

# Limites et perspectives des détecteurs cryogéniques

G. Chardin, CSNSM

Université Paris-Sud and CNRS/IN2P3

# Plan

- Motivations initiales
- Deux « drivers » en physique
  - Recherche de la Matière Noire
  - Masse neutrino : désintégration double beta
- Types de senseurs et de détecteurs : évolutions
- Du détecteur simple pixel aux matrices
- Développements en cryogénie et en cryoélectronique
- Quelques mots sur la roadmap européenne ASPERA
- Conclusions partielles

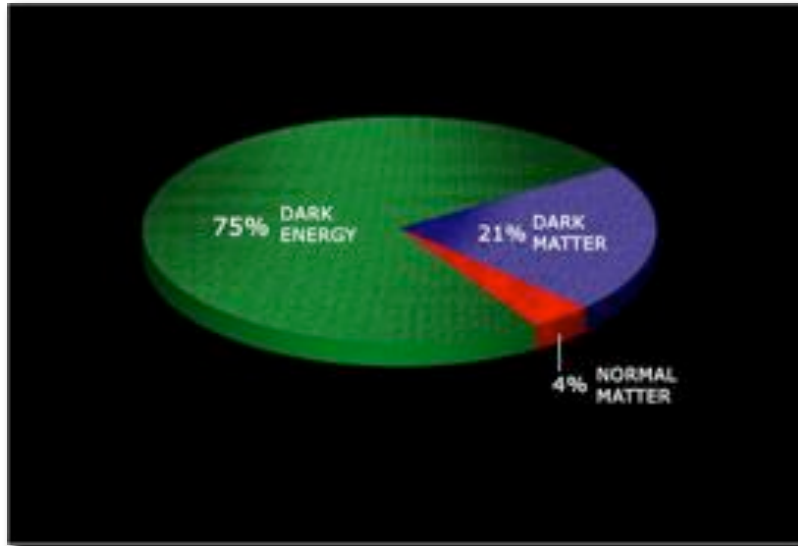
# « Drivers » de physique

- infrarouge, millimétrique : Herschel, Artémis, camera bolomètres IRAM millimétrique 30 m, matrices  $\text{Nb}_x\text{Si}_{1-x}$  haute impédance 200+ pixels, ...
- CMB : Planck, polarisation BRAIN, Olimpo ...
- astronomie X : énergie quelques centaines eV à un petit nombre de dizaines de keV, avec objectif fondamental de la raie du Fer à 6 keV : IXO
- recherche de WIMPs : EDELWEISS, CRESST, ROSEBUD, EURECA
- Masse du neutrino : MIBETA, CUORICINO, CUORE

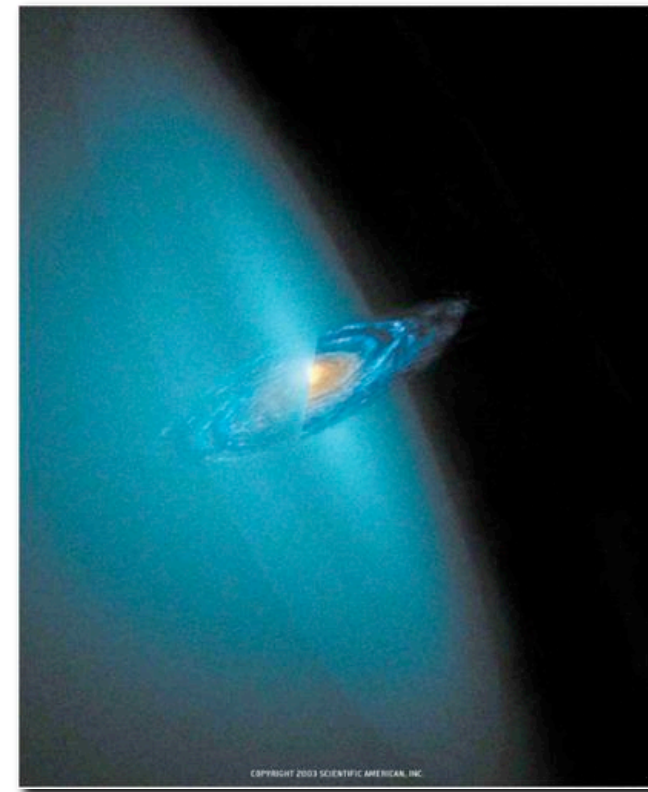
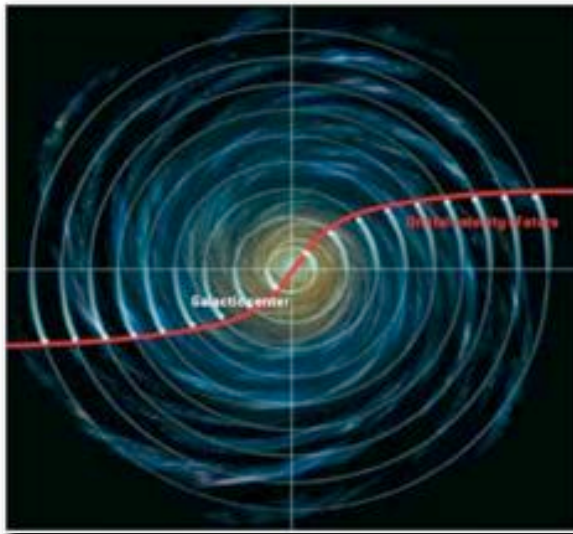
# Naissance d'une communauté

- « driver » de deux problèmes de physique (logique de projet):
  - masse du neutrino double beta (MIBETA, puis CUORICINO, puis CUORE) (Claudia Nones)
  - recherche des WIMPs, identification d'un très faible signal de reculs nucléaires (signal), au milieu des reculs électroniques (très grande majorité des interactions, bruit de fond radioactif) (Alex Juillard)

# Quelle est la composition de l'Univers ?

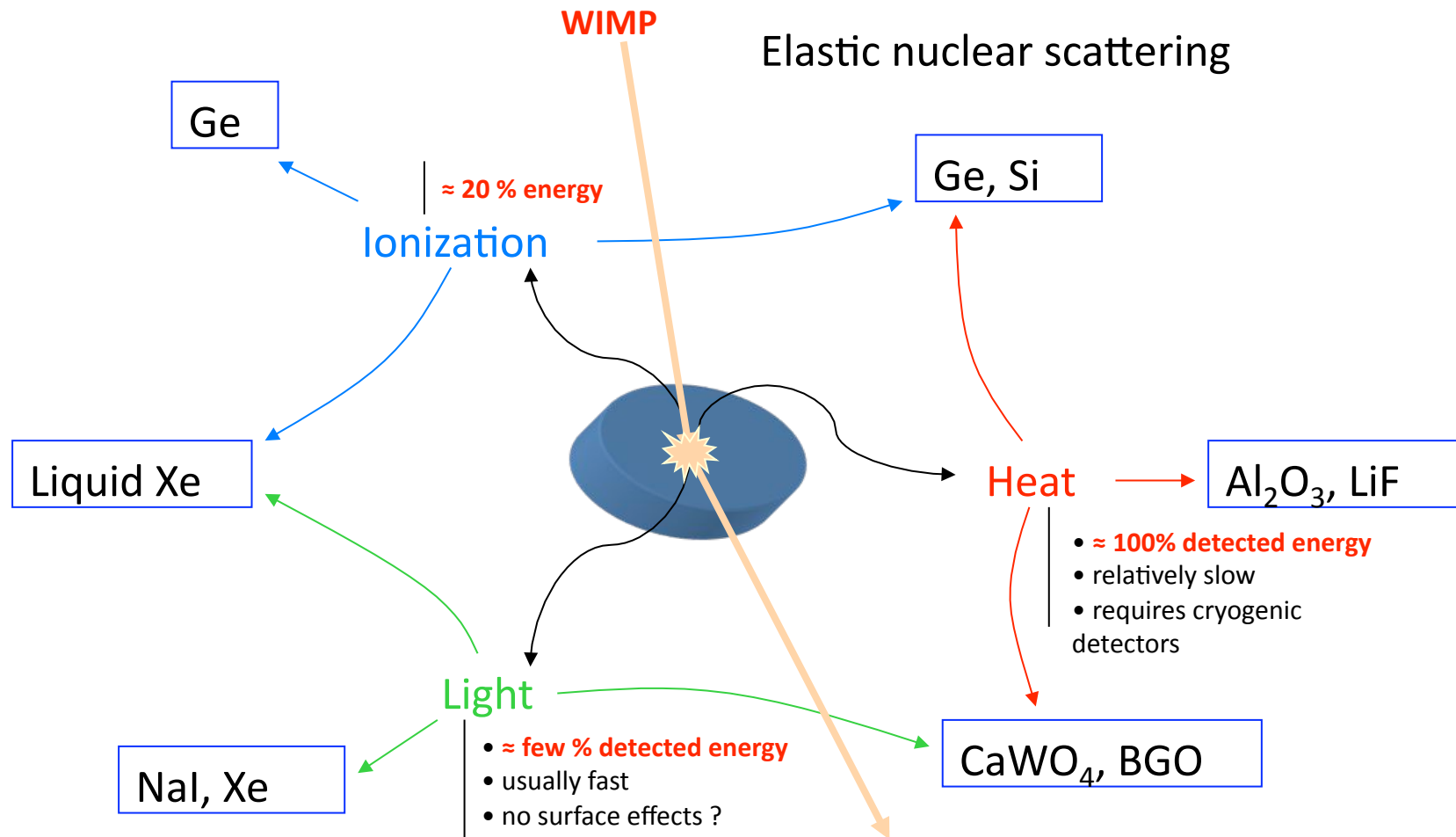


- Astrophysical measurements
  - “Dark” matter halo around the galaxies
  - Local density:  
 $r_{DM} \sim 0.3 - 0.5 \text{ GeV/cm}^3$



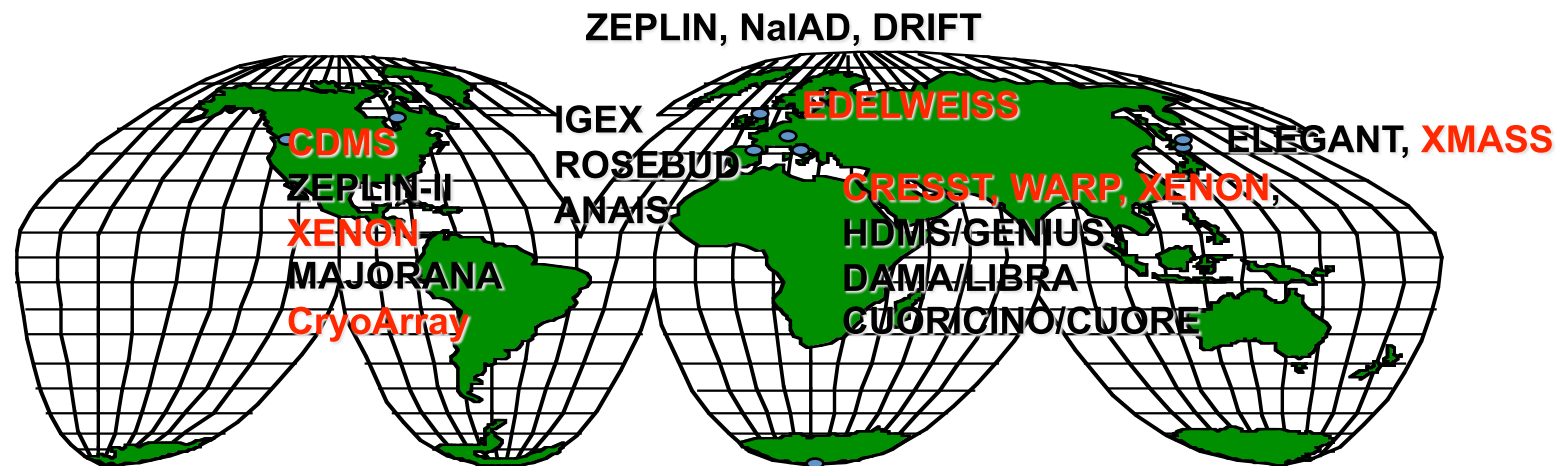
# after Drukier and Stodolsky, PRD 30 (1984) 2295

## Direct detection techniques

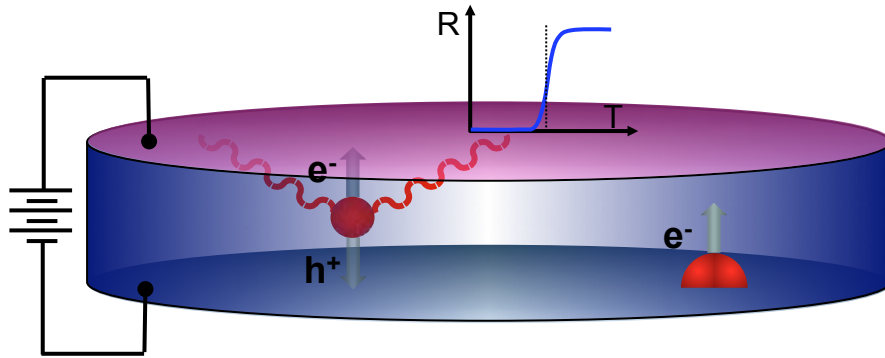


# Wimps direct detection experiments

- CDMS-II @ Soudan Mine
- EDELWEISS-II (cryo Ge @ Fréjus)
- CRESST-II (cryo  $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{ZnWO}_4$ ) @ Gran Sasso
- XENON-10, XENON-100, ZEPLIN, DRIFT, NaIAD
- WARP, ArDM (liquid argon)
- DAMA/LIBRA (NaI, Xe @ Gran Sasso)
- IGEX @ Canfranc, HDMS/GENIUS-TF (Ge) @ Gran Sasso
- CUORICINO/ CUORE ( $\text{TeO}_2$ ) @ Gran Sasso
- SIMPLE, MACHe3, ORPHEUS (Bern)
- ELEGANT, LiF @Japan
- + Future experiments: SuperCDMS, EURECA , XENON, XMASS, GERDA



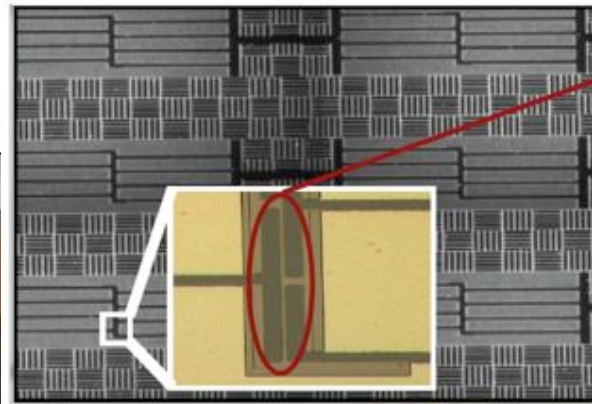
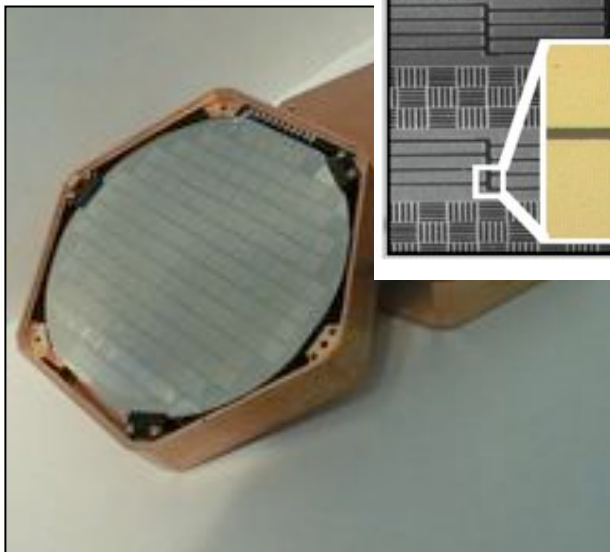
# CDMS @ Soudan



250 g Ge or 100 g Si crystal  
1 cm thick x 7.5 cm diameter

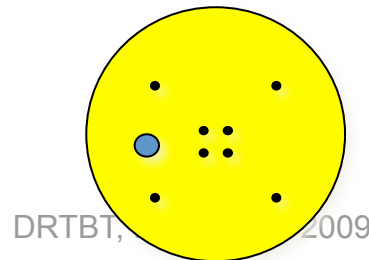
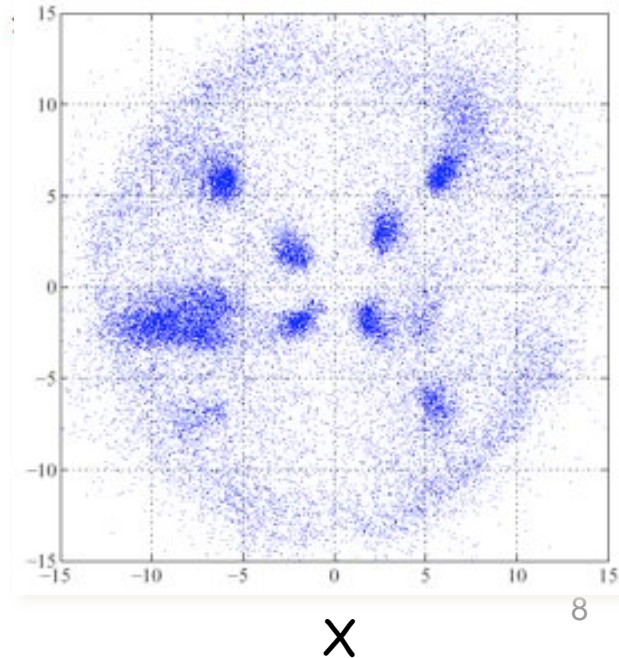
Collect athermal phonons:  
XY position imaging  
Surface (Z) event veto based  
on pulse shape risetime

Z-sensitive Ionization  
and Phonor-  
mediated©



superconducting  
thermometer

y



DRTBT, 2009

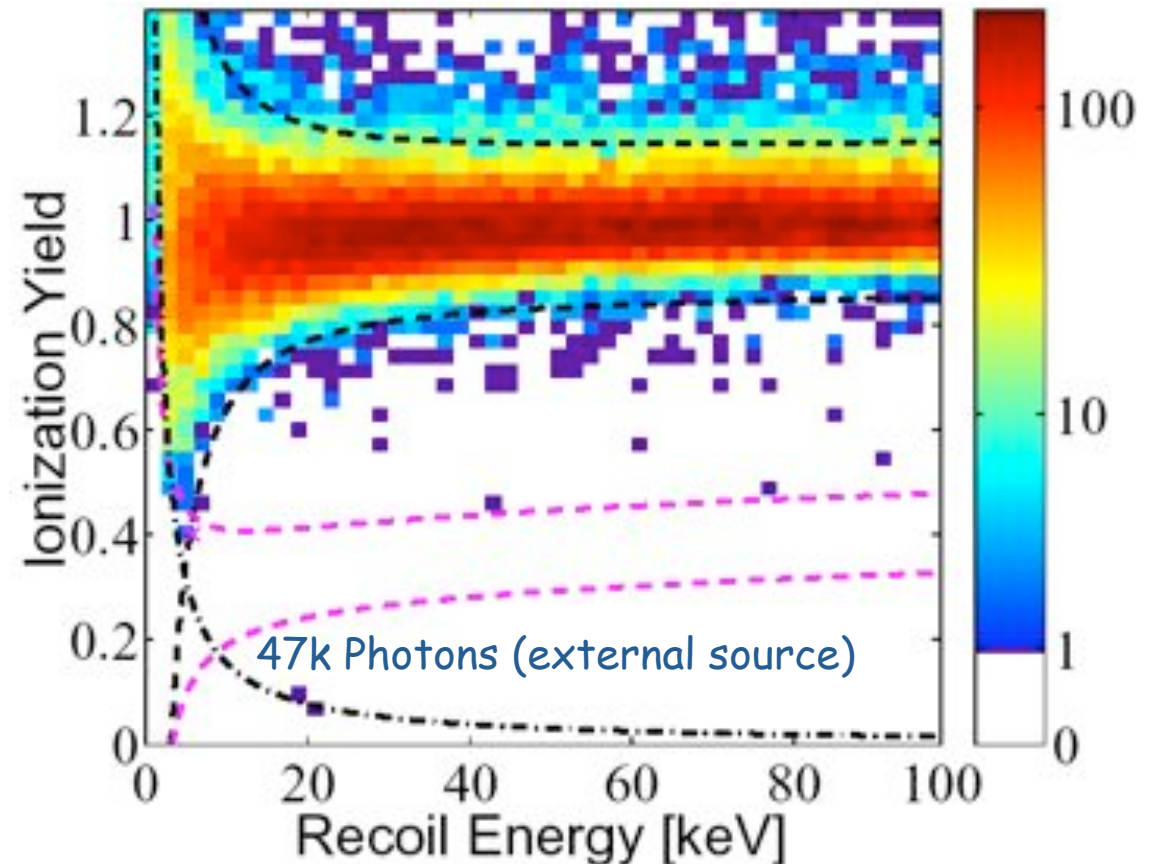
X

8



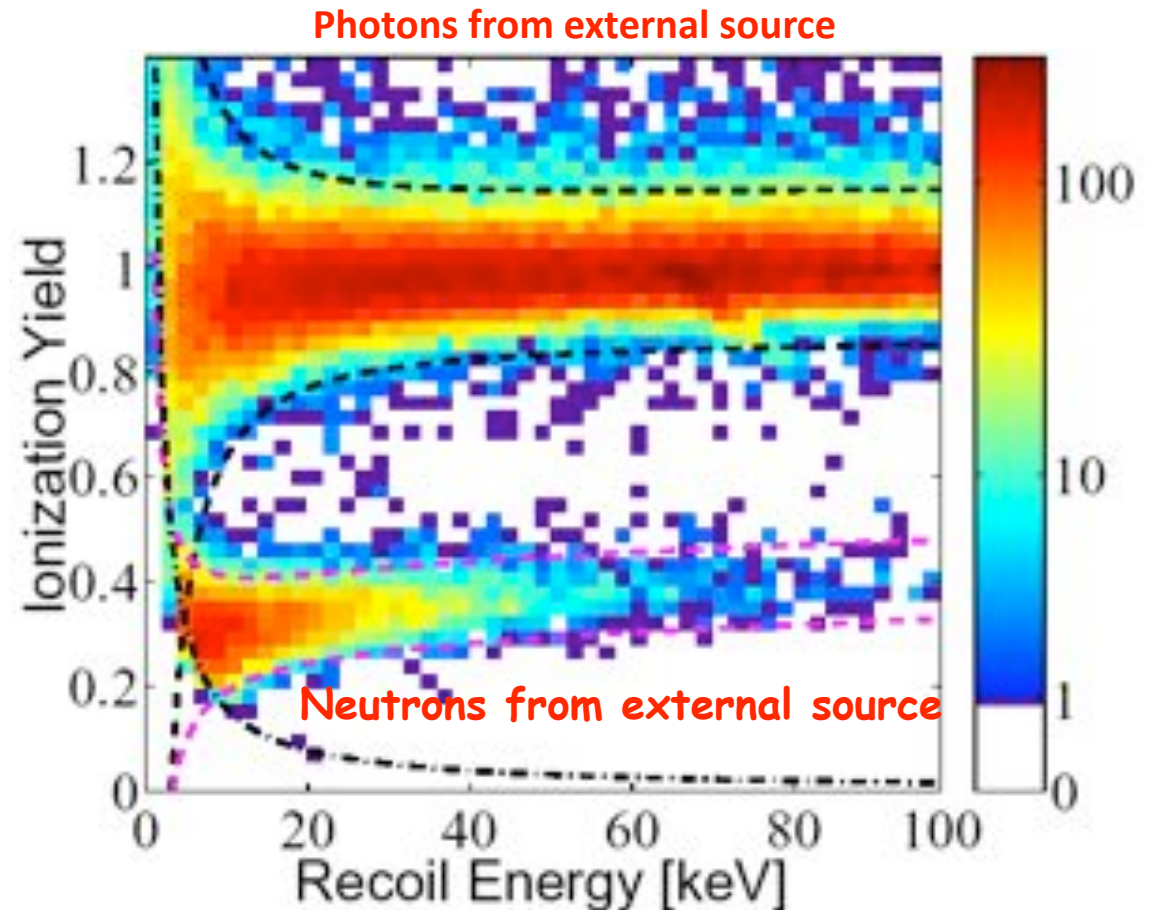
# CDMS II Background Discrimination

- Ionization Yield (ionization energy per unit recoil energy) depends strongly on type of recoil
  - Most background sources (photons, electrons, alphas) produce electron recoils



