

PEPITES

Profil Eur Pour Ions Thérapeutiques à Electrons Secondaires

Journées R&T 2022,
Lyon,
Marc Verderi (LLR)



Aperçu de PEPITES

PEPITES ?



▪ Motivé par besoins de la protonthérapie

- Détecteur “transparent”, $< 15 \mu\text{m}$ WET, à $\sim 2 \text{ m}$ du patient
- Monitoring continu du faisceau pendant l’irradiation
- Bonne tenue aux radiations : $10^6 - 10^8 \text{ Gy/an}$
- Energies intermédiaires $O(100 \text{ MeV})$



Image: Bruno Boyer

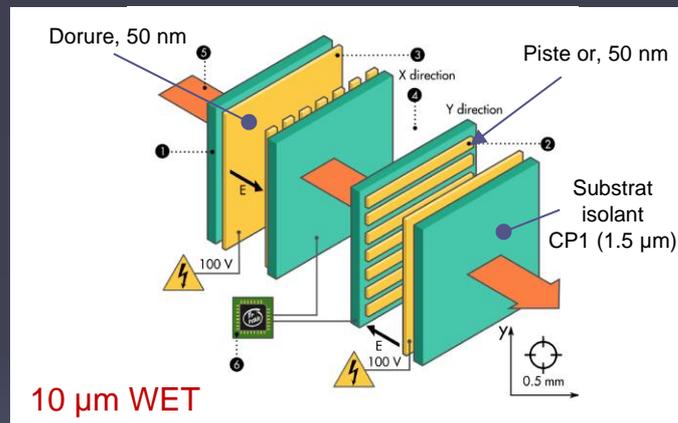
▪ Aujourd’hui, chambres à ionisation

- Volume de gaz entre deux membranes, dans le vide
- “Tension” entre minceur système & tenue de la pression
- Radiations \rightarrow Vieillissement \rightarrow changement préventif

▪ PEPITES:

▪ Signal : émission électrons secondaires (SEE)

- $\sim 10 \text{ nm}$ suffisent pour générer SEE \rightarrow détecteur mince
- Phénomène très linéaire



- $e^- O(eV) \rightarrow$ fonctionnement au vide
 - \rightarrow cohérent pour moniteur placé dans la ligne
 - \rightarrow pas de stress mécanique:
 - \rightarrow membranes aussi minces que techniquement faisable
 - \rightarrow dommages radiations moins gênants
- Construit avec méthodes de Couches Minces

Bref Historique



- 2012 : Contact IBA
 - En recherche d'un moniteur "transparent" et résistant aux radiations
- 2013 : Accord de confidentialité IBA – Ecole polytechnique/IN2P3
 - Information faisceau et traitement
- 2014 : Idée d'un moniteur à SEE
 - Mise en forme de celle-ci
 - Entre-temps, perte contact avec IBA : on leur a demandé du financement !
- Printemps 2016 : ARRONAX propose de collaborer
- Printemps/été 2016 : réalisation d'un premier prototype

- **Septembre 2016 : 1^{er} test en faisceau @ ARRONAX**

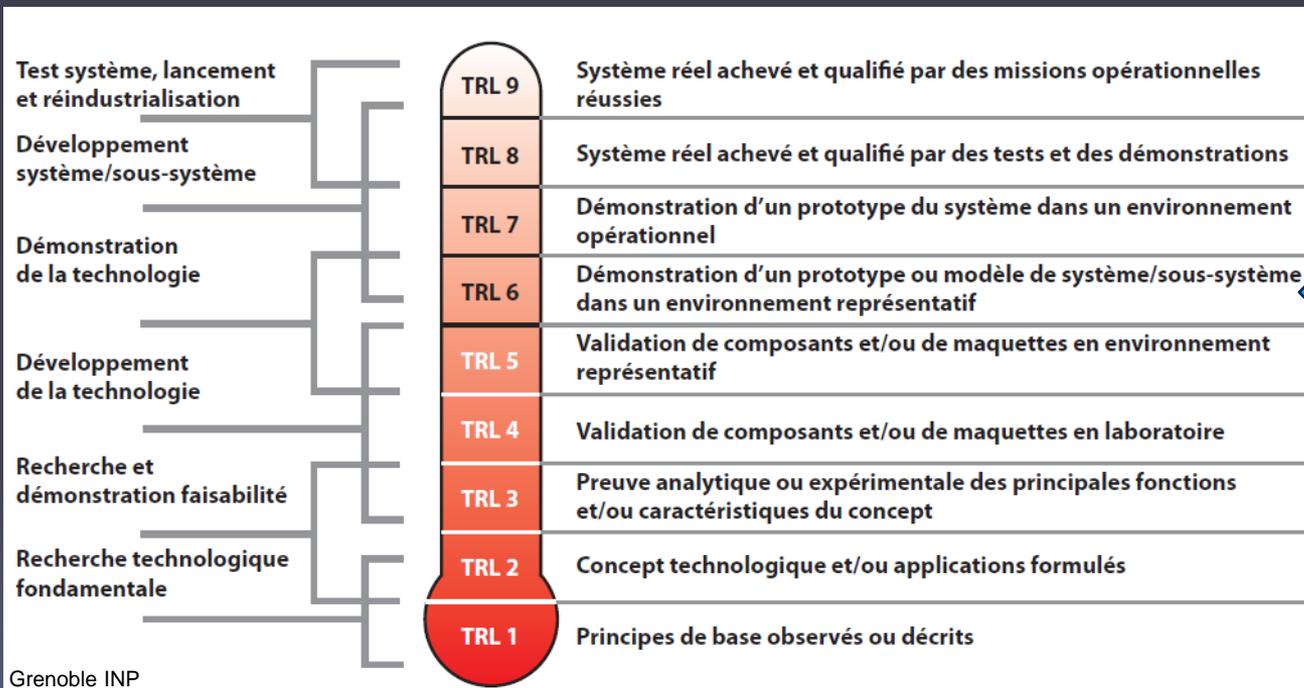
- Premier signal, premiers profils, avec proton 68 MeV !
- **Preuves de principe !**

- 2017 : dépôt de brevet
 - Délivré en 2020

- **Été 2017:**

- **Obtention ANR**
 - LLR (méca, porteur), ARRONAX (dommage radiation), CEA (électronique lecture)
 - Sur 3 ans (+ 2 prolong.: élec. 15 mois, COVID 6 mois)
- **Et P2IO !**
 - Sur 2 ans
- **Objectif : moniteur, 10 μ m WET, entièrement fonctionnel, installé à ARRONAX, pour utilisation de routine et retour d'expérience**
 - Validerait l'approche et autoriserait déclinaisons

TRL PEPITES : ~6



Grenoble INP

← Tweet

Lab Leprince Ringuet
@LaboLR

Yes we can !
Tout premier profil réalisé par l'équipe PEPITES !
Un détecteur ultra-mince de 10 microns pour caractériser un faisceau de protons de 68 MeV du cyclotron #Arronax.
Une équipe heureuse et fière ! Avec le @CEAIfu #Arronax le LLR @Polytechnique @IP_Paris @IN2P3_CNRS

6:33 PM · May 31, 2022 · Twitter for iPhone

2 Retweets · 1 Quote Tweet · 8 Likes

Tweet 31 mai 2022



PEPITES : sa construction & aujourd'hui

Mécanique (LLR)

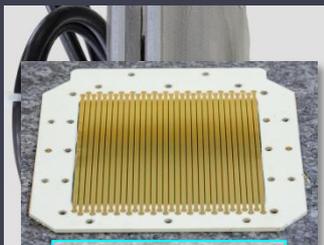


Harnais

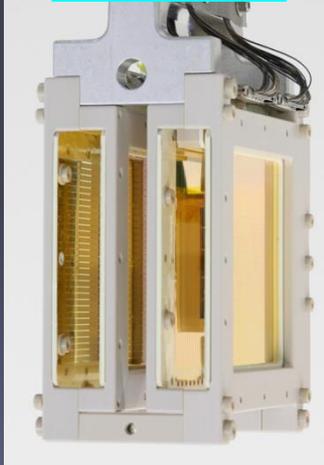
Coax high tech. ($\varnothing < 1$ mm) basse capa.



