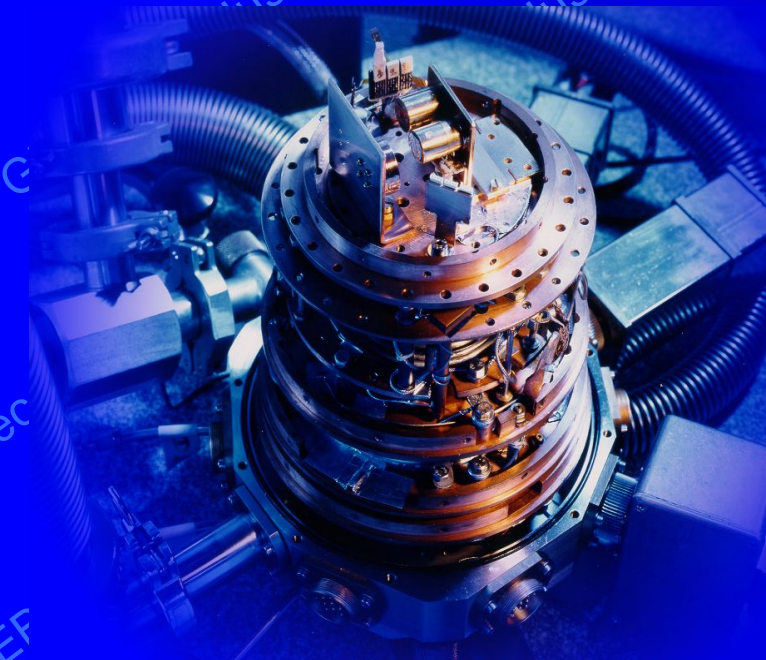




Détecteurs cryogéniques : nouvelles perspectives pour la spectrométrie X



E. Leblanc

**Laboratoire National Henri Becquerel
Commissariat à l'Énergie Atomique
Saclay**



Spectrométrie des photons X

- Pourquoi introduire de nouveaux détecteurs ?
- Quel principe physique permet de franchir les limites des détecteurs conventionnels ?
- Comment construire le détecteur ?
- Est ce que ça marche ? Performances :
 - ❖ Seuil de détection
 - ❖ Résolution en énergie
 - ❖ Rendement de détection
- Des applications industrielles ?
- Conclusions



Spectrométrie et imagerie X : des applications qui exigent des détecteurs toujours plus performants

- ◆ **Astrophysique**
 - ✓ Etude des galaxies
 - ✓ Formation des premiers éléments
- ◆ **Sciences des matériaux**
 - ✓ Analyse de dopants dans des semi-conducteurs
- ◆ **Biophysique**
 - ✓ Suivi de l'état chimique de métaux liés à des protéines
- ◆ **Environnement**
 - ✓ Analyse de l'état d'oxydation d'aérosols

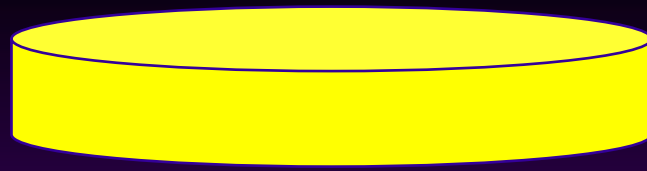
Les besoins :

Abaisser les limites
de détection
Reconnaître la présence
d'éléments

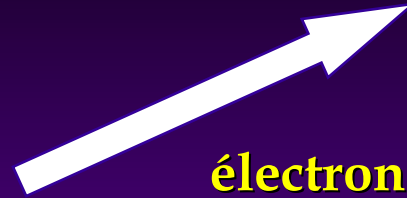
Excellente résolution
en énergie
Seuil de détection
à très basse énergie

Seuil de détection < 100 eV
rendement de détection proche de 100%
résolution en énergie < 10 eV

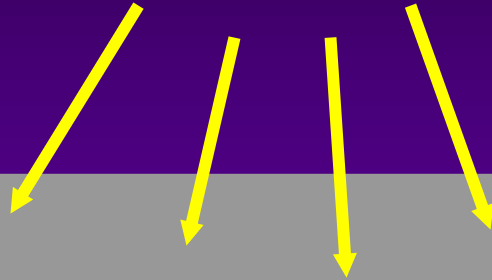
**Echantillon
à analyser**



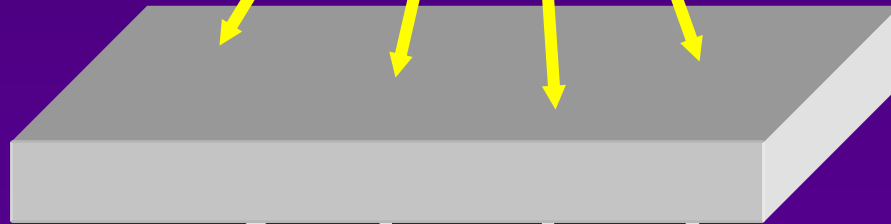
Source de
rayonnement



électrons, photons X



milieu
absorbant



Détecteur



quel élément

→ quelle énergie ?

quelle quantité de
chaque élément

→ intensité de chaque
rayonnement ?

Résolution en énergie

Seuil de détection en E

Rendement de détection

Source



Rayonnement



Exemple : énergie incidente 6 keV

Compteur proportionnel

10^2 ions

Semi-conducteur Ge, Si
Cd ZnTe

10^3 paires
 e^- / trous

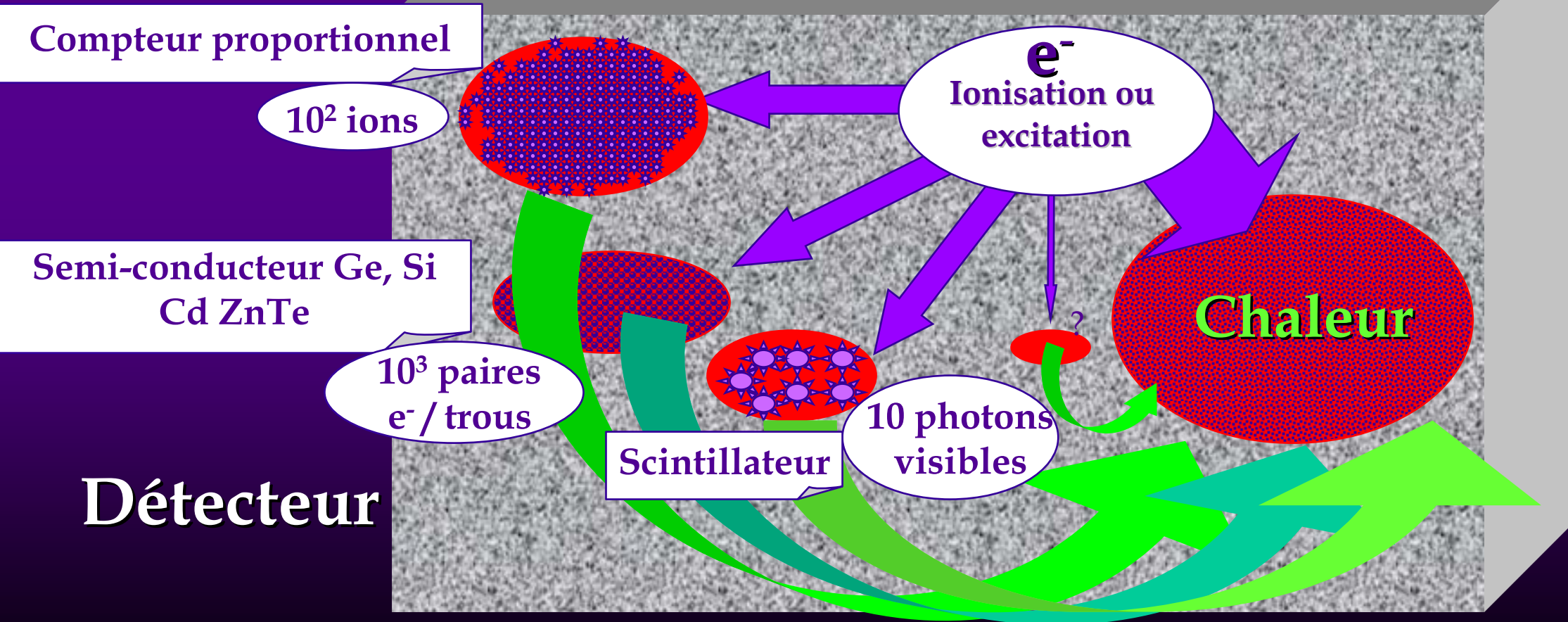
Détecteur

e^-
Ionisation ou
excitation

Chaleur

Scintillateur

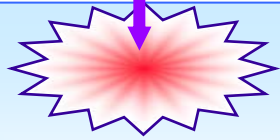
10 photons
visibles



Transfert d'énergie sous forme de chaleur
ou d'états excités

Energie incidente
exemple : 6 keV

A très basse température (< 100 mK)



*Transfert d'énergie
aux états excités*

Absorbeur

- supraconducteur 10^6 quasi-particules
- diélectrique 10^8 phonons
- métal $\gg 10^8$ électrons

Senseur

- Jonction tunnel
- Transition supraconductrice
- Thermomètre résistif
- Senseur magnétique (10^9 spins)

