

# GRAiNITA

Hervé Chanal

on behalf of the GRAiNITA R&T members : S. Barsuk, D. Breton, I. Boyarintseva, A. Boyarintsev, H. Chanal, .M. Dubovik, B. Geoffroy, C.D. Goncalves, G. Hull, M. Imre, A. Kotenko, J. Lefrançois, M. Magne, B. Mathon, S. Monteil, S. Olmo, D. Picard, D. Reynet, M-H. Schune, N. Semkiv, I. Tupitsynaand, M. Yeresko.

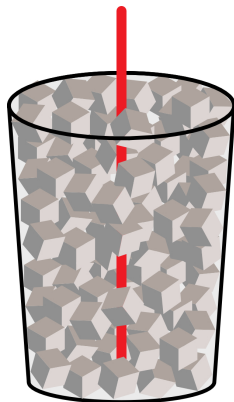
Journée R&T 2023 - Strasbourg  
7/11/23

## GRAiNITA

- ▶ Démonstrateur de calorimètre de nouvelle génération
- ▶ Adaptés aux contraintes de FCC-ee
- ▶ Doit permettre un échantillonnage fin de la cascade électromagnétique grâce à un confinement de la lumière (Inspiré par la technique de détection LiquidO<sup>a</sup>)
- ▶ Coût raisonnable

## Collaboration

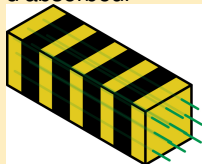
- ▶ ICJLab (Orsay)
- ▶ LPC (Clermont)
- ▶ ISMA (Partenaire-Ukraine)



<sup>a</sup>A. Cabrera et al. LiquidO Commun Phys 4, 273 (2021)

## Calorimètre Shashlik

Couches alternées de scintillateur et d'absorbeur

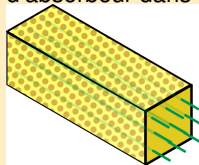


- ▶ Haute granularité
- ▶ Résolution énergétique limitée

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{10\%}{\sqrt{E}}$$

## GRAiNITA

Mélange de grain de scintillateur et d'absorbeur dans le même volume



- ▶ Haute granularité
- ▶ Résolution énergétique attendue (simulation G4) :

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1\% \text{ à } 2\%}{\sqrt{E}}$$

La résolution en énergie d'un calorimètre s'exprime comme :

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{A}{\sqrt{E}} \oplus \frac{B}{E} \oplus C$$

La maîtrise du terme constant C est un des challenge du projet.

# Concept de GRAiNITA 2/2

- ▶ Scintillateur : grains de haut Z et haute densité
- ▶ Liquide : indice de réfraction élevé et haute densité
- ▶ Fibres WLS pour la collection de lumière de scintillation

Deux prototypes en développement ( $\text{ZnWO}_4$  et BGO) :

## $\text{ZnWO}_4$

- ▶  $LY = 10000 \text{ ph/MeV}$
- ▶  $Z_{\text{eff}} = 61$
- ▶ Densité =  $7.62 \text{ g/cm}^3$
- ▶  $n = 2.1 - 2.3$
- ▶  $\tau = 20 \mu\text{s}$
- ▶  $\lambda_{\text{max}}^{\text{em}} = 490 \text{ nm}$

## $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)

- ▶  $LY = 10000 \text{ ph/MeV}$
- ▶  $Z_{\text{eff}} = 74$
- ▶ Densité =  $7.13 \text{ g/cm}^3$
- ▶  $n = 2.1$
- ▶  $\tau = 300 \text{ ns}$
- ▶  $\lambda_{\text{max}}^{\text{em}} = 480 \text{ nm}$

- ▶ SiPM pour la lecture de la lumière de scintillation

# Scintillateur : les grains

## ZnWO<sub>4</sub>

Grains produits par cristallisation spontanée (flux method - entre 700 et 1100 °C)

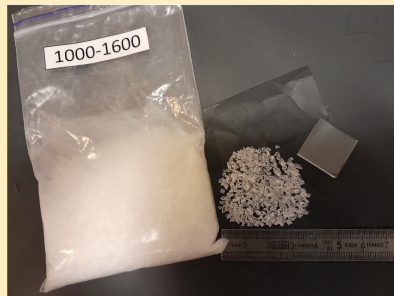
1ère prod.	2ème prod.	3ème prod.
40 g	170 g	1380 g
≈ 1 – 3 mm	≈ 1 – 2 mm	≈ 1 mm



