

DRTBT09 : 6^{ème} Ecole Thématique
Perspectives des Détecteurs Cryogéniques

Matrices de bolomètres pour l'astrophysique millimétrique

Ph. Camus

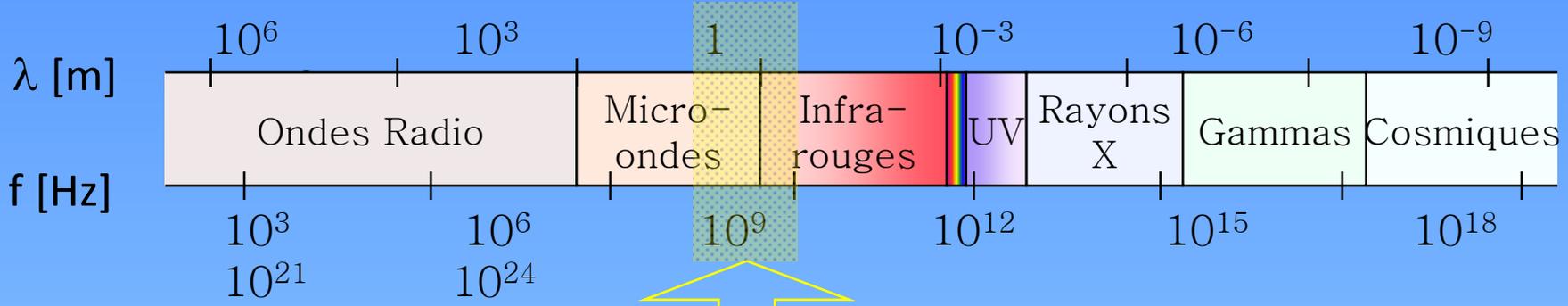
Le 12 mai 2009

Plan

- Motivations
- Propriétés élémentaires de OEM
- Structures classiques
- Imagerie avec des antennes planaires
- Prospectives

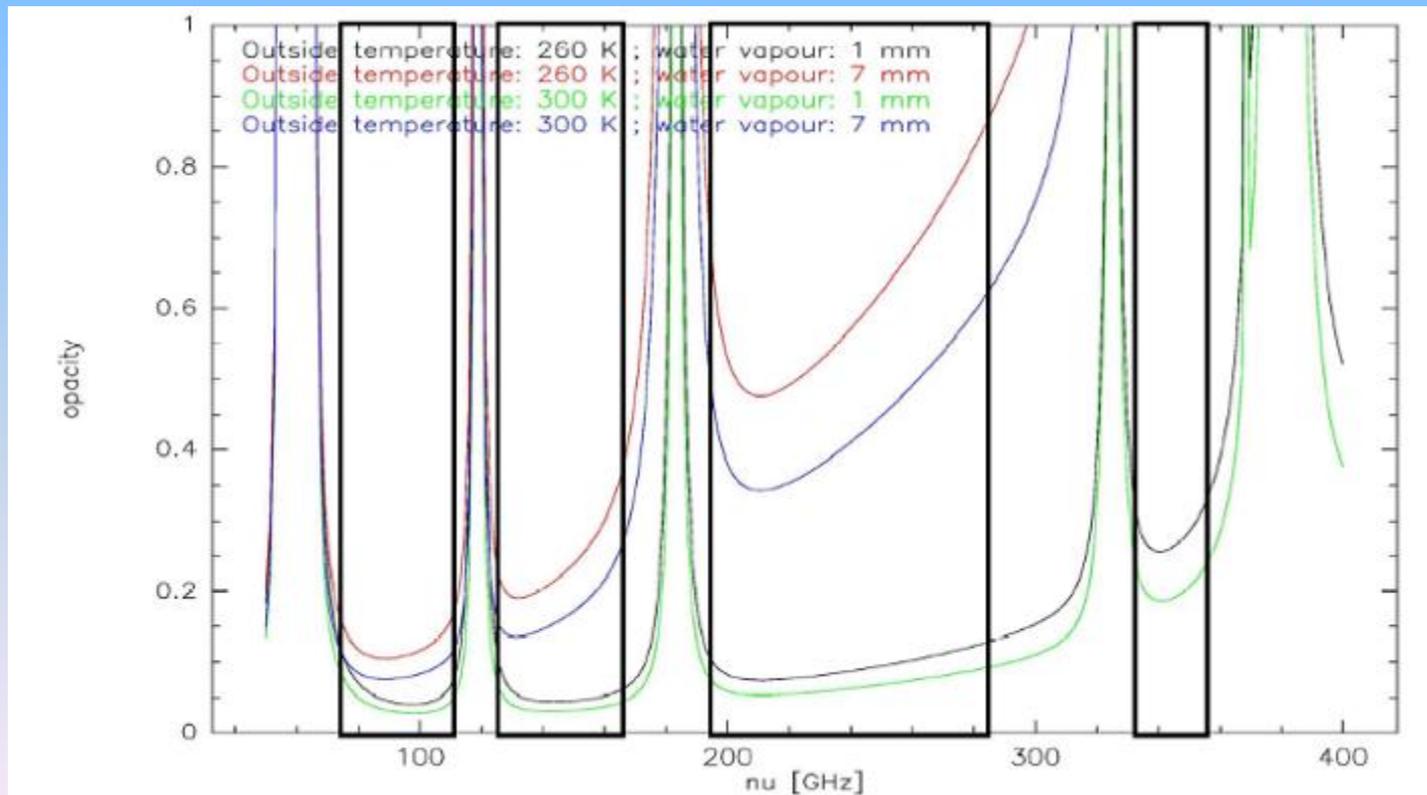
Motivations

- Sensibilité instrumentale
 - Détection de sources ponctuelles
 - Vitesse de cartographie
- Meilleure utilisation du plan focal



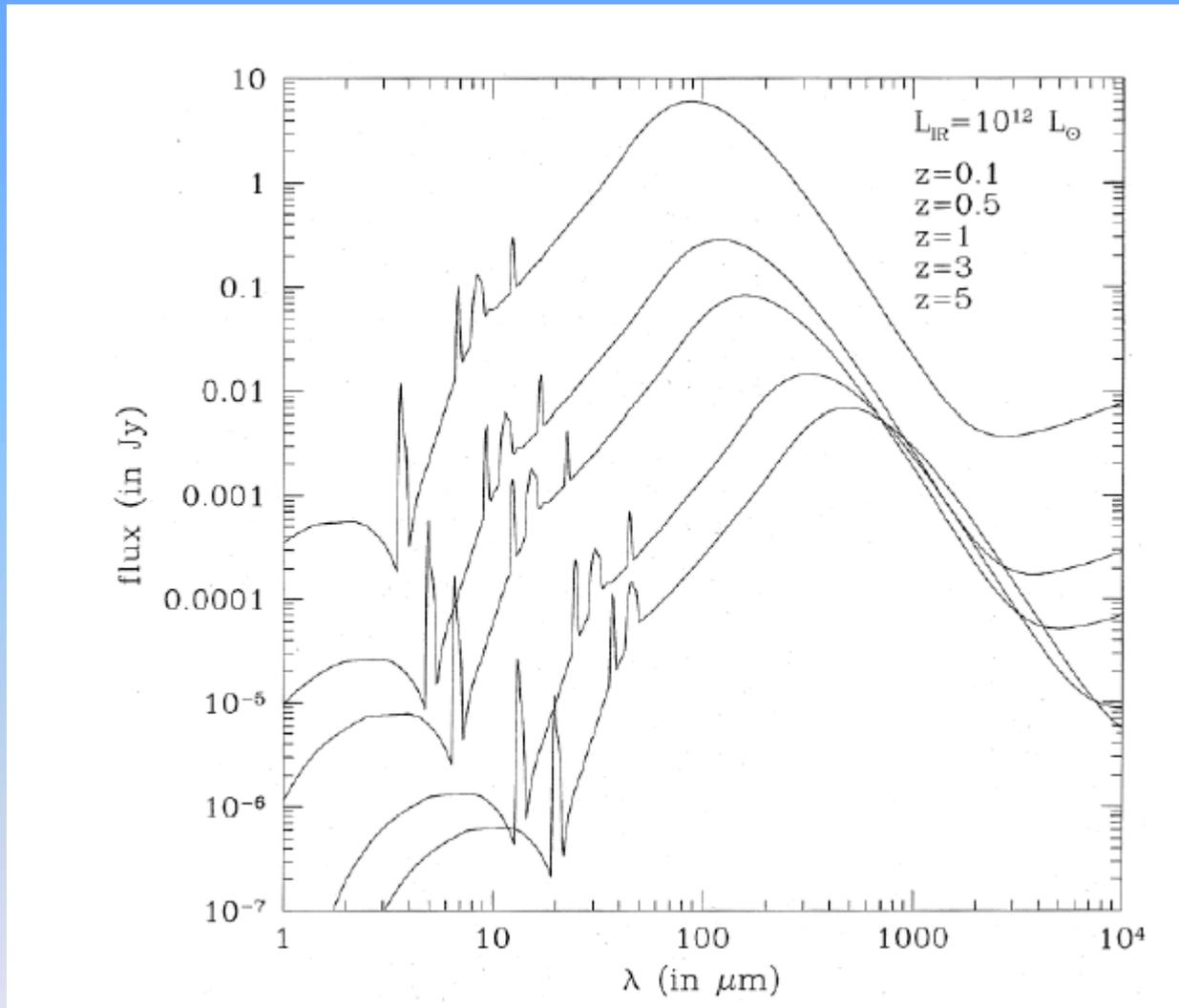
Rayonnement fossile

- *Corps noir @ 3K*
- B_{max} @ 160 GHz



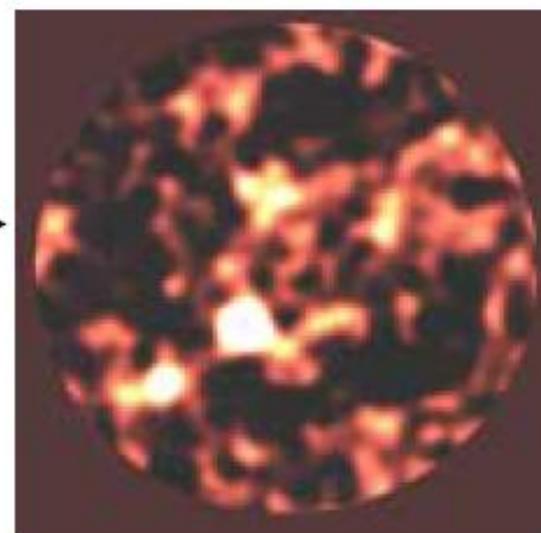
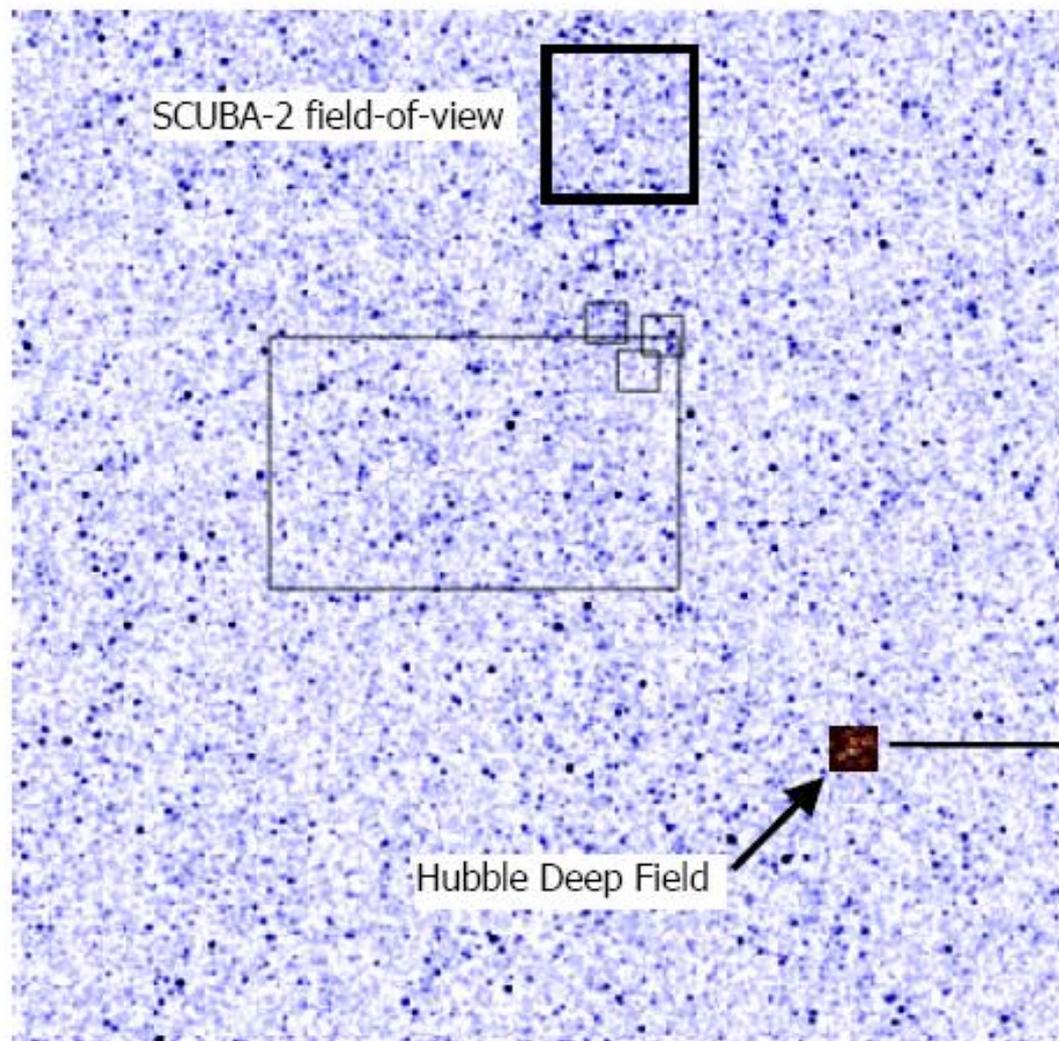
94±18 146±20 240±45 345±12 GHz

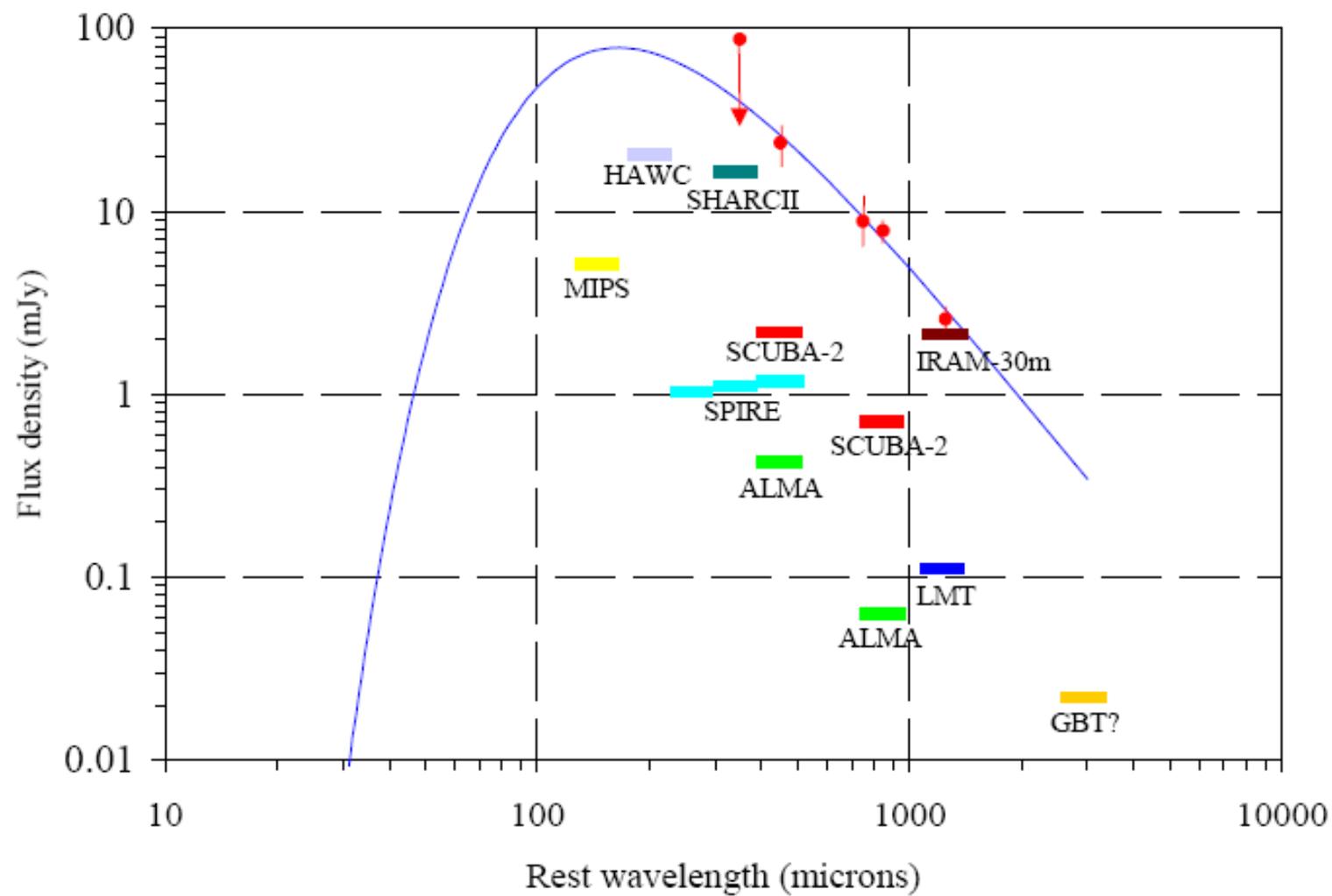
Formation d'étoiles dans les galaxies



[Guiderdoni, 98]