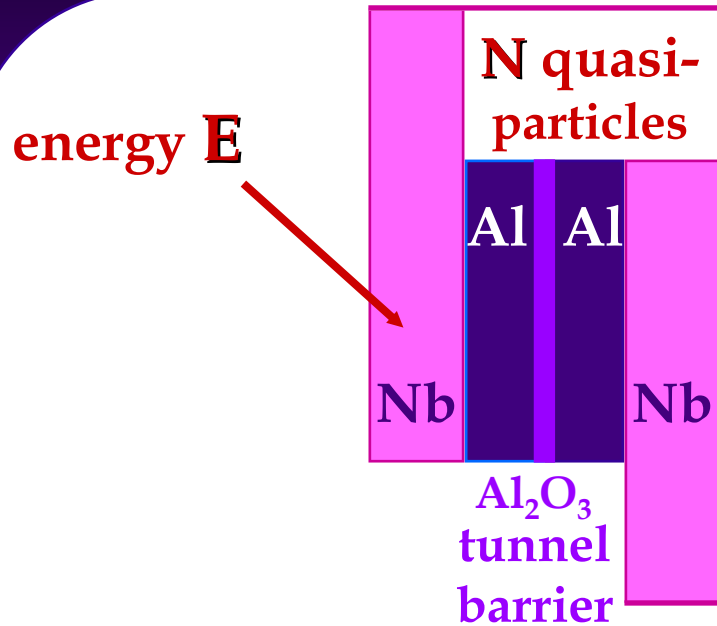
Faible couplage
thermique G



*Retour à l'équilibre
après chaque interaction
dans le détecteur*

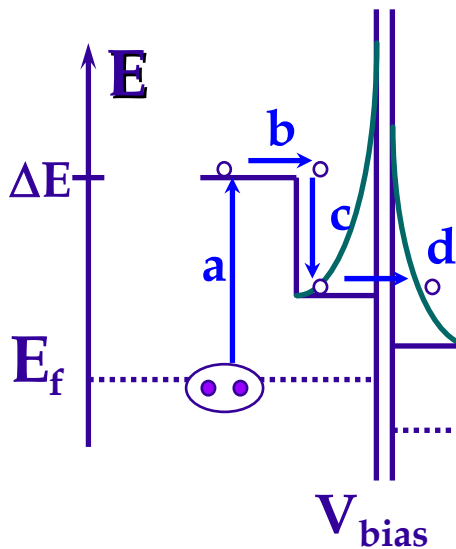
Bain thermique

Détecteur	Phénomène physique	Energie par quantum d'information
Scintillateur	Emission de photons lumineux	100 eV ou plus
Compteur proportionnel	Production d'ions dans un champ électrique	10 à 30 eV
Semi-conducteur à 77 K	Création de paires électron-trou dans un champ électrique	3 - 4 eV
<i>A très basse température (<100 mK)</i>		
Jonction tunnel	Brisure de paires de Cooper, formation de quasiparticules	10^{-3} eV
Bolomètre diélectrique	Transfert d'énergie par phonons	10^{-5} à 10^{-4} eV
Bolomètre magnétique	Transfert d'énergie aux électrons de conduction et spins	$\ll 10^{-5}$ eV



Variation of tunnel current :

- proportional to N
 N = number of quasiparticles tunneling through the barrier
- proportional to deposited energy E



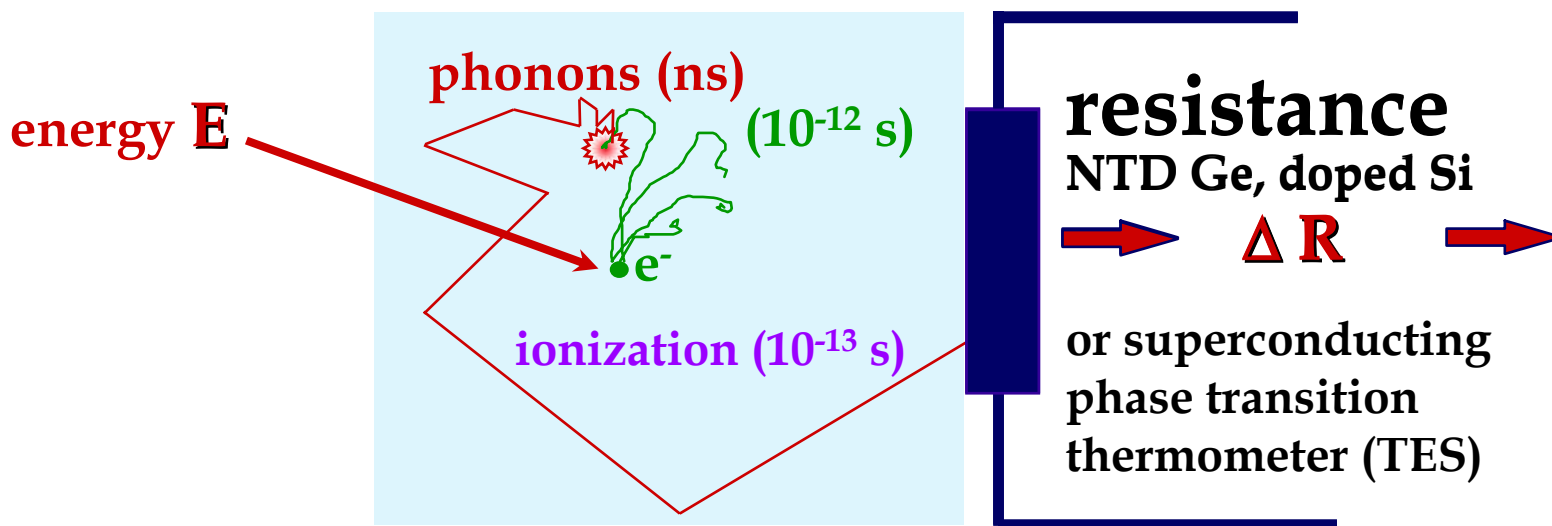
- a : Cooper pair breaking
- b : quasiparticle diffusion
- c : quasiparticle trapping
- d : quasiparticle tunneling

$T \ll T_c$ required to avoid Cooper pair breaking by thermal excitation

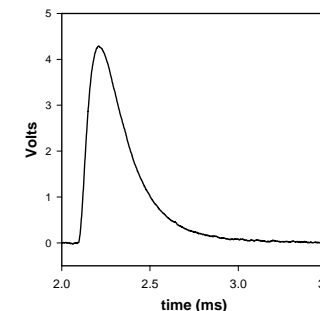
Counting rate 10 000 /s

(insulator, semiconductor)

ΔT



voltage pulse



amplitude ΔV

Rise time:
thermal equilibrium within
the detector (1 - 100 μ s)

Decay time $\tau = C / G$

Why very low temperatures (< 100 mK) ?

Signal : $\Delta T \propto E / C$

Insulator : $C = a T^3$

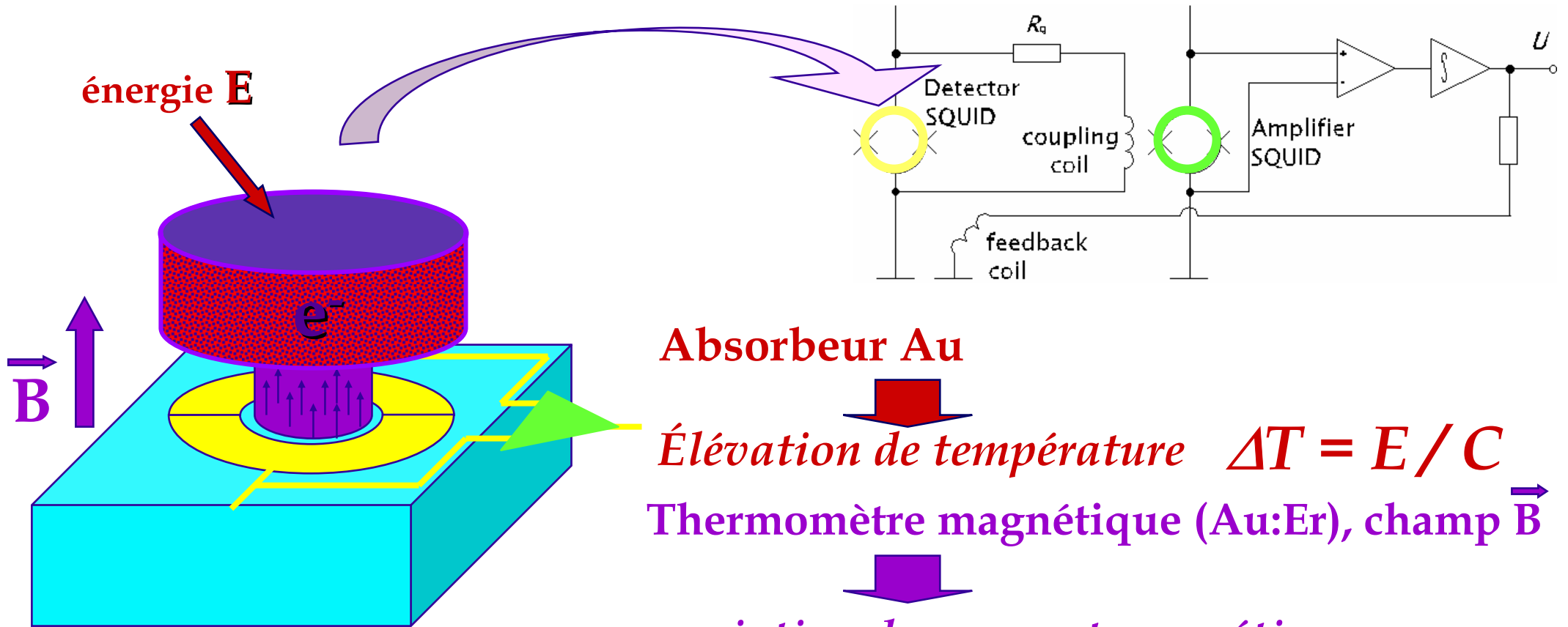
$C =$ heat capacity

fundamental limitation of energy resolution

$$\Delta U^2 = kT^2C \rightarrow \Delta E_{FWHM}^{th} \propto T^{5/2}$$

energy fluctuations between
detector and thermal bath

Excitation thermique des électrons et lecture par un thermomètre magnétique : calorimètre magnétique



Absorbeur Au



Élévation de température $\Delta T = E / C$

Thermomètre magnétique (Au:Er), champ \vec{B}



variation du moment magnétique



1^{er} SQUID : lecture du signal (variation de flux)

2^e SQUID : amplification du signal ΔV

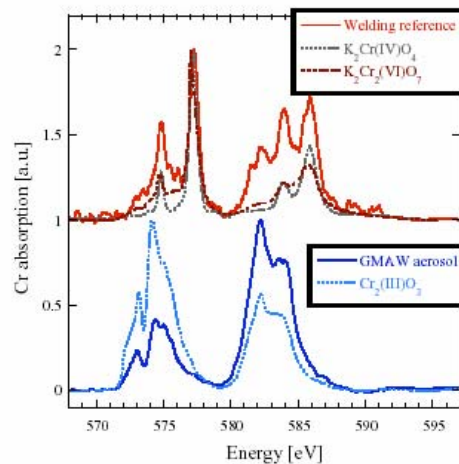
Très basse température (< 100 mK) ?

