

Activités du Réseau Semi-conducteurs IN2P3 – IRFU

A.S. Torrentó

“Physique et détecteurs à la frontière”

22-24 juin 2021

Le Réseau Semi-conducteurs IN2P3 – IRFU



Journées thématiques

2013	Simulation IPN (Orsay), 60 participants.	https://indico.in2p3.fr/event/8900/
2014	Intégration de détecteurs. LAL (Orsay)	https://indico.in2p3.fr/event/11470/
2015	Électronique front-end associé aux détecteurs semi-conducteurs LPNHE (Paris), 50 participants.	https://indico.in2p3.fr/event/11595/
2016	Effet des irradiations dans les détecteurs semi-conducteurs LPNHE (Paris), 44 participants.	https://indico.in2p3.fr/event/13060/
2017	Fabrication de détecteurs semi-conducteurs. LPNHE (Paris), 53 participants.	https://indico.in2p3.fr/event/14663/
2018	Les détecteurs à pixel LPSC (Grenoble), 48 participants	https://lpsc-indico.in2p3.fr/event/1769/
2019	Les détecteurs rapides et leur électronique associée CPPM (Marseille), 48 participants	https://indico.in2p3.fr/event/18911/
2021	Méthodes de test orientées simulation IP2I (Lyon – visioconférence), 60 participants	https://indico.in2p3.fr/event/20627/

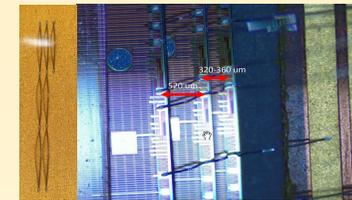
Vision générale

✧ Types de semi-conducteurs / détecteurs

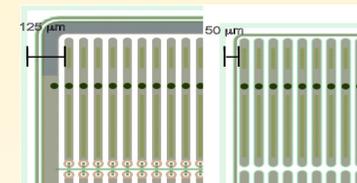
- ✧ Silicium: Barrière de surface, SiLi, localisation (surface résistive, strips, pixel), avalanche (LGAD, SPAD, SiPM), PiN, MAPS, SSD, DEPFET, BMJ
- ✧ Germanium: monobloc, segmenté
- ✧ Diamant: pad, segmenté
- ✧ SiC
- ✧ CdTe, HgCdTe, InGaAs, GaN, InP

✧ Domaines d'utilisation

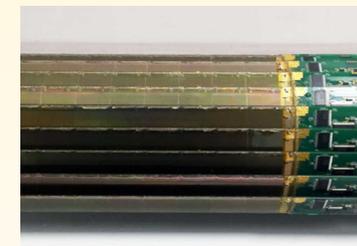
- ✧ Physique de particules, Physique nucléaire, Astroparticules
- ✧ Astrophysique spatiale
- ✧ Physique médicale
- ✧ Études avec radiation synchrotron
- ✧ Détection dans conditions extrêmes (centrales nucléaires)
- ✧ Industrie



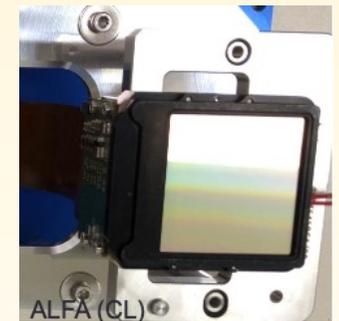
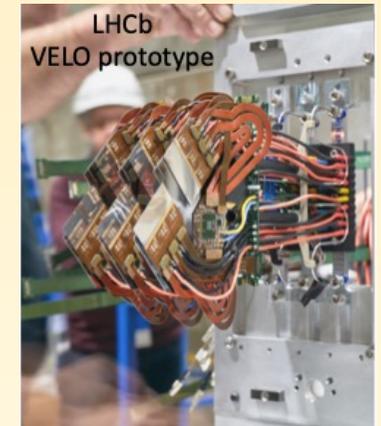
Stitchy bonding



Active edge (ATLAS)



STAR – PXL



Expertises

Fabrication de détecteurs
 Maintenance détecteurs / " petits équipements"
 Bonding et autres équipements spécifiques
 Intégration mécanique (CAO ou atelier)
 Conception/routage de PCB spécifiques
 Conception/dével. d'électronique
 Simulations (GEANT 4, modélisation de lecture
 Simulation TCAD
 Tolérance aux radiations : modélisation, signal)
 Tolérance aux radiations : simulations
 Machines d'inspection : mesures
 Conception DAQ grand nombre de voies (>100)
 Traitement du signal (numérique/modélisation)
 Test et caractérisation
 Analyse de données