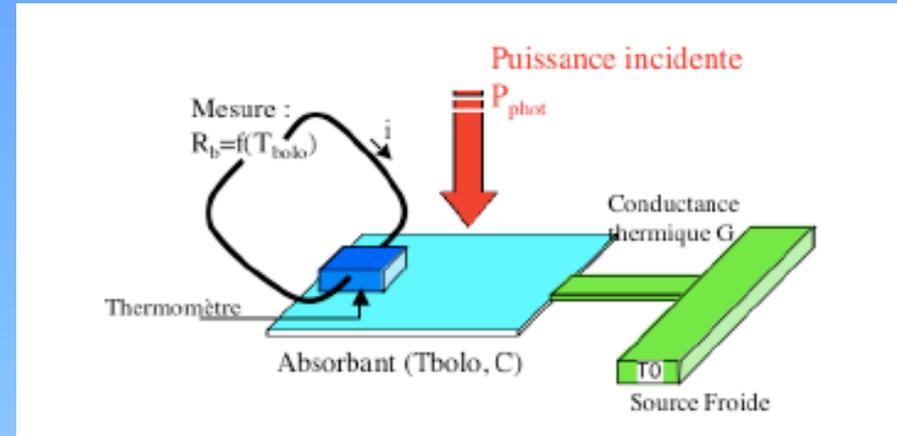
Décalage vers le rouge des galaxies





• Détecteur thermique

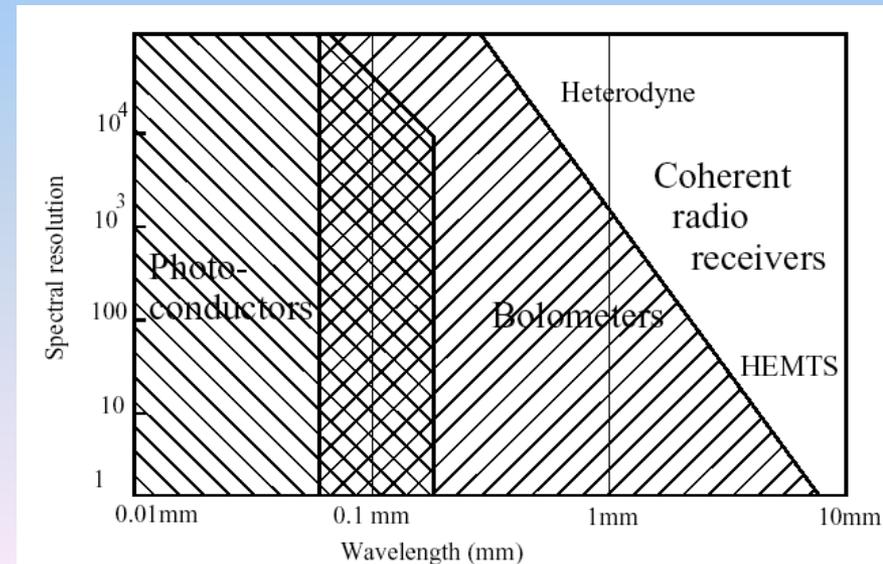
- Système macroscopique
- Mesure de l'échauffement résultant de l'absorption du rayonnement
- Thermomètre = élément résistif



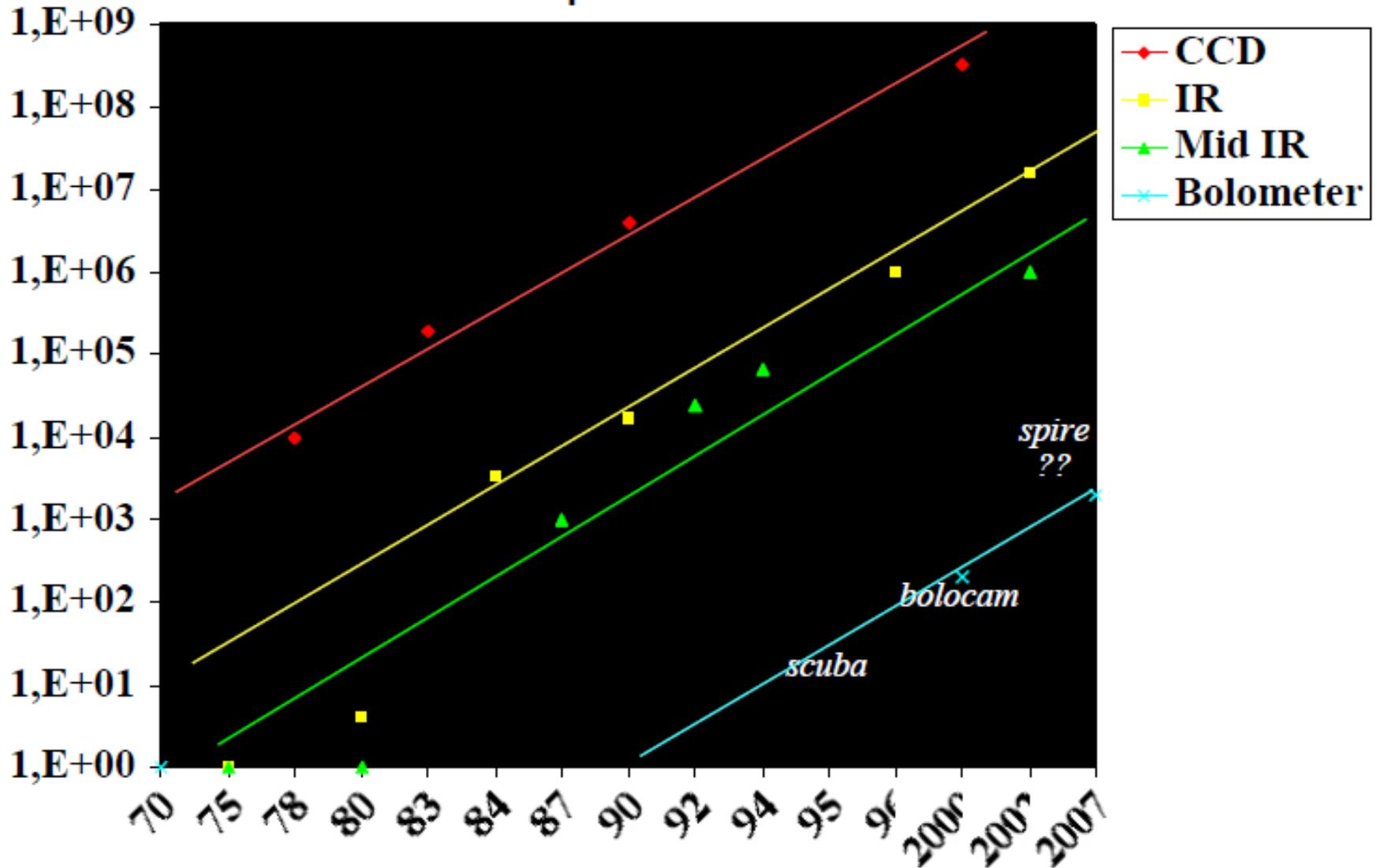
Crédit thèse V.Reveret, 2004

- Meilleur détecteur large bande dans la gamme $200\mu\text{m} - 3\text{mm}$

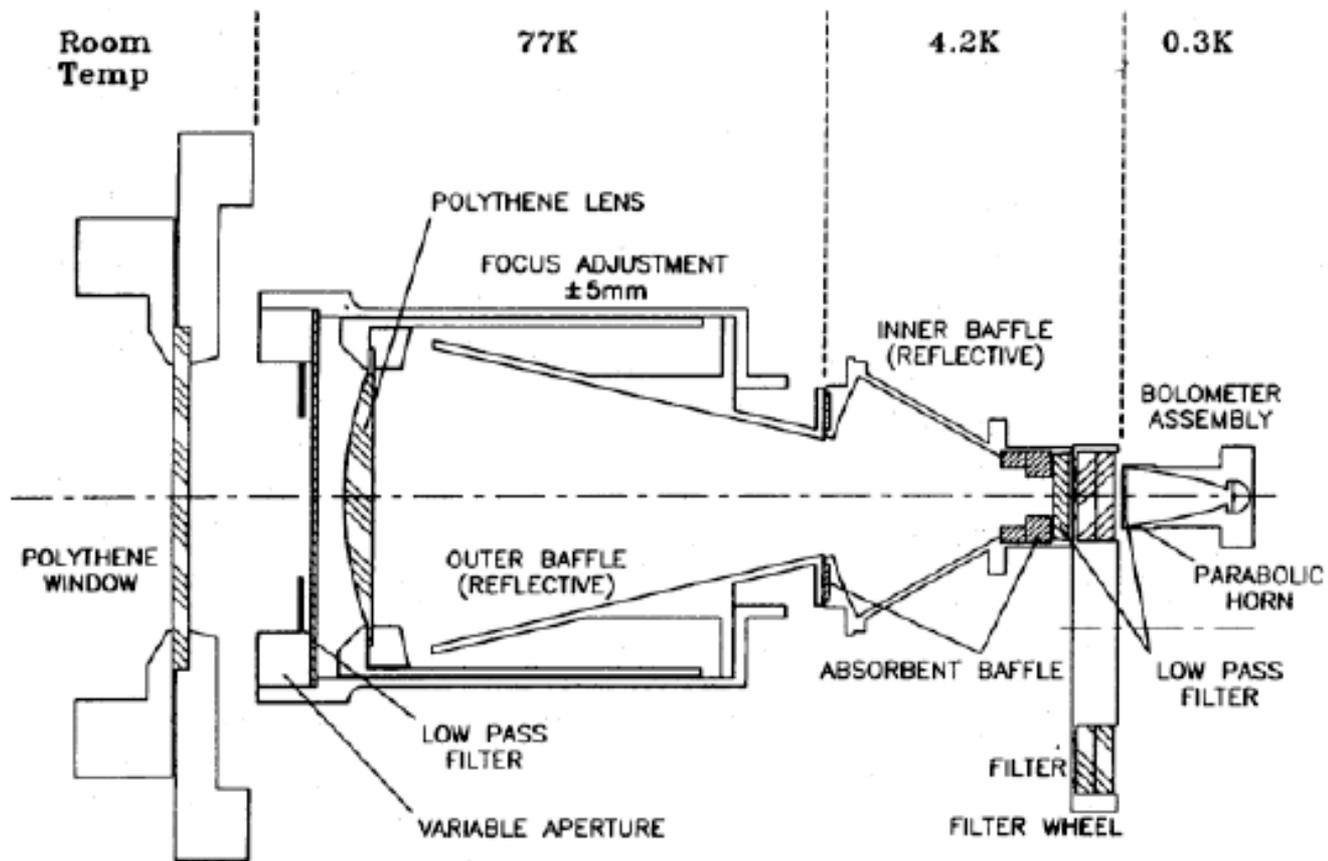
- BLIP si $T < 0.1K \bullet \frac{3\text{mm}}{\lambda}$



Number of pixels with time



(Crédit L. Rodriguez)



UTK14 JCMT (Mauna Kea, 1988)

Propriétés élémentaires des OEM

Onde plane dans le vide

$$\lambda_0 = \frac{c}{f}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\frac{E}{H} = Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$$

Onde plane dans un diélectrique

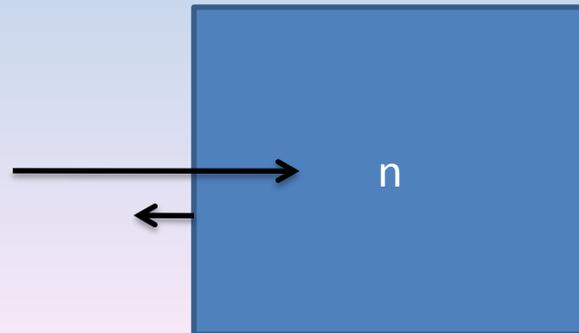
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

$$\frac{E}{H} = Z = \frac{Z_0}{n}$$

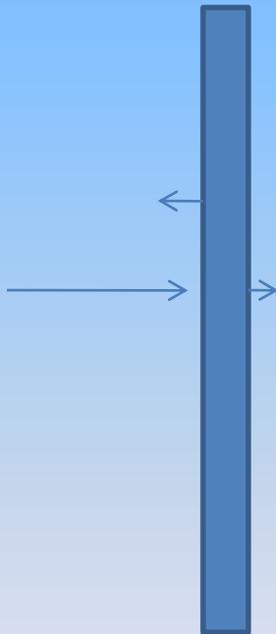
$$R = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$$

$$T = \frac{4n}{(1+n)^2}$$

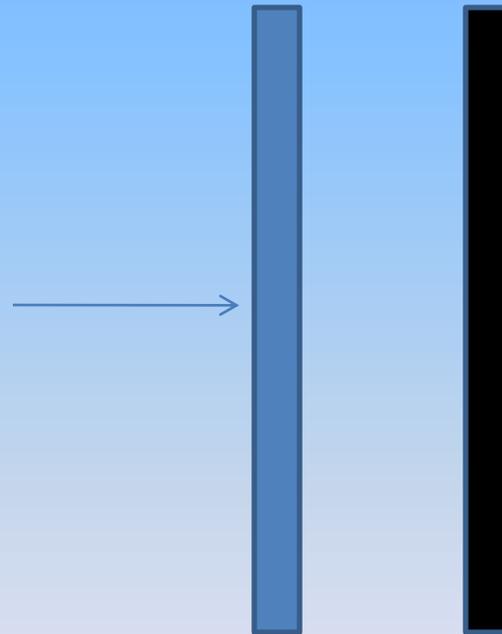


Onde plane dans un métal normal

$$E^+(z) = E^+ \cdot e^{-\frac{z}{\delta} \cdot (1+j)} \quad \text{avec} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu_0 \omega}}$$



$$R_c = \rho/e = Z_0/2$$
$$A = 50\%$$

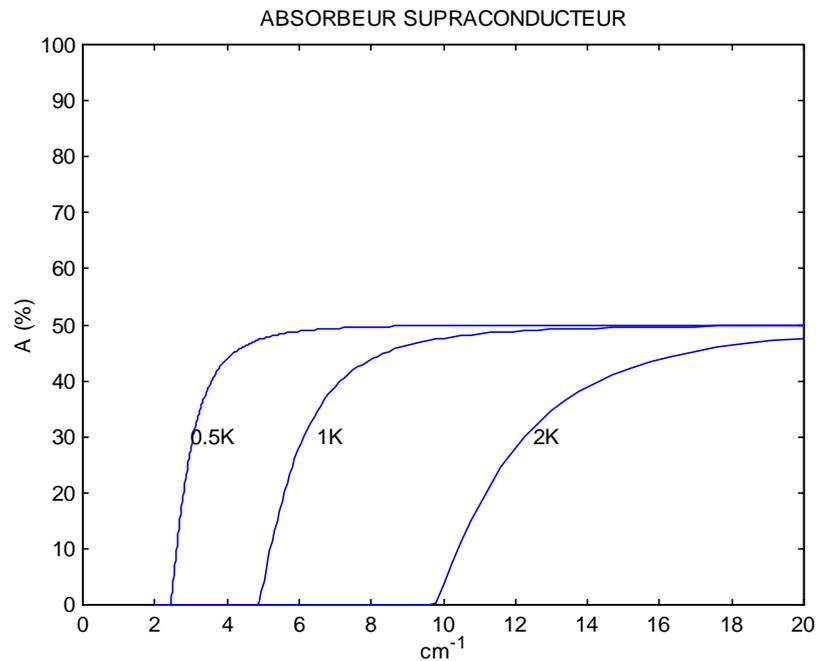
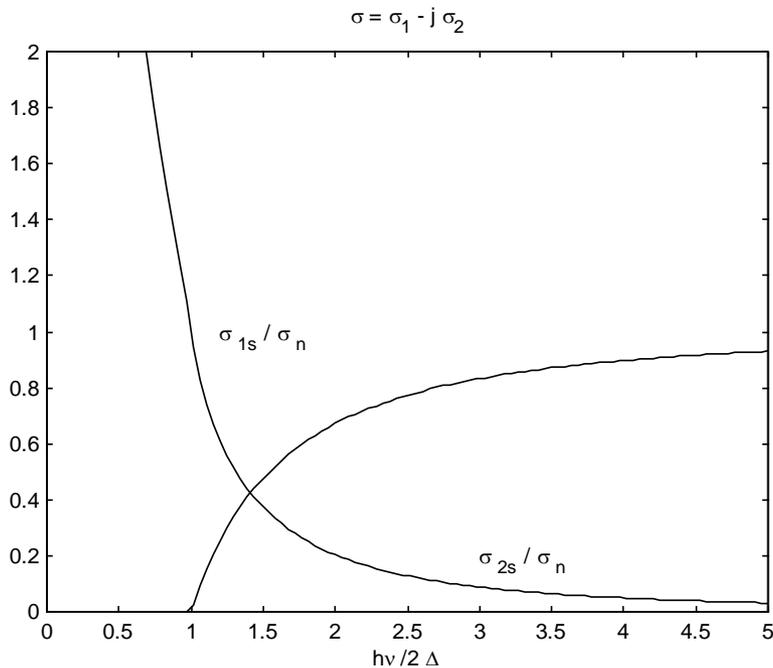