Capacité calorifique $C = \gamma T$ et bruit thermodynamique $\Delta U^2 = kT^2C$

Superconducting Tunnel Junctions Summary

STJ X-ray spectrometer at ABEX beam line

- 36-pixel STJ for synchrotron science
 - < 10-20 eV FWHM up to 1 keV
 - > 10⁶ counts/s total and high P/B with DSP readout
 - Solid angle $\Omega/4\pi \approx 5 \times 10^{-3}$
- Future: 112 channels, Ta absorber (PSI, IPHT)



X-ray Spectroscopy: Chemistry of dilute samples

- Material Science: Dopants (e.g. GaInNAs)
- Biophysics: Reaction mechanisms (e.g. CO₂-binding)
- Environmental science: Speciation (e.g. Cr in welding)

Voir site
du Laboratoire National de Livermore :

<http://cryodetectors.llnl.gov/STJIntro.html>

Voir site
ESTEC/ESA :

<http://www.esa.int/esapub/sp/sp1211/agr4.htm>

and

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0502038>

Etat de l'art des jonctions tunnel

	Application	(FWHM)	at energy	counts / s	Institute
STJ 112 pixels	synchrotron science environmental metal speciation fluorescence soft X-ray absorption			10 000 / s	LLNL Paul Scherrer, Suisse LBL, Berkeley
STJ 36 pixels	material analysis (commercial) synchrotron environmental metal speciation	24 eV 10-15 eV 1,7 eV	6 keV 1 keV 50 eV	10 000 / s 1 000 000 / s	LLNL, USA LBL
STJ 120 pixels	photon counting imaging ground optical astronomy	2 eV	500 eV	10 000 / s	ESTEC, The Netherlands Lancaster

すざく - *Suzaku*
(formerly Astro-E2)



Voir site :

<http://www.isas.jaxa.jp/e/enterp/missions/suzaku/index.shtml>

Les performances : Si implanté, Ge NTD et STJ

microcalorimeter	Field	Energy resolution		count rate	Laboratory	
implanted Si	Japan/US Satellite	3	6 keV	300 /s	NASA, Greenbelt	
	X-ray imaging spectroscopy	32 pixels 6 eV	6 keV		RIKEN, Japan	
	36 pixels	plasma diagnostics	70 eV		60 keV	GSI, Darmstadt
		photon emission sources	8 pixels 100eV		60 keV	LLNL, Stanford
					Greenbelt, Wisc	
NTD Ge	astrophysics	3 eV	1 - 6 keV		Cambridge, USA	
	X-ray imaging spectroscopy				Berkeley	
30 pixels		52 eV	60 keV		LLNL	
STJ	synchrotron science			10 000 / s	LLNL	
	112 pixels	environmental metal speciation			Paul Scherrer, Suisse	
		fluorescence soft X-ray absorption			LBLN, Berkeley	
STJ	material analysis (commercial)	24 eV	6 keV	10 000 /s	LLNL, USA	
	36 pixels	synchrotron	10-15 eV		1 keV	1 000 000 /s
		environmental metal speciation	1,7 eV	50 eV		LBLN
STJ	photon counting imaging				ESTEC,	
	120 pixels	ground optical astronomy	2 eV	500 eV	10 000 / s	The Netherlands
					Lancaster	

Voir site :

http://www.sron.nl/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=109&lang=

<http://www.physorg.com/news5143.html>

http://www.ipht-jena.de/BEREICH_1/abt13_cryo_electronics/devices-data/Itscurrent.html

http://www.ipht-jena.de/BEREICH_1/abt13_cryo_electronics/publications-data/2005/06-asc2004_may.p

microcalorimeter TES	Field	Energy resolution		count rate	last progress or next target	Laboratory
	actinide isotope analysis nuclear weapons inspection nuclear reaction cross sections	70 eV 100 eV	60 keV 100 keV	$\tau_r = 10 \mu\text{s}$	external feedback	LLNL
4 pixels 9 pixels	imaging X-ray astronomy materials analysis chemical shifts	2,4 eV 8 pixels 3,8 eV 42 eV	6 keV 6 keV 103 keV	$\tau_d = 260 \mu\text{s}$ $\tau_r = 4 \mu\text{s}$	aim 1024 pixels aim 300 mK aim 10^4 pixels	NIST Boulder
	X astronomy neutron stars, g-ray burst, black holes	5 eV	6 keV	$\tau_r = 10 \mu\text{s}$ $\tau_d = \text{few } 100 \mu\text{s}$	aim 2-4 eV 0,1-10 keV	Univ INFN Genoa INAF, Roma
20 pixels	microanalysis imaging spectroscopy	13 eV 30-60 eV	3 keV 6 keV		aim 1000 pixels	Tokyo University AIST, Japan
256 pixels	microanalysis	28 eV 200 eV	6 keV 6 keV	0.2 ms	Bi/Cu multilayers electrodeposition	DACW, Tokyo DEEBW, ISAS, Tokyo JAEA, MHI, Japan
	materials analysis (steel industry)	20 eV commercial	6 keV	$\tau_d = 90 \mu\text{s}$ 555 cp/s		SII Nanotechnology Japan
	microanalysis with PIXE spectrometry	19,6 eV	6 keV	$\tau_d = 270 \mu\text{s}$	add metal Cu in Bi	Tokyo University
1024 pixels	Constellation X Focal Plane Microcalorimeter Array	4,5 eV	6 keV	with ETF	Bi absorber digital filtering	SRON, The Netherlands
32 pixels	Constellation X Focal Plane Microcalorimeter Array Telescope	2,4 eV 3,7 eV 6 eV	1,5 keV 3,3 keV 6 keV	$\tau_d = 300 \mu\text{s}$	reducing sensor area to $0,15 \text{ mm}^2$ for telescope anti-coincidence	NASA, Greenbelt UIUC, Urbana
10 pixels	imaging spectroscopy 0,07 - 10 keV plasma diagnostics	32 pixels 8 eV 16 eV	6 keV 3,3 keV 4,5 keV	$\tau_d = 190 \mu\text{s}$		NASA, Greenbelt Wisconsin, UIUC
32 pixels	Constellation X Focal Plane Microcalorimeter Array Telescope	0,16 eV	2,33 eV	30MHz/pixel $\tau_r < 1 \mu\text{s}$ $\tau_d = 10 \mu\text{s}$	aim $\tau_d = 1 \mu\text{s}$	Stanford Univ, USA NIST, Boulder JPL
32 pixels	quantum computing, photons metrology	0,2 eV	qq eV	$\tau_r = 0,4 \mu\text{s}$		NIST, Boulder

Magnetic calorimeters and TES sensors for process control in semi-conductor industry