Prix cristal/grains = 2.5

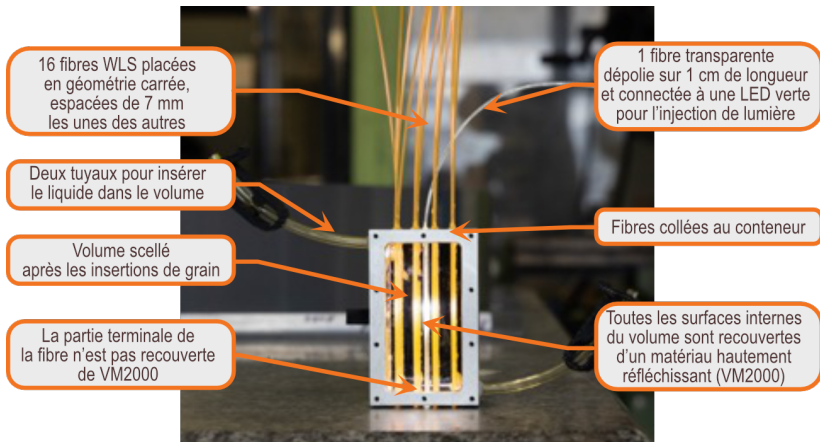
## Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BGO)

Grains produits par écrasement mécanique



Prix cristal/grains = 1.1

# Le prototype GRAiNITA

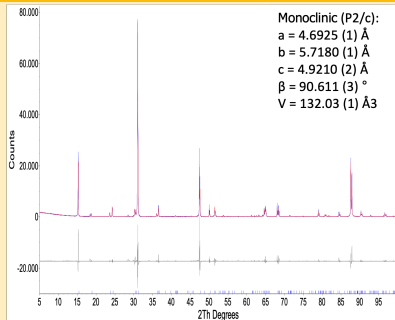


# I. CARACTÉRISATION DES CONSTITUANTS DU PROTOTYPE

# Caractérisation optique des grains $\text{ZnWO}_4$ (ISMA)

Comparaison des caractéristiques du mono-cristal avec les grains.

## Diffusion des rayons X



Même structure monoclinique en phase wolframite qu'en monocristaux.

## Spectre de luminescence

### Excitation par rayons X



- ▶ Spectre similaire pour le cristal ou les grains
- ▶ Décalage de la luminescence maximale due à l'absorption/diffusion accrue des grains



# Caractérisation de la scintillation des grains de $ZnWO_4$

## Protocole expérimental

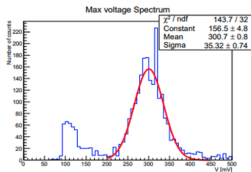
- ▶ PMT Hamamastu R2083, graisse optique, teflon
- ▶ Source  $^{241}\text{Am}$  (60 keV)
- ▶ RC = 100  $\mu\text{s}$



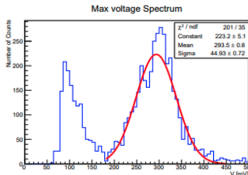
## Résultats

Sample	Mean, mV	Sigma, mV
Grains in the frame 1 <sup>st</sup> batch (40 g)	260.7	59.24
Grains in the frame 2 <sup>nd</sup> batch (170 g)	279.9	43.11
Grains in the frame 3 <sup>rd</sup> batch (1380 g)	293.5	44.93
2x2x0.085 cm <sup>3</sup> plate	296.7	37.65
2x2x0.103 cm <sup>3</sup> plate	301.9	36.36
2x2x0.103 cm <sup>3</sup> plate	300.7	35.32
2x2x0.103 cm <sup>3</sup> plate	298.3	36.21
2x2x0.214 cm <sup>3</sup> plate	284.7	35.99
2x2x0.214 cm <sup>3</sup> plate	288.4	36.91
2x2x0.314 cm <sup>3</sup> plate	265.7	34.15
2x2x0.314 cm <sup>3</sup> plate	277.2	30.79
2x2x0.425 cm <sup>3</sup> plate	272.1	33.39
2x2x0.425 cm <sup>3</sup> plate	268.8	34.82
1x1x1 cm <sup>3</sup> cube	181.7	26.45

### Mono-cristal



### Grain

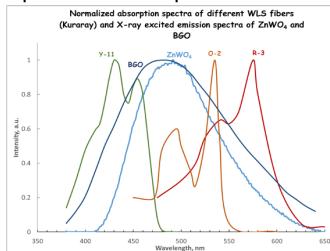


La 2eme et 3eme production des grains montrent :

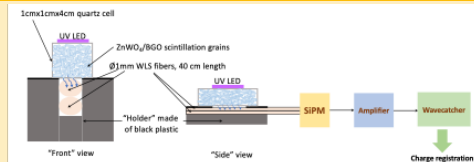
- ▶ Reproductibilité des mesures  $\rightarrow$  technologie de production stabilisée.
  - ▶ Plus petite variance de l'amplitude du pic de l'  $^{241}\text{Am}$  (60 keV)
- $\rightarrow$  meilleure homogénéité de la production de lumière.

# Propriétés des fibres WLS

## Spectre d'absorption :

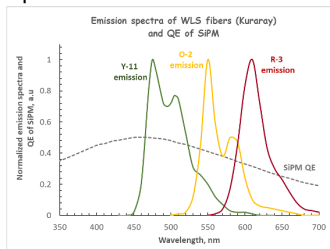


## Protocole expérimental



## Résultats :

## Spectre d'émission :

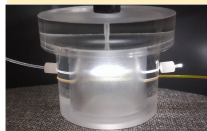


WLS fiber	Estimated $N_{phe}$	Relative efficiency, %
<b>ZnWO<sub>4</sub> grains ~9 mm in the quartz cell</b>		
O-2(300)	302.555064	100
O-2(200)	313.631277	104
Y-11(200)	133.50304	44
R-3(100)	181.404855	60
<b>ZnWO<sub>4</sub> grains ~5-6 mm in the quartz cell</b>		
O-2(300)	294.391397	100
O-2(200)	304.384926	103
Y-11(200)	215.041589	73
<b>BGO grains ~9 mm in the quartz cell</b>		
O-2(300)	326.138167	100
O-2(200)	339.2981441	104
Y-11(200)	318.4178521	98
<b>BGO grains ~5-6 mm in the quartz cell</b>		
O-2(300)	471.9886362	100
O-2(200)	549.6132684	116
Y-11(200)	671.9978981	142

La fibre O2(200) est adaptée pour le ZnWO<sub>4</sub> et le BGO

# Caractérisation de la propagation de la lumière

## Protocole expérimental



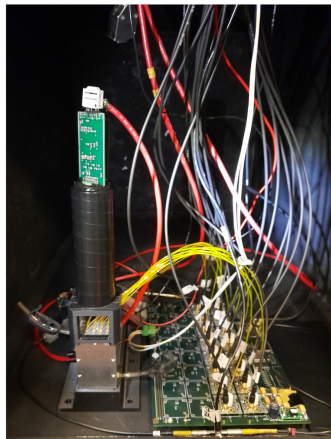
- ▶ Petit volume de grains
- ▶ Fibre claire pour l'injection de la lumière (dépolie sur 1 cm)
- ▶ LED verte (520 nm, 20 ns, pulses à 30 Hz)
- ▶ Fibre WLS pour la collection de lumière (4 mm de distance de la fibre claire), couplée à un SiPM
- ▶ Conteneur recouvert de réflecteur spéculaire (VM2000)

	Charge [pC]	RMS [pC]	Fraction de lumière capturé [%]	Temps de propagation [ns]
Air	71.938	15.377	100	54.89
ZnWO <sub>4</sub>	60.591	14.263	84	55.51
ZnWO <sub>4</sub> +H <sub>2</sub> O	67.455	14.938	94	54.91

$\Delta T = 0.62$  ns  
 $\Delta S \sim 12$  cm!

- ▶ Une fraction importante de la lumière est capturée par les grains
- ▶ En ajoutant du liquide ( $n(\text{H}_2\text{O})=1.33$ ) la lumière collectée par les fibres augmente (la lumière capturée par les grains diminue)

## II. CARACTÉRISATION DU PROTOTYPE



Étude des deux possibilités de grain (BGO et  $\text{ZnWO}_4$ )

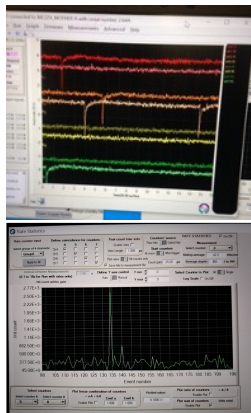
Test en deux étapes :

- ▶ Test avec des muons cosmiques
  - ▶ Nombre de photoelectrons par MeV
  - ▶ Étude de l'uniformité de réponse
- ▶ Test en faisceau (2024)
  - ▶ Caractérisation fine de la réponse du détecteur

Puis production et caractérisation d'un détecteur plus grand (2024-28).

# Muons cosmiques (Orsay)

- ▶ Deux scintillateurs plastiques couplés à deux PMTs en coïncidence
- ▶ 4 évènements par heure, 40 MeV déposés dans le volume de grains



Signaux acquis par le banc de test

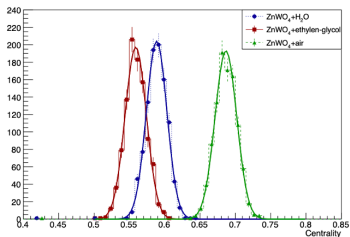
- ▶ Deux WaveCatchers 8 canaux pour la lecture du signal des 16 fibres WLS, synchronisation post-prise de données par le programme d'analyse (possible car basse fréquence des evts)
- ▶ Comptage du nombre d'impulsions (ph-é uniques) sur une échelle de temps de 25  $\mu$ s (temps décroissance  $ZnWO_4$  20  $\mu$ s)

# Muons cosmiques : Résultats (Orsay)

Configurations testées :

- ▶  $\text{ZnWO}_4$
- ▶  $\text{ZnWO}_4$  + eau
- ▶  $\text{ZnWO}_4$  + éthylène glycol

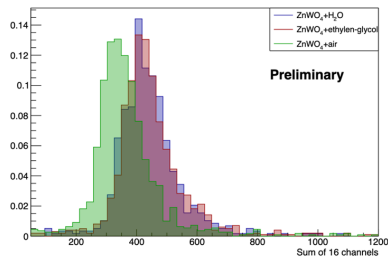
## Utilisation de LED



Étude du confinement de la lumière :  
Signal dans les 4 canaux  
centraux/16 canaux

L'objectif du projet en terme de LY est atteint (10000 PE/GeV).

## Muons cosmiques



- ▶  $\text{LY} \approx 400 \text{ PE}/40 \text{ MeV}$   
(10000 PE/GeV)
- ▶ 20 à 25 % en plus de lumière  
avec le liquide
- ▶ Peut être amélioré car les  
extrémités des fibres ne sont  
pas recouvertes de réflecteur

# Banc de test muons cosmiques (Clermont Ferrand)

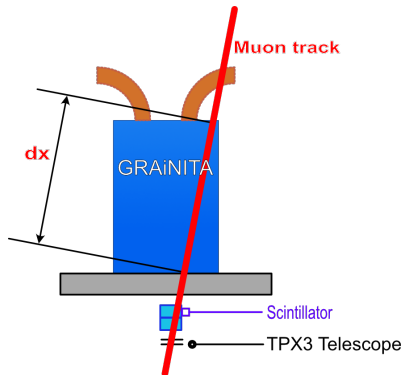
## Objectif

Déterminer précisément la trace du muon dans le calorimètre

- ▶ Conception d'un banc de test dédié
- ▶ Possiblement utile à d'autres R&D détecteurs à l'IN2P3

## Réalisation

- ▶ Utilisation d'un tracker (deux plans de timepix)
- ▶ 1 mm de résolution sur la trace à 15 cm du tracker





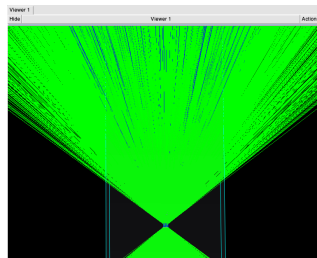
# Banc de test muons cosmiques : Validation

## Étude

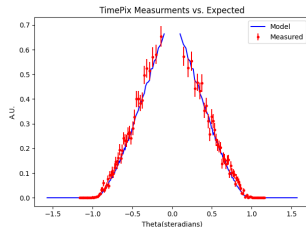
- ▶ Comparaison de la distribution angulaire des muons avec un modèle :

$$I(\theta) = I_0 \cos^{2.22}(\theta) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

- ▶ Utilisation de 7 jours de données du constructeur



Event viewer

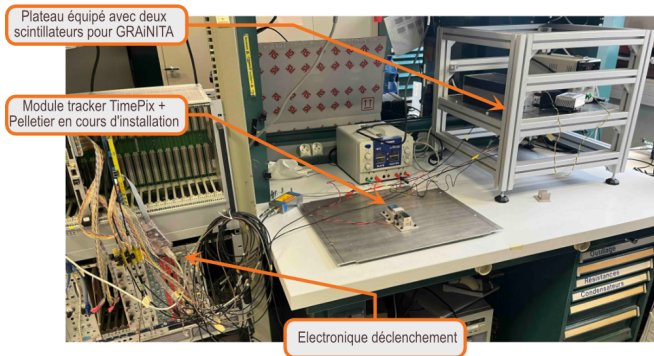


Comparaison données/modèle

## Résultat

- ▶ Modèle en accord avec les données
- ▶ 0.74 muons  $\text{min}^{-1}$  attendus pour 0.73 muons  $\text{min}^{-1}$  obtenus

# Banc de test muons cosmiques : État de l'art



## Réalisé

- ▶ Structure mécanique
- ▶ Lecture et refroidissement du tracker
- ▶ Circuit de lecture des scintillateurs

## En cours

- ▶ Enregistrement des données sur disque
- ▶ Alignement des détecteurs

### III. PULSE SHAPE DISCRIMINATION

# Pulse shape discrimination 1/3

## Objectif

Mesure de la fraction d'énergie électromagnétique des cascades hadroniques

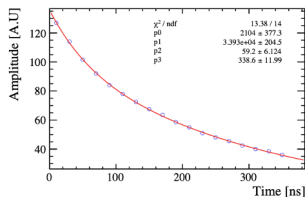
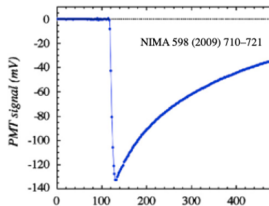
## Physique

Les particules hadroniques perdent une partie de leur énergie pour briser les noyaux et produisent des protons et des neutrons de basse énergie.

## Idée

La manière dont l'énergie est déposée par ces particules non-relativistes (noyaux, neutrons) se reflète dans des temps de scintillation différents entre composantes EM et hadronique. La mesure de la forme temporelle des signaux peut fournir une alternative à la lumière Cerenkov (dual read-out).

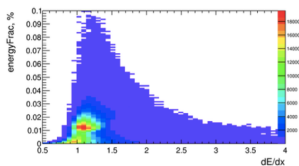
Exemple : pions de 250 GeV dans du BGO: deux composantes temporelles (malheureusement, nous n'avons pas accès aux données).



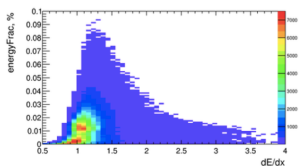
# Pulse shape discrimination 2/3

Preuve de concept (par la simulation):

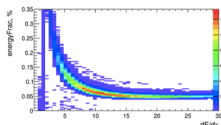
- ▶ Caractérisation des différences d'énergies déposées entre électrons et hadrons non-relativistes (G4 simulation, fait en 2023)



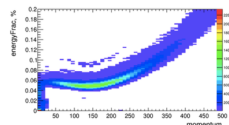
$e^-$



$e^+$



$p$



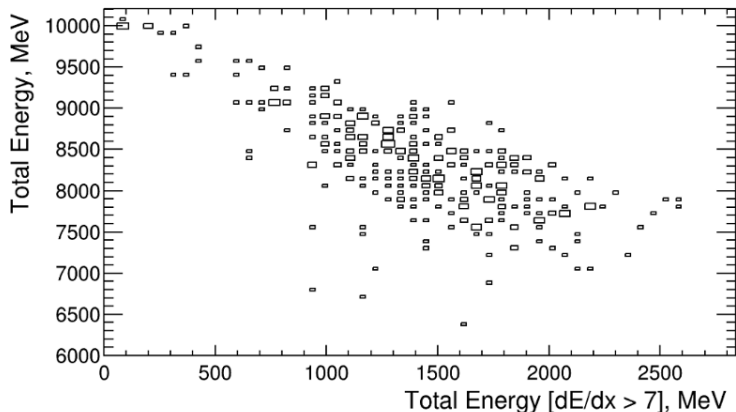
$p$

Particle	$e^-$	$e^+$	$\gamma$	$\pi^-$	$\pi^+$	$p$
Mean, %	38.7	13.0	2.0	4.9	11.2	22.9
RMS, %	8.1	5.5	0.5	3.7	11.6	10.3
Particle	n	D	T	$\alpha$	nuclei	Total
Mean, %	0.8	1.8	0.3	0.8	2.5	98.9
RMS, %	0.4	1.7	0.5	0.5	1.4	

## Pulse shape discrimination 3/3

Preuve de concept (par la simulation):

- ▶ Mise en évidence d'une corrélation négative entre l'énergie totale déposée et les dépôts d'énergie des hadrons non-relativistes. Premiers résultats prometteurs obtenus..
- ▶ Prochaine étape: produire un modèle optique (nourri par des données de test beam basse énergie).



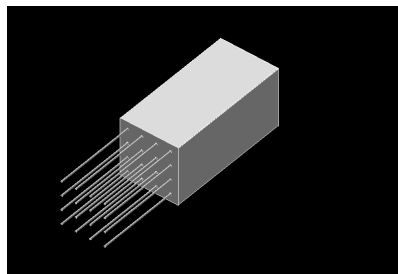
## IV. SIMULATION

## Simulations G4

- ▶ Améliorer la compréhension des mesures
- ▶ Prédire les caractéristiques du détecteur

## Modèle

- ▶ Génération de la position des grains : modèle des sphères dures
- ▶ 20k grains
- ▶ Caractéristiques optiques et des scintillations des éléments à affiner

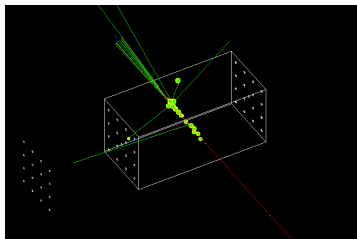


Modèle G4 du prototype

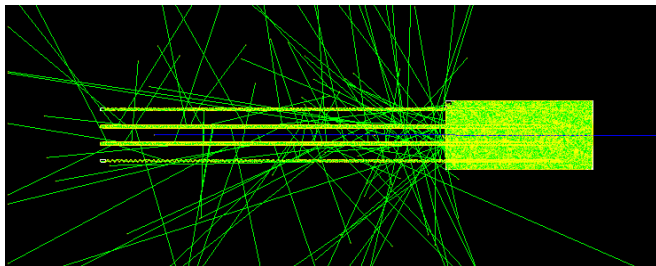


## Scintillation des grains

- ▶ Modèle comportemental de la scintillation
- ▶ G4 permet de définir plusieurs composantes temporelles pour la scintillation



Scintillation des grains (incident e<sup>-</sup>)



Simulation d'un muon traversant le prototype  $\text{ZnWO}_4$  + air (avec la scintillation et les fibres WLS activées.)

## Status

- ▶ Premier prototype fabriqué
- ▶ Deux options pour les grains :  $\text{ZnWO}_4$  et le BGO
- ▶ Études sur le liquide à venir
- ▶ Performances du prototype  $\text{ZnWO}_4$  prometteuses (production et confinement de la lumière) mesurés avec des muons cosmiques
- ▶ Banc de test muons cosmique en phase finale de développement

### Prochaines étapes

- ▶ Test du prototype avec les grains de BGO
- ▶ Utilisation du banc de test à rayons cosmiques pour étudier la réponse du détecteur en fonction de l'angle et de la position des muons (fin 2023)
- Première étape pour adresser la question de l'uniformité du détecteur et le contrôle du terme constant.
- ▶ Test en faisceau au CERN et à GANIL prévu en 2024
- ▶ PSD: création du modèle optique pour la simulation (relier les temps de scintillations aux énergies déposées) et test beam pour connaître les réponses temporelles de protons de basse énergie ( 20 MeV) dans les cristaux.