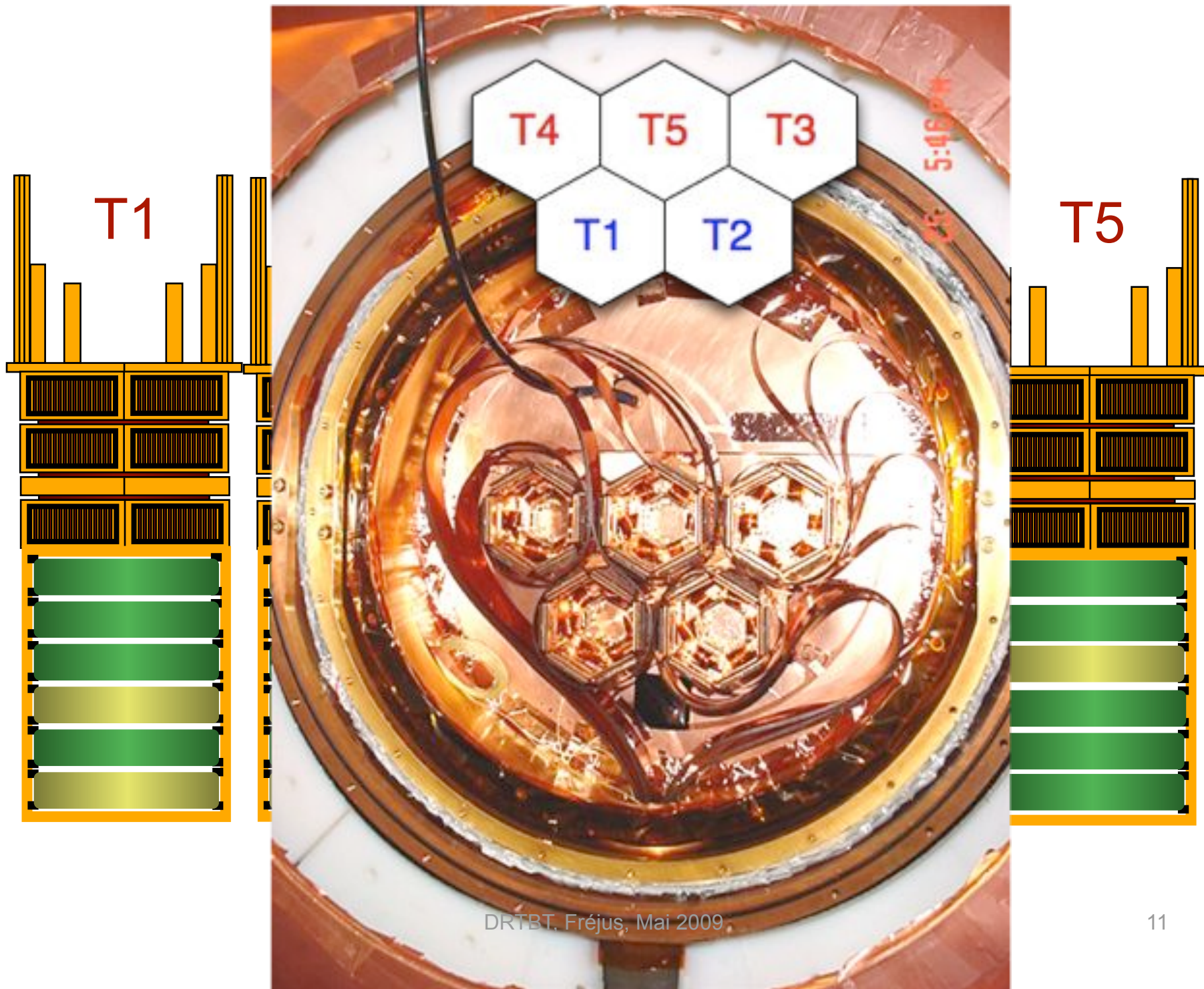
# CDMS II Background Discrimination

- **Ionization Yield**  
(ionization energy per unit recoil energy)  
depends strongly on type of recoil
- **Ionization yield** alone rejects >99.9% of gammas, >75% of 'betas'



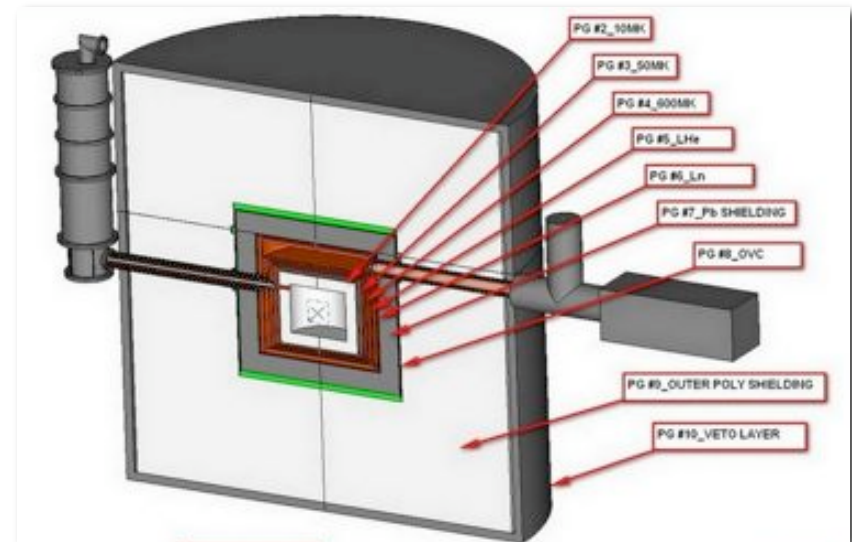
## **Ionization + Timing:**

Reject **99.9998%** of **Gammas**, **99.8%** of surface events



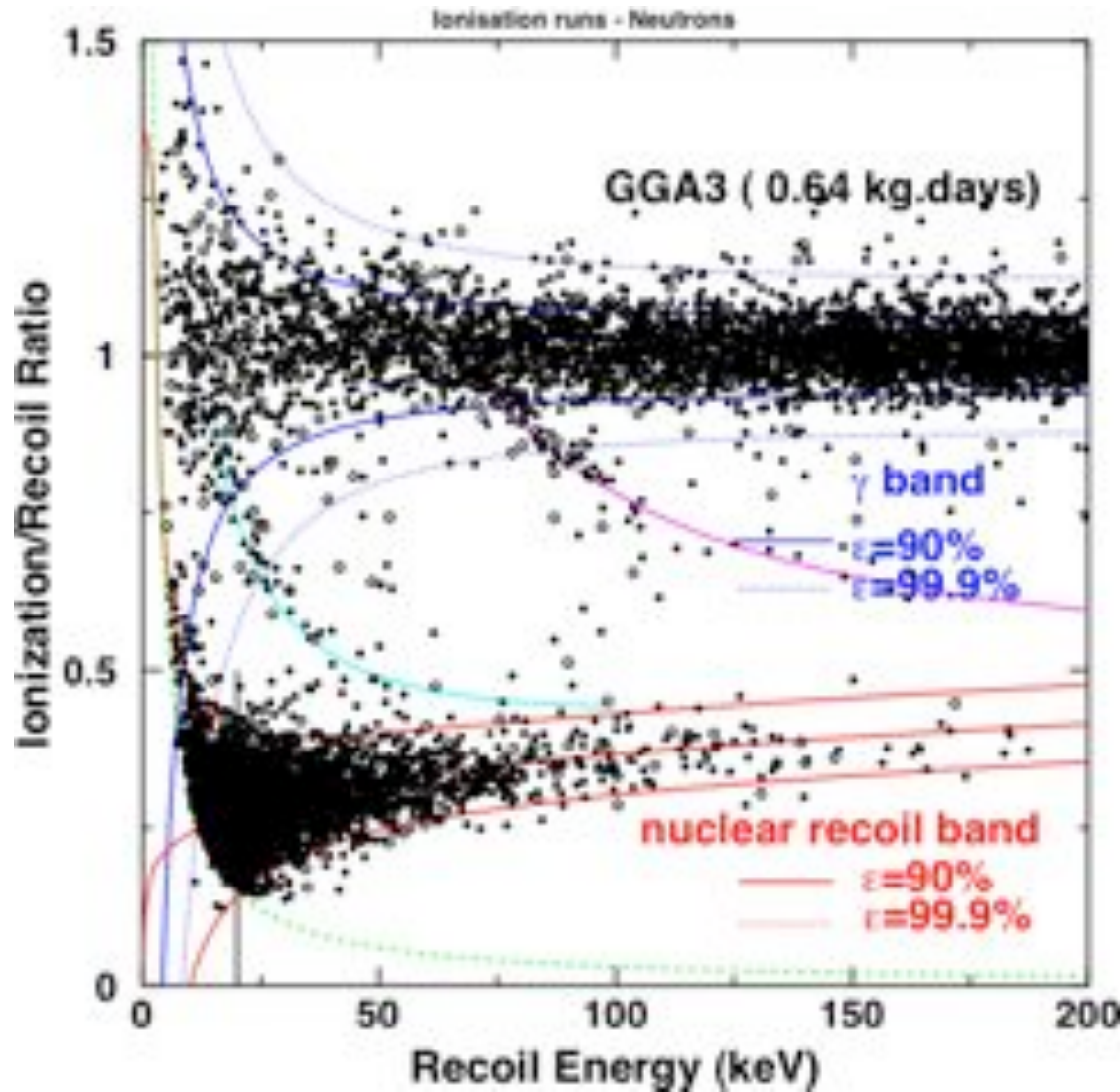


# From CDMS-II in Soudan to SuperCDMS in SNOlab



# Edelweiss: event-by-event discrimination

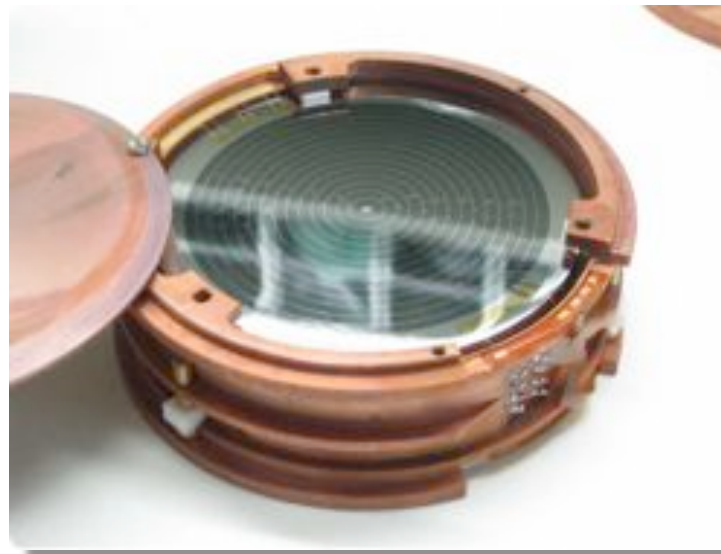
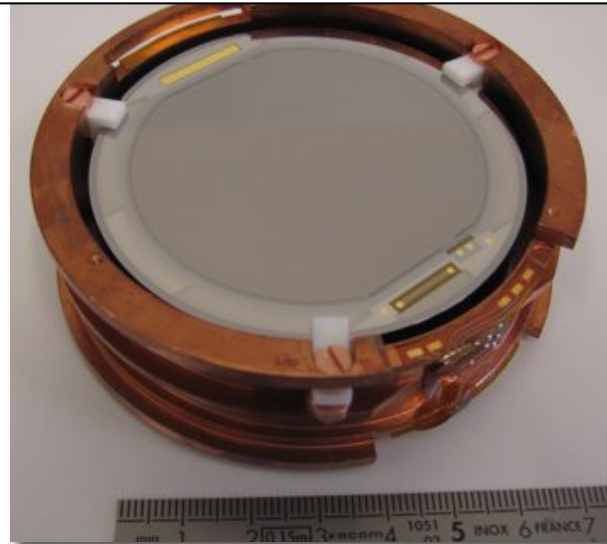
O. Martineau et al., astro-ph/0310657/



**Neutron + gamma  
calibration**

**Nuclear recoil  
discrimination down to  
20 keV threshold :  
 $\gamma$ -ray rejection > 99.99 %**

# EDELWEISS-II setup in LSM

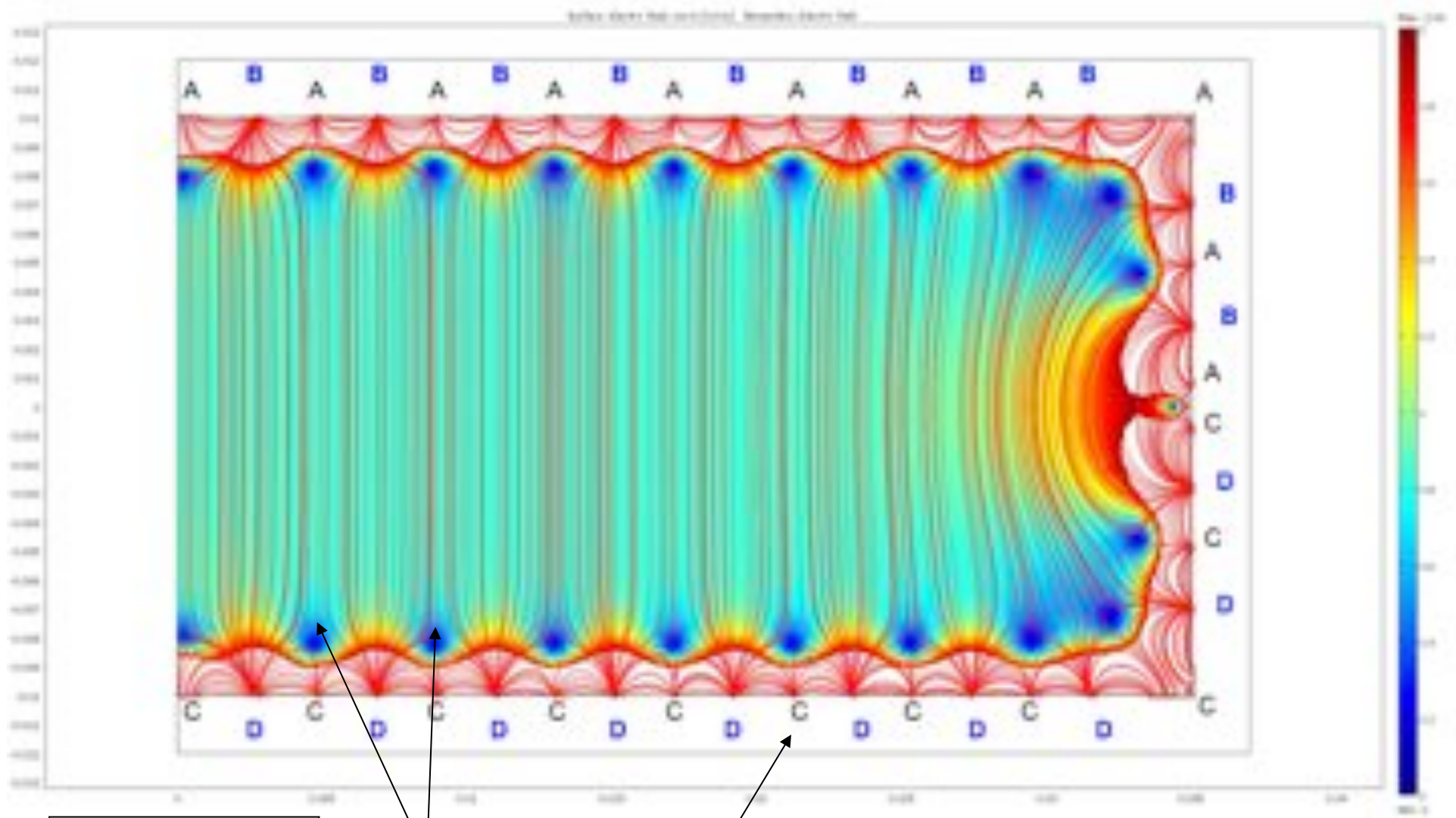


- Bolometric detectors with NbSi with identification and rejection of surface events
- Interdigit detectors with identification and rejection of surface events
- Large number of channels/wires
- Operation in underground site: remote operation of dilution cryostat and helium reliquefier



# Super ID geometry

Diameter = 70mm  
Height = 20mm



<u>4 Amplis</u>	
A= -0.5	B= 2.5
C= 0.5	D= -2.5

Low E field zones

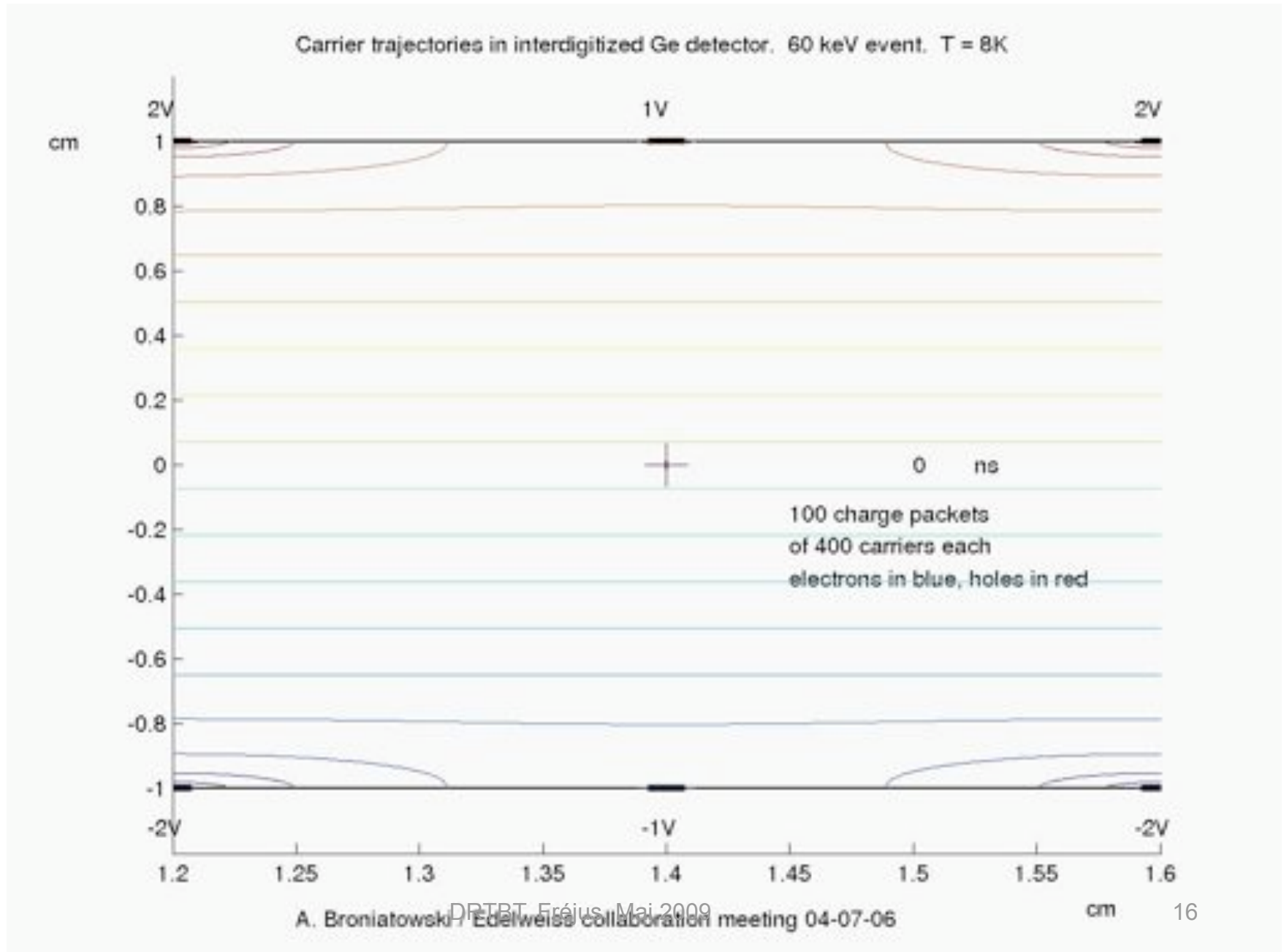
DPTBT, Fréjus, Mai 2009

Bolometer mounting (grounded)

- Electric field, norm (>2V/cm in white)
- Fieldlines E

==> Fid volume = 80 %

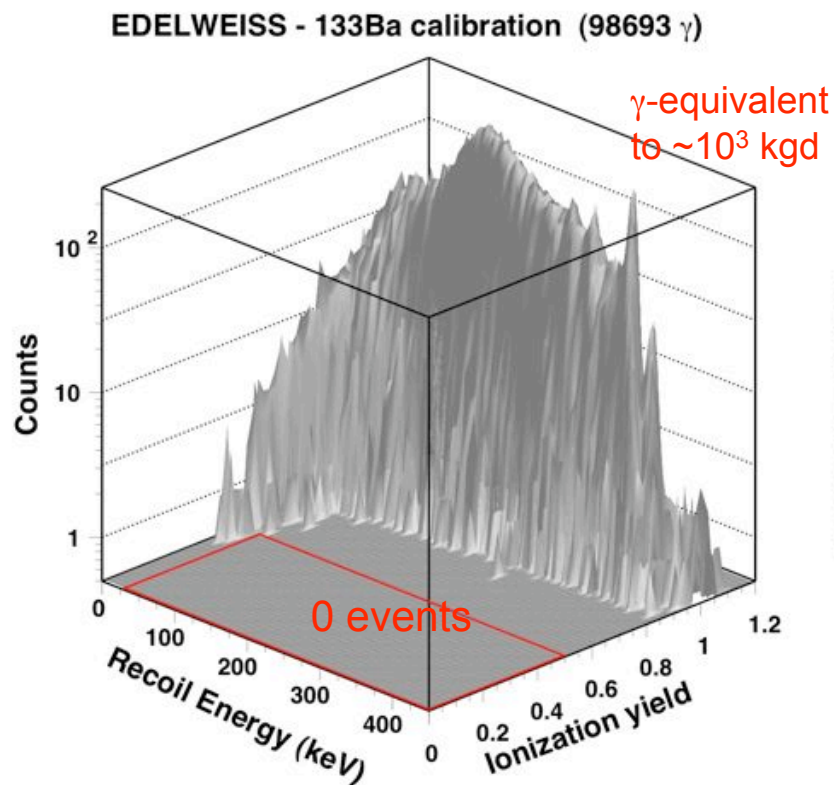
# Simulation of InterDigit Detector



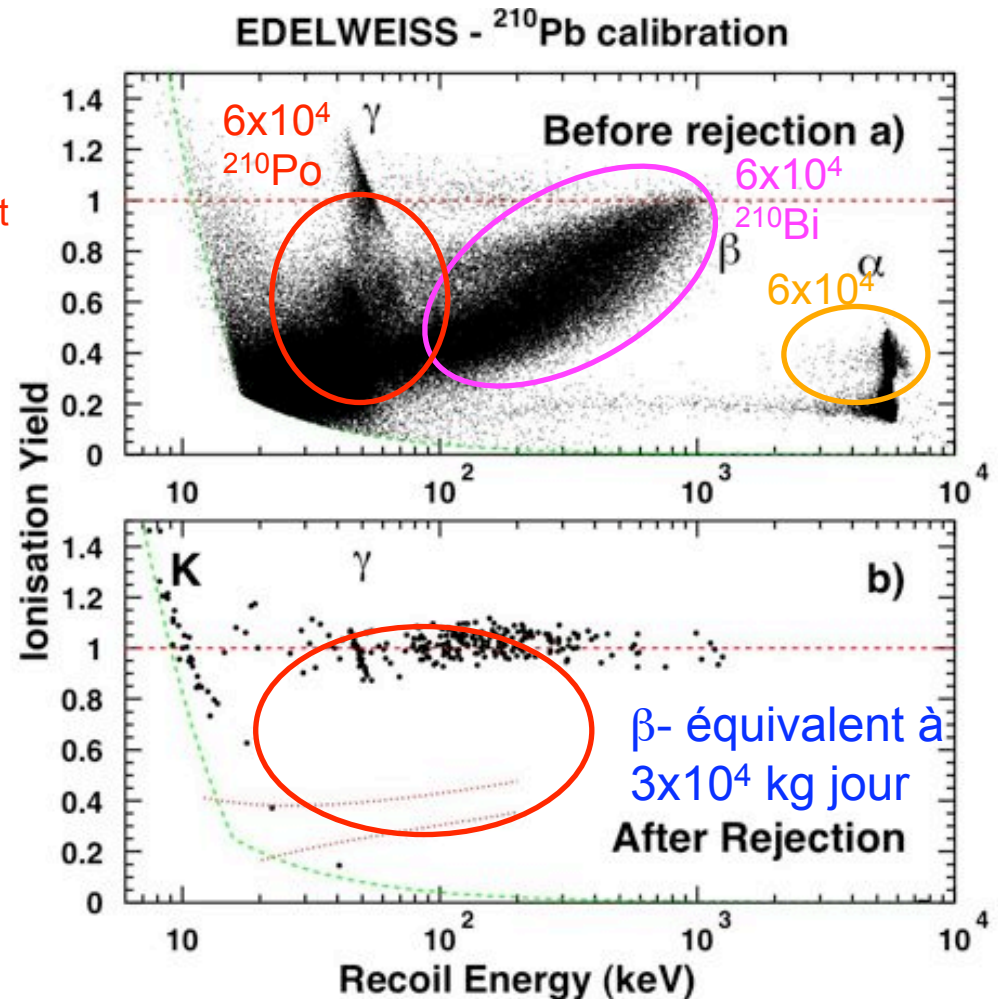


# InterDigit: rejet des événements surface

- Test du rejet du bruit de fond gamma
  - ~1 mois de calibration



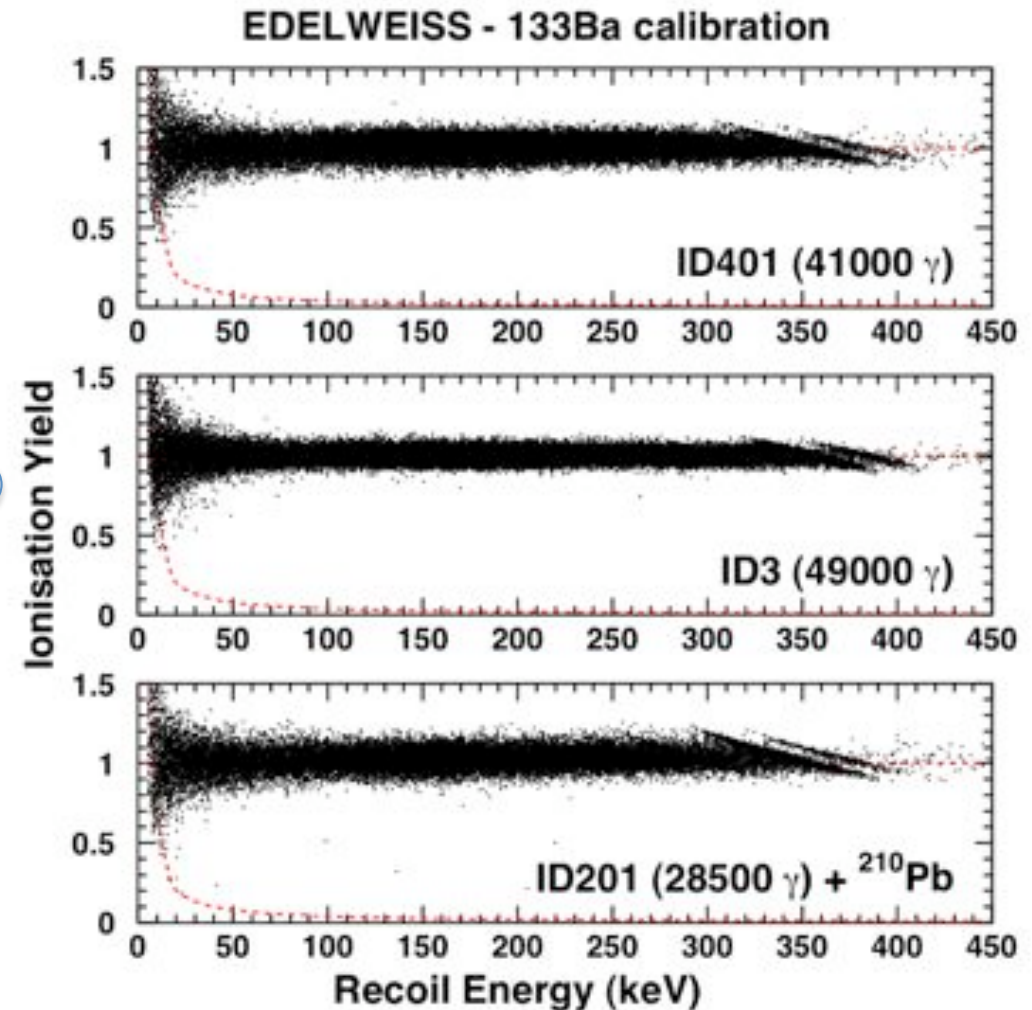
■  $^{210}\text{Pb}$   $\beta$  de surface