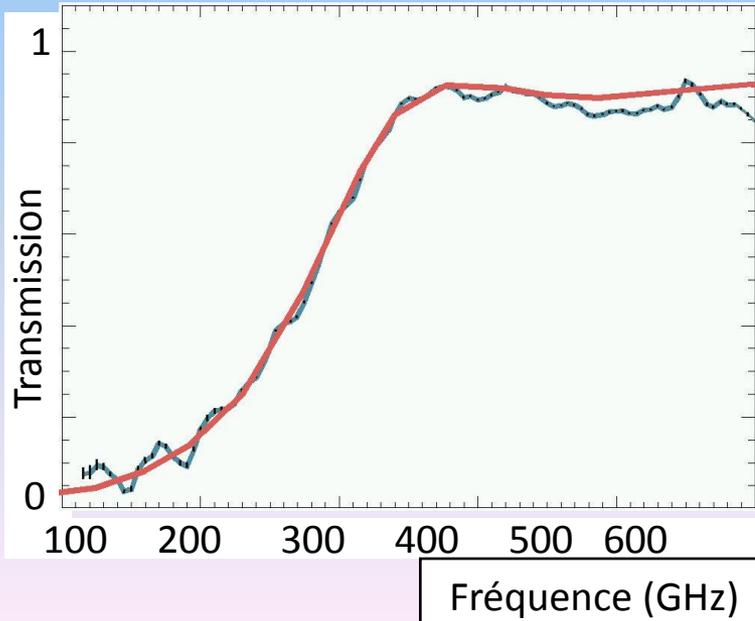
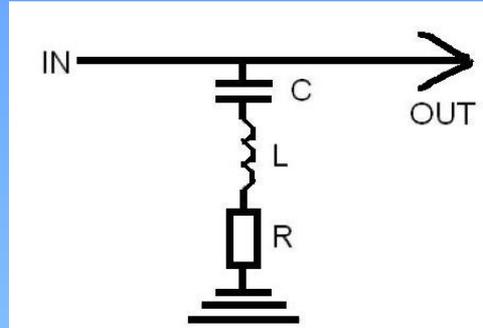
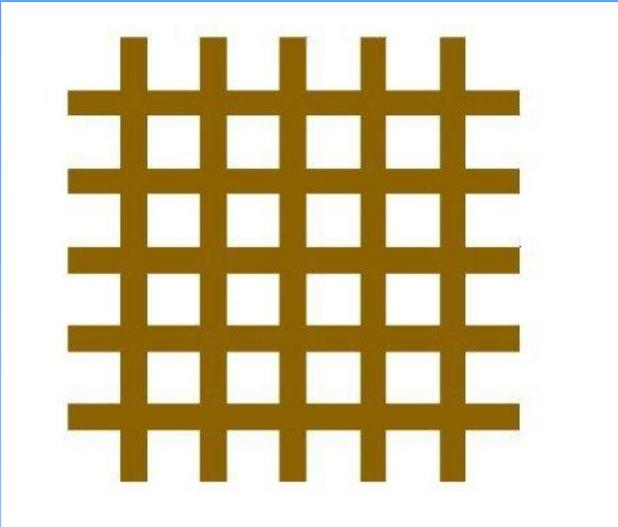
$$R_c = \rho/e = Z_0$$
$$A = 100\% \text{ @ } d = \lambda/4 + k \lambda/2$$

Cas d'un métal supraconducteur (modèle à deux fluides de Gorter-Casimir)

$$\sigma(\omega) = \sigma_1 - j \cdot \sigma_2 = \sigma_n \cdot t^4 - \frac{j}{\mu_0 \lambda_L(0) \cdot \omega} \cdot (1 - t^4)$$

où $\lambda_L(0)$ est la longueur de London à température nulle et $t=T/T_c$.





Comme une couche continue si $f \ll f_c$

$$R_c = \frac{\rho}{e} \cdot \frac{l}{w}$$

Formalisme des matrices de transfert

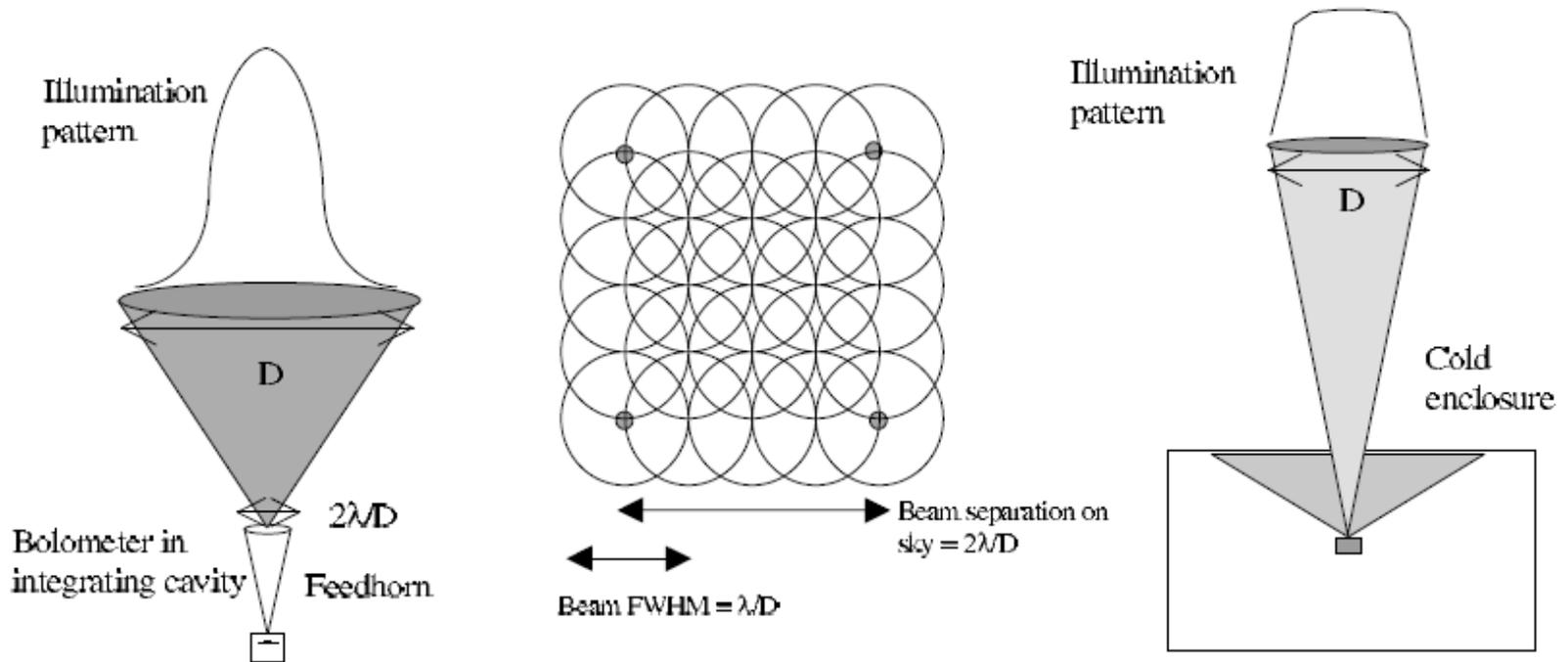
$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\gamma d) & Z_c \cdot sh(\gamma d) \\ \frac{1}{Z_c} \cdot sh(\gamma d) & ch(\gamma d) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_2 \\ H_2 \end{pmatrix}$$

$$T = \prod_{k=1 \dots n} T_k$$

...Voir thèse V. Reveret, 2004

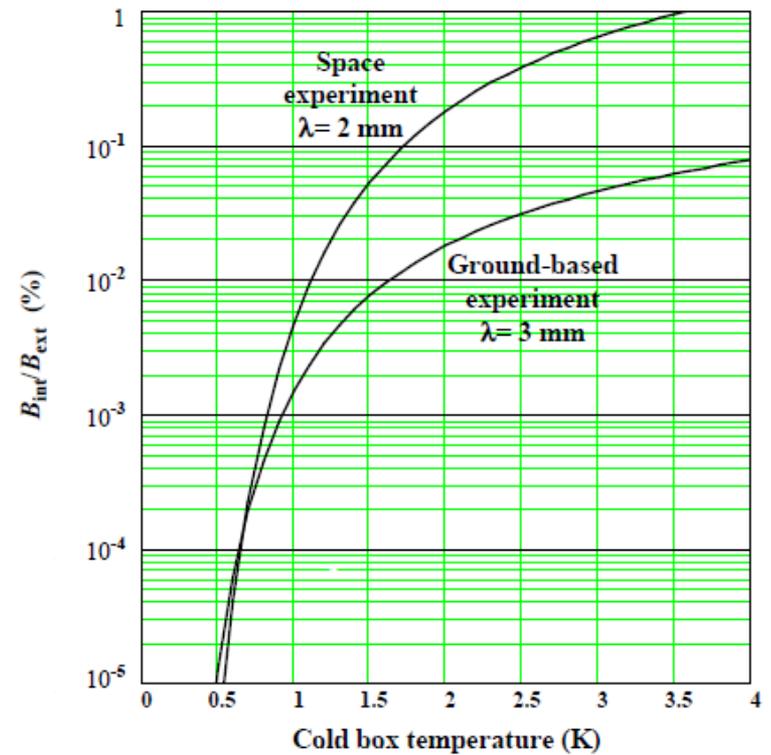
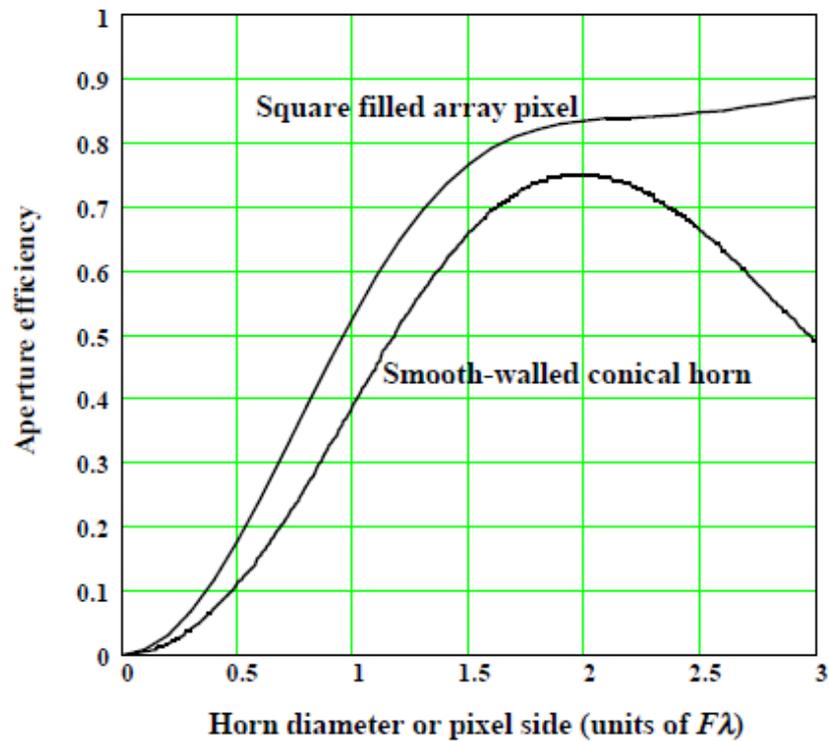
Structures classiques

Avec ou sans cônes ?

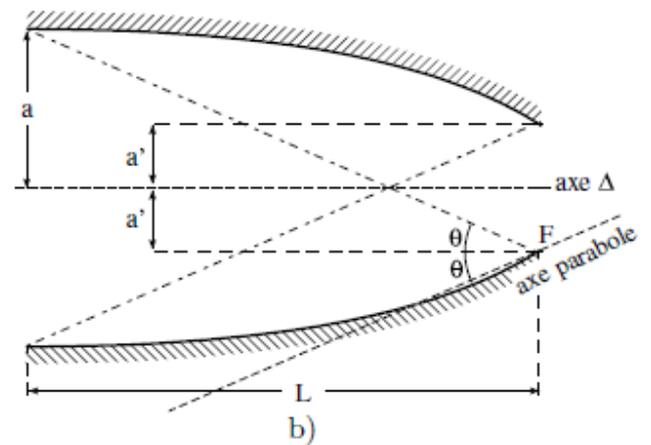
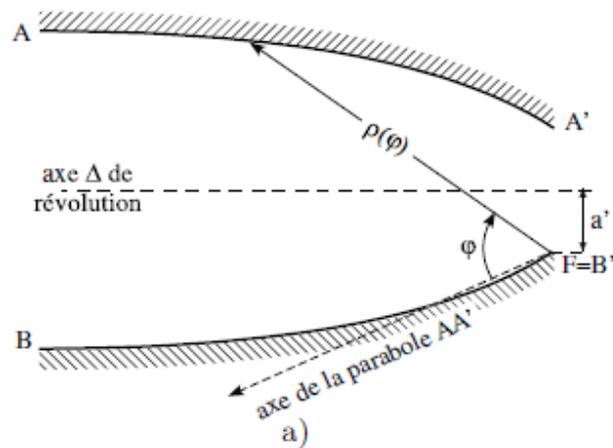
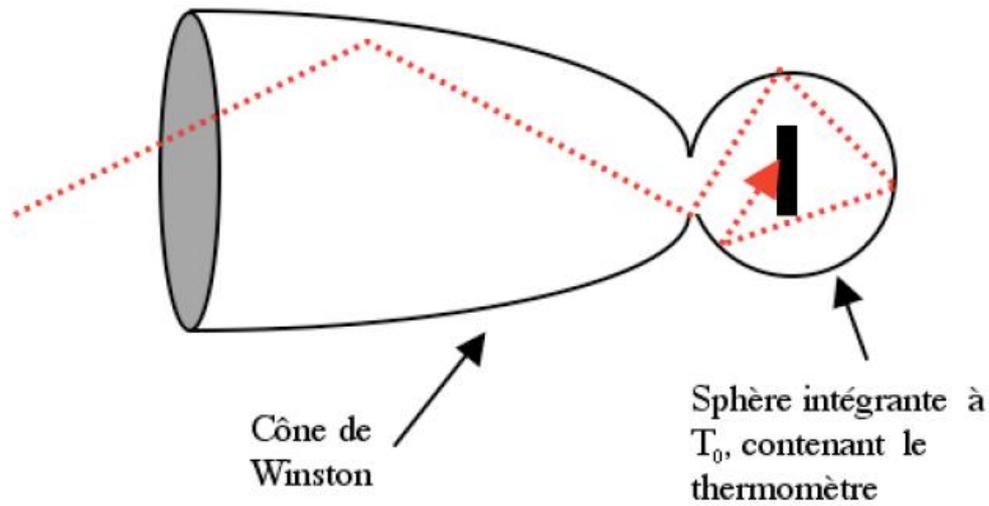


Tache de diffraction $\sim F\lambda$

\Rightarrow Nyquist $0,5 F\lambda$

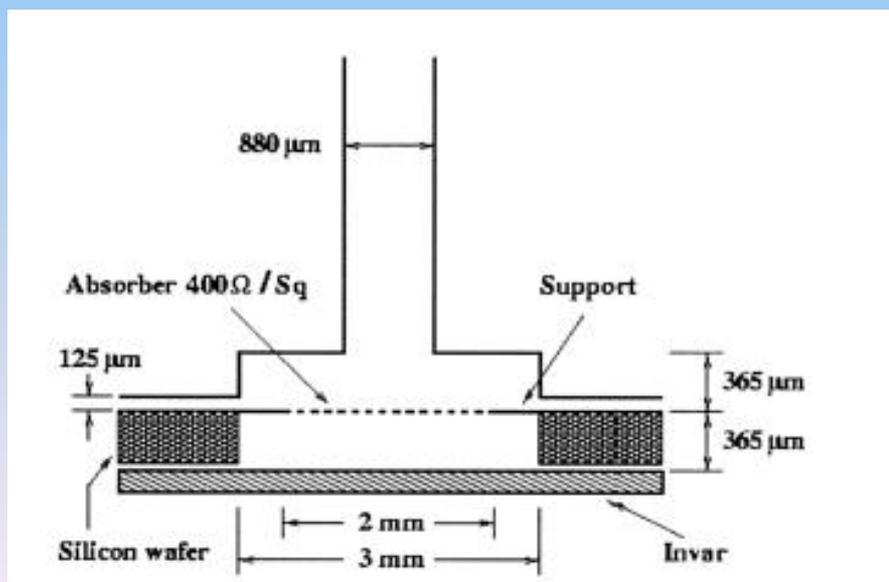
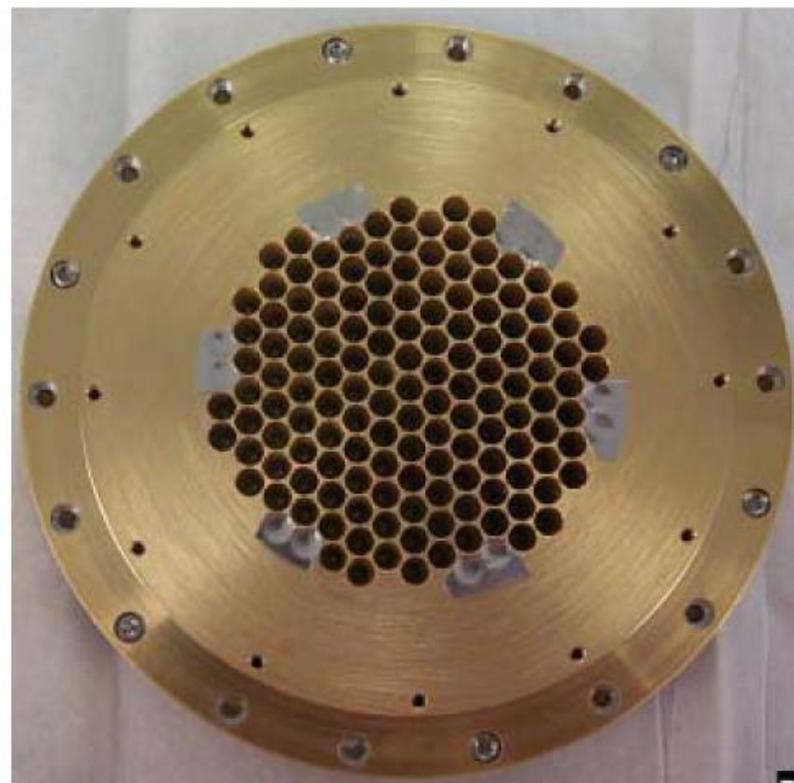


