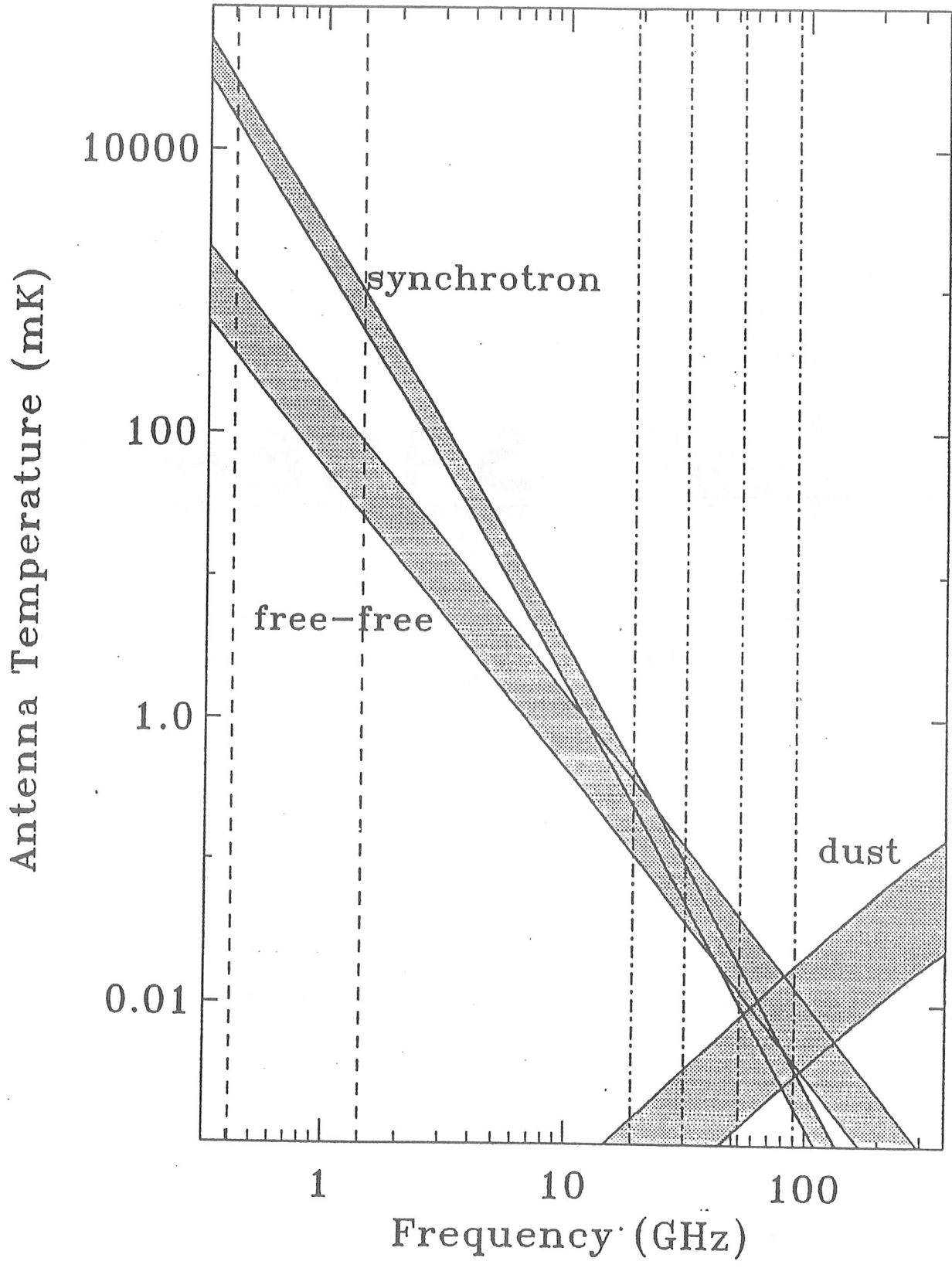
5.2 10⁶ " " 6[^]

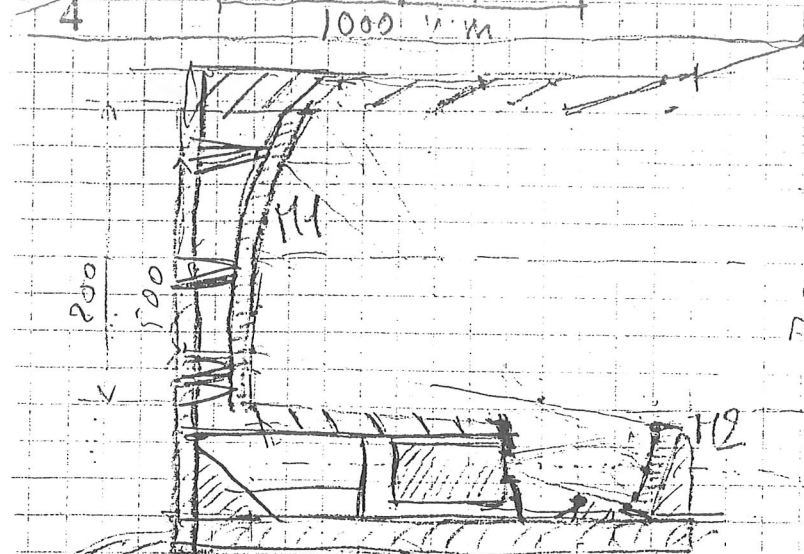
- Pour une mission de même durée (1 à 2 ans)
Il faut la même sensibilité en $\frac{1}{5000}$ de temps.

\Rightarrow Amélioration par un facteur $\frac{1}{\sqrt{5000}} \approx \frac{1}{70}$

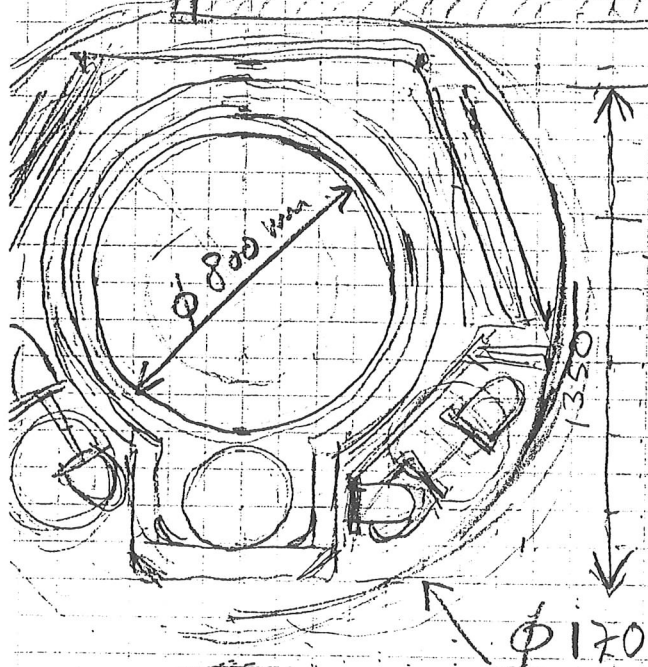
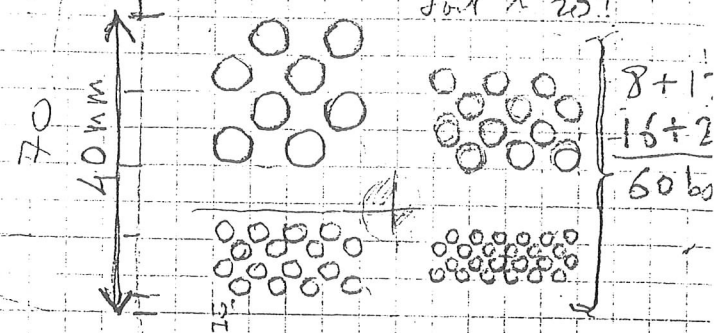
(1) } \Rightarrow Il faut un détecteur 700 fois meilleur
(2) } que COBE - DMR

- Seuls des bolomètres à très basse temp.
ont les NEP voulus: $99 \cdot 10^{-17} \text{ W}\cdot\sqrt{\text{s}}$





Plan focal Primaire
 $\phi_{diff} = 1.2 \times 2.4 \times 1.6$
 $\phi_{diff} = 1.2 \times 2.4 \times 1.6$
 soit ≈ 20



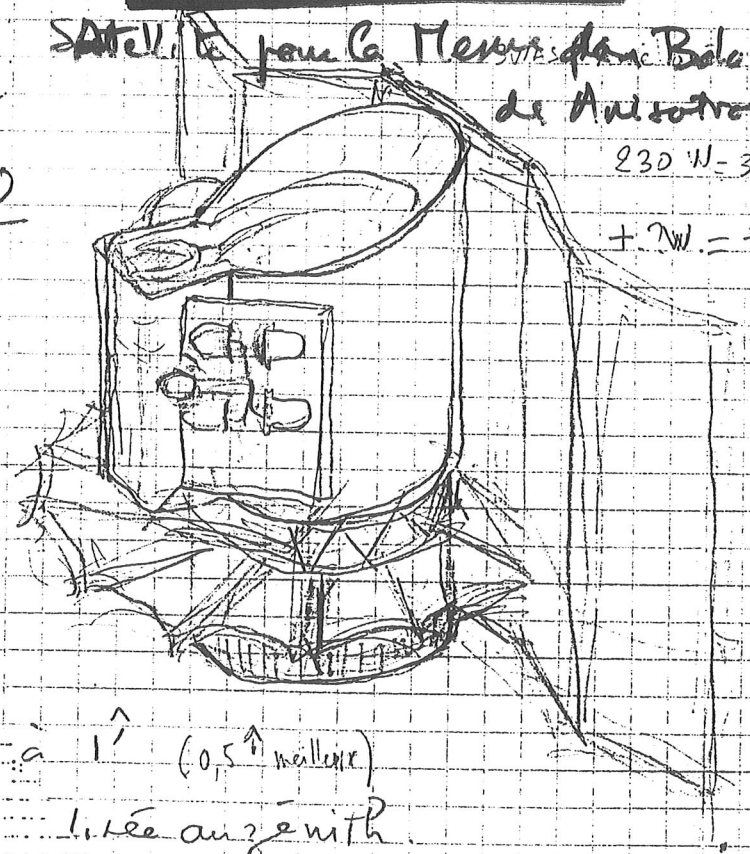
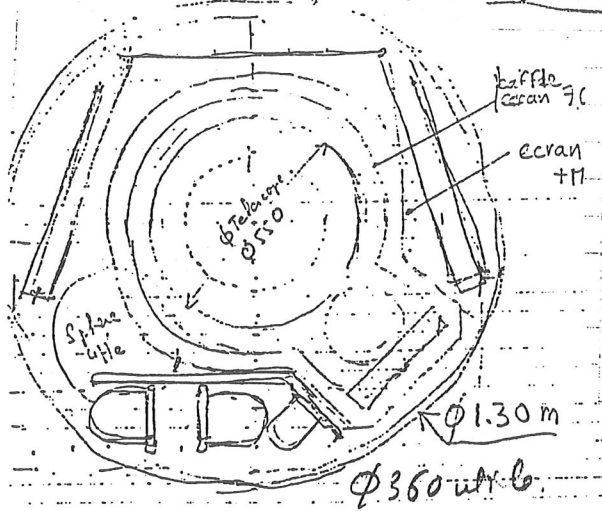
enversion $\phi 800$

JTI laundrette 10 avr 93

SAMBA

SATELITE pour la Messure de la Balançoire de Anisotropie.

230 W = 3.4 m²
 A₄
 + 7W = + m²



à 1' (0,5 m meilleur)
 liée au zénith

Versions $\phi 250$ et $\phi 400$ mm

Si 100 W/m²
 A₄ 150 W/m²

Concept Samba

- Bolomètres à 0.1 K - (0.1K à 0g!)
- Couplage avec le télescope par un cône.
- Plusieurs bandes spectrales - Poussières.
- Filtres interférentiels
 - Effet S-Z
 - Fluctuations CMB
- Balayage lent de tout le ciel
- Système de lecture sans bruit en 1/f.
- Télescope à faible émissivité (Gregory tilté)
- Cryogénie active + rayonnement

COBRAS/SAMBA Mission Summary

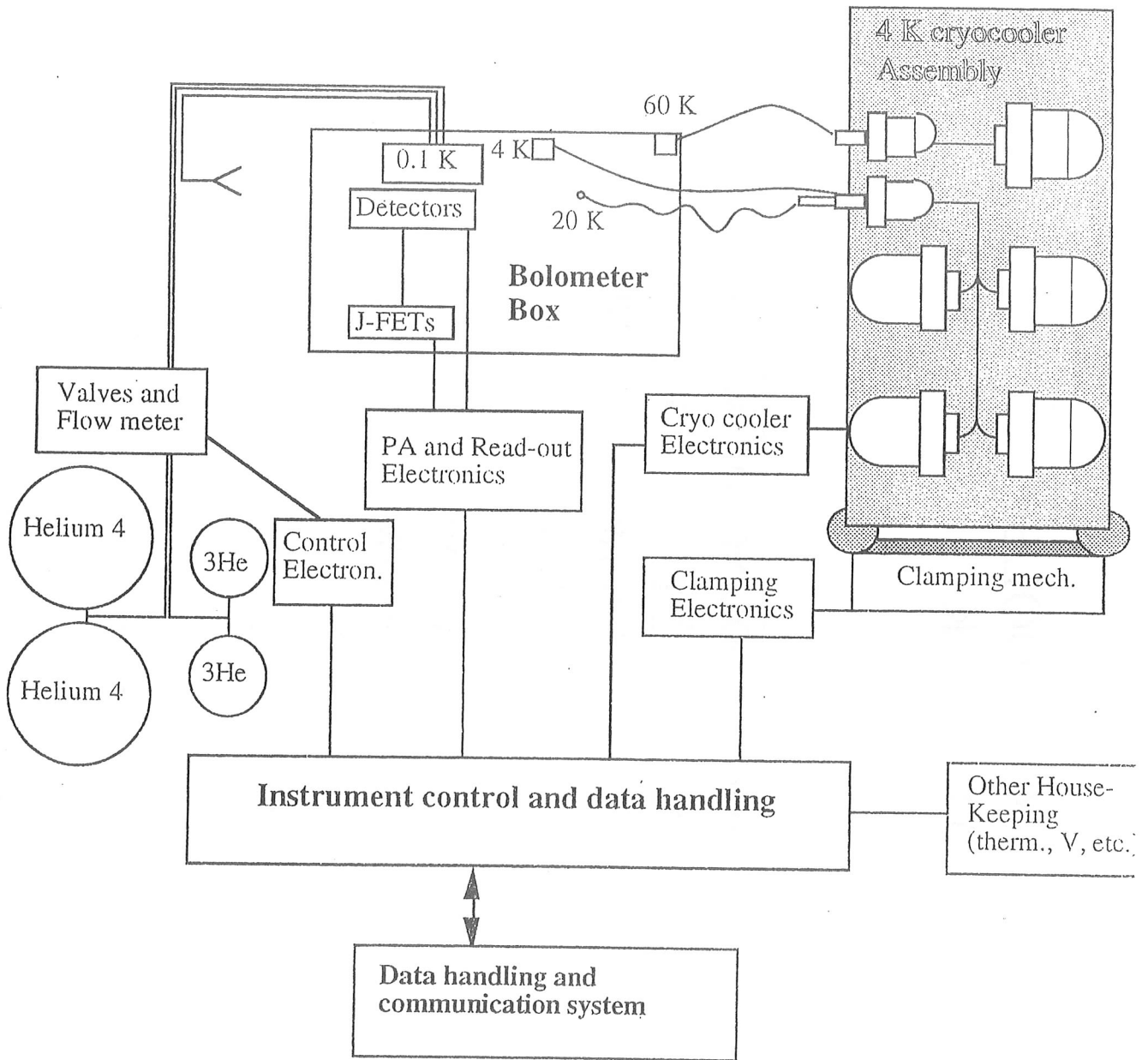
Main Scientific Objective	<p>To image over the whole sky the temperature anisotropies of the cosmic microwave background radiation, with a sensitivity $\frac{\Delta T}{T} \lesssim 2 \times 10^{-6}$ and an angular resolution of ~ 10 arcminutes.</p> <p>To achieve this objective, the whole sky will be mapped in nine frequency channels ranging between 30 and 900 GHz, with a sensitivity and an angular resolution which allow the separation of the cosmological signal from all other sources of confusion.</p>
----------------------------------	--

PAYLOAD									
Telescope	1.5 m Diam. Gregorian; shared focal plane; system emissivity 1% Viewing direction offset 70° from spin axis.								
Center Frequency (GHz)	31.5	53	90	125	143	217	353	545	857
Detector Technology	HEMT radio receiver arrays				Bolometer arrays				
Detector Temperature	~ 100 K				0.1-0.15 K				
Cooling Requirements	Passive				Cryocooler + Dilution system				
Number of Detectors	4	14	26	12	8	12	12	12	12
Angular Resolution (arcmin)	30	18	12	12	10.3	7.1	4.4	4.4	4.4
Optical Transmission	1	1	1	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Bandwidth ($\frac{\Delta \nu}{\nu}$)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
$\frac{\Delta T}{T}$ Sensitivity per res. element (14 months, 1σ , 10^{-6} units)	7.8	7.5	14.4	35.4	1.2	2.0	12.1	76.6	4166

SPACECRAFT	
Launcher	Ariane 5 (Dual- or triple-launch Configuration, SILMA Fairing)
Orbit	Lissajous around Sun-Earth L2 point
Stabilization	Spinner at 1 rpm
Pointing (2σ)	2.5 a posteriori
Lifetime	1.5 yrs baseline, 5 yrs extended
Operations	10-11 hr per day contact; one ground station

Mass & Power Breakdown		
	Mass (kg)	Power (W)
Payload Module	304	413
Service Module	413	196
Fuel	555	
L/V Adapter	92	
Margin	159	84 (10%)
Total	1523 kg	693 W