# Identification et rejet gammas

Rejection 20-500 Q<0.5:

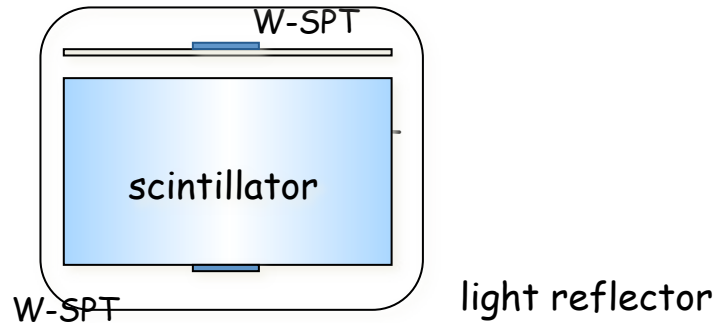
- ID401 +ID3 : 0 / 89 000
- Rejection <  $\sim 2.6 \times 10^{-5}$
- Equivalent to background exposure  $\sim 2\,000$  kg.d



# CRESST-II experiment (Gran Sasso)

## Background discrimination by simultaneous detection of phonons and light

separate calorimeter as light detector



Works with many absorber materials

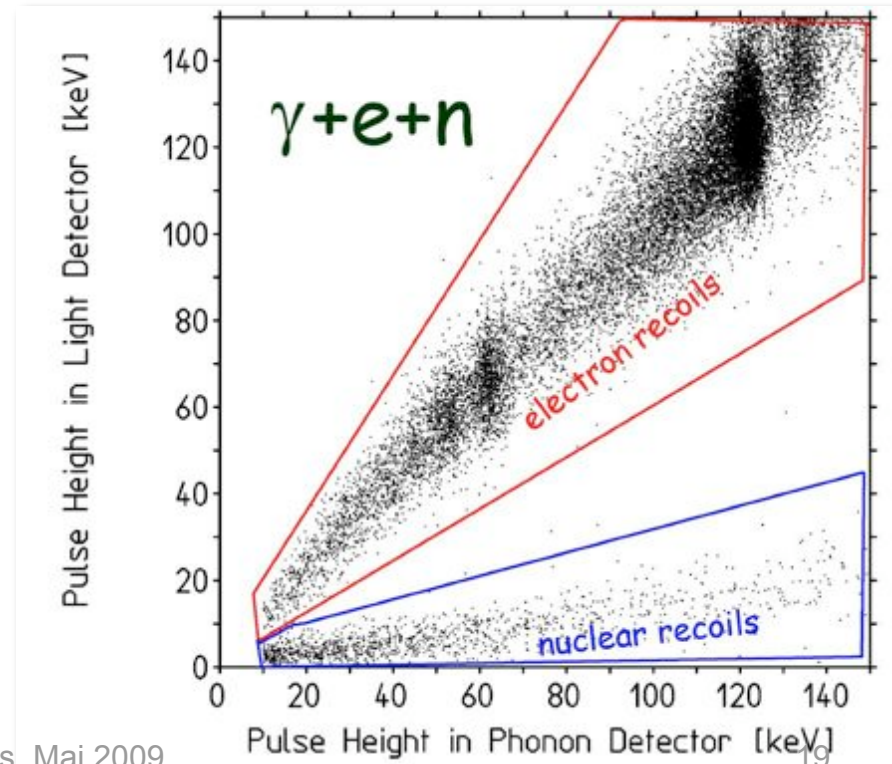
CaWO<sub>4</sub>, PbWO<sub>4</sub>, BaF, BGO  
(other tungstates and molybdates)

High rejection:

99.7%  $E > 15$  keV

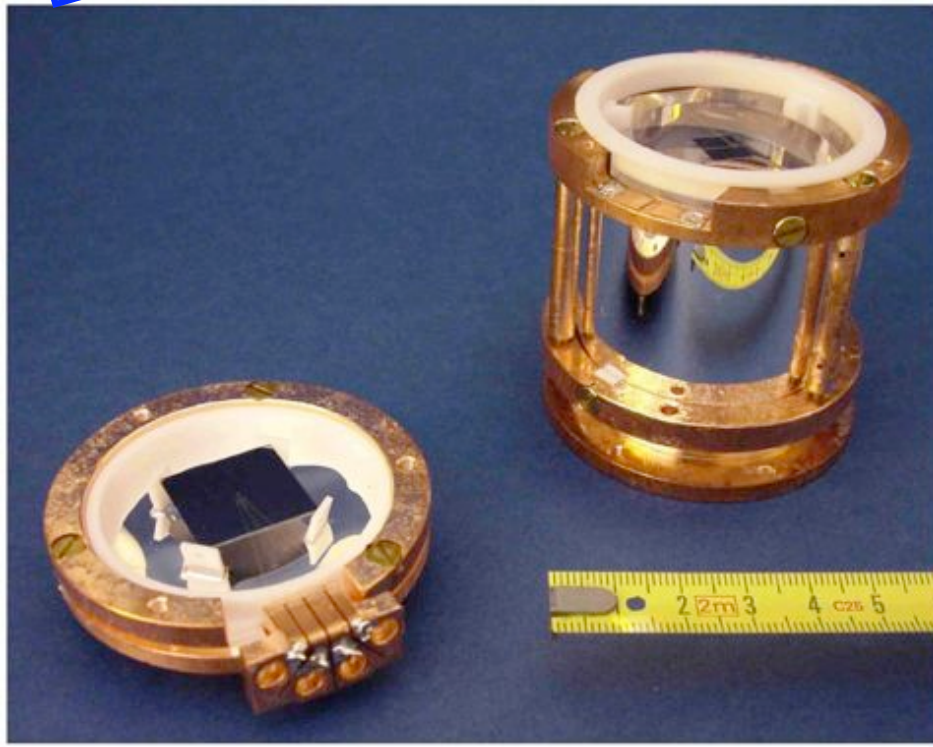
99.9%  $E > 20$  keV

Appl. Phys.Lett.  
75(9),1335(1999)



# CRESST II -Detector Module

33 modules ( $\approx 10$  kg)  
for CRESST II



phonon channel

300g  $\text{CaWO}_4$

$\varnothing = 40\text{mm}$ ,  $h = 40\text{mm}$

W-SPT  $4 \times 6 \text{ mm}^2$

light channel

Si  $30 \times 30 \times 0.4 \text{ mm}^3$

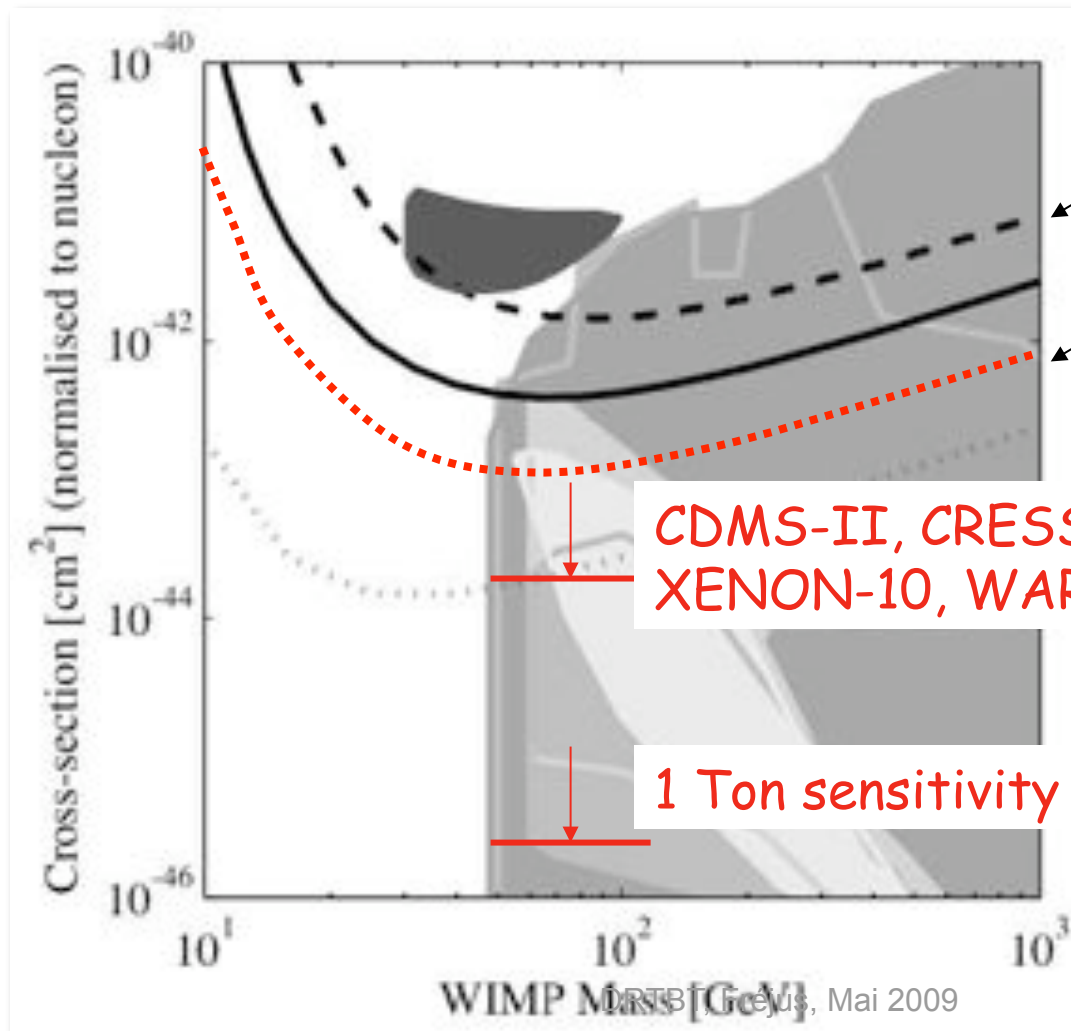
W-SPT

reflector

polymeric foil, teflon



# Experimental status and theoretical predictions



EDELWEISS, CRESST  
CDMS present  
sensitivities

CDMS-II, CRESST-II, EDELWEISS-II,  
XENON-10, WARP-10 ... sensitivity goals

1 Ton sensitivity goal (optimistic)

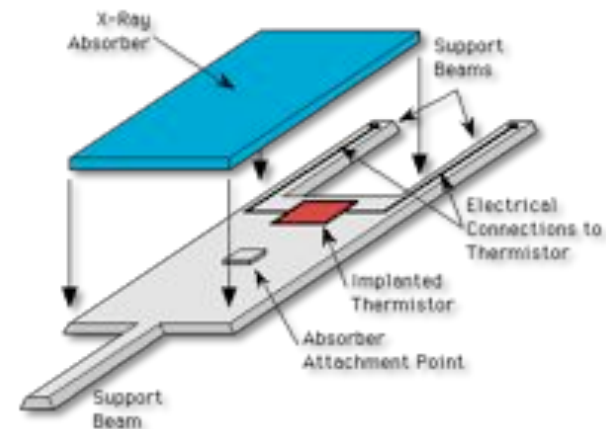
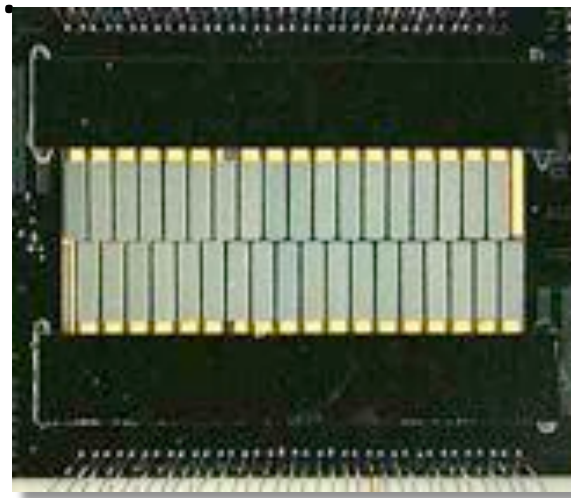
after dmtools  
R. Gaistkell and V. Mandic

# Détecteurs cryogéniques vs. détecteurs conventionnels

- Dark Matter: approximativement la même sensibilité
  - CDMS légèrement meilleure que XENON, Interdigit revient fort)
  - Etape XENON-100 : comprendre les limitations des détecteurs gaz/liquides nobles
  - Importance de disposer de deux cibles au moins (Xe, Ge ?)
- Double beta : GERDA/MAJORANA, SuperNEMO, CUORE
  - Avantage en principe à GERDA, mais à vérifier
  - Là aussi importance de disposer de plusieurs cibles
- CMB, IR/mm, X-ray : nouvelle génération semble presque nécessairement cryogénique

# Pioneering microcalorimeters

- S.H. Moseley, J.C. Mather, D. McCammon, J. Appl. Phys. 56 (1984) 1257 : quelques dizaines de microgrammes
- N. Coron, et al., Nature 314 (1985) 75 : 0.5 mg diamond composite bolometer
- Première matrice : XQC fin années 90



XQC array (end 90's)

# Motivations initiales

- La capacité calorifique varie comme  $T^3$  (matériau diélectrique), ou comme  $T$  (métal)
- Sensibilité à une énergie  $E_0$  donnée meilleure à basse température  $T$
- Phonons meV ou moins : résolution intrinsèque en principe excellente

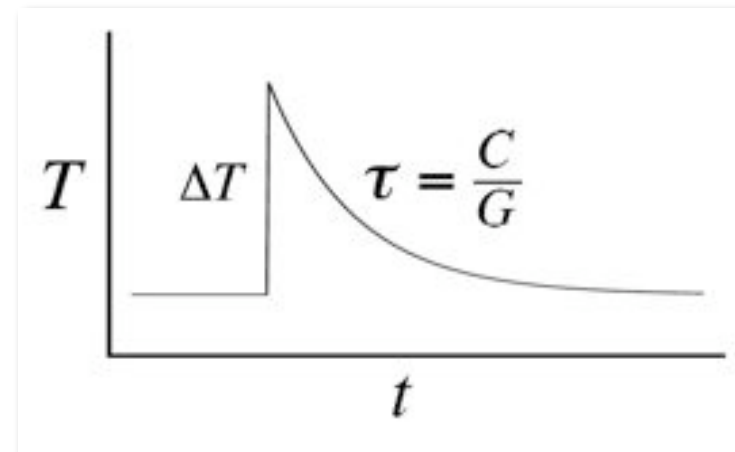
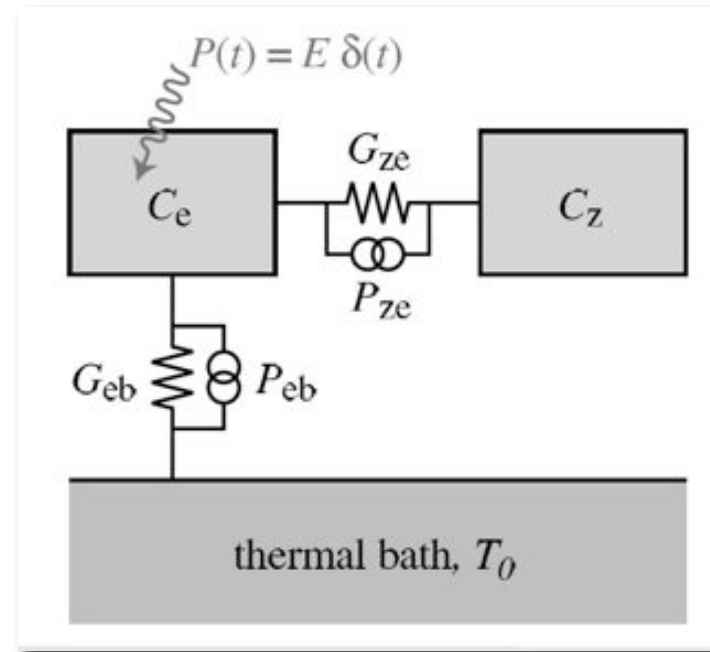
$$\delta E_0 = 2.35 \sqrt{\epsilon F E_0}$$

- Egaleme<sup>nt</sup>, possibilité de combiner la mesure du signal de phonons avec une deuxième mesure de scintillation ou de charge dans certains matériaux



# Principe de détection

- 1- Dépôt d'énergie dans l'absorbeur du détecteur
- 2- Couplage entre absorbeur et senseur (NTD, TES, MMC, ...)
- 3- Fuite thermique vers le bain afin de revenir à  $T$  de base

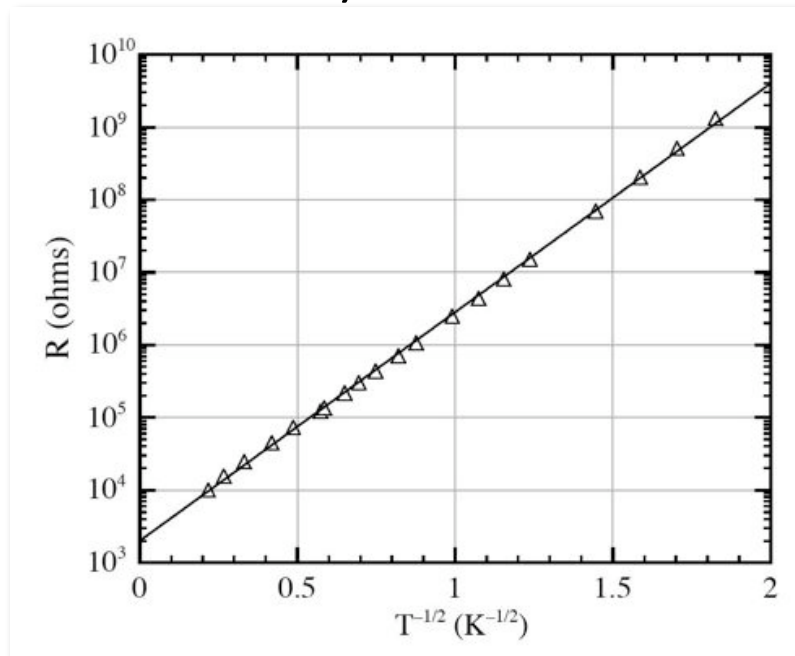


# Senseurs: MIT

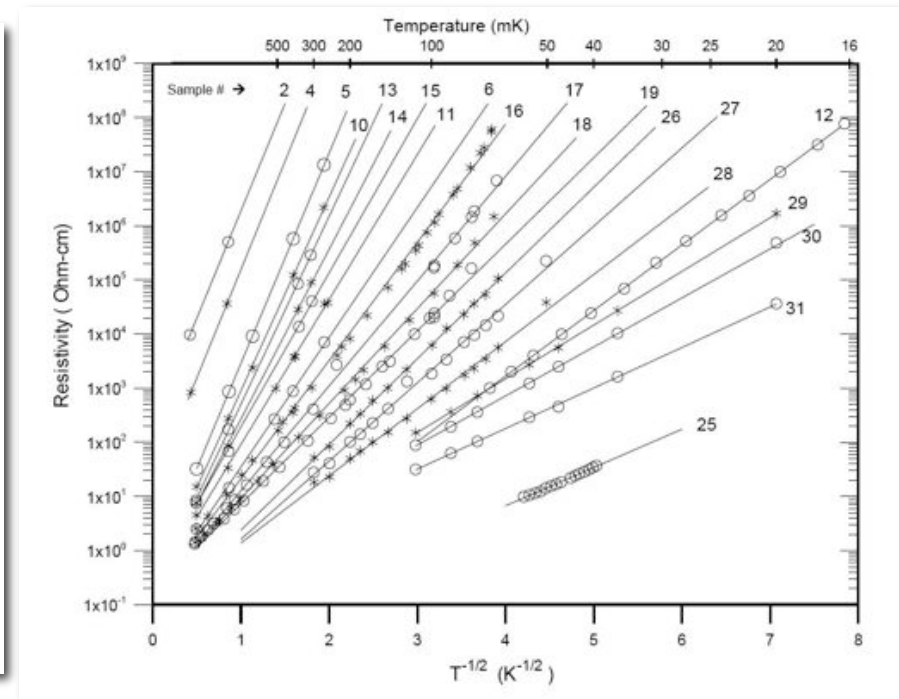
- Metal-Insulator Transition (MIT) (Transition métal-isolant)
  - Si implanté (implantation ionique, chimique puis diffusion à haut T)
  - Neutron Transmuted Doped (NTD) Ge (dopages par irradiation neutrons)
  - Senseurs en couches minces amorphes (e.g.  $Nb_xSi_{(1-x)}$ , or  $Y_xSi_{(1-x)}$  )
- Excellents thermistors, impédance généralement élevée,  $M\Omega$  à  $G\Omega$
- Initialement difficile de contrôler précisément l'impédance (production de plusieurs batches) (e.g. chimique et NTD)
- Homogénéité critique
- Diffusion à haute température (McCammon, Agnès): bien meilleure homogénéité (limitation: quelques  $\mu m$  épaisseur)

# Senseurs: MIT (Metal-Insulator Transition)

- Impédance ajustable  $M\Omega$  à  $G\Omega$
- Production le plus souvent de plusieurs batches
- Mécanisme de variable range hopping (Mott, Efros, Shklovskii)



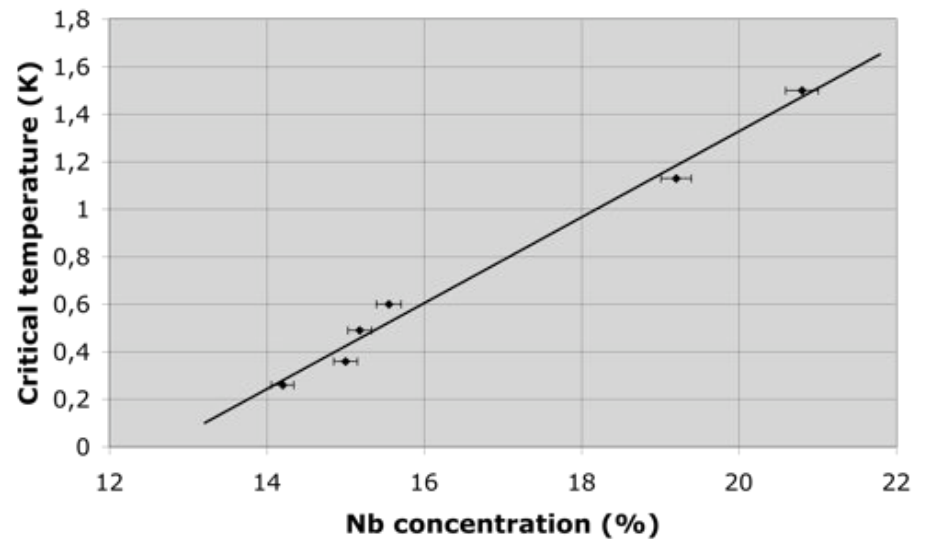
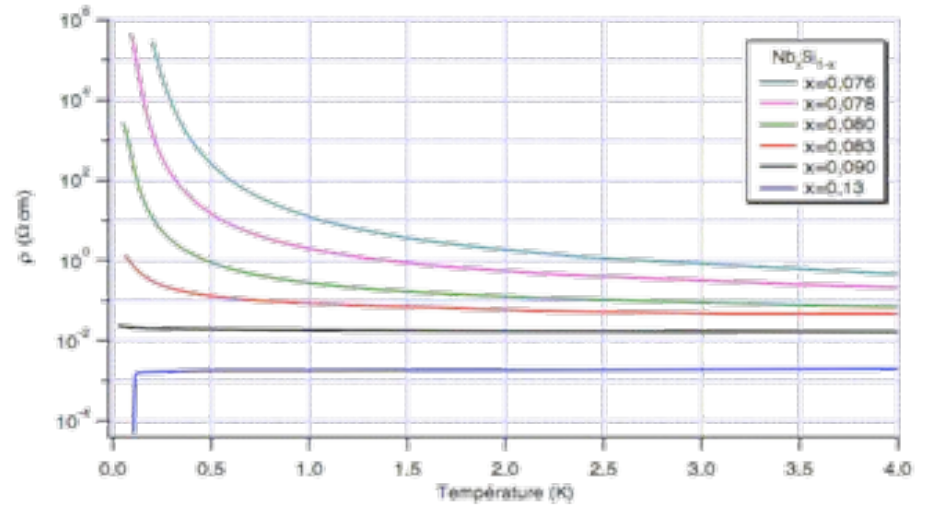
Ion implanted Si impedance scaling (McCammon et al.)



Various batches of NTDs (Beeman and Haller)

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

- Co-évaporation réalisée au CSNSM (Orsay)
- $\text{Nb} < 9\%$ : senseur MIT
  - Isolant d'Anderson
  - Excellent couplage thermique electron-phonon
  - Bruit en  $1/f$
- $\text{Nb} > 9\%$ : supraconducteur
  - La valeur de  $T_c$  dépend de la concentration relative en Nb

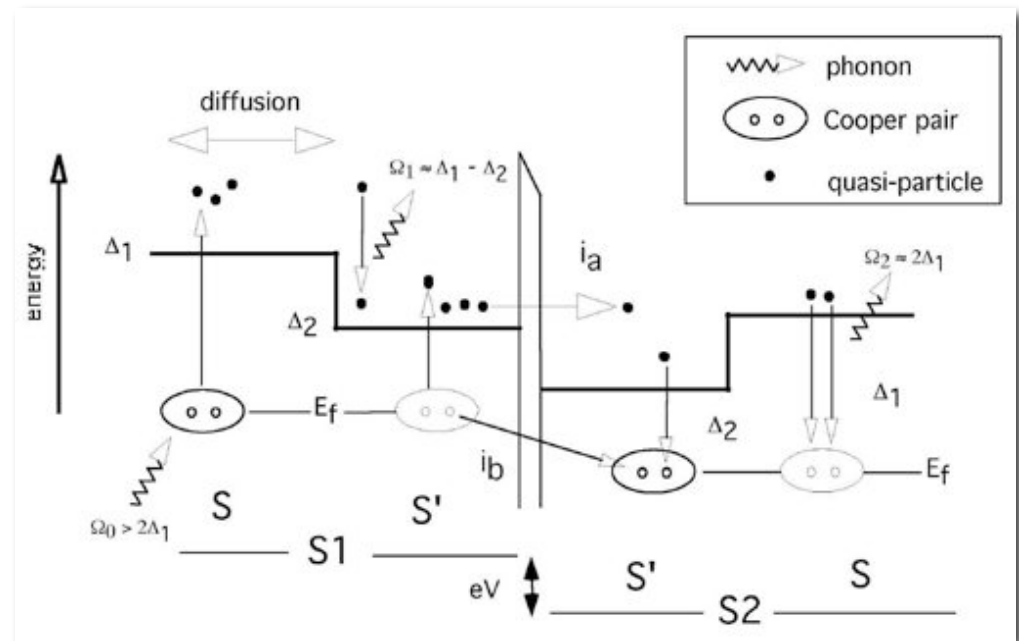


# Junctions tunnel supraconductrices (STJs)

- Nb/Al/Al<sub>ox</sub>/Al/Nb junctions (e.g., but also Ta or other)
- Quasiparticle trapping by Al traps
- Excess noise compared to

$$\delta E_0 = 2.35 \sqrt{\epsilon F E_0}$$

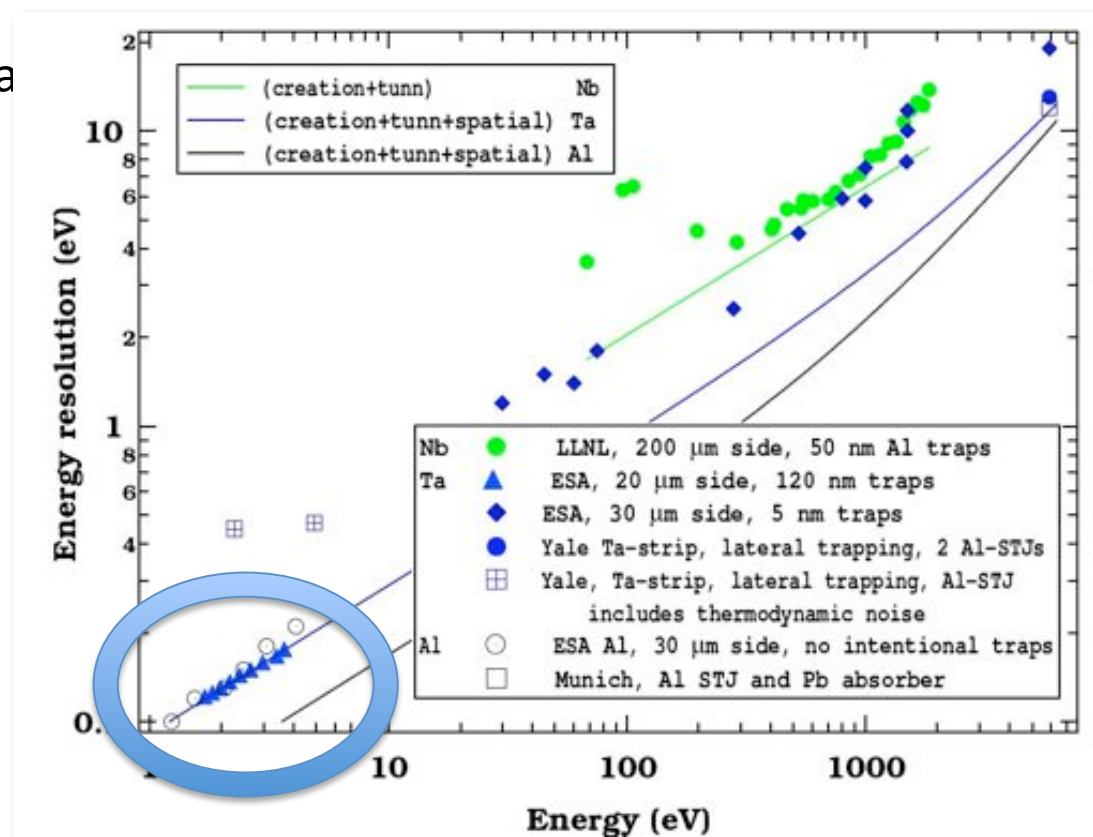
- Expect  $\Delta E \approx 2.5$  eV at 6 keV, observe 12 eV
- At low energies, almost statistically limited
- Nice : can usually be operated at 300 mK (<sup>3</sup>He)



# Jonctions tunnel supraconductrices (STJs)

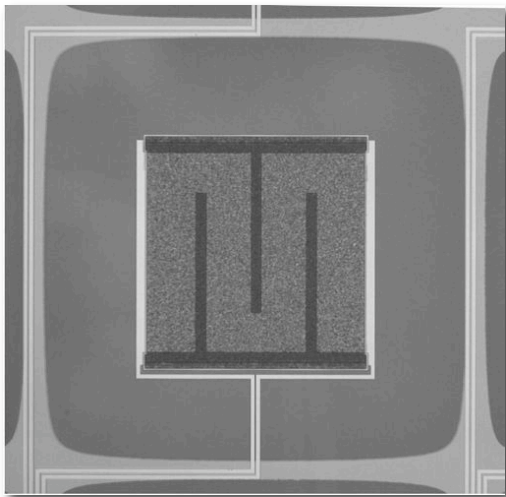
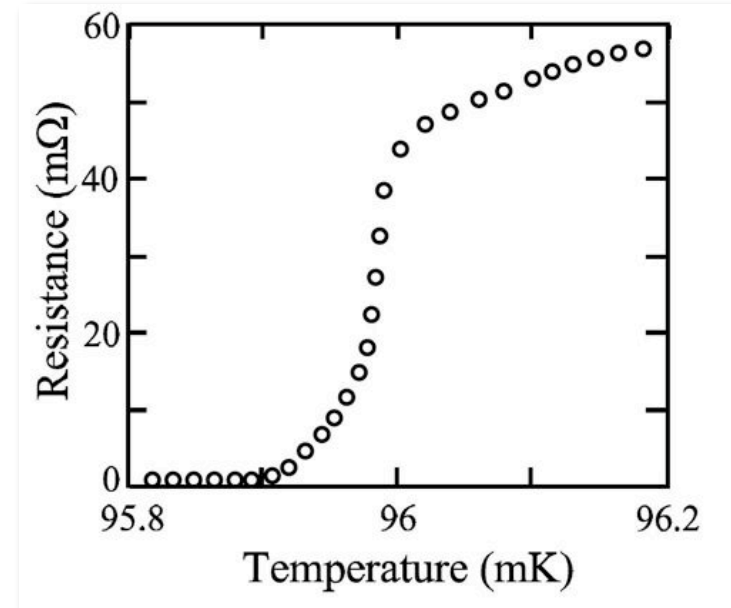
- Résolution en énergie en fonction de l'énergie détectée, comparée à la résolution théorique ultime :

$$\delta E_0 = 2.35 \sqrt{\epsilon F E_0}$$

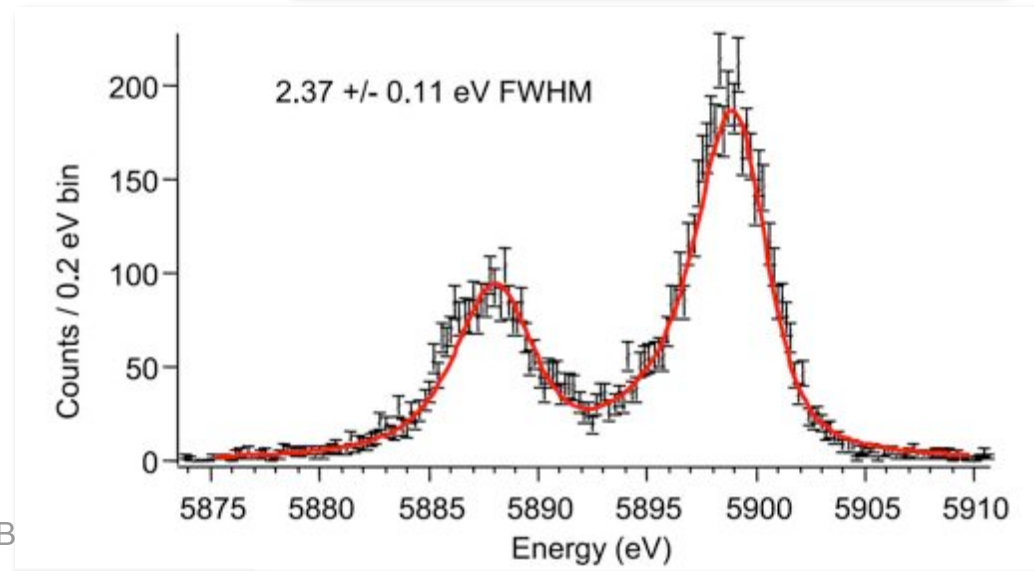


# TES (Transition edge sensors)

- Principe
- $\alpha = R/T \, dR/dT$  peut dépasser  $\gg 1000$  !
- Exemple simple pixel
- Remarquable résolution en énergie

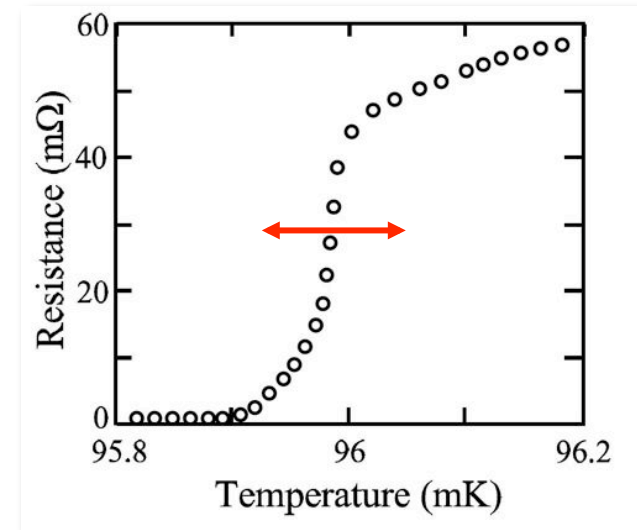


DRTB

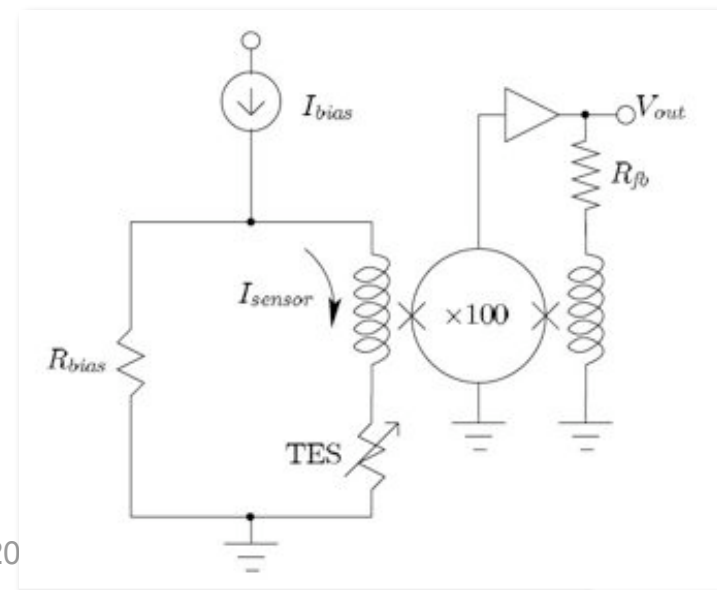


# Senseurs Transition edge (TES)

- Problèmes initiaux:
  - Reproductibilité de la  $T_c$
  - Ajustement possible par implantation ionique (Fe) mais coûteux en temps et en personnel
  - Point de fonctionnement et dynamique si biais en courant
- Avancée apportant la solution à ces problèmes: negative electro-thermal feedback (ETF) par Irwin (1995)
- Régulation voltage bias avec couplage à un bain thermique à T très froid
- En gros, se ramener au cas où l'on maintient l'impédance du senseur fixe
- Signal = - Puissance de régulation



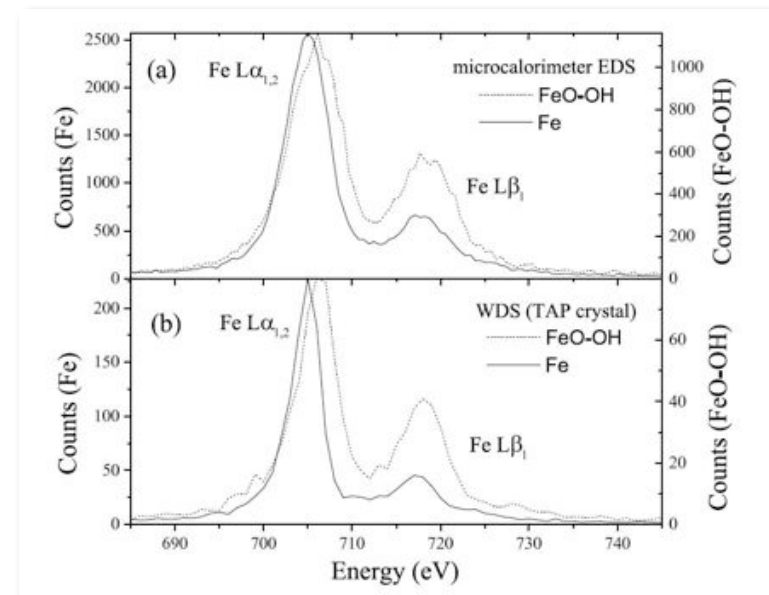
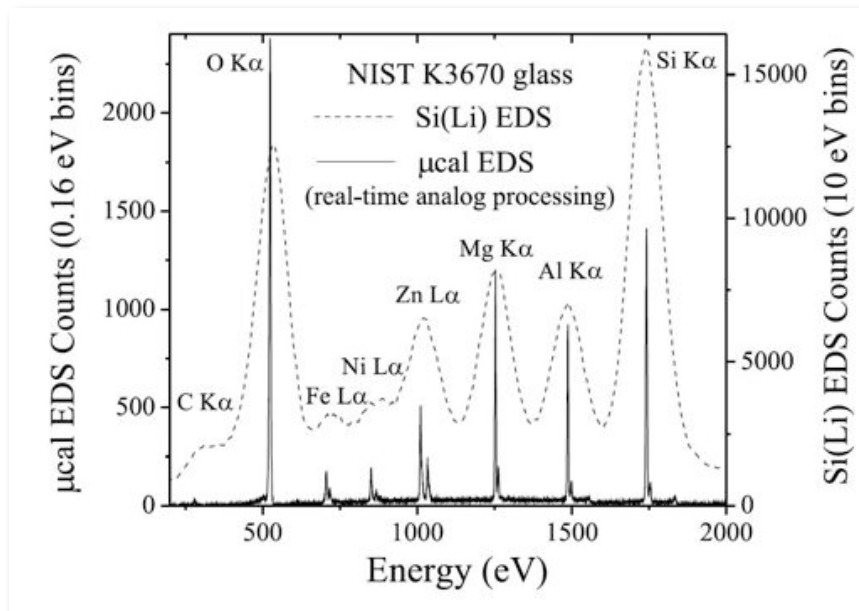
After Irwin et al. (2005)





# Sensors: Transition edge (TES)

- Outstanding energy resolution
- Comparison with best silicon detectors
- Performances similar to WDS (wavelength dispersive)
- Ability to detect environmental effects

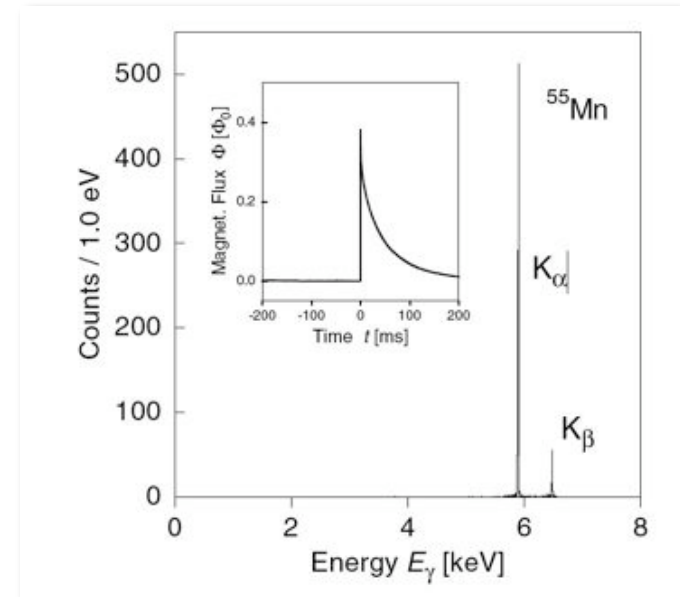
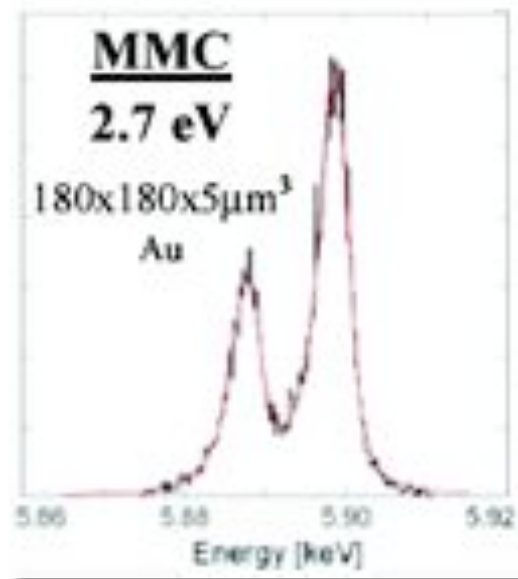


# MMC (Metallic Magnetic Calorimeters)

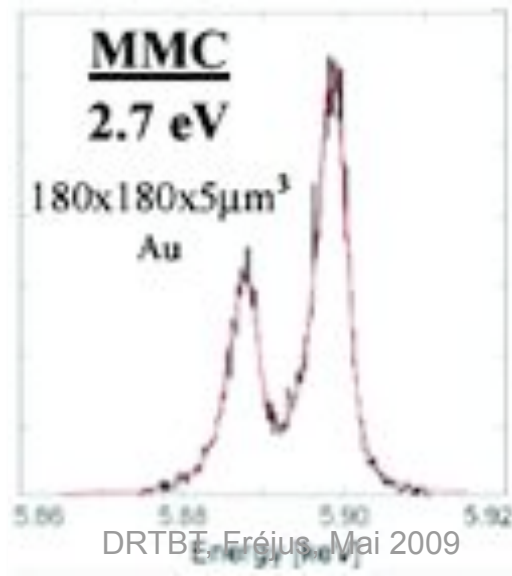
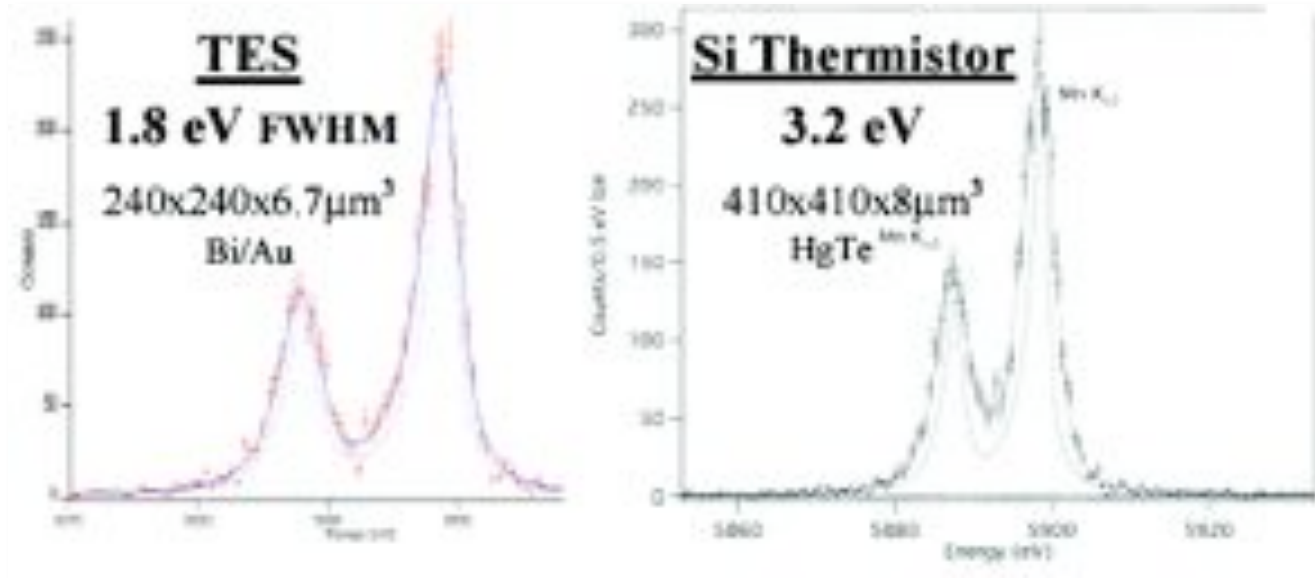
- Echantillon paramagnétique dans champ B relativement faible ( $\approx$  quelques mT)
- Bühler and Umlauf: un des premiers détecteurs cryogéniques utilisant comme senseur des  $4f$  ions dans un diélectrique : résolution en énergie déjà excellente, mais détecteurs très lents
- En 1993, Bandler et al. : implanter des ions paramagnétiques dans un métal : réponse extrêmement rapide ( $\approx 10^{-7}$  s)
- Excellente résolution en énergie ( $\approx 3$  eV @ 6 keV)
- Système le plus étudié Au:Er
- Devrait démontrer résolution aussi bonne que TES ( $\leq 2$  eV à 6 keV)

# Metallic Magnetic Calorimeters

- Excellente résolution en énergie ( $\approx 3$  eV @ 6 keV)
- Comparable à résolution TES
- Déjà quelques applications (voir talk Mathias Rodrigues)

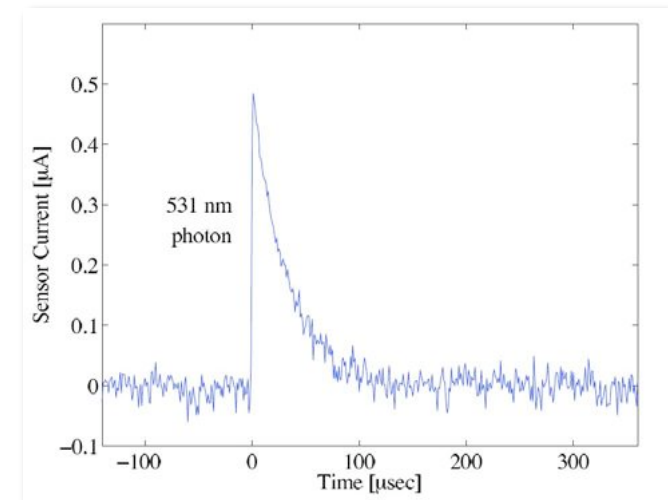
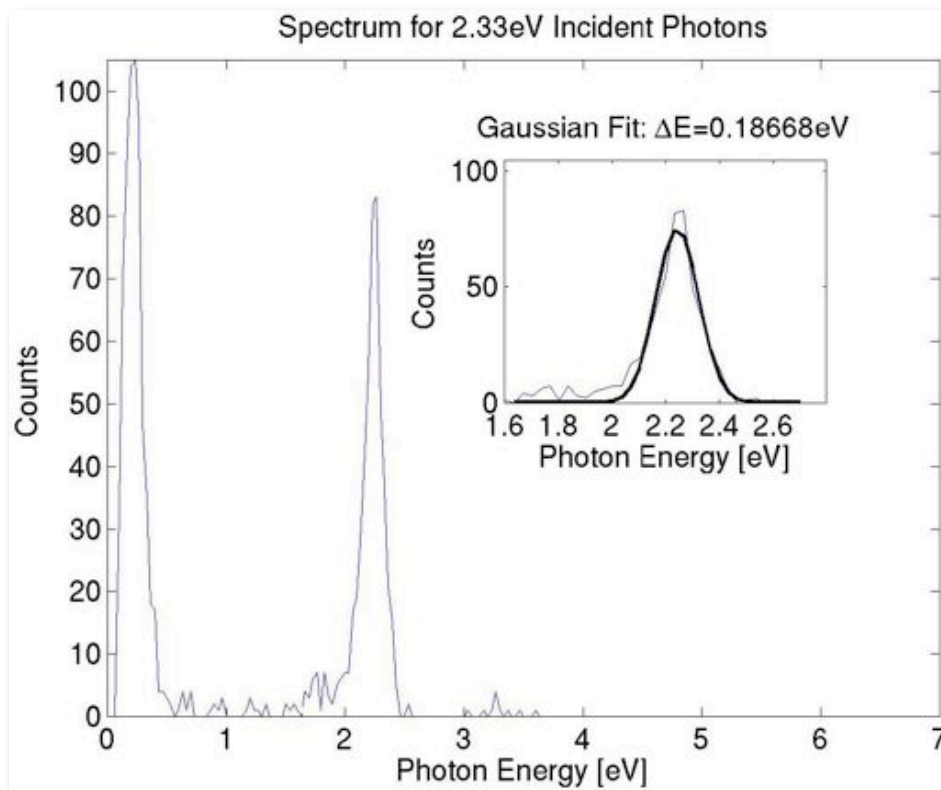


Meilleures performances actuelles microcalorimètres simple pixel:  
pas de grosse différence entre les trois principaux senseurs



# Utilisation comme détecteur simple photon

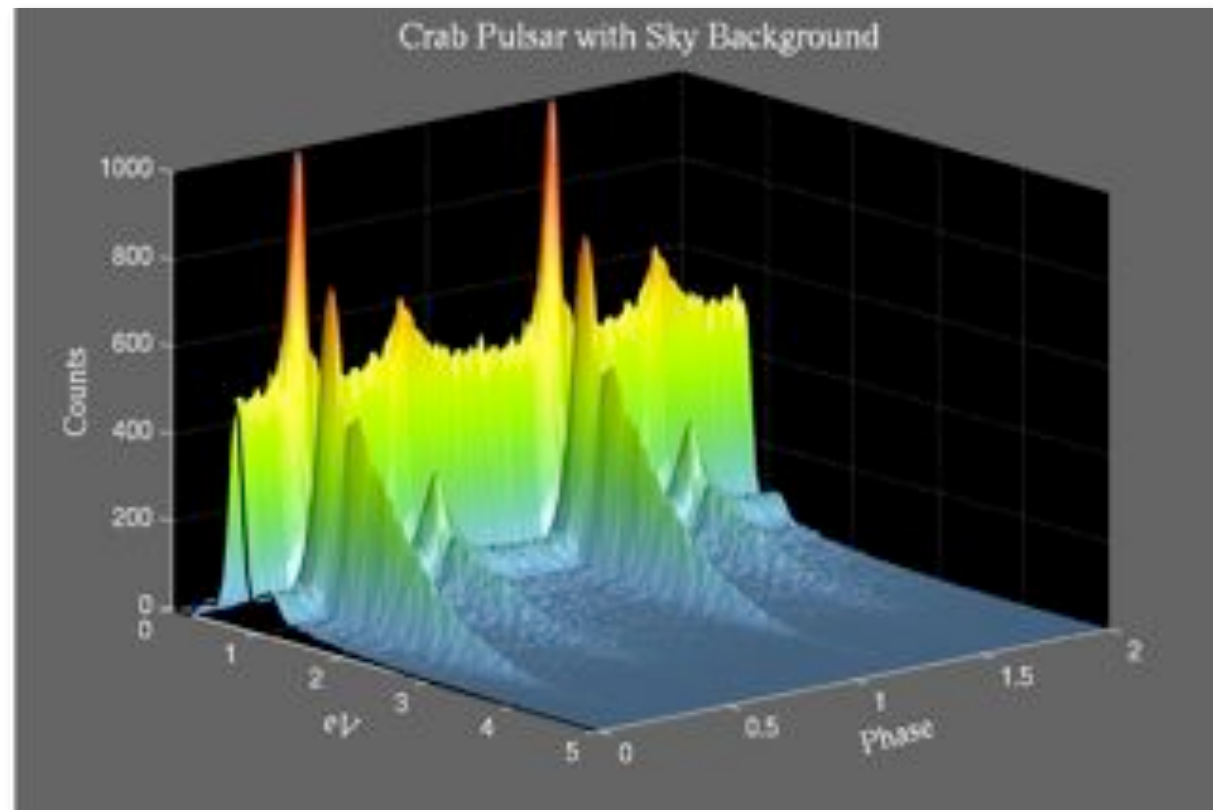
- A peu près en même temps par ESA (STJ) et Stanford (TES)



D'après Cabrera and Romani (2005)

# Courbe de lumière 33-ms du pulsar du Crabe

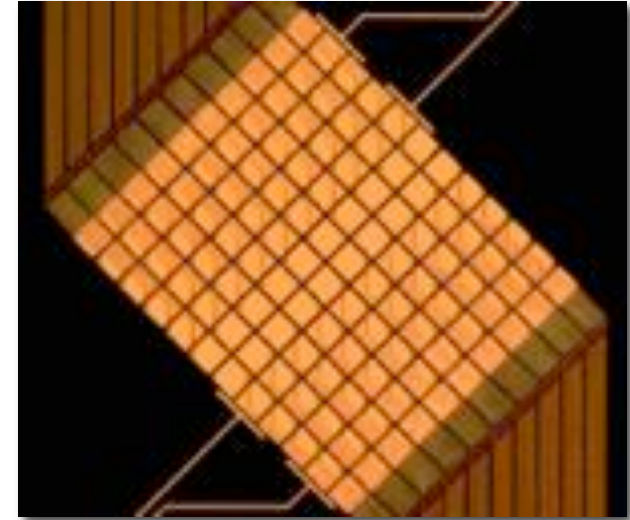
- Observations (TES) dans la banlieue de Stanford...



After Cabrera and Romani (2005)

# Du simple pixel à la matrice...

- Matrices S-Cam 1 et S-Cam 3 (ESA)
- Photomultiplicateur avec résolution en position et en énergie...
- Difficulté à étendre à grand nombre de pixels



La caméra S-Cam 3 (ESA)

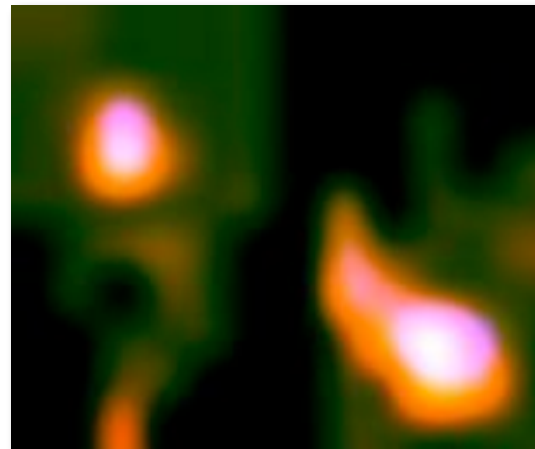


Image d'une région étendue d'émission IR

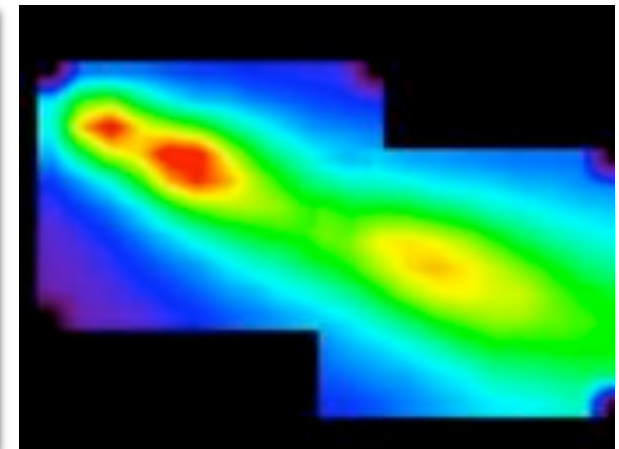
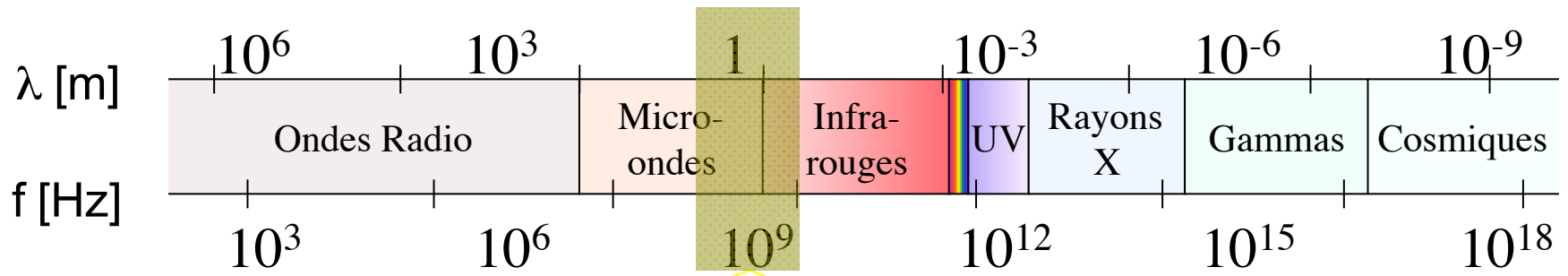


Image d'un fragment de la comète 73P/Schwassmann-Wachmann

# Observations au sol vs. observations en satellite

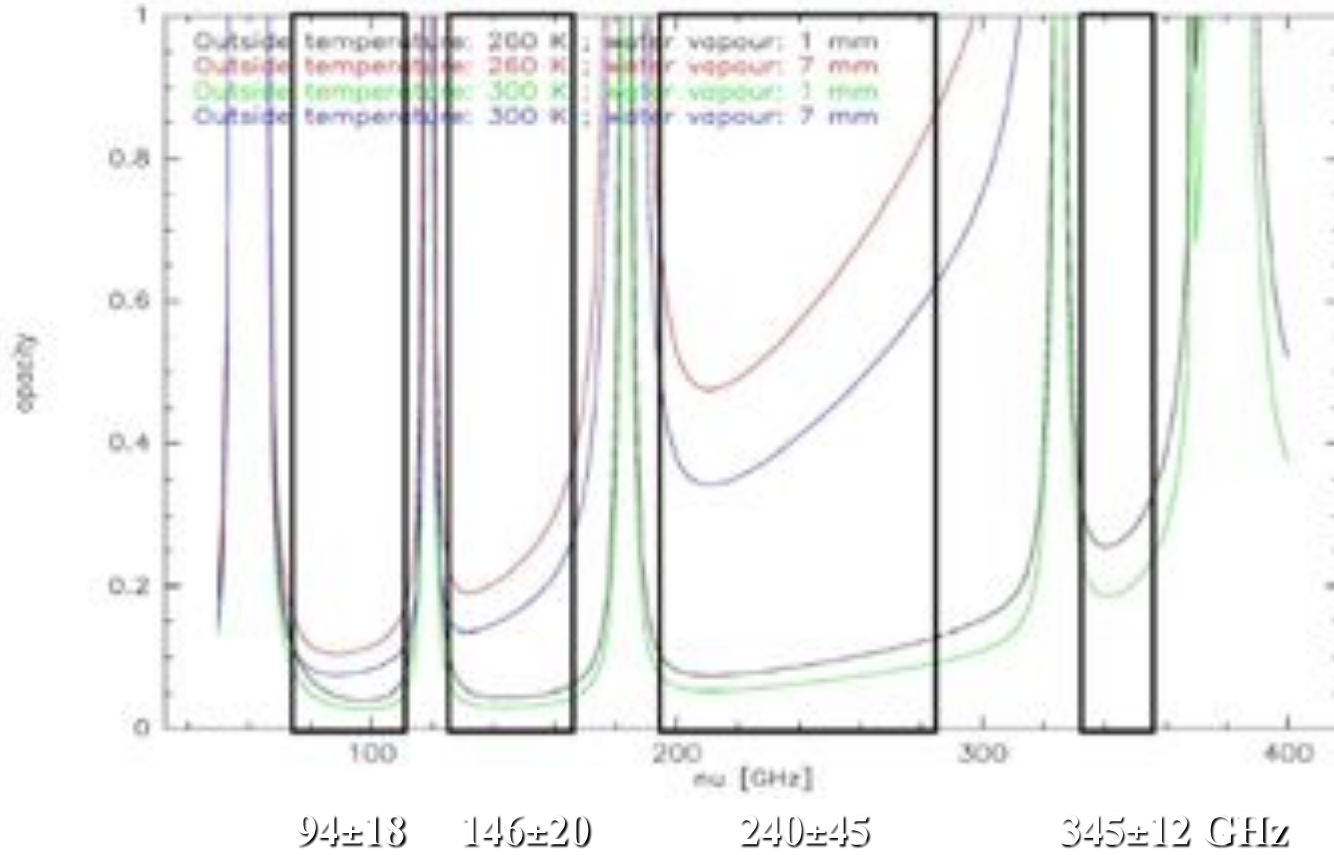
- Satellite : on s'affranchit des problèmes de transmission à travers l'atmosphère
- Pas le choix pour certaines bandes d'énergie de photons (astronomie X)
- Pour le millimétrique, bandes de transmission et absorption de l'atmosphère (Ph. Camus)
- Appareillage au sol: beaucoup moins cher et beaucoup plus facile à débogger/développer





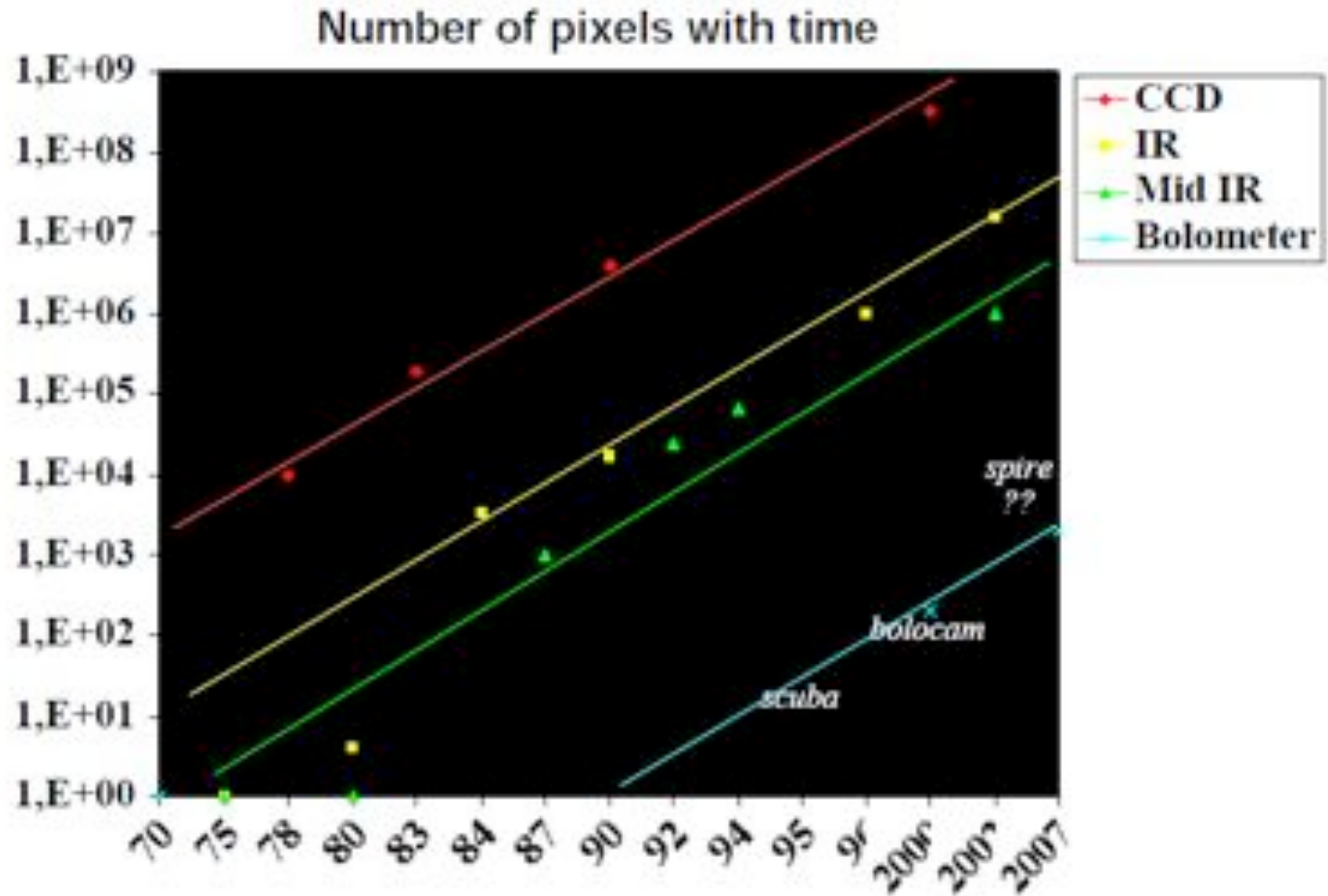
Rayonnement fossile

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



# Du laboratoire à la pré-industrie

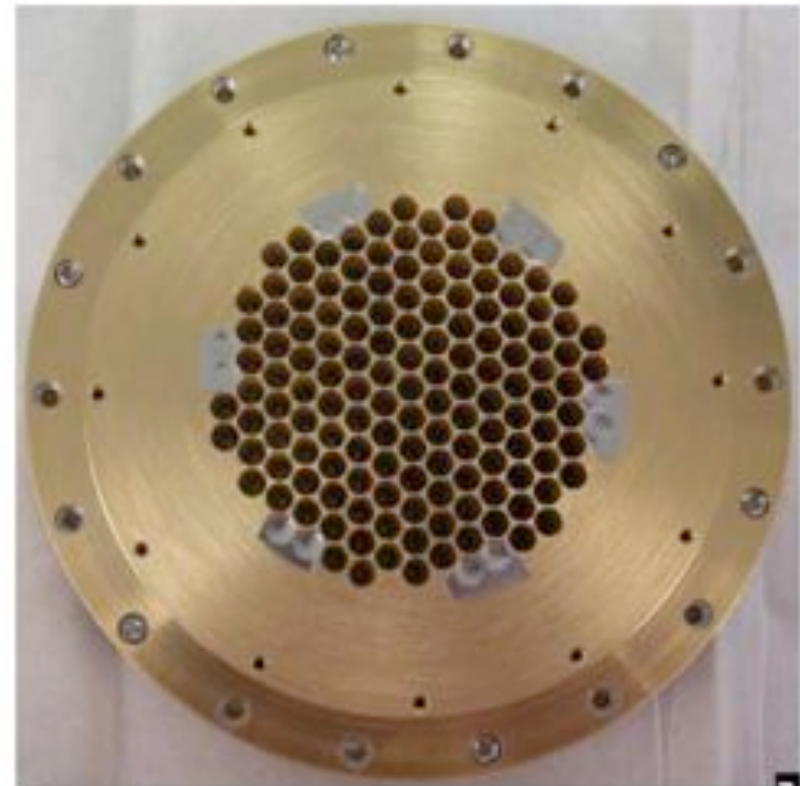
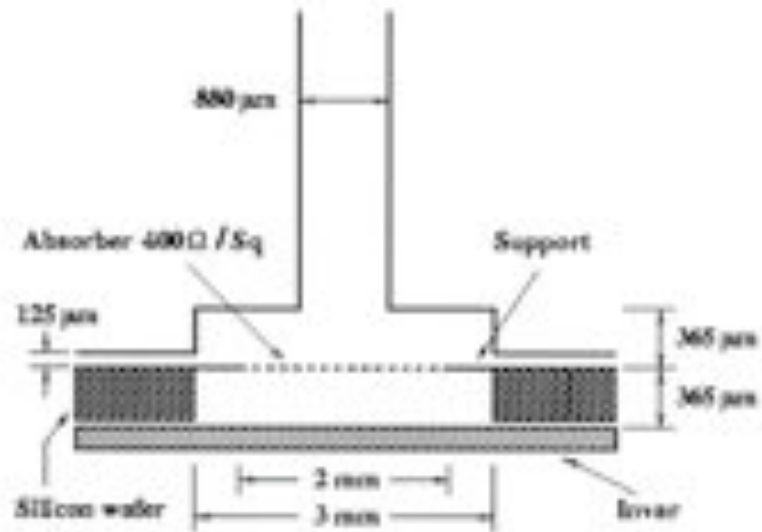
- Spécificités équipes de laboratoires vs. installations pré-industrielles (e.g. CEA/LETI)
- En laboratoire, définition et test des prototypes des nouvelles techniques, avant passage en production
- Equipements laboratoires : coût d'investissement de plus en plus grand, réalisation des prototypes en collaboration avec centrales de nanotechnologies.
- Exemple Néel, CSNSM, vs. IEF et/ou LPN (ou Stanford nanofabrication facility), vs. LETI ou industriel en contrat CNES
- Autre exemple définition détecteur Ge dans labo, production Canberra-Eurisys



( *Crédit L. Rodriguez* )

# Matrice Bolocam (Glenn, 2002)

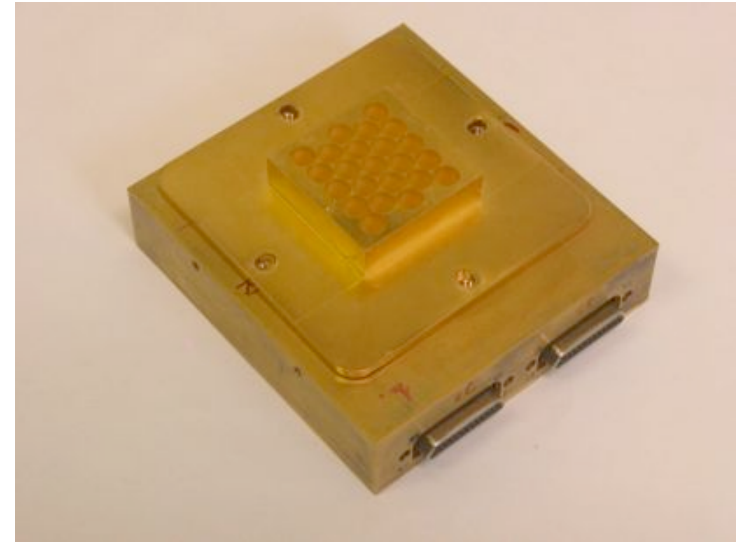
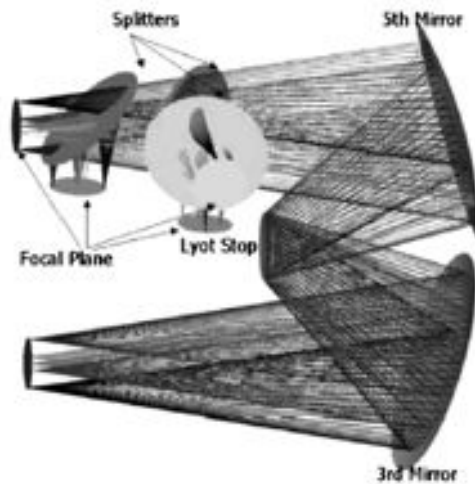
$$A = 1 - R - T = \frac{4g_a Z_0 l}{(2 + g_a Z_0 l)^2}$$



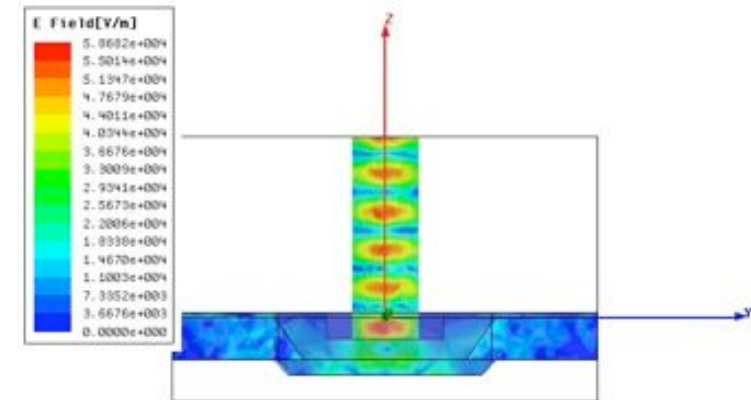
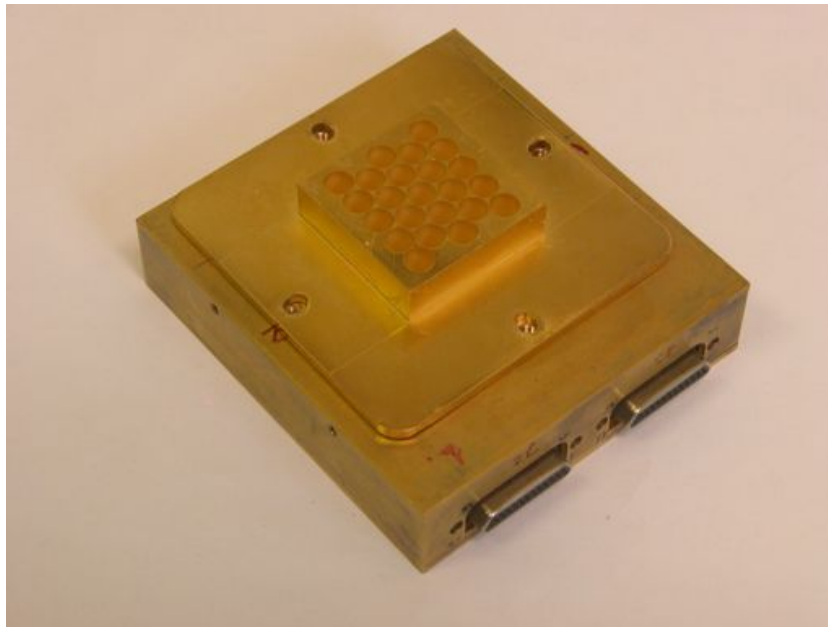
# Matrices pour Olimpo

Télescope Cassegrain submillimétrique, diamètre 2.6 m

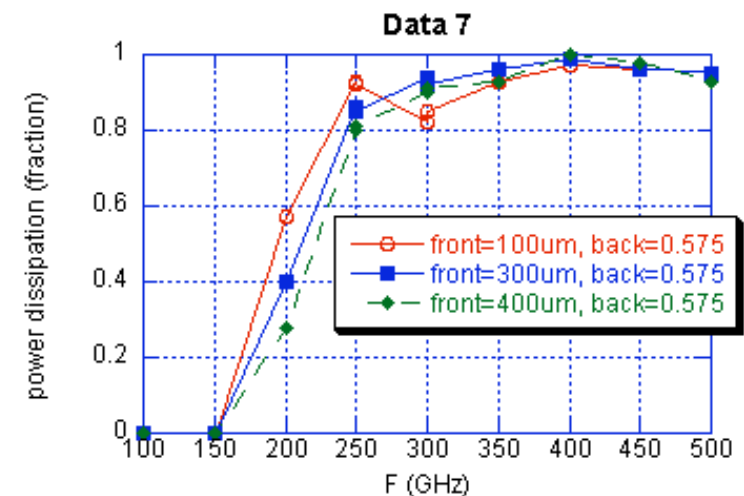
- télescope  $f/D = 3.5$   $\Rightarrow$  grand champ (30 arcmin)  
 $\Rightarrow$  angle d'ouverture  $16^\circ$
- pouvoir de résolution à 2mm : 3.2 arcmin



# 23-pixel matrices for OLIMPO (CMB)



- Small prototype arrays of 23 pixels @ 300mK
- Frequency channels 500-600 GHz and 380-440 GHz (TBC)
- Resonant cavity design
- Backshort / front distances  $\lambda/4$  ( 2<sup>nd</sup> wafer )
- Crosstalk < 1%





# Thermomètre NbSi

**Nb<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub> :**

-> 1-5 MΩ adapté à l'électronique de lecture

-> composition x optimale = f (T<sub>fonct</sub> = 350 mK)

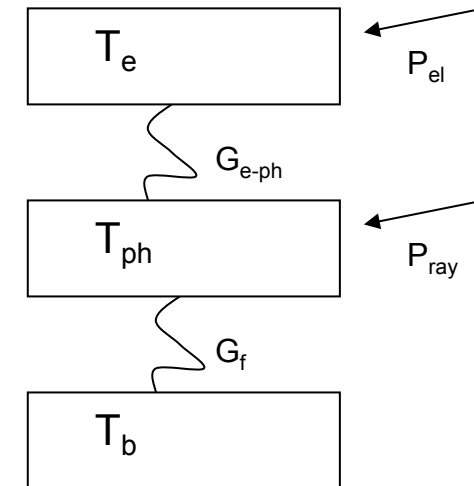
-> effet de champ et découplage électron/phonon

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

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

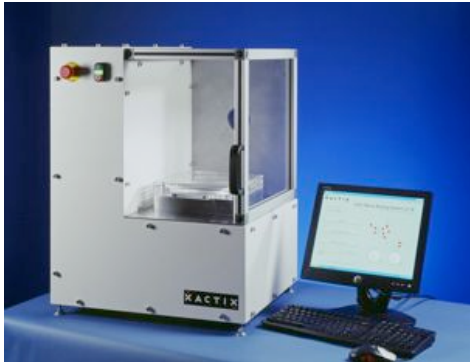
$$\frac{E^2}{\rho} = G_{e-ph} \cdot (T_{el}^5 - T_{ph}^5)$$

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



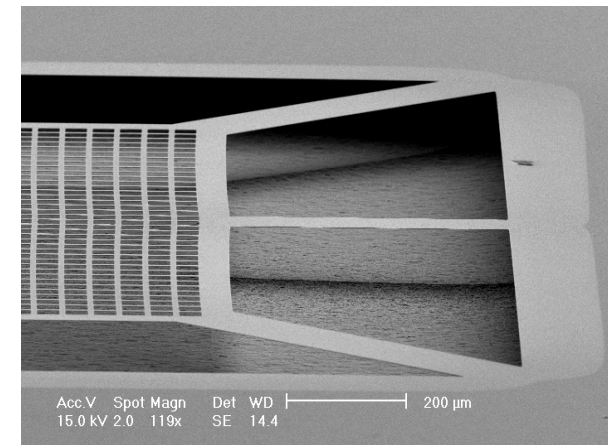
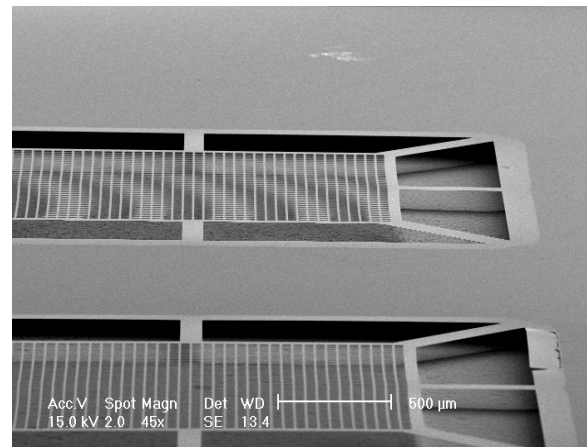
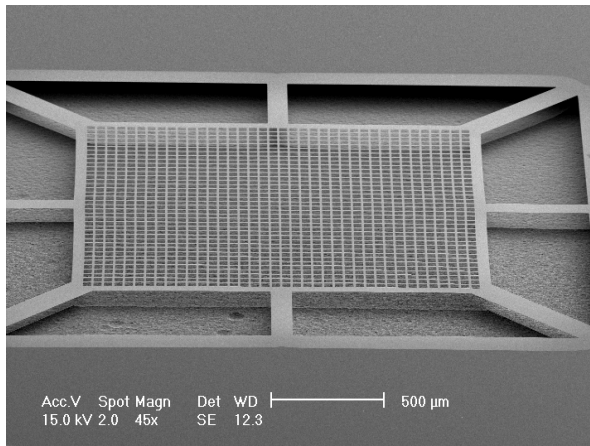
$$\text{Volume de la couche : } \Omega \geq 10 \cdot \frac{P_{el}}{G_{e-ph}} \cdot T_{ph}^5$$

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



***Le XeF<sub>2</sub> se présente sous la forme solide.  
Il passe à l'état gazeux à environ 3,8 Torr  
à 25 ° C.***

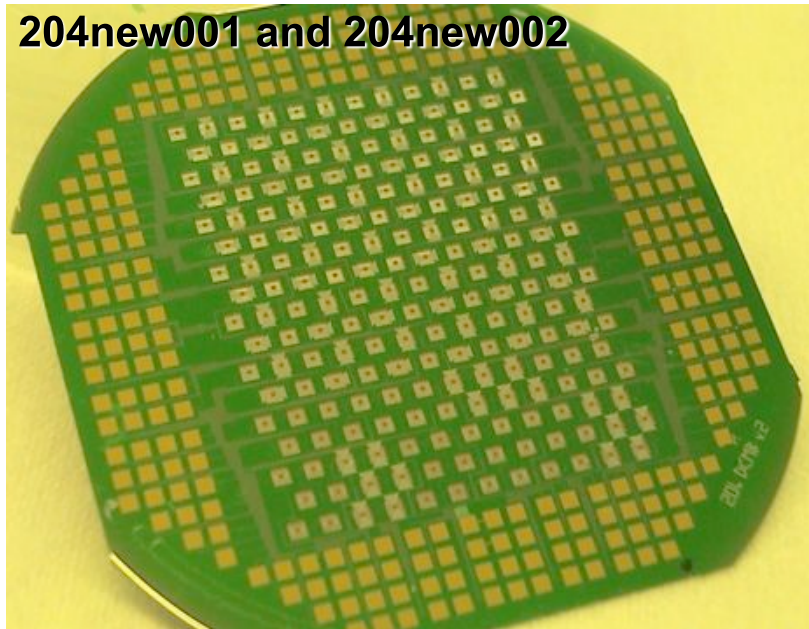
***Le silicium se grave de façon isotrope  
très sélective jusqu'à (1000:1) vis à vis  
du SiO<sub>2</sub>, du nitrure de silicium, de  
l'aluminium....***



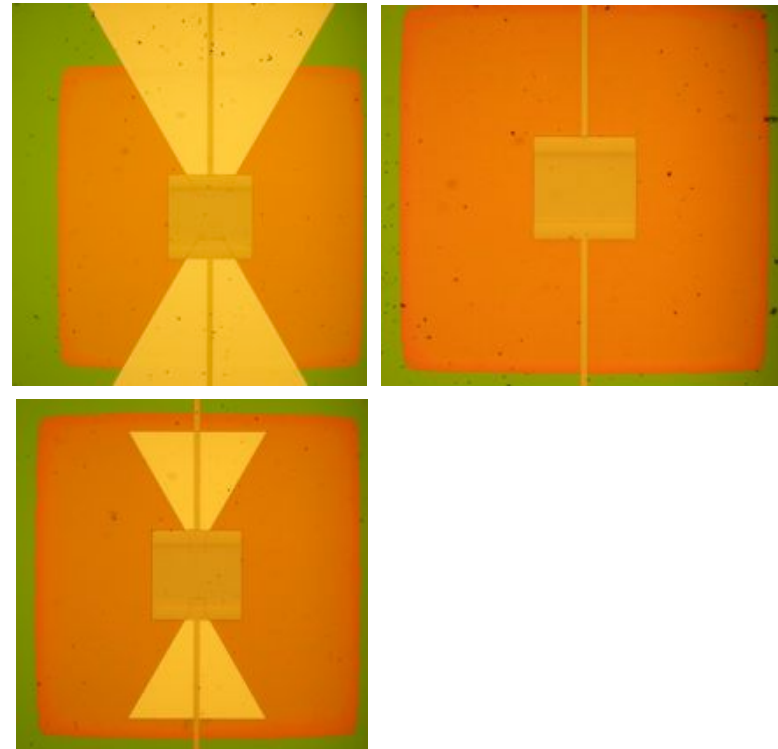
***Membranes ajourées en nitrure de silicium 4x4 mm  
épaisseur 500 nm.***

# Matrice à antenne DCMB

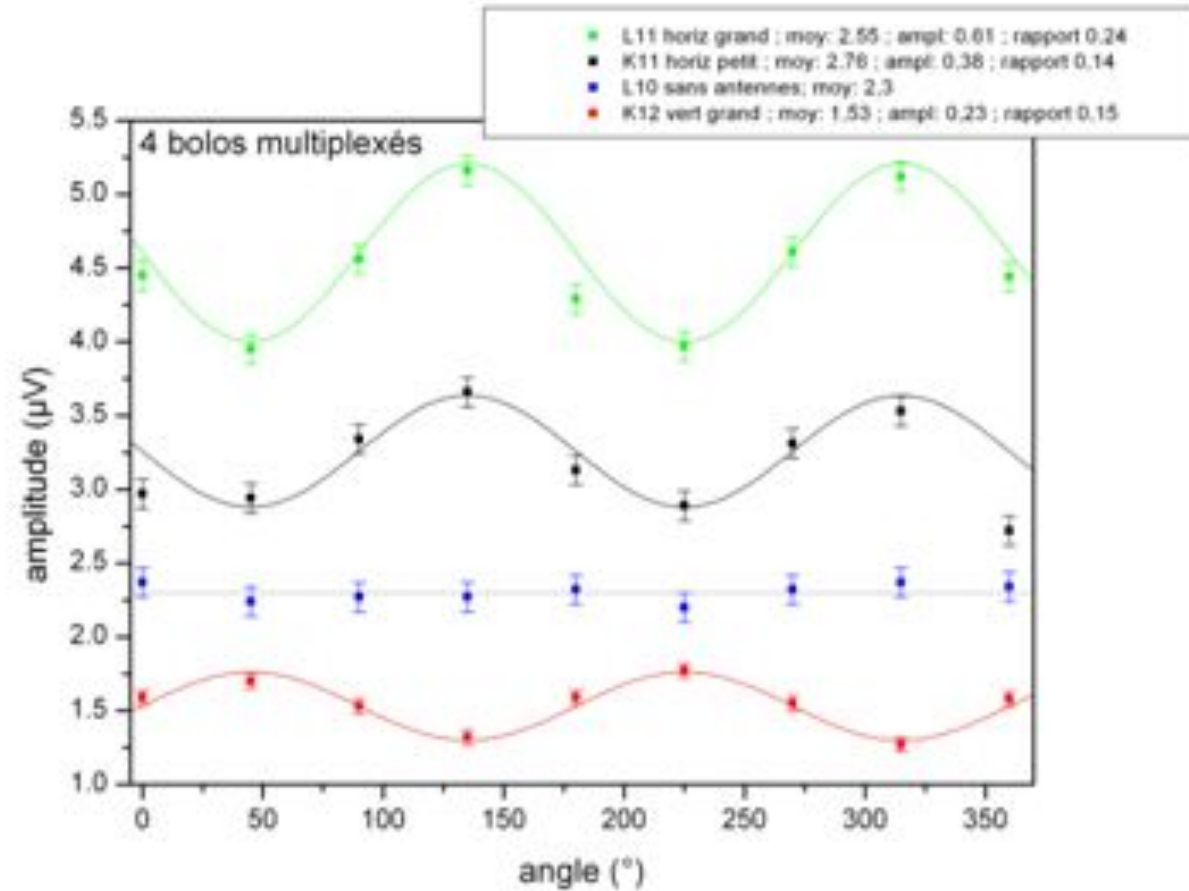
204new001 and 204new002



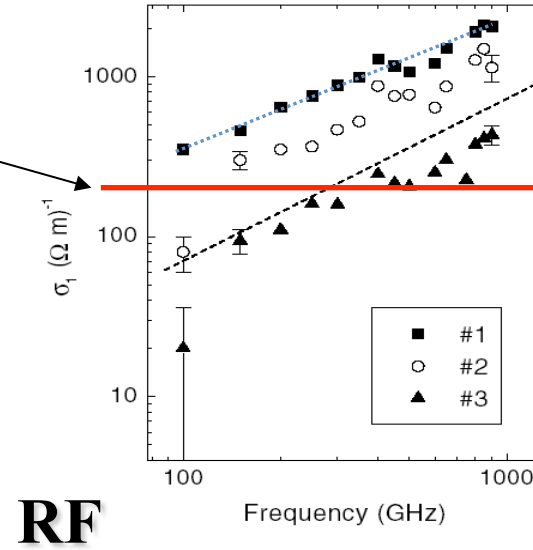
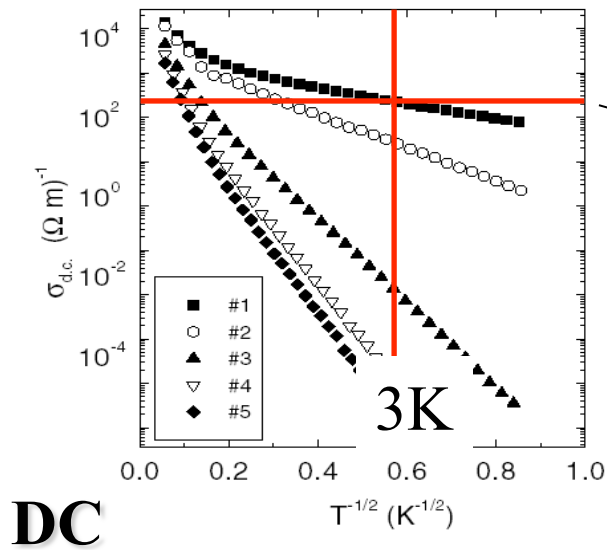
Test matrix (August 2007)



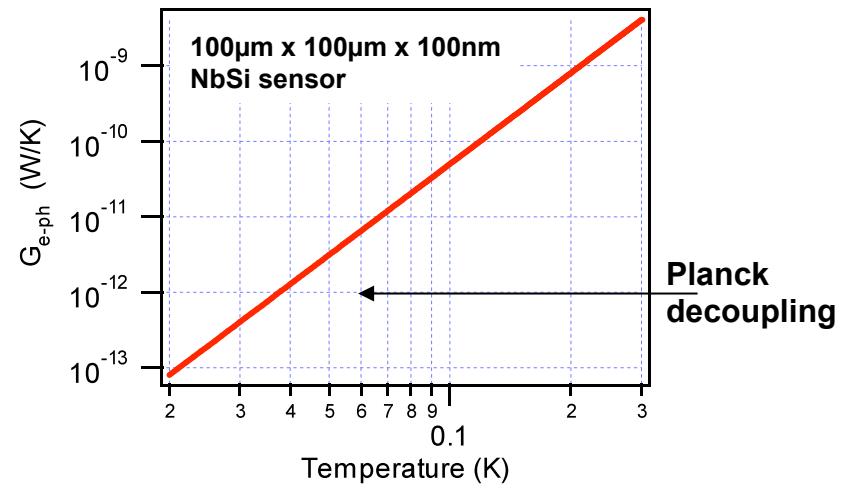
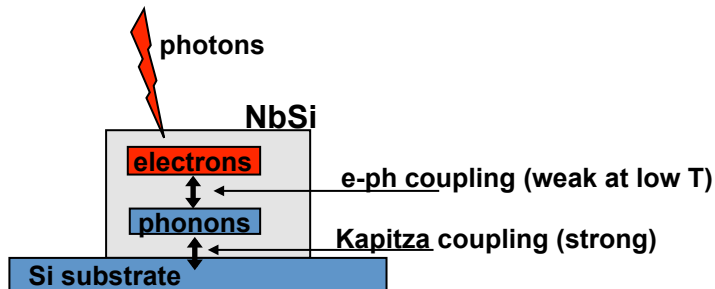
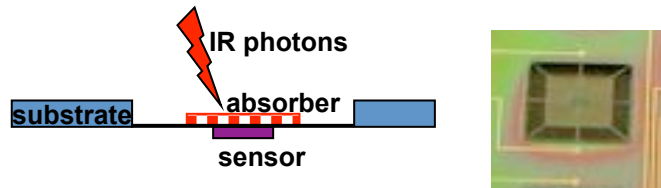
# Réponse à la polarisation



( 1 mm )



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



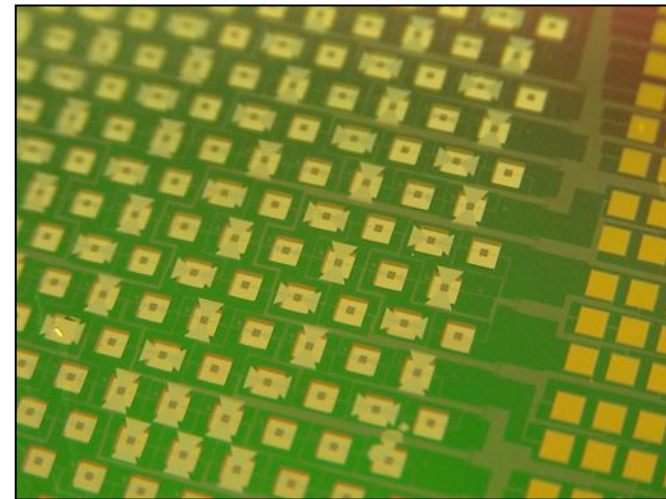
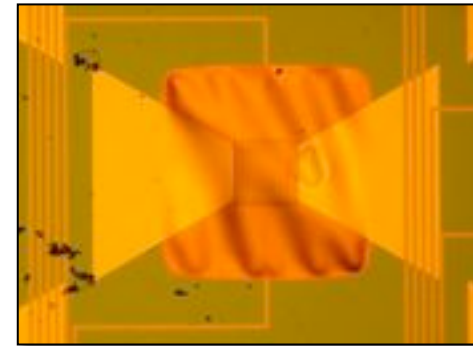
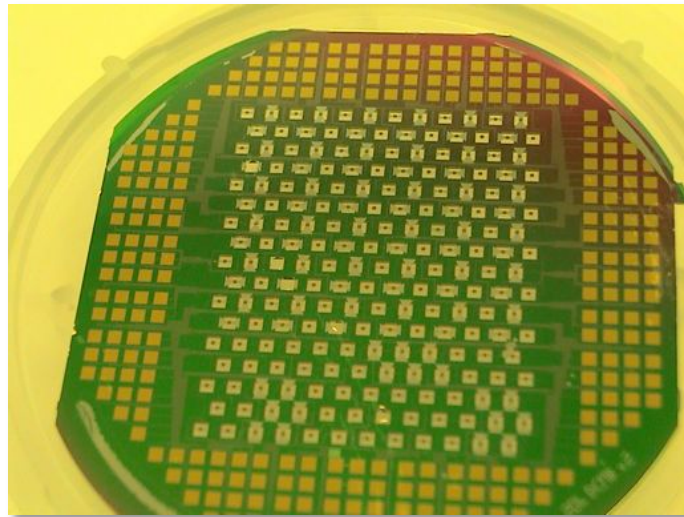
$G_{e-ph} = 5gV T^4$ . Cooling below 60mK is necessary to reduce electron-phonon coupling.

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.



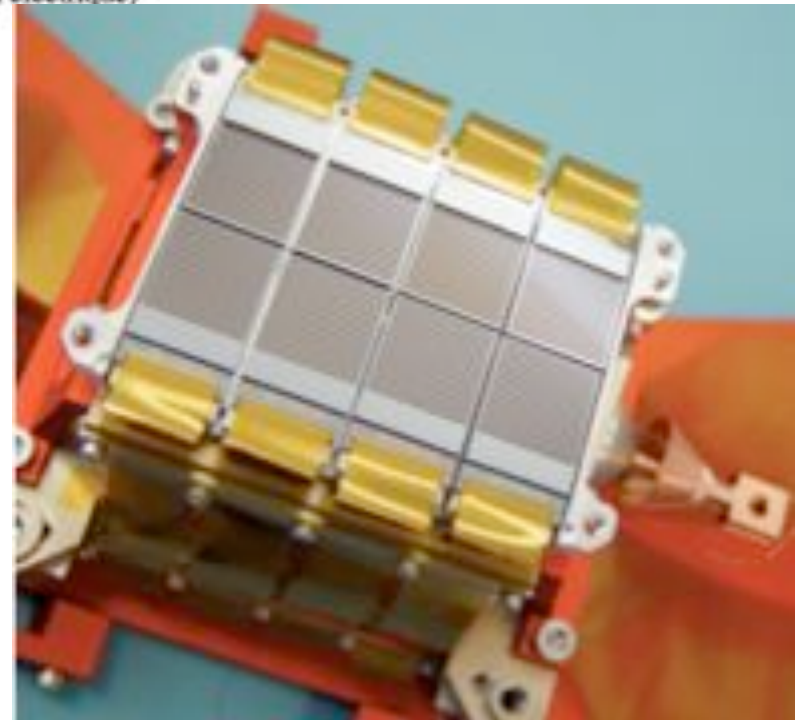
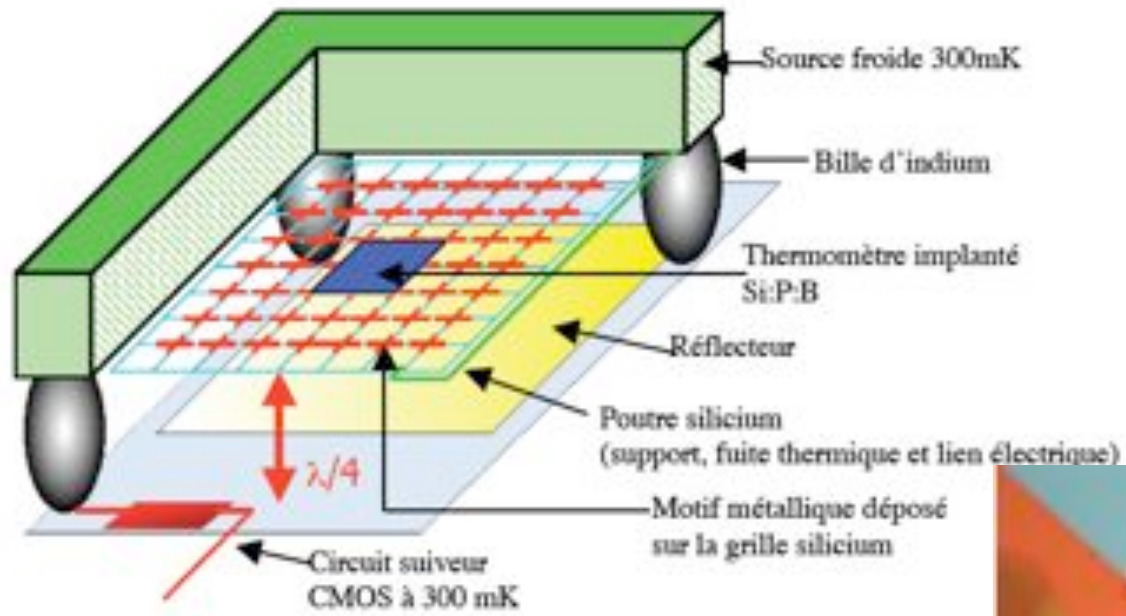
## 204 bolometer arrays with bow tie antennas

- Future CMB experiments: high-resolution anisotropy mapping and polarisation detection → large arrays of antenna-coupled bolometers at low temperature.
- 2 antenna sizes, 2 orientations
- High impedance NbSi

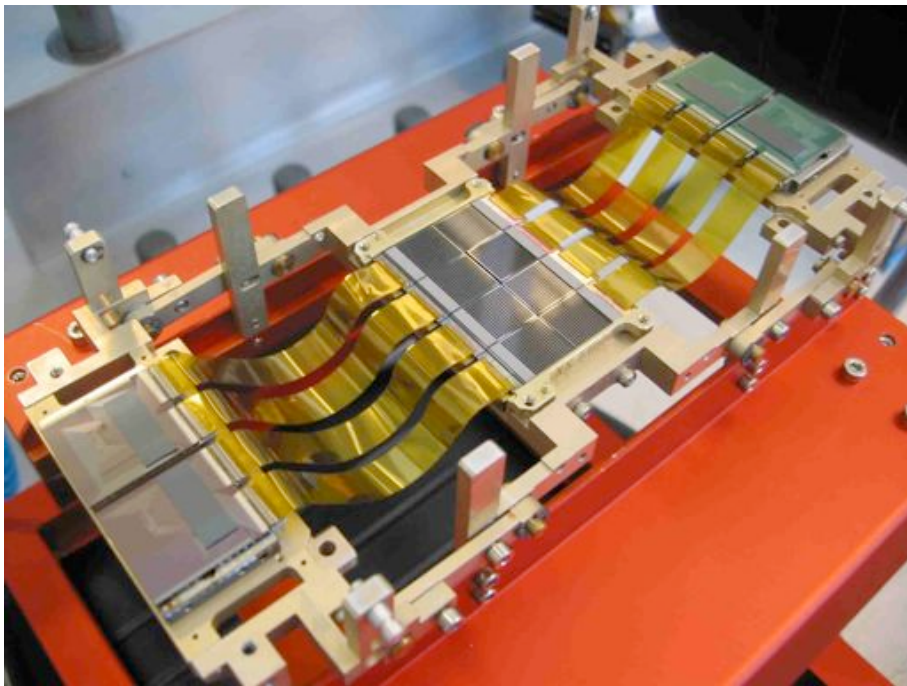
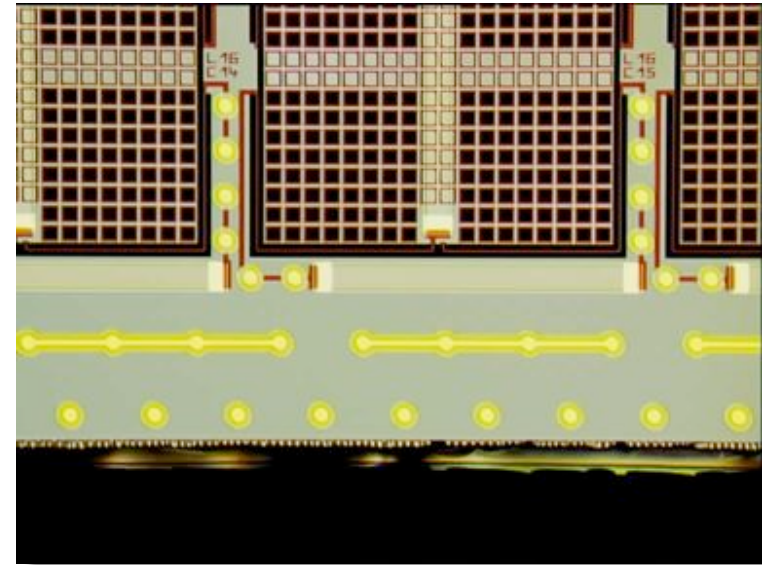
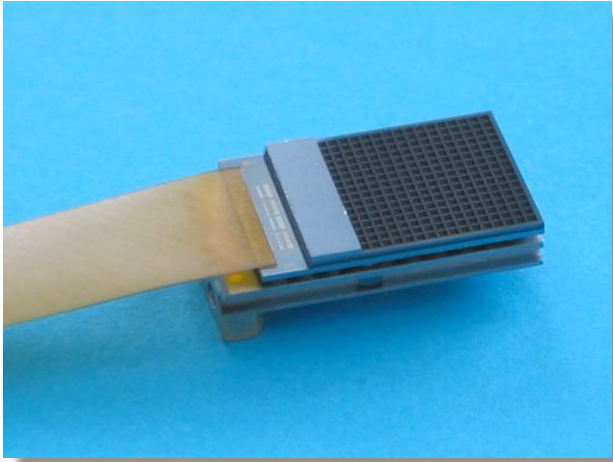




# Matrices ARTEMIS



# Développements de matrices pour le satellite Herschel

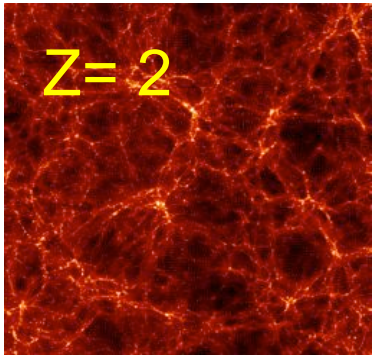




# Multiplexage, MKIDs et autres...

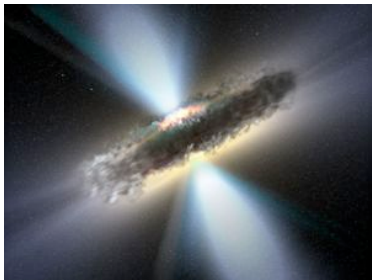
- Matrices : grand nombre de canaux déjà envisagés par les physiciens (jusqu'à  $O(10^6)$  canaux envisagés à cette école)
- Multiplexage (temps, fréquence, codage, ...) pratiquement nécessaire (D. Prêle)
- Idée très astucieuse des KIDs (Kinetic Inductance Detectors) : circuits résonants désaccordés légèrement par les quasiparticules produites par une interaction (A. Monfardini)



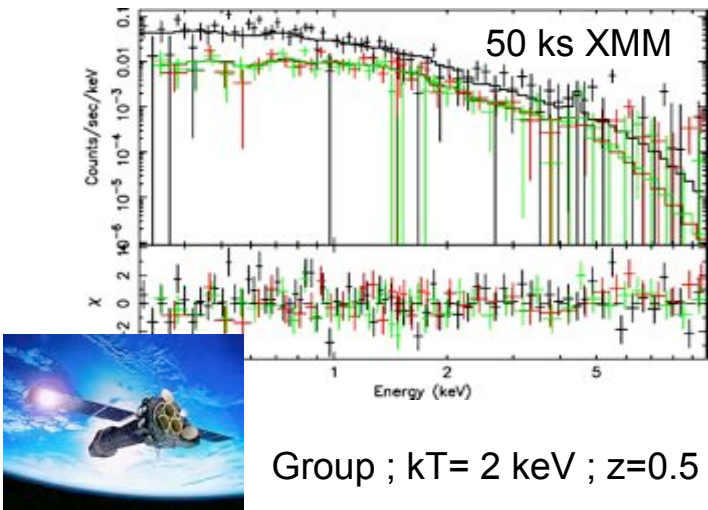


# IXO: International X-ray Observatory

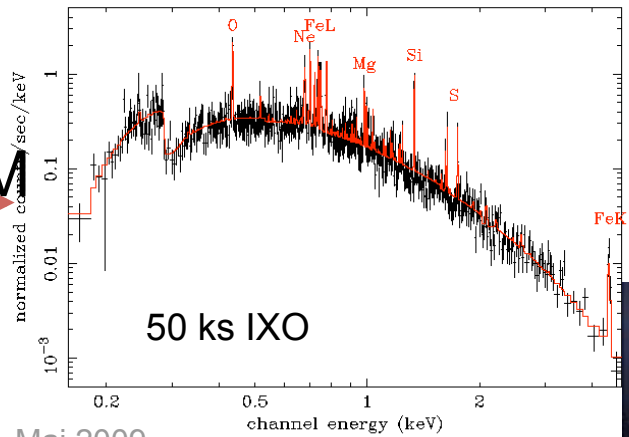
- ### Main scientific objectives of IXO
- **Evolution** of large scale structures (at large redshifts)  
Formation of the first structures and evolution towards the present galaxy clusters
  - Nucleosynthesis (*synthesis of metals*)
  - Links between galaxies and **Supermassive Black Holes**  
Birth and Growth of black holes ; relations with their host galaxies
  - Matter under extreme conditions –Tests of General Relativity



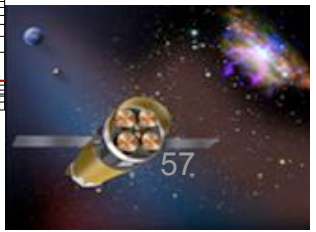
In order to meet these objectives, we need:  
A **large collection surface** & an **excellent spectral resolution**



From XMM  
to IXO



DRTBT, Fréjus, Mai 2009



# Développement de nouveaux types de cryostat

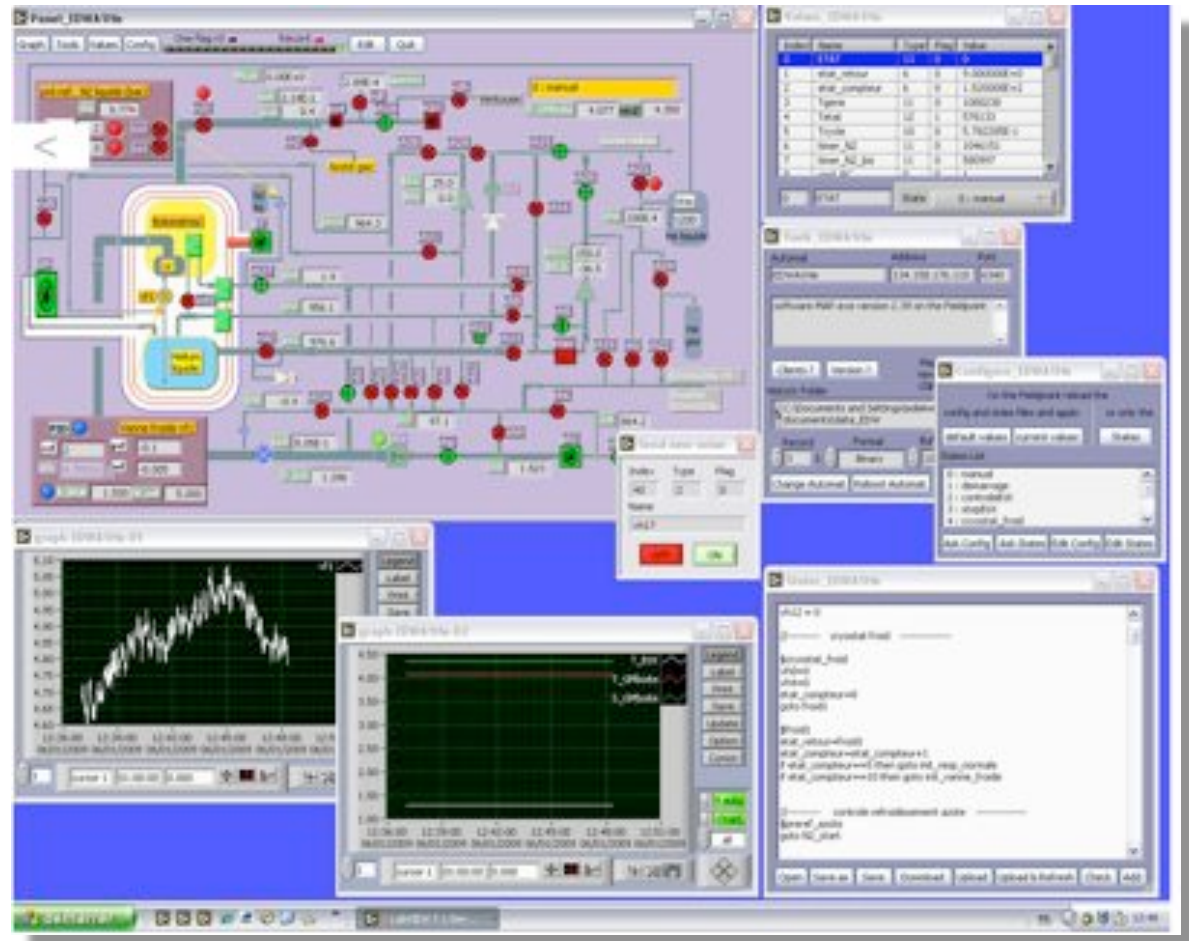
- (Pratiquement) plus de fluides externes (azote et He liquide)
- Contrôle total du cryostat à distance et mode automatique
- Protection et mode dégradé pour parer aux incidents
- 10 mK de température de ligne de base
- l'un des plus importants volumes utiles à 10 mK
- Alain peut déboguer et démarrer le cryostat même quand il est au Japon ou au Népal...





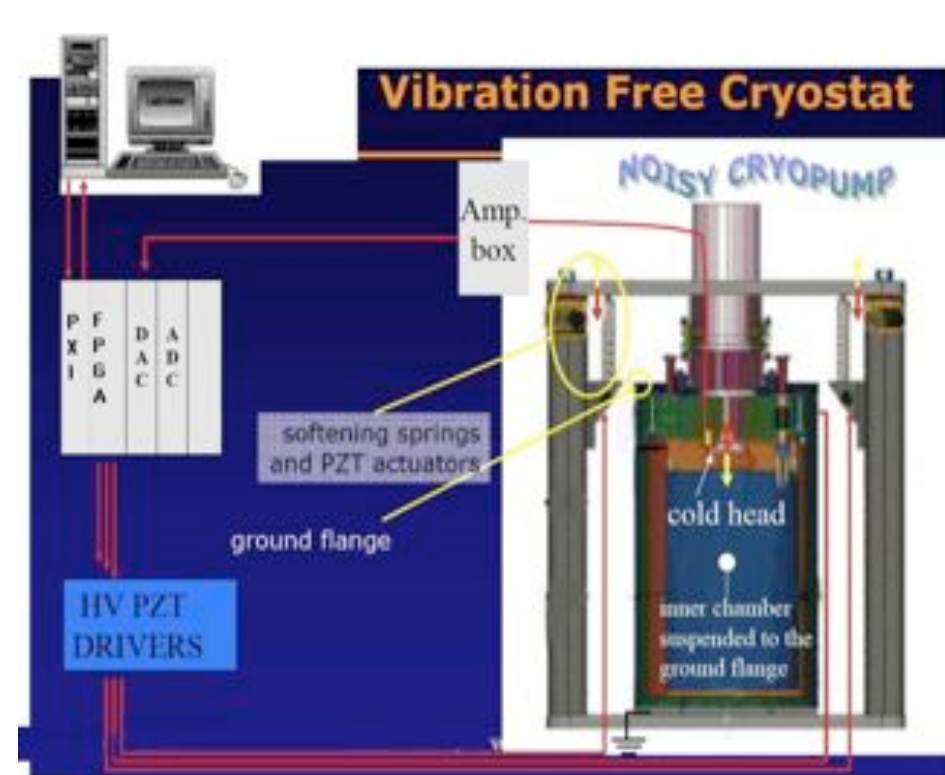
# Dilution cryostat: remote and automated

- (Almost) no external fluids
- Fully remote operation possible using internet connection
- 10 mK baseline temperature
- probably present largest volume at 10 mK



- **Coût croissant de l'hélium**,  
→ développement de systèmes sans hélium externe (circuit fermé)
- Prototypes utilisant des tubes pulsés développés par le CEA et le CNRS pour EDELWEISS, Planck, VIRGO
- **ULTRACOLD : réduire de façon drastique les vibrations** induites par le système de refroidissement par tubes pulsés et pompes turbomoléculaires
  - **Compensation active accéléromètres – actuateurs**
  - Cryostat dédié avec turbo, tube pulsé et système compensation
- Problèmes similaires dans **advanced VIRGO** ; satellite Planck : réduction passive des vibrations ; EDELWEISS, EURECA

## Ultracold: compensation active des vibrations

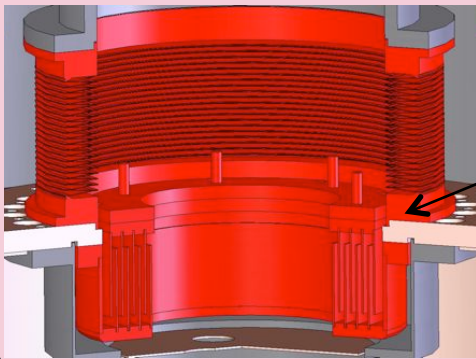


## Cryostat ULTRACOLD

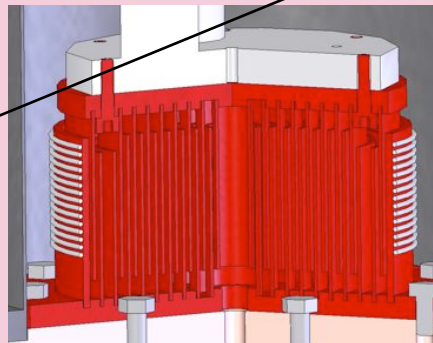
- Atténuation des vibrations via système passif
- Liaisons froides par échange gaz (He)
- Asservissements dynamique via actuateurs piézo et accéléromètres

**ETAPE 1 (validée) : optimisation du système Passif**

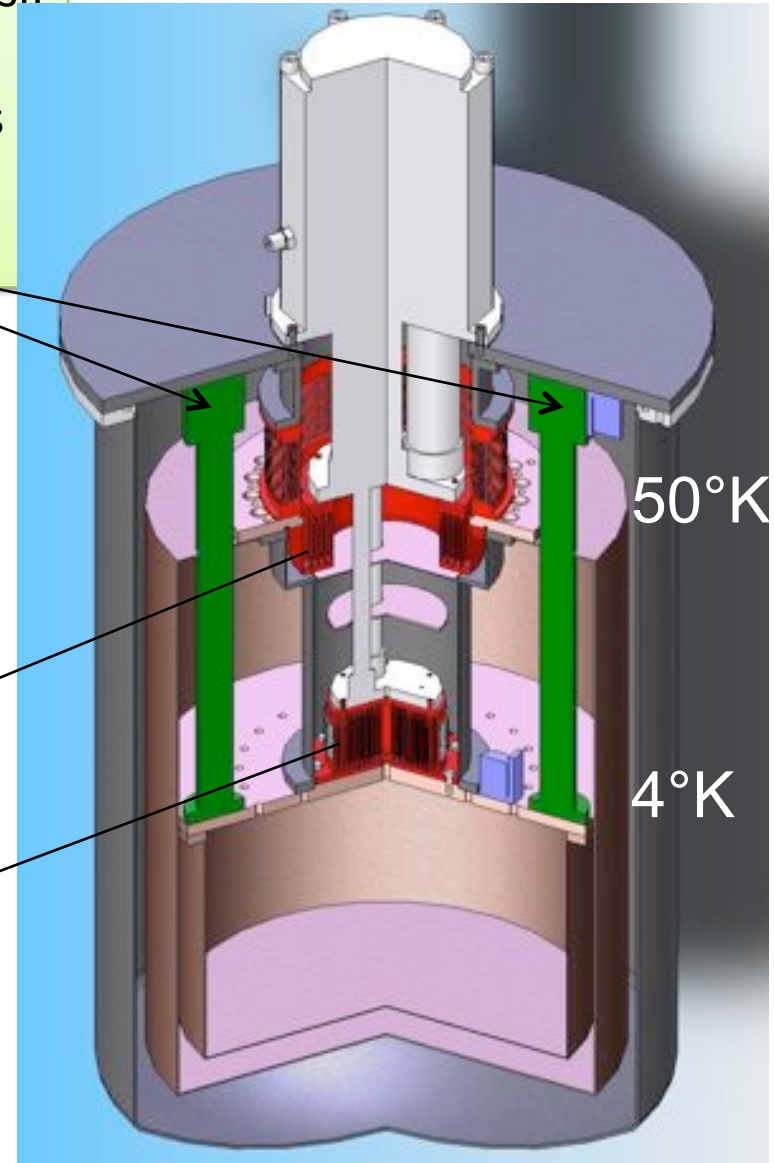
Innovation (licence CEA-Cryoconcept) : liaison froide via échangeur gaz à 50K et 4K



Etage 50°K

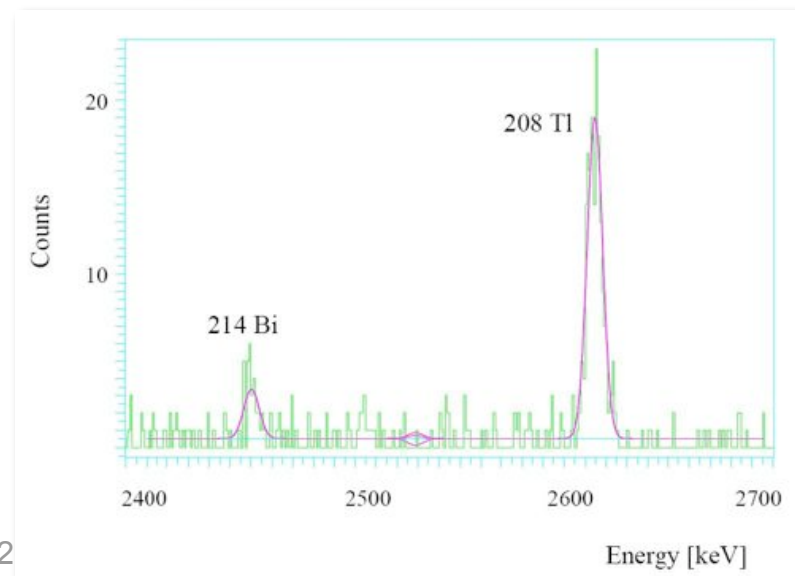
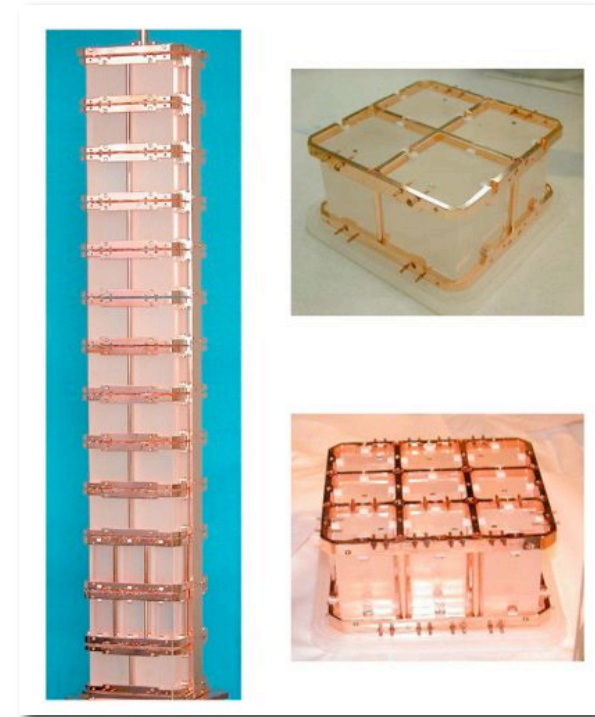


Etage 4°K



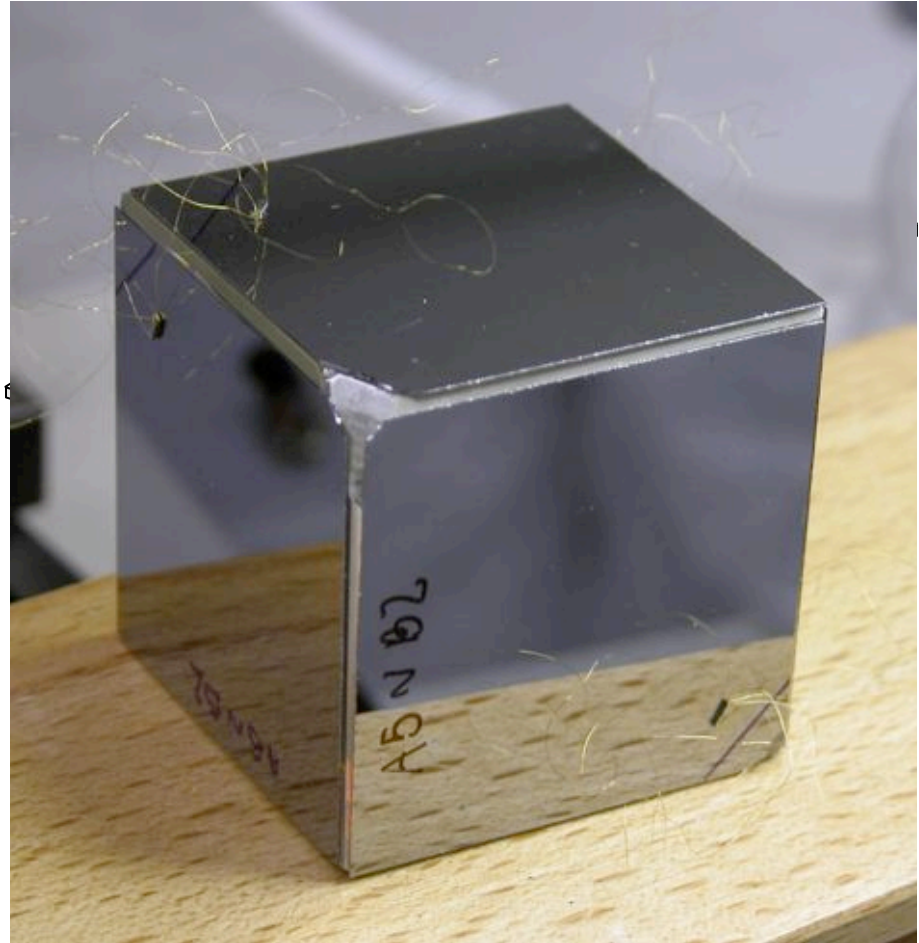
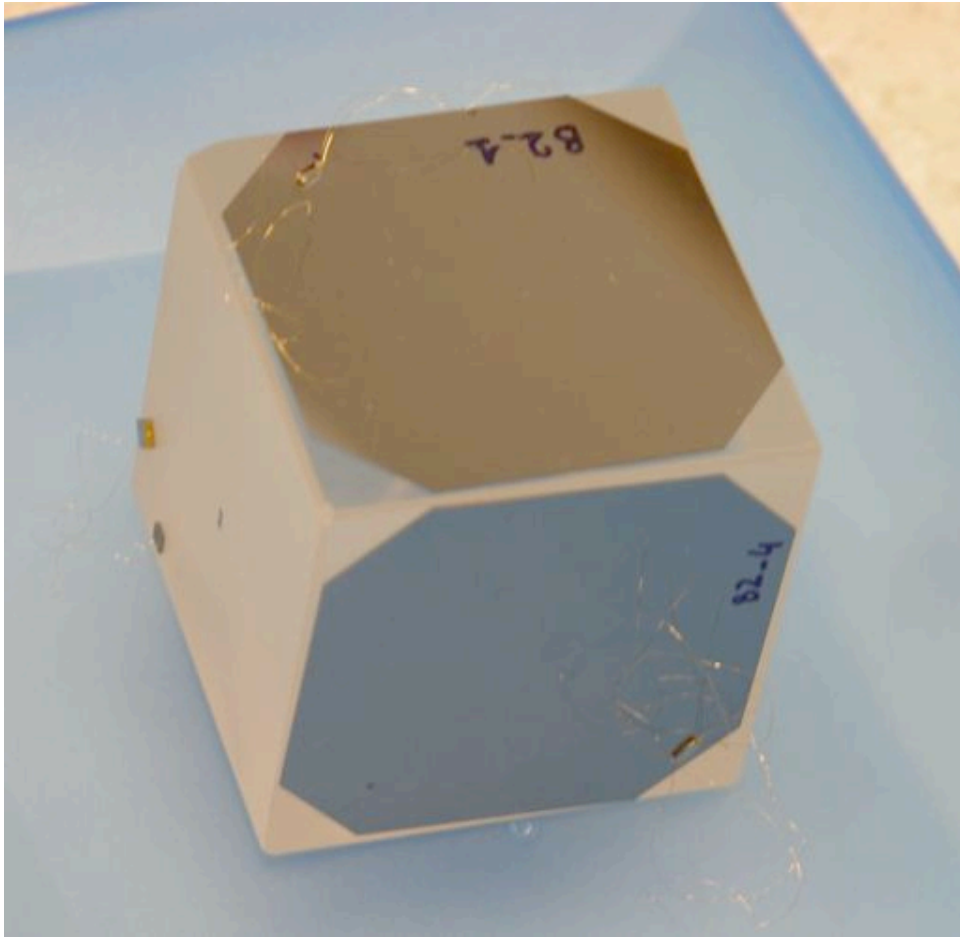
# Double beta decay (talk Claudia Nones)

- CUORICINO: largest mass cryogenic experiments (42 kg at  $T \approx 10\text{mK}$ )
- Excellent energy resolution
- Now stopped, in preparation of the CUORE experiment (760 kg  $\text{TeO}_2$  !)

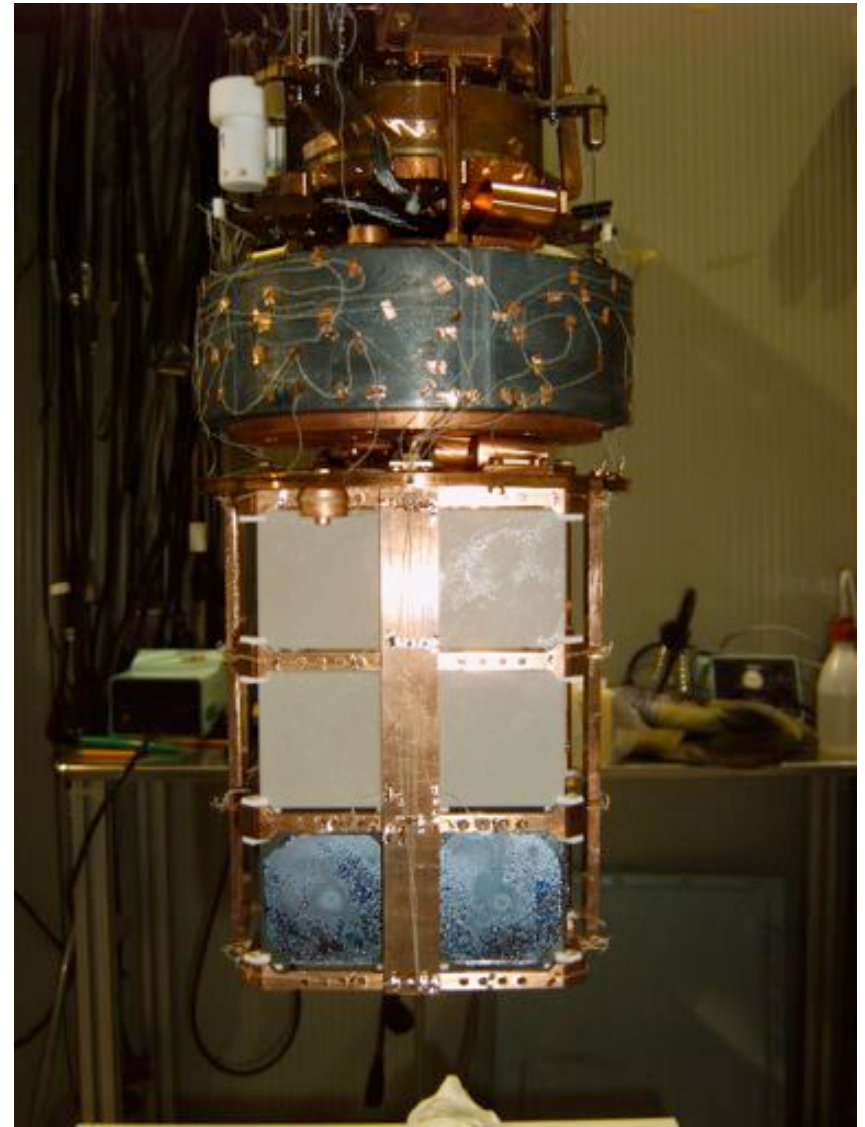
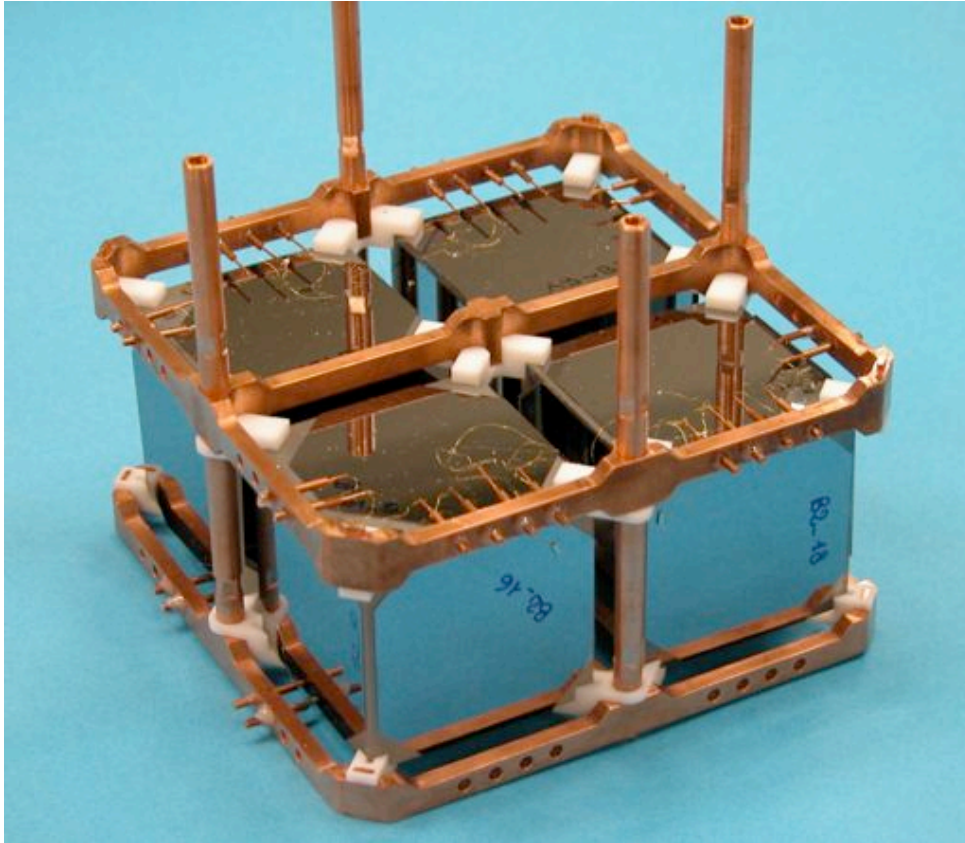




## B3 - LNGS: mounting of CUORE-like modules with SSB

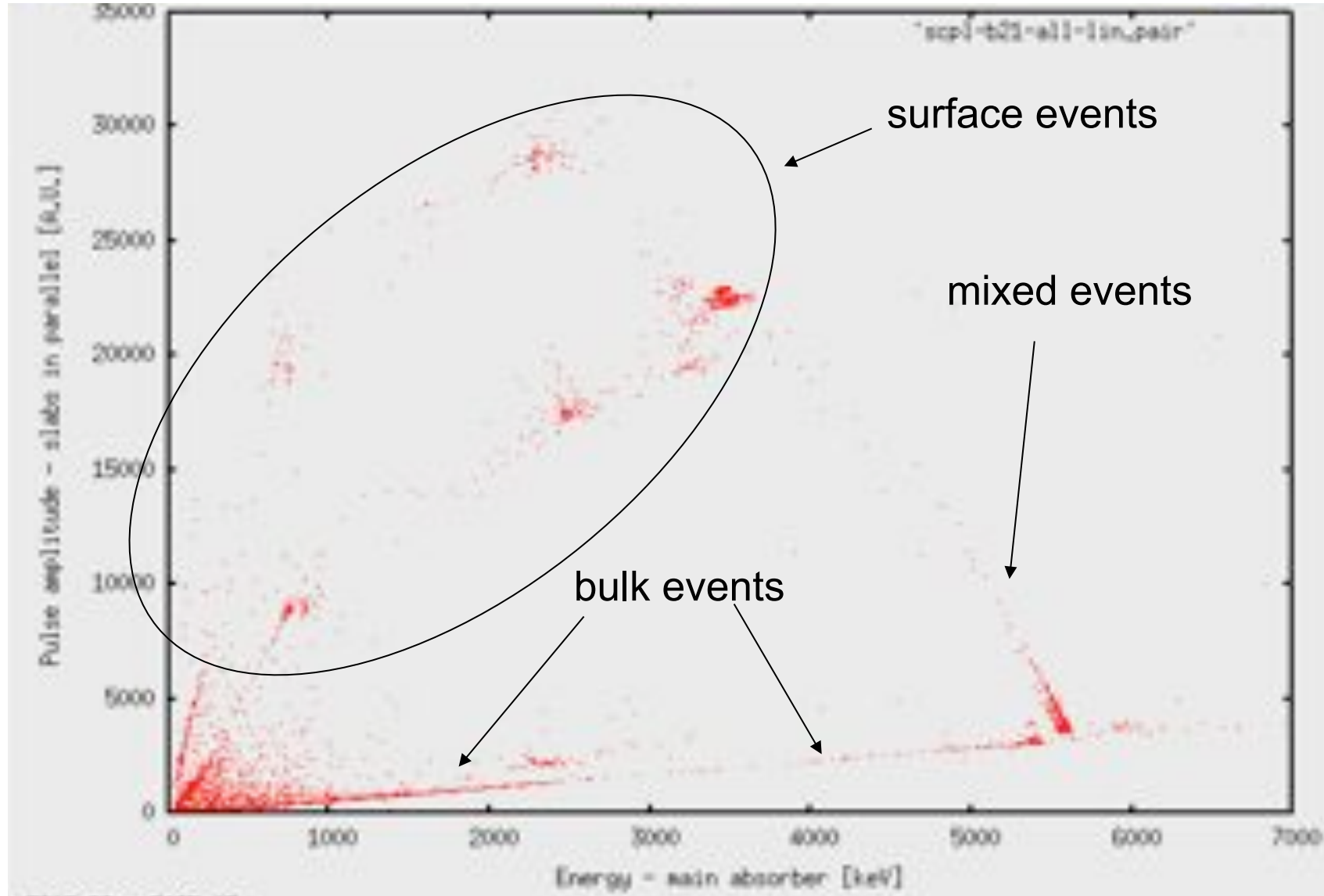


## B3 - LNGS test of SSB





## B3 - Scatter plot in LNGN test



# Cryoelectronics developments

- Challenges in cryoelectronics :
  - Large number of wires
  - heat load constraints
  - development of custom cables and amplification components (FETs)
- High impedance channels (CUORE, EDELWEISS, EURECA) : develop ultra-low noise low dissipation AsGa FETs (LPN Marcoussis, talk Yong Jin)
- Low impedance channels : SQUID electronics (IPHT Jena, MPI Muenchen, Oxford, APC Paris...)
- For both types of channels : multiplexing is mandatory for most matrix applications
- **Cryogenic detectors : relatively slow signals (talk Jules Gascon) →**
  - **digitize very early (close to cryostat) the analog signals**
  - **digital filter (after anti-aliasing low-cost filter...)**
  - **digital trigger**

# Les « magnificent seven » d'ASPERA

- 1) What is the Universe made of ?  
In particular: What is dark matter?
- 2) Do protons have a finite life time?
- 3) What are the properties of neutrinos?  
What is their role in cosmic evolution?
- 4) What do neutrinos tell us about the interior of the Sun and the Earth, and about supernova explosions?
- 5) What is the origin of cosmic rays?  
What is the view of the sky at extreme energies?
- 6) What will gravitational waves tell us about violent cosmic processes and about the nature of gravity?
- Référence sur le web:

<http://www.aspera-eu.org/images/stories/files/Roadmap.pdf>



# Selection of projects

- The Roadmap Committee proposes seven types of major projects, on different time scales:
  - **Ton-scale detectors for dark matter search**
  - **A ton-scale detector for the determination of the fundamental nature and mass of neutrinos**
  - **A Megaton-scale detector for the search for proton decay, for neutrino astrophysics and for the investigation of neutrino properties**
  - **A large array of Cherenkov Telescopes for detection of cosmic high energy gamma-rays**
  - **A cubic kilometre-scale neutrino telescope in the Mediterranean**
  - **A large array for the detection of charged cosmic rays**
  - **A third-generation underground gravitational antenna**

# Les questions de « Cosmic Vision »

- **What are the conditions for life and planetary formation?**
- **How does the Solar System work?**
- **Searching for gravitational waves with LISA**
- **What are the fundamental laws of the Universe?**
- **How did the Universe begin and what is it made of? (What is the nature of Dark Matter and Dark Energy)**

# Some comments (1)

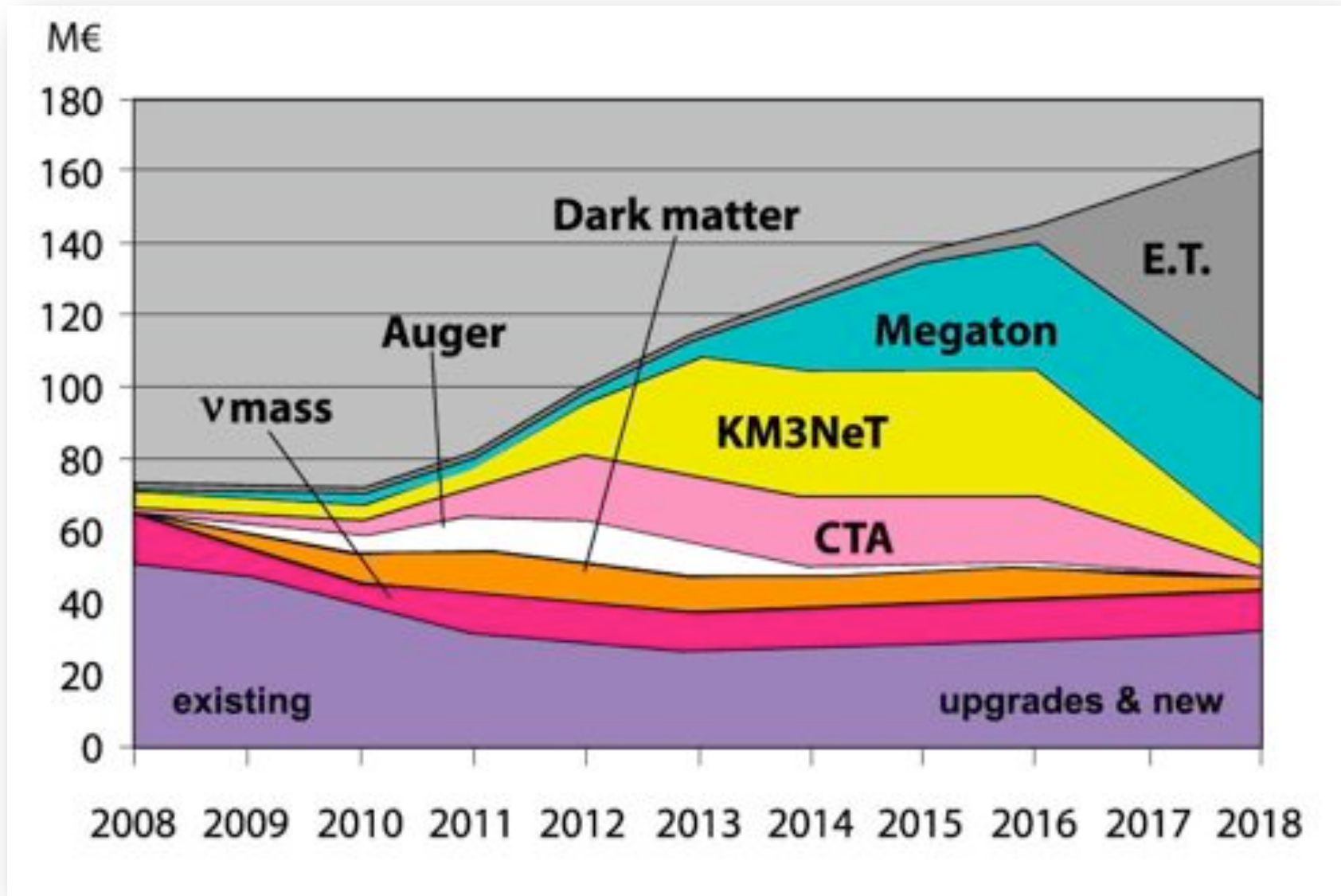
- High scientific priority given to Dark Matter search (first chapter and first installation quoted in the roadmap)
- But decision for tonne-scale Dark Matter experiment delayed as field not considered as mature enough yet for a firm commitment.
- Decision on **which first large-scale DM experiment expected around 2011**



## Some comments (2)

- Two main techniques recommended and still considered in competition :
  - Xe (or possibly Ar) double-phase TPCs
  - Cryogenic detectors
- Cost of typical tonne-scale experiment 50-100 M€ range : expensive considering the size of the community concerned
- R&D effort : directional detectors (not large scale until clear detection or LHC signal)

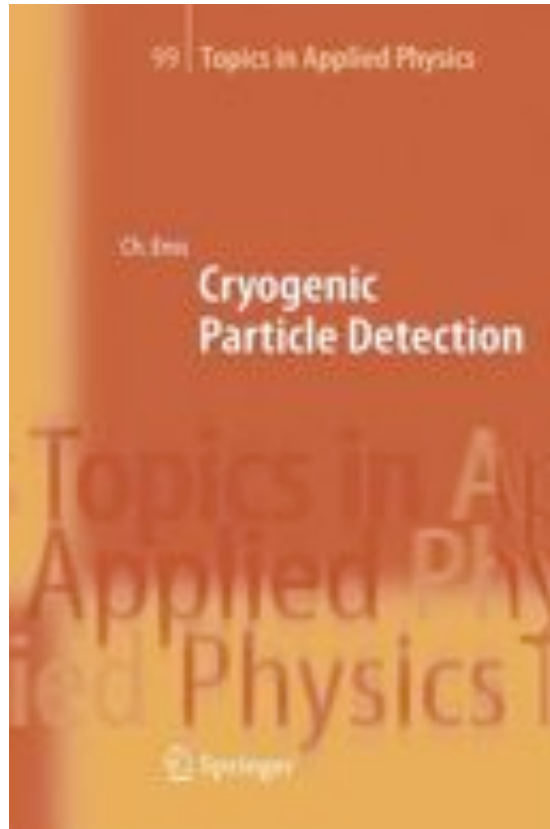
# ASPERA funding scenario



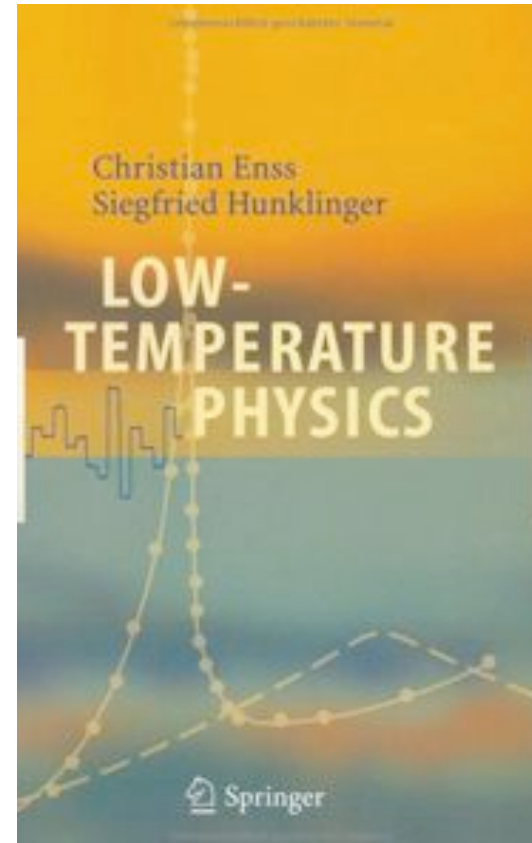
# Organisation de la communauté LTD

- Succès des deux réseaux européens (FP4 et FP5) « Applied cryodetectors »
  - Échange très libre d'informations
  - Source de collaborations ultérieures
- Pas de financement accordé aux demandes FP6 et FP7 (ITN)
- Proposition de GDR (ou GIS) pour coordonner les efforts des groupes français LTD
- Mise en place dès 2010 ?

# Pour en savoir plus...

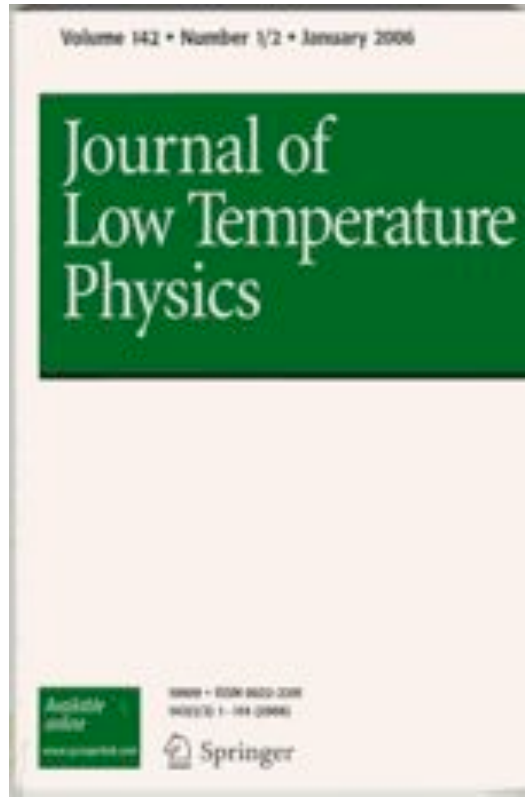


“Cryogenic Detectors”, ed. Christian Enss, Topics in Applied Physics, (Springer, Heidelberg, 2005)



“Low-temperature physics”, Christian Enss and Siegfried Hunklinger, Topics in Applied Physics, (Springer, Heidelberg, 2005)

# Pour en savoir plus (2)...



Proceedings of the 12th Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-12) ed. M.Chapellier and G. Chardin, J. Low Temp. Phys. 151 (2008)



Proceedings of the 11th Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-11) ed. M. Ohkubo, K. Mitsuda and H. Takahashi, Nucl. Instr. Meth. A 559 (2006)

# Conclusions

- Les détecteurs cryogéniques sont maintenant des outils pratiquement indispensables dans plusieurs domaines
- Bien que difficile, le champ devient peu à peu accessible aux utilisateurs non (peu) spécialistes (ADR, pulsetubes, réfrigérateurs à dilution automatisés, SQUIDs plus maniables...)
- L'un des défis majeurs consiste maintenant dans le développement de matrices de grande taille
- Les défis en astrophysique, astroparticules ou la physique des particules sont d'excellents « drivers » pour le développement de nouvelles techniques
- Probablement important de considérer la communauté française des LTDs globalement et qu'elle se coordonne via un GDR



# **Matière Noire: nature inconnue, question scientifique « tout ou rien »**

## **Collision de galaxies « Bullet cluster »**



- Les masses vues par rayonnement X (gaz) et par effet de lentille gravitationnelle sont-elles au même endroit ?
- Coup important (décisif ?) contre MOND (gravité modifiée)