M. J. Griffin et al., The relative performance of Filled and Feedhorn-Coupled Focal Plane Architecture, 2002



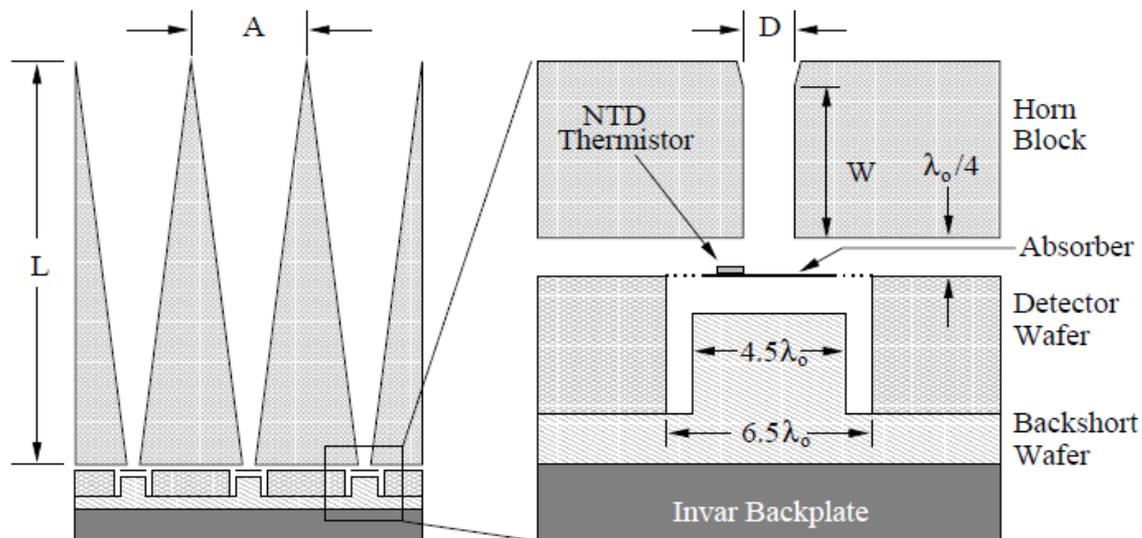
Matrice Bolocam (Glenn, 2002)

$$A = 1 - R - T = \frac{4g_a Z_0 l}{(2 + g_a Z_0 l)^2}$$



Matrice Herschel/SPIRE

(G. Chattopadhyay et al., IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., 51 (10), October 2003)



FEED HORN AND CAVITY DIMENSIONS

Array	λ_0 (μm)	Length, L (mm)	Aperture, A (mm)	Waveguide Dia., D (μm)	Waveguide Length, W (μm)
P/SW	250	23.68	2.40	171	500
P/MW	363	32.75	3.23	239	700
P/LW	517	46.36	4.90	342	1000
S/SW	275	23.68	2.15	190	550
S/LW	450	46.36	3.80	393	900

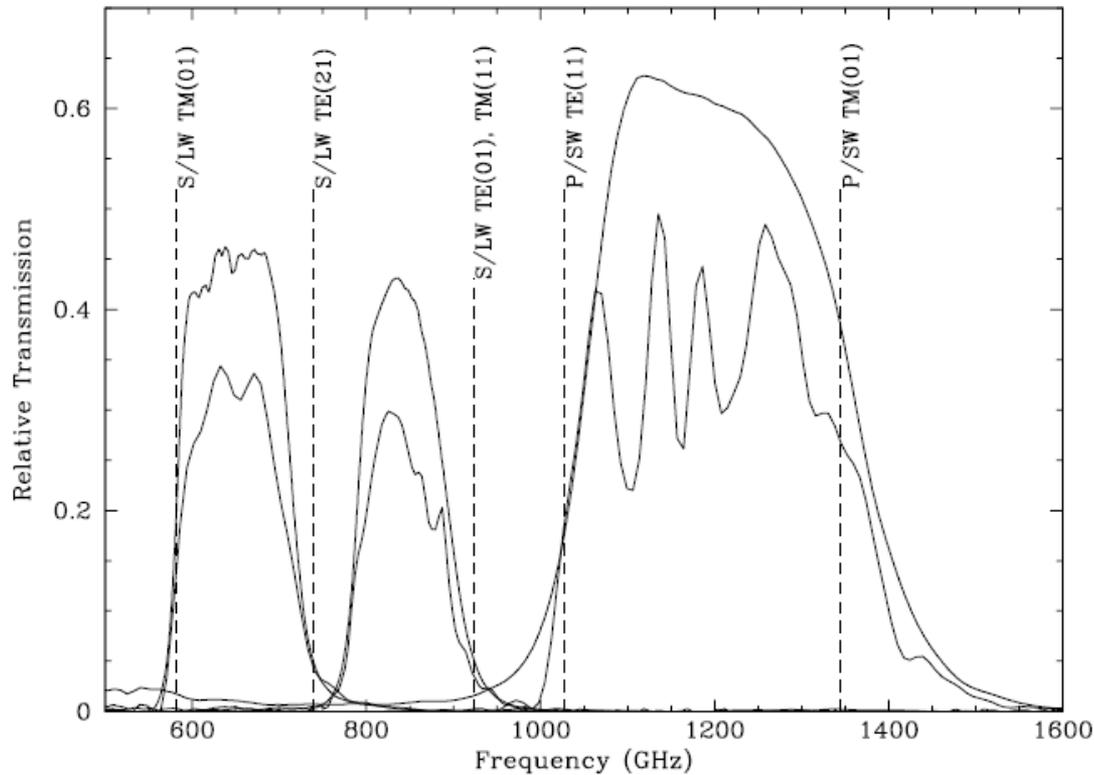


Fig. 8. The expected (upper) and the measured (lower) bandpass transmission profiles are plotted together, along with the cut-off frequency markers for each mode of the waveguides in the P/SW and S/LW arrays. The measured and the expected relative transmissions are intentionally plotted here on a different scale for clarity. The structures in the measured spectra is due to the reflection from the mylar beam splitter used in the measurement.

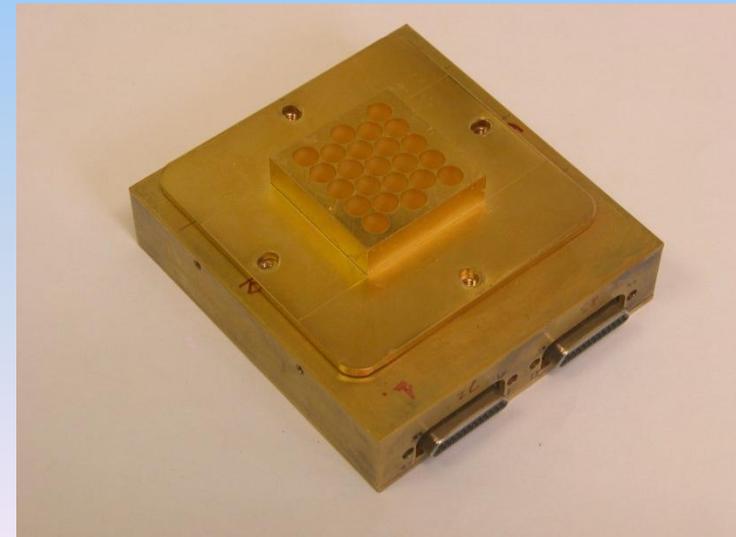
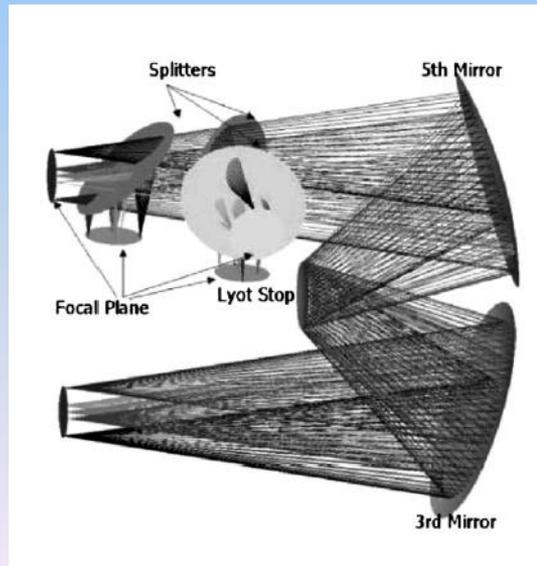
FEED HORN AND CAVITY DIMENSIONS

Array	λ_0 (μm)	Length, L (mm)	Aperture, A (mm)	Waveguide Dia., D (μm)	Waveguide Length, W (μm)
P/SW	250	23.68	2.40	171	500
P/MW	363	32.75	3.23	239	700
P/LW	517	46.36	4.90	342	1000
S/SW	275	23.68	2.15	190	550
S/LW	450	46.36	3.80	393	900

Matrices pour Olimpo

Télescope Cassegrain submillimétrique, diamètre 2.6 m

- télescope $f/D = 3.5$ => grand champ (30 arcmin)
 => angle d'ouverture 16°
- pouvoir de résolution à 2mm : 3.2 arcmin



Cryostat 300mK, 4 bandes de fréquences

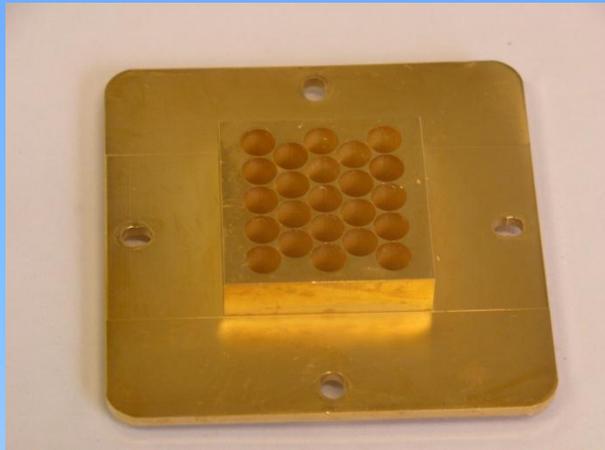
canal	fréquence (GHz)	longueur d'onde (mm)	charge optique (pW)	NEPphoton (10^{-16} W/Hz ^{1/2})	conductivité de la membrane (nW/K)
1	150	2	1,5	0,17	0.05
2	220	1.4	2,0	0,24	0.07
3	350	0.85	11	0,71	0.33
4	545	0.55	50	1,9	1.7

- canaux I, II : 19 (37) pixels TES -> Cardiff
- canaux III, IV : 23 pixels sur wafer 2 pouces -> DCMB (NbSi)

- *conductivité typique des membranes SiN utilisées : 1nW/K*

=> sans structuration des membranes, seulement détecteurs pour les canaux 3 et 4 envisageables

Cavite intégratrice



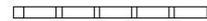
straight cones



wafer



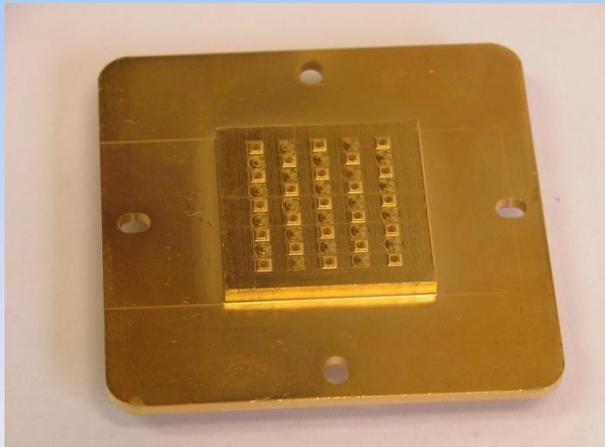
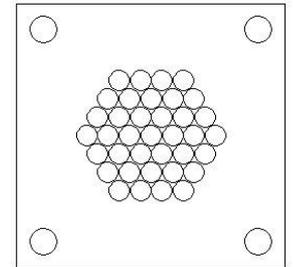
1/4 wave cavities



electrical board



housing+connectors



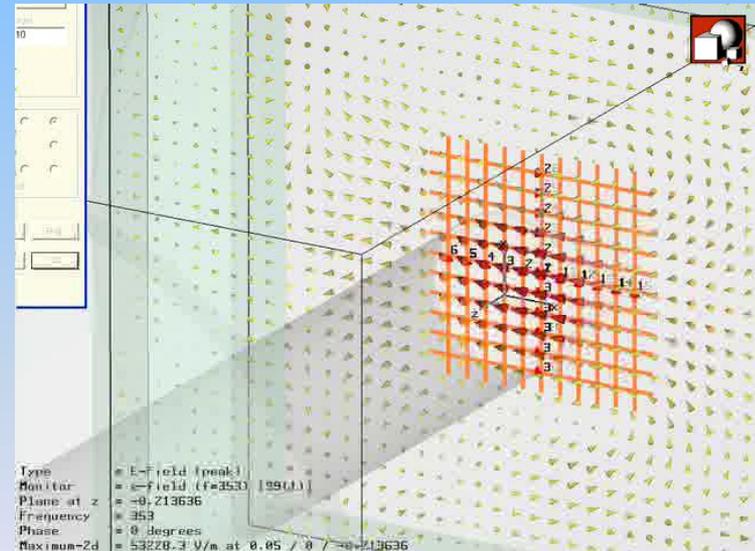
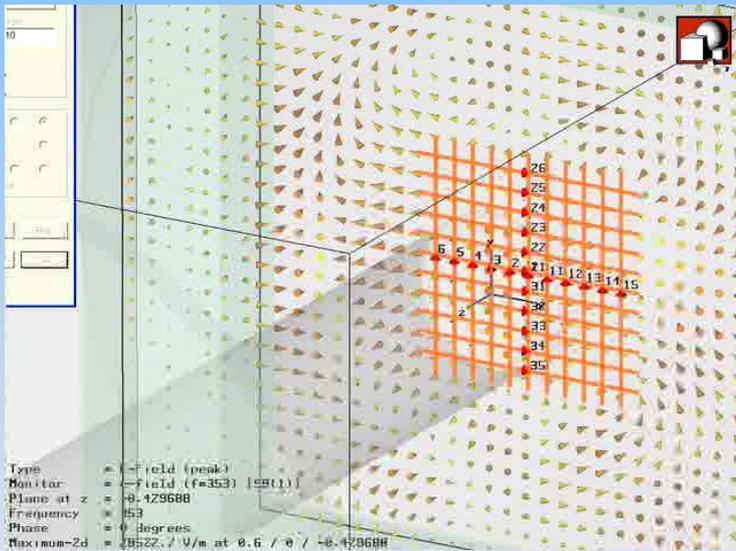
- cavités $\lambda/4$ derrière la matrice pour un maximum d'absorption

- la distance entre la sortie des cornets et le détecteur est également critique $\Rightarrow \lambda/4$

-Calcul électromagnétique (Microwave Studio / HFSS)

à 350 GHz : 2 - 3 modes pour lesquels $f_c < f$
à 545 GHz : 6 modes

paramètre de la simulation: distance sortie cornet – détecteur (même mode)



Absorbeur

Géométrie:

- carrés de $l = 50 \mu\text{m}$; largeur de ligne $w = 2 \mu\text{m}$
- R_{\square} adapté à l'impédance du vide: $Z_0 w/l \sim 15 \Omega$

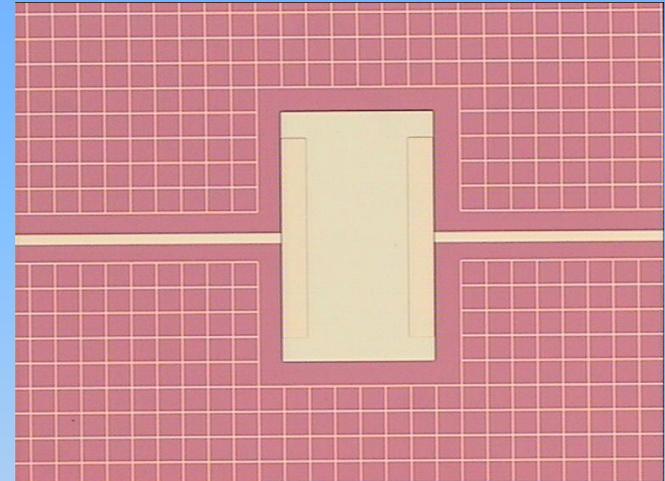
Considérations sur les matériaux:

- Au limite de continuité à 20nm
- Pd chaleur spécifique importante
- Nb supraconducteur aux fréquences intéressantes ($E_{\text{gap}} \rightarrow 700\text{GHz}$)

-> Al, Ti, ...

-> nouveaux masques $100 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$

$$R_{\square} \sim 7.5 \Omega$$



matériau	épaisseur (nm)	R/carré (Ω) à 300K
Au	15	7 – 20
Au	20	2
Au	27	1.4
Pd	15	54
Pd	20	16
Pd	25	15

Thermomètre NbSi

$\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$:

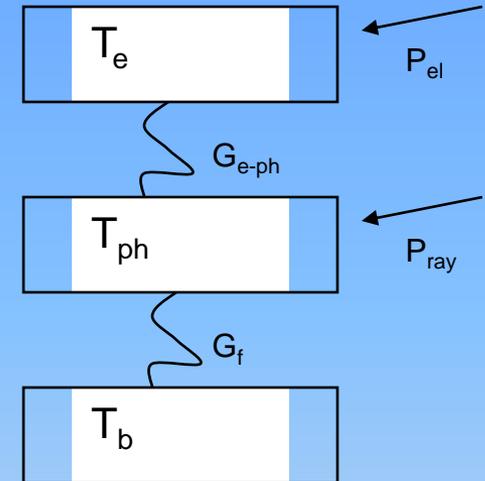
- > 1-5 M Ω adapté à l'électronique de lecture
- > composition x optimale = f ($T_{\text{fonct}} = 350 \text{ mK}$)
- > effet de champ et découplage électron/phonon

$$\rho(T_{el}, E) = \rho_0 \cdot \exp \left[\left(\left(\frac{T_0}{T_{el}} \right) \cdot \left(1 - \frac{E}{E_c} \right) \right)^n \right]$$

$$E_c = \frac{2 \cdot k_B \cdot T_{el}}{q \cdot L_{LOC}}$$

$$\frac{E^2}{\rho} = G_{e-ph} \cdot (T_{el}^5 - T_{ph}^5)$$

$$E_c \sim 5000 \text{ V/m}; G_{e-ph} \sim 80 \text{ W/cm}^3/\text{K}^5$$



$$\text{Volume de la couche : } \Omega \geq 10 \cdot \frac{P_{el}}{G_{e-ph} \cdot T_{ph}^5}$$

$$\text{Distance inter - électrode : } l \geq 20 \cdot \frac{P_{el}}{I \cdot E_c}$$

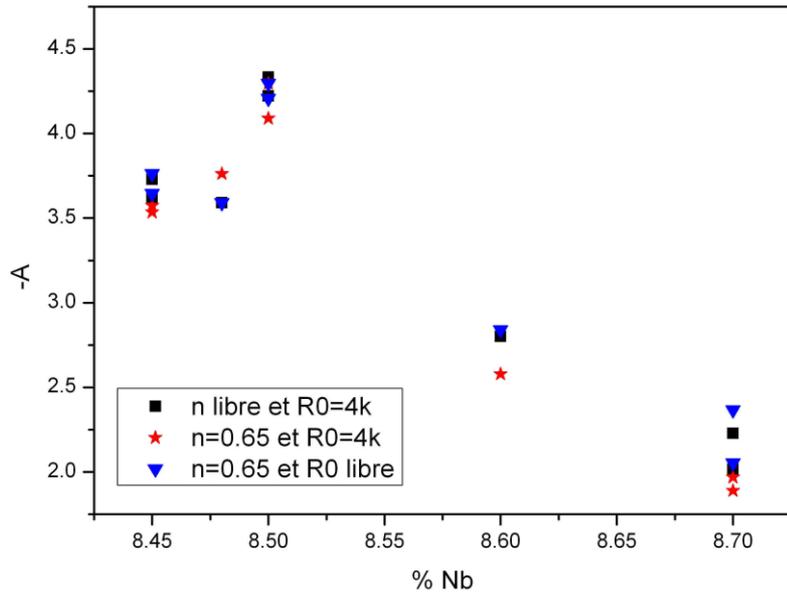


Figure 1 : Influence de la composition sur la sensibilité relative $A = -d\ln R/d\ln T$

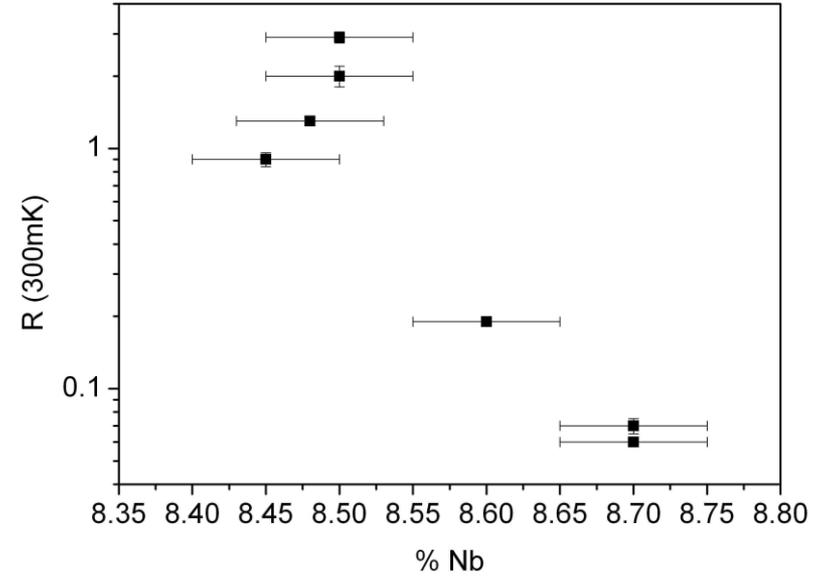
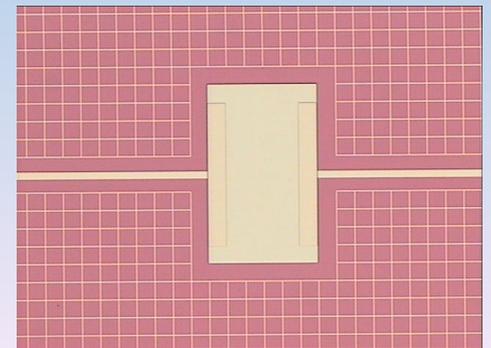
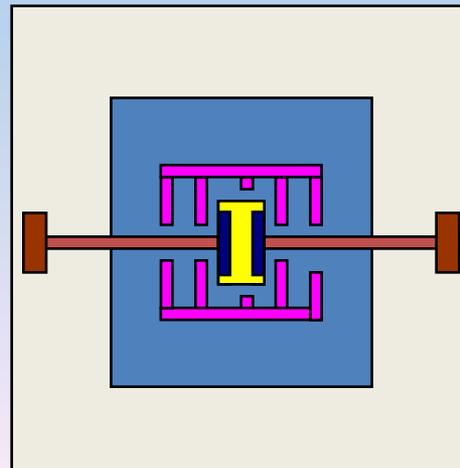
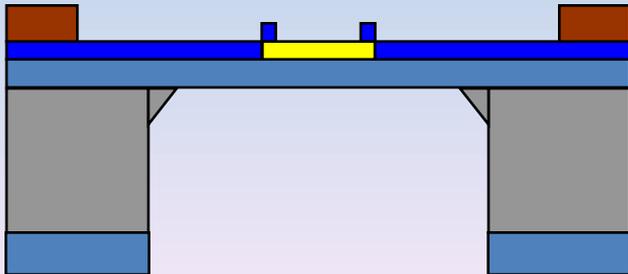


Figure 2 : Influence de la composition sur la résistivité

Fabrication

wafer 2 pouces, épaisseur 300 μ m (mieux adaptée à la prégravure RIE)

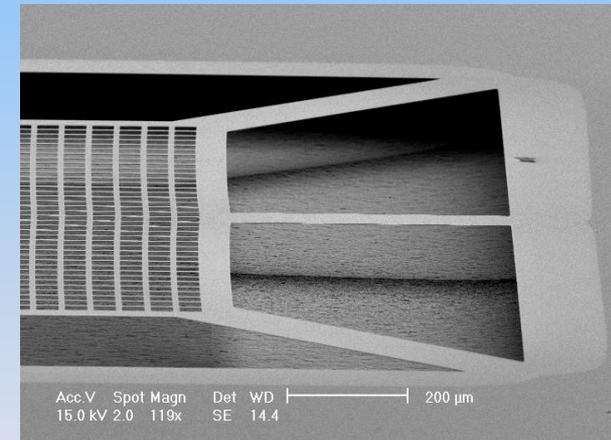
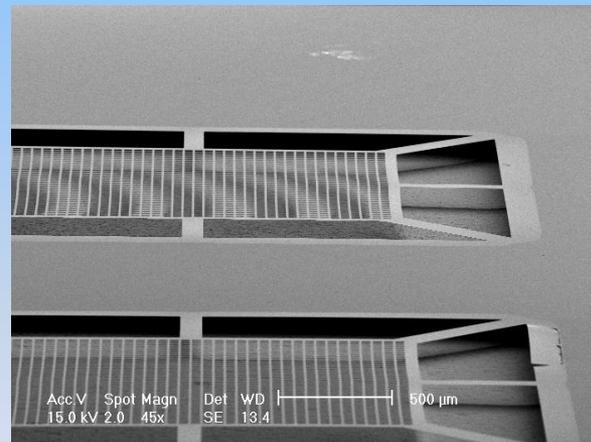
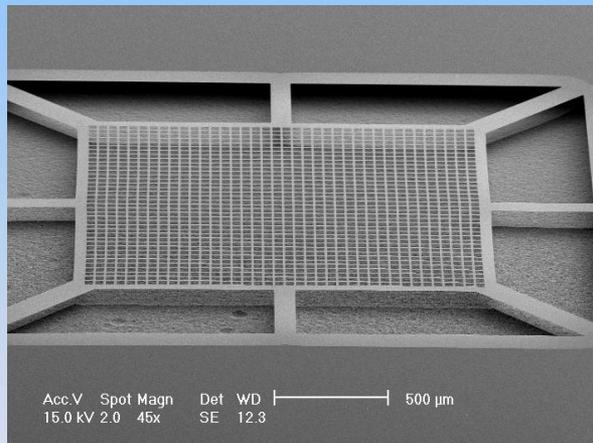
1. membranes : *face avant* 500nm SiN low stress; *face arrière* 1 μ m SiN LF 
2. ouverture de SiN en face arrière RIE
3. lift-off grille Pd, Au, Al, Ti 
4. lift-off thermomètre NbSi 100 nm + recuit 125°C pendant 2h 
5. lift-off électrodes Nb / Ir 40 nm / 10nm 
6. lift-off plots de contacts Au 200 nm 
7. prégravure membranes DRIE (jusqu'à ~ 30.. 50 μ m)
8. fin de gravure en voie humide TMAH ou gravure gazeuse XeF2





***Le XeF₂ se présente sous la forme solide.
Il passe à l'état gazeux à environ 3,8 Torr
à 25 °C.***

***Le silicium se grave de façon isotrope
très sélective jusqu'à (1000:1) vis à vis
du SiO₂, du nitrure de silicium, de
l'aluminium....***



Membranes ajourées en nitrure de silicium 4x4 mm épaisseur 500 nm.

Conduction dans les membranes SiN

Approche microscopique pour la conductivité thermique:

$\kappa(T) = C_V * v * l / 3$ - C_V (J/K/m³) capacité thermique par volume

- v vitesse de son

- l libre parcours moyen des phonons

- à “haute” température l est limité par des processus Umklapp

- en dessous de 20K, l est limité par la diffusion sur des défauts cristallins et des impuretés

- dans des matériaux amorphes comme SiN, l est limité par la diffusion par le désordre

-> **transport diffusif**

- longueur d'onde des phonons $\lambda \sim 1/T$

-> à très basses température l devient plus grand que la taille du dispositif (typiquement 1mm à 100mK)

-> diffusion à la surface

-> **transport radiatif**

Modélisation de la fuite thermique:

$P(T) = G (T^n - T_{\text{bain}}^n)$, où G (W/K^n) ne dépend pas de $T \Rightarrow g$ (W/K) = $\Delta P/\Delta T = n G T^{n-1}$

transport diffusif:

$g(T) = F \kappa(T)$, où F (m) est un facteur géométrique

Exemples :

- transport dans une membrane circulaire : $F = 2\pi t / \ln(R_{\text{out}}/R_{\text{in}})$, où t est l'épaisseur
- transport dans N poutres de largeur w , longueur L et épaisseur t : $F = w t N/L$

transport radiatif :

$g(T) = 4 \sigma S_{\text{ph}} \xi T^3$, c'est-à-dire $n=4$

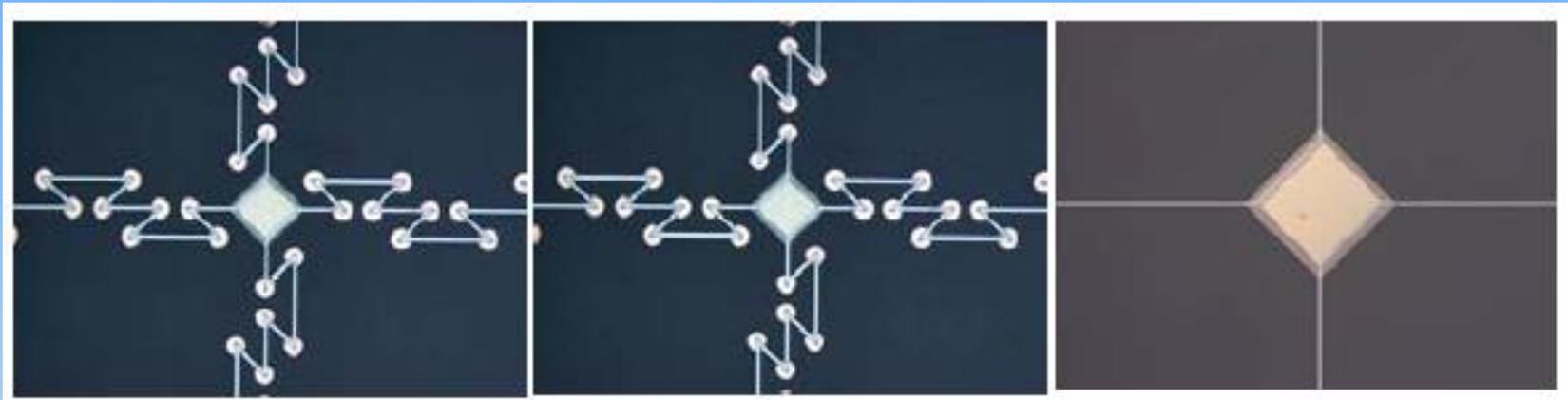
- S_{ph} surface émettrice de phonon (section perpendiculaire au flux de chaleur)

- ξ caractérise la réduction de g due à la diffusion de surface:

$\xi = 1$ – réflexion spéculaire

ξ_{min} – "Casimir limit" – réflexion diffuse à la surface

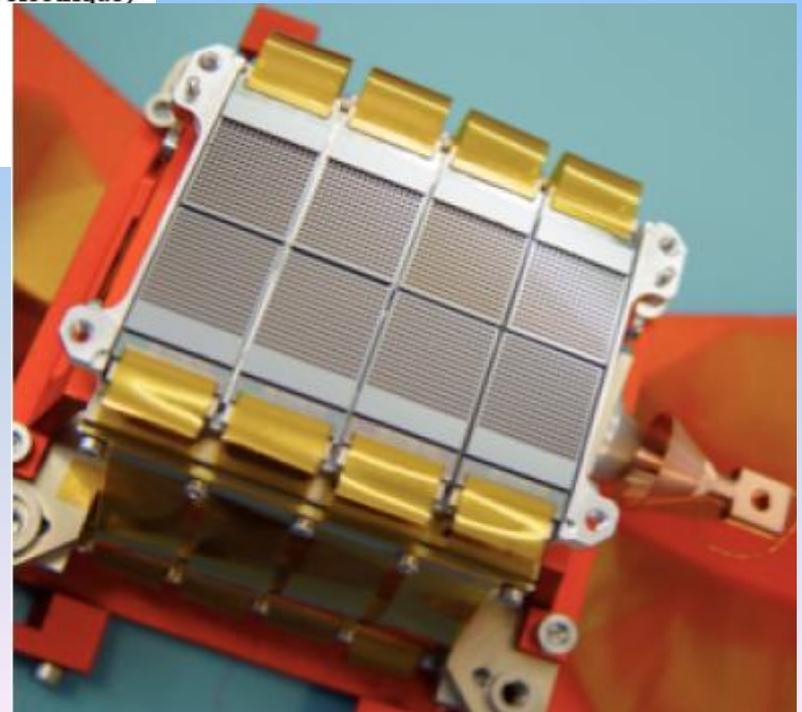
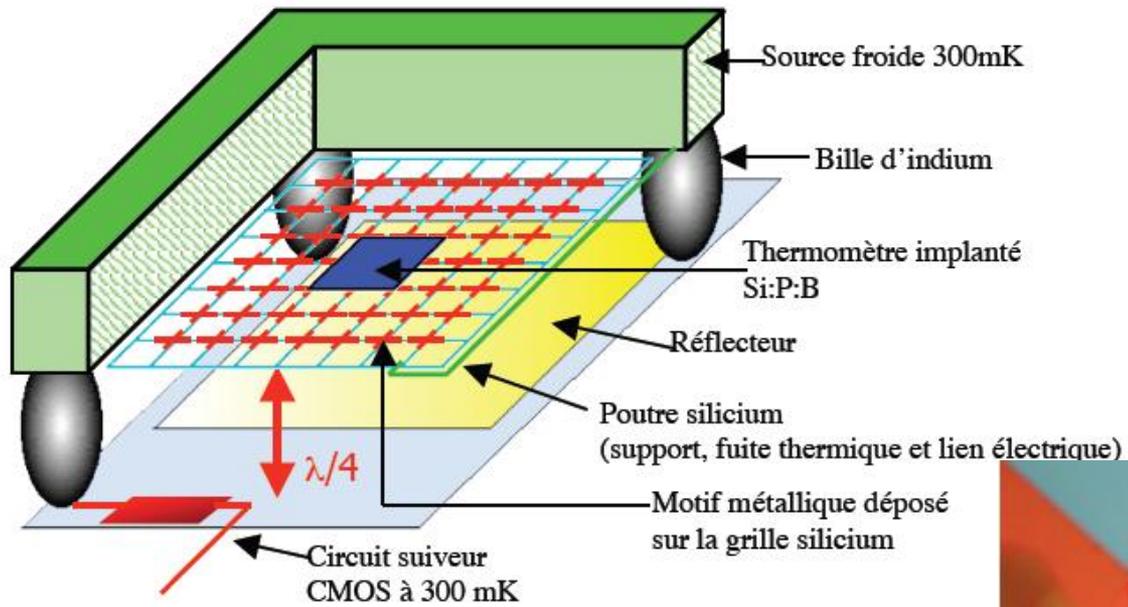
Limite des bolomètres suspendus