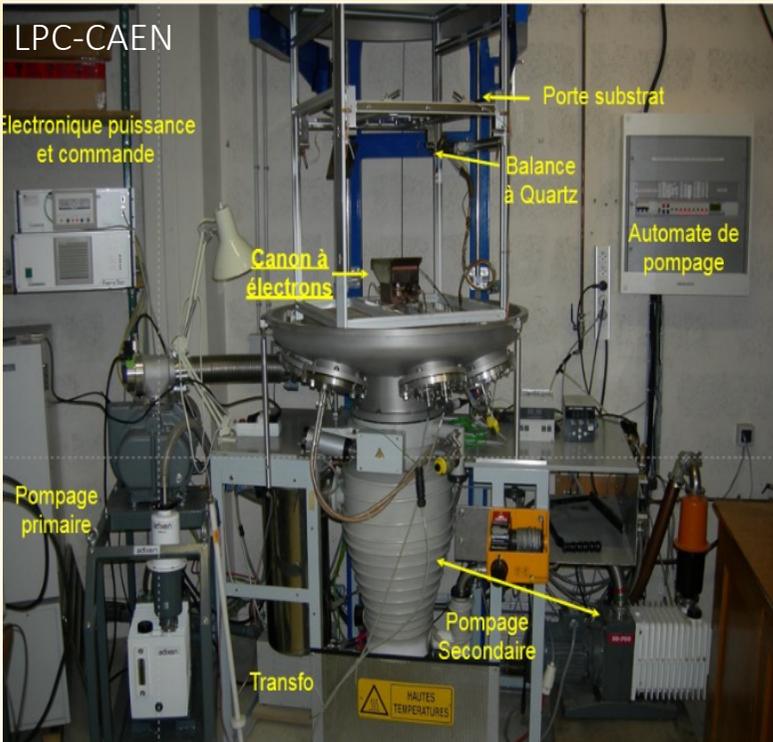
Laboratoire	Technologies																			
APC	Si (DSSD), Ge																			
CEA-IRFU/DAP	CdTe, HgCdTe, Si:As (IR), DEPFET, pnCCD, Si (SDD, DSSD)																			
CEA-IRFU/DEDIP	Si (DSSD), Ge																			
CENBG	CdTe, CMOS (pixel), SDD																			
CPPM	Si, CdTe, HVCMOS, MAPS																			
GANIL	Si, HPGe spectroscopie																			
IJCLab	Ge/Bolomètres, DAQ, Si (DSSD, pixel)																			
IM2NP	SiC																			
INL	CMOS BMJ, SPAD, GaN, GaP, InP																			
IPHC	Si, CMOS, MAPS, Ge, diamant																			
IP2I	CdTe, Ge/Bolomètres																			
LAPP	Si																			
LLR	SiPM, PIN																			
LPC CAEN	Si, Diamant																			
LPNHE	Si (Pixel, LGAD), CCD, PIN																			
LPSC	Diamant, Si(Pixel)																			
SOLEIL	Si (pixel), CMOS, MAPS, Ge																			
SUBATECH	Si																			

Moyens

Équipement	# Labos	Équipement	# Labos	Équipement	# Labos
Salle blanche	7	SIMS	1	Salle de chimie	5
Station sous pointes	6	Faisceau pour irradiation/implantation/analysis	3	Evaporateurs (Al, Au, SnO2, Li, Ti, Pt, Fe, Cr,...)	5
Sourcemeters/PAmperem/RLC/VNA	7	Diffraction X	3	Scie/foret diamantés	4
Keithley 4200/Agilent B1505A IV CV	7	Microscope numérique	4	Polisseuse	4
Spectroscopie DLTS/DLOS	1	Microscope confocal	4	Étuves	3
Chaîne spectroscopique analogique	5	Microscope de mesure	4	Four SiC recuit post-implantation	1
ACQ numerique	2	Binoculaire	5	Machine de wire-bond	6
Banc test caracterisation optique CCD	2	Microscope force atomique	1	Machine pull-test	2
Banc test laser	4	Machine de métrologie	2	Sérigraphie/depose de composants	1
Mesures optiques/electro-optiques	1	Projecteur de profile	1	Machine de placement	2
Mesures electro-mécaniques	1	Profilometre	2	Machine a graver	1
Regeneration Ge	2	Camera thermique IR	4	Machine collage/resinage a froid	1
Installation Cryogenique pour Ge	4	Enceinte climatique	4	Chassis d'insolation	1
Table scan pour Ge	1	Stockage sous azote/T_RH controllees	4	Fraiseuse prototypage PCB	1
Générateur de rayons X	1			Four de refusion a phase vapeur	1
				Equipement de réparation bga / tqfp	2
				Robot collage	1
				Inspection visuelle	1

Moyens fabrication / maintenance

LPC-CAEN



Electronique puissance et commande

Porte substrat

Balance à Quartz

Automate de pompage

Canon à électrons

Pompage primaire

Pompage Secondaire

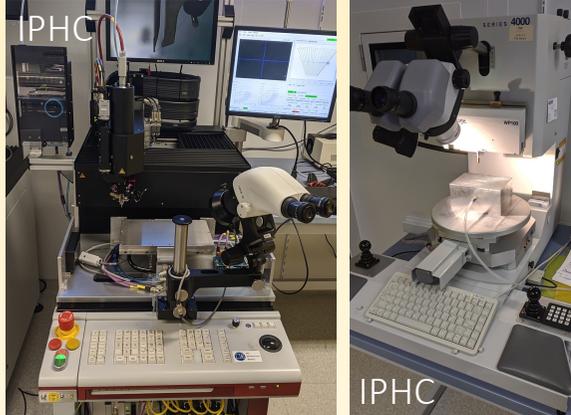
Transfo

HAUTES TEMPERATURES

Évaporateurs de couches minces (thermiques, canon électrons): Al, Au, Li, SnO₂, Ti, Pt, Fe, Cr

22 juin 2021

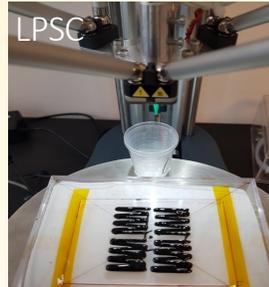
IPHC



IPHC

Bonding et pull-tester

LPSC



Robot collage

Réseau Semi-conducteurs. A. Torrentó.



