



HAL
open science

Détecteurs Cryogéniques

Damien Prêle

► **To cite this version:**

Damien Prêle. Détecteurs Cryogéniques. École thématique. DÉTECTION DE RAYONNEMENT À TRÈS BASSE TEMPÉRATURE - DRTBT, Aussois, France. 2018. hal-03767837

HAL Id: hal-03767837

<https://cel.hal.science/hal-03767837>

Submitted on 16 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détecteurs Cryogéniques

DÉTECTION DE RAYONNEMENT
À TRÈS BASSE TEMPÉRATURE

- ▶ *Cryogenic Particule Detectors* - B. Cabrera - CPAD2013
- ▶ *Supraconductivité* - L. Dumoulin - DRTBT2009
- ▶ *Le bolomètre résistif* - L. Rodriguez - DRTBT2009
- ▶ *Intro. to KIDs* - S. Doyle - DRTBT2012
- ▶ *Isolants d'Anderson* - S. Marnieros - DRTBT2009
- ▶ *Metallic Magnetic Calorimeters* - M. Rodrigues - DRTBT2012
- ▶ *Cryogenic Particle Detection* - Ch. Enss - Springer
- ▶ *Détecteurs bolo. refroidis* - P. de Marcillac - Detect. Mes. 2018
- ▶ *Principes des Bolomètres* - P. Camus - DRTBT2002
- ▶ *Direct détection : Bolomètres* - M. Piat - NTTI2009
- ▶ *Coherent systems for CMB* - M. Gervasi et al. - RS2006
- ▶ *Physical Principles of LTD* - C. Enss et al. - JLTP2008
- ▶ *Low Temp. Detectors: Principles & Ap.* - G. C. Hilton - LTD13
- ▶ *Les détecteurs TES* - D. Prêle - DRTBT2012
- ▶ *Superconductive bolo* - H. Kraus - SST1996
- ▶ *Super. Det. and Mix. mm Astro.* - J. Zmuidzinas - JPROC2004

Plan :

Détection Cryogénique

Généralités

Rayonnements

Détecteurs

Bolomètre

Thermomètre

Polarisation

Contre-réaction électro-thermique

Lecture et multiplexage

KID

Inductance cinétique

Kinetic Inductance Detector

Matrices de KID et multiplexage

Plan : Détection Cryogénique

Détection Cryogénique

Généralités

Rayonnements

Détecteurs

Bolomètre

Thermomètre

Polarisation

Contre-réaction électro-thermique

Lecture et multiplexage

KID

Inductance cinétique

Kinetic Inductance Detector

Matrices de KID et multiplexage

Détecteur



Transduction multiple :

- ▶ **filtrage** fréquence, temporel/trigger, champ de vue
- ▶ **guidage** grandeur initiale ou transport d'une grandeur intermédiaire
- ▶ **transposition** modulation, détection synchrone ou détection quadratique
- ▶ **Transductions multiples séries/successives** grandeurs intermédiaires
- ▶ **Transductions parallèles** discrimination, anti-coïncidence/veto, double échantillonnage corrélé

Cryogénie $T < \pm 20\text{K} \text{ à } 1\text{K}$

- ▶ faible bruit / rayonnement de fond
- ▶ physique des détecteurs (faible chaleur spécifique, supra, ...)

* Sub-K

Détection de Rayonnement *Électromagnétique*

Charge $q = 0$ et Masse $m = 0$; $E = hf$ et Impulsion $p = \frac{h}{\lambda}$

$$\left\{ \begin{array}{llll} f & [\text{Hz}] & = & c/\lambda & = & E/h & \approx & 4,965k_B T/h \\ \lambda & [\text{m}] & = & c/f & = & hc/E & \approx & hc/4,965k_B T \\ E & [\text{eV}] & = & hf & = & hc/\lambda & \approx & 4,965k_B T \\ T & [\text{K}] & = & hf/4,965k_B & \approx & hc/4,965k_B \lambda & \approx & E/4,965k_B \end{array} \right.$$

	fréquence f	longueur d'onde λ	Energie E	T
Radio	< 300 MHz	> 1 m	< 1 μeV	3 mK
μOnde	≈ 3 GHz	≈ 10 cm	≈ 10 μeV	30 mK
mm	≈ 300 GHz	≈ 1 mm	≈ 1 meV	3 K
↑		antennes possible		↑
IR	≈ 300 THz	≈ 1 μm	≈ 1 eV	3000 K
Visible	≈ 500 THz	≈ 600 nm	≈ 2 eV	5000 K
UV	≈ 1 PHz	≈ 300 nm	≈ 4 eV	10 000 K
↓		$\lambda \leq$ distance inter-atomique		↓
X	≈ 300 PHz	≈ 1 nm	≈ 1 keV	3 MK
γ	> 30 EHz	< 10 pm	> 100 keV	> 300 MK

$h \approx 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \approx 4,13 \times 10^{-15} \text{ eV/Hz}$ la constante de Planck

Astrophysique multi-longueurs d'onde



Détection cohérente vs quadratique

- ▶ Ondes radio ($< 100 \text{ GHz}$) \Rightarrow Détection cohérente (module et phase)
- ▶ IR et optique ($> 1 \text{ THz}$) \Rightarrow Détection quadratique (module au carré)

Limite de détection

- ▶ Détection cohérente :

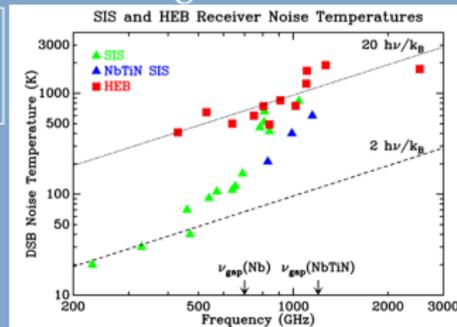
Mesure de l'amplitude et de la phase simultanément
+ Principe d'indétermination de Heisenberg

= limitation quantique $T_n = \frac{h\nu}{k_B}$

- ▶ Détection quadratique :

Mesure de la puissance efficace

\Rightarrow pas de limite fondamentale ... mais tjs des limites instrumentales



J. Zmuidzinas "The Role of Coherent Detection"

Exemple de limite de sensibilité à 300 GHz ($\lambda=1\text{ mm}$)

Observation d'un rayonnement thermique (corps noir) :

$$\text{Loi de Wien : } T \approx \frac{3 \cdot 10^{-3}}{\lambda=1\text{ mm}} = 3\text{ K}$$

λ typique pour l'observation du fond diffus cosmologique (rayonnement à 3K)

Limitation **quantique** des détecteur cohérent à 300 GHz

$$\text{Bruit quantique : } \frac{h\nu}{k_B} = 14\text{ K}$$

Limitation "**thermique**" d'un bolomètre

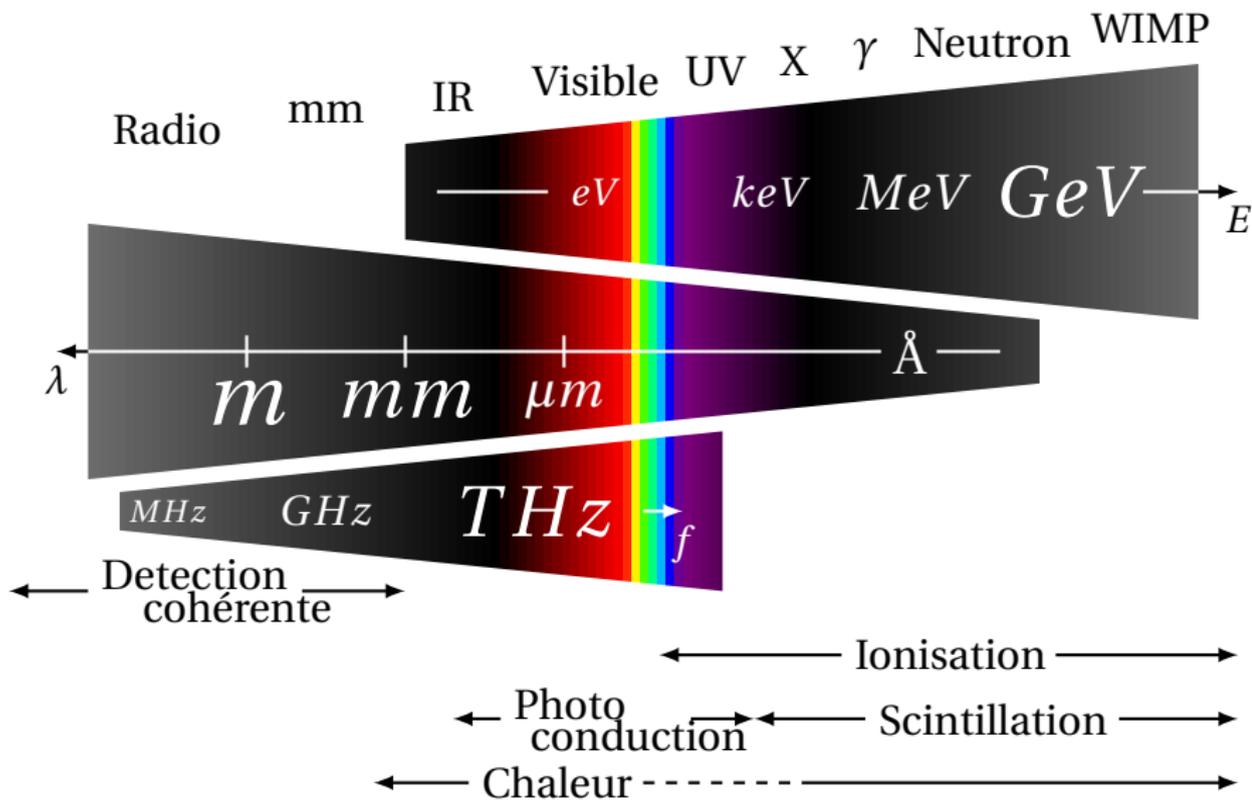
Contribution en bruit de l'environnement (background) et du détecteur
lui-même à la température T (bruit de phonon)

Température de fonctionnement $T \lesssim 300\text{ mK}$ (réduction du bruit de phonon des TES en $4k_B T^2 G$)
pour n'être limité que par l'environnement Background Limited Performances - BLIP

Détection de Rayonnement *Corpusculaire/Particulaire*

$$\text{Énergie relativiste } E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \text{ et Impulsion } p = \frac{mv}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

	Charge q	Masse m	"Taille"
Axion (?)	0	? < 1 meV	
Neutrino électronique	0	< 2,5 eV/c ²	
Neutrino muonique	0	< 170 eV/c ²	
Neutrino tauique	0	< 18 MeV/c ²	
Neutron	0	≈ 940 MeV/c ²	
WIMP (?)	0	? 1-1000 GeV/c ²	
...			
e ⁻ (β ⁻)	-e	≈ 511 keV/c ²	≈ 1 am
positron (β ⁺)	+e	≈ 511 keV/c ²	
Muon	-e	≈ 106 MeV/c ²	
Proton	+e	≈ 940 MeV/c ²	≈ 1 fm
Ion ⁴ He ²⁺ (α)	2e	≈ 3,7 GeV/c ²	≈ 1 fm
...			