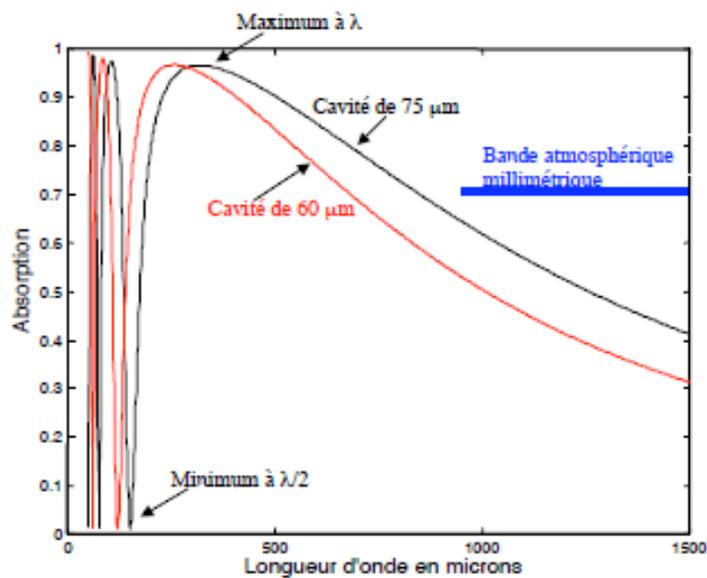
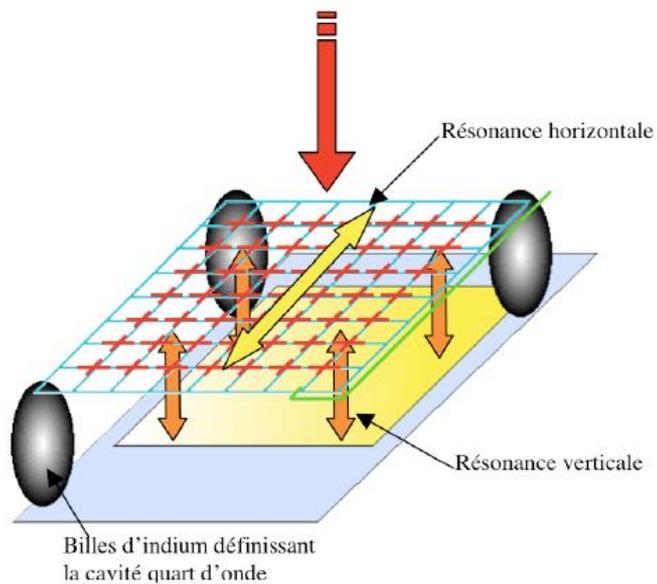


(H. Hoevers, SRON)

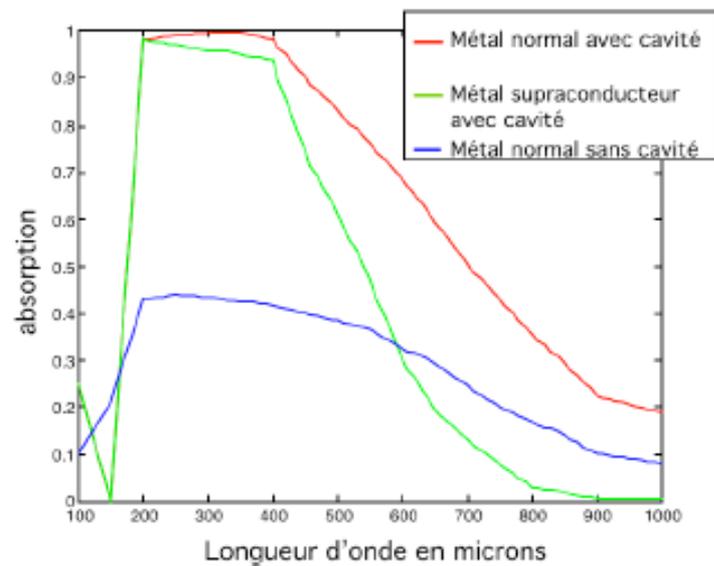
Limite conductivité – $4 \cdot 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$ @ 100mK

Matrices ARTEMIS



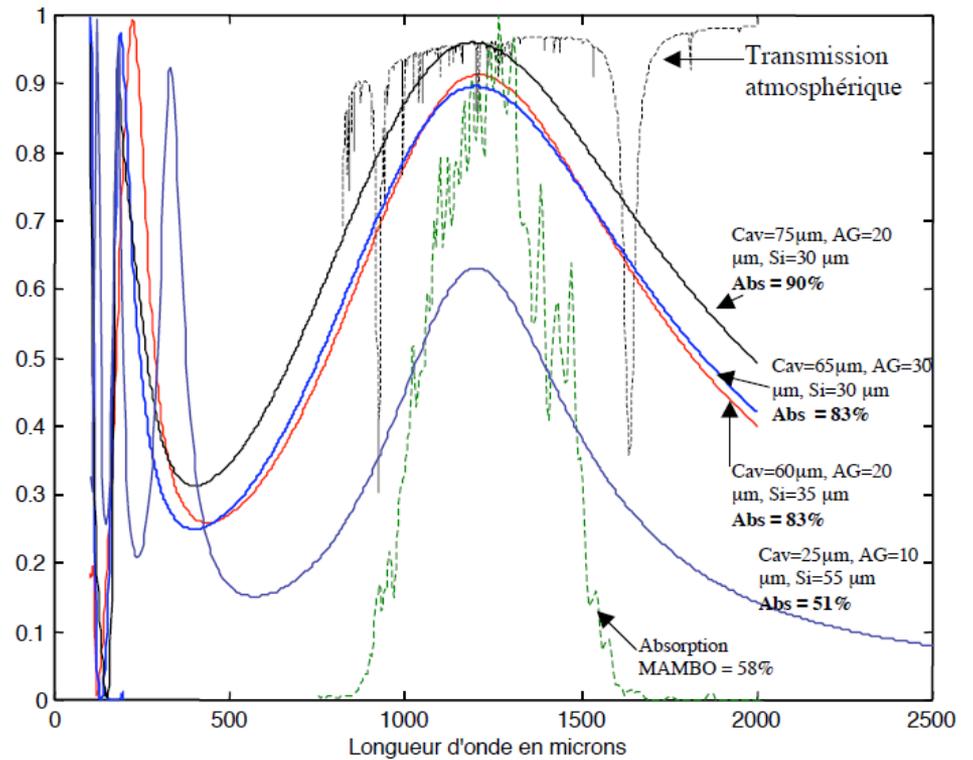
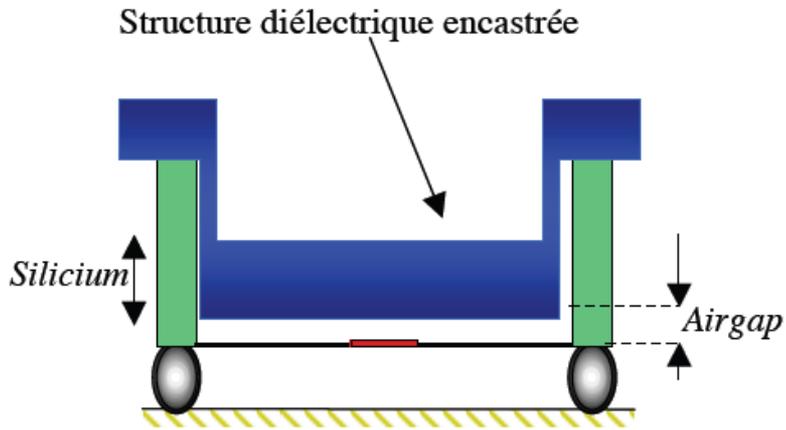


(a)

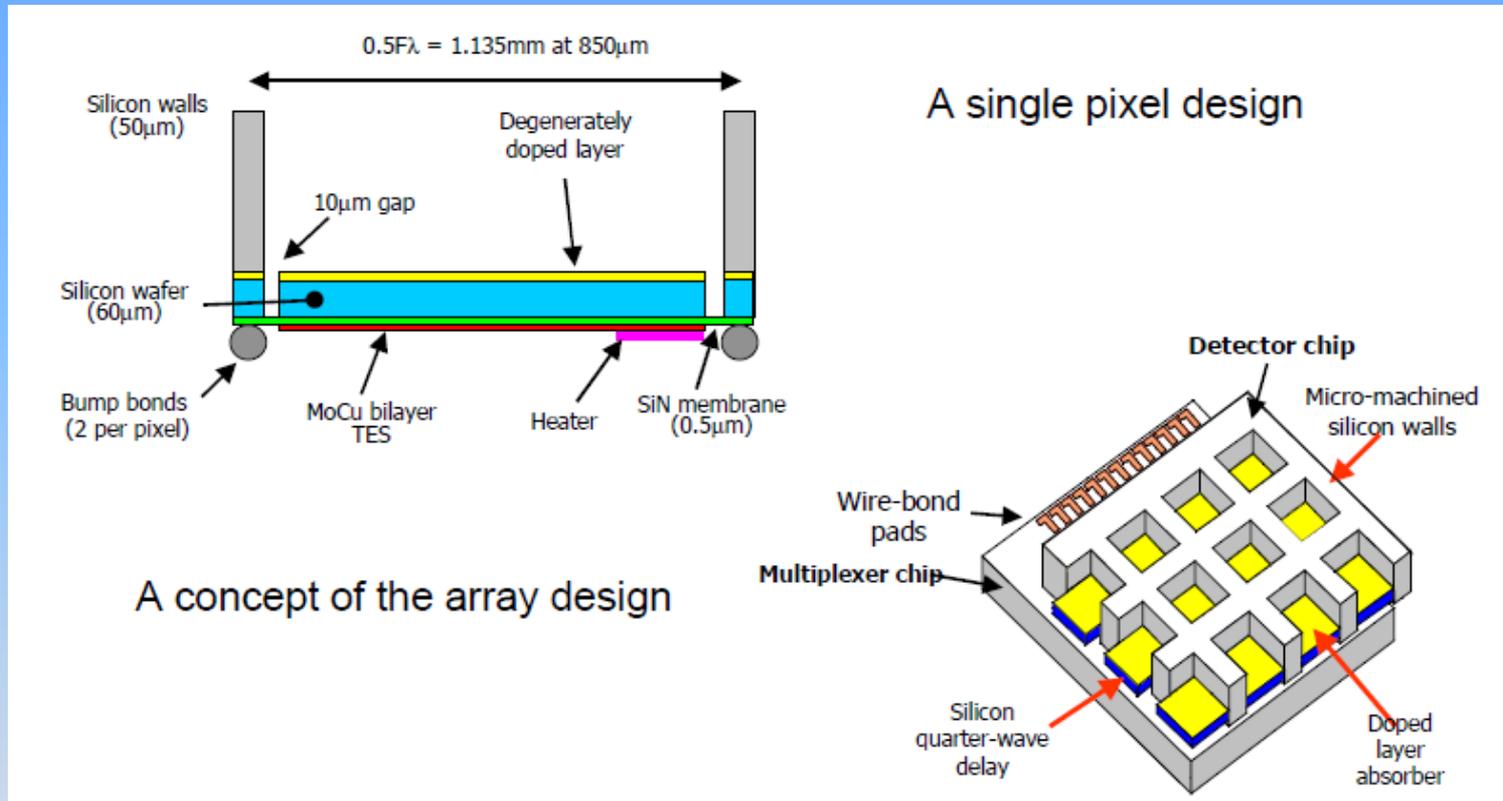


(b)

Adaptation pour le mm
Thèse V. Reveret, 2004



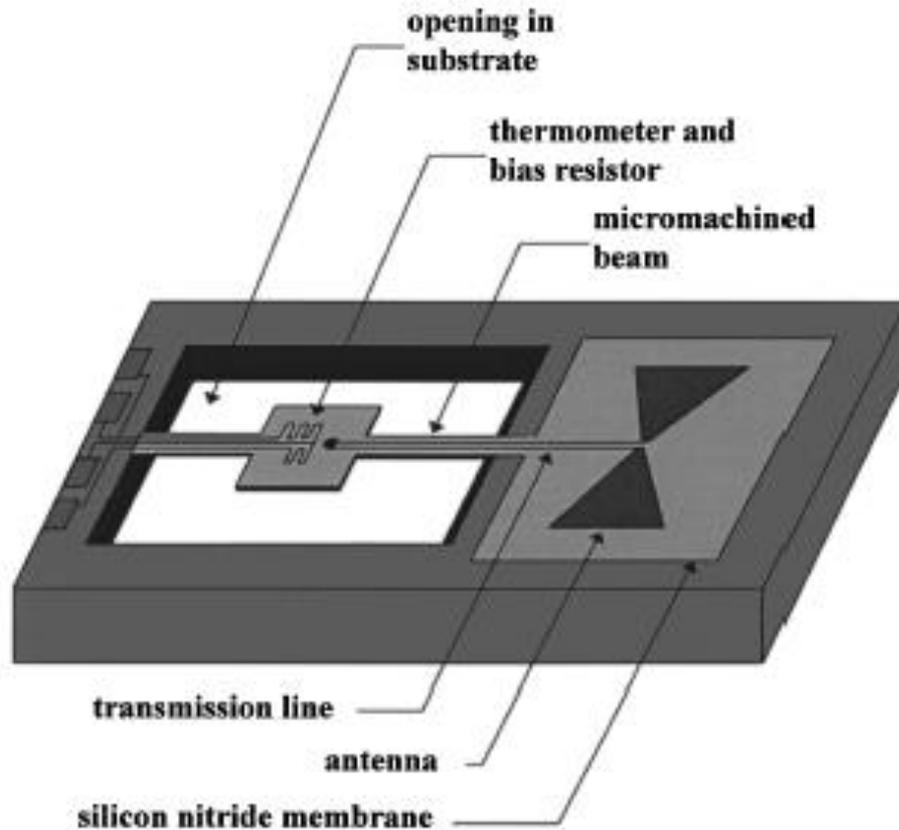
Matrices Scuba2



- Support Si pour homogénéité de la température de l'absorbeur et $\frac{1}{4}$ onde
- Chauffage pour ajuster le TES !

	Target specifications for SCUBA-2 pixels			
	850 μ m	450 μ m	Units	Notes
Background power	7	92	pW (minimum)	Prediction from model
	19	150	pW (maximum)	
Design pixel power level	30	200	pW per pixel	
	0.2	1.3	μ W per focal plane	
Target Tc	100 - 120	200	mK	
Target G	~1700	~5000	pW/K	
Likely C	6.5	11	pJ/K	Dominated by TES
Bias power	5 to 10	5 to 10	pW	To reduce ETF
Minimum photon noise level	6.5	33	10^{-17} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Phonon and Johnson Noise	1	9	10^{-17} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Mux chip power dissipation	3 to 4	3 to 4	μ W per focal plane	Depends on bias power level used
Time constant target	1- 2	1 -2	msecs	
Distant pixel to pixel cross talk	<0.3	<0.3	%	

Imagerie avec antennes planaires

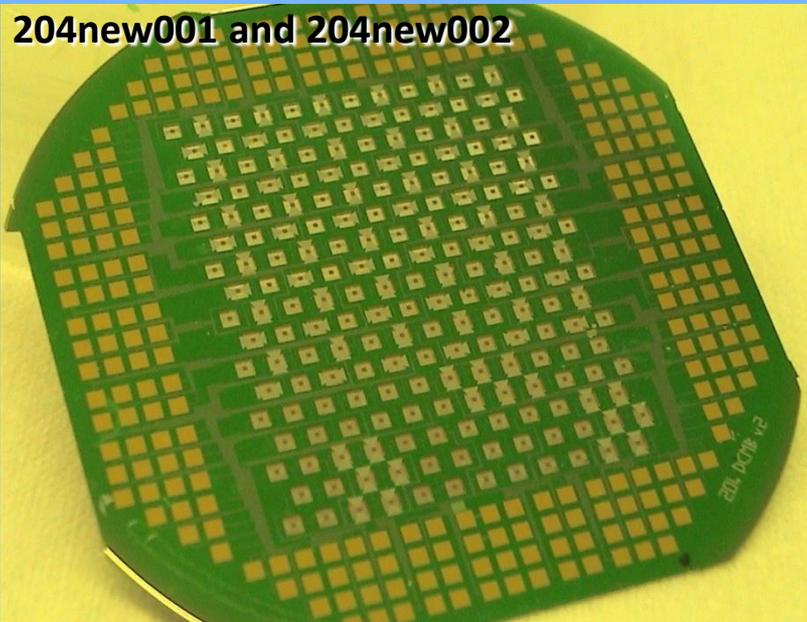


Séparation complète des fonctions

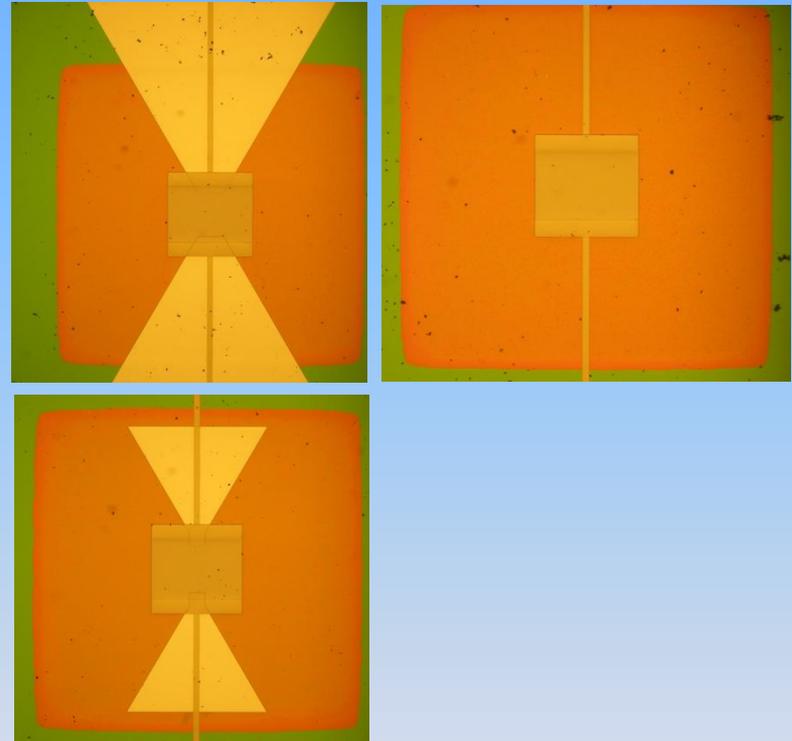
- Couplage oem
- Dissipation de l'énergie / mesure

