

Détecteurs cryogénique

Problématique générale de R&D

Plateforme Cryo IP2I

Journées thématiques Réseaux Semi-conducteurs
10-11 Juin 2021

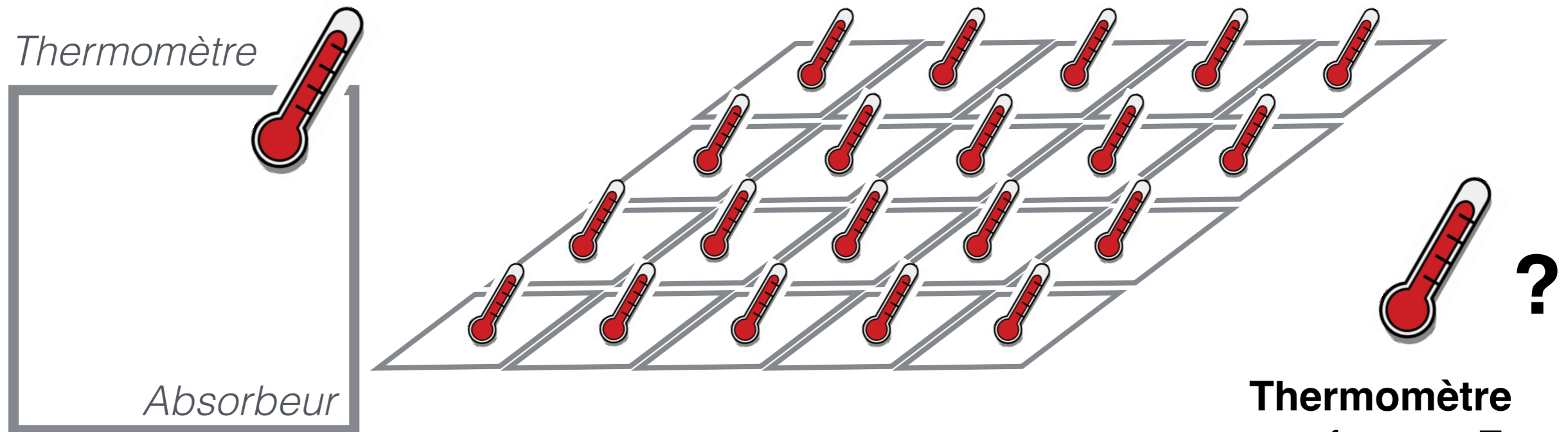
Alex Juillard IP2I



IN2P3
Institut national de physique nucléaire
et de physique des particules



Détecteur cryo ??



Bolomètre « massif »

- ◆ $\sim g \rightarrow \sim kg$
- ◆ procédé de fabrication en partie « à la main »
- ◆ détection de particule « une à une »
- ◆ application principale :

détection

d' » événements rares »

- Matière Noire
- $0\nu\beta\beta$
- CE ν NS

Matrice de Bolomètre

- ◆ $1 \rightarrow 100k$ « pixels »
- ◆ procédé de fabrication en partie « collectif »
- ◆ détection de particule « une à une » ou flux de puissance
- ◆ application principale :

Astro

- Sub-mm (50-600 Ghz)
- X

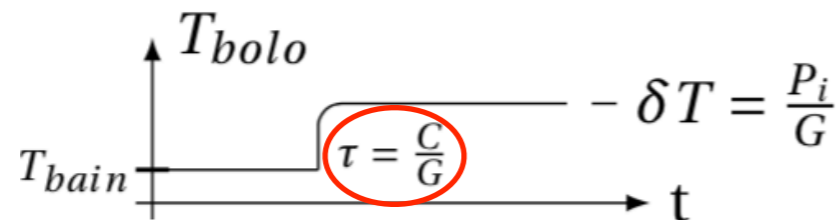
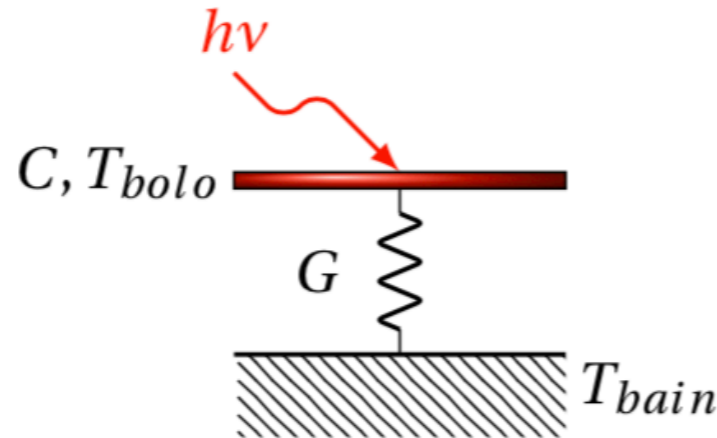
Thermomètre

« transforme » T en grandeur mesurable

- ◆ Résistif
 - supraconducteur
 - Transition Métal-Isolant
- ◆ Magnétique
- ◆ avec médiateur hors d'équilibre
 - Paire de Cooper dans matériaux supra :
 - Kinetic Inductance vs dN_{qp}
 - phonon hors d'équilibre peuvent « casser » des paires de Cooper

Détecteur cryo ??

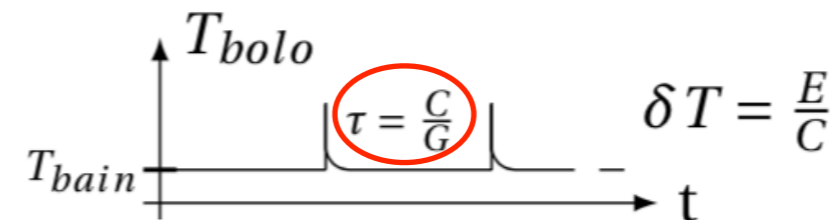
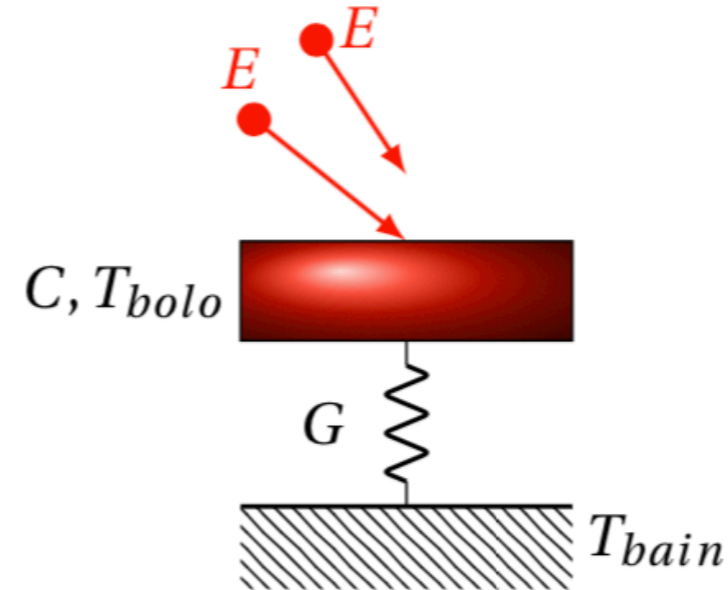
"background" / flux de photon



Mode « bolométrique »

- ◆ Réponse en C/G
- ◆ $NEP = \sqrt{4k_B T^2 G}$ [W/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

photons > eV / particules



Mode « calorimétrique »

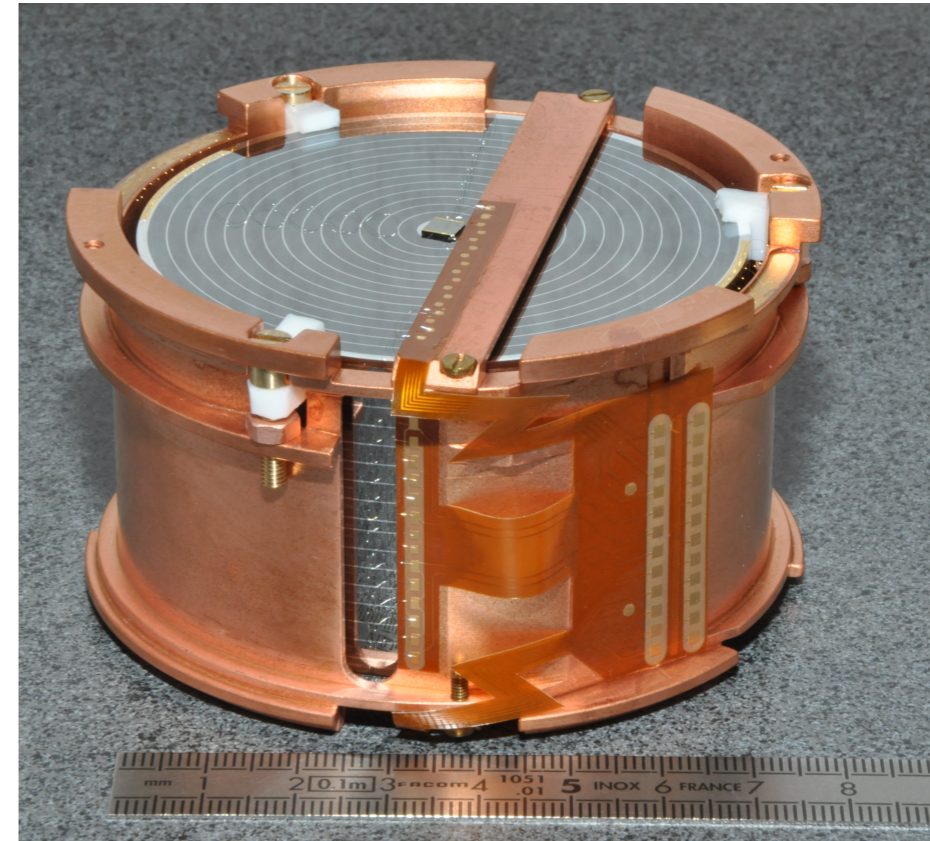
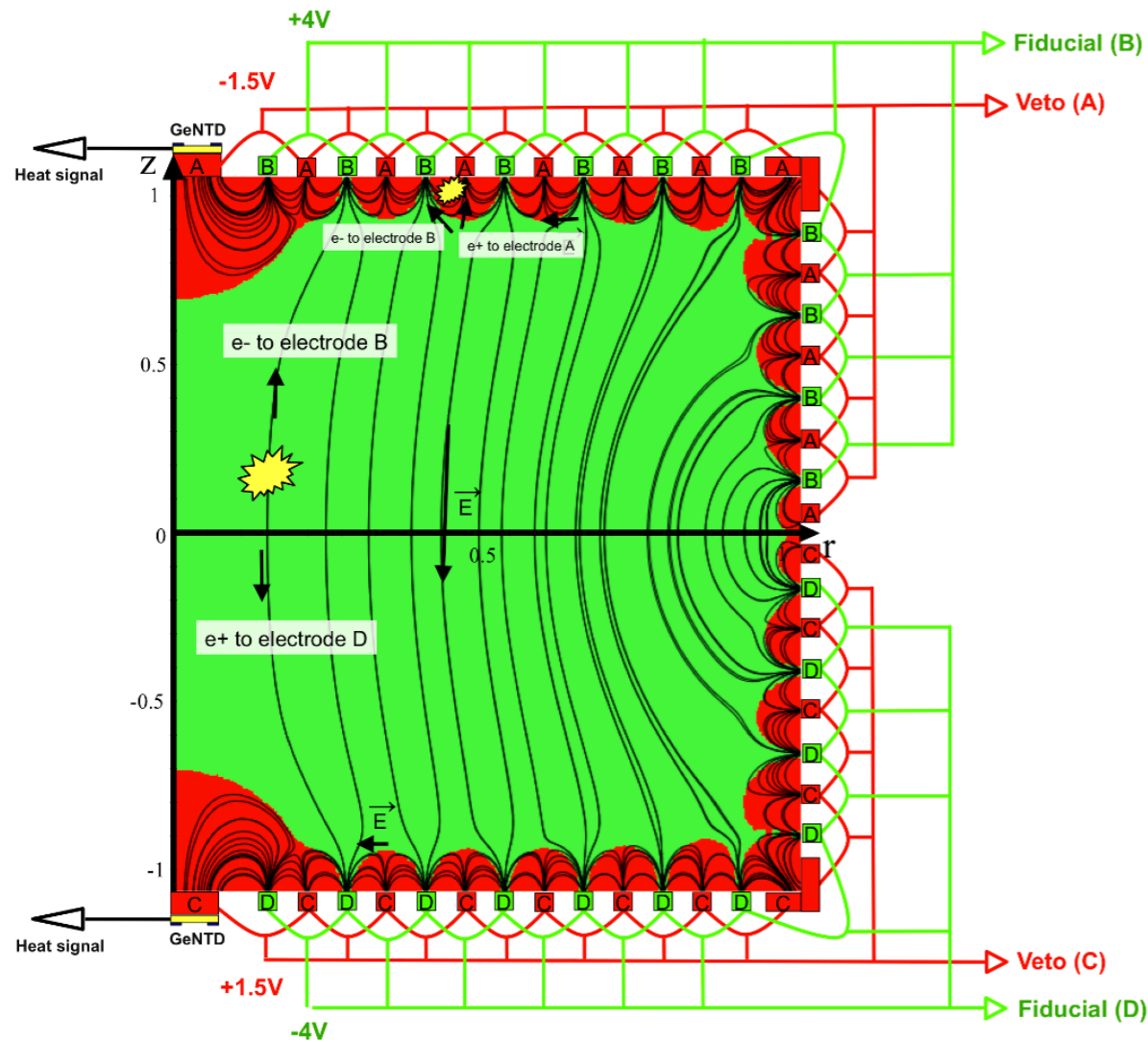
- ◆ Décroissance en C/G
- ◆ $\delta E = \sqrt{4k_B T^2 C}$ [J]

Il faut refroidir : sensibilité ↗ et bruit ↘

$T_{\text{bain}} \sim 10 \text{ mK} - 300 \text{ mK}$

**R&D = absorbeur + thermomètre +
electronique (adaptation Z, gain, readout) + environnement cryo** 3

Cryo & Semi-conducteur

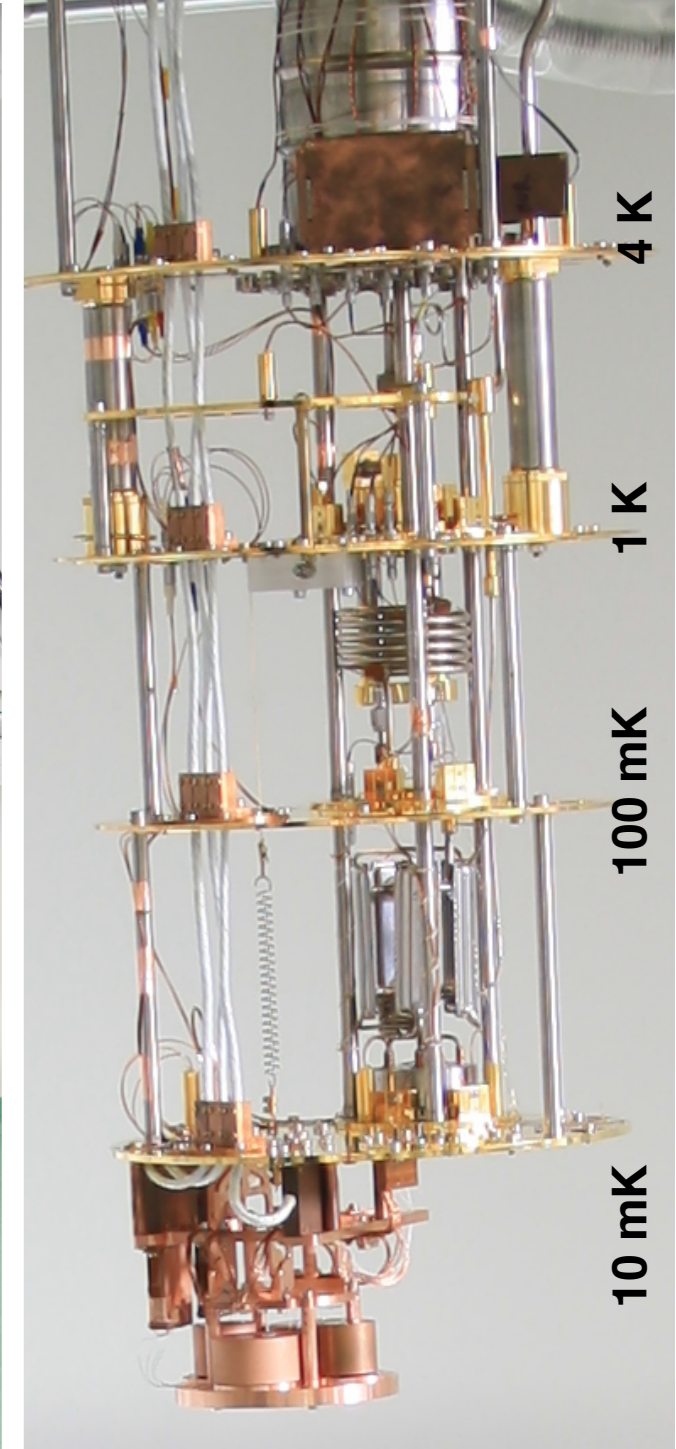
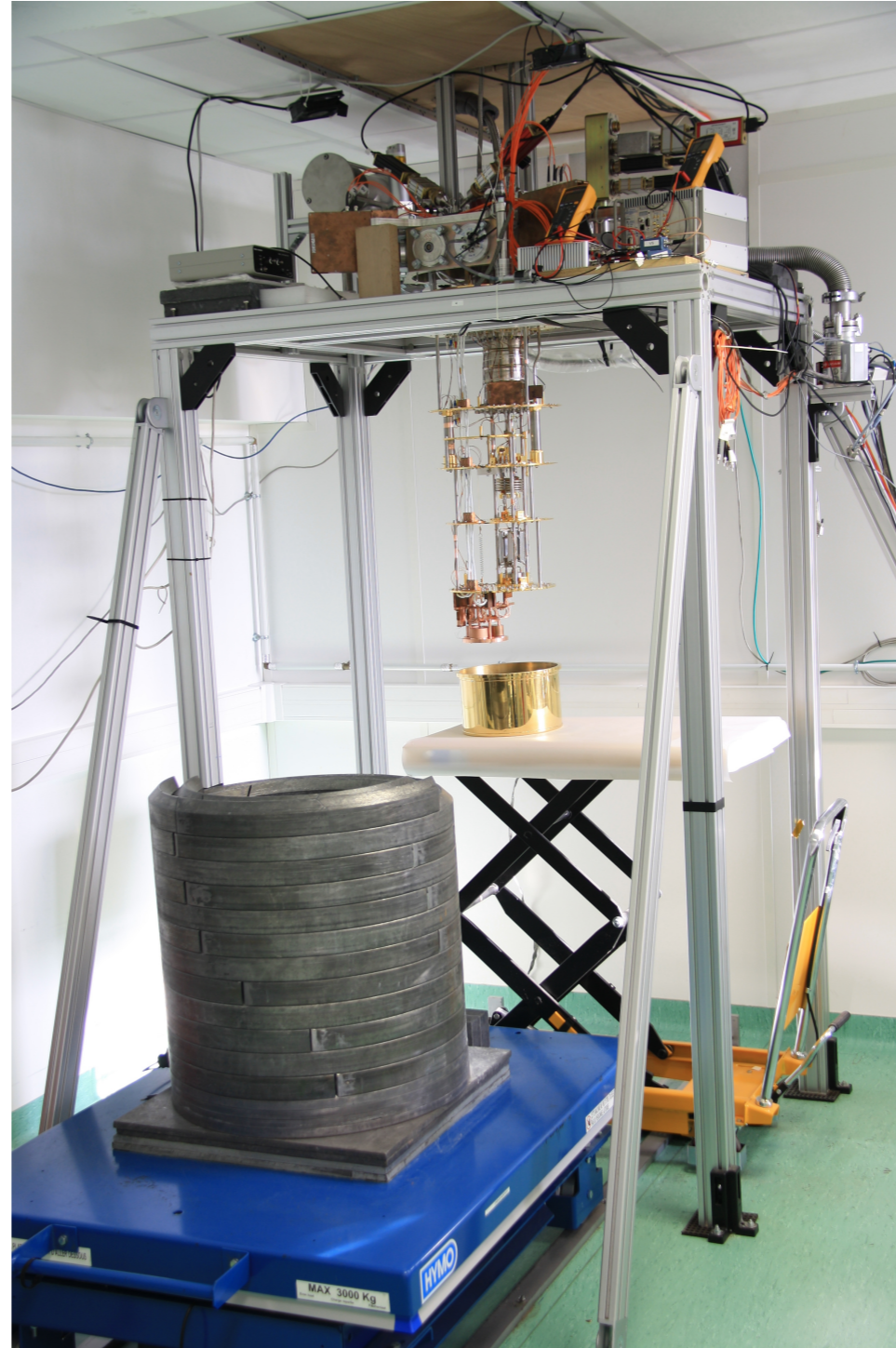
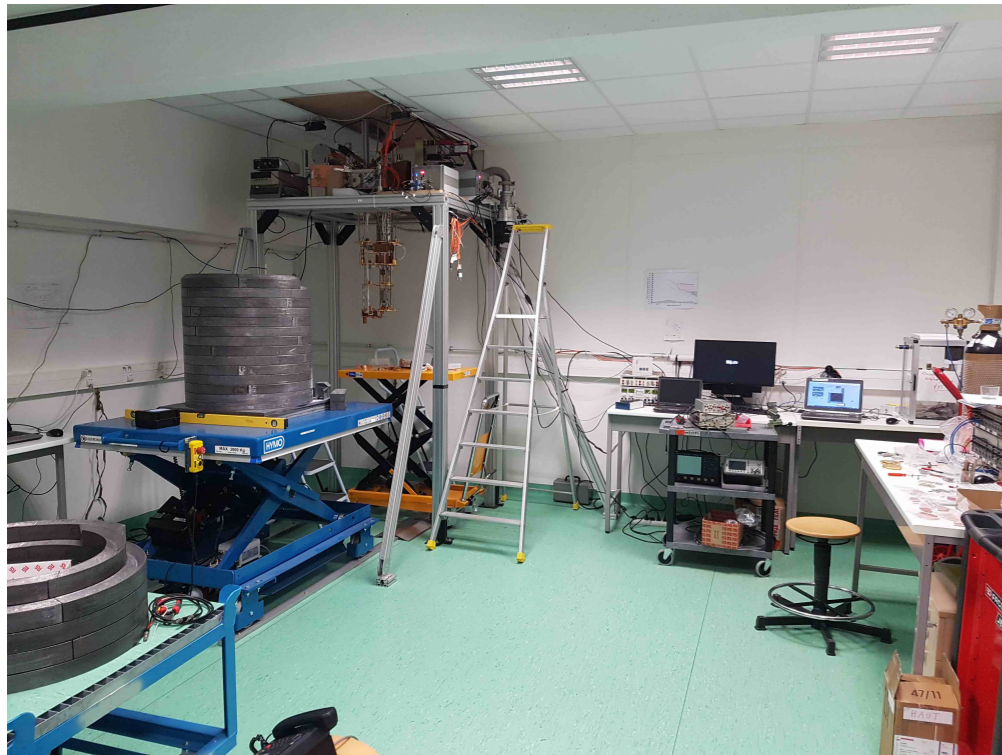


FID800 (EDELWEISS-III)
Ge ultra pur ($10^{10}/\text{cm}^3$)

Ge ou Si massif refroidi $< 100\text{mK}$

- ◆ **Double mesure chaleur et ionisation**
- ◆ **Identification de particule possible (recoil nucléaire - recoil électronique)**
 - **rejet du fond radioactif**
- ◆ « Shaping » possible du champ électrique appliqué par électrodes multiples
 - **rejet de certaine zone possible : ex surface**

Labo Cryo IP2I



Cryostat Dry dilution He3-He4

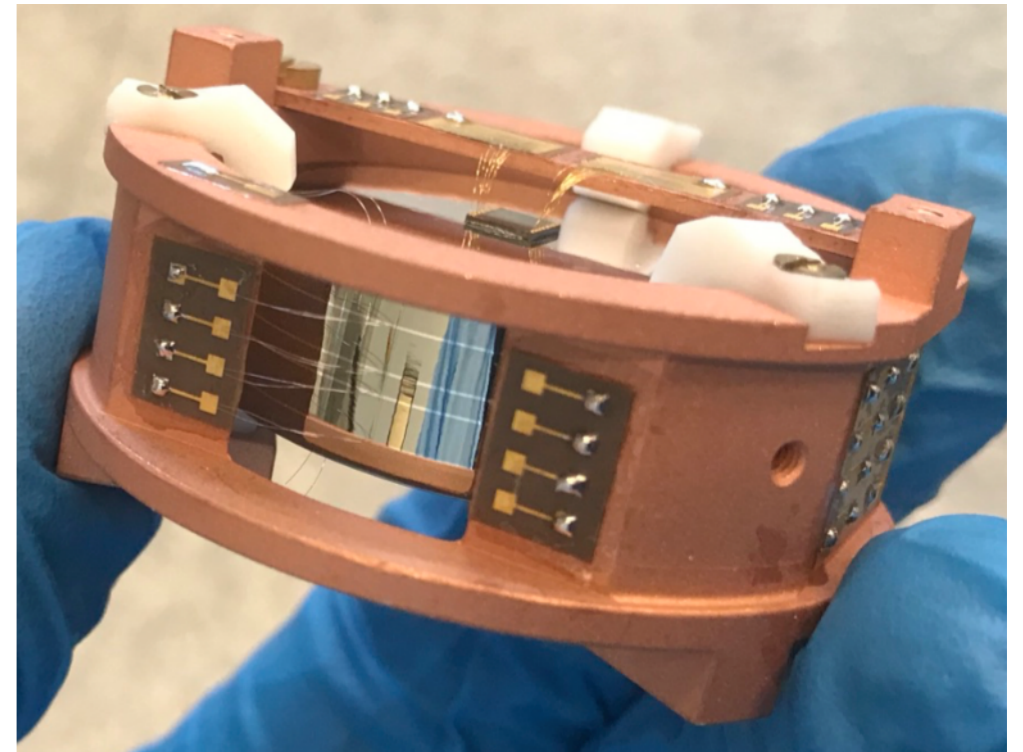
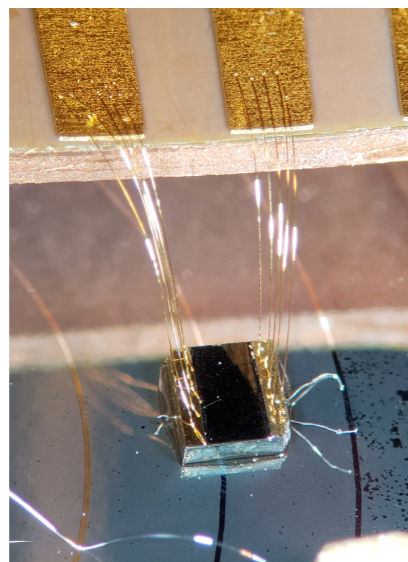
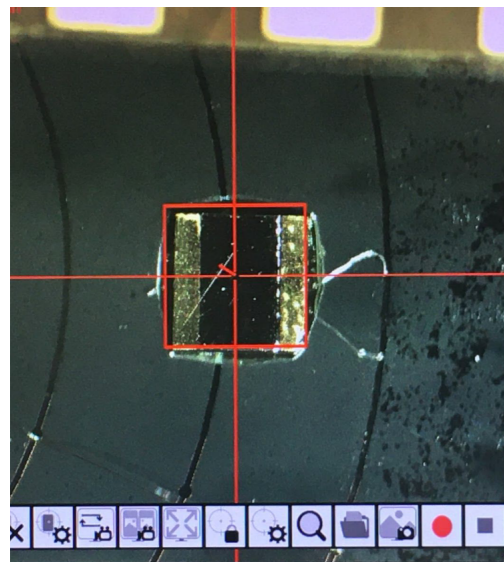
- ◆ 10 mK ss 48h
- ◆ $\Phi 30\text{cm} * h20\text{ cm}$ utile @ 10mK
- ◆ Etage 1K, 4K et 50 K pour elec. froide
- ◆ Blindage Pb 2 tonnes

Labo Cryo IP2I

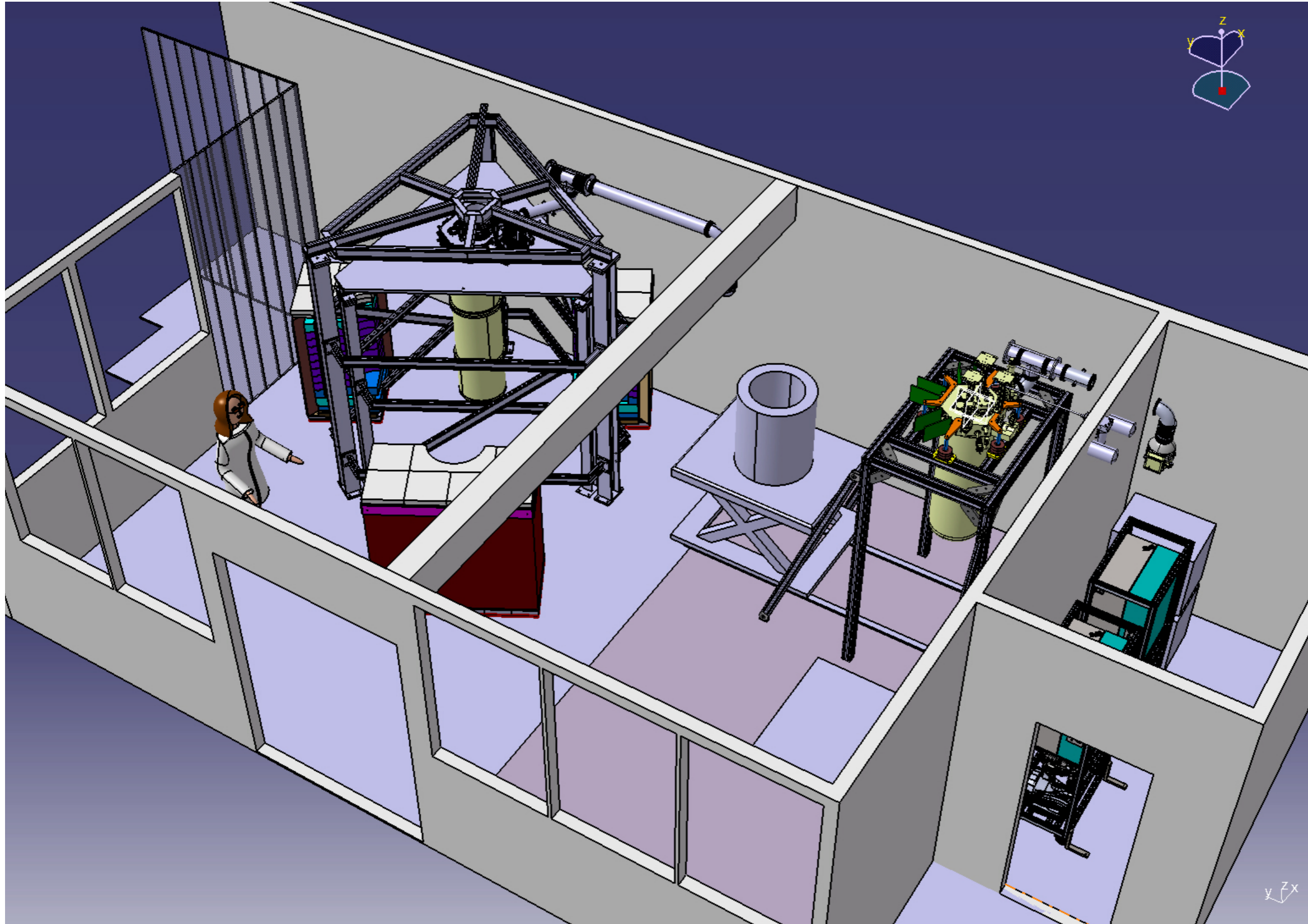


Salle propre d'intégration

- ◆ Micro-manipulateur
 - collage Ge-NTD, Resist.
- ◆ Wire Bounder
 - contact NTD et electrodes
- ◆ Stockage propre sous flux N2