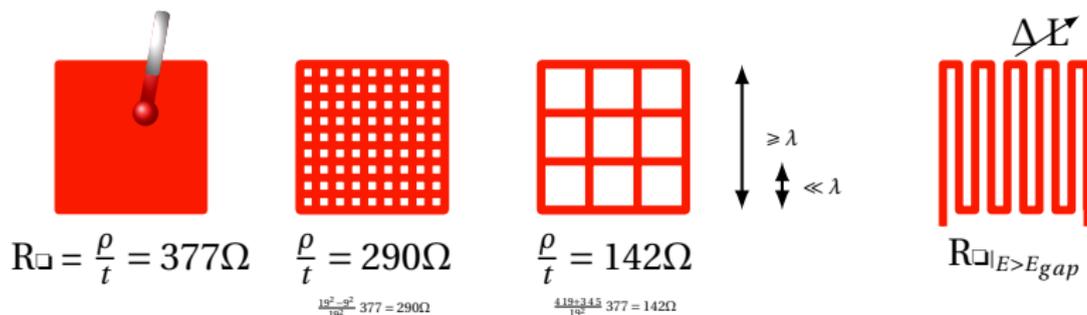


Couplage avec la radiation

- ▶ **Guidage / Directivité** (téléscope, lentille, collimateur, Lyot-stop, antenne)



- ▶ **Filtrage** (coplanaire, optique, dichroïque, blindage ...)
- ▶ **Dissipation / Absorption / Cible** (onde TEM \rightarrow 377Ω)



Détecteurs Cryogenics

Détecteurs thermiques / *equilibrium detectors* ($Excitations \approx k_B T$)

Bolomètre/Calorimètre/HEB

- ▶ semi-conducteur
- ▶ supra-conducteur (TES)
- ▶ magnétique (MMC)

Détecteurs athermiques / *non-equilibrium detectors* ($Excitations > k_B T$)

- ▶ Inductance Cinétique
 - ▶ LEKID
 - ▶ MKID
- ▶ Heterodyne (non-quadratique)
 - ▶ mixer/SIS/SNS
- ▶ Nanofil supraconducteur (SNSPD)

Détecteurs Cryogenics (sub-Kelvin)

Détecteurs thermiques / *equilibrium detectors* ($Excitations \approx k_B T$)

Bolomètre/Calorimètre/HEB

- ▶ semi-conducteur
- ▶ supra-conducteur (TES)
- ▶ magnétique (MMC)

Détecteurs athermiques / *non-equilibrium detectors* ($Excitations > k_B T$)

- ▶ Inductance Cinétique
 - ▶ LEKID
 - ▶ MKID
- ▶ Heterodyne (non-quadratique)
 - ▶ mixer/SIS/SNS
- ▶ Nanofil supraconducteur (SNSPD)

Plan : Bolomètre

Détection Cryogénique

Généralités

Rayonnements

Détecteurs

Bolomètre

Thermomètre

Polarisation

Contre-réaction électro-thermique

Lecture et multiplexage

KID

Inductance cinétique

Kinetic Inductance Detector

Matrices de KID et multiplexage

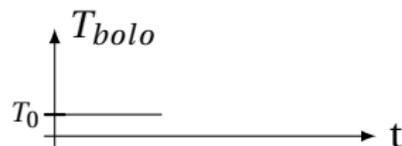
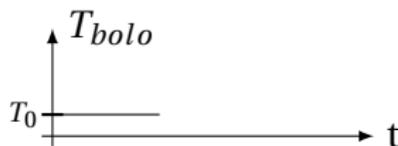
Principe du bolomètre

"background" / flux de photon

photons > eV / particules

C, T_{bolo} 

C, T_{bolo} 

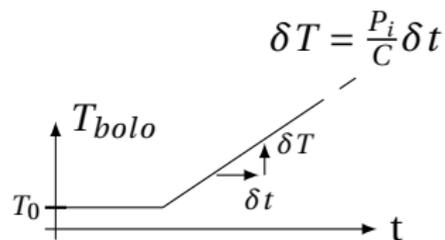
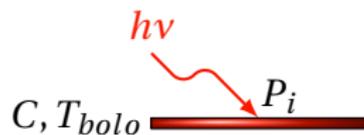


Soit un absorber à une température de référence $T = T_0$

C capacité calorifique [J/K]; G conductance thermique [W/K]; T_{bolo} Température d'équilibre [K]; T_{bain} Température de bain [K]; E Energie déposée [J]; P_i Puissance incidente [W]; P_J Puissance dissipée par effet Joule [W]

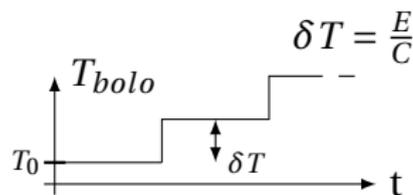
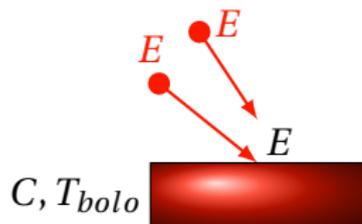
Principe du bolomètre

"background" / flux de photon



$$\delta T = \frac{P_i}{C} \delta t$$

photons > eV / particules



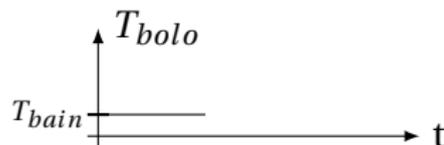
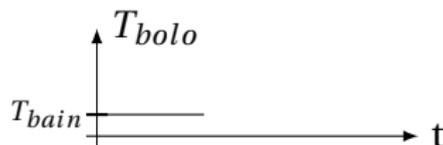
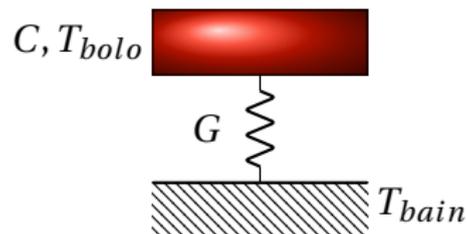
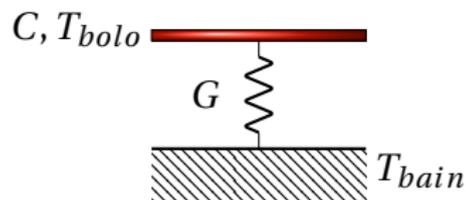
$$\delta T = \frac{E}{C}$$

C capacité calorifique [J/K]; G conductance thermique [W/K]; T_{bolo} Température d'équilibre [K]; T_{bain} Température de bain [K]; E Energie déposée [J]; P_i Puissance incidente [W]; P_j Puissance dissipée par effet Joule [W]

Principe du bolomètre

"background" / flux de photon

photons > eV / particules

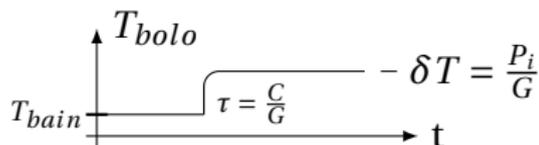
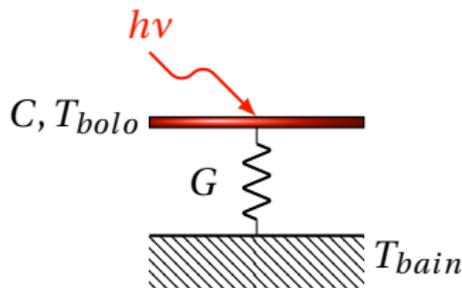


Température de référence = bain thermique $\rightarrow T_0 = T_{bain}$

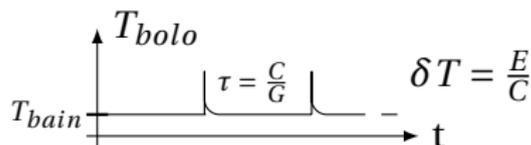
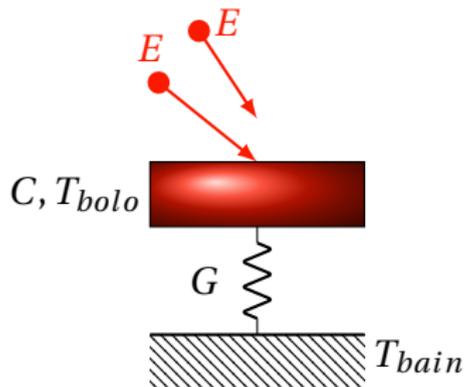
C capacité calorifique [J/K]; G conductance thermique [W/K]; T_{bolo} Température d'équilibre [K]; T_{bain} Température de bain [K]; E Energie déposée [J]; P_i Puissance incidente [W]; P_J Puissance dissipée par effet Joule [W]

Principe du bolomètre

"background" / flux de photon



photons > eV / particules

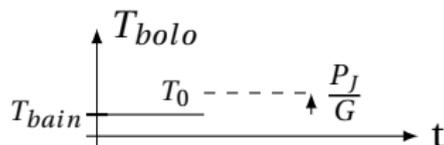
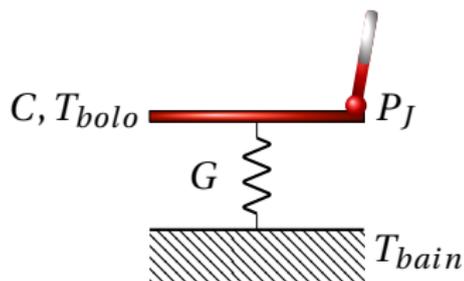


Constante de temps naturel du bolomètre $\rightarrow \tau = \frac{C}{G}$

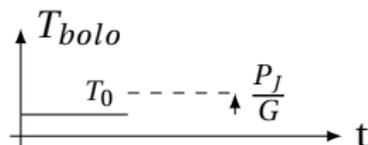
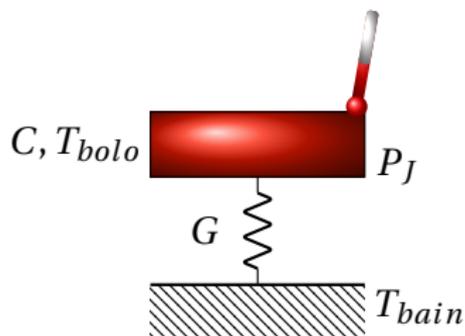
C capacité calorifique [J/K]; G conductance thermique [W/K]; T_{bolo} Température d'équilibre [K]; T_{bain} Température de bain [K]; E Energie déposée [J]; P_i Puissance incidente [W]; P_j Puissance dissipée par effet Joule [W]

