

Sujet de thèse 2024 : Développements de détecteurs pour les applications utilisant la plateforme d'irradiation du GIP Arronax

Contexte :

Le GIP Arronax, située à Saint-Herblain (Nantes-France), possède un cyclotron de haute énergie et de haute intensité qui peut accélérer différents types de projectiles comme les protons, les deutérons et les particules alpha. Le cyclotron a été conçu pour la production de radionucléides destinés à la médecine nucléaire [1]. Le faisceau est composé de paquets d'ions d'une durée de 3 ns et séparés par 33 ns. L'énergie maximale disponible est de 70 MeV pour les particules alpha et les protons et de 35 MeV pour les deutérons. L'intensité du faisceau peut varier de quelques ions/s à plusieurs centaines de μA . La partie injection du cyclotron est équipée d'un système de pulsation du faisceau qui permet de retirer un nombre spécifique de paquets de faisceau. Par conséquent, le faisceau peut être délivré de train d'une durée minimale de 1 μs et avec fréquence de répétition maximale d'environ 10 kHz. Après l'injection et l'accélération, le faisceau peut être envoyé dans différentes casemates expérimentales en fonction de l'application.

Une casemate, nommée AX, est dédiée à la recherche appliquée. La large gamme d'énergies, d'intensités de faisceau, de structures temporelles et d'ions légers, disponibles sur notre installation permet des recherches dans des domaines variés. Ainsi il est possible de réaliser des études précliniques en radiothérapie et en particulier l'étude de l'effet Flash lié à la préservation des tissus sains par l'irradiation à des ultra-hauts débit de dose sur une courte durée. Le faisceau Arronax peut aussi simuler les protons présents dans les rayons cosmiques, le vent solaire et les ceintures autour de la Terre. Il est donc possible de caractériser la résistance aux radiations des composants électroniques et des détecteurs pour les missions spatiales. Enfin, le faisceau à haute énergie est adapté à l'analyse par faisceau d'ions d'objets du patrimoine culturel tels que les pièces de monnaie en argent, les peintures et les statuettes.

Pour toutes ces applications, afin de garantir une irradiation précise, les paramètres du faisceau, les intensités, le profil géométrique et l'énergie du faisceau à l'intérieur des échantillons irradiés doivent être contrôlés avec précision.

Travaux proposés :

L'objectif de ce travail sera d'installer sur nos lignes de faisceau plusieurs détecteurs afin de pouvoir obtenir des mesures en ligne précises sur une large gamme d'intensité, de projectiles et d'énergies. Une cage de Faraday avec un anneau de garde placée dans une chambre à vide est utilisée pour mesurer l'intensité du faisceau et sert de référence ce qui permet de calibrer tous les détecteurs avant leur utilisation.

Régime des basses intensités ($\leq 1\text{nA}$)

Pour une intensité variant de 1 pA à 1 nA, il est possible d'utiliser une chambre d'ionisation mince disponible commercialement ou d'utiliser la production de rayons X de fluorescence lors du passage du faisceau à travers une fine feuille métallique. Nous avons développé une méthode alternative qui utilise un photomultiplicateur (PM) pour détecter la fluorescence UV-visible émise par l'azote dans l'air excité par le passage du faisceau. Cette méthode fonctionne à partir de 1 nA et présente l'avantage de ne pas interférer avec le faisceau incident. Bien que le signal du PM soit rapide (temps de montée 2 ns), la probabilité de détecter un paquet est faible car la section efficace de production UV-visible est petite. Le travail consistera à poursuivre le développement de cette technique et notamment de déterminer la limite inférieure d'intensité mesurable.

Un nouveau détecteur basé sur un semi-conducteur mince en diamant est en cours de développement en collaboration avec le "Laboratoire de physique subatomique et corpusculaire" à Grenoble -France. La

réponse du diamant est très rapide (temps de montée de 100ps) avec une efficacité de détection élevée [2], ce qui permet de détecter les paquets de particules individuelles et de mesurer le nombre de particules par paquet. Il y a cependant des aspects liés aux défauts créés par l'irradiation qui restent à explorer.

Régime des hautes intensités (jusqu'à 20 μ A)

La méthode basée sur le PM décrite ci-dessus convient parfaitement à la mesure et au suivi d'un faisceau continu de haute intensité (jusqu'à 20 μ A dans notre cas). Le nombre de protons par paquet est important ce qui permet de détecter individuellement chacun d'entre eux au-delà de 1 μ A. Des études réalisées avec différentes intensités ont montré la linéarité de la réponse de la PM sur une large gamme d'intensités [3]. En utilisant le système de pulsation présent dans notre cyclotron pour envoyer des trains de paquets, le nombre de protons dans un train et sa durée peuvent être mesurés avec précision. En parallèle, un détecteur au diamant avec une électronique dédiée est en cours de développement pour mesurer le train (nombre de protons et durée) pour des intensités de faisceau allant de 1 nA à 1 μ A. Les deux méthodes sont donc complémentaires, et nous souhaitons équiper nos lignes de faisceaux en AX avec des PMs placés près de la fenêtre de sortie, où une forte intensité de faisceau est attendue, et avec des prototypes en diamant, près de l'échantillon où une intensité de faisceau de moins de 1 μ A est attendue. L'intégration de ces deux détecteurs et la caractérisation des capacités du système feront partie de ce travail.