Labo Cryo IP21

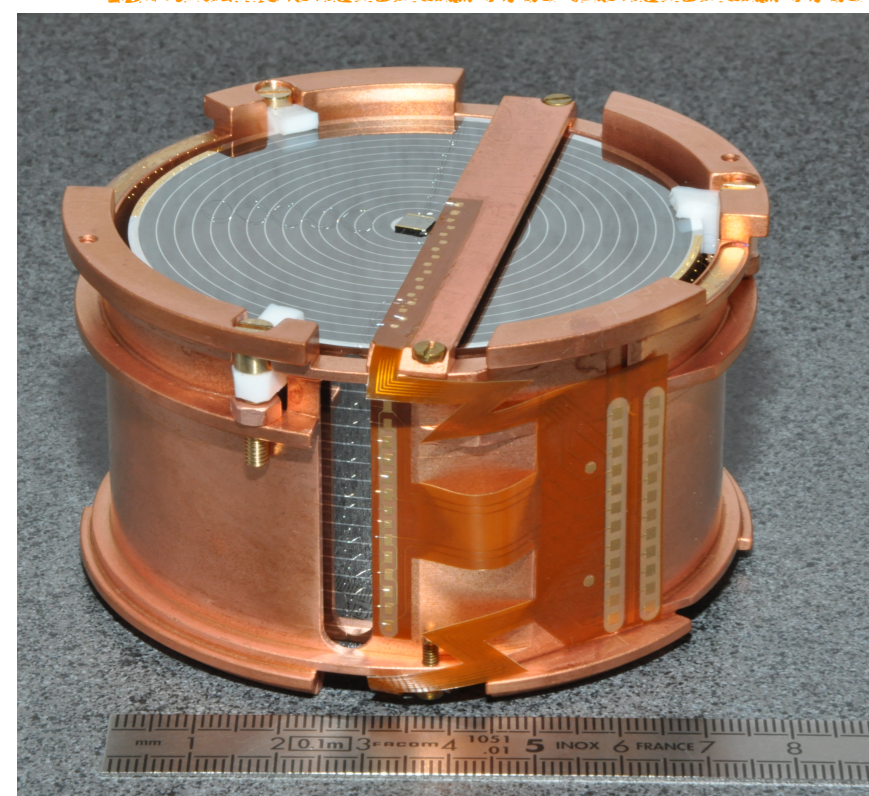


Bolomètre massif : R&D IP2I

Bolomètre massif : R&D IP2I Ge ionisation chaleur 2 développements principaux :

- ✦ « Crise » de la **Matière Noire** : aucun signe de détection directe + absence de nouvelle physique au LHC
 - ➔ « Fin » du WIMPs standard, Elargir la recherche (**EDELWEISS-SubGeV**)
- ✦ Recherche de nouvelle physique via mesure fine **CE ν NS (Coherent Elastic neutrino-nucleus scattering)**
 - ➔ pousser la discrimination à très bas seuil (**Ricochet**)
 - ➔ cf présentation Jules Colas sur cette optimisation

Ex. de réalisation : EDELWEISS-III



36 * FID-800

- ◆ **Ge 820 g**
- ◆ Thermomètres haute impédance Ge-NTD (cristal Ge dopé par neutron)
- ◆ 4 jeux d'électrodes Al pour collecte charge
 - Mesure simultanée **ionisation - chaleur**
 - Discrimination active du fond



INSTRUMENT (> 2013)

- ◆ **Cryostat 10mK** + 40 tonnes blindages PE + Pb @ LSM
- ◆ **3000 cables coaxés (6 km)**
- ◆ **350 transistors Si-FET @ 120K**
- ◆ 36*2 « Bolometers Boxes » @ 300K

Prospective R&D : Ricochet

Mesure de précision d'un signal connu !

IPNL, IJCLab, LPSC, I. Néel

- ◆ changement de philosophie après la Matière Noire
- ◆ **Mesure du CE ν NS pour ν de 5 MeV** (mesuré en 2018 @ 30 MeV)
- ◆ Cahier des charges « simple »
 - **1 kg Ge (27*38g)**
 - **20 eV ioni + 10eV chal**
- ◆ R&D en partie techno (transistor HEMT) et commune avec EDELWEISS



Réacteur 60 MW @ ILL / Grenoble

- ◆ Installation Ricochet prévue 2022-23
- ◆ **programme à ~ 5 ans**

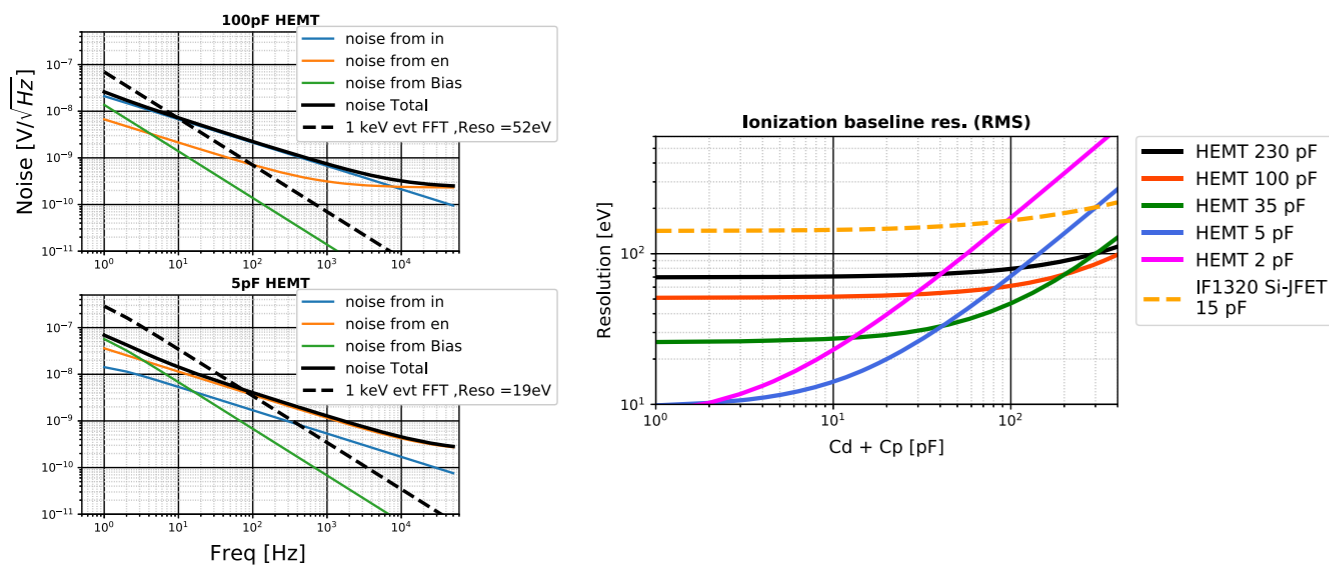


Fig. 5 *Left:* Contribution to the ionization resolution of the voltage noise, current noise, bias resistor (10 G Ω @ 20 mK). The total detector + cabling capacitance is 20 pF. 5 pF and 100 pF geometries have been studied. FFT of 1 keV event are shown. *Right:* Evolution of the resolution with the detector + cabling capacitance for the 5 HEMT geometries and the IF1320 Si-JFET from InterFET. Noise of the bias resistor is included. (Color figure online.)