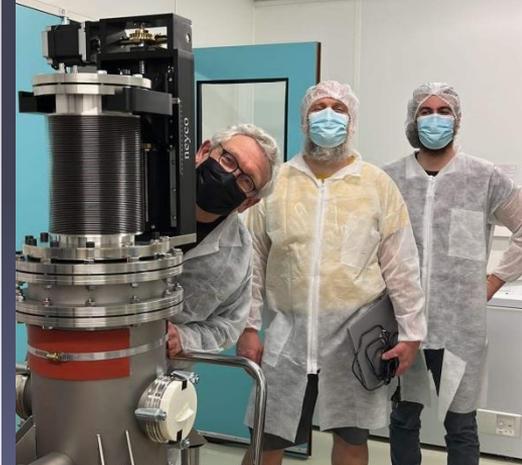
Montage sur bride



Plan 32 voies



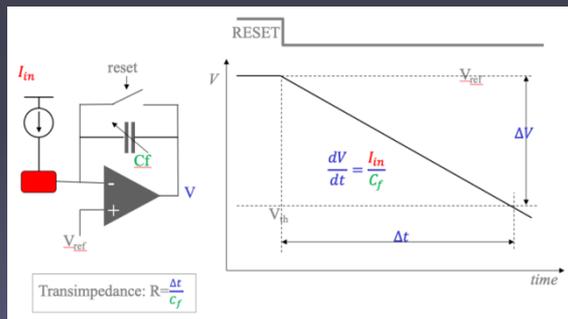
Montage sur translateur



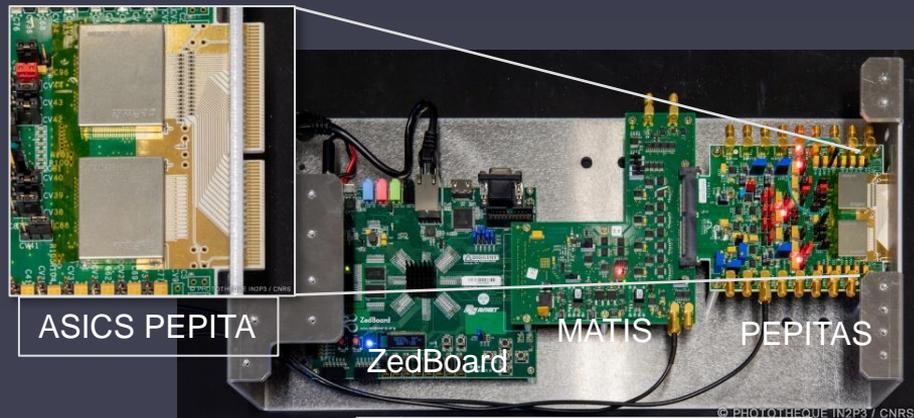
Electronique (CEA)



- ASIC dédié:
 - Lecture de courants continus
 - Grande gamme dynamique (5 décades)
 - Bas-bruit (lecture courant aussi bas que $O(10 \text{ fA})$)
- Technologie:
 - CMOS 350 nm AMS initialement souhaitée
 - Mais technologie à risque fin 2019 (début design ASIC)
 - 180 nm X-FAB retenue
 - Allongement project ANR de 15 mois
- ASIC 32 voies



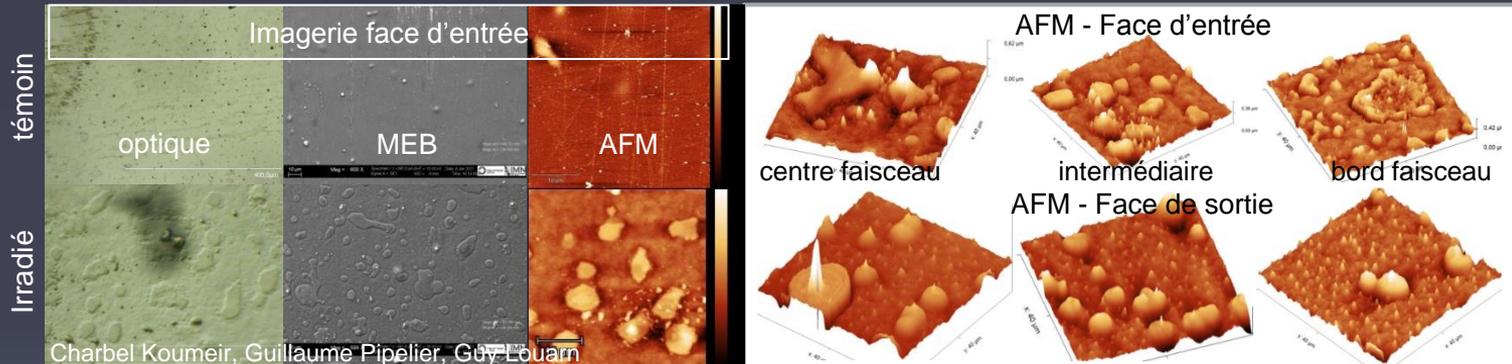
- Mesure courants : basée sur lecture TDC (mode défaut)
- **ASICs ont fonctionné dès la 1^{ère} fonderie !**



Endommagements (ARRONAX)



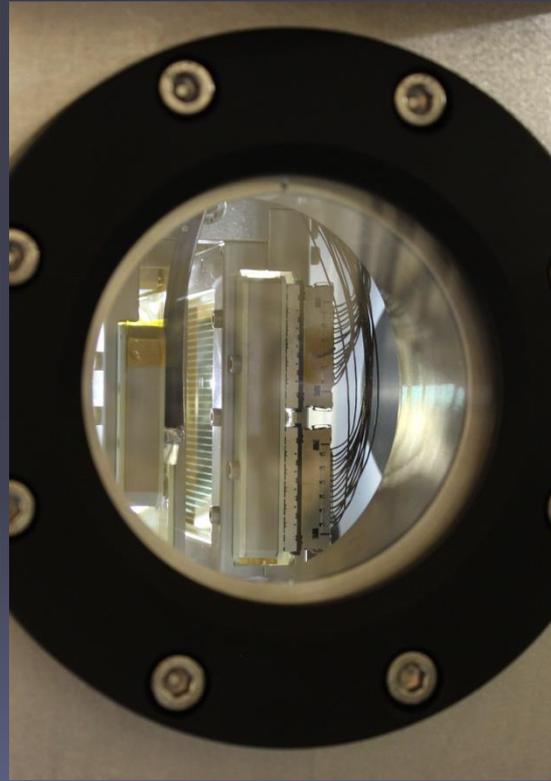
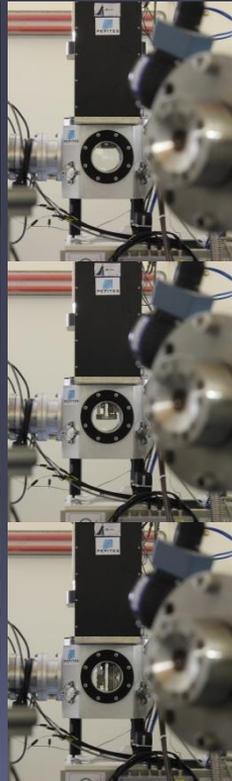
- Ensemble de méthodes de caractérisation des dommages pour
 - Comprendre ce qui se passe
 - En complément des irradiations « brute force » ci-dessous
 - Anticiper la durée de vie du moniteur
 - Sur Kapton (présenté ici) et sur CP1