Profileur faisceau

Pour les faibles intensités (de 1pA à quelques nA), un profileur de faisceau transparent, appelé PEPITES, développé en collaboration avec le "Laboratoire Leprince Ringuet" à Palaiseau et le CEA-Saclay a été installé sur notre ligne de faisceau. Le détecteur est basé sur l'émission d'électrons secondaires à partir d'une couche d'or nanométrique déposée sur une fine couche de polymère et est composé de deux plans de bandes d'une surface active de 10 cm². L'épaisseur totale équivalente à l'eau de PEPITES est inférieure à 10 μ m. Par conséquent, la perturbation du faisceau (perte d'énergie et étalement angulaire) est négligeable. Pour les intensités de faisceau élevées (> 1nA), un nouveau profileur de faisceau, basé sur la détection de la fluorescence de l'air avec plusieurs PM, est en cours de développement en collaboration avec le "Laboratoire Subatech - Nantes". L'objectif de ce travail sera de finaliser ces développements, de caractériser les performances et d'intégrer un tel système sur notre ligne de faisceaux. En effet, ces deux profileurs sont complémentaires et couvrent la large gamme d'intensités de faisceaux disponibles sur notre ligne de faisceaux de recherche.

Mesure du Range du faisceau

Enfin, dans certaines applications, il est nécessaire de vérifier la portée (Range) du faisceau de protons. Actuellement, cette vérification est effectuée à l'aide d'une chambre d'ionisation commerciale (Markus, PTW) placée dans un réservoir d'eau. Le réservoir est monté sur un axe de translation (précision de 10 μ m) pour balayer l'énergie déposée le long de l'axe du faisceau. La courbe de Bragg est mesurée et comparée aux simulations Monte-Carlo pour déduire l'énergie du faisceau. Cette méthode est couramment utilisée dans les centres de protonthérapie pour vérifier la qualité du faisceau. Dans le cas d'un milieu inhomogène, comme les petits animaux, il n'existe pas de méthode pour suivre l'énergie du faisceau à l'intérieur de la cible. C'est pourquoi nous avons commencé à étudier la possibilité d'utiliser le Bremsstrahlung des rayons X émis par le milieu irradié et de le corrélérer avec la dose déposée. Les premiers résultats obtenus sur des couches de PMMA sont encourageants [5]. Les prochaines étapes consisteront à vérifier la faisabilité avec des fantômes réels et à construire une caméra à rayons X adaptée aux petits animaux. Ce système devra ensuite être intégré sur notre ligne de faisceau.

Système d'acquisition de données

Associé à tous ces développements de détecteurs, un système d'acquisition de données devra être mis en place pour faciliter l'utilisation de ces différents détecteurs par les utilisateurs externes venant à Arronax pour faire des campagnes expérimentales.

Equipe d'encadrement : C. Koumeir and F. Haddad

Date de début : Octobre 2024 **Durée :** 3 ans

Lieu de réalisation du travail : Le travail de thèse sera réalisé sur le site du GIP Arronax (St Herblain, 44) en collaboration avec le laboratoire Subatech (équipe PRISMA)

Compétences :

Nous recherchons un étudiant ayant un Master de physique subatomique ou un diplôme d'ingénieur et qui a un intérêt fort pour la physique expérimentale, l'électronique et le développement de détecteurs. Des connaissances en programmation sont un prérequis indispensable pour ce travail (Python et C++)

Bibliographie

- [1] F. Haddad et al, 2008. ARRONAX, a high-energy and high-intensity cyclotron for nuclear medicine. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 35, 1377–1387. <https://doi.org/10.1007/s00259-008-0802-5>
- [2] S. Curtoni et al, 2021. Performance of CVD diamond detectors for single ion beam-tagging applications in hadrontherapy monitoring. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 1015, 165757. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165757>
- [3] N. Servagent et al, 2022. PROTON BEAM FLASH ONLINE MONITORING AT ARRONAX CYCLOTRON. *Physica Medica* 94, S44-S45. [https://doi.org/10.1016/S1120-1797\(22\)01529-0](https://doi.org/10.1016/S1120-1797(22)01529-0)
- [4] B. Boyer et al, 2019. Development of an ultra-thin beam profiler for charged particle beams. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 936, 29-30. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.134>
- [5] F. Ralite et al, 2021. Bremsstrahlung X-rays as a non-invasive tool for ion beam monitoring. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 500-501, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.05.013>
- [6] G. Saade et al, 2023. Ultrahigh-Dose-Rate Proton Irradiation Elicits Reduced Toxicity in Zebrafish Embryos. *Advances in Radiation Oncology* 8, 101124. <https://doi.org/10.1016/j.adro.2022.101124>
- [7] Y. Ghannam et al, 2023. First evidence of in vivo effect of FLASH radiotherapy with helium ions in zebrafish embryos. *Radiotherapy and Oncology* 187, 109820. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2023.109820>
- [8] G. Blain et al, 2022. Proton Irradiations at Ultra-High Dose Rate vs. Conventional Dose Rate: Strong Impact on Hydrogen Peroxide Yield. *Radiation Research* 198, 318–324. <https://doi.org/10.1667/RADE-22-00021.1>
- [9] A. Gillon et al, 2023. Elemental analysis by XRF and HE-PIXE on silver coins from the 16th-17th centuries and on a gilded crucifix from the 12th century. *Phys. J. Plus* 138, 945. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04570-5>
- [10] M. Hazim et al, 2020. High energy PIXE: New experimental K-shell ionization cross sections for silver and gold and comparison with theoretical values from ECPSSR/RECPSSR models. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 479, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.06.028>