Principe du bolomètre

"background" / flux de photon



photons > eV / particules



Température de référence > bain thermique $\rightarrow T_{bolo} - T_{bain} = \frac{P_J}{G}$

C capacité calorifique [J/K]; G conductance thermique [W/K]; T_{bolo} Température d'équilibre [K]; T_{bain} Température de bain [K]; E Energie déposée [J]; P_i Puissance incidente [W]; P_J Puissance dissipée par effet Joule [W]

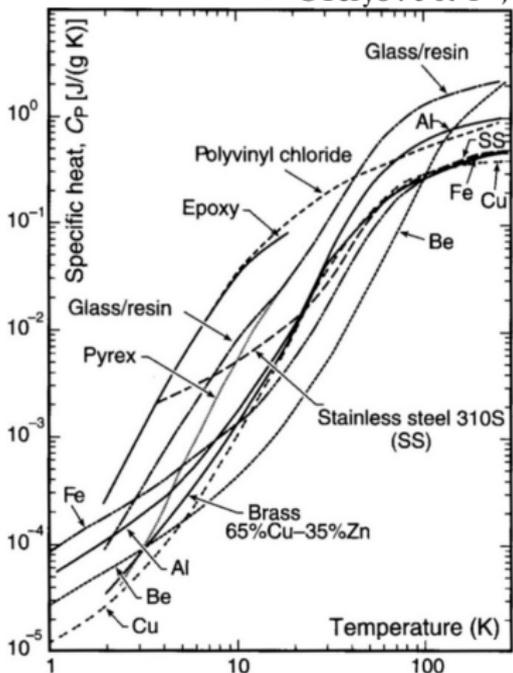
Refroidir pour mieux Chauffer

$$\delta T \rightarrow \frac{E}{C} = \frac{E}{mc}$$

Chaleur spécifique c [J/gK]

$\div 10$ @ 77K $\div 1000$ @ 4K

@Tcryo: $c \propto T^3$; $c_{\text{metaux}} \propto T$



"sensitivity of calorimetric can be increased by many orders of magnitude by working at very low T"

Application of Low Temperature Calorimetry to Radioactive Measurements

It is often of importance to determine in absolute measure energy changes connected with radioactive transformations, but only in a few cases has it been possible to employ calorimetric methods for this purpose, since in general the amounts of energy liberated in unit time are too small. The sensitivity of calorimetric measurement can be increased, however, by many orders of magnitude by working at very low temperatures, and it may be worth while to point this out, as low temperature technique is now within the reach of non-specialised laboratories.

Consider a calorimeter consisting of lead. At a temperature of 1.3°K, which can easily be obtained with liquid helium, its specific heat is 3.000 times smaller than at room temperatures. So the calorimetric sensitivity is increased by this factor if we

MAY 4, 1935 NATURE 763

take the temperature sensitivity as constant. Using a substance like tungsten, with a higher θ_{Debye} , one can increase this factor still further by one power of 10. If one wishes to measure the heat developed with an accuracy of 1 per cent, the temperature must be allowed to change by $1/10^4$, assuming that the measuring sensitivity is $1/10,000^2 = 1/10,000^2$. The effect can be accumulated over a period of at least ten minutes, as at very low temperatures the thermal insulation can be made nearly perfect, owing to the lack of radiation. Thus, using a calorimeter consisting of 1 cm³ of tungsten, one could measure 10^{11} cal./sec., which is about 1,000 times more sensitive than in the calorimeter of Meitner and Orthmann¹. So, for example, the total heating effect of 10^{10} g. of radium situated within the calorimeter could be determined, or the heating caused by the γ -rays from a source of 0.1 milligram of radon placed 3 cm. away from the calorimeter.

Cooling the calorimeter below 1° by the magnetic procedure, one can diminish still further the specific heat of the absorbing substance, and at the same time the sensitivity of the temperature measurement is considerably increased by heating it on the susceptibility of the paramagnetic salt, for, in the region where the Curie law holds, the accuracy of temperature measurement is proportional to $1/T^2$. With a substance obeying the T^3 law for the specific heat, therefore, the sensitivity of this method increases with falling temperature with T^4 .

The specific heat of a paramagnetic salt, however, does not follow the T^3 law, as its specific heat must necessarily be discontinuous in temperature.² No great increase in sensitivity could therefore be achieved below 1° by working with a calorimeter consisting of the salt alone. But of course, this does not apply to an appropriate combination of the paramagnetic salt and an absorbing substance of non-anomalous specific heat.

In some preliminary experiments carried out during the past few weeks, Dr. Kirti and I nevertheless worked with the unfavourable case of the salt alone in order to be able to use our ordinary apparatus for magnetic cooling³. We took 1 gm. of iron ammonium alum and cooled it down to 0.45°, which in this case was an advantage solely because of the improved thermal insulation⁴. In spite of the very small absorption coefficient of the substance for γ -rays, and the comparatively low thermometric sensitivity of this particular apparatus, a rise of temperature set in immediately after the substance had been exposed to the γ -radiation of 100 milligrams of radon at a distance of 2.5 cm. (This turned out to be a very convenient way for measuring the specific heat of the salt and we will report soon on the results.) Even in this unfavourable case, we could measure 10^{10} cal./sec., and it should be possible to measure, in a volume of about 1 cm³, an evolution of heat of the order of 10^{11} cal./sec., by using a suitable absorbing substance in combination with the paramagnetic salt and improving the sensitivity of the temperature determination.

With such increased sensitivity, various problems can be attacked, and experiments in this direction are in progress at the Charendon Laboratory.

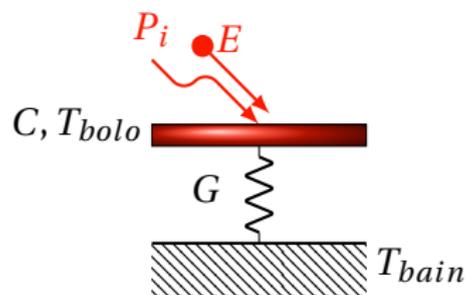
F. SIMOS.

Charendon Laboratory,
Oxford.
March 28.

¹ L. Meitner and W. Orthmann, Z. Phys., **60**, 243; 1930.

² S. Kirti and F. Simos, Proc. Exp. Sec., **3**, 160, 152; 1935.

Bruits intrinsèques



- ▶ P_i [W] → Puissance incidente (de l'onde)
- ▶ E [J] → Energie déposée (par une particule)
- ▶ C [J/K] → Capacité calorifique du dissipateur couplé au thermomètre
- ▶ T_{bolo} [K] → Température du bolomètre
- ▶ G [W/K] → Conductance thermique
- ▶ T_{bain} [K] → Référence de température

- ▶ Calorimetre $\Delta T = P_i / G$

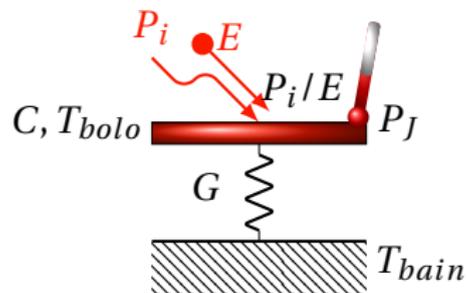
Fluctuations d'Energie : $\Delta E_{rms} = \sqrt{k_B T^2 C}$ [J]

- ▶ Bolometre $\Delta T = E / C$

Bruit thermodynamique : $NEP = \sqrt{4k_B T^2 G}$ [W/ \sqrt{Hz}]

☞ travailler à basse température

Bolomètre = Transducteur P ou E \rightarrow T



- ▶ P_i [W] \rightarrow Puissance incidente (de l'onde)
- ▶ E [J] \rightarrow Energie déposée (par une particule)
- ▶ P_J [W] \rightarrow Puissance dissipée par effet Joule dans le thermomètre
- ▶ C [J/K] \rightarrow Capacité calorifique du dissipateur couplé au thermomètre
- ▶ T_{bolo} [K] \rightarrow Température du bolomètre
- ▶ G [W/K] \rightarrow Conductance thermique
- ▶ P_b [W] \rightarrow Puissance de fuite
- ▶ T_{bain} [K] \rightarrow Référence de température

Conversion P \rightarrow T $P_i + P_J - G(T_{bolo} - T_{bain}) = C \frac{\partial T}{\partial t}$

ou E \rightarrow T $\frac{\partial E}{\partial t} + P_J - G(T_{bolo} - T_{bain}) = C \frac{\partial T}{\partial t}$

Constante de temps naturel du bolomètre

$$\tau = \frac{C}{G}$$

Thermomètre = Transducteur T → grandeur mesurable

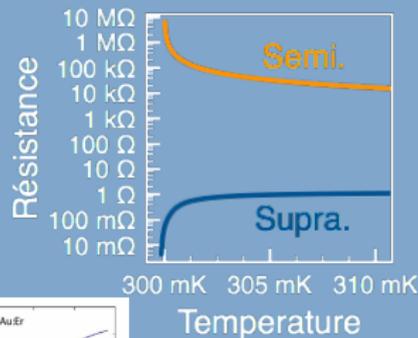
▶ Résistive (thermistors)

Semi. Haute impédance [$\gg 100 \text{ k}\Omega$]

- ▶ Semi. Dopé NTD
- ▶ Alliage $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ avec $x < 9\%$

Supra TES / Basse impédance [$< 1 \Omega$]

- ▶ Alliage $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$ avec $x > 13\%$
- ▶ MultiCouches Mo-Cu, Mo-Au ...



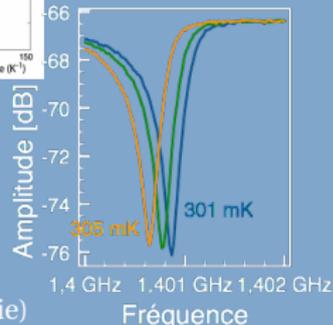
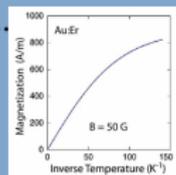
▶ Magnétique (MMC)

variation aimantation fonction de T
Alliage paramagnétique (orientation des spins d'ions)

Ions Terres rares : Er^{3+} , Eu^{3+} , Sm^{3+} , Yb^{3+} ...

Matrice Métallique Au, Ag ... ou isolant TmAG ...

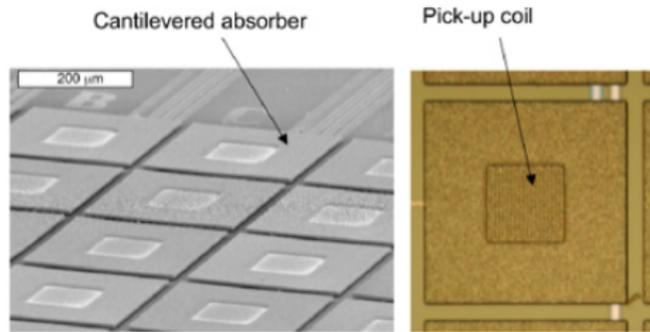
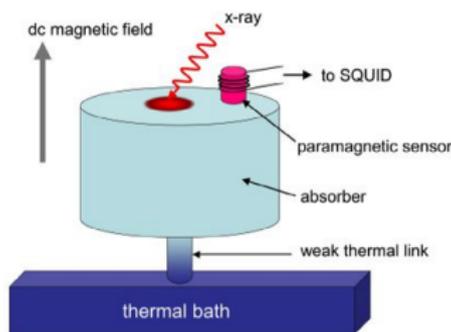
Exemple : Au:Er (or-erbium) [MMC - M. Rodrigues - DRTBT2012]



▶ Inductif → KID "athermique" (Cf deuxième partie)

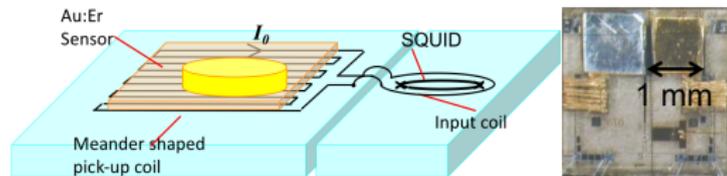
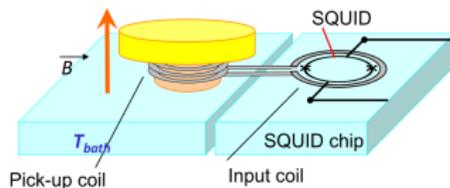
Bolomètre magnétique / Calorimètre magnétique

$1 \mu\text{m}$ Au:Er thermomètre + Absorber X (bismuth-gold bi-couches "en porte à faux")



S. Bandler - GSFC - Magnetic calorimeter arrays for x-ray astronomy - SPIE2010 DOI: 10.1117/2.1201002.002620

Champ magnetic externe ν s meandre

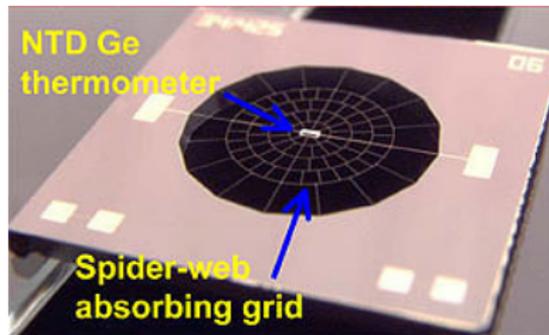


M. Rodrigues - LNE-LNHB-CEA - Metallic Magnetic Calorimeters - DRTBT2012

Bolomètre résistif

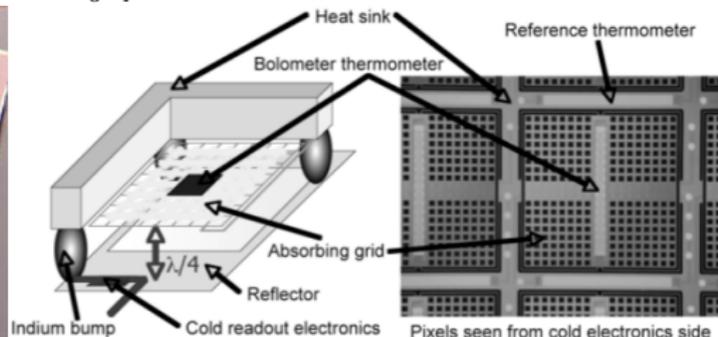
Bolomètre "Spider web" (JPL)

Thermomètre NTD / Absorbeur mm : Or sur Nitrure de Silicium (Si_3N_4)

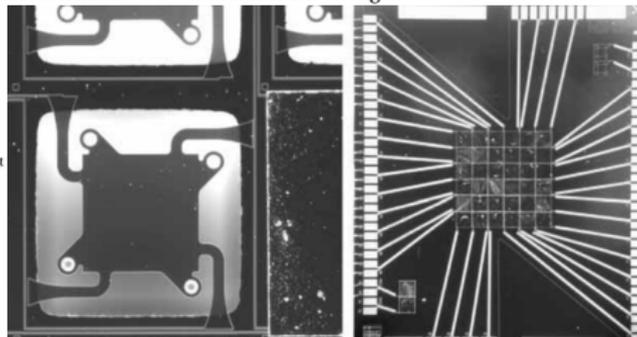
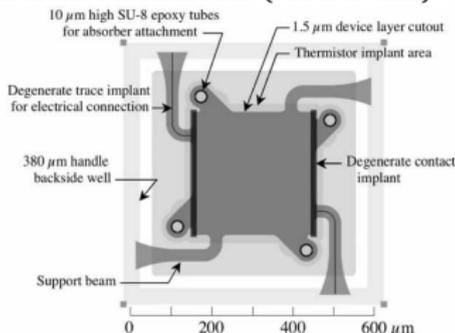


Matrice Pacs (CEA)

Thermomètre Si:P:B / Absorbeur submm



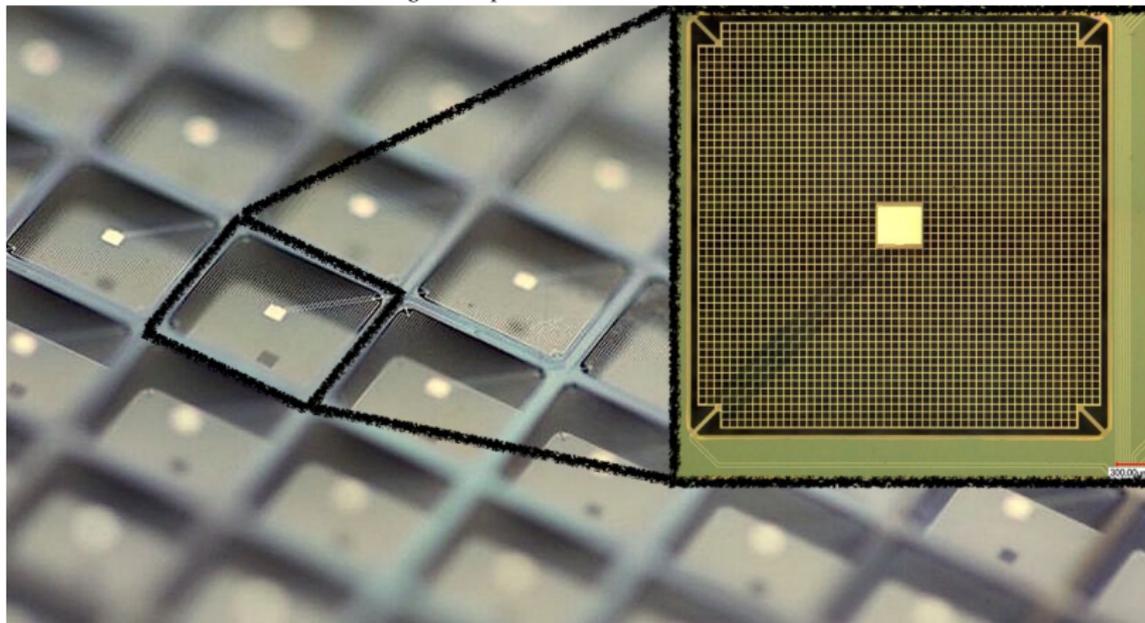
XRS instrument (Astro-E2) Thermomètre NTD Ge / Absorbeur X : HgTe



Bolomètre supraconducteurs *mm field array*

Transition-Edge Sensor - TES *mm* [QUBIC - APC/CSNSM/C2N...]

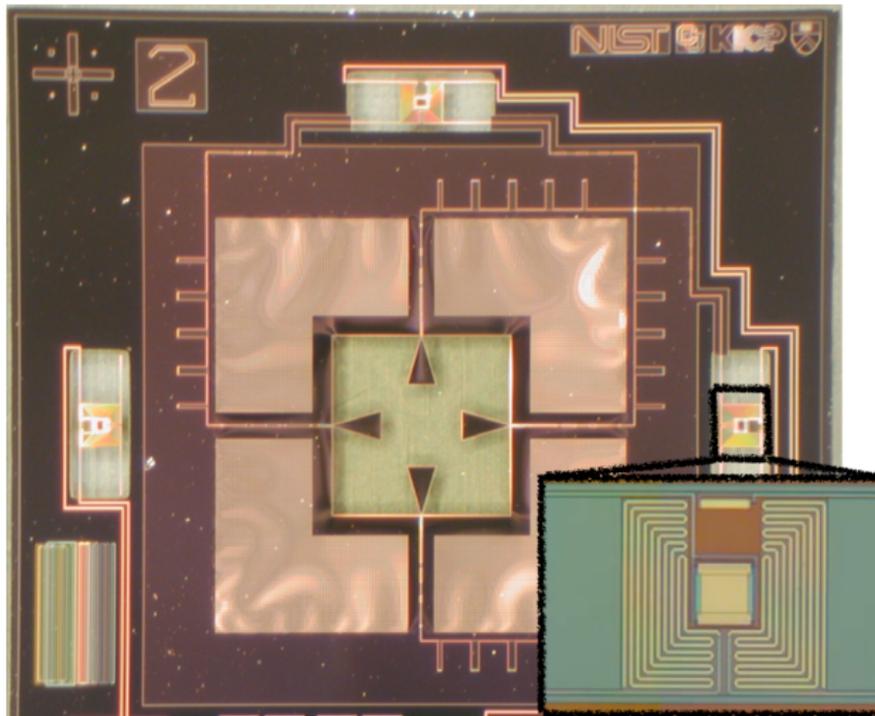
Thermomètre TES NbSi / Absorbeur *mm* : grille suspendue en Palladium Pd



Bolomètre supraconducteurs *mm* + Antenne

Transition-Edge Sensor - TES *mm*/150GHz [SPT_{po1}]

Thermomètre TES Mo/Cu bi-couches sur membrane SiN / Antenne : OMT Nb/NbO + Filtres microstrip

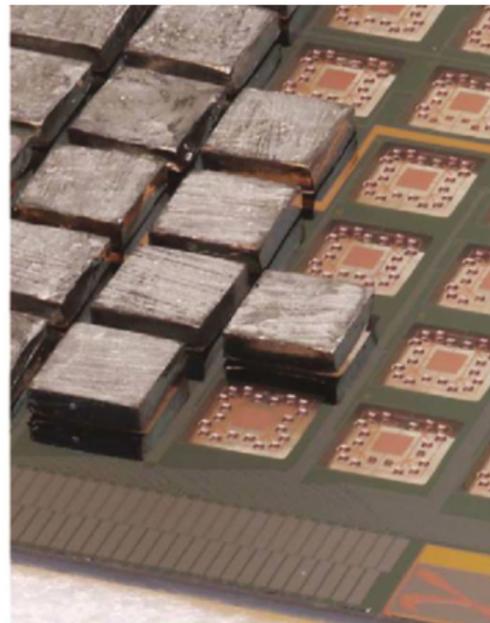
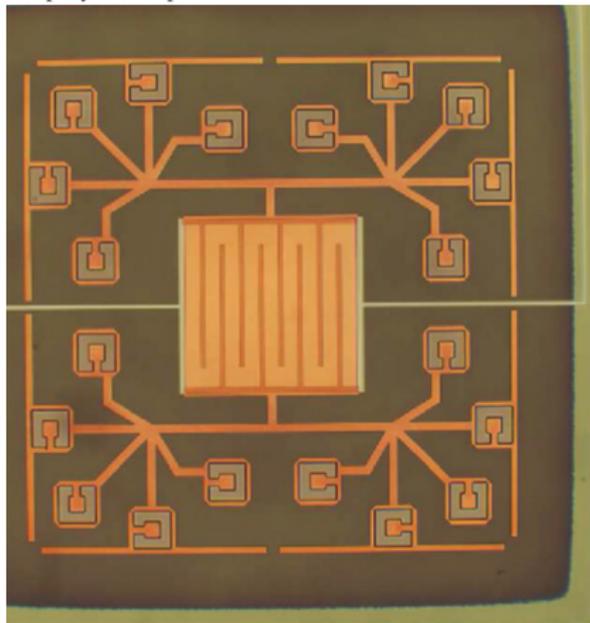


Bolomètre supraconducteurs γ

Calorimètre/Spectroscopie γ [TES γ - Ullom/Bennett - NIST]

Thermomètre TES cuivre/molybdène Mo/Cu bi-couche sur membrane Si_3N_4 / Absorbeur γ : étain supraconducteur collé

à l'Epoxy sur des pistes normales



Bolomètre résistif + charge + lumière

Cuoricino

Double beta decay

Thermomètre NTD Ge/ Absorber TeO_2

Edelweiss

Détection direct de matière noire

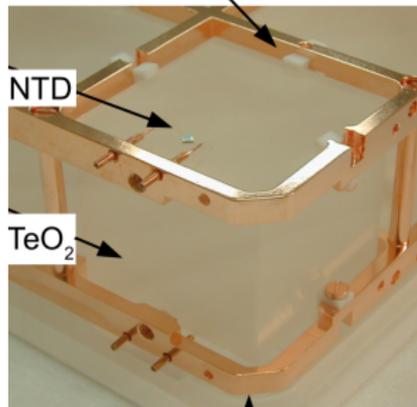
Thermo. NTD / Abs. Ge + Electrodes

Rosebud

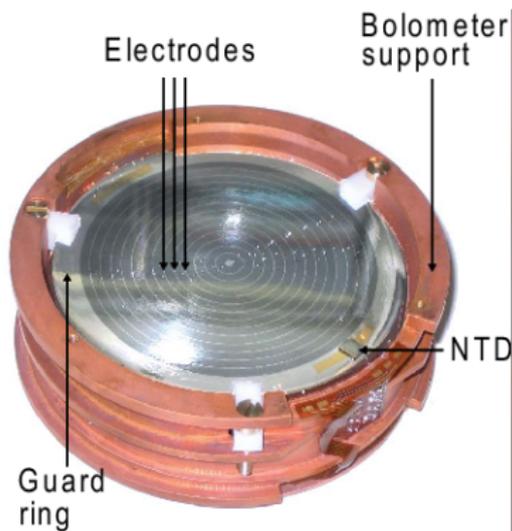
Détection directe de la matière noire

Thermo. NTD Ge / Abs. Ger.+BGO

Thermal conductance: PTFE



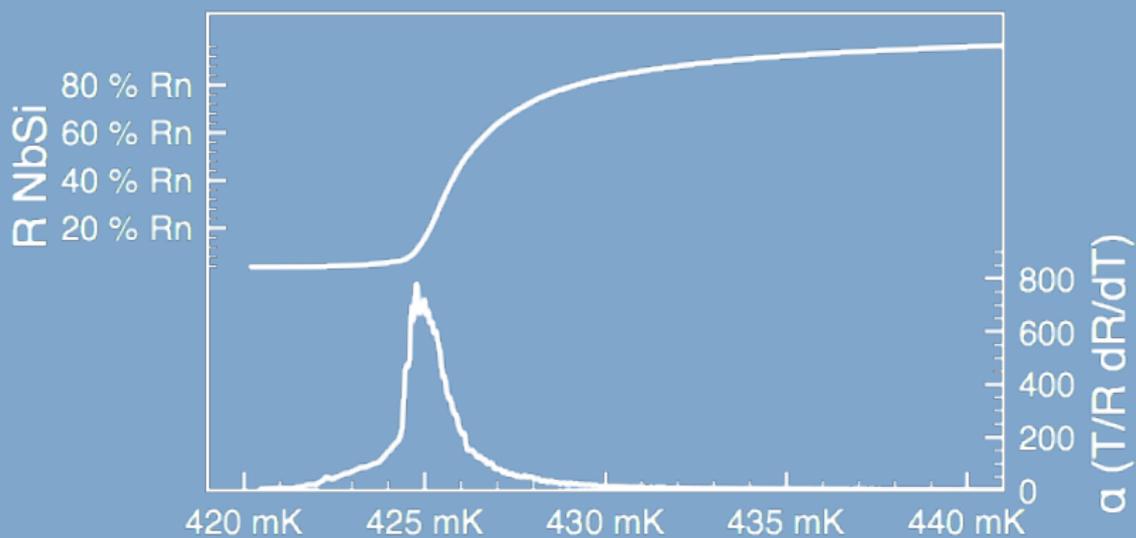
Heat bath: OFHC Copper



Sensibilité "adimensionnelle" du thermomètre

$$R(T) \approx R_0 + \frac{\partial R}{\partial T} \delta T = R_0 + \alpha \frac{R_0}{T_0} \delta T$$

$$\alpha = \frac{\partial \log R}{\partial \log T} = \frac{T_0}{R_0} \frac{\partial R}{\partial T}$$

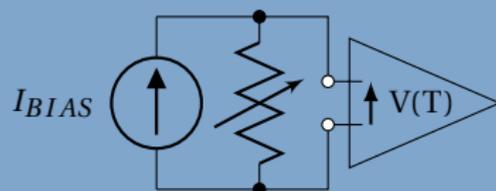


Polarisation d'un bolomètre résistif

On polarise le thermomètre résistif afin de bénéficier d'un **signal électrique** image de la variation de résistance et donc de la variation de température.

Il existe deux méthodes simples de polarisation

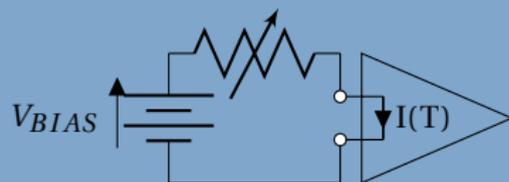
1. Polarisation en courant



Lecture en tension

$$V(T) = R(T) \times I_{BIAS}$$

2. Polarisation en tension

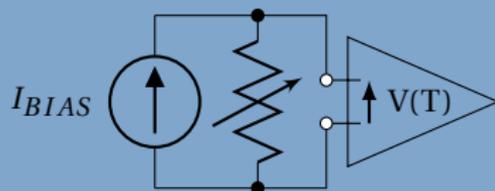


Lecture en courant

$$I(T) = V_{BIAS} / R(T)$$

Polarisation en courant

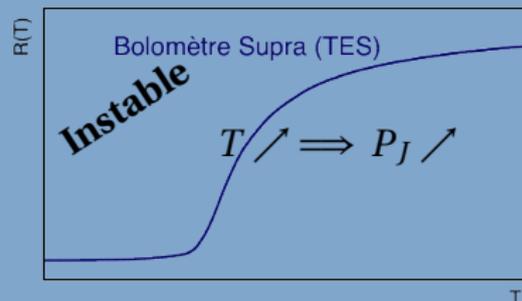
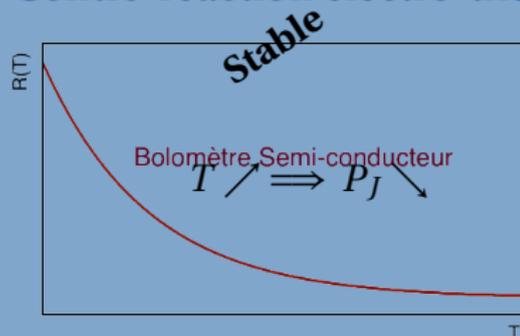
Polarisation en courant de bolomètre résistif



$$V(T) = R(T) \times I_{BIAS}$$

$$P_J(T) = R(T) \times I_{BIAS}^2$$

Contre-réaction électro-thermique



Polarisation en tension

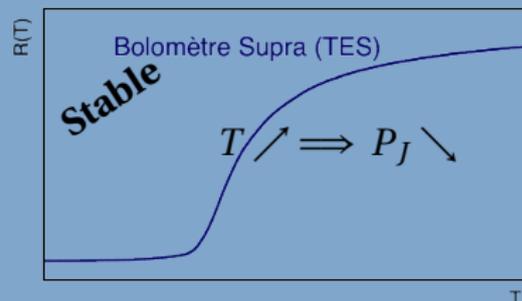
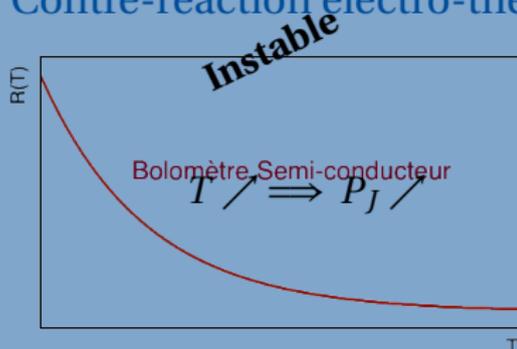
Polarisation en tension de bolomètre résistif



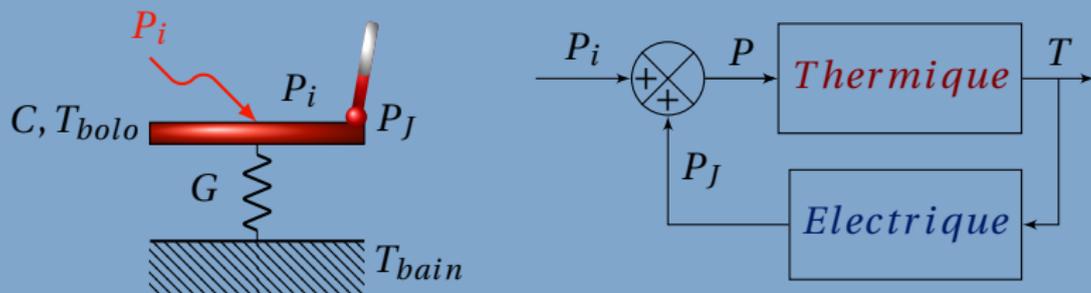
$$I(T) = V_{BIAS} / R(T)$$

$$P_J(T) = V_{BIAS}^2 / R(T)$$

Contre-réaction électro-thermique



Contre-réaction électro-thermique - ETF



Gain de boucle de la contre-réaction : $\mathcal{L} = \frac{\partial T}{\partial P} \frac{\partial P_J}{\partial T} = \frac{P_J \alpha}{G T_{bololo}}$

$\frac{\partial T}{\partial P}$ - fonction de transfert Thermique du bolomètre $\frac{1}{G_d} \frac{1}{1+j\omega\tau}$

$\frac{\partial P_J}{\partial T}$ - fonction de transfert Electrique du bolomètre

En forte contre réaction électro-thermique (TES polarisé en tension et $|\mathcal{L}|$ tres grand)

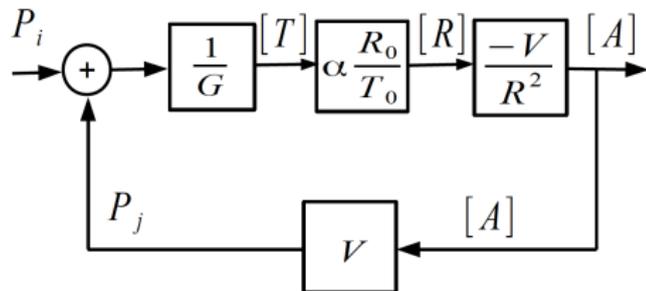
la fonction de transfert $\frac{\partial T}{\partial P} \approx \frac{1}{\mathcal{L}G} \frac{1}{1+j\omega\frac{\tau}{\mathcal{L}}} \rightarrow 0$

En cas de forte ETF, le thermomètre empêche la température de varier

Sensibilité du TES

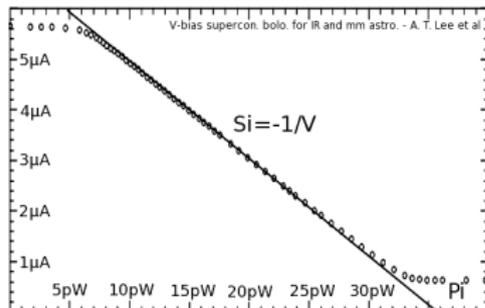
TES polarisé en tension

$V = \text{cst}$



Sensibilité $S_I = \frac{\partial I}{\partial P} = \frac{\partial T}{\partial P} \frac{\partial R}{\partial T} \frac{\partial I}{\partial R}$ du TES

$$S_I \lim_{\mathcal{L} \rightarrow \infty} \rightarrow \frac{1}{\mathcal{L}G} \frac{1}{1+j\omega\frac{\tau}{\mathcal{L}}} \times \alpha \frac{R}{T} \times \frac{-V}{R^2} = \frac{-1}{V} \frac{1}{1+j\omega\frac{\tau}{\mathcal{L}}} \quad [\text{A/W}]$$

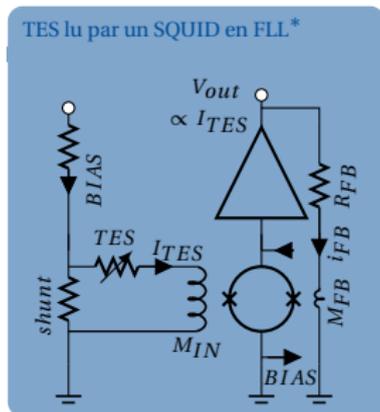


- ▶ $S_I = \frac{\partial I}{\partial P}$ linéaire et indépendant du TES
- ▶ $\tau_{eff} = \text{constante de temps accélérée} \Rightarrow$ Bande passante ↗

Lecture en courant des TES

Le circuit de lecture du TES doit assurer la **polarisation en tension** du TES et sa **lecture en courant**.

Le SQUID *Superconducting Quantum Interference Device* permet une lecture en courant du TES sans résistance d'entrée.



1. Amplificateur de courant (trans-impédance $I \rightarrow V$)
2. Réactance nulle \Rightarrow Polarisation en tension
3. Fonctionne jusqu'à $\approx 0K$
4. Multiplexage possible (marge de bruit et de bande passante)

La caractéristique périodique du SQUID est linéarisée par une boucle de contre-réaction qui fixe le **gain de la chaîne de lecture** à

$$\frac{M_{IN}}{M_{FB}} R_{FB}$$

Plan : KID

Détection Cryogénique

Généralités

Rayonnements

Détecteurs

Bolomètre

Thermomètre

Polarisation

Contre-réaction électro-thermique

Lecture et multiplexage

KID

Inductance cinétique

Kinetic Inductance Detector

Matrices de KID et multiplexage

Inductance cinétique alternative à la mesure de la température pour la détection quadratique $\ll T_C$

Inductance cinétique

Apparaît dans les couches minces supraconductrices où les **paires de Cooper atteignent de très grandes vitesses** (✓ temps entre "collisions" τ)

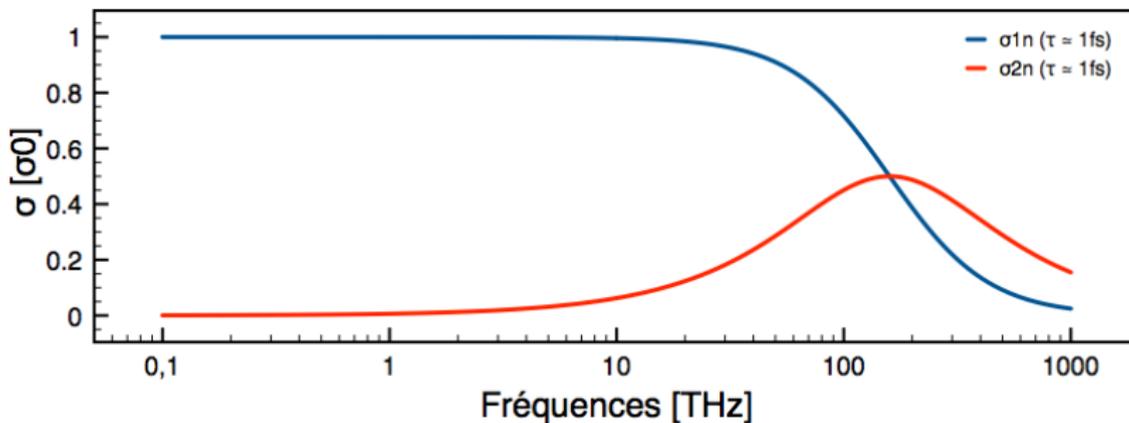
L'inertie (masse + vitesse) des porteurs "supra." s'oppose à un changement de sens d'un champ. élec. appliqué

Conductivité dans un métal normal

Conductivité électrique AC suivant le modèle de Drude

$$\sigma_n = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n (1 + i\omega\tau)} = \frac{\sigma_0}{1 + i\omega\tau} = \underbrace{\frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}}_{\sigma_{1n}} - i \omega \tau \underbrace{\frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}}_{\sigma_{2n}}$$

Métal normal \Rightarrow temps typique entre 2 "collision" \approx femtoseconde :

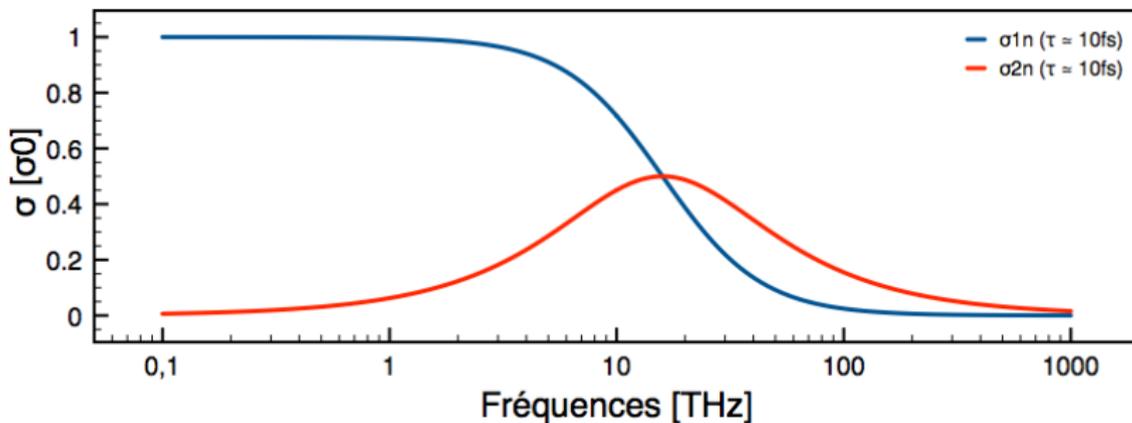


Conductivité dans un métal normal

Conductivité électrique AC suivant le modèle de Drude

$$\sigma_n = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n (1 + i\omega\tau)} = \frac{\sigma_0}{1 + i\omega\tau} = \underbrace{\frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}}_{\sigma_{1n}} - i\omega\tau \underbrace{\frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}}_{\sigma_{2n}}$$

Métal normal \Rightarrow temps typique entre 2 "collision" \approx femtoseconde :

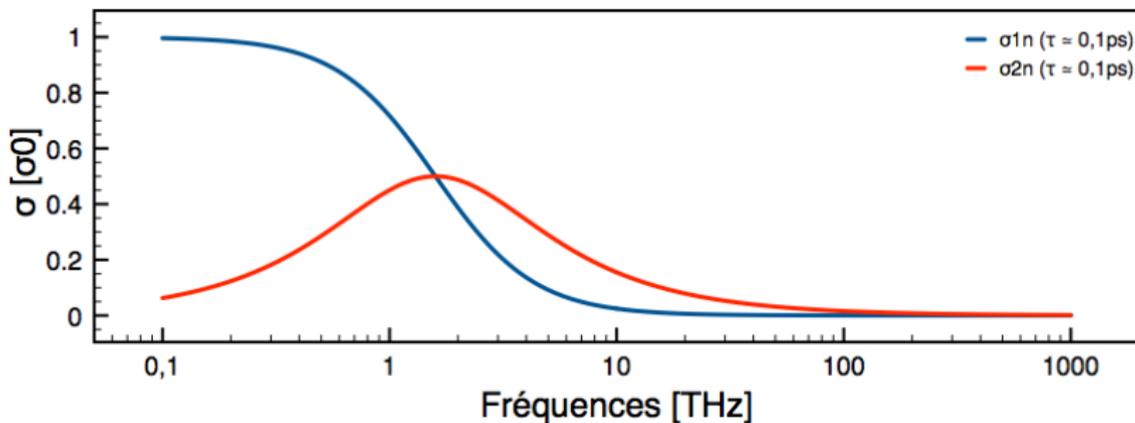


Conductivité dans un métal normal

Conductivité électrique AC suivant le modèle de Drude

$$\sigma_n = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n (1 + i \omega \tau)} = \frac{\sigma_0}{1 + i \omega \tau} = \underbrace{\frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}}_{\sigma_{1n}} - i \omega \tau \underbrace{\frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}}_{\sigma_{2n}}$$

Métal normal \Rightarrow temps typique entre 2 "collision" \approx femtoseconde :

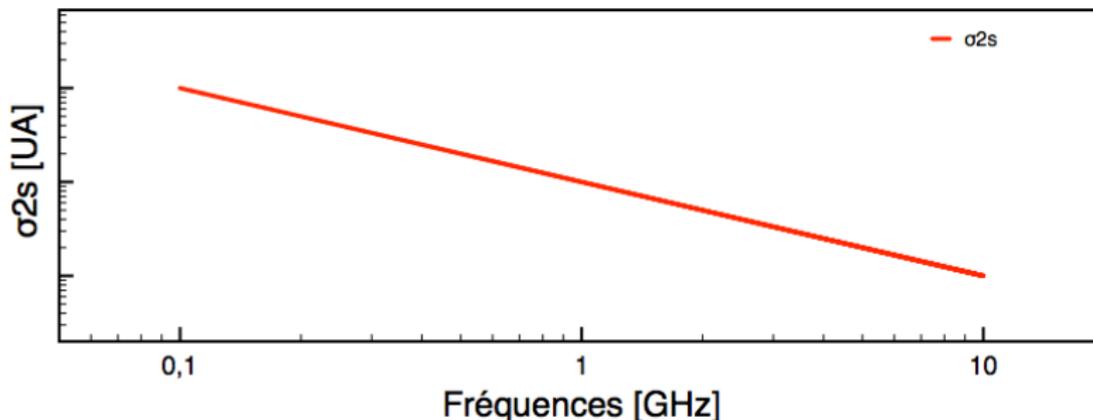


Conductivité dans un supraconducteur

Les paires de Cooper ne diffusent pas : $\tau_s \rightarrow \infty$

$$\sigma_s = \lim_{\tau_s \rightarrow \infty} \frac{n_s q^2 \tau_s}{m_s (1 + i\omega \tau_s)} = -i \underbrace{\frac{n_s q^2}{m_s \omega}}_{\sigma_{2s}} = -i \frac{\sigma_0}{m_s \tau_s \omega}$$

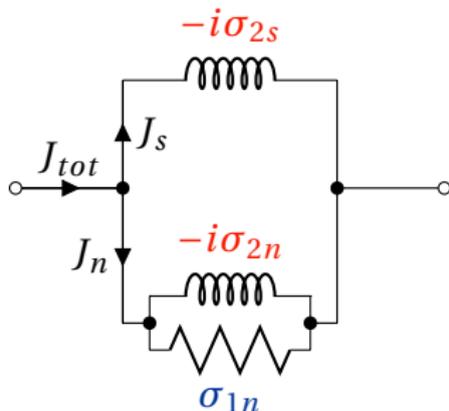
σ_s imaginaire pur \Rightarrow **Inductance Cinétique**



Modèle à deux fluides ($T < T_c$)

Expression générale de conductivité dans un supra

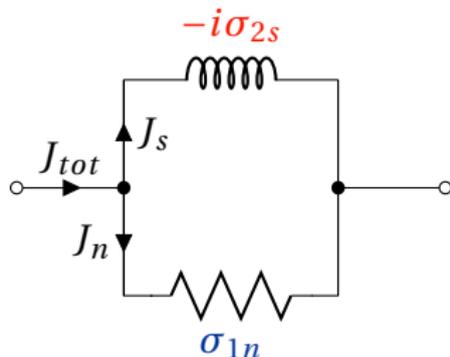
$$\sigma = \sigma_{1n} - i\sigma_{2n} - i\sigma_{2s} = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n (1 + \omega^2 \tau^2)} - i \left(\frac{n_n e^2 \omega \tau^2}{m_n (1 + \omega^2 \tau^2)} + \frac{n_s q^2}{m_s \omega} \right)$$



Modèle à deux fluides ($T < T_c$)

Expression générale de conductivité dans un supra

$$\sigma = \sigma_{1n} - i\sigma_{2n} - i\sigma_{2s} = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n (1 + \omega^2 \tau^2)} - i \left(\frac{n_n e^2 \omega \tau^2}{m_n (1 + \omega^2 \tau^2)} + \frac{n_s q^2}{m_s \omega} \right)$$



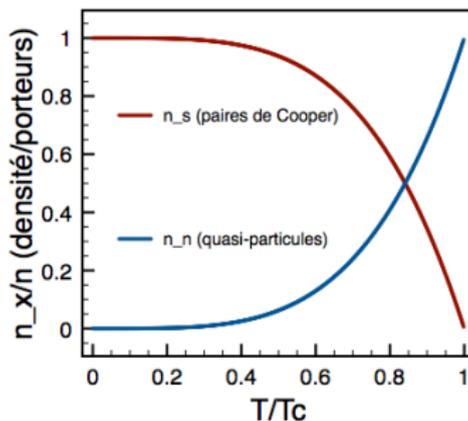
Σ quasi-particules + **super-courant**

$$\underline{\omega \tau \ll 1} \Rightarrow \sigma \approx \sigma_{1n} - i\sigma_{2s} = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n} - i \frac{n_s q^2}{m_s \omega} \left\{ \begin{array}{l} T > T_c \quad \sigma = \frac{n_n e^2 \tau}{m_n} \\ T = 0 \quad \sigma = -i \frac{n_s q^2}{m_s \omega} \end{array} \right.$$

Modèle à deux fluides $n = n_n + n_s$

$$\frac{n_s}{n_n} = 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4$$

$$L_S \propto \frac{1}{\text{densité de paires de Cooper}}$$



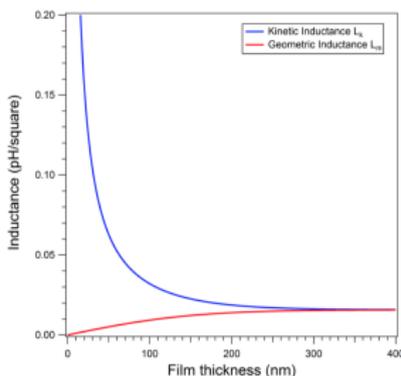
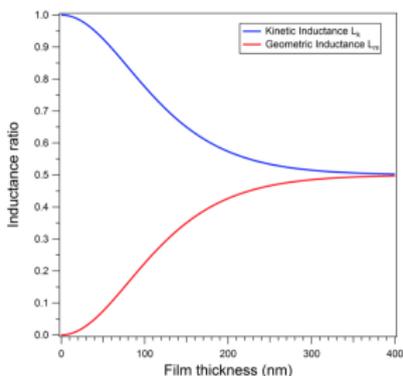
L'impédance de surface $Z_S = \frac{1}{t \times \sigma} = \frac{1}{t(\sigma_{1n} - i\sigma_{2s})} = R \parallel i\omega L_K$

$$\text{à } T \ll T_c \quad L_K \approx \frac{1}{\sigma_{2s}} \frac{l}{S} = \frac{m_s}{n_s q^2} \frac{l}{S}$$

⇒ Long méandre d'un film supra mince et fin pour maximiser $\frac{l}{S}$

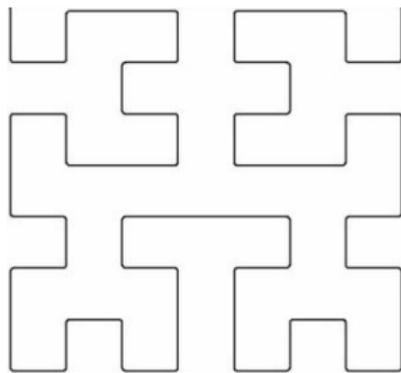
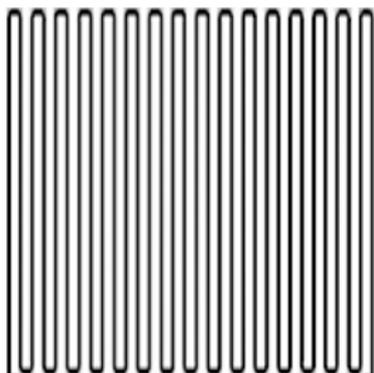
m_n et n_n masse et densité d' e^- ; $m_s = 2m$ et $n_s = n/2$ masse et densité de paire de Cooper; $q=2e$

1) L'inductance cinétique maximisée si $t < \lambda_L$ (profondeur de pénétration) \rightarrow film fin :

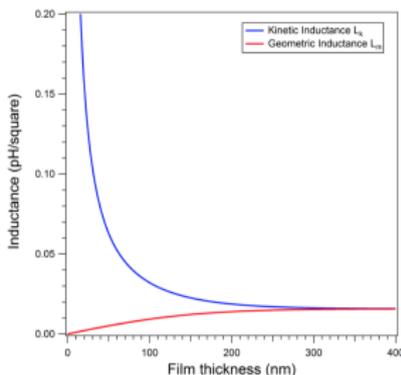
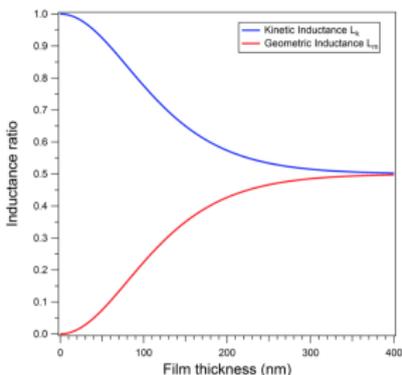


Fabrication Charac. Thin-Film SNS for Novel Q. Devices - D. Niepce

2) Méandre pour minimiser "aussi" l'inductance géométrique :

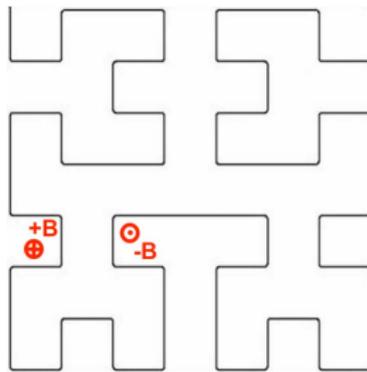
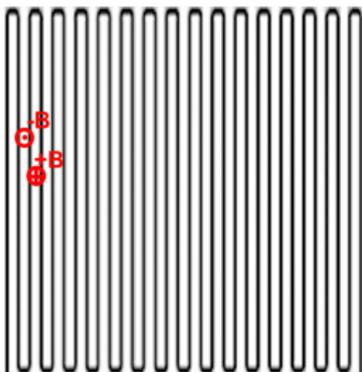


1) L'inductance cinétique maximisée si $t < \lambda_L$ (profondeur de pénétration) \rightarrow film fin :



Fabrication Charac. Thin-Film SNS for Novel Q. Devices - D. Niepce

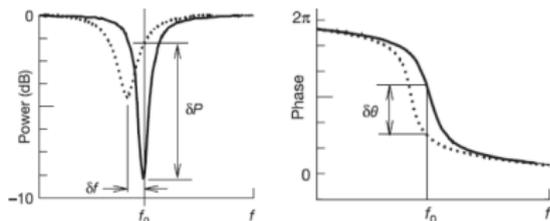
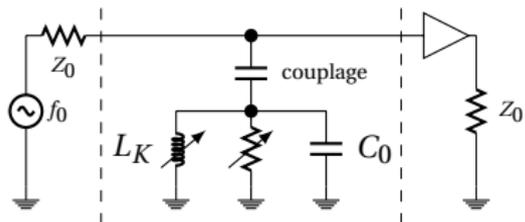
2) Méandre pour minimiser "aussi" l'inductance géométrique :



Kinetic Inductance Detector

⇒ Détection par lecture du déplacement et de l'amortissement de la résonance (δf)

$$\frac{\delta f}{f_0} > \frac{1}{Q} = \frac{R}{2\pi L} \quad \text{typiquement } \frac{\delta f}{f_0} \approx 10^{-6}$$



$$\text{Photons} \nearrow \Rightarrow \text{quasiparticules} \nearrow \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C}} \searrow \Rightarrow Q = \frac{1}{R_S} \sqrt{\frac{L_S}{C}} \searrow$$

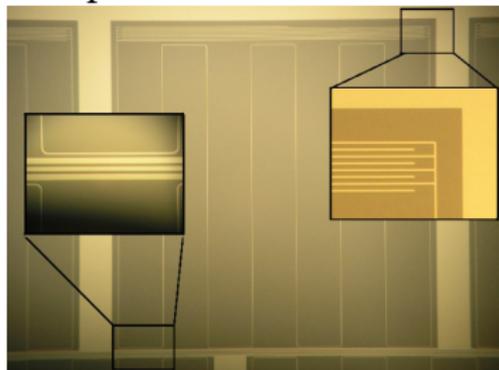
Constante répartie ν s constante localisée

Résonateur CL_K pour mesurer ΔL_K

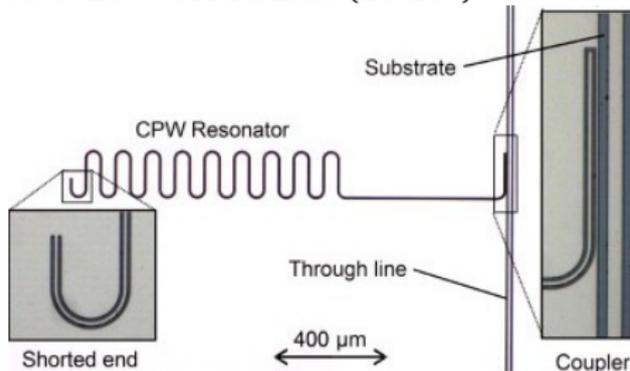
1. Circuit constantes localisées : L et C discrets / éléments
 $\ll \lambda_{readout}$
2. Circuit constantes réparties : "association infinie d'éléments" / ligne de transmission $\geq \lambda_{readout}$

MicroWave Kinetic Inductance Detectors

Lumped Element resonator



$\lambda/4$ CPW resonator (SRON)



Casser les "paires de Cooper"

Choix du supraconducteur - *gap*
Energie détectée > Energie de Gap Supra

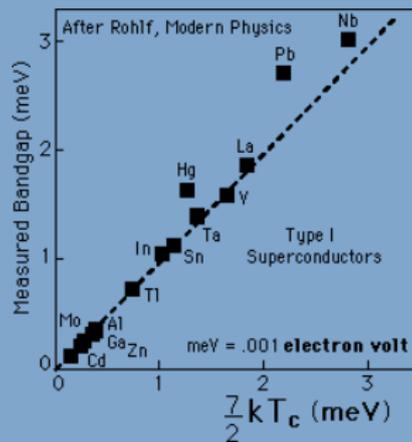


Gap énergétique Δ des supraconducteurs

$$2\Delta \approx 3,5k_B T_C < hf|_{300\text{GHz}} \approx 1,2\text{meV}$$

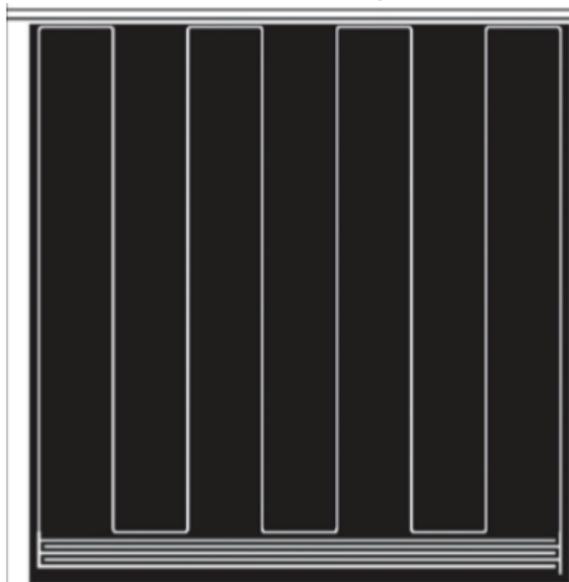
Le KID doit travailler à $f > f_c = \frac{2\Delta}{h}$

Supra.	T_C	2Δ	f_c
Al	1.19 K	0,36 meV	90 GHz
Re	1.7 K	0,5 meV	120 GHz
Ta	4.4 K	1,3 meV	310 GHz
Nb	9.2 K	2,8 meV	670 GHz

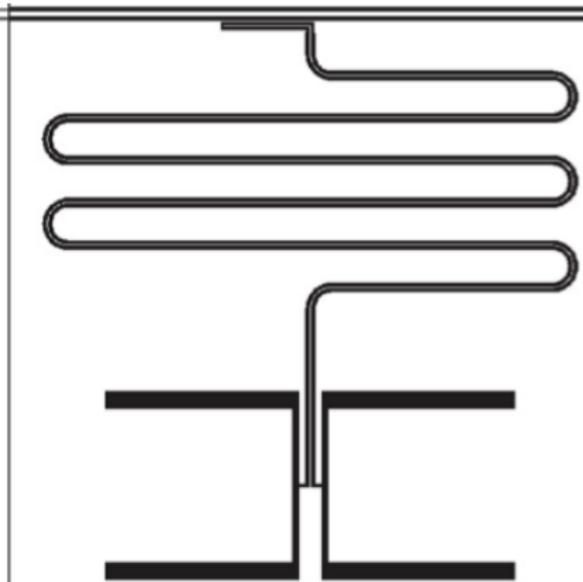


Couplage

Antenne *vs* "field array"



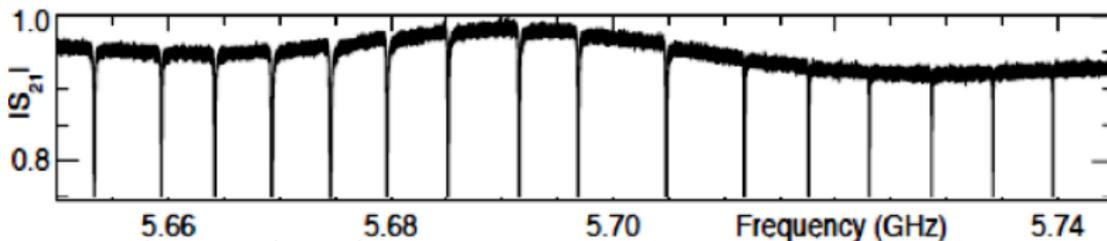
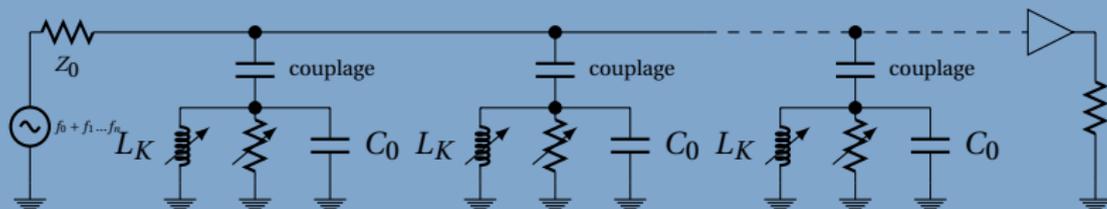
LEKID - NIKA NEEL



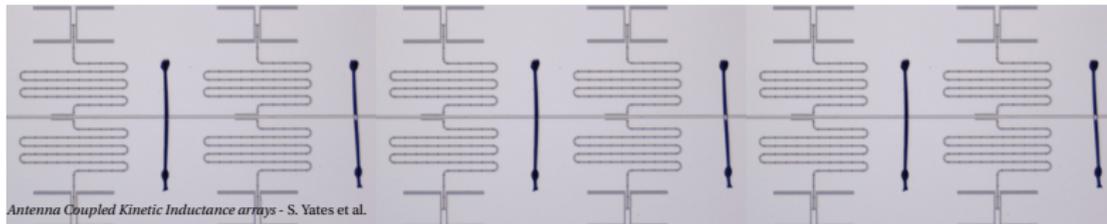
KID + Antenne - SRON

KID multiplexés

Multiplexage fréquentiel de KID

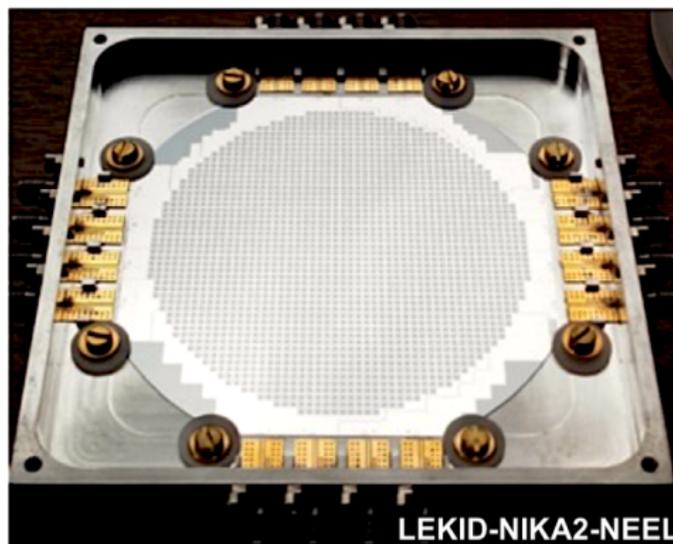


Microwave Kinetic Inductance Detectors: The First Decade - B. Mazin



Antenna Coupled Kinetic Inductance arrays - S. Yates et al.

Matrice



Matrice