Charbel Koumeir, Guillaume Pipelier, Guy Louam

- Irradiations « brute force »
 - LSI (électrons 2 MeV, Palaiseau), jusqu'à 10^9 Gy, CNSM (protons 10 keV - 2 MeV, Orsay), 10^7 et 10^8 Gy, ARRONAX (gamma)
 - pas d'effet visibles jusqu'à 10^8 Gy
 - ARRONAX (proton 68 MeV, 300 nA, pendant 2.5 h, irradiation à l'air)
 - dommages visibles dès qq 10^7 Gy !
 - Interactions nucléaires avec fragments haut TEL ? Attaque oxygène ?
- En tout cas, plusieurs années de fonctionnement anticipées**

PEPITES sur site, à ARRONAX



1^{er} Test Beam 31/05/22 @ ARRONAX



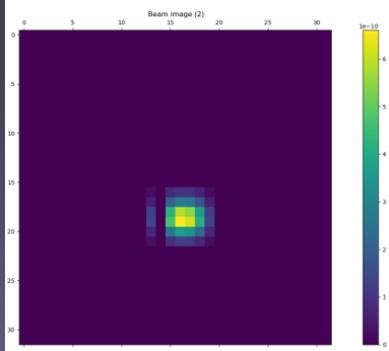
Faisceau proton 68 MeV

7x7 cm; 32x32 voies

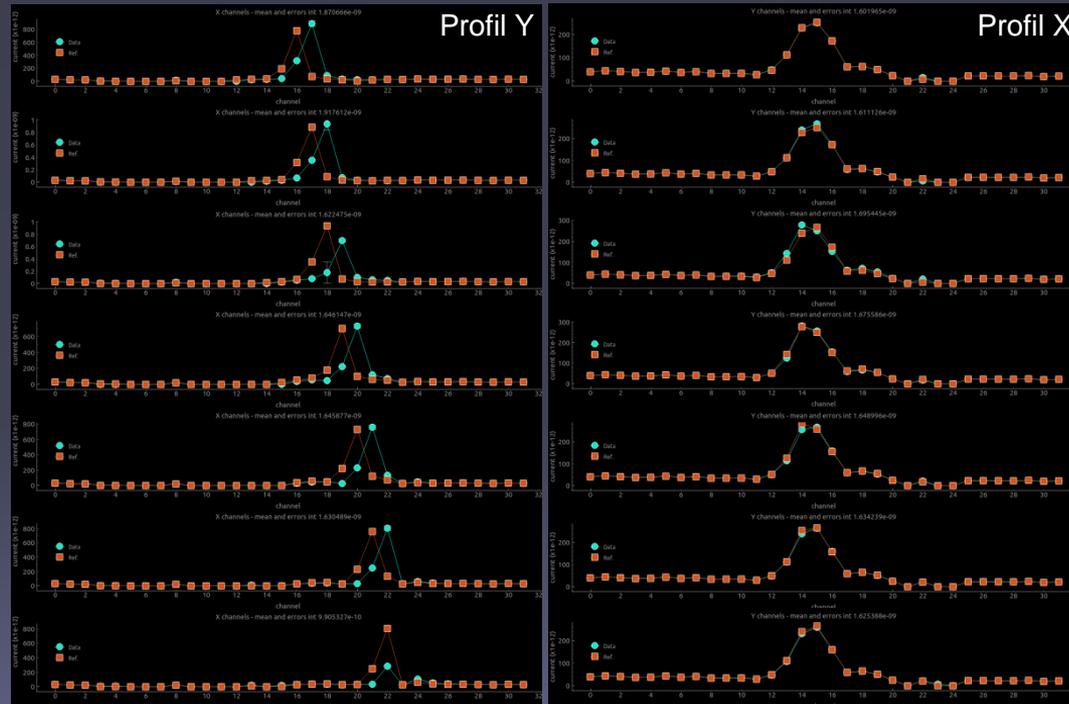
$I_{\text{beam}} \sim 1 \text{ pA}$
Pic à 35 fA !



$I_{\text{beam}} \sim 20 \text{ nA}$



Scan en Y, pas = largeur de piste, $I_{\text{beam}} \sim 500 \text{ pA}$



→ 4 ordres de grandeur, “out of the box” !

La « FLASH » en bref



Recherches ↗↗↗ en thérapie FLASH

- FLASH : durée classique d'irradiation de quelques minutes → < 100 ms voire << 100 ms !
 - Nocivité moindre pour tissus sains
 - Mais inchangée pour tumeurs !
 - Aspects cinétiques chimique et/ou biologique en jeu
 - en cours d'étude
 - Observé avec tous les chargés
-
- Faisceaux « FLASH » mal définis encore
 - Objet des recherches !

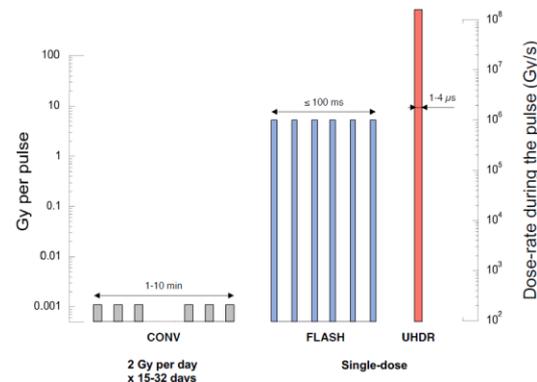
Certitude : moniteurs classiques à la peine !

- Intensités instantanées × 1000, voire+++ !
- Problèmes de saturation → il faut innover !
- Besoin de:
 - Grande gamme dynamique
 - Résistance aux radiations

DOI: [10.1126/scitranslmed.3008973](https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3008973)



Temporal structure of energy deposition in the conventional vs. FLASH modalities





PEPITES et la « FLASH »

1. Détecteur (ultra-)mince
 - Pour ne pas perturber le faisceau

2. Signal = émission e^- secondaires
 - Nécessite très peu de matière (10 nm)
 - Pour satisfaire 1.



PEPITES et la « FLASH »

1. Détecteur (ultra-)mince
 - Pour ne pas perturber le faisceau
 - Limite les échauffements
 - Peu de dépôt d'énergie dans les plans
 - A priori pas un problème en pure clinique
 - On ne veut pas bruler le patient...
 - Mais utile en campagne de tests intensifs
 2. Signal = émission e^- secondaires
 - Nécessite très peu de matière (10 nm)
 - Pour satisfaire 1.
 - Signal très linéaire, pas de saturation
 - Utilisé en physique v , à Fermilab
 - <https://doi.org/10.1063/1.1831167>
 - Intensité ~ 0.4 A ! (spills protons)
 - Seule contrainte:
 - Appliquer un champ électrique suffisant
- Zone active et signal physique : ✓ !

PEPITES et la « FLASH »



1. Détecteur (ultra-)mince

- Pour ne pas perturber le faisceau
- Limite les échauffements
 - Peu de dépôt d'énergie dans les plans
 - A priori pas un problème en pure clinique
 - On ne veut pas brûler le patient...
 - Mais utile en campagne de tests intensifs

2. Signal = émission e^- secondaires

- Nécessite très peu de matière (10 nm)
 - Pour satisfaire 1.
- Signal très linéaire, pas de saturation
 - Utilisé en physique v , à Fermilab
 - <https://doi.org/10.1063/1.1831167>
 - Intensité ~ 0.4 A ! (spills protons)
 - Seule contrainte:
 - Appliquer un champ électrique suffisant

- Zone active et signal physique : ✓ !