HFI
Samba boxes and wires



IWG. 20-21/11/96

0.1K-CRYOCOOLER 100 K-0.1 K

IAS/JJF

SAMBA HFI	0.1 K Cryocooler	STAGE T (K)	COOLING POWER	DIAMETER (mm)	HEIGHT (mm)	MASS (Kg)
Dilution	Dilution	0,1 K	100 nW	90	70	0,65
J-T Dilution	J-T Dilution	1,6 K	100 μ W	160	130	1,2
J-T Cryocooler	J-T 4K cooler	4 K	5 mW	180	184	1,04
20 K Stirling stage	20 K Stirling stage	20 K	40 mW	212	244	1,34
60 K Stirling/Envi	Helium loop	60 K	120 mW	244	304	1,74
			suspensions			0,3
				Total		6,27

Environment	Helium loop	100 K		276	364	2,31
				Total		8,58

First Made c 1970s

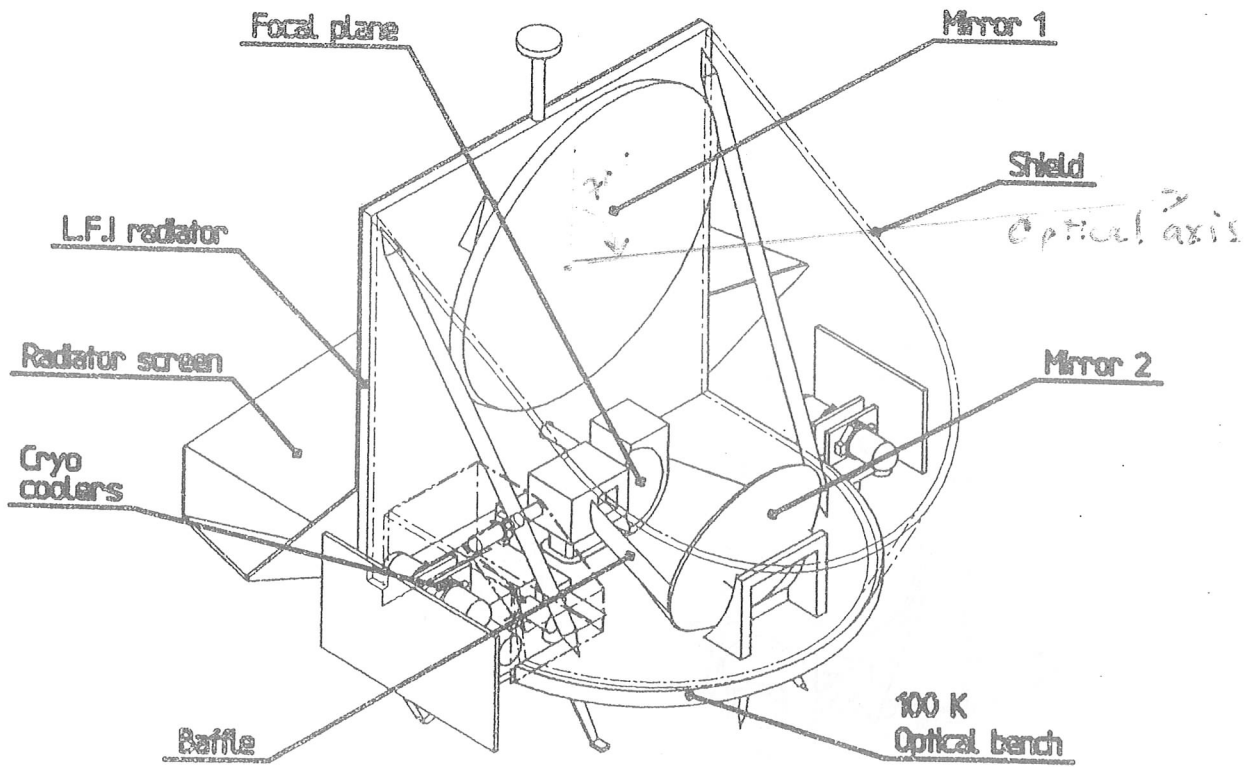
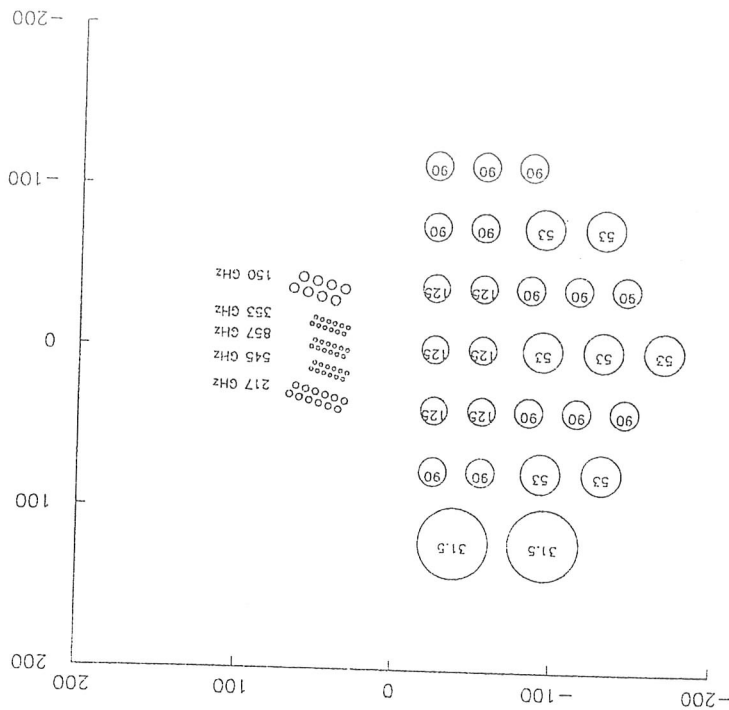


Figure 3.7: (a) A three-dimensional view of the fully assembled payload module.



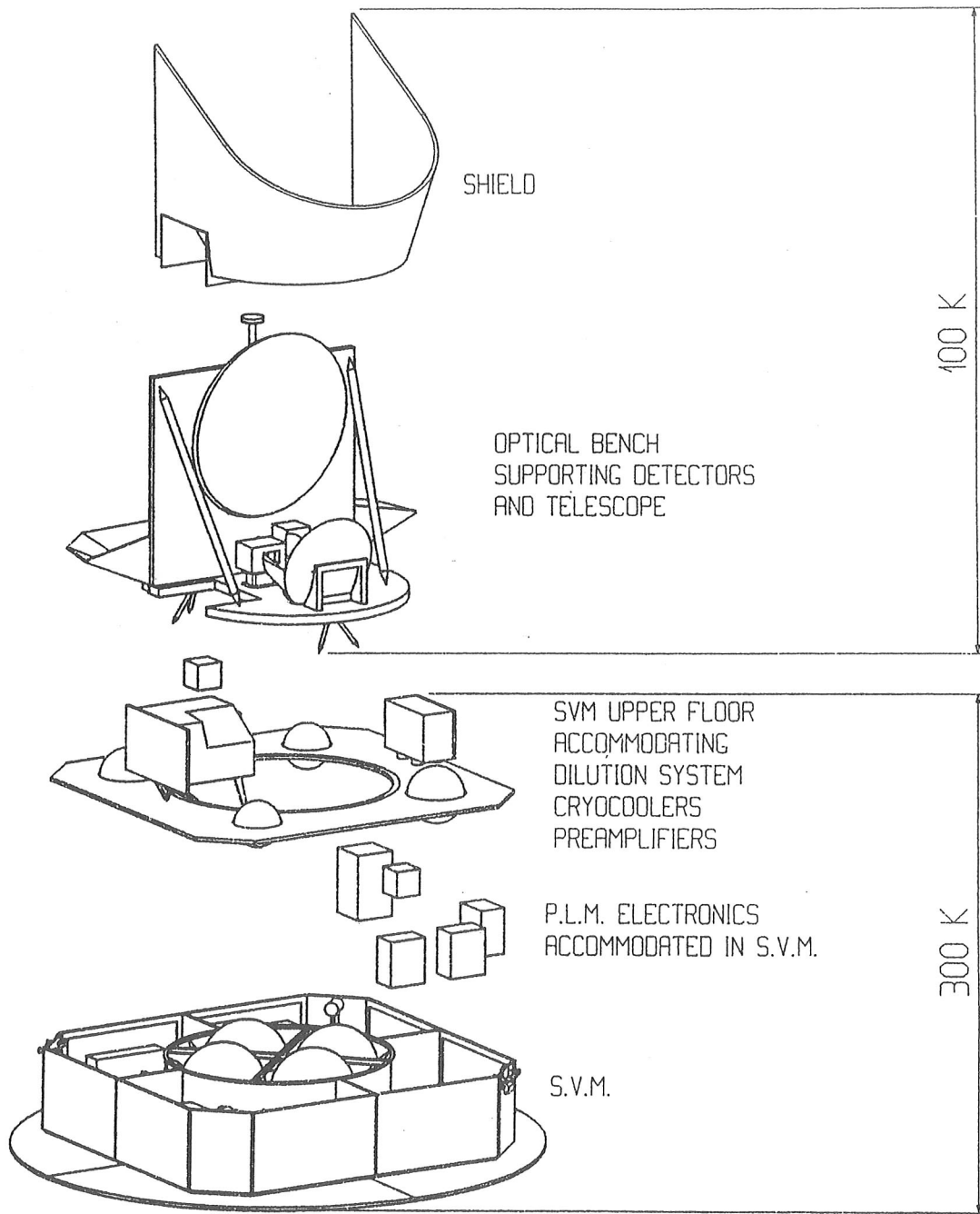


Figure 3.7: (b) A three-dimensional exploded view of the payload module.

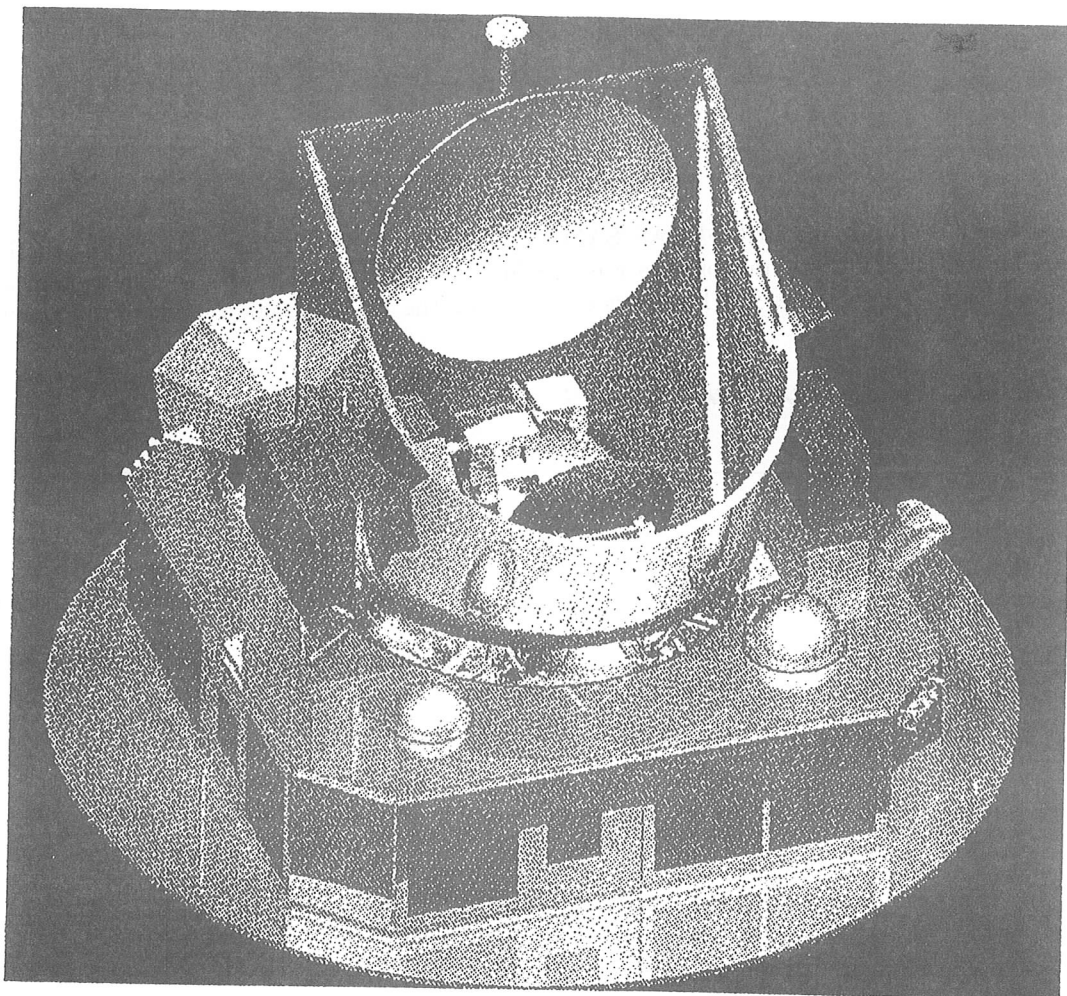


Figure 1.1 The COBRAS/SAMBA telescope on the satellite platform

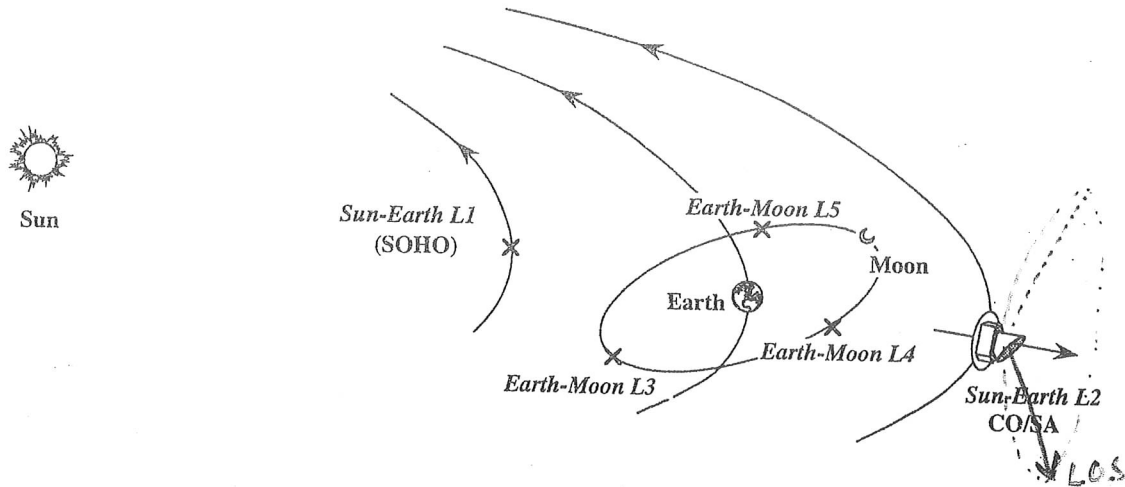


Figure 3.10: Far-Earth orbit options for COBRAS/SAMBA . The L4 and L5 Lagrangian points of the Earth-Moon system are located at ~ 400000 km from the Earth, while the L2 point of the Earth-Sun system is at a distance of $\sim 1.5 \times 10^6$ km. The baseline is a Lissajous orbit around the L2 Lagrangian point of the Earth-Sun system.

Durée des mesures en L2 : ~ 18 mois .

AITOFF PROJECTION OF COBRAS/SAMBA SCAN CIRCLES

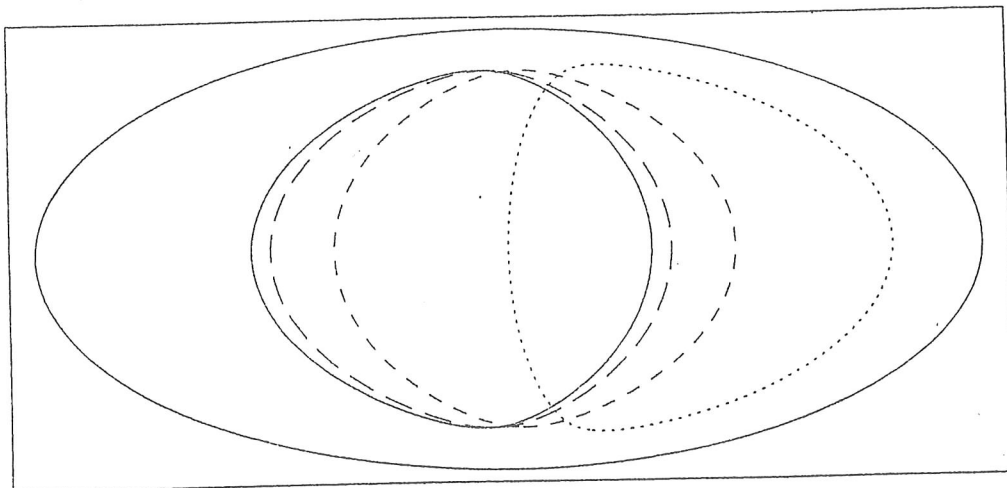


Figure 2.16: Aitoff projection of four COBRAS/SAMBA scans. The second, third and fourth scan from the left are obtained 1 week (long dashes), 1 month (short dashes) and 3 months (dots) respectively after the first.

- Produits scientifiques attendus -

⇒ Dans un délai d'un an après la fin des mesures:

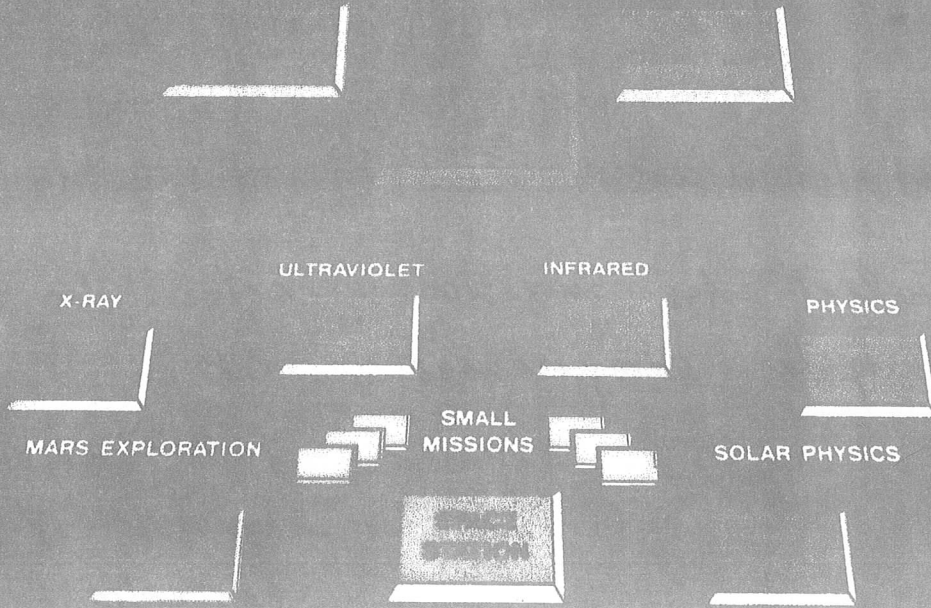
- 9 cartes du ciel (1 par canal) calibrées - nettoyées

⇒ Dans les 2 ans:

- Résultat des inversions: cartes des principales composantes:
 - CMB
 - poussière.
 - Synchrotron / free-free
 - Fon extra galactique
 - Catalogue S-Z
 -

Traitement des données organisé sur un plan européen.

HORIZON 2000 PLUS



HORIZON 2000

Domaine Spectral
 Diamètre du Telescope
 Résolution angulaire
 Résolution spectrale $\lambda/\Delta\lambda$
 Détecteurs

Mission
 Objectif scientifique
 Domaine éventuel de recouvrement:
 Détection de galaxies lointaines

COBRAS/SAMBA

0.2 - 10 mm
 1.3 m
 4.4 - 30 arcmin
 3 - 7
 Bolomètres 0.1K
 HEMT

Relevé du ciel
 Cosmologie

. Couverture totale du ciel
 . limitée par la confusion

FIRST

80 μ m - 800 μ m
 3 m
 8 - 80 arcsec
 4 - 10⁶

Photo-conducteurs
 SIS - hétérodyne
 Bolomètres 0.1K
 Observatoire
 Milieu Interstellaire

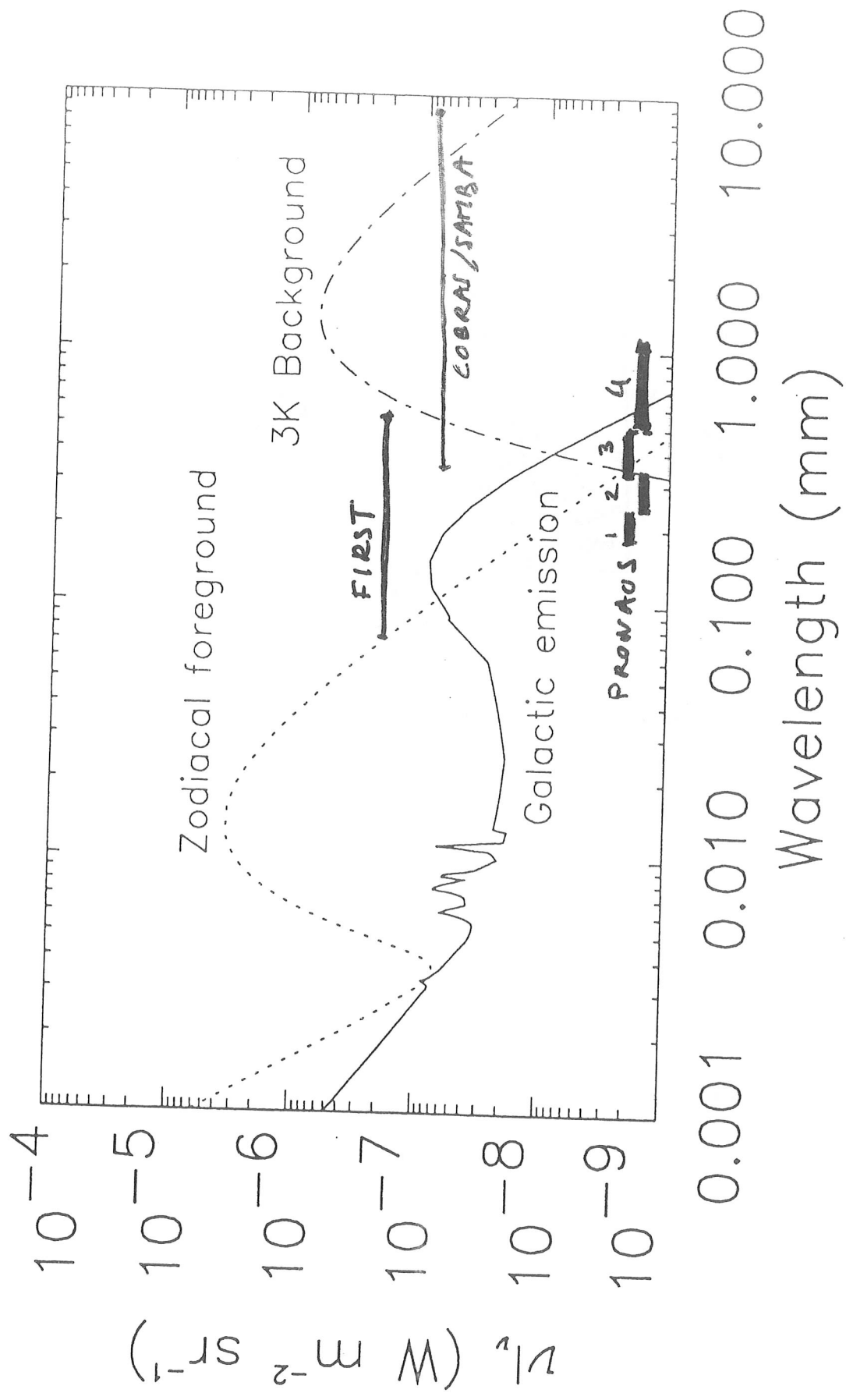
. Couverture partielle
 . mais plus profonde
 . Capacité de spectro.

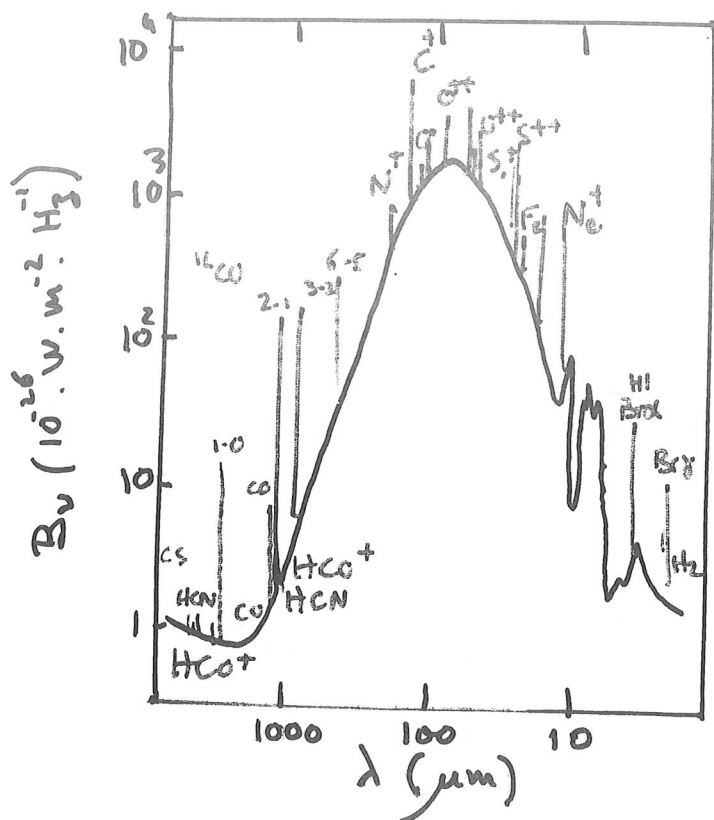


Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA





Emission de M82. (modélisée, simplifiée)

On détecte le milieu interstellaire. (MIS)

{ 99% de gaz. Rain
 1% de poussière. Continuum.

Le MIS est une phase clé dans le recyclage de la matière :

- Produit (entre autres) des super novae
- Lieu de formation de nouvelles étoiles.

On doit pouvoir y lire l'évolution des galaxies.

Spectroscopie

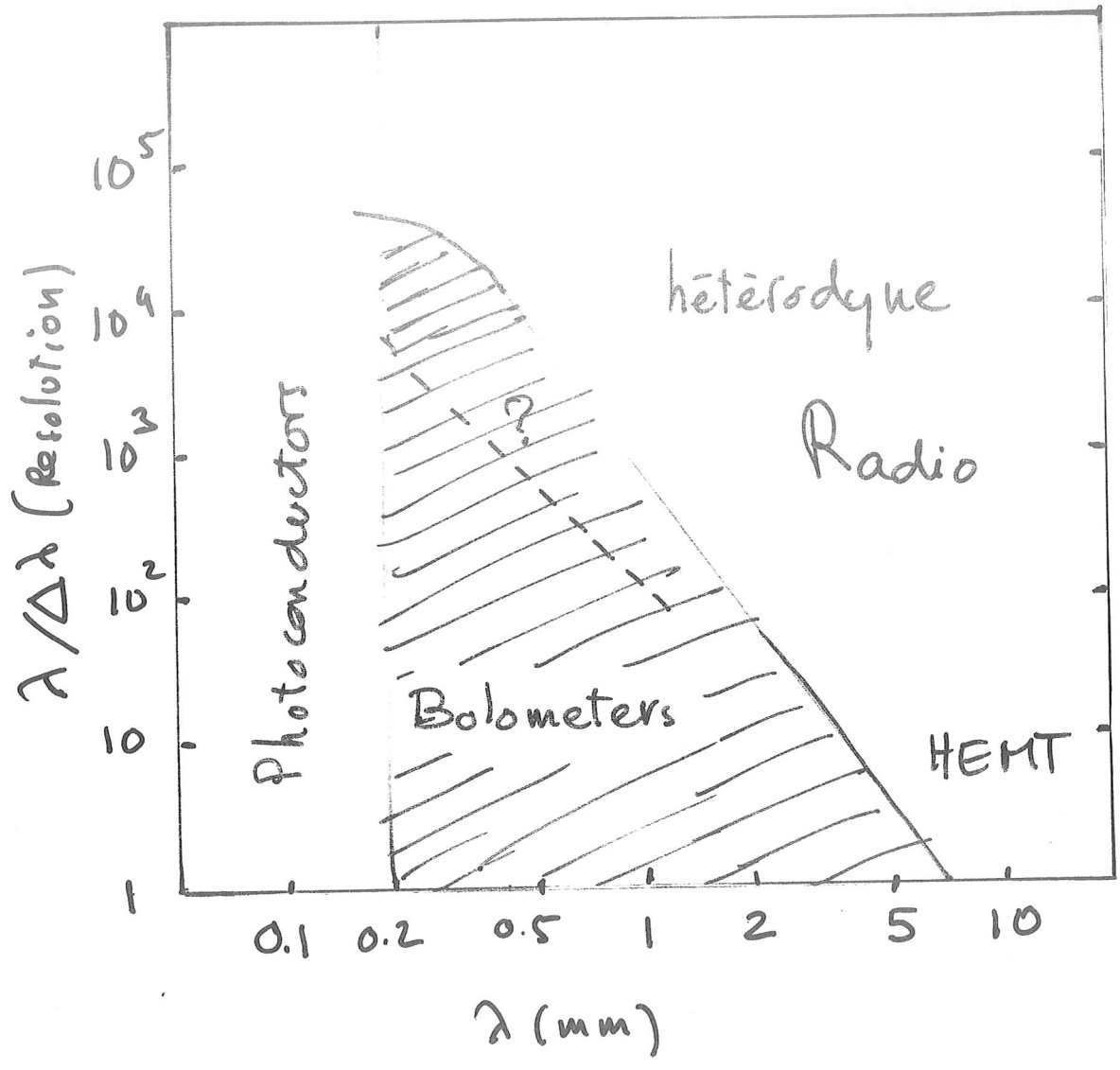
Donne accès au gaz.

- Composition chimique.
- Conditions physiques (ionisation)
- Vitese / morphologie : effet Doppler / cartes.
- Informations riches sur phénomènes complexes.

Photométrie.

Donne accès à la poussière

- Traceur de la masse et de la température
- Indicateur d'opacité rôle vital de la dynamique
- Relations gaz / poussière.
- Sensibilité pour la détection (sources faibles)



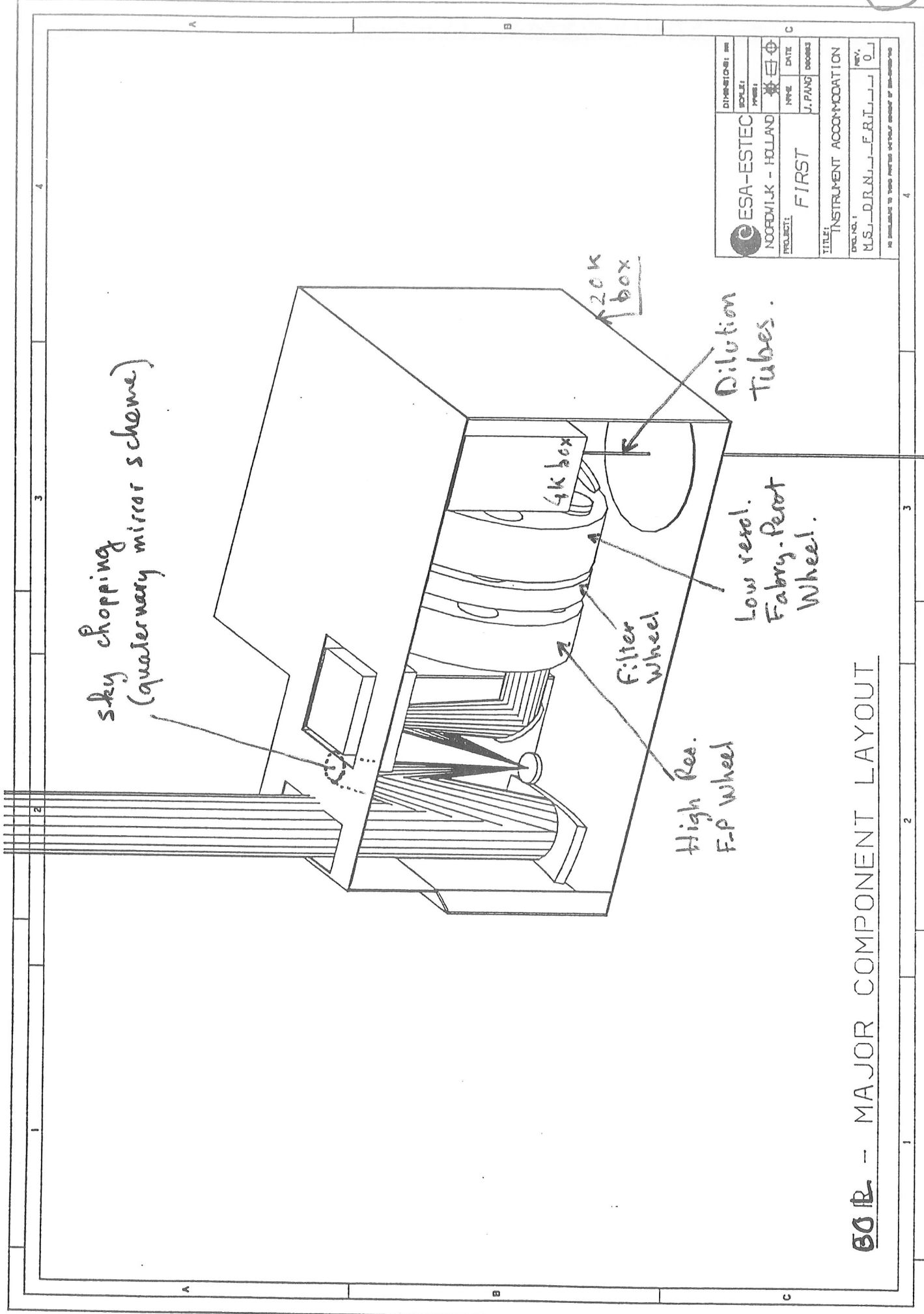
3 Instruments Focaux.

(32.6i)

PHOC. Photocconducteurs. $\lambda = 80 - 200 \mu\text{m}$.
 $\lambda/\Delta\lambda = R = 3 - 3 \cdot 10^4$. (Fabry - Perot)
Matrice 16×16

BOL Bolomètres. $\lambda = 200 \mu\text{m}$.
 $R = 3 - 3 \cdot 10^3$ (F.P.)
Matrices 64? et 8? bolomètres.

HET . Mélangeurs SIS - 6 bandes : $270 \mu\text{m}$
Détection hétérodyne. \dots
 $612 \mu\text{m}$.



DIMENSIONS: mm		DATE		DESIGNER	
SCALE		TYPE		PROJECT	
PROJECT: ESA-ESTEC		DATE		PROJECT: FIRST	
NOORDWIJK - HOLLAND		DATE		PROJECT: INSTRUMENT ACCOMMODATION	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	
PROJECT: FIRST		DATE		PROJECT: MIS-DOR-NUN-ER-LIJ	

60 B - MAJOR COMPONENT LAYOUT

λ (μm)	R	Telescope efficiency	η_{pixel}	BLIP NEP ^(a) ($\text{W Hz}^{-1/2}$)	Det. NEP ^(b) ($\text{W Hz}^{-1/2}$)	Coupling ^(c) correction	System NEP ($\text{W Hz}^{-1/2}$)
250	3×10^3	0.7	1	4.2×10^{-18}	2×10^{-17}	32	6.4×10^{-16}
210 - 280	3	0.7	1	2.4×10^{-16}	2×10^{-17}	11	2.6×10^{-15}
280 - 380	3	0.7	1	1.4×10^{-16}	2×10^{-17}	11	1.5×10^{-15}
380 - 600	3	0.7	1	1.8×10^{-16}	2×10^{-17}	11	2.0×10^{-15}
600 - 900	3	0.7	1	7.5×10^{-17}	2×10^{-17}	11	0.8×10^{-15}

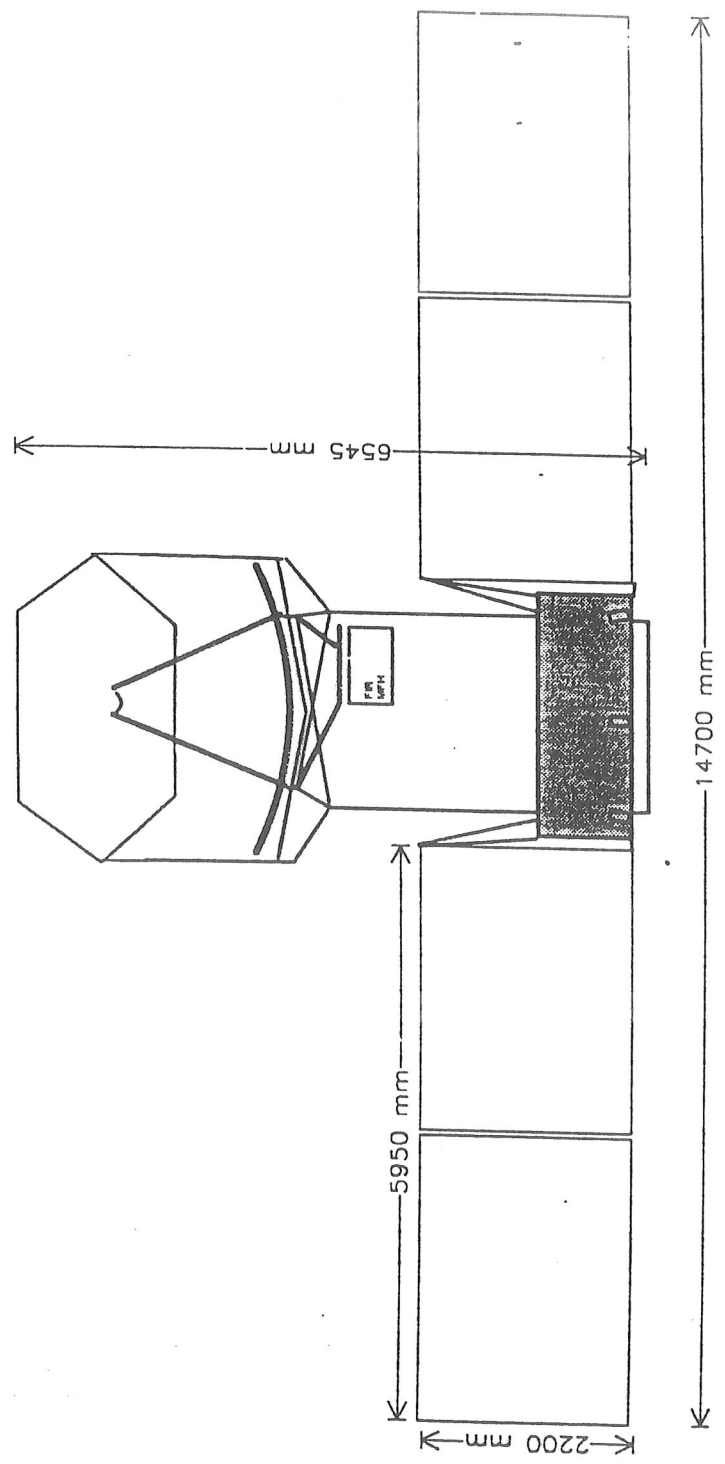
Table 26: Sensitivity of the BOL in different modes of operation

(a) The BLIP NEP is defined as the optical power incident onto the detector that produces a signal equal to the r.m.s. noise measured under the quoted background conditions. The quantum efficiency is taken into account, but otherwise the detector is assumed to be noise free. The following assumptions have been made to calculate the BLIP NEP: The telescope has an emissivity of 4% at a temperature of 150 K; the emissivity of the 65 K optics is 1% and that of the 23 K optics is 10%. The transmission of the cold optics, τ_{cold} , was assumed to be 10% for spectroscopy and 30% for photometry, respectively. The detector quantum efficiency was assumed to be 80%.

(b) The detector NEP is defined as the optical power equivalent to the intrinsic noise of the combination of detector and readout electronics under dark condition.

(c) The coupling factor is defined as $(\tau_{\text{cold}} \times \eta_{\text{chop}} \times \eta_{\text{tel}} \times \eta_{\text{pixel}}^{1/2})^{-1}$ where τ_{cold} is the transmission of the instrument as quoted above, η_{chop} is the chopping efficiency (0.45), and η_{tel} is the telescope efficiency as listed in the table. The system NEP is obtained by multiplying the dominant NEP (either background or detector) with the coupling factor.

FIRST SPACECRAFT CONFIGURATION

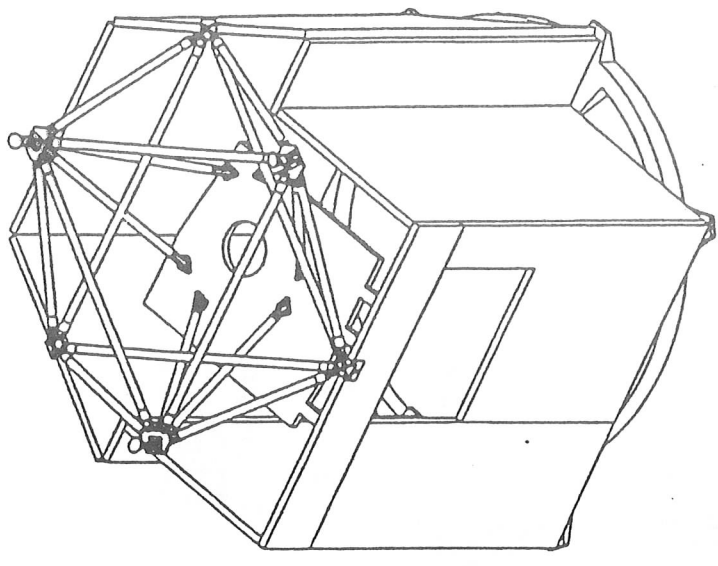
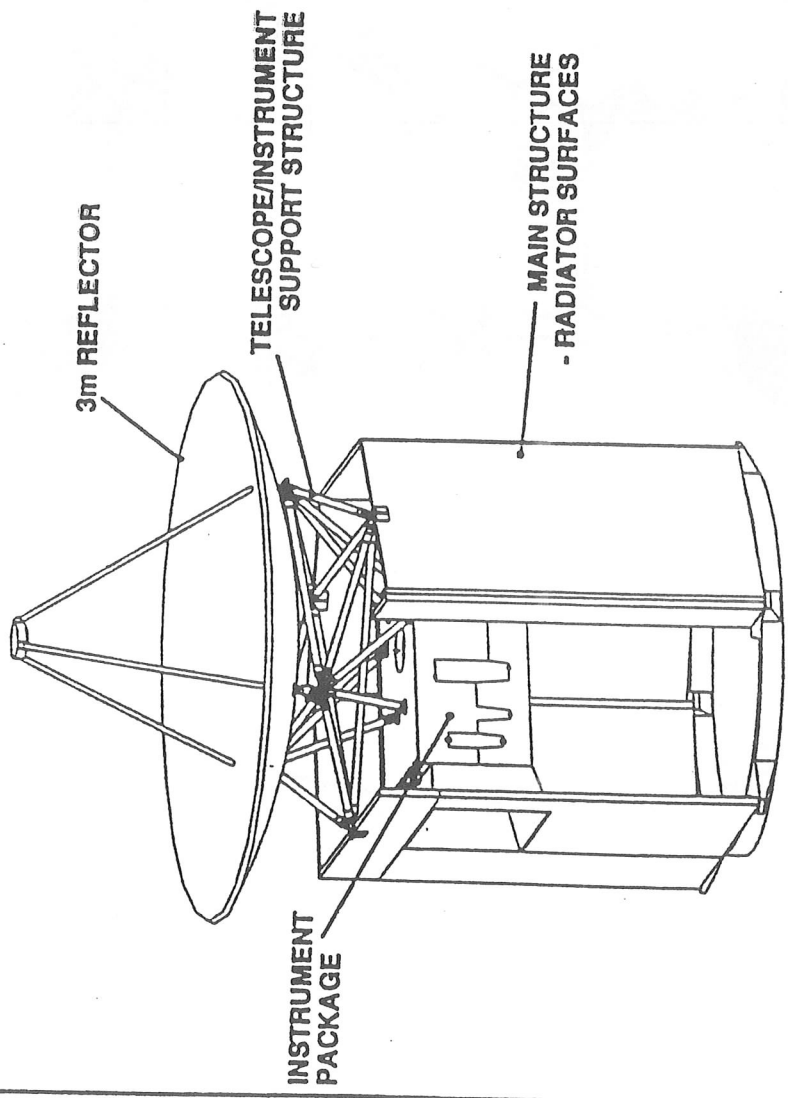


esa
estec

FUTURE SCIENCE PROJECTS
SCIENTIFIC PROJECTS DEPARTMENT

FIRST
24 June 1993

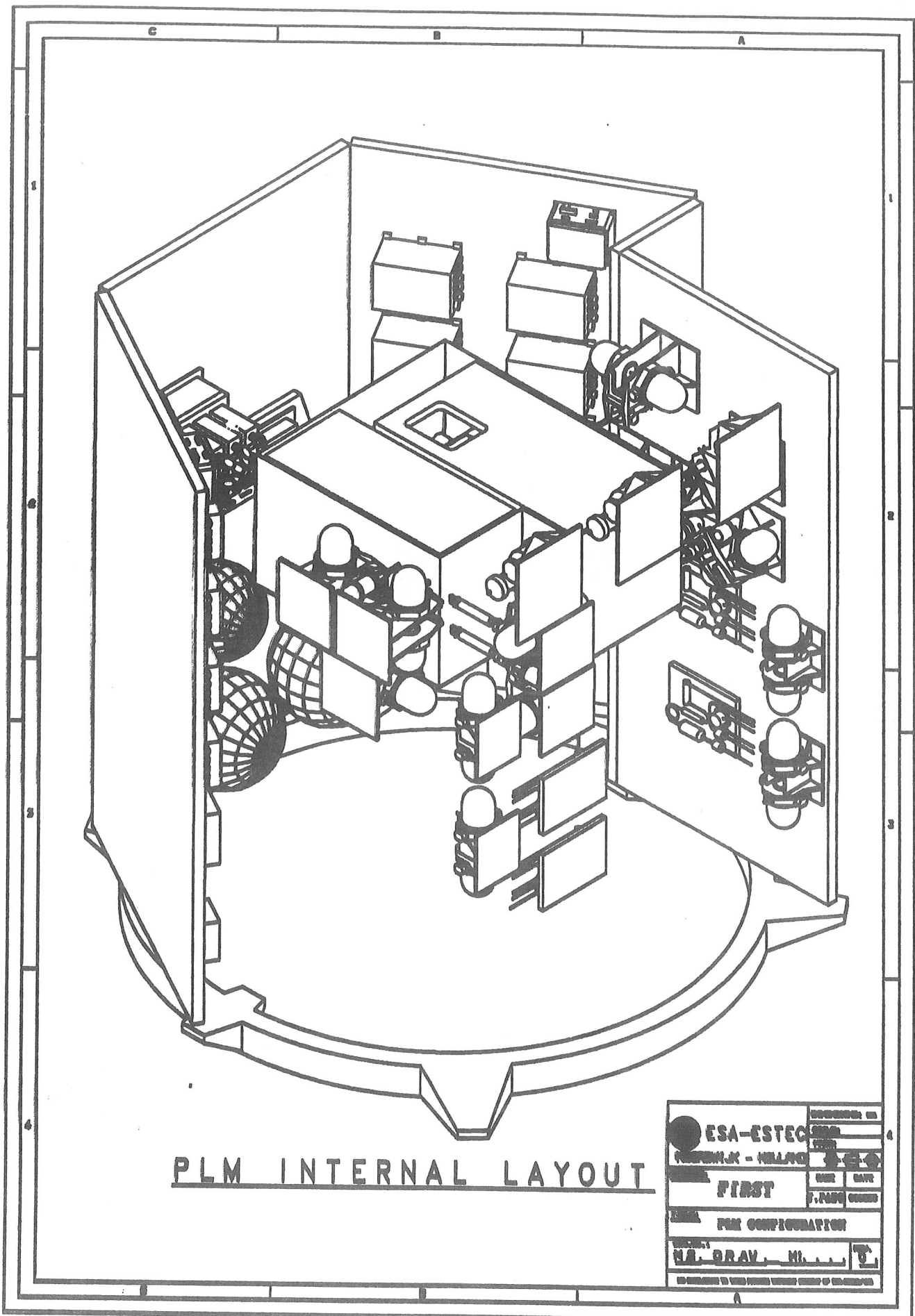
FIRST PAYLOAD MODULE CONFIGURATION



esa
estec

FUTURE SCIENCE PROJECTS
SCIENTIFIC PROJECTS DEPARTMENT

FIRST
2 June 1993



PLM INTERNAL LAYOUT

ESA-ESTEC ESTABLISHED IN 1972 FOUNDED BY - NEDERLAND	NUMBER 11 11/11
	DATE 11/11
FIRST	DATE 11/11
FOR CONFIGURATION	DATE 11/11
DR. GRAY, HI	DATE 11/11
TO BE USED TO THE POINT WHERE THE STATE OF THE ART IS REACHED	

MASS : 2500 kg.

POWER : 1880 W

PROPULSION: Monopropellant (500kg)

TELEMETRY 30 kbps

ATTITUDE MEASUREMENT and CONTROL SYSTEM :

- ISO type Star Tracker
- Fine sun sensor + gyros
- Reaction wheels

10 Absolute Pointing Error: $3''$

ORBIT: 24 hours elliptical

LIFETIME: 2 years For components
6 years For consumables

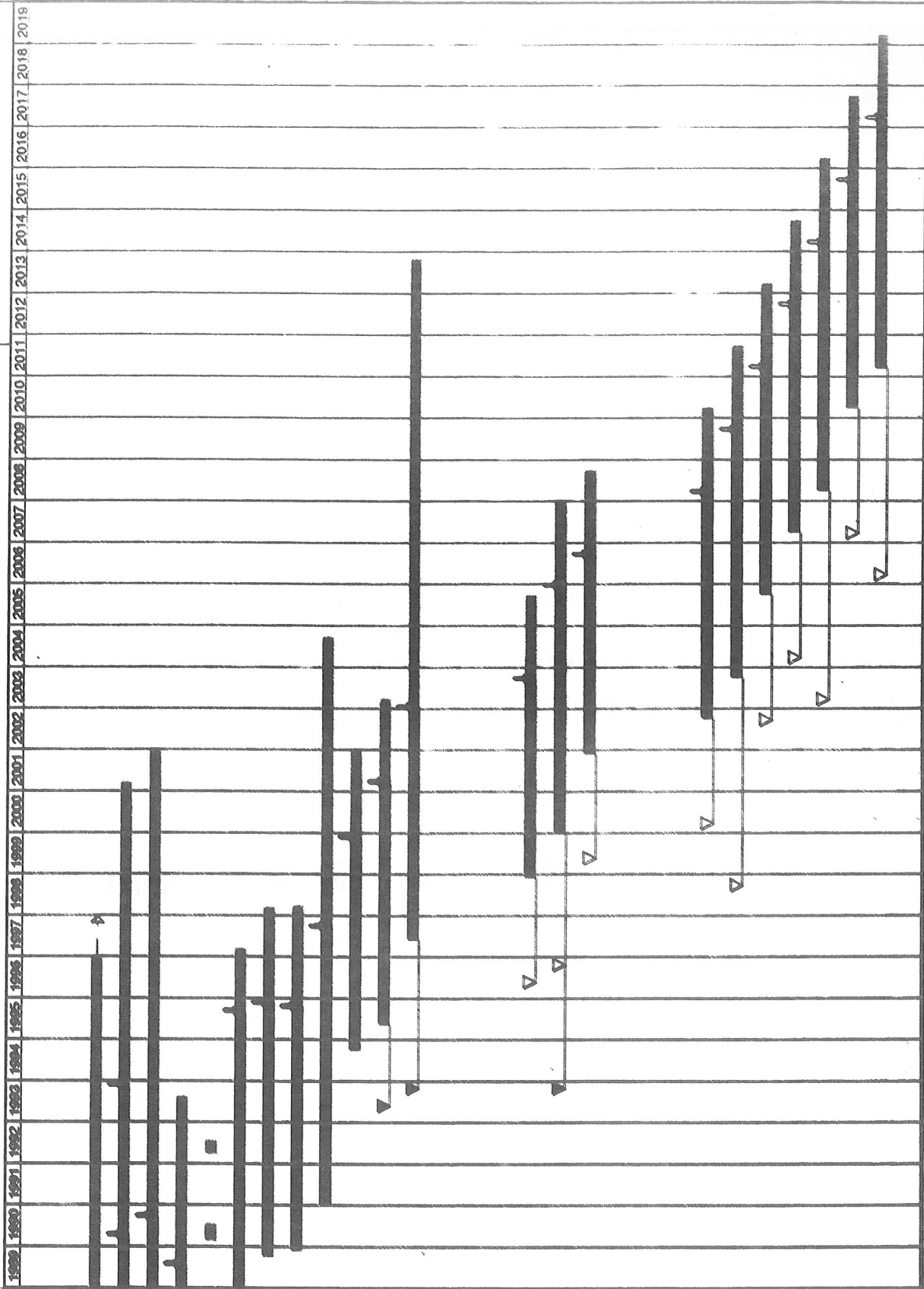
LAUNCH: 2003 or 2005



SCIENTIFIC PROGRAMME - LONG TERM PLAN

HORIZON 2000 & HORIZON 2000 PLUS

Master plan
Schedule by



H2000 Approved Projects

- L.U.E.
- HUBBLE SPACE PROJECT
- ULYSSES
- HIPPARCOS
- GIOTTO Ext. Mission
- I.S.O.
- CLUSTER
- SONO
- HUYGENS (CASSINI)
- XMM
- INTEGRAL
- ROSETTA

H2000 Planned Projects

- MEDIUM - 3
- FIRST
- MEDIUM - 4

H2000 PLUS Potential Projects

- MEDIUM - 5
- CORNERSTONE - 5
- MEDIUM - 6
- MEDIUM - 7
- CORNERSTONE - 6
- MEDIUM - 8
- CORNERSTONE - 7

Milestones:

- Planned
- Completed
- Launched

Activities:

- Phase B & CD (Preferential Phase)



