



## Ετήσια έκθεση προόδου PhD

Βασίλειος Ντούπης, 04 Δεκεμβρίου 2023

Τίτλος: **Μελέτη απόδοσης φωταύγειας φθοριούχων κρυσταλλικών σπινθηριστών για χρήση σε ανιχνευτικές διατάξεις ιατρικών απεικονιστικών συστημάτων** (αρ. απόφασης 2/15-02-2021 )

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Βαλαής

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ιωάννης Βαλαής, Νεκτάριος Καλύβας, Χρήστος Μιχαήλ

### Αρχικοί ερευνητικοί στόχοι

- Η πειραματική και θεωρητική μελέτη της απόδοσης φωταύγειας Φθοριούχων μονοκρυσταλλικών σπινθηριστών  $BaF_2$ ,  $PbF_2$ ,  $CeF_3$  και  $CaF_2:Eu$  κάτω από την επίδραση ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Ο προσδιορισμός της δυνατότητας χρήσης των σπινθηριστών σε απλά συστήματα ακτίνων-Χ και υβριδικά SPECT/CT και PET/CT, σε θερμιδομετρία (calorimetry) ακόμα και σε πειράματα φυσικής υψηλών ενεργειών κλπ. Ο προσδιορισμός των συνθηκών που μεγιστοποιούν την απόδοση και οδηγούν σε μείωση της δόσης ακτινοβολίας στον εξεταζόμενο.
- Αξιολόγηση της αποδοτικότητας των κρυστάλλων μέσω προσδιορισμού παραμέτρων όπως: απόδοση απορρόφησης φωτονίων (QDE) και της ενέργειας τους (EAE), ολική απόδοση φωταύγειας (AE), η οπτική απολαβή του σπινθηριστή (DOG), καθώς και η απόδοση φωταύγειας του σπινθηριστή σε ακτίνες-Χ (XLE). Έλεγχος της συμβατότητας του εξερχομένου φάσματος από τους κρυστάλλους με διάφορους οπτικούς ανιχνευτές, μέσω του παράγοντα φασματικής σύζευξης (SMF), καθώς και της συνολικής απόδοσης φωταύγειας του συστήματος σπινθηριστής-οπτικός ανιχνευτής (Effective Efficiency).

### Περιγραφή προόδου για το έτος 2023

Μελετήθηκε η απόδοση φωταύγειας ενός μονοκρυστάλλου  $PbF_2$   $10 \times 10 \times 10$  mm<sup>3</sup> που διατίθεται στο εμπόριο, προκειμένου να διερευνηθεί η απόδοση αυτού του υλικού ως πιθανού υποψηφίου για εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης ακτίνων Χ. Το  $PbF_2$  έχει εξαιρετικά καλή απορρόφηση ακτίνων γάμμα ( $\gamma$ ) ως αποτέλεσμα της υψηλής πυκνότητάς του, του υψηλού ατομικού αριθμού (Z), των σύντομων χρόνων απόσβεσης (6 και 30 ns) του πολύ μικρού Radiation Length (0,93 cm) και Moliere Radius (2,2cm)[1].

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό διέγερση ακτίνων-Χ από μια γεννήτρια ακτίνων-Χ υψηλής συχνότητας CPI Inc. CMP 200 DR και μια λυχνία ακτίνων-Χ IAE SpA μοντέλο RTM90HS, στην περιοχή 40–140 kVp, διατηρώντας παράλληλα το γινόμενο ρεύματος χρόνου στα 63 mAs. Εκτός από το εσωτερικό φίλτρο της λυχνίας, που ισοδυναμεί με 2 mm Al, προστέθηκαν άλλα 20 mm Al για να προσομοιωθεί η εξασθένιση από ένα τυπικό ανθρώπινο θώρακα.

Η οπτική συμπεριφορά του  $PbF_2$  στην περιοχή ενεργειών ακτίνων-Χ ιατρικής απεικόνισης αξιολογήθηκε πειραματικά με τον προσδιορισμό της απόδοσης απόλυτης φωταύγειας (ΑΕ) (περιγράφοντας την ισχύ εξόδου φωτός ανά έκθεση σε προσπίπτουσα ακτινοβολία).