VEGATEC

imenp

Four pour recuit post-implantation spécifique au SiC

IJCLab



Banc pompage-recuit HPGe

6

Moyens métrologie

IJCLab



Microscope numérique

LPSC



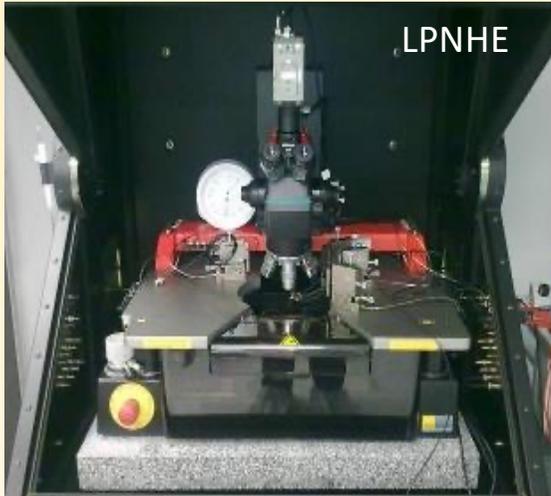
Machine de métrologie

INL

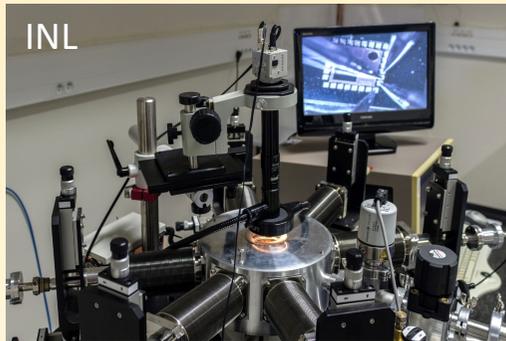


Microscope force atomique

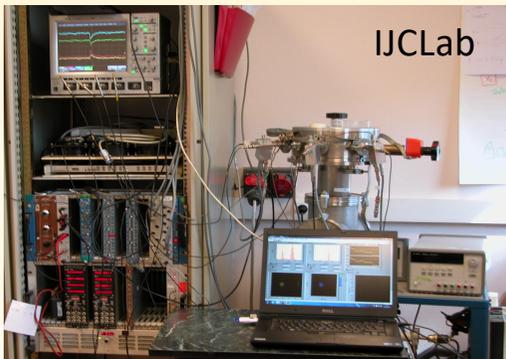
Moyens test



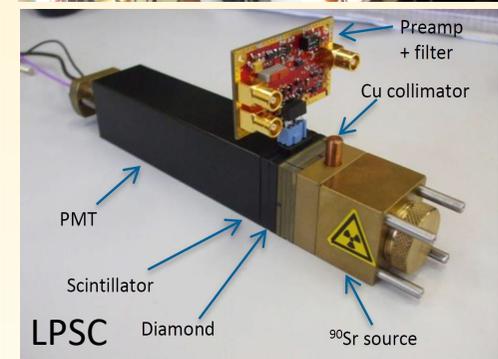
Station sous pointes:
I-V, C-V, DLTS, DLOS, VNA



Station sous pointes cryogénique

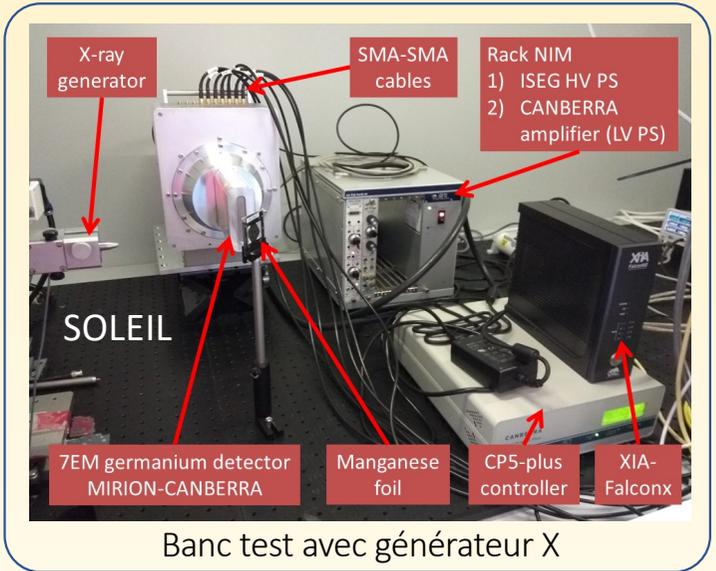
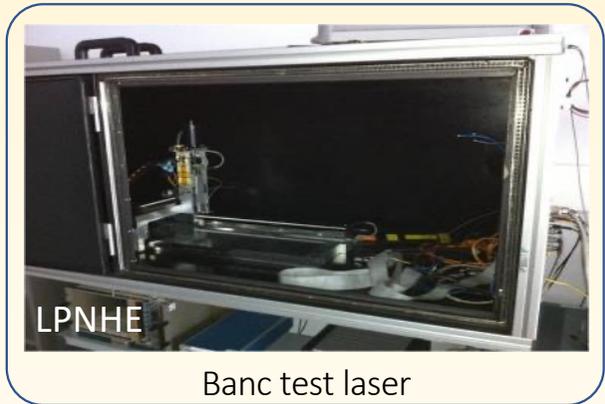
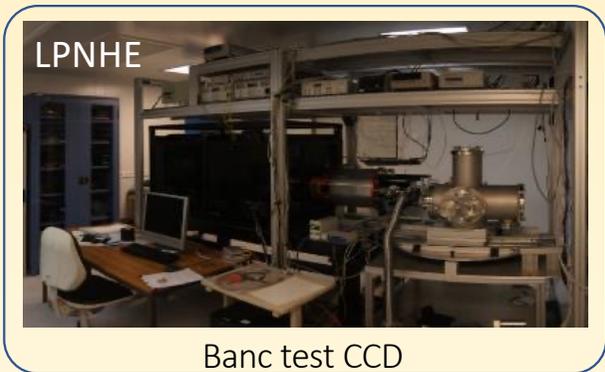
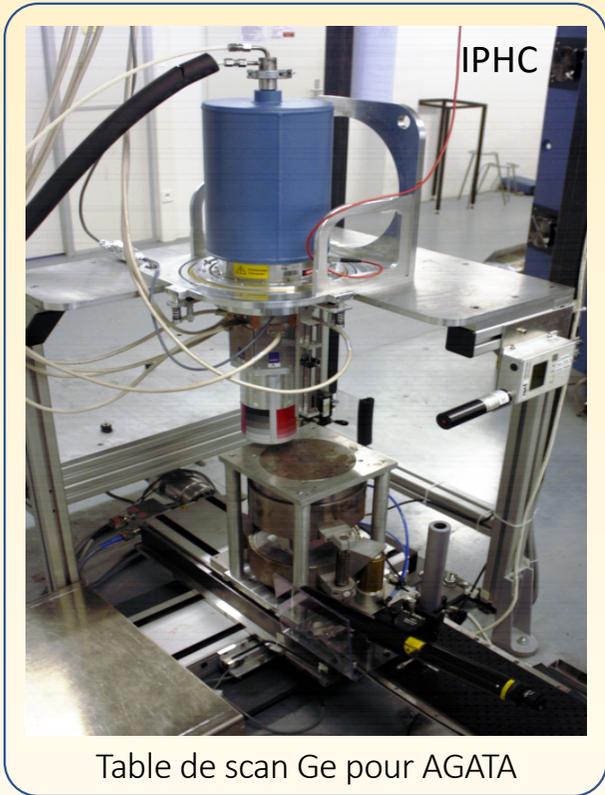


Chaîne spectroscopique analogique



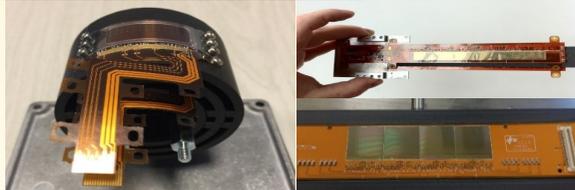
Banc test beta

Moyens test



Moyens test

- * Regroupement des équipements dédiées à un type de détecteur avec statut de plateforme/plateau technique



Centre de Compétences de Capteurs CMOS à Pixels Intégrés (C4Pi) (IPHC)



Plateau Technique IR (CPPM)



Plateforme Captinov (IJCLab)

Utilisation de plateformes

Irradiation/implantation/caractérisation	
	Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine (Gradignan)
	Accélérateur pour la Recherche en Radiochimie et Oncologie à Nantes Atlantique
	Centre Antoine Lacassagne: Institut Méditerranéen de ProtonThérapie (Nice)
	Irradiation gamma avec source de ^{60}Co (CEA-Saclay)
	Cyclotron pour la REcherChe et l'Enseignement (IPHC)
	European Synchrotron Radiation Facility (Grenoble)
	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (Caen)
	Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation – Synthesis & Characterization using ion Accelerators for Pluridisciplinary Research (IJCLab, CEA-Saclay)
	Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses (Palaiseau)
	NanoLyon: Pôle de Nanocaractérisation
	Plateforme d'ANalyse et de cAractérisation de Matériau pour les Accélérateurs (IJCLab)
	Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE (Gif-sur-Yvette)
	Accélérateur Linéaire et Tandem à Orsay
Fabrication	
	Centre for Nanosciences and Nanotechnologies (Palaiseau)
	Institut Néel, NanoFab (Grenoble)
	NanoLyon: Centrale de Micro-Nano-Fabrication

