

Senseurs quantiques pour une détection aux limites

**Activités du plateau technique CryoRED
et du groupe MANOIR de l'IP2i**

J. Colas PhD, IR CNRS
j.colas@ip2i.in2p3.fr

représentant de CryoRED (et de MANOIR
pour cette présentation)

16/06/2025, IP2i



Les limites, de quoi ?

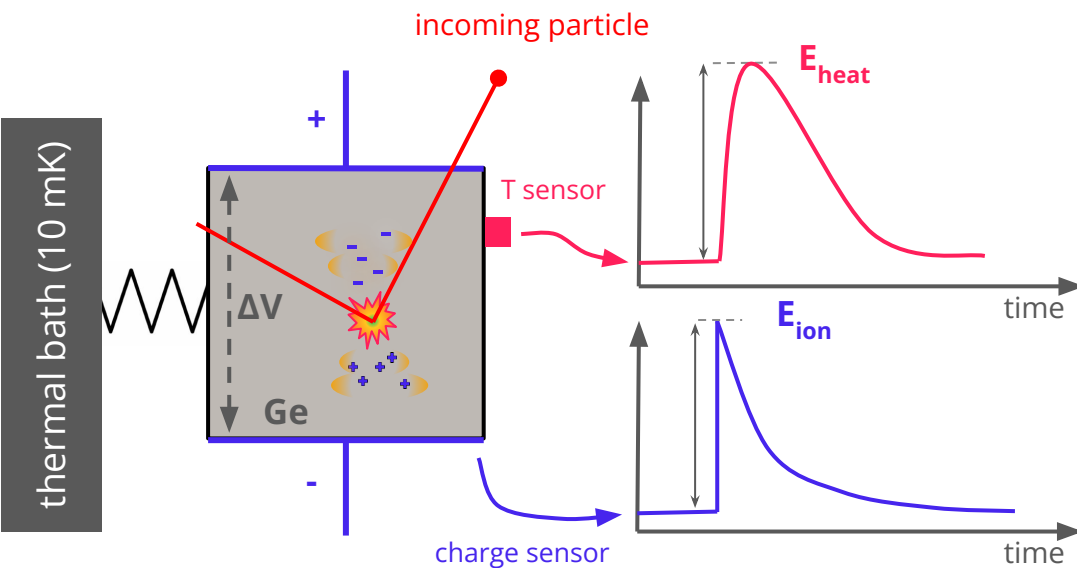
limitations expérimentales

- bruit de fond radioactif [blindages passifs / actifs]
- bruit électromagnétique [blindages IR et HF]
- bruit électronique [amplificateurs bas-bruit “maison”]
- vibrations [dissipation mécanique]
- low energy excess [discrimination des interactions du détecteurs]
- très basses températures [cryogénie, $T \sim 10$ mK]

dépasser les limites de nos connaissances

- mesures de précision du modèle standard (à très basse énergie)
- avancées technologiques (quantique, cryogénique, ...)