=> l'absorbeur ne limite plus τ

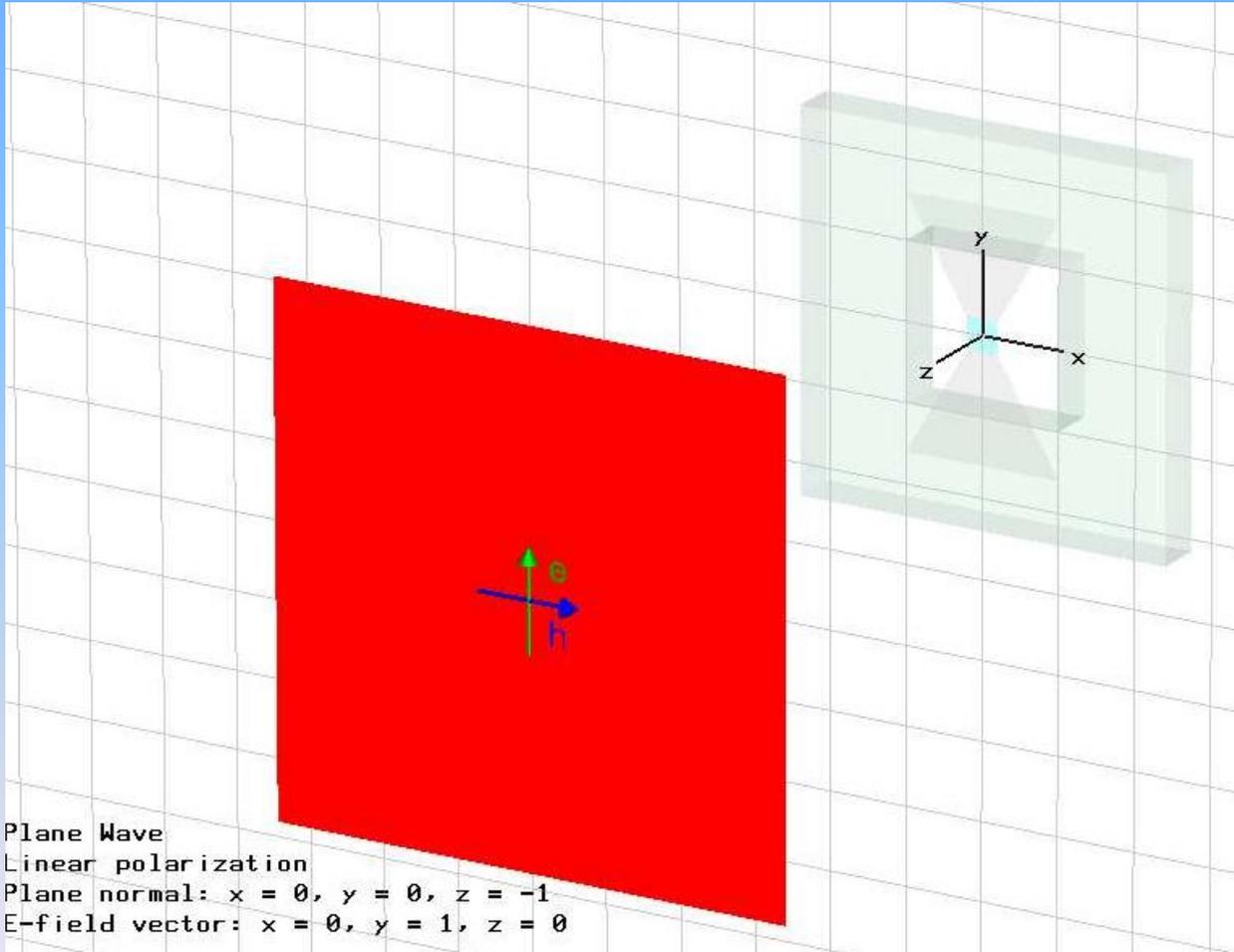
Matrice à antenne DCMB



Test matrix (August 2007)



Simulation électromagnétique



A plane wave is launched hitting a single pixel. Open boundaries.

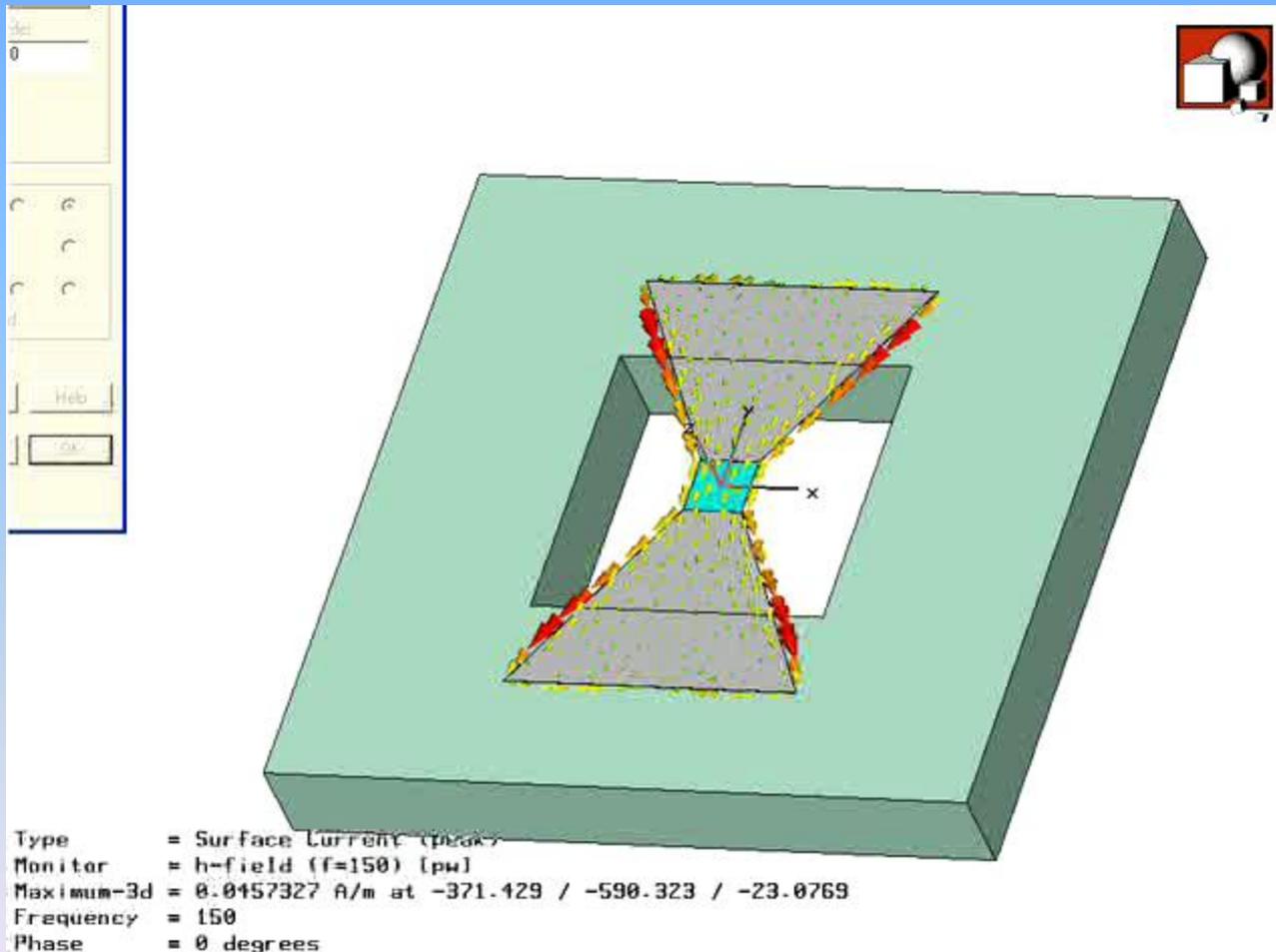
Considered:

- antenna
- shunt
- Si with cavity

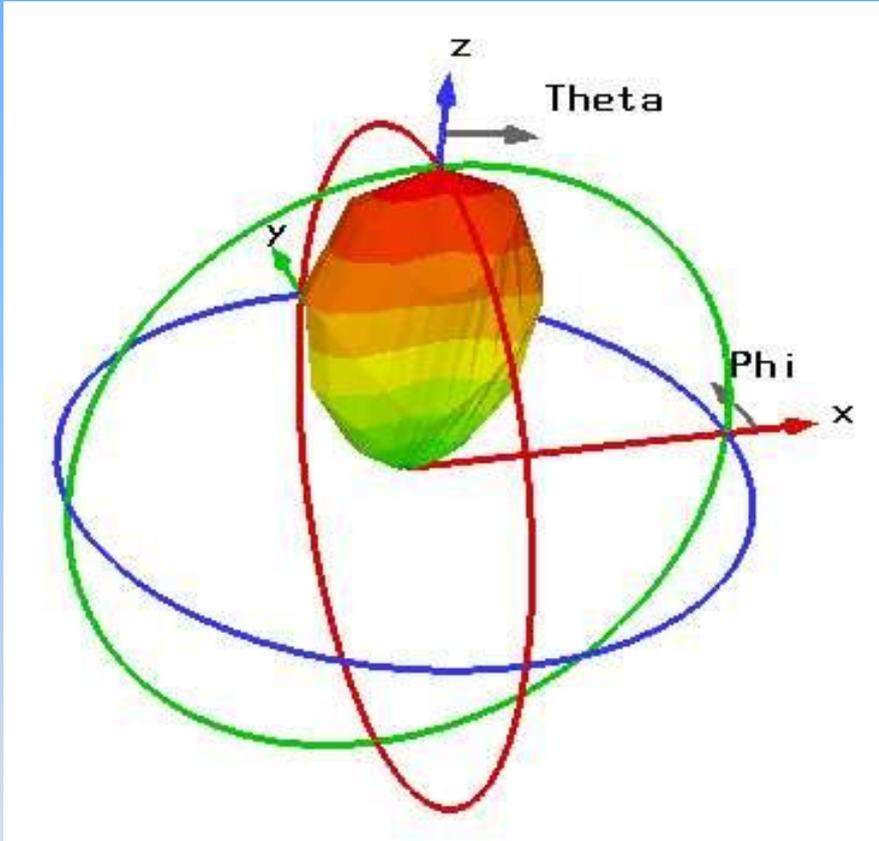
Not considered:

- **NbSi**
- pistes (in progress)
- array effects

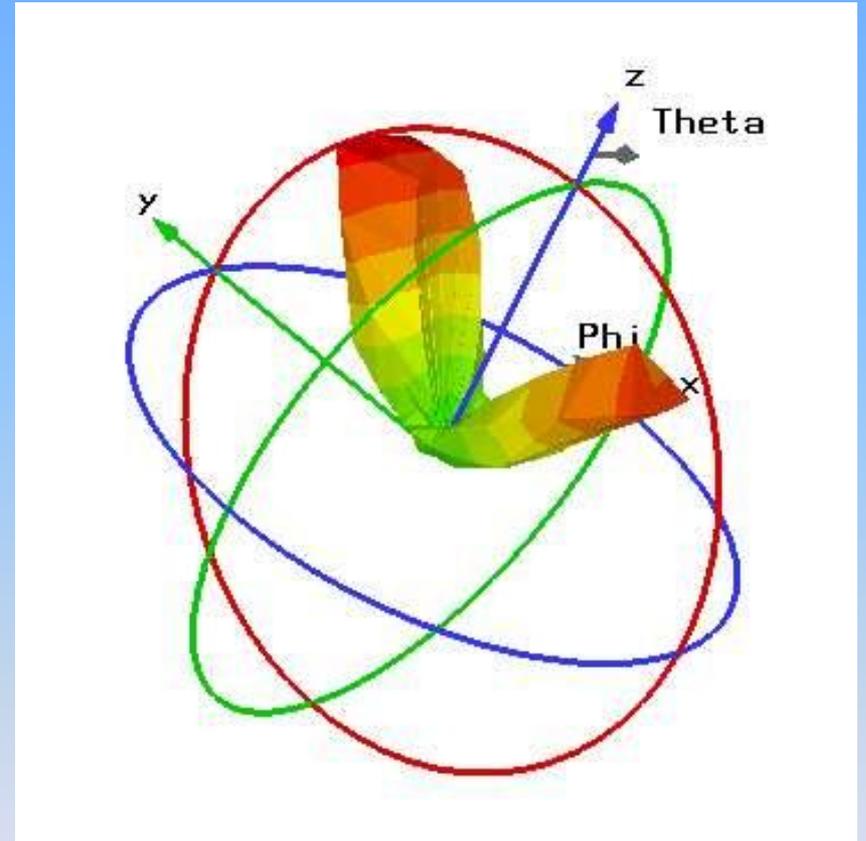
Distribution de courants



Lobes d'antenne

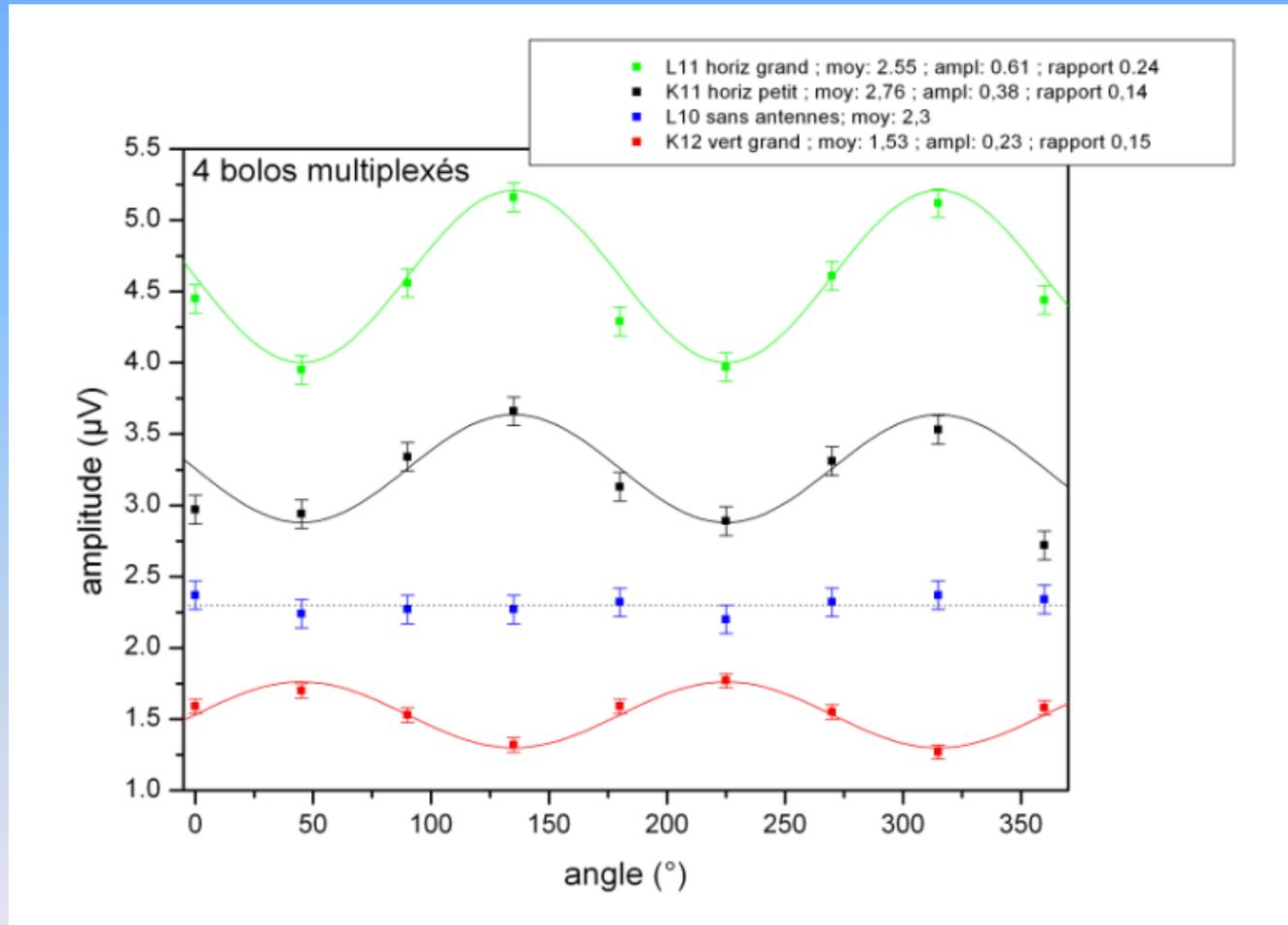


150 GHz (2 mm)



300 GHz (1 mm)

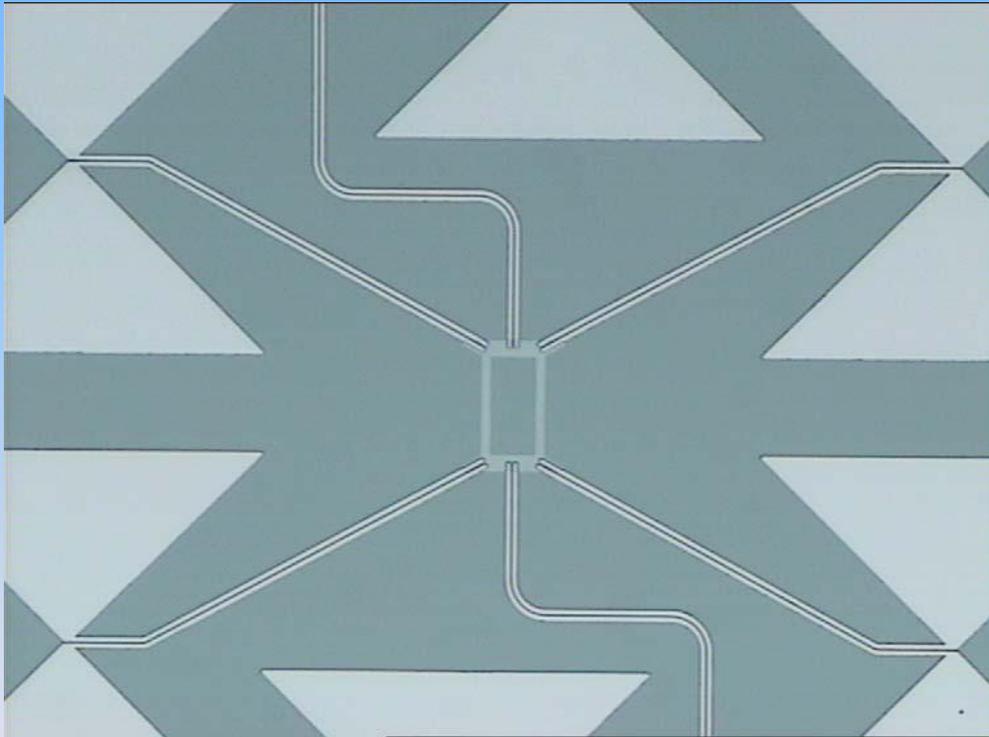
Réponse à la polarisation



(1 mm)

Couplage de plusieurs antennes

Diffraction $\sim F \cdot \lambda$
Antenne $\sim \lambda$



Sommation des puissance sur le même bolomètre

Antennes à fente (slot)

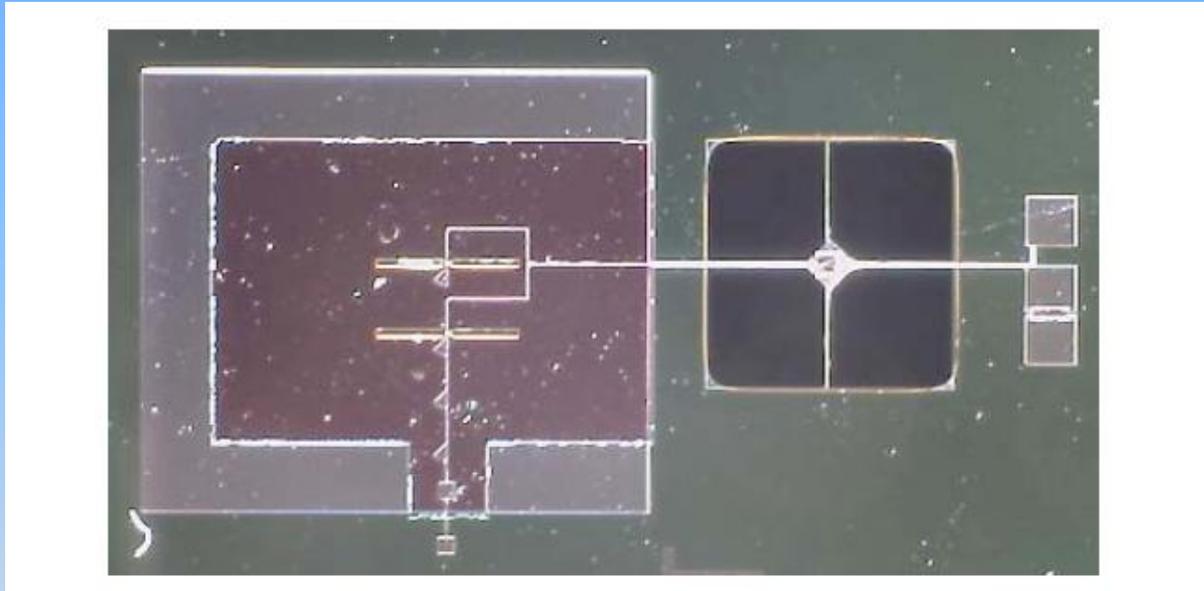


Figure 4: Single-element antenna-coupled TES bolometer, currently under development, consists of a dual slot antenna (at left) coupled to superconducting Nb microstrip. The microstrip passes over a suspended beam of silicon nitride to a termination resistor located on the thermally isolated diamond-shaped region. An Al/Ti/Au transition-edge superconductor, located near the termination resistor, is readout via superconducting Nb leads to contact pads located on the right-hand side.

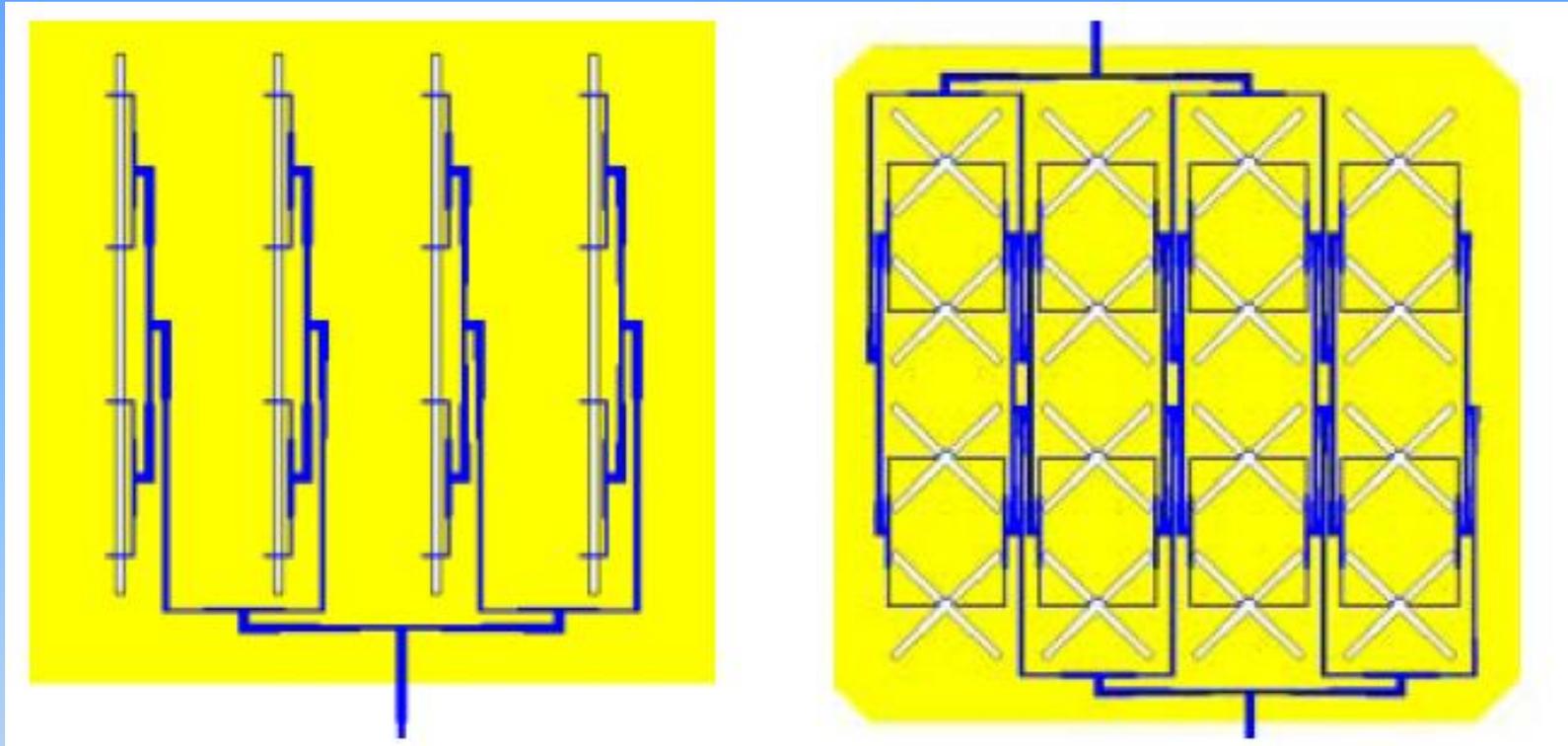
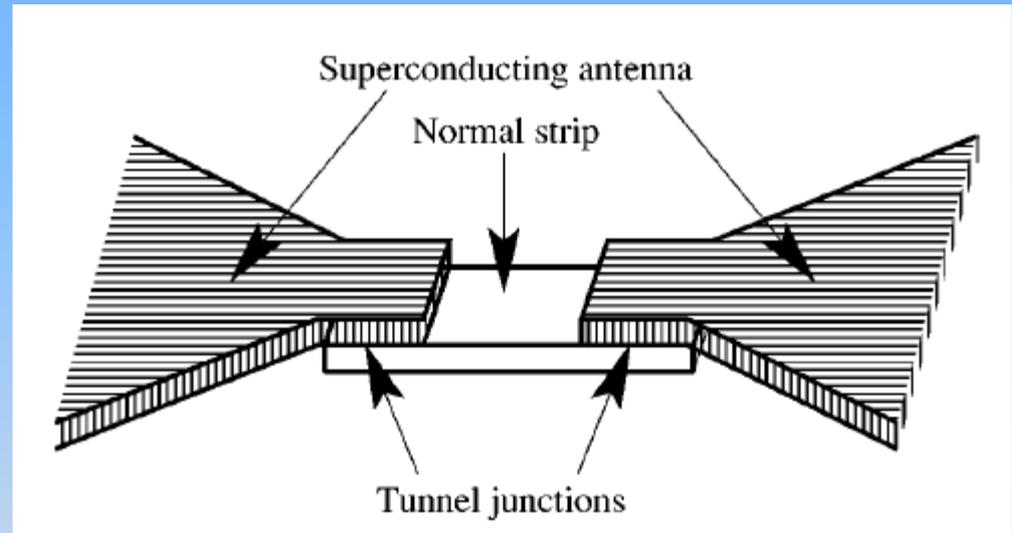
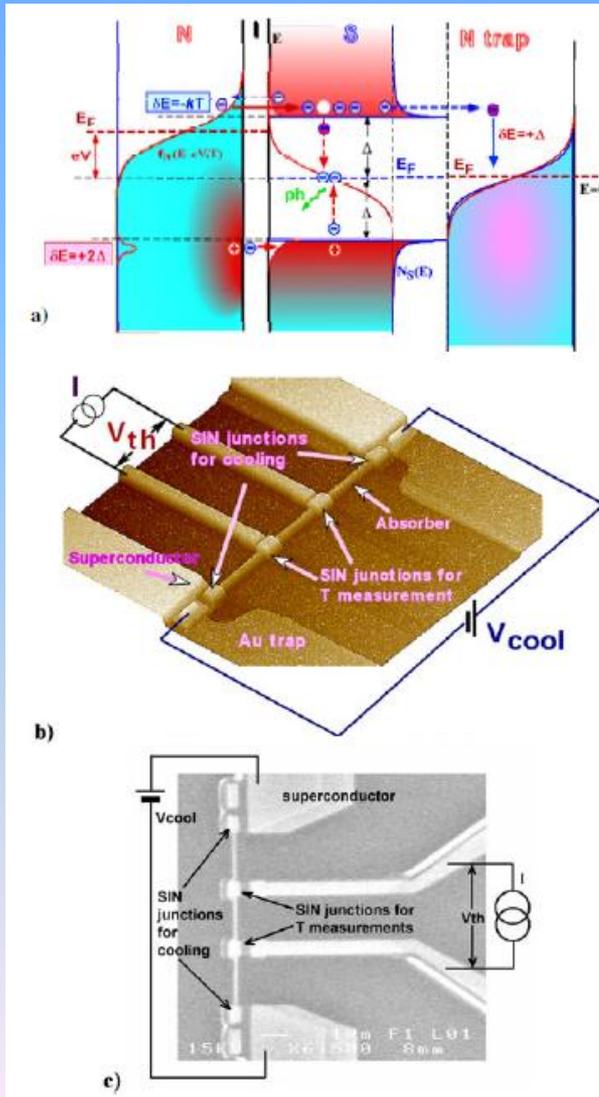


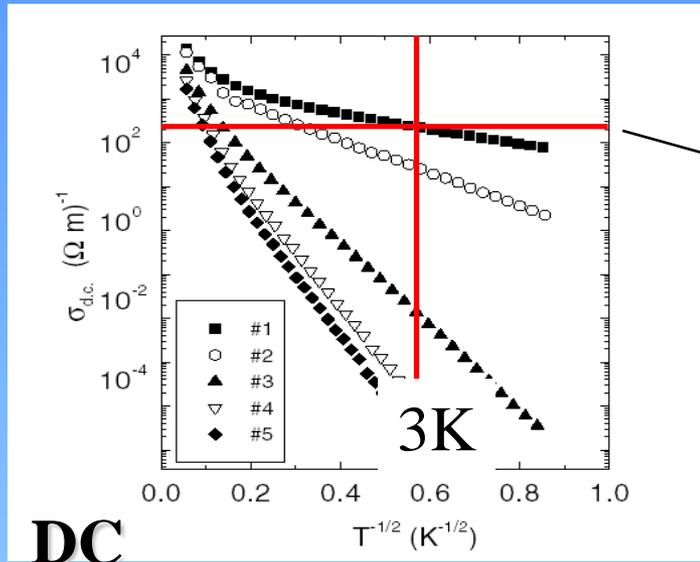
Figure 3: Two possible pixel geometries for antenna-coupled focal planes. (Left) Continuous slot-lines are tapped off and coherently summed in microstrip. The summing produces a useful antenna-pattern without lens coupling. The bandwidth of this arrangement is large, and multiple spectral bands can be obtained by diplexing the final microstrip line. (Right) A dual-polarization antenna sums both linear polarizations onto two striplines at the top and bottom.

Prospectives

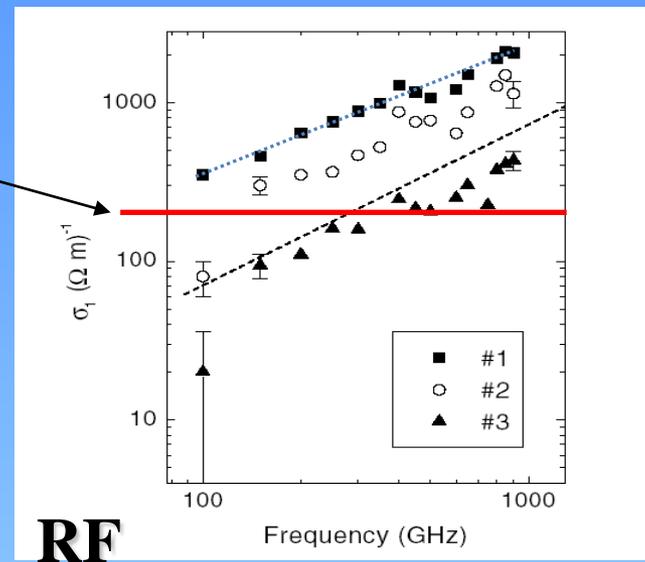


Cold Electron Bolometer, L. Kuzmin



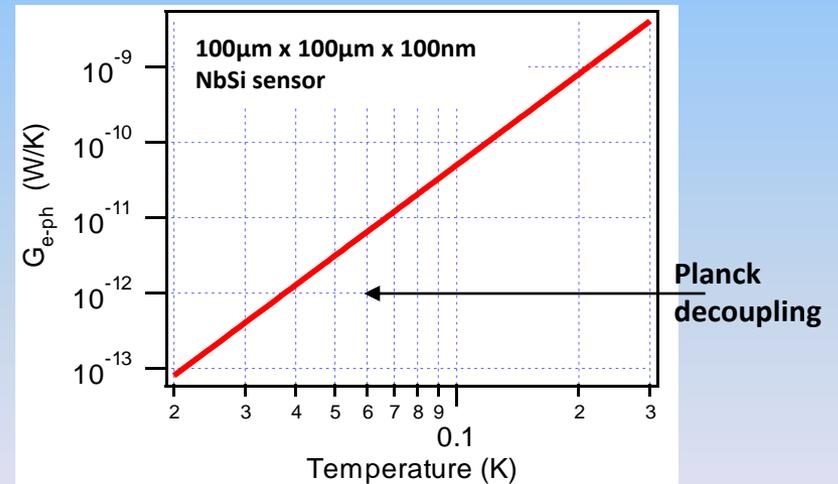
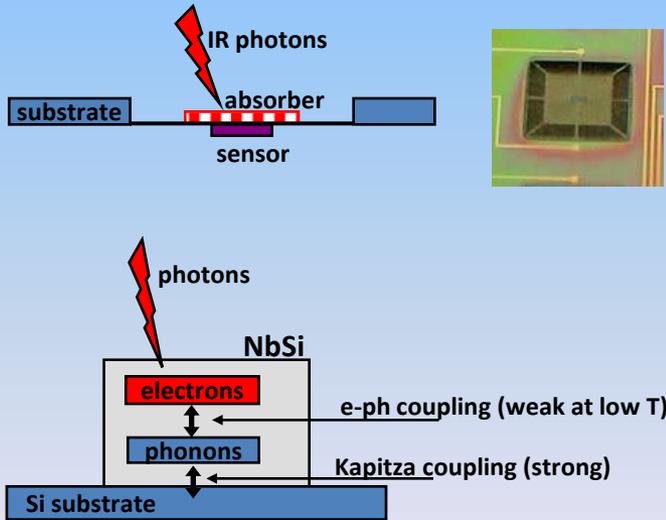


DC



RF

Helgren et al., PRL Vol. 87, Number 11 (2001)



$G_{e-ph} = 5gV T^4$. Cooling below 60mK is necessary to reduce electron-phonon coupling.

Superconducting and Anderson insulator NbSi sensors can be tailored for optimal photon absorption ($R_{sq} \sim 377\Omega$ at 1-10K). This is obtained by choosing the appropriate composition and thickness of the NbSi layers.