A. Fleischmann, J. Höhne

TU München

C. Hollerith, M. Huber, J. Jochum, F. v. Feilitzsch

KIP, Uni Heidelberg

M. Linck, H. Rotzinger, A. Burck, A. Fleischmann, C. Enss

VeriCold Technologies

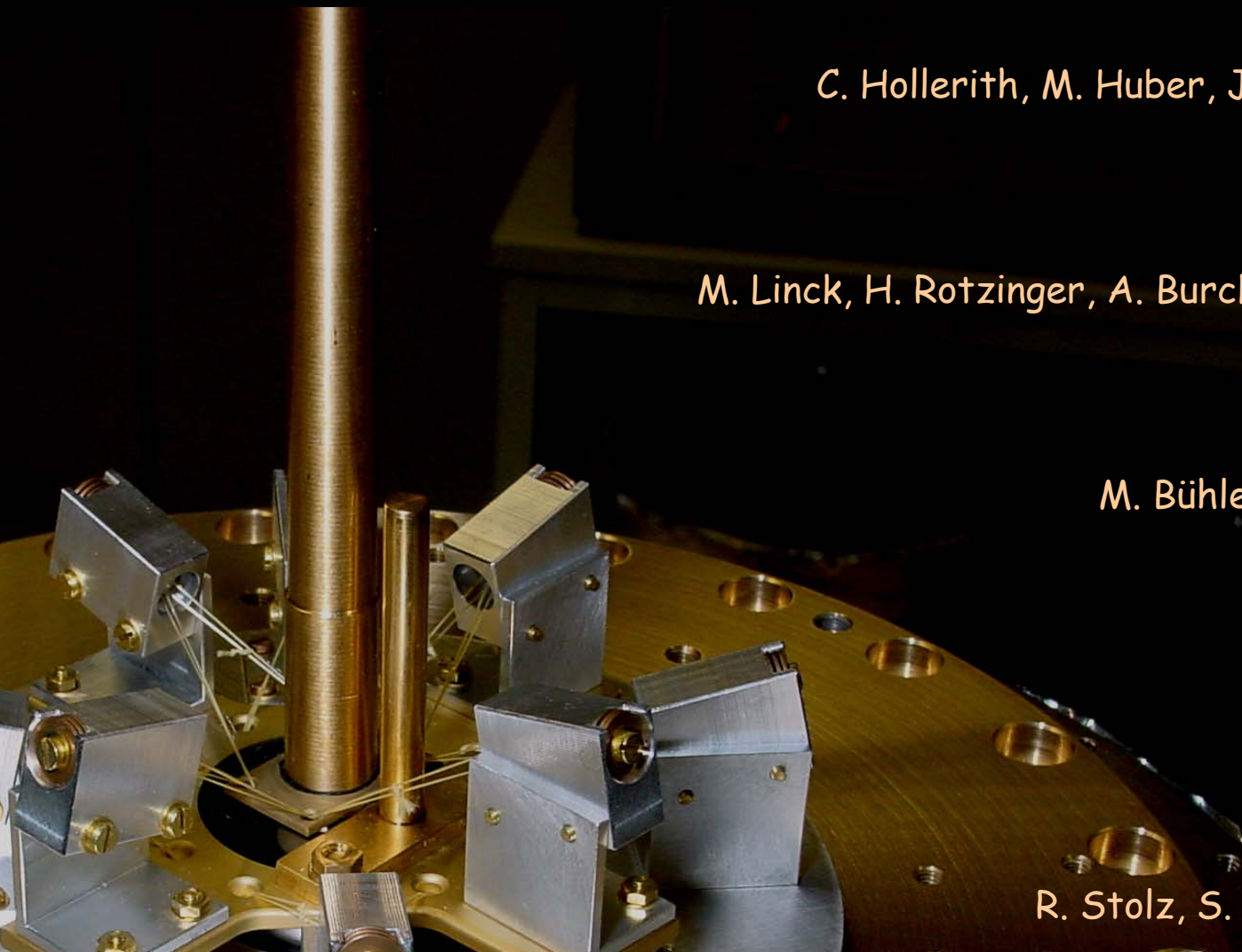
M. Bühler, D. Wernicke, J. Höhne

Infineon

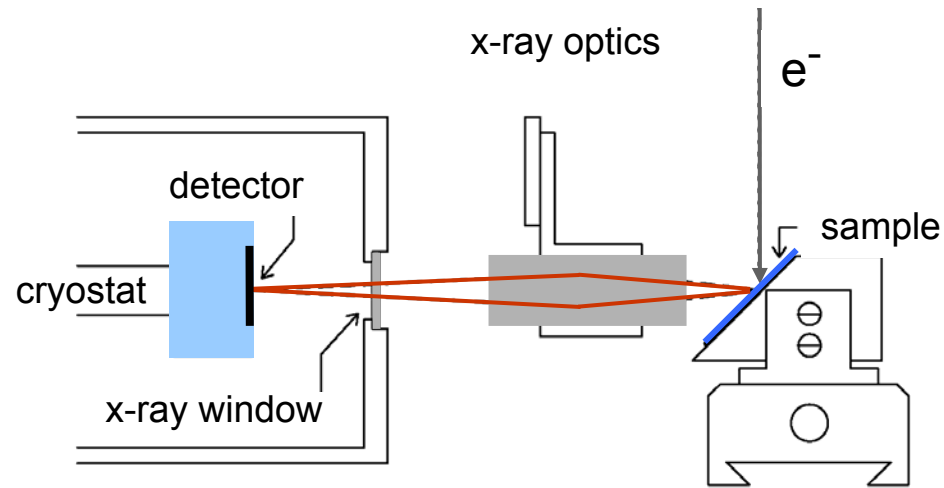
B. Simnacher, R. Weiland

IPHT Jena

R. Stolz, S. Zakosarenko, H.G. Meyer

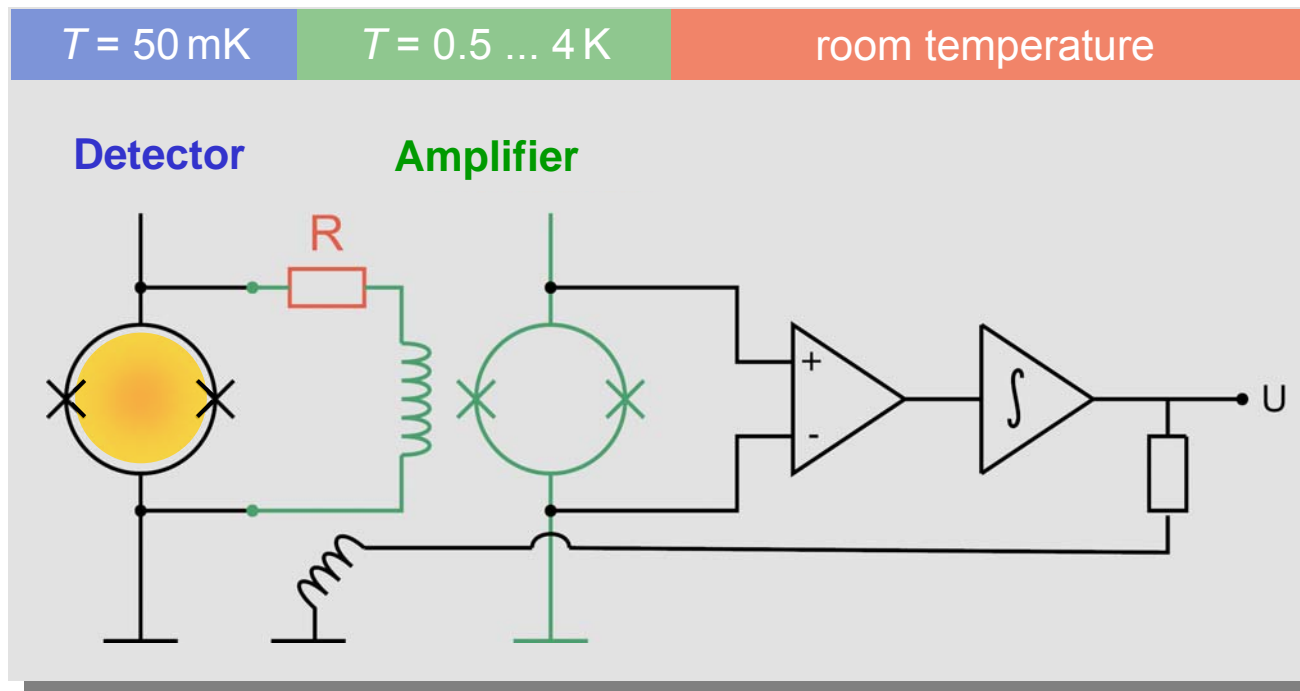


x-ray fluorescence analysis @ scanning electron microscope



analysis of the element composition
of thin films, small particles, failures

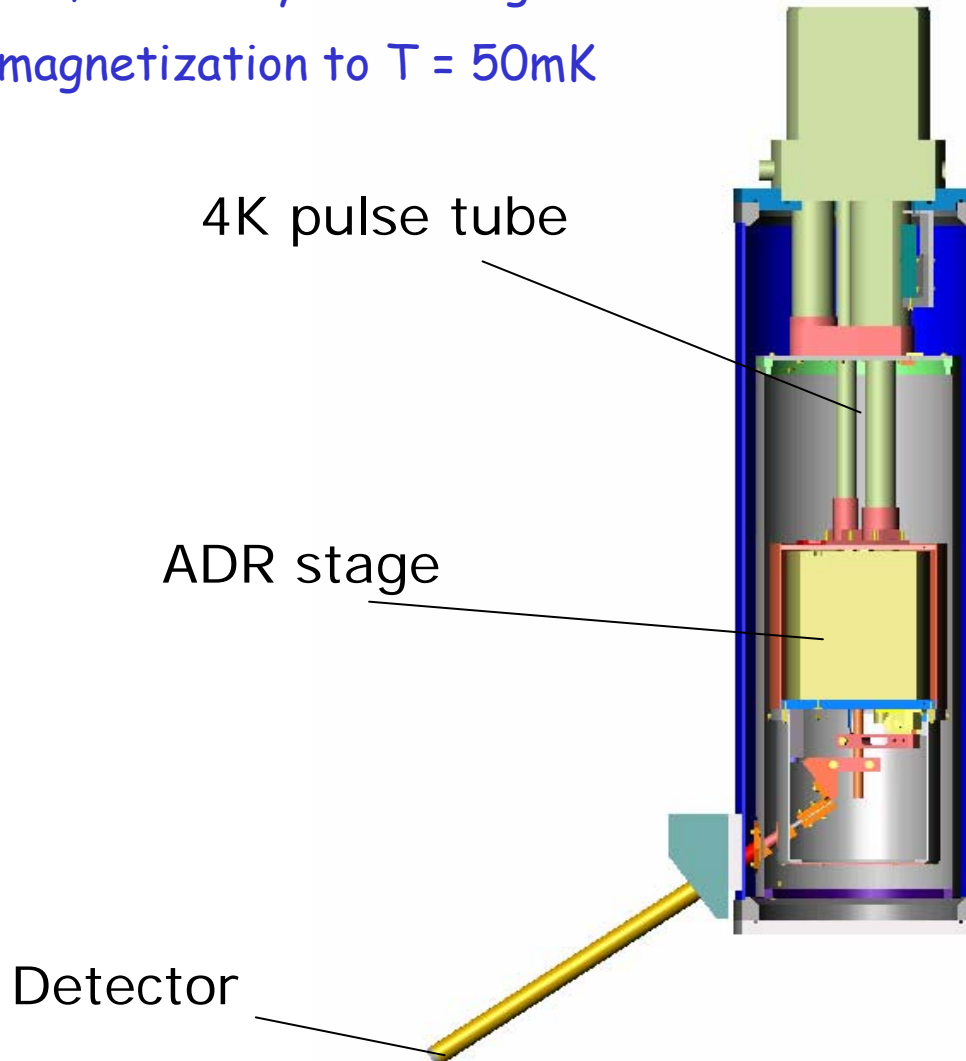
readout of magnetic calorimeters



- detector SQUID read out by a **current-sensor** SQUID
- **two-stage setup** allows for:
 - **low noise**
 - **large bandwidth** / Slewrate
 - **small power dissipation** on detector SQUID chip (Voltage bias)

Pulse tube cooled ADR

cryo liquid free, closed cycle cooling to $T = 4\text{K}$
adiabatic demagnetization to $T = 50\text{mK}$