Principe de double détection cryogénique

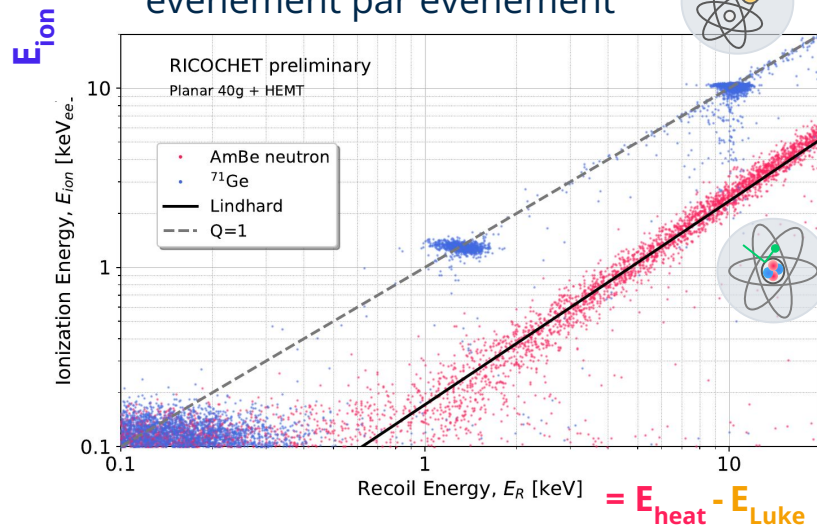


à faible potentiel électrique ΔV

mesure phonon → résolution en énergie ~ 50 eV

mesure de charge → discrimination

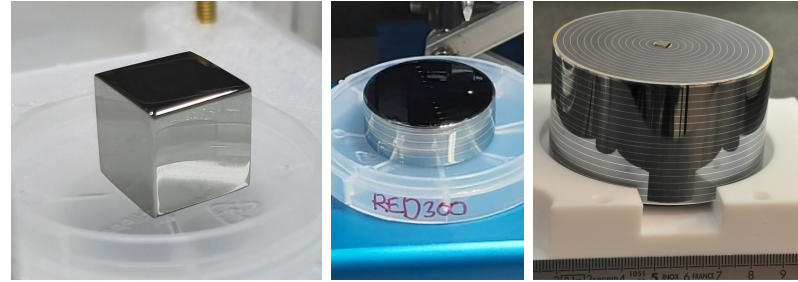
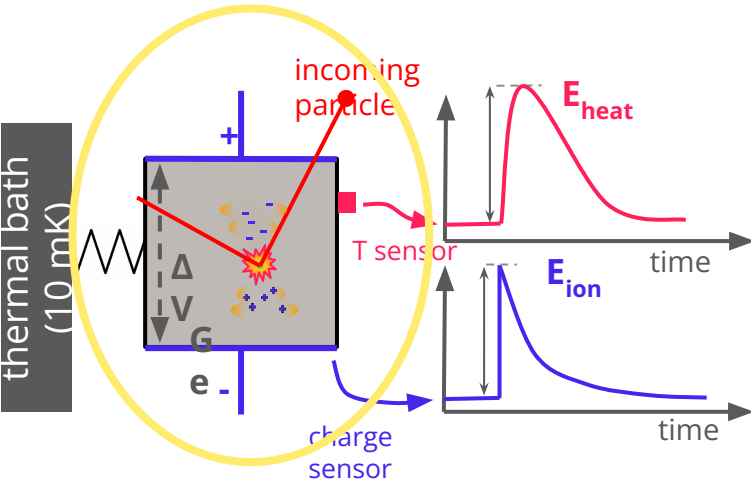
discrimination ER/NR/...
événement par événement



👉 50 eV, c'est comme l'énergie qu'il faut pour soulever un grain de poussière d'un millième de millimètre !

Cible cristalline semi-conducteur

Crystal target

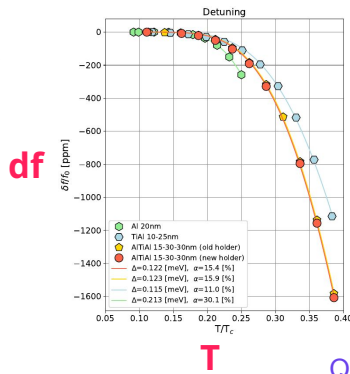
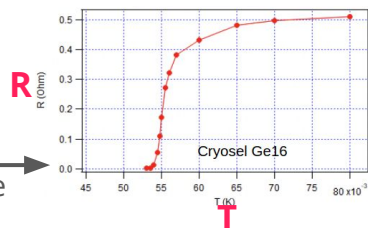
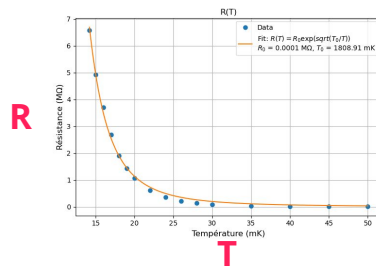
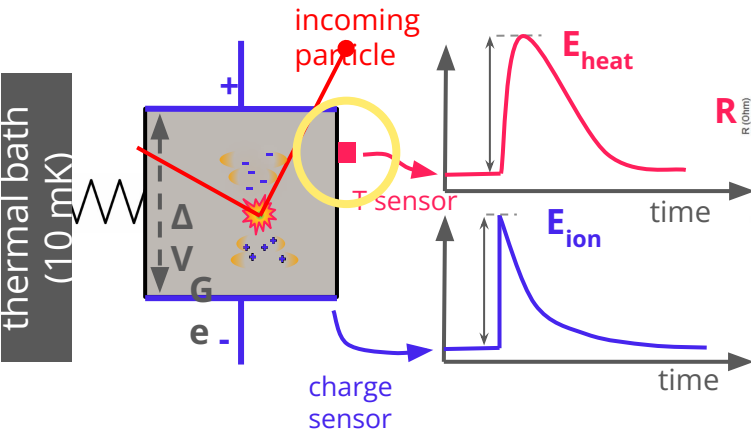