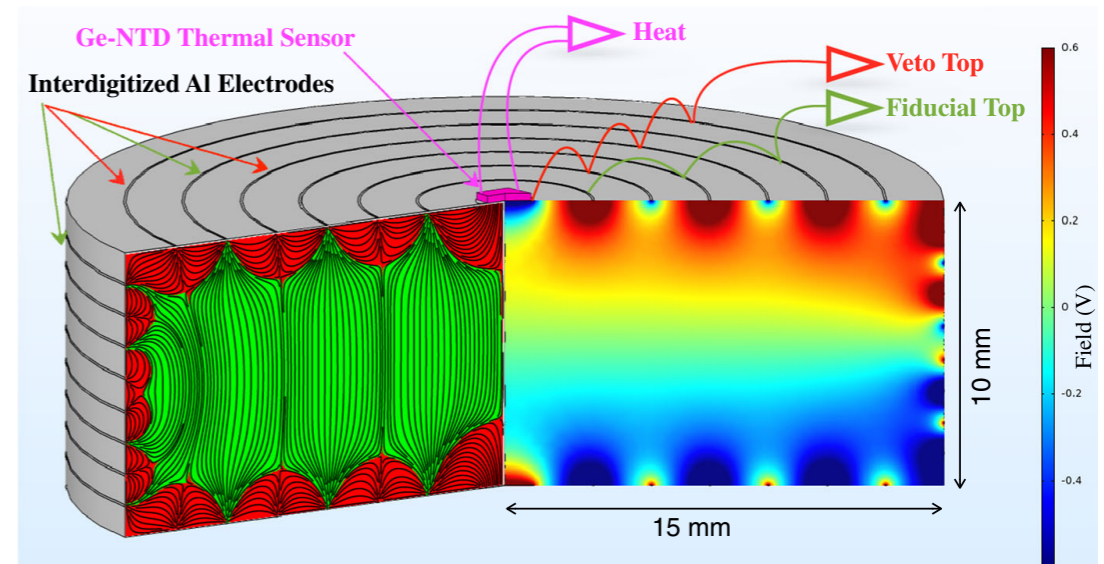
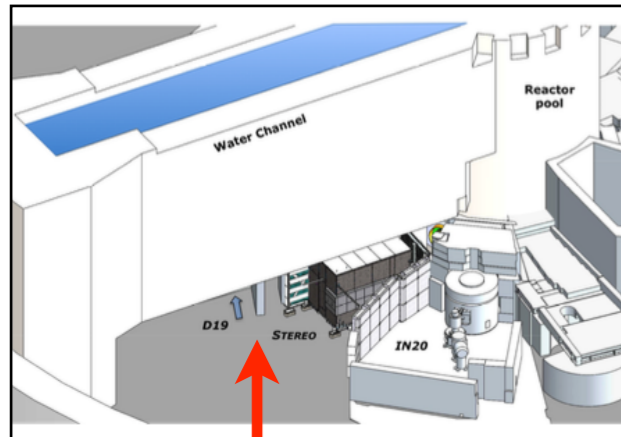
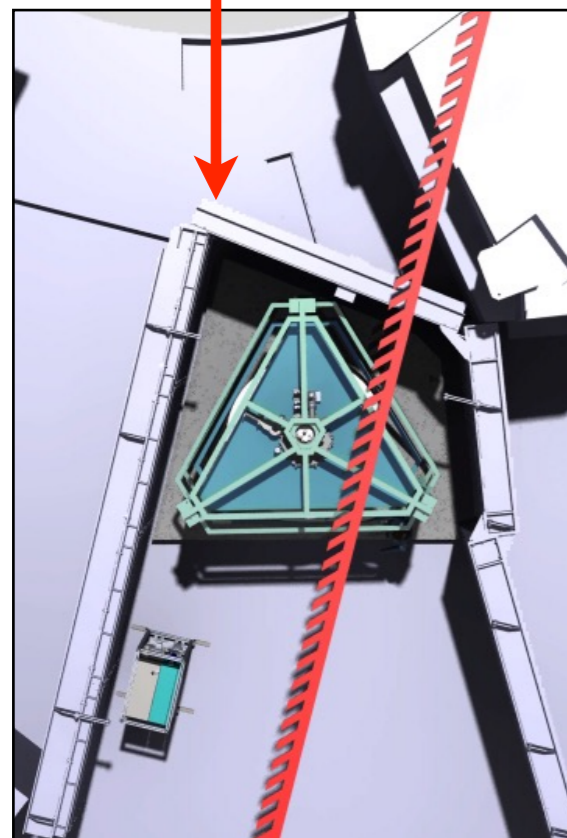


Fig. 6 Electrostatic simulation of a Full Inter-Digitized electrodes scheme on a 38 g germanium crystal ($\Phi = 30$ g, $h = 10$ mm). The crystal is surrounded at 2 mm distance by a chassis connected to the ground (not shown). The capacitance of the 4 electrodes with respect to the ground is about 20 pF (Color figure online.)

Ricochet @ ILL H7 : Basics of the proposed setup

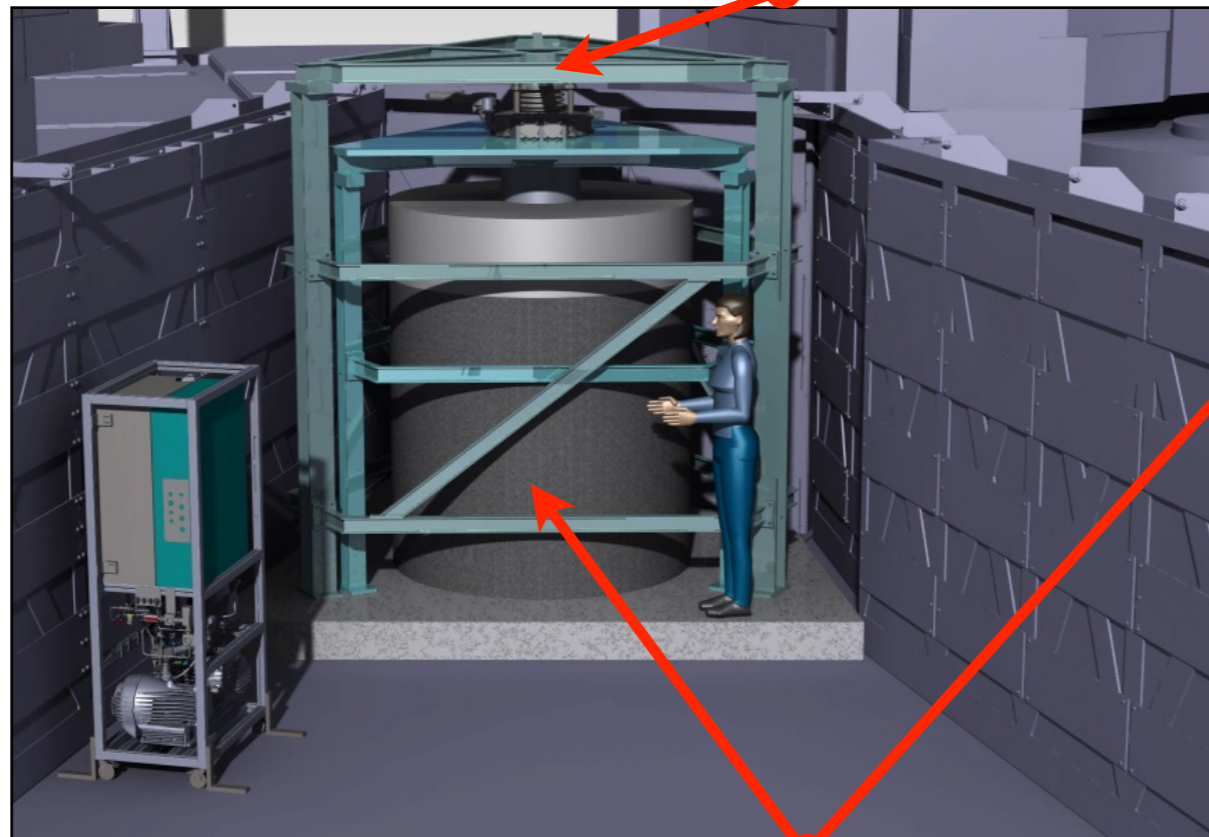


- H7 site :**
- currently Stereo exit
 - close to reactor core
 - water channel protection



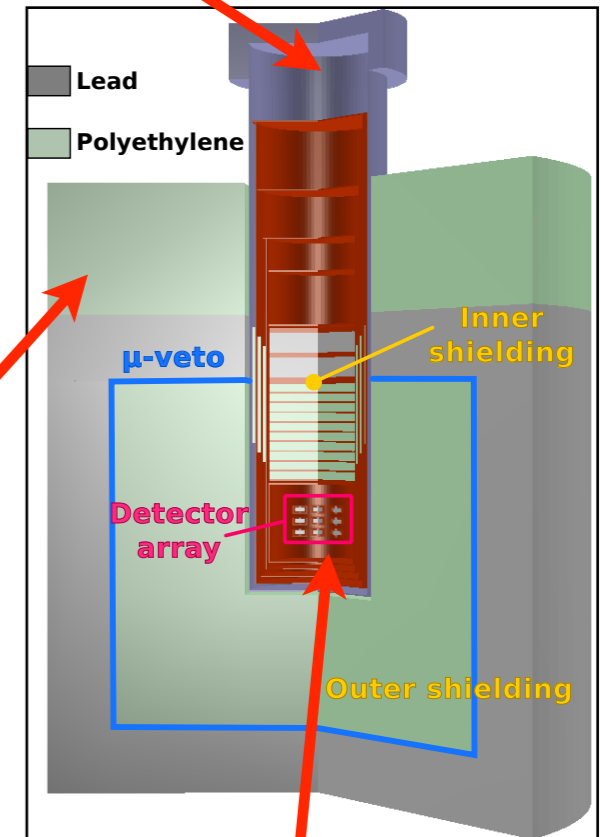
Ultra-low vibration He3/He4 dilution fridge :