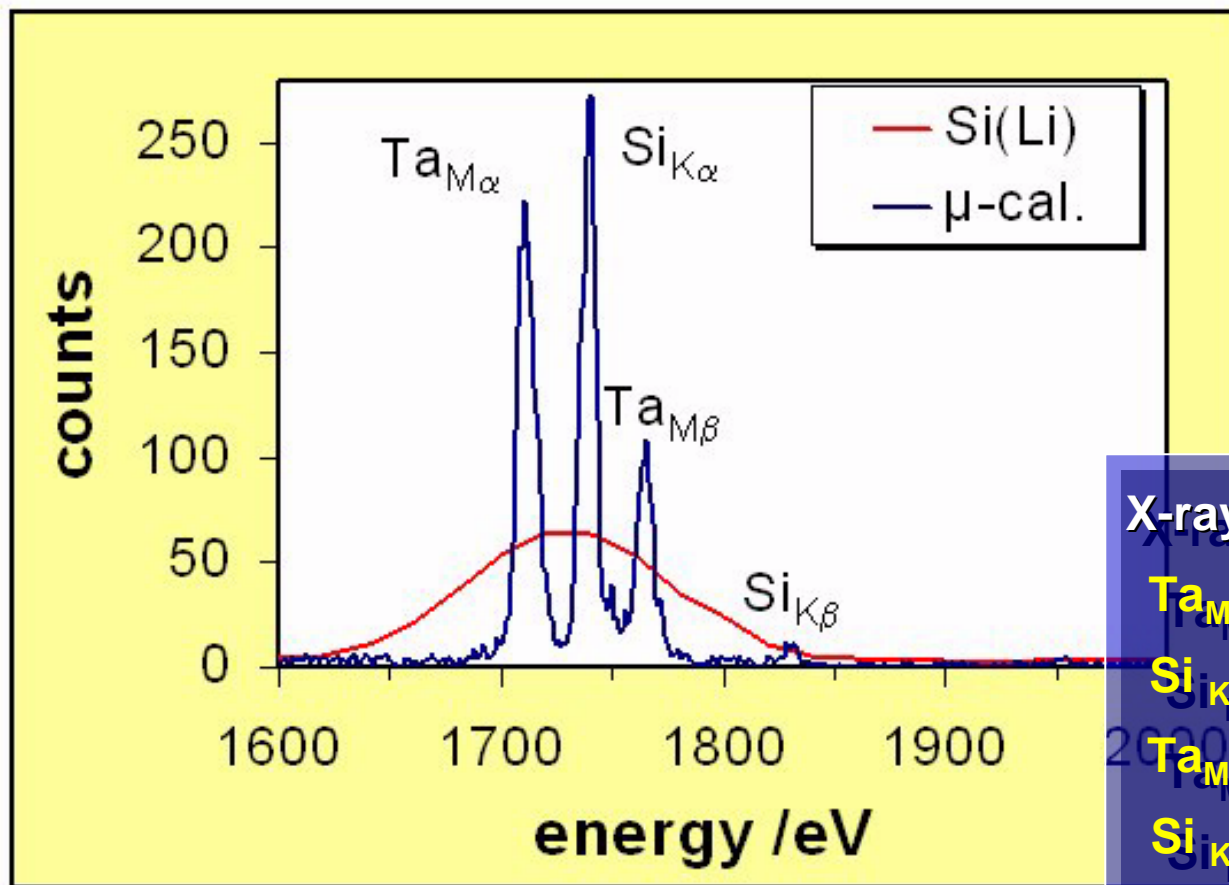


detector, cooler and SEM



separation of close lines

TaSi₂ - standard-reference sample



X-ray transitions

Ta_{Mα} : 1.709 eV

Si_{Kα} : 1.739 eV

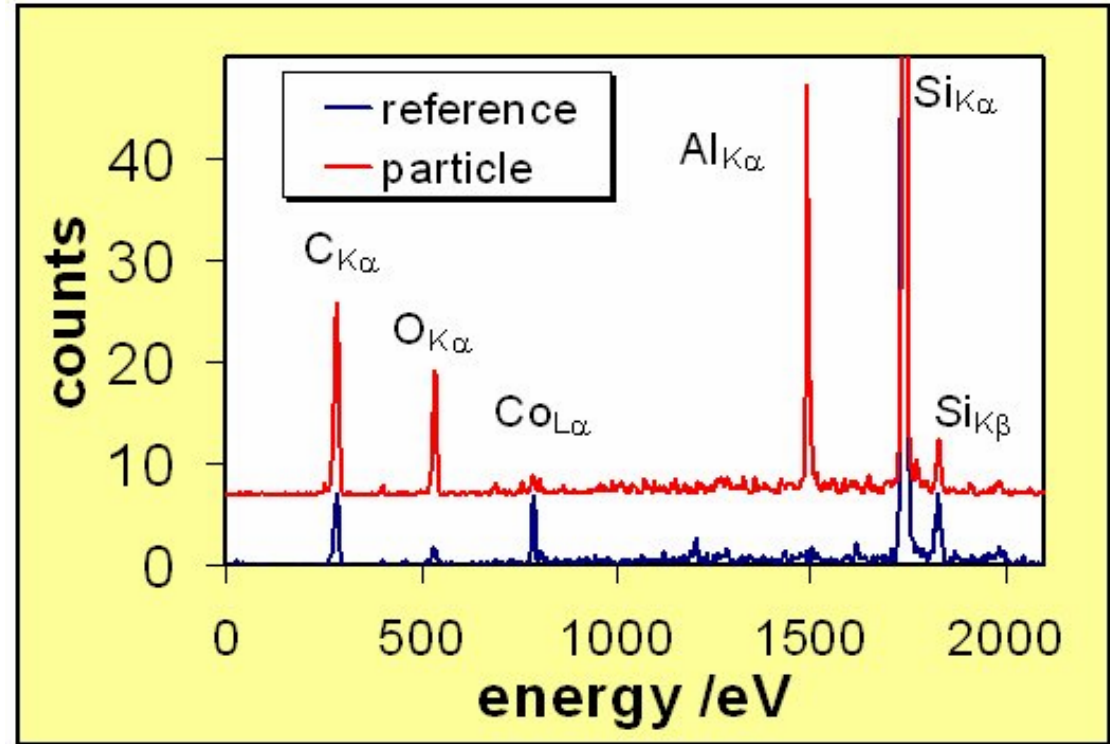
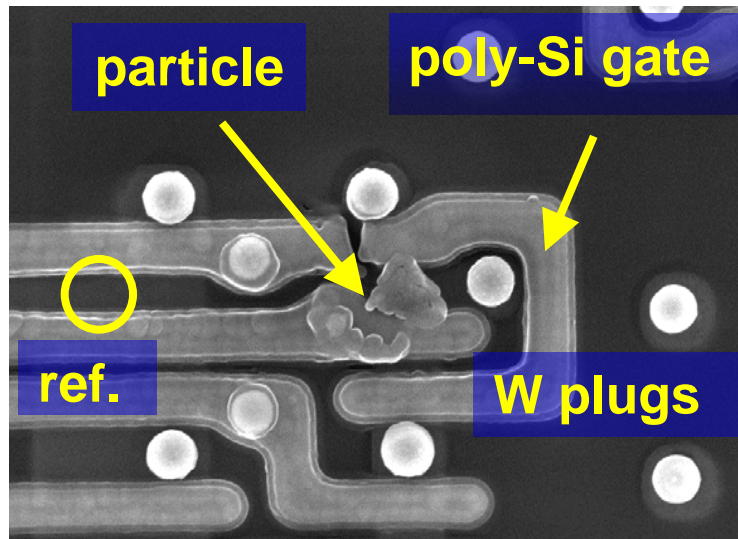
Ta_{Mβ} : 1.765 eV

Si_{Kβ} : 1.829 eV

small volume particle analysis

200 nm particle on poly-Si gate-layer

SEM picture:

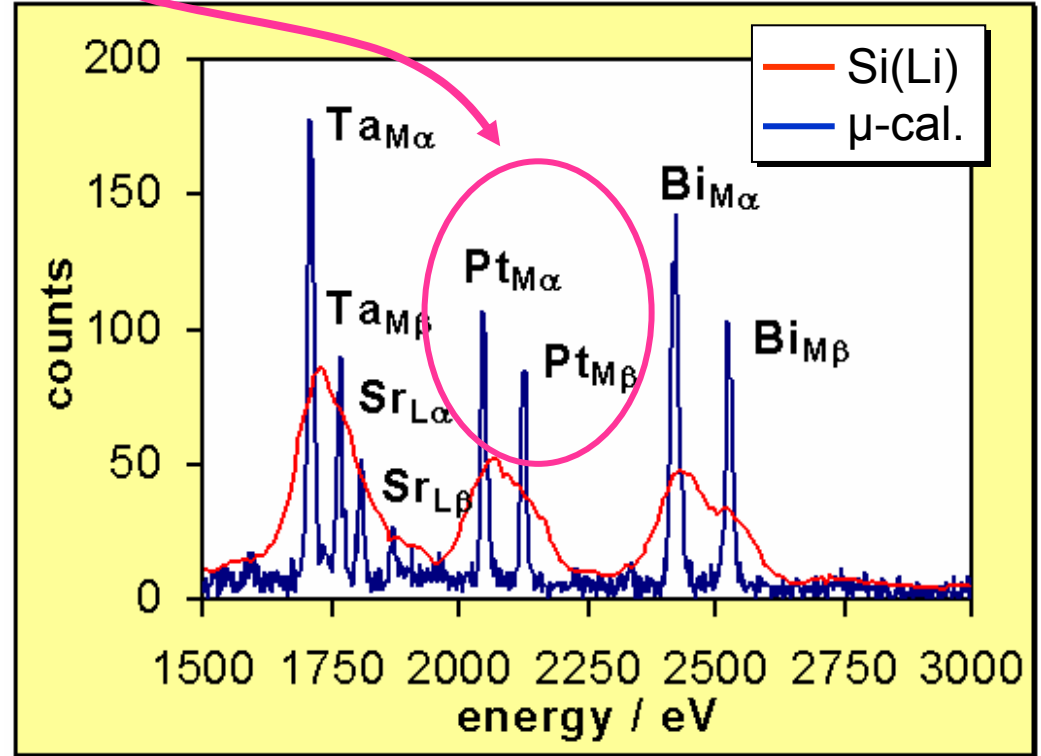
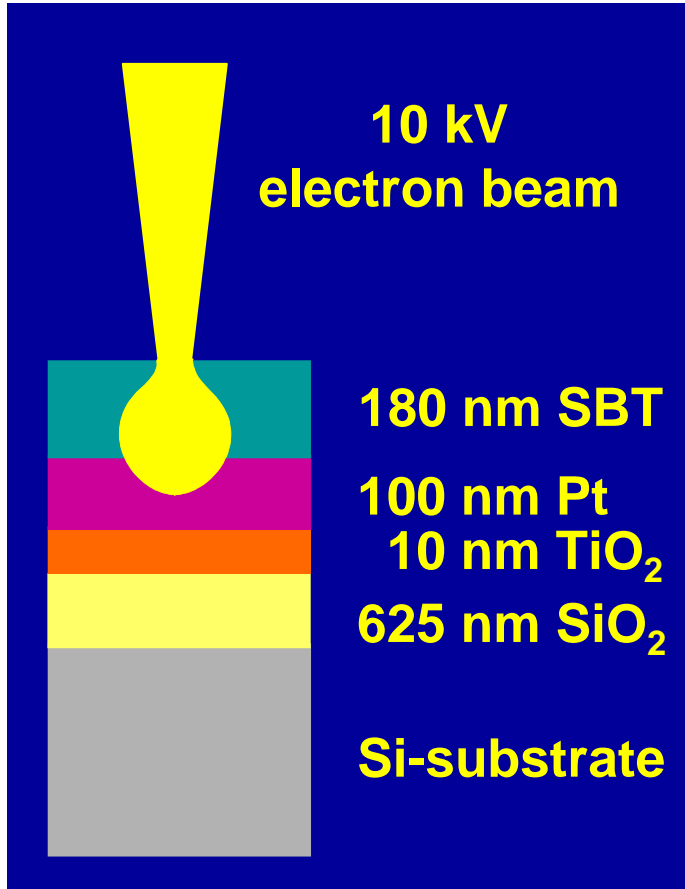