Germanium (Ge)

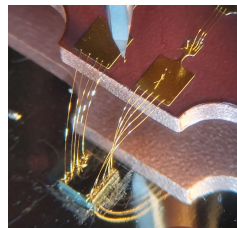


Silicon (Si)

Senseurs thermique

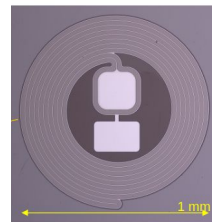


Phonon (T) sensors



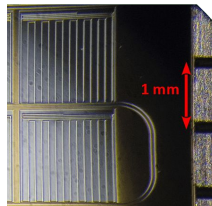
NTD-Ge

neutron transmutation doped germanium
 semi-conductor doped
 thermistor with exponential R variation



TES

transition edge sensor
 supraconductor operated near T_c
 benefit from normal/supra steep transition

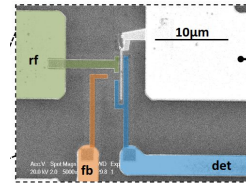
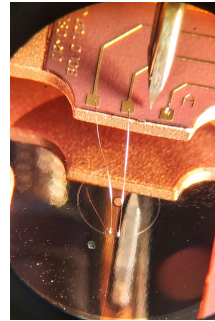
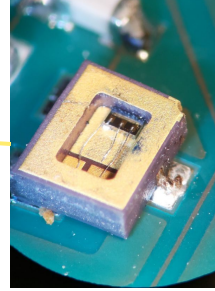
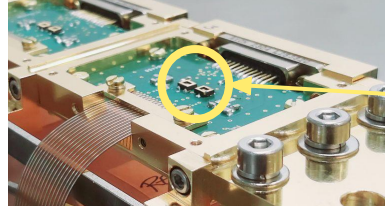


KID

kinetic inductance detector
 supraconductor operated at $T \ll T_c$
 resonant frequency depends on CP breaking

Quantum effects make them not sensitive to the same phonons

Senseurs de charge



Charge sensors

HEMT charge pre-amplifier

2D-electron gas in HEMT (high electron mobility transistor) allows for ultra-low T operation (contrary to standard JFET)

need to reduce $C \rightarrow dV = Q/C$

SSSED

superconducting single electron device

same idea as SSPD but for electrons

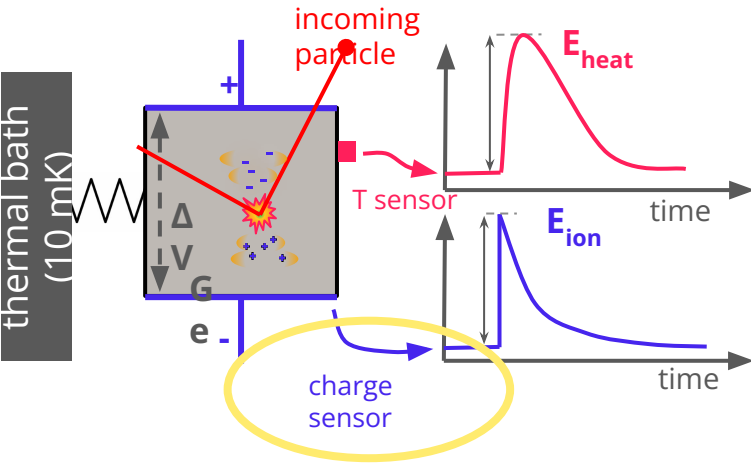
create "hotspot" of quasiparticles that propagate and break superconductivity in the film

Charge Qubit (not used on detector yet)

also called Cooper pair box (CPB)