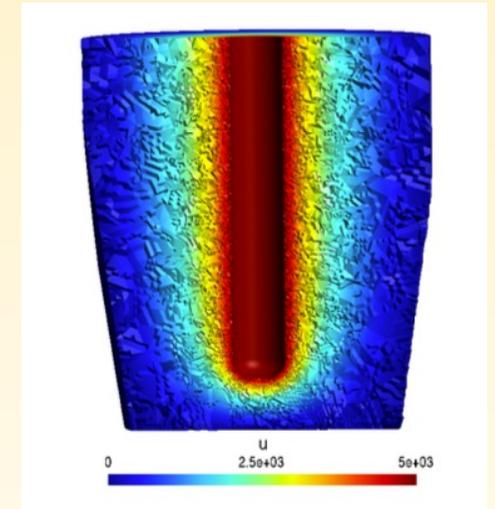
Moyens simulation

* Commerciales :

- ☆ TCAD Synopsys – Sentaurus (license dans chaque laboratoire via Europractice) : semi-conducteur
- ☆ TCAD Silvaco – ATLAS (5 jetons 2D et 5 jetons 3D disponibles au Centre de Calcul de Lyon) : semi-conducteur
- ☆ TCAD COMSOL Multiphysics : champ électrique, semi-conducteur
- ☆ TCAD SIMION : champ électrique
- ☆ MATLAB : transport signaux

* Non commerciales :

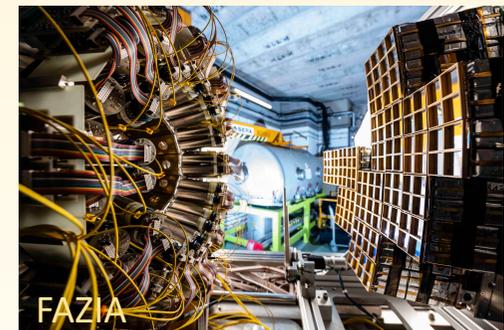
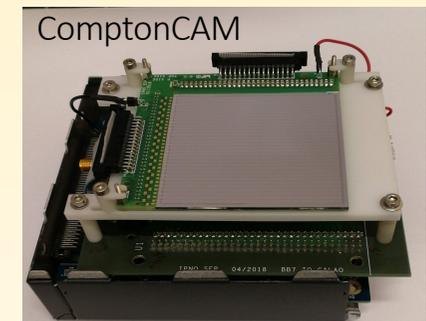
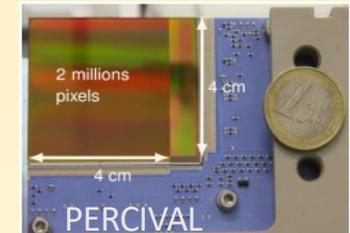
- ☆ Agata Detector Library (ADL) (développé par la collaboration AGATA)
- ☆ AllPix2 (développé au CERN)
- ☆ Kaliveda (développé par la collaboration FAZIA)
- * GEANT4, SRIM, TRIM pour le dépôt d'énergie des particules dans les détecteurs



Champ électrique AGATA

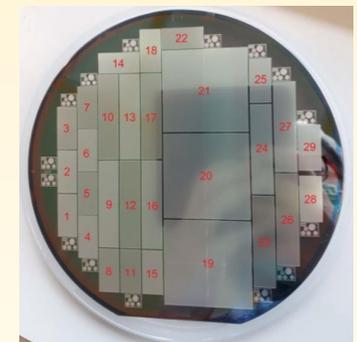
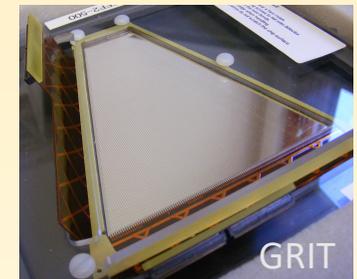
Activités Silicium

- ✧ Le silicium est largement utilisé: bonne maîtrise de la technologie, résolution en énergie et temporelle bonnes, recouvrement des grandes surfaces pour un prix raisonnable
- ✧ Laboratoires impliqués : APC, CEA-IRFU-DAP, CEA-IRFU-DEDIP, CPPM, IJCLab, INL, IPHC, LAPP, LPC-CAEN, LPNHE, LPSC, SOLEIL, SUBATECH
- ✧ Expertises : conception, caractérisation, simulation, intégration
- ✧ Domaines :
 - ✧ Particules : ATLAS, CMS, ALICE, LHCb, EIC-Roman Pot, ILC-CALICE, BELLE-II, FCC, STAR-PXL
 - ✧ Nucléaire : GRIT, FAZIA, SIRIUS
 - ✧ Astroparticules : ComCube, TRISTAN
 - ✧ Industrie Nucléaire : ComptonCAM (caméra gamma démantèlement)
 - ✧ Médical : détection X pour diagnostique, télescope neutrons en salle de traitement
 - ✧ Imagerie sources X : PERCIVAL, UFXC
 - ✧ Spatiale : SVOM, eXTP



Statut silicium

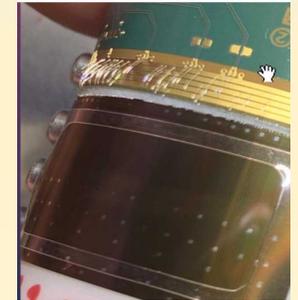
- * En général, on va vers des performances plus poussées: meilleure résolution, plus de granularité, plus rapides, meilleur recouvrement des surfaces de détection, plus résistants aux radiations, faible niveau de matière.
- * Étroite collaboration avec équipes d'électronique pour développement de l'électronique de lecture
- * En Physique des Particules :
 - * Fabrication silicium chez les fonderies, collaboration avec elles pour les nouveaux développements
 - * Prépondérance des technologies planaires hybrides, active-edge pour un meilleur recouvrement
 - * Résistance aux radiations : technologie n on p pour planaires, monolithiques
- * En Physique Nucléaire :
 - * La fabrication ne se fait plus dans les laboratoires, maintenant les détecteurs sont achetés dans le commerce; technologies "classiques", nouveaux designs géométriques pour augmenter le recouvrement
 - * Augmentation du nombre de voies d'acquisition, gestion du flux des données
 - * Analyse de la forme des signaux pour faire l'identification des particules et la localisation (précision sub-pixel)
 - * Recouvrement 4π autour du point de réaction : intégration
- * En Imagerie X pour applications synchrotron :
 - * Développement en collaboration avec des équipes de recherche ou adaptation des solutions commerciales



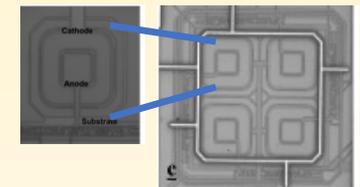
RD53A upgrade
ATLAS, CMS

Statut R&D silicium

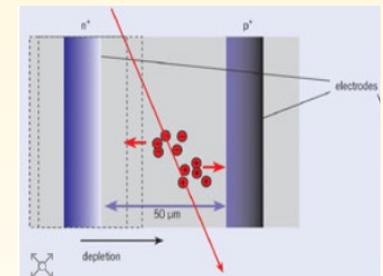
- * **MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor)** : nouveaux capteurs de rayonnements intégrant des microcircuits de traitement, technologie 3D en cours de développement (amélioration des performances, résistance aux radiations)
 - * HV-CMOS, CMOS Pixel sensors (CPS), DeMAPs, aminci et courbé (ALICE)
 - * Déjà utilisée (p. ex. STAR-PXL au RHIC), est prévu pour plusieurs projets (MIMOSIS, BELLE-2, ALICE,...)
- * **SPAD (Single Photon Avalanche Diode)** : détection photon unique < 1 ns, nombreuses applications possibles (particules, ToF pour télémétrie, vision 3D; fluorescence)
 - * SPAD intégré en technologie STMicroelectronics CMOS 28nm FDSOI: amélioration des performances
 - * 3D-SiCAD, SPADs alignés verticalement pour détection en coïncidence: solution pour assemblage 3D
- * À ma connaissance, pas de R&D *détecteur* sur :
 - * LGAD (Low Gain Avalanche Diode, couplage DC ou AC) : résolution en temps ~ 50 ps
On fait plutôt du développement d'électronique de front-end
 - * Senseurs 3D (jonction en profondeur) : rapides, résistants aux radiations
- * Activité R&D menée en parallèle aux grandes productions... parfois pas évident



Bonding CMOS
50 μ m courbé



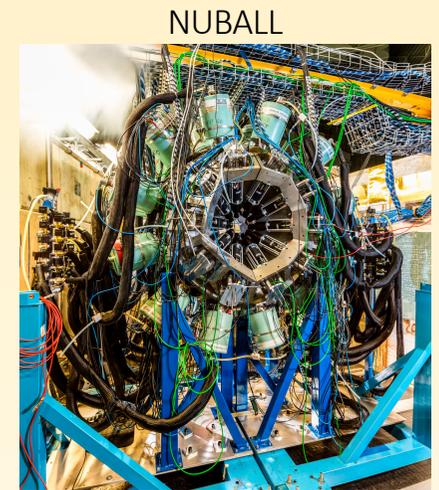
Matrice 2x2 3D-SiCAD



Senseur 3D

Activités Germanium

- * Les détecteurs Ge s'utilisent pour une meilleure résolution en la mesure de l'énergie car le gap est plus petit que dans le Si, mais utilisation à températures cryogéniques
- * Laboratoires impliqués : APC, GANIL, IJCLab, IPHC, IP2I, SOLEIL
- * Expertises : maintenance, caractérisation, simulation, intégration
- * Domaines :
 - * Spectroscopie gamma pour physique nucléaire
 - ▶ EXOGAM, ORGAM, EUROBALL, NUBALL, MINORCA (monobloc, un électrode)
 - ▶ AGATA (monobloc, électrodes segmentés)
 - ▶ French-UK Loan Pool
 - * Spectroscopie X synchrotron (planaire avec électrodes segmentées)

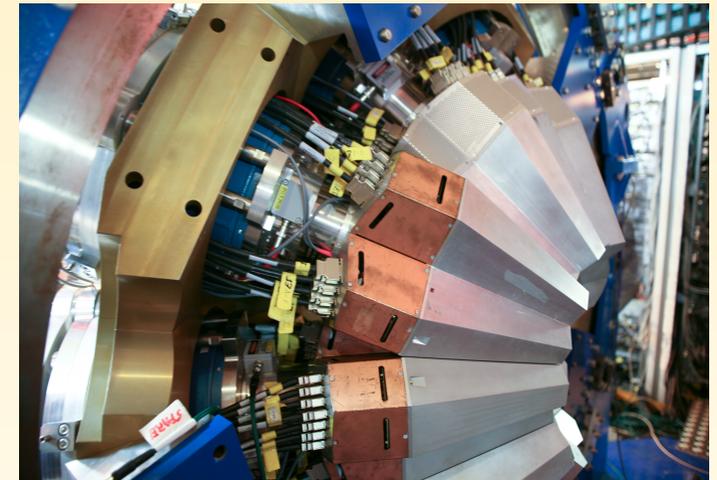


Spectroscopie X
synchrotron

Statut Germanium

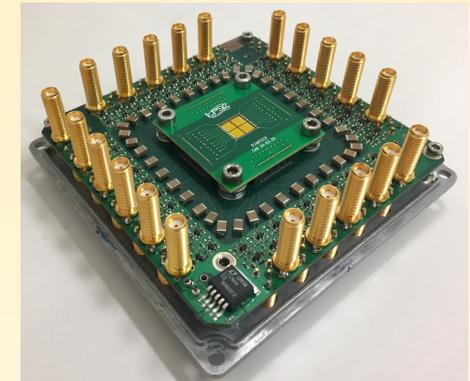
- ✧ Fabrication dans l'industrie, seulement deux fournisseurs, Mirion (mergé avec Canberra en 2016) et ORTEC, est c'est très chère!
 - ✧ Laboratoire pour fabrication de Ge à Jülich en cours de demantèlement (?)
- ✧ Le secret industriel empêche d'avoir les informations nécessaires pour la bonne compréhension / simulation des détecteurs
 - ✧ Développement des tables de scan AGATA : imagerie de surface et scans en volume
- ✧ **Développements:**
 - ✧ R&D sur détecteurs coaxiaux segmentés de type p, passivation
 - ✧ R&D de nouvelles géométries pour amélioration de la résolution spatiale et de l'efficacité de détection
 - ✧ Électronique de lecture
 - ✧ Machine learning pour l'analyse des données

AGATA

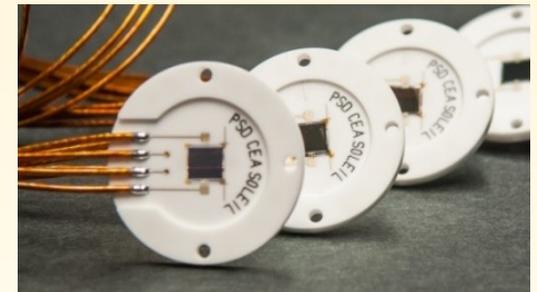


Activités diamant

- ✧ Développement des détecteurs diamant : plus résistant aux radiations que le silicium (gap plus grand), réponse rapide, bas bruit
- ✧ Laboratoires impliqués : LPSC, IPHC, IP2I, SOLEIL, SUBATECH
- ✧ Expertises : fabrication, caractérisation, simulation, intégration
- ✧ Domaines :
 - ✧ Physique médicale :
 - Moniteur faisceau pour hadronthérapie (CLaRys UFT, TIARA)
 - Moniteur faisceau pulsé pour radiothérapie “flash” proton (DIAMMONI)
 - Imagerie portale Micro Beam Radiation Therapy ESRF ligne médicale ID17 (DIAMTECH – IDSYNCHRO)
 - ✧ Physique Nucléaire : télescope $\Delta E-E$ (DIAMTECH – DIATEL)
 - ✧ Synchrotron : moniteur faisceau rayons X (xBMP)



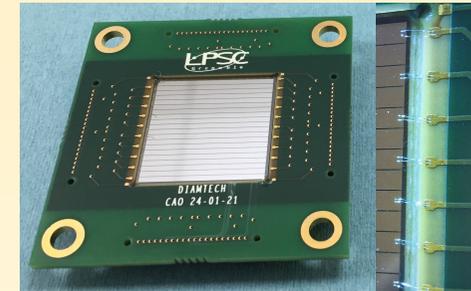
CLaRys



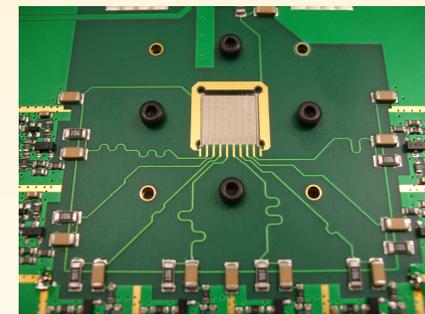
xBMP

Statut diamant

- ✧ Fabrication des cristaux avec un taux de défauts acceptable (qui permet son utilisation comme détecteur) développée dans les instituts de recherche
- ✧ Maintenant cette technologie est accessible chez les industriels
- ✧ **Développements :**
 - ✧ Capteurs scCVD ou monolithiques pcCVD
 - ✧ Différentes géométries: pixels, matrice
 - ✧ Améliorer la résolution en énergie et temporelle, et la granularité
 - ✧ Électronique de lecture résistante aux radiations, traitement signaux pour imagerie



DIAMTECH polycristallin

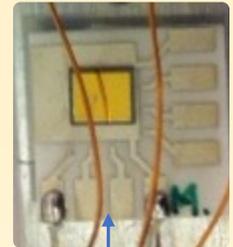


Diamant monocristallin

Activités / Statut SiC

- * Le SiC possède un grand gap qui permet son utilisation dans des environnements avec forte irradiation et hautes températures
- * Laboratoires impliqués : IM2NP
- * Expertises : fabrication, caractérisation, intégration
- * Domaines :
 - * Détection neutrons rapides (monitoring réacteurs nucléaires, géophysique, médical, sciences matériaux, sécurité, spatiale)
 - * Spatial: photodiodes UV
- * Développements :
 - * Linéarité des détecteurs de neutrons sur plusieurs décades de flux
 - * Amélioration de la résolution avec le flux de neutrons
 - * Stabilité des caractéristiques à 500°C

Diode 4H-SiC

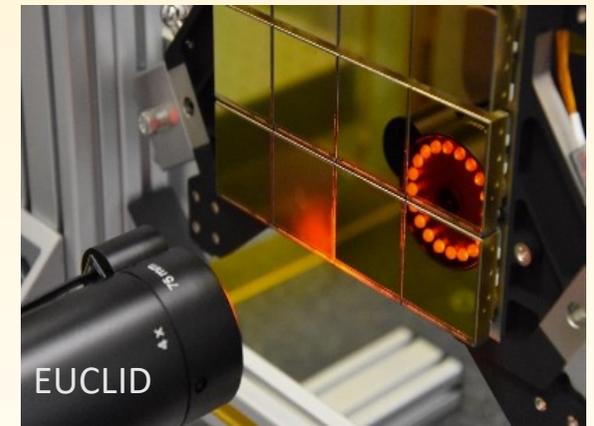


Activités / Statut CdTe, HgCdTe, InGaAs

- * Matériaux SC avec grand gap qui sont sensibles au rayonnement IR, et aussi grand pouvoir d'arrêt qui permet la détection du rayonnement X
- * Laboratoires impliqués : APC, CEA-IRFU-DAP, CENBG, CPPM, IP2I, LPSC
- * Expertises : caractérisation, technologies d'hybridation (développement avec des industriels), méthodes d'intégration
- * Domaines :
 - * Astrophysique spatiale:
 - CdTe (RX): Solar Orbiter-STIX, SVOM-ECLAIRS, MACSI
 - HgCdTe (IR) : EUCLID, CAGIRE-ALPHA (suivi SVOM)
 - InGaAs (IR) : photodiode LISA
 - * Médicale : radiothérapie (caméra gamma SATBOT)
 - * Industrie :
 - Nucléaire: Origamix (caméra gamma démantèlement)
 - Fabrication additive : CONIX (caméra gamma pour détection défauts)
- * Statut :
 - * Développement détecteur orienté à meilleurs performances (bas bruit, résolution spectrale, ...) et minimisation de la taille du pixel
 - * Développement de l'électronique de lecture (IDeF-X) en parallèle



STIX



Activités / Statut GaN, InP, BMJ

- * Les semi-conducteurs bi-composants GaN, InP ont des propriétés scintillantes et sont utilisés en photodétection et lasers.
- * Les BMJ (Buried Multiple Junction) permettent une modulation de la réponse spectrale par polarisation des jonctions adjacentes.

* Laboratoires impliqués : INL

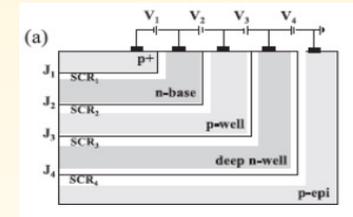
* Expertises : conception, fabrication, simulation, caractérisation, intégration

* Domaine :

- * **Détection de particules** : LHCb-SciFi (GaN), 3D-SiCAD (3D Silicon Coincidence Avalanche Detector)
- * **Physique médicale** :
 - Dosimétrie: Scanner microdosimétrie (QASys avec SciFi), GaN/InP
 - Guidage du geste médical: ANR Newloc (GaN / Gadolinium Oxysulfide + PMT)
 - Assurance qualité des faisceaux X kV: BMJ (Buried Multiple Junction)



LHCb-SciFi



BMJ

Conclusions

- ✧ Le réseau semi-conducteurs IN2P3-IRFU regroupe des équipes de recherche qui couvrent un vaste domaine scientifique et des compétences technologiques
- ✧ Nombreuses collaborations entre les laboratoires IN2P3-IRFU, mais aussi avec d'autres instituts (CNES, INSU, CEA-LETI, CEA-Cadarache)
- ✧ Utilisation et collaboration habituelle avec des plateformes
- ✧ Collaboration étroite avec les équipes d'électronique pour développement de l'électronique de lecture, PCB, etc.
- ✧ Activité R&D
 - ✧ Très importante sur certains axes, il n'y a pas sur d'autres
 - ✧ R&D menée souvent en parallèle aux activités de caractérisation, production, intégration...