x-ray fluorescence spectra of
particle and reference:


$V_{\text{acc}} = 5\text{kV}$, $I_{\text{pr}} = 620\text{ pA}$, 6 min

analysis of multi-layer structures

SrBi₂Ta₂O₉ (SBT) / Pt / TiO₂ / SiO₂ / Si-Substrat

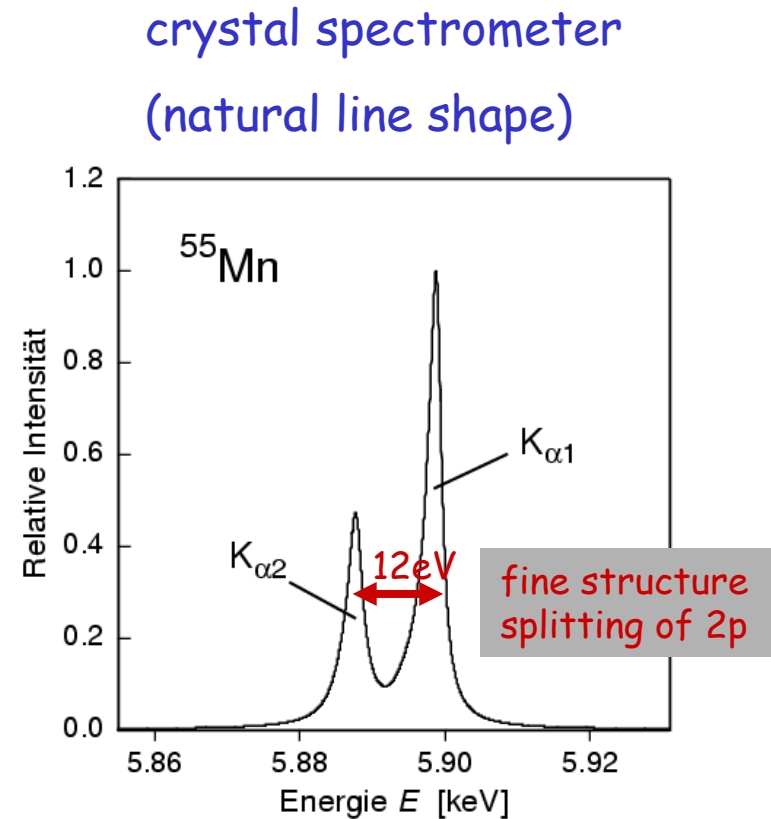
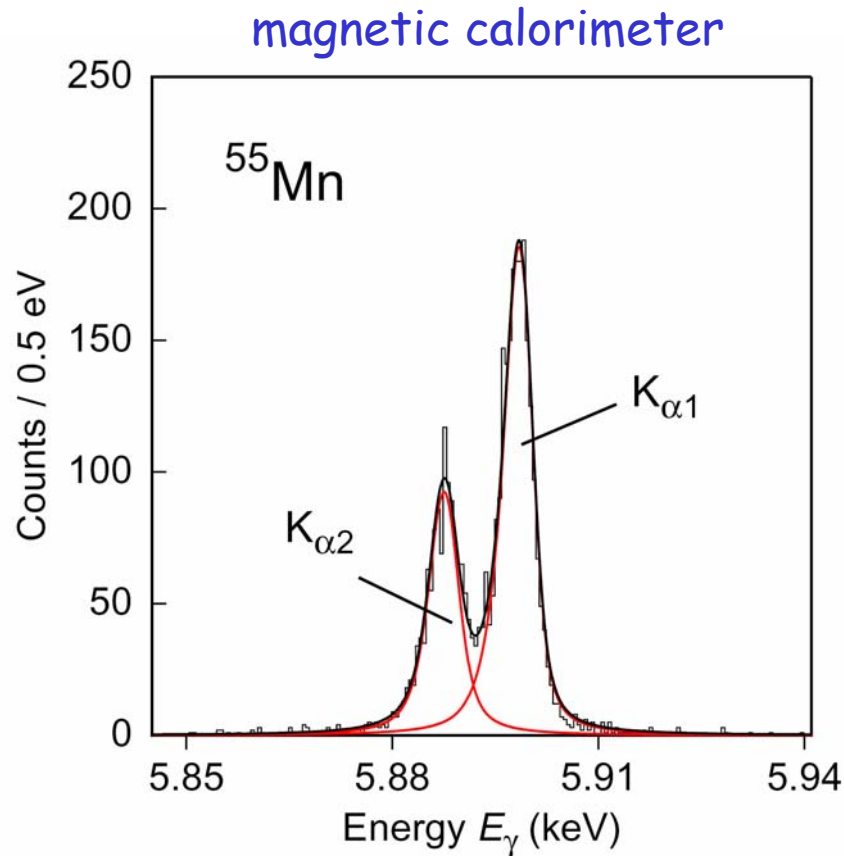


V_{acc} = 10 kV
for micro-calorimeter and Si(Li) spectra



**What about the
chemical bonding state
of atoms in thin film structures ?**

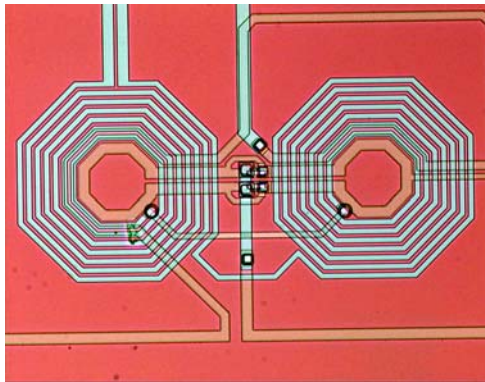
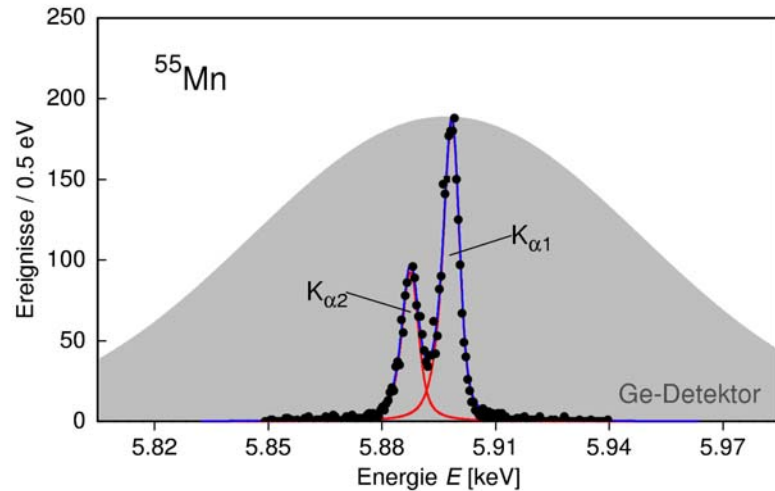
x-ray fluorescence of manganese



energy resolution 3.4 eV @ 6keV

resolving power > 1700

summary & outlook



(IPHT-Jena)

TES sensors and magnetic calorimeters

- hi-res x-ray spectrometers
- process control of deep sub- μm processes

future:

new materials and geometries

to reach sub-eV resolution

demonstrate chemical analysis in SEM

development of detector arrays

Cryogen-free Two Stage Adiabatic Demagnetization Refrigerator from Janis, Wilmington, USA

- ◆ cryogen-free two stage adiabatic demagnetization refrigerator
 - ✓ using a 4 K pulse tube cryocooler.
- ◆ base temperature below 50 mK
- ◆ remains below 100 mK for more than two days
- ◆ <http://www.janis.com/p-adr.html>



VeriCold Technologies GmbH



• Adiabatic Demagnetisation Refrigerator

- ✓ Base temperature of 50-100mK
- ✓ No need for cryogenic liquids
- ✓ Power consumption 6kW – possibly reduction to 2 kW
- ✓ Weigh: approx. 35 kg, next generation < 25 kg
- ✓ Volume: Height 1200mm x Dia. 240mm; next generation: 700mm x Dia. 240mm, „set and forget“ automation: cool down, recharge, temperature stabilization (start cooling in evening, system cold in the morning)
- ✓ industry proven



Absorbeur

masse : μg au kg

faible Z à fort Z

- **Supraconducteur**
 - Étain, tantale, plomb, ...
- **Isolant**
 - Saphir, diamant, ...
- **Semi-conducteur**
 - Germanium, silicium, ...
- **Métal**
 - Or, cuivre, ...

Thermomètre

Constantes de temps : $1 \mu\text{s}$ à 10ms

- ⚡ **jonction tunnel (STJ)**
 - ❖ SQUID ou FET
- ⚡ **résistance thermique**
 - ❖ FET (transistor à effet de champ)
- ⚡ **thermomètre à transition supraconductrice (TES)**
 - ❖ SQUID
- ⚡ **thermomètre magnétique**
 - ❖ SQUID (magnétomètre)

Aussi nombreuses que les détecteurs classiques !!!



Industrial applications ?

What about low temperature ?

- One would like a warm friendly closed box that one can put on a table
- No need for cryogenic liquid
- Press a button in the evening, cold the next morning
- It exists today !
 - ❖ Since 2002

Applications are waiting for you !



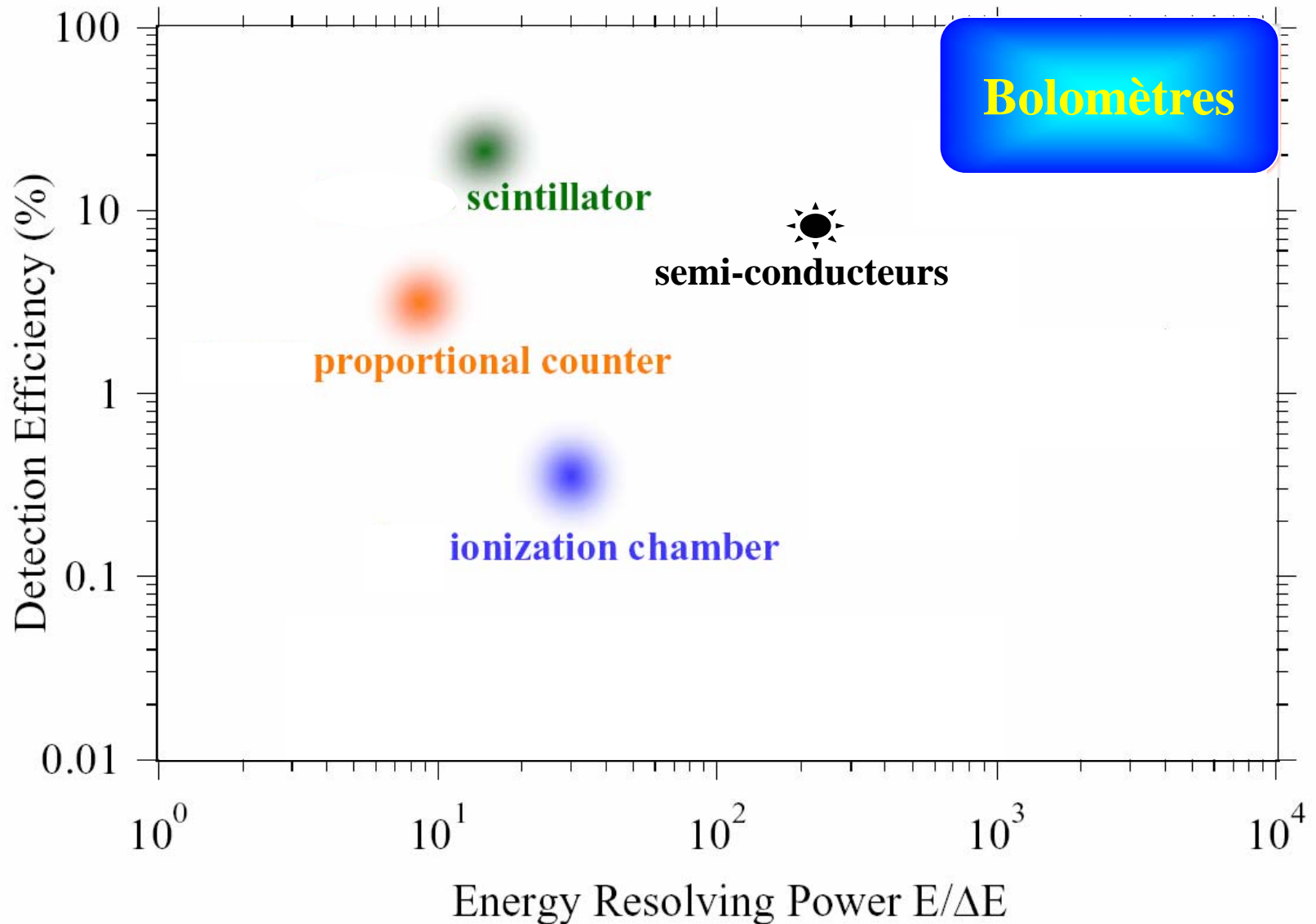
Conclusions

- 10^{-3} eV à 100 MeV !
 - ❖ Photons, électrons, alphas, neutrons, ions lourds, bio-molécules, ...
- Domaines d'applications très variés :
 - Recherche (astrophysique, physique fondamentale, ...)
 - Sécurité (non-prolifération nucléaire)
 - Environnement (spéciation de métaux)
 - Industriel (analyse de matériaux)
 - ...
- Des performances inégalées

Les domaines d'applications : 10^{-3} eV à 100 MeV !

- **10^{-3} à 10^{-1} eV** : sub-millimétrique, micro-onde, IR
 - Astrophysique : caméras (imageur), ...
- **1 à 10 eV** : photons visibles, spectrométrie, imagerie
 - Astrophysique, télécommunications, métrologie quantique, ...
- **10 eV à 10 keV** : UV, X et électrons de faibles énergies
 - Astrophysique, analyse de matériaux, masse du neutrino, ...
- **10 keV à 100 keV** : X, gamma faible E, électrons
 - Astrophysique, plasmas, non-prolifération nucléaire, matière noire, ...
- **3 à 6 MeV** : alpha, reculs de noyaux, neutrons
 - Alphas, imagerie et spectrométrie neutronique, ...
- **1 à 100 MeV** : ions lourds, bio-molécules

Détecteurs de photons X



Détecteurs cryogéniques pour la spectrométrie X : avantages et limites des technologies d'aujourd'hui

Elvire Leblanc
CEA Saclay
Laboratoire National Henri Becquerel
91191 Gif-sur-Yvette, France

Résumé :

De nouvelles applications de la recherche et de l'industrie bénéficient aujourd'hui des performances remarquables des détecteurs de type bolomètre fonctionnant à très basse température. En particulier pour la spectrométrie X, les seuils de détection et les résolutions en énergies sont meilleurs de plus de un ordre de grandeur par rapport à ceux des détecteurs classiques. Cette rupture technologique n'est possible que par l'introduction d'un principe physique de détection fondamentalement différent. Ceci rappelle la révolution introduite dans les années 1970 avec les détecteurs à semi-conducteur par rapport aux détecteurs à scintillateur. Aujourd'hui il existe de nombreuses technologies de détecteurs fonctionnant à très basse température, présentant chacune ses avantages et ses limites. Mais dans ce domaine les technologies évoluent aujourd'hui rapidement pour répondre aux besoins de nouvelles applications.

1 Introduction

La physique de détection des détecteurs fonctionnant à très basse température est fondamentalement différente de celle des détecteurs classiques et introduit une rupture technologique dans la mesure des rayonnements ionisants. Le principe de détection des bolomètres ou microcalorimètres est la mesure d'une élévation de température consécutive à l'interaction d'un rayonnement dans la cible du détecteur. L'élégance du principe de détection est de mettre en jeu la création et la mesure d'un très large nombre de quanta, trois à quatre ordres de grandeur plus important que le nombre de paires électrons-trous formés dans un semi-conducteur par exemple. Les très faibles fluctuations statistiques du nombre de quanta créés pour une interaction donnent ainsi accès à des seuils de détection et des résolutions en énergie meilleurs de un à deux ordres de grandeur. De plus le rendement de détection n'est pas limité à basse énergie comme dans le cas des semi-conducteurs en germanium ou en silicium.

Le signal mesuré est d'autant plus grand que la température diminue. Et à très basse température, les fluctuations sur ce signal deviennent très faibles. Les détecteurs cryogéniques n'ont pas besoin d'être refroidis en permanence comme c'est le cas des détecteurs à semi-conducteurs, mais seulement lors de la mesure. La descente à la température de fonctionnement (50 - 100 mK) peut s'effectuer aujourd'hui de façon entièrement automatique en quelques heures avant la mesure, grâce à la mise à disposition sur le marché de petits réfrigérateurs portables, automatiques et sans liquide cryogénique. Les détecteurs cryogéniques sont donc, malgré leur température de fonctionnement relativement basse, moins coûteux à l'entretien et au fonctionnement que les détecteurs conventionnels.

Les détecteurs cryogéniques investissent aujourd'hui de nouveaux domaines d'applications couvrant la détection de rayonnement ou de particules d'énergie allant de 10^{-3} eV à 10^8 eV ! Parmi les applications les plus avancées on note le développement de caméras (> 1000 pixels) dans le domaine sub-millimétrique, micro-onde et infra-rouge pour l'astrophysique. La détection quantique de photons optiques ouvre des applications stratégiques dans les

télécommunications. La réalisation de mosaïques de quelques dizaines de pixels pour des caméras X développées à l'origine pour l'astrophysique, est exploitée dans l'industrie pour l'analyse des matériaux par fluorescence X. De nouveaux détecteurs sont développés aux Etats Unis et au Japon pour la spectrométrie des photons gamma de 20 à 200 keV (mesure isotopique des actinides, surveillance de la non-prolifération des matières nucléaires, diagnostic de plasmas).

La diversité des applications s'explique par la richesse des technologies existantes permettant de concevoir le détecteur dans des matériaux et des géométries infiniment variés. La cible du détecteur peut être réalisée dans un diélectrique, un supraconducteur ou un métal. Elle peut être d'un seul bloc ou composite (plusieurs matériaux associés) et constituée de un ou plusieurs pixels avec des masses globales de quelques micro-grammes à plusieurs dizaines de kilogrammes. Plusieurs technologies sont exploitées aujourd'hui, mettant en œuvre des principes physiques différents qui conditionnent les avantages et les limites de chacune.