quantum capacitance device

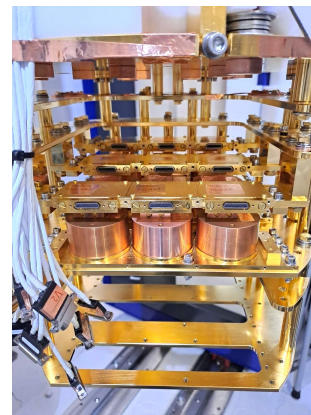
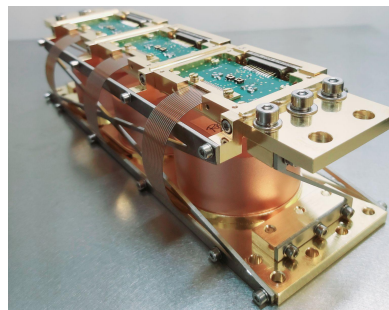
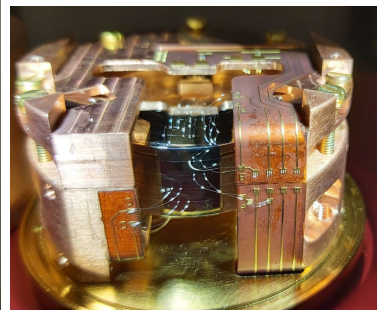
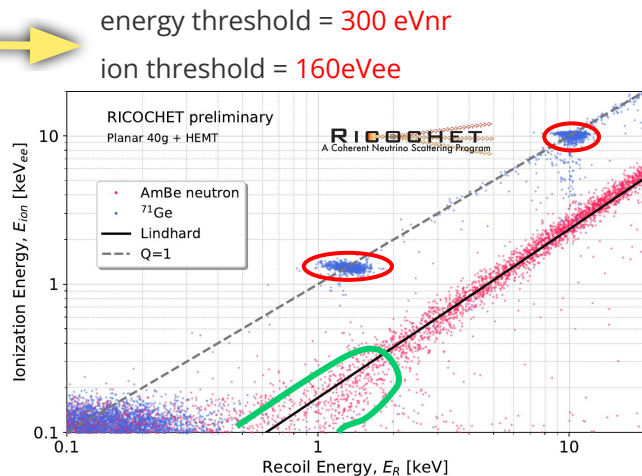
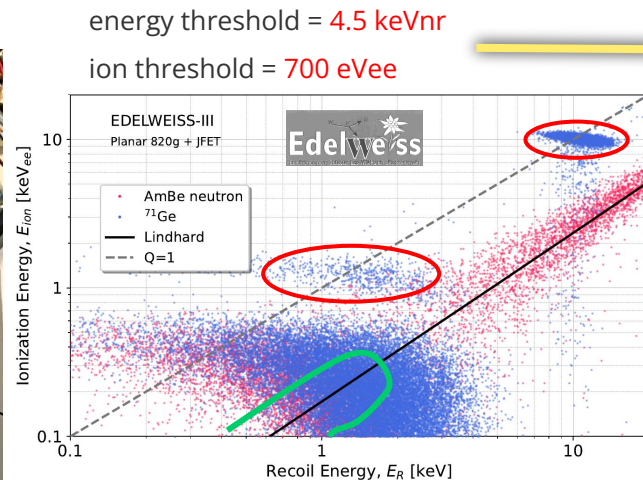
RF readout



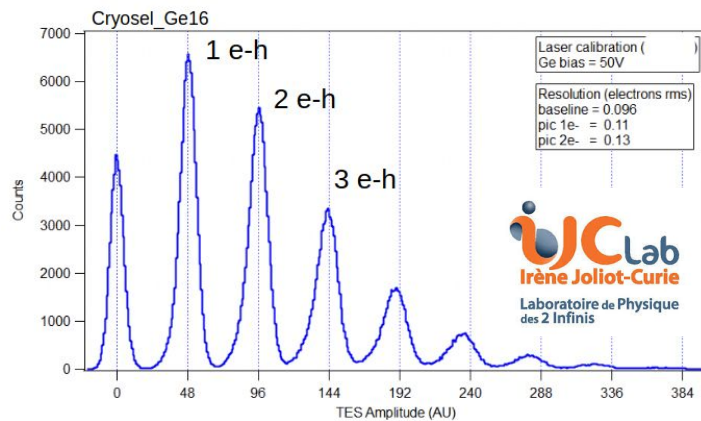
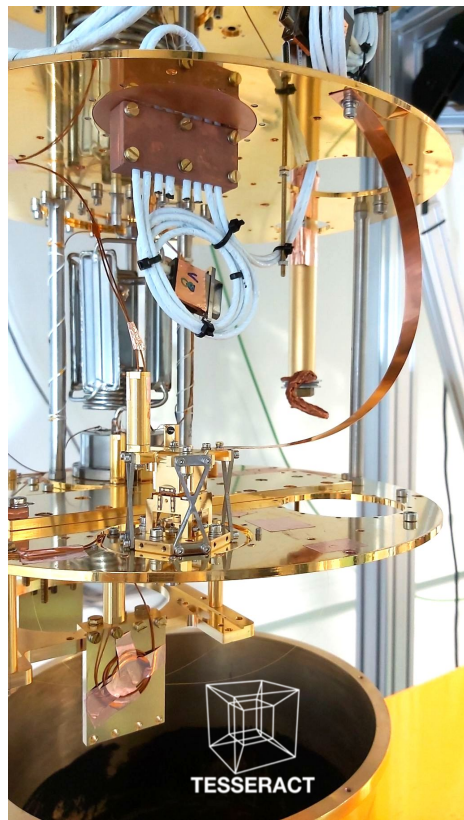
voltage is applied on Al electrodes mostly