Υπολογίστηκε το κλάσμα των προσπιπτόντων φωτονίων ακτίνων-Χ που καθορίζει τον σχηματισμό του σήματος εξόδου μέσω της απόδοσης ενεργειακής απορρόφησης (ΕΑΕ). Το ΕΑΕ είναι ο λόγος της ενέργειας των ακτίνων Χ που απορροφάται προς την ενέργεια που προσπίπτει σε ένα ανιχνευτικό σύστημα. Η απόδοση ενεργειακής απορρόφησης προσδιορίστηκε ως συνάρτηση διαφορετικών kVp της λυχνίας ακτίνων Χ.

Από την έρευνά μας αυτή προέκυψε ότι η απόλυτη απόδοση του  $PbF_2$  αλλά και η απόδοση ενεργειακής απορρόφησης (ΕΑΕ) του  $PbF_2$  μειώνονται σταδιακά στο εύρος (40KVp-140KVp), γεγονός που οφείλεται στην ισχυρή παγίδευση οπών σε Pb. Η παγίδευση αυτή συμβαίνει λόγω της μεγάλης ενέργειας που απαιτείται για να μετατοπιστούν οι οπές σε γειτονικά άτομα Pb και είναι πολύ υψηλότερη από την ενέργεια θερμικής δόνησης του κρυστάλλου [2].

Επιπροσθέτως προέκυψε ότι ο κρυσταλλικός σπινθηριστής  $PbF_2$  είναι ένας αποτελεσματικός απορροφητής ακτίνων-γάμμα και έχει πολύ γρήγορο time-of-flight (TOF), όμως δεν φαίνεται να έχει χρησιμότητα στις ιατρικές εφαρμογές ως σπινθηριστής [3, 4].

Πραγματοποιήθηκε επίσης διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με τις ιδιότητες και τις ιατρικές εφαρμογές του  $CeF_3$ .

Από την μελέτη αυτή, προέκυψε ότι οι κρύσταλλοι φθοριούχου Δημητρίου ( $CeF_3$ ) έχουν σημαντικές ιδιότητες φθορισμού, υψηλή πυκνότητα, σύντομο χρόνο απόσβεσης (decay time), γρήγορη απόκριση, υψηλή αντοχή στην ακτινοβολία και παρουσιάζουν μη αναλογικότητα έως τα 5,1MeV, που τους καθιστά πολλά υποσχόμενους κρυστάλλους για γρήγορους και αποτελεσματικούς σπινθηριστές.

Οι κρύσταλλοι ( $CeF_3$ ) είναι καλοί υποψήφιοι για τη φάση υψηλής φωτεινότητας του επιταχυντή LHC (Large Hadron Collider), καθώς έχει αποδειχθεί ότι επανέρχονται αυθόρμητα, σε θερμοκρασία δωματίου, από τις βλάβες που προκαλούνται από ενεργειακά αδρόνια. [5-9]

## Δημοσιεύσεις - Συνέδρια

1. **Vasileios Ntoupis**, Dionysios Linardatos, George Saatsakis, Nektarios Kalyvas, Athanasios Bakas, George Fountos Ioannis Kandarakis, Christos Michail, and Ioannis Valais, 2023. Response of Lead Fluoride ( $PbF_2$ ) Crystal under X-ray and Gamma Ray Radiation. *Photonics* **2023**, 10(1), 57; <https://doi.org/10.3390/photonics10010057>
2. Dionysios Linardatos, **Vasileios Ntoupis**, Stavros Tseremoglou, Ioannis Valais, Konstantinos Ninos, Athanasios Bakas, Eleftherios Lavdas, Ioannis Kandarakis, Nektarios Kalyvas, George Fountos, and Christos Michail, **2023** Light output dependence of  $CeBr_3$  hygroscopic scintillator upon temperature. *Procedia Structural Integrity*, 47, 80-86; <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.06.043>
3. Stavros Tseremoglou, **Vasileios Ntoupis**, Dionysios Linardatos, Ioannis Valais, Christos Michail, Athanasios Bakas, Konstantinos Ninos, Eleftherios Lavdas, Ioannis Kandarakis, George Fountos and Nektarios Kalyvas, **2023** Temperature Dependence of the Luminescence Output of  $LaCl_3:Ce$  Single Crystal Scintillator. *Procedia Structural Integrity*, 47, 119-124; <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.002>
4. Dionysios Linardatos, **Vasileios Ntoupis**, Stavros Tseremoglou, Ioannis Valais, Konstantinos Ninos, Athanasios Bakas, Eleftherios Lavdas, Ioannis Kandarakis, Nektarios Kalyvas, George Fountos, and Christos Michail, Light output dependence of  $CeBr_3$  hygroscopic scintillator upon temperature, 27<sup>th</sup> International Conference on Fracture and Structural Integrity February 22-24, **2023**, Rome (Italy) & Web