2 Les jonctions Tunnel (Superconducting Tunnel Junctions)

2.1 Principe de détection

Les Jonctions Tunnel Supraconductrices (STJ) sont composées de 2 couches de métaux supraconducteurs séparées par une mince barrière isolante. Dans un supraconducteur les électrons sont couplés par deux et forment des paires de Cooper. L'énergie d'une particule incidente est absorbée dans une des couches métalliques et entraîne l'excitation d'une cascade d'électrons (primaires et secondaires). La désexcitation de ces électrons permet la brisure d'un très grand nombre de paires de Cooper, chacune libérant 2 quasiparticules¹. Celles-ci peuvent traverser la mince barrière isolante par un phénomène quantique appelé effet tunnel. Le nombre total de quasiparticules qui traversent la barrière est proportionnel à l'énergie déposée par la particule incidente. Ceci crée un excès de courant qui est mesuré par un SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) ou par un FET. L'optimisation du rapport signal sur bruit des Jonctions Tunnel est réalisé en cherchant à augmenter la durée de vie des quasiparticules (éviter la recombinaison, d'où la nécessité de refroidir le dispositif très en dessous de la température critique du supraconducteur utilisé) et favoriser leur transport par effet tunnel.

2.2 Avantages que présentent aujourd'hui les Jonctions Tunnel Supraconductrices :

- Des taux de comptage relativement élevés peuvent être obtenus (10^4 coups/s pour une jonction), avec une dégradation mineure de la résolution en énergie.
- Une faible dépendance en température : la réponse du détecteur reste stable avec une dérive en température de plusieurs millikelvins.
- Peu de sensibilité aux vibrations ou aux perturbations électromagnétiques. Le faible courant traversant la jonction peut être mesuré à l'aide d'un SQUID placé à proximité de la jonction. Le signal en sortie est peu sensible aux variations de capacité des câbles pouvant être induites par des vibrations.
- Ces détecteurs permettent d'atteindre des seuils de détection en énergie très bas. Ils sont utilisés pour la spectrométrie haute résolution en énergie, l'imagerie, et le comptage (X mous, ultra violet, et optique).

¹ Quasiparticules : électrons extraits, par apport local d'énergie, de l'état fondamental des paires de Cooper dans un supraconducteur

Les résolutions en énergie publiées sont de l'ordre de 10 à 20 eV pour des photons X de 6 keV, de l'ordre de 2 eV en dessous de 1 keV et de l'ordre de 0,2 eV pour des photons optiques.

2.3 Limites actuelles des Jonctions Tunnel Supraconductrices :

- La résolution en énergie des jonctions est limitée par la dépendance de la réponse du détecteur au point d'impact dans l'absorbeur. La surface de détection doit donc être limitée (quelques $100 \times 100 \mu\text{m}^2$, jusqu'à $1 \mu\text{m}^2$ pour la détection des photons optiques).
- L'épaisseur de la couche supraconductrice absorbante ne doit pas dépasser quelques centaines de nanomètres (pour éviter la recombinaison et favoriser le passage des quasiparticules). Ceci limite l'efficacité de détection. Différentes équipes essaient de coupler un absorbeur (Tantale par exemple) à la jonction tunnel. La résolution en énergie est alors dégradée.
- La présence de champ magnétique résiduel induit la création de vortex dans les minces couches supraconductrices piégeant partiellement les quasi-particules. Ceci a pour effet de réduire l'amplitude de la réponse de la jonction.
- La propagation diffusive des quasi-particules à travers les électrodes de la jonction entraîne une non-linéarité de la réponse en fonction de l'énergie du détecteur.
- La réponse du détecteur en fonction de l'énergie est complexe. Des pics multiples peuvent apparaître dus à une interaction possible dans les différentes couches supraconductrices.

2.4 Progrès en cours, axes de recherche :

- Des jonctions de faibles surfaces ($1 \mu\text{m}^2$) sont couplées à un absorbeur commun diélectrique plutôt que supraconducteur (l'intérêt est d'avoir ainsi un couplage par phonons et non par quasi-particules). La dépendance de la réponse des jonctions suivant le point d'impact est mise à profit pour atteindre une résolution spatiale.
- Un traitement du signal et une reconnaissance de forme des impulsions permet une discrimination des événements venant de l'absorbeur et de la jonction.

3 Les calorimètres ou bolomètres

Le principe physique des microcalorimètres est la mesure d'une élévation de température due à l'absorption d'une particule incidente dans un matériau cible. Suivant l'énergie et le type de rayonnement, ou les besoins spécifiques de l'expérience, un choix extrêmement large de matériaux s'offre pour la réalisation de la cible. Dans les dernières années différents types de thermomètres ou senseurs ont été explorés.

- Les premiers senseurs développés sont les semiconducteurs en germanium ou en silicium dopés par implantation chimique ou par transmutation induite par neutrons. Ils présentent pour un taux de dopage précis et une gamme de température donnée une résistivité variant fortement avec la température. Ces senseurs permettent d'obtenir d'excellentes performances en terme de résolution en énergie.
- Les senseurs TES (Transition Edge Sensor) sont réalisés dans une mince couche supraconductrice. Utilisés dans la gamme de température de la transition supraconductrice, ces TES constituent des thermomètres de très haute sensibilité, leur résistance augmentant très rapidement avec la température. Ces détecteurs permettent d'obtenir des résolutions en énergie remarquables. L'électronique adaptée à la lecture de ces senseurs à basse impédance comprend un SQUID.

Les senseurs de température magnétiques sont issus d'un des principes de détection les plus innovants. Le senseur est constitué d'une matrice métallique contenant quelques ions paramagnétiques. L'élévation de température consécutive à l'interaction d'un rayonnement induit une diminution de la magnétisation du senseur (placé dans un champ magnétique) qui est mesurée de façon extrêmement sensible par un magnétomètre SQUID.

3.1 Performances et avantages des microcalorimètres ou bolomètres :

Les meilleures résolutions en énergie pour un détecteur isolé sont de l'ordre de 2 eV pour des photons de 1,5 keV et de l'ordre de 3 eV pour des photons de 6 keV. Ces résultats sont confirmés par plusieurs équipes internationales : la NASA (Greenbelt) et l'université de Wisconsin aux Etats Unis, le NIST à Boulder, le centre d'astrophysique de Cambridge en collaboration avec le laboratoire national de Berkeley, le centre de recherche spatiale aux Pays-Bas (SRON), en collaboration avec l'Université de Colorado à Denver, l'Institut National de Physique Nucléaire (INFN), l'université de Milan en Italie et l'Université de Heidelberg (Allemagne). Ces performances sont obtenues de façon reproductibles.

Les développements portent actuellement sur la réalisation de mosaïques de détecteurs pour de l'imagerie. Les résultats présentés sont excellents : résolution en énergie inférieure à 10 eV à 6 keV sur un ensemble de 30 pixels.

Les microcalorimètres magnétiques offrent l'avantage d'une réponse linéaire sur plus de deux ordres de grandeur en énergie. Ils associent un excellent rendement de détection à un taux de comptage relativement élevé. Bien que la technologie soit très récente, des mosaïques de plusieurs pixels sont déjà à l'étude et en cours de développement (Allemagne, USA, Japon).

3.2 Difficultés d'utilisation :

- Le principe physique étant basé sur une mesure d'élévation de température, ces détecteurs requièrent une excellente stabilité en température, inférieure au micro-kelvin pour les détecteurs les plus sensibles.
- Devant être ramenés à leur température initiale après chaque événement, ces détecteurs sont pour certains relativement lents. Les taux de comptage les plus élevés et associés à une bonne résolution en énergie sont de l'ordre de 1000 coups par seconde.
- Les senseurs à transition supraconductrice (TES) ne sont linéaires que dans une gamme d'énergie relativement limitée (1 ordre de grandeur).
- Le bismuth, matériau intéressant pour sa faible capacité calorifique et son numéro atomique élevé, se révèle difficile à exploiter en combinaison avec certains matériaux, notamment l'or. Par ailleurs sa faible conductivité thermique rend le transfert d'énergie peu efficace pour des volumes conséquents.

3.3 Progrès en cours, axes de recherche :

- Le système de contre-réaction thermique passif (ETF) (contrôle actif de la puissance dissipée dans le détecteur par un circuit externe) permet de réduire aisément d'un facteur 10 le temps de réponse du détecteur. (La température du senseur est maintenue constante en variant la tension ou le courant de polarisation de façon à réduire après chaque impulsion la puissance dissipée dans le microcalorimètre). L'ETF, couramment utilisé aujourd'hui, offre de plus l'avantage de réduire fortement l'exigence de régulation en température du détecteur.
- L'augmentation du nombre de pixels permet d'améliorer la statistique de comptage : $6 \cdot 10^6$ désintégrations bêta enregistrées par l'Université de Milan pour l'étude de la forme du spectre bêta de ^{187}Re , l'objectif final est d'atteindre une statistique de 10^{14} !

- Des électroniques de multiplexage pour la lecture des SQUIDS de mosaïques de 1000 pixels sont en cours de développement.

4 Conclusions

Les détecteurs cryogéniques investissent aujourd'hui un nombre croissant d'applications introduisant des performances (résolution en énergie et seuil de détection) qui ont franchi de plus d'un ordre de grandeur les limites intrinsèques aux détecteurs conventionnels. La conception des détecteurs en mosaïques de plusieurs dizaines à quelques mille pixels offre les avantages d'une petite caméra ou d'un taux de comptage global élevé. Les avancées spectaculaires dans ce domaine sont possibles d'une part par la mobilisation de moyens et d'équipes conséquentes et la coopération de plusieurs instituts. D'autre part la mise à disposition sur le marché de petits réfrigérateurs portables, automatiques et sans liquide cryogénique, motive de nouveaux développements ouvrant des perspectives sans précédent pour les laboratoires de recherche et pour l'industrie.