<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054072>

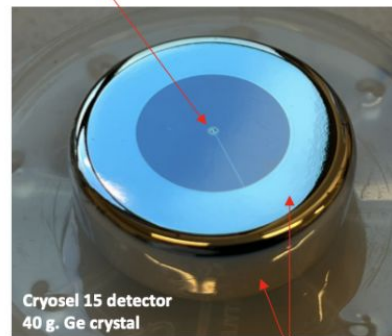
Exemples de réalisations



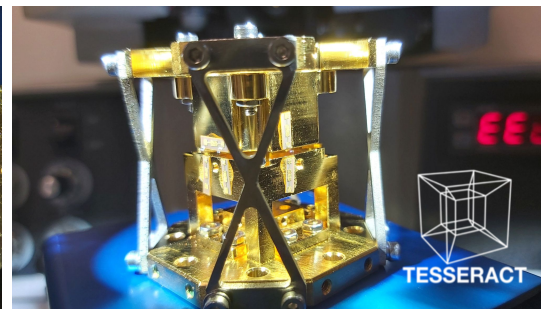
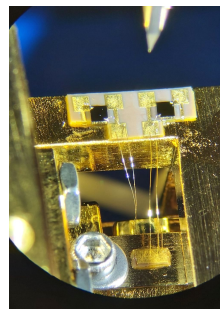
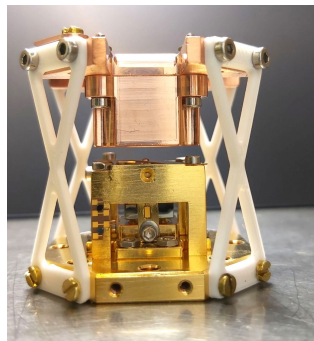
Exemples de réalisations



TES "point contact"



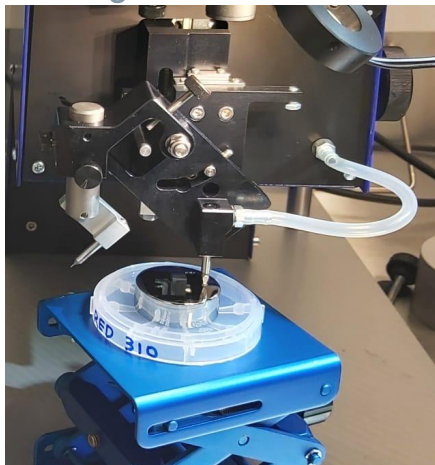
Aluminum electrode



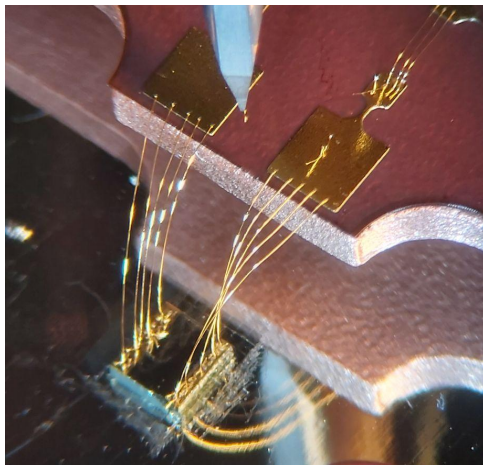
Le plateau technique CryoRED de l'IP2I



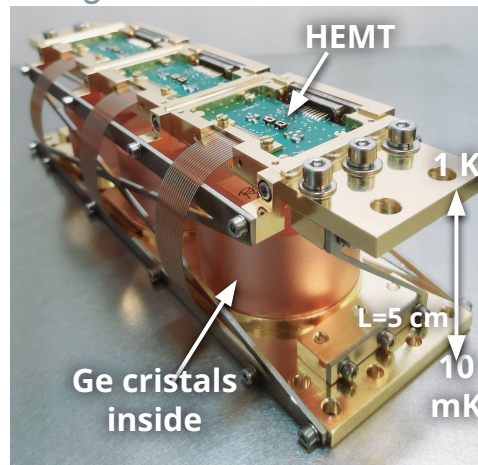
collage senseur NTD



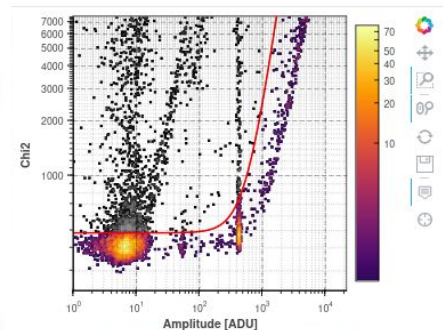
microsoudure senseur NTD



intégration des détecteurs



analyses / caractérisation



utilisation du CCIN2P3

1 micro-manipulateur JFP/MPS

placer et coller précisément des composants

1 micro-soudeuse semi-auto MPP

soudures Wedge fil Al et Au 25 μm de diamètre



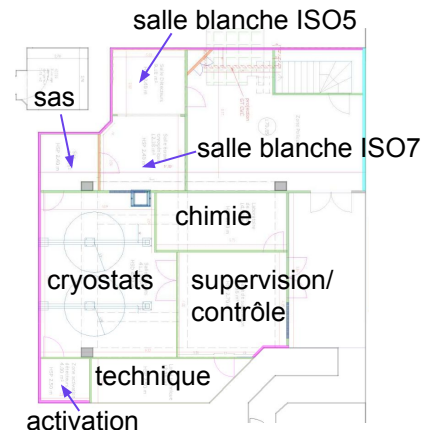
Le plateau technique CryoRED de l'IP2i



plateau technique LIO
opéré depuis 12 ans



plateau technique CryoRED
livraison décembre 2025

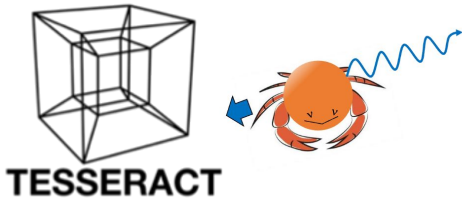


2 cryostats "dry" basse vibration
2 blindages PE/Pb (10 T) et Pb (2 T)
1 générateur N2 en continu
caractérisations électriques de précision

1 setup laser (IR) de calibration/régénération
diverses chaînes de lectures / acquisition
logiciels de gestion, supervision et traitement des données
intégration, tests et validations des chaînes de mesure

principaux utilisateurs et contributeurs = groupe **MANOIR** de l'IP2i

Principaux projets du groupe MANOIR de l'IP2I

Expériences	Status	Détecteurs	Thématique Scientifique
	arrêtée	800 g energy threshold = 4.5 keVnr charge threshold = 700 eVee	détection directe de WIMP (matière noire)
	opération  	40 g energy threshold = 300 eVnr charge threshold = 160 eVee	changement technologique JFET → HEMT KID technology investigated (RMS ~ 1 keV) mesure de précision du CENNS (neutrinos)
	développement 	5 g energy threshold = 30 eVnr charge threshold = 30 eVee goal ! energy threshold = 1 eVnr charge threshold ≤ 15 eVee	optimisation d'intégration switch from NTD to TES + SQUID détection directe de sub-GeV DM (matière noire) mesure de calibration nucléaire (physique nucléaire)

Partenaires principaux en France

Institutions

Projet commun

Echange technologique



support R&D
pas dans le projet
in2p3



techniques de microfabrication
électrodes Al (puis TES, KID ?)



techniques de microfabrication
avancées (NbSi, TES, SSED, Al, ...)



expertise basse radioactivité
mesures, simulations Geant 4
expertise physique
de la détection en surface et underground
électronique bas bruit
analogique



R&D senseurs
Kinetic Inductance Detector



simulation nucléaire
rapport d'ionisation, événements CRAB

Partenaires principaux dans le monde

Institutions



Projet commun



Echange technologique

détecteur He4 superfluide
 évaporation quantique
 détecteur en matériaux polaire
 couplage aux phonons optiques
 TES ultra sensibles
 production, optimisation



cible en supraconducteur
 développement de nouvelles approches de
 détection (gap supra << gap semi-conducteur)
 readout SQUID HF pour TES
 nécessaire pour le multiplexage
 source de calibration (potentiel)
 source de neutron pulsée



TES (potentiel)
 fabriqués à Munich
 source de calibration
 réacteur nucléaire, setup physique nucléaire

Développements quantiques futurs

mid-2025

intégration d'une chaîne de lecture TES

être capable d'opérer les détecteurs de nos partenaires

intégration d'une chaîne de lecture KID

moins prioritaire, pour des études prospectives

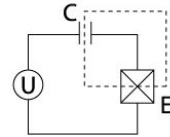
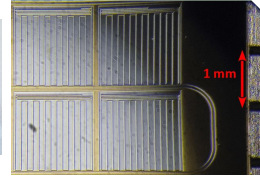
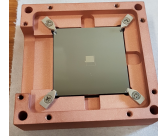
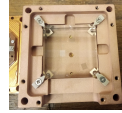
intégration des détecteurs He4 liquide de Berkeley

développement des "charge Qubit" pour la mesure de charge

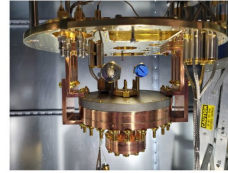
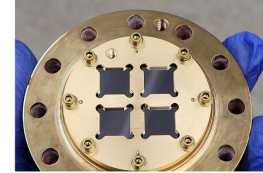
aussi appelés Cooper Pair Box, ils sont une piste pour améliorer la voie ionisation

développement de détecteurs "Single electron" pour la détection

R&D menée par l'IJCLAB → récupération des techniques à Lyon ?



4-Channel Array for HeRALD v0.2 @LBNL (4x 1cm²)



2029 - 203X

ouverture aux thématiques "quantum computing" / "quantum sensing"

étude de l'effet de la radioactivité intrinsèque sur la décohérence

application des développements réalisés pour la détection aux Qubit

compréhension des limitations expérimentales intrinsèques (LEE, nouvelles frontières)

développement de stratégie de détection innovantes basées sur les propriétés quantiques

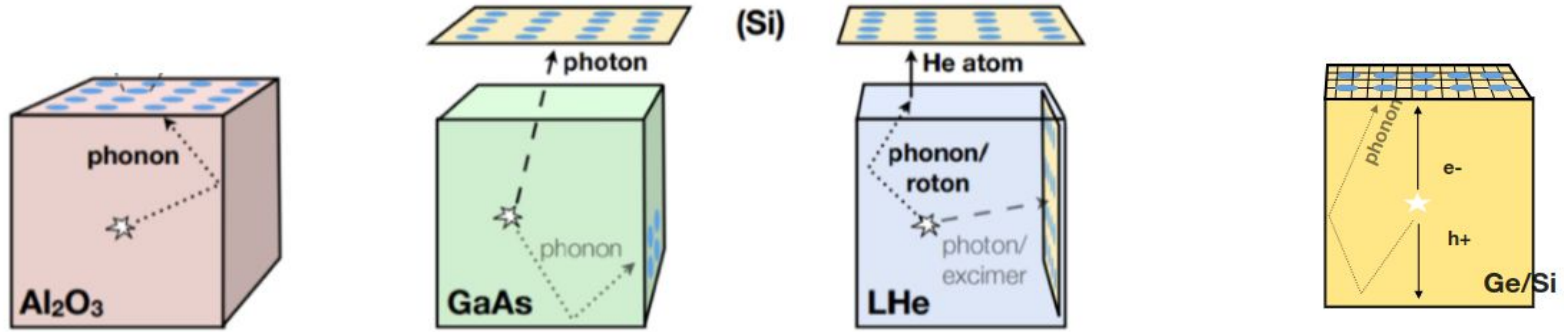
time

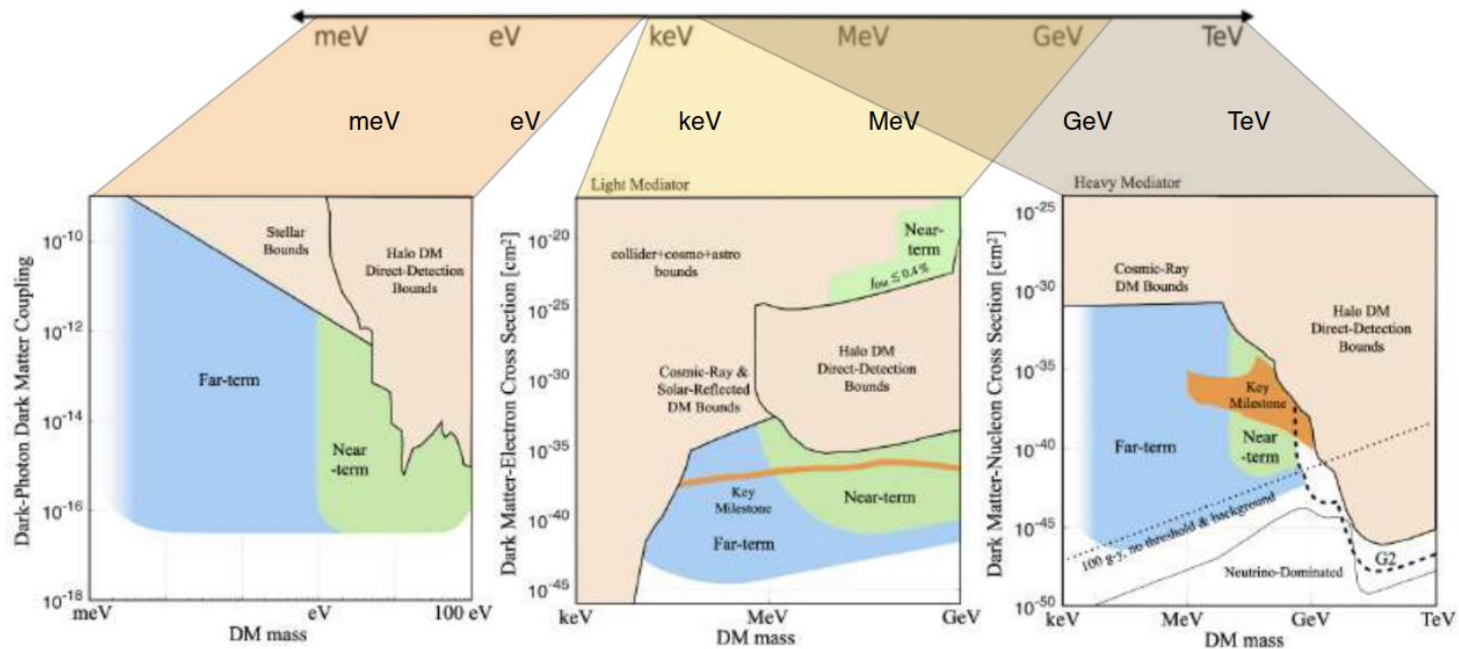


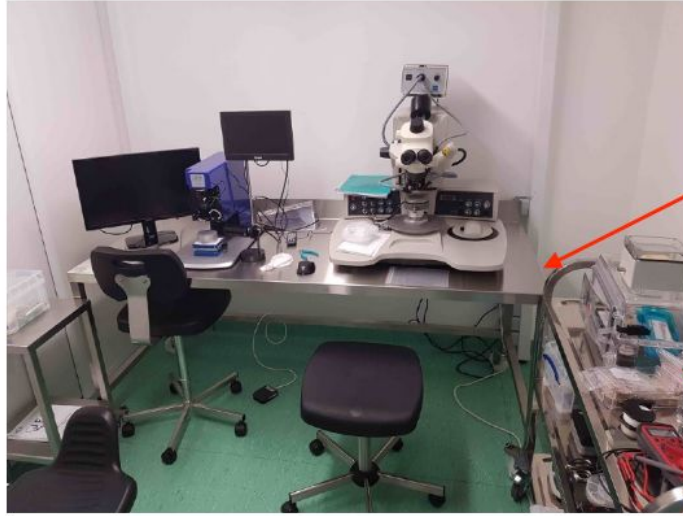
Conclusion

1. Les technologies quantiques développées à l'IP2I via CryoRED et MANOIR couvrent des perspectives fortes en détection cryogénique pour la physique fondamentale. Les applications visent des domaines de pointe : neutrinos, matière noire légère, et phénomènes nucléaires à basse énergie.
2. Une dynamique locale émerge, en particulier avec l'INL pour la micro-fabrication des électrodes et pourquoi pas des senseurs quantiques dans un avenir proche.
3. Renforcer cette coopération inter-laboratoires serait stratégique pour anticiper les senseurs quantiques du futur et consolider les savoirs-faires existants..

Merci de votre attention

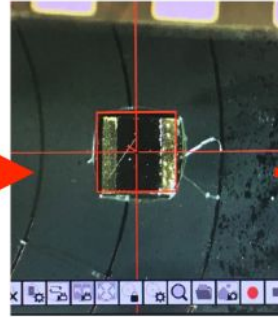




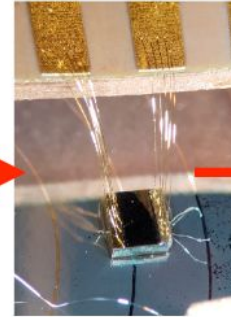


- Electrodes deposition done at IJCLab
- HEMT produced at C2N by CryoHEMT
- Integration done at IP2I

1) Gluing



2) Bonding



3) Mounting