▪ Quid de l'électronique de lecture ?

- Conçue pour courants continus capable de mesurer des bas courants
- Mais FLASH \rightarrow courants « pulsés » et élevés !
- Mais 100 voire 1 ms : ce n'est pas « court »
- ARRONAX délivre des faisceaux FLASH !

PEPITES et la « FLASH »



1. Détecteur (ultra-)mince

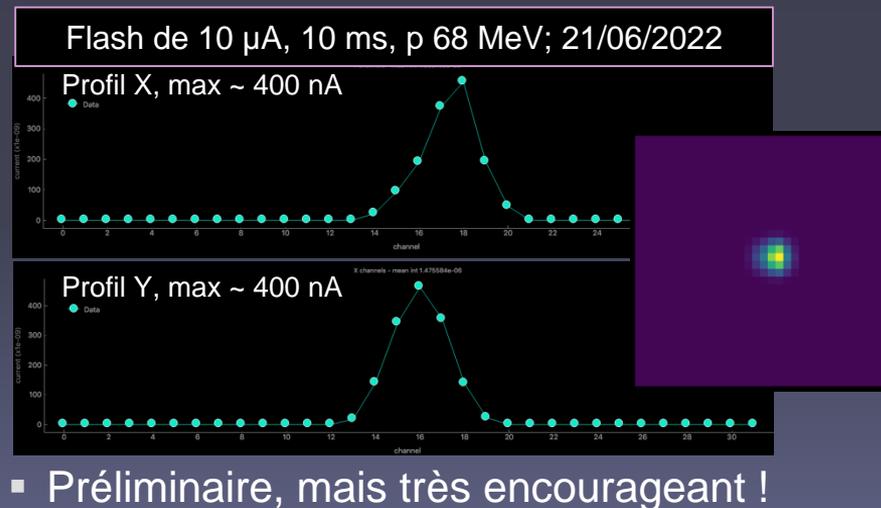
- Pour ne pas perturber le faisceau
- Limite les échauffements
 - Peu de dépôt d'énergie dans les plans
 - A priori pas un problème en pure clinique
 - On ne veut pas brûler le patient...
 - Mais utile en campagne de tests intensifs

2. Signal = émission e^- secondaires

- Nécessite très peu de matière (10 nm)
 - Pour satisfaire 1.
- Signal très linéaire, pas de saturation
 - Utilisé en physique ν , à Fermilab
 - <https://doi.org/10.1063/1.1831167>
 - Intensité ~ 0.4 A ! (spills protons)
 - Seule contrainte:
 - Appliquer un champ électrique suffisant
- Zone active et signal physique : ✓ !

▪ Quid de l'électronique de lecture ?

- Conçue pour courants continus capable de mesurer des bas courants
- Mais FLASH \rightarrow courants « pulsés » et élevés !
- Mais 100 voire 1 ms : ce n'est pas « court »
- ARRONAX délivre des faisceaux FLASH !





Et ensuite ?

Suites possibles



▪ **Maîtrise de PEPITES**

- PEPITES fonctionne
- Mais nous ne le maîtrisons pas encore !
- Etudes systématiques à conduire !
- **Problème : depuis le 30 juin (fin ANR) financement = 0 !**
 - En pratique : missions ARRONAX
- HELP !

▪ **Collaboration CNAO**

- Détails après
- CNAO intéressé par PEPITES
 - Vise utilisation en clinique *in fine*
 - Si évaluation satisfaisante
- Démarrage projet début 2023
 - Suppose une bonne maîtrise de PEPITES !

▪ **ANR PEPITES FLASH**

- Constat : développements FLASH nécessitent moniteurs polyvalents
 - PEPITES bien placé !
 - Quelles évolutions à prévoir ?
 - ASIC ? Réduire gaps ? Zone sensible facile à changer ?
 - Maîtrise de PEPITES nécessaire !
- Stratégie:
 - 1) Capitaliser sur PEPITES existant pour
 - 2) aller à PEPITES-FLASH
 - Modes courant jusque O(1 ms) (tel qu'aujourd'hui)
 - Intégrateur de charge au-dessous
- Discussion au sein du consortium PEPITES existant (LLR, CEA, ARRONAX)
- Et arrivée Institut Curie (CPO)
 - Inventeurs de la FLASH !

▪ **SPLIF : « Spin-off » PEPITES**

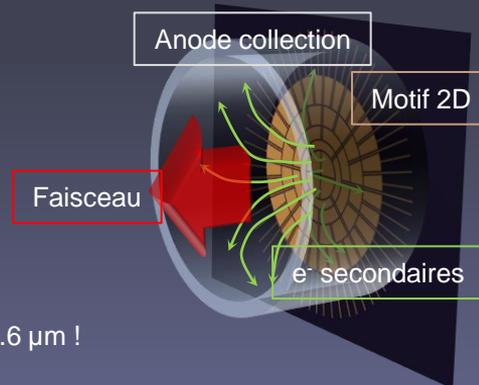
- Un appareillage portable pour la FLASH
- Détails après (confidentiel)

PEPITES @ CNAO ?

The National Center for Oncological Hadrontherapy



- **Vif intérêt de CNAO pour PEPITES:**
 - *Minceur du système*
 - **Besoin d'un moniteur lointain : 6.5 m du patient !**
 - Présent pendant l'irradiation du patient
 - Rappel : PEPITES était taillé pour ~2 m du patient
- **Accord CNRS/IN2P3 – CNAO en cours d'écriture (...)**
- Programme (3 – 4 ans), démarrage début 2023
 - 1. Tester performances avec « PEPITES NOMADE »
 - Clone PEPITES ARRONAX
 - 2. Puis test avec ce nomade (ou une future copie) *in situ*
 - **3. Adoption en clinique si adéquation**
 - **Si non-adéquation, autres cartouches « R&D »:**
 - **Même système mais plus cher:**
 - Membrane polymère 1.5 μm \rightarrow 0.1 μm : WET détecteur ~ 6 μm
 - Membrane polymère \rightarrow membrane nitrure silicium
 - Testé avec surface 1.4 x 1.4 cm^2
 - Disponibilité en grandes surfaces ?
 - **Système différent (mais mêmes principes de mesure):**
 - 2 plan de pistes + anode de collection hors axe
 - 2 plan de pistes \rightarrow motif 2D + anode de collection hors axe
 - Et pourquoi pas membrane polymère 0.1 μm : on arriverait à un WET détecteur ~0.6 μm !



SPLIF : SimPLe moniteur pour Intensités Flash (confidentiel: brevet)



CONFIDENTIEL



Conclusion

- Prototype PEPITES entièrement fonctionnel installé à ARRONAX
- Tient toutes ses promesses
 - Et même au-delà : **bonne surprise FLASH !**
- **Mais beaucoup à apprendre, tester et maîtriser encore !**
 - **Préliminaires aux projets CNAO et ANR FLASH !**
 - Problème, depuis le 30 juin côté financement nous sommes →  !
 - Le LLR nous a beaucoup aidé déjà !
- Collaboration avec CNAO se dessine, pour début 2023
 - Pourrait déboucher à une application en clinique de PEPITES !
 - Tel quel, ou dans des versions plus minces
- ANR PEPITES FLASH en discussion, dans le but d'une pré-proposition
 - Après phase de maîtrise PEPITES existant, évolutions envisagées (ASIC, réduction gap, etc.)
- Projet SPLIF, « spin-off » de PEPITES discuté (« pitch ») aujourd'hui à l'IPP !
- Donc, beaucoup d'activités et de déclinaisons possibles de PEPITES !
 - Faire attention à « factoriser » autant que ce peut, pour éviter la dispersion !
 - Ou dotation de moyens ;)