- double frame structure
 - reaching 10 mK
 - Funded by JINR Dubna, will be delivered at IP2I by spring 2021
 - to be done : seismic and safety studies
- Help from ILL needed**



Active Muon Veto :

- Should be based on few cm-thick plastic scintillator
- Works ongoing to select the best solution
- No safety issues expected



Passive Shielding :

- PE + Lead : about 20 tons
- Geant4 model finalized
- General designed done
- Detailed mechanical arrangements & mechanical structure to be done

The CryoCube :

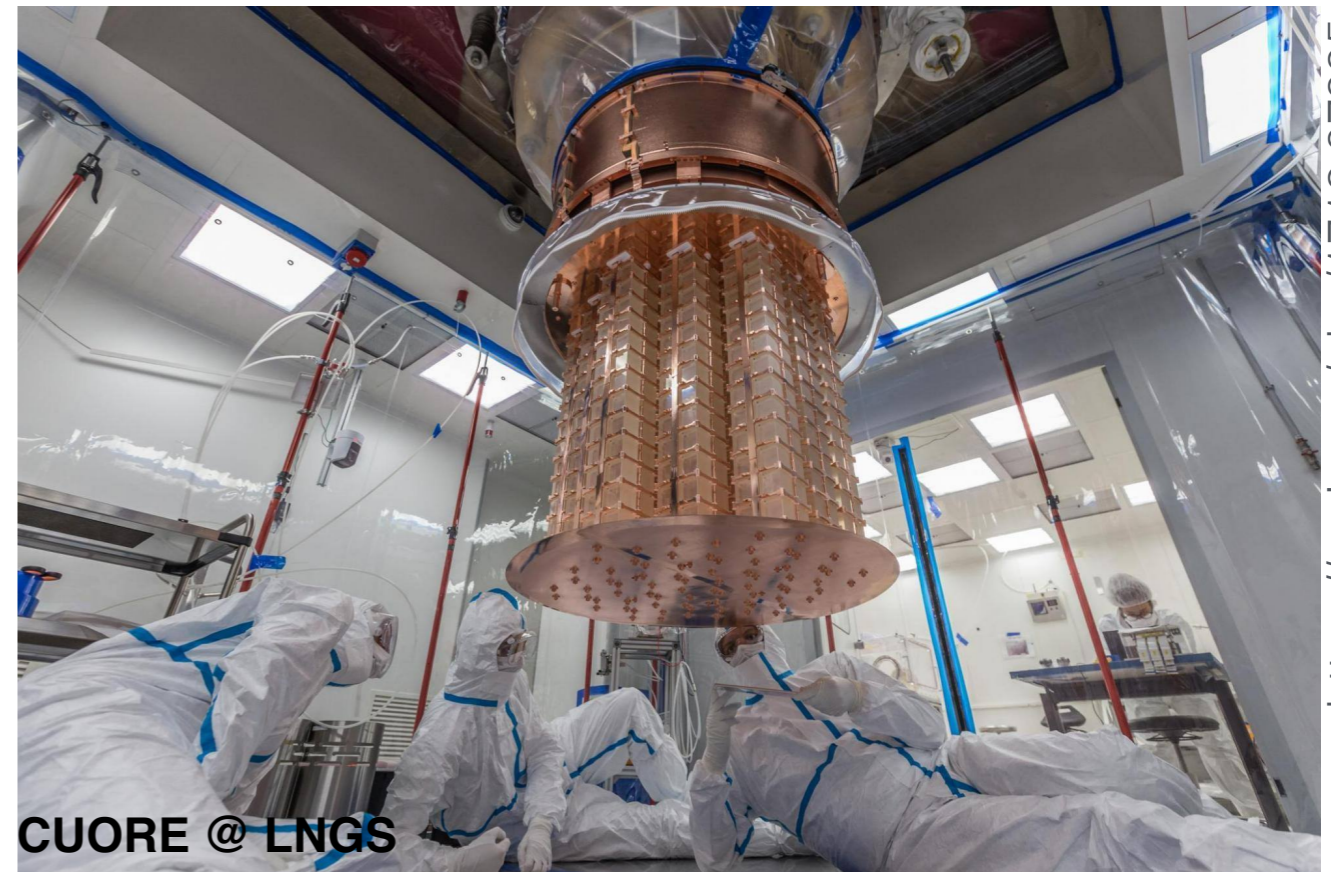
- Low threshold cryogenic detector
- Particule Identification
- Funding secured thanks to the ERC starting grant
- R&D ongoing, production to be started in 2022

Prospective R&D : CUPID

CUPID

CUORE Upgrade with Particle Identification

- ◆ 30 instituts, 100aines de personnes
- ◆ Long **processus de selection des R&D**
 - <https://arxiv.org/abs/1504.03612>
- ◆ R&D France (**CUPID-Mo**, **CSNSM-IP2I-LAL** + CEA) **sélectionnée comme base de CUPID**
 - <https://arxiv.org/abs/1907.09376>
- ◆ Projet CROSS
- ◆ Détails dans contribution au GT06
- ◆ **programme à ~10 ans**



<https://arxiv.org/abs/1712.07995>

Parameter	CUPID	CUPID-reach	CUPID-1T
Crystal	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$	$\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$
Detector mass (kg)	472	472	1871
^{100}Mo mass (kg)	253	253	1000
Energy resolution FWHM (keV)	5	5	5
Background index (counts/(keV kg y))	10^{-4}	2×10^{-5}	5×10^{-6}
Containment efficiency	79%	79%	79%
Selection efficiency	90%	90%	90%
Livetime (years)	10	10	10
Half-life exclusion sensitivity (90% C.L.)	1.5×10^{27} y	2.3×10^{27} y	9.2×10^{27} y
Half-life discovery sensitivity (3σ)	1.1×10^{27} y	2×10^{27} y	8×10^{27} y
exclusion sensitivity (90% C.L.)	10–17 meV	8.2–14 meV	4.1–6.8 meV
discovery sensitivity (3σ)	12–20 meV	8.8–15 meV	4.4–7.3 meV

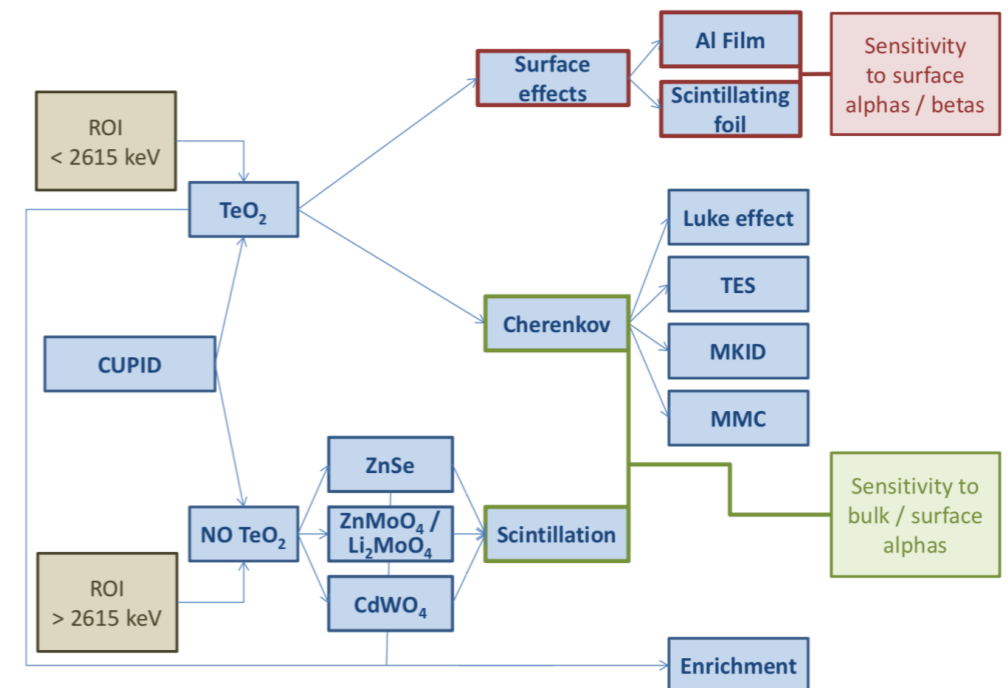


FIG. 1: Scheme of the R&D detector activities for CUPID

<https://arxiv.org/abs/1504.03612>

Prospective R&D : EDW-Sub GeV

« small is beautiful ! »

- ◆ Pas d'observation de WIMPs « standard » ($M > \text{qq GeV}$) avec des taux d'interactions $< 1 \text{ evt/tonne/an}$!
- ◆ Les détecteurs cryo ne sont plus compétitifs dans cette zone
- ◆ Intrinsèquement compétitif à basse masse (résolution et seuil)
- ◆ bonne nouvelle : si DM = Sub-GeV WIMPs il y en a donc beaucoup plus !
 - **1 kg de « bons » détecteurs est compétitif**
- ◆ Axion & ALPs : Reculs électroniques
 - ! fond parasite « chaleur seule »
- ◆ **Objectif R&D : IPNL IJCLab (+ CEA)**
 - Tenue en tension (courant fuite) pour « boost » effet Luke
 - Discrimination jusqu'à la **paire e-/h+ unique**
 - Changement de technologie elec. froid
 - ➔ Si-JFET ➔ **HEMT** (C2N/CNRS)
- ◆ **programme à ~ 5 ans**

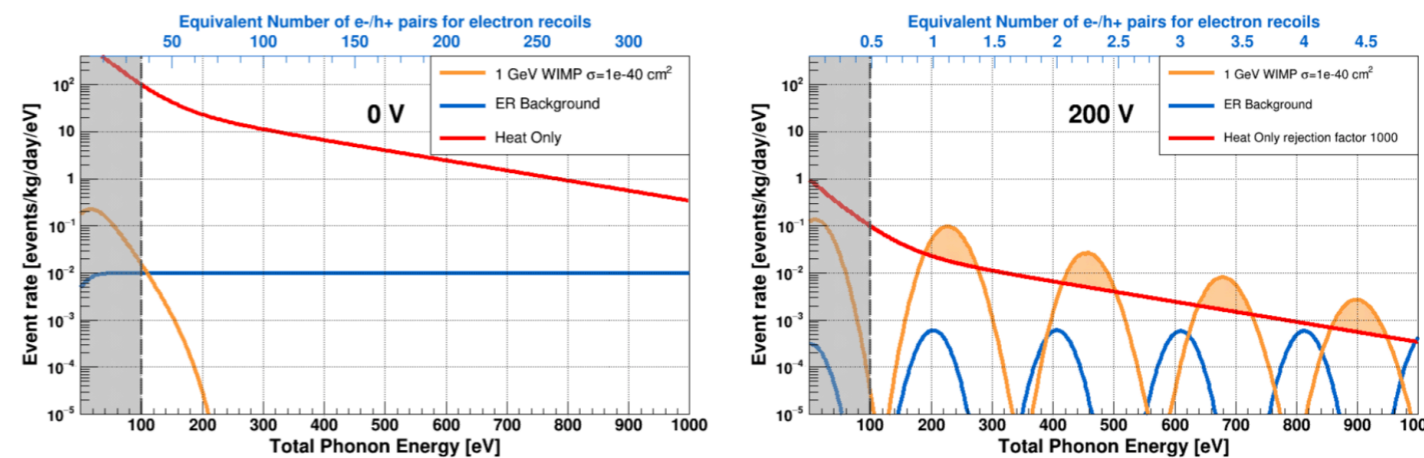
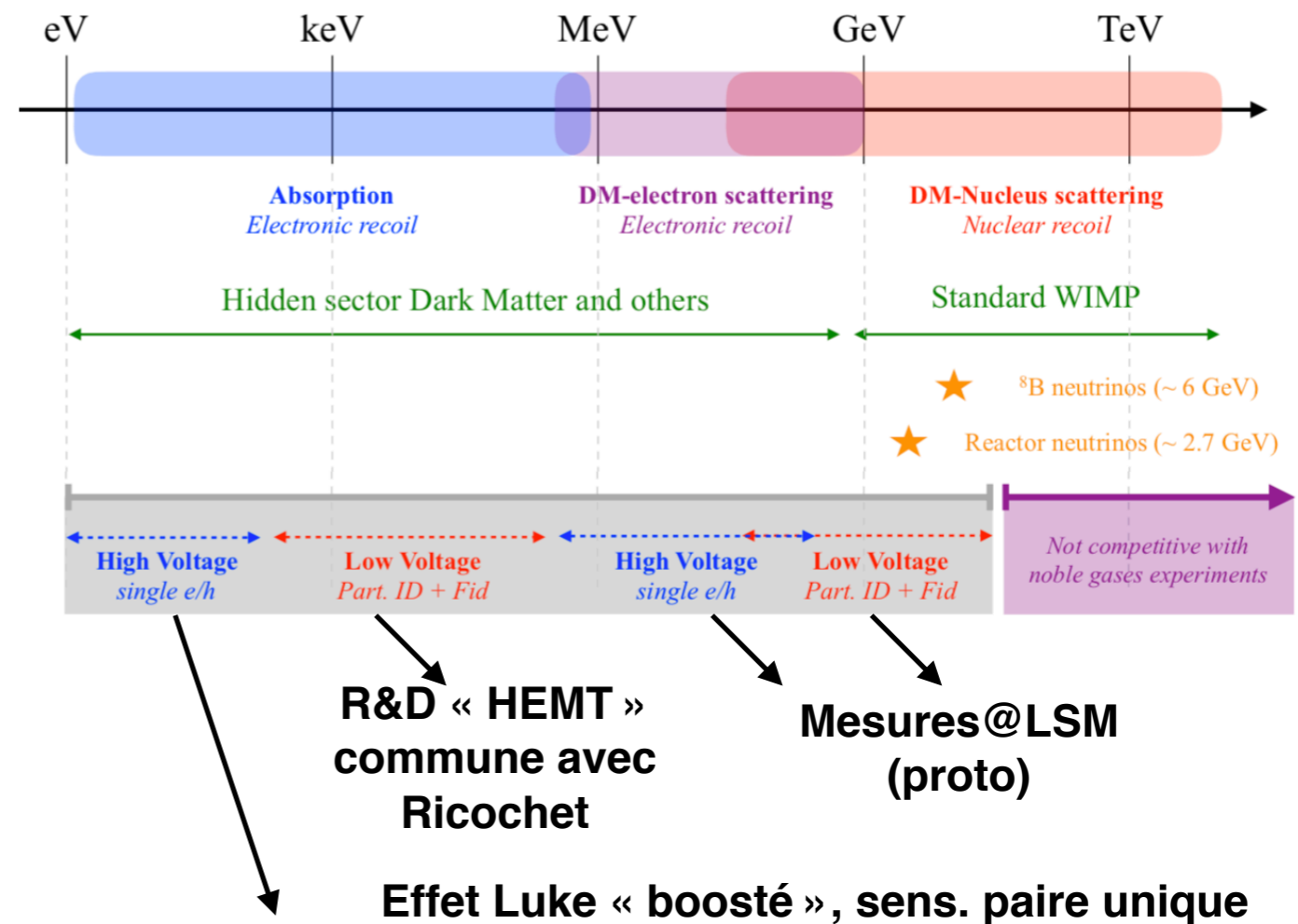


Figure 1: Response of the CRYOSEL detector operated at 0 V (left) and 200 V (right). Orange: expected NR signal for a 1 GeV WIMP with a scattering cross-section of 10^{-40} cm^2 . The blue and red lines correspond to the ER and heat-only backgrounds observed in EDELWEISS detectors. The shape of the NR response is sensitive to the actual quenching factor and straggling effects for this type of interaction. In right panel a rejection factor of 1000 is considered for HO events.