5. Stavros Tseremoglou, **Vasileios Ntoupis**, Dionysios Linardatos, Ioannis Valais, Christos Michail, Athanasios Bakas, Konstantinos Ninos, Eleftherios Lavdas, Ioannis Kandarakis, George Fountos and Nektarios Kalyvas, Temperature Dependence of the Luminescence Output of LaCl<sub>3</sub>:Ce Single Crystal Scintillator, 27<sup>th</sup> International Conference on Fracture and Structural Integrity February 22-24, **2023**, Rome (Italy) & Web.

### Βιβλιογραφία

- [1] Huang Xingbin, Wang Yuhao, Zhang Peixiong, Su Zikang, Xu Jingdong, Xin Kunyuan, Hang Yin, Zhu Siqi, Yin Hao, Li Zhen, Chen Zhenqiang, Zheng Yi, Li Haifeng, Efficiently strengthen and broaden 3 μm fluorescence in PbF<sub>2</sub> crystal by Er<sup>3+</sup>/Ho<sup>3+</sup> as co-luminescence centers and Pr<sup>3+</sup> deactivation, Journal of Alloys and Compounds, 811 (2019) 152027, <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2019.152027>
- [2] Stephen E. Derenzo, Marvin J. Weber, Prospects for first-principle calculations of scintillator properties. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 422 (1999) 111–118
- [3] P.Lecoq, C.Morel, J.O.Prior, D.Visvikis, S.Gundacker, E.Auffray, P.Krizan, R.M.Turtos, D.Thers, E.Charbon, J.Varela, C.De La Taille, A.Rivetti, D.Breton, J.F. Pratte, J. Nuyts, S. Surti, S. Vandenberghe, P. Marsden, K.Parodi, J.M. Benlloch, M. Benoit, Roadmap toward the 10 ps time-of-flight PET challenge, Phys. Med. Biol. 65 (2020), <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab9500>
- [4] -Marharyta Alokina, Clotilde Canot, Oleg Bezshyyko, Igor Kadenko, Gérard Tauzin, Dominique Yvon, Viatcheslav Sharyy, Simulation and optimization of the Cherenkov TOF whole-body PET scanner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 912,(2018),Pages 378-381, ISSN 0168-9002, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.01.027>
- [5] N. L. Sizovaa, D. N. Karimova, T. B. Kosovaa, and D. S. Lisovenkob, “ Mechanical Properties of CeF<sub>3</sub> Single Crystals”. ISSN 1063-7745, Crystallography Reports, Vol. 64, No. 6, pp. 942–946 (2019)
- [6] Ling Zhu, Qin Li, Xiangdong Liu, Jiayan Li, Yanfei Zhang, Jian Meng, and Xueqiang Cao, “Morphological Control and Luminescent Properties of CeF<sub>3</sub> Nanocrystals”. J. Phys. Chem. C, 111, 5898-5903(2007)
- [7] L. Bianchini, G. Dissertori, M. Donega, W. Lustermaun, A. Marini, F. Micheli, F. Nessi-Tedaldi (Member, IEEE),F. Pandolfi, M. Peruzzi, M. Schonenberger, “High-energy electron test results of a calorimeter prototype based on CeF<sub>3</sub> for HL-LHC applications”. Journal of Latex Class Files, VOL. 6, NO. 1 (2007)
- [8] W. Klamral, P. Sibczynski, Member, IEEE, M. Moszynski, , Fellow, IEEE and V. Kozlov, “Study of Undoped CeF<sub>3</sub> Scintillators at Room and Liquid Nitrogen Temperature. IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC) (2012)
- [9] W. Klamra, P. Sibczynski, M. Moszynski, W. Czarnacki and V. Kozlov, “Extensive studies on light yield non-proportional response of undoped CeF<sub>3</sub> at room and liquid nitrogen temperatures”. IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab srl (2013)

## ΤΑ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Ιωάννης Βαλαής

Νεκτάριος Καλύβας

Χρήστος Μιχαήλ

Καθηγητής

Αναπληρωτής Καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής