

Πυρηνική φυσική με ακουστικά κύματα: καινοτόμοι ακουστικοί κρυσταλλικοί κυματιστές για παραγωγή ακτίνων-γ στενού φάσματος

Κωνσταντίνος Καλέρης^{1,2}, Ευάγγελος Κασελούρης^{1,2}, Εμμανουήλ Κανιολάκης
Καλούδης^{1,2}, Ελένη Παπαδάκη^{1,2}, Μάκης Μπακαρέζος^{1,2}, Βασίλειος Δημητρίου^{1,2},
Μιχαήλ Ταταράκης^{1,3}, Νεκτάριος Παπαδογιάννης^{1,2}

¹ Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο,
Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

² Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής
Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Περιβόλια,
74133 Ρέθυμνο

³ Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 73133
Χανιά

*npapadogiannis@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει τις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου TECHNO-CLS με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων πηγών στενοζωνικής ακτινοβολίας γ μέσω κυματισμού ποζιτρονίων από ακουστικούς κρυσταλλικούς κυματιστές. Η ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ σε καθορισμένες ενεργειακές περιοχές είναι κρίσιμη σε σύγχρονες επιστημονικές και τεχνολογικές εφαρμογές και ιδιαίτερα στη μοριακή και την ιατρική φυσική. Μέχρι σήμερα, η παραγωγή ακτίνων γ γίνεται με χρήση επιταχυντών σωματιδίων ή ραδιενεργών ισοτόπων. Οι μέθοδοι αυτές έχουν σημαντικά μειονεκτήματα καθώς έχουν πολύ υψηλό κόστος ενώ προσφέρουν περιορισμένο έλεγχο των χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας. Οι κρυσταλλικές πηγές φωτός (ΚΠΦ) αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη καινοτόμος τεχνολογία για την ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ από απλές και αποδοτικές διατάξεις. Το πρόγραμμα TECHNO-CLS χρηματοδοτείται από το Pathfinder Europe του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Καινοτομίας (EIC) και στοχεύει στην ανάπτυξη αυτών των πηγών μέσω της εκμετάλλευσης των ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων σε κρυστάλλους για την επιτάχυνση σωματιδίων και την εκπομπή ακτινοβολίας γ. Η ερευνητική ομάδα του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ακουστικών κρυσταλλικών κυματιστών, έχοντας ήδη παράξει τα πρώτα υπολογιστικά αποτελέσματα.

Nuclear physics using acoustic waves: novel acoustic wave crystalline undulators for the generation of narrowband γ -ray radiation

ABSTRACT

This work presents the current research activities within the framework of the European project TECHNO-CLS, aimed at developing novel narrow-band γ -ray sources via positron undulation by acoustically driven crystalline undulators. The controlled generation of γ -radiation with narrow bandwidth is crucial in modern scientific and technological applications, particularly in molecular and medical physics. Until now, γ -ray production has relied on particle accelerators or radioactive isotopes. However, these methods have significant drawbacks, such as high costs and limited control over the radiation's characteristics. Crystal Light Sources (CLS) are emerging as a promising innovative technology for the controlled generation of narrowband γ -radiation from simple and efficient layouts. The TECHNO-CLS project is funded by the EIC Pathfinder Europe and aims to develop these sources by exploiting the strong electric fields in crystals to accelerate particles and emit γ -radiation. The research team at the Institute of Plasma Physics and Lasers (IPPL) of the Hellenic Mediterranean University (HMU) plays a central role in developing the acoustically driven crystalline undulator technology and has already produced the first computational results.

Εισαγωγή

Η ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ σε καθορισμένες ενεργειακές περιοχές και διαφορετικά εύρη φάσματος είναι εξαιρετικά σημαντική σε σύγχρονες επιστημονικές και τεχνολογικές εφαρμογές, όπως η μοριακή φυσική αλλά κυρίως η ιατρική φυσική [1][2]. Συγκεκριμένα, στην ακτινοθεραπεία για την αντιμετώπιση του καρκίνου και τη διαγνωστική απεικόνιση, τα μόρια του DNA των καρκινικών κυττάρων ιονίζονται λόγω της εξαιρετικά υψηλής ενέργειας των φωτονίων γ , με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ανάπτυξη και η αναπαραγωγή τους [3]. Έως τώρα, η παραγωγή ακτίνων γ γίνεται σε επιταχυντές σωματιδίων ή με χρήση τεχνητά ενεργοποιημένων ραδιενεργών ισωτόπων [4]. Οι επιταχυντές είναι εξαιρετικά κοστοβόρες υποδομές τεραστίων διαστάσεων με πολύ περιορισμένη προσβασιμότητα και χρηστικότητα [5]. Αντίστοιχα, η χρήση ραδιενεργών ισωτόπων συνεπάγεται εξαιρετικά μειωμένη ελεγχσιμότητα των χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας, και συγκεκριμένα της ενέργειας των φωτονίων και της έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Άλλου είδους πηγές φωτεινής ακτινοβολίας, όπως τα Λείζερ Ελεύθερων Ηλεκτρονίων (Free Electron Lasers -FELs) τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σύμφωνων ακτίνων X, αδυνατούν να παράξουν ακτινοβολία στην περιοχή των ακτίνων γ λόγω τεχνολογικών περιορισμών [4][6][7]

Οι κρυσταλλικές πηγές φωτός (Crystal Light Sources - CLS) αποτελούν μια ανερχόμενη τεχνολογία που αναμένεται να επιτρέψει την ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ στενού φασματικού εύρους από απλές, οικονομικές και αποδοτικές

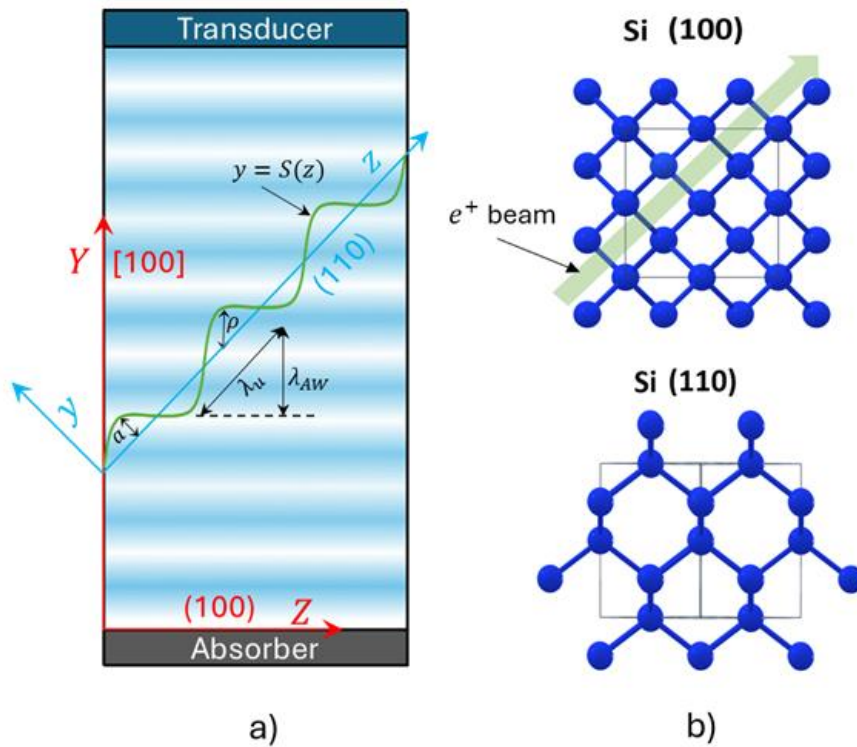
κρυσταλλικές δομές μικρού μεγέθους [8][9]. Η σχετική έρευνα στην Ευρώπη στηρίζεται για την πενταετία 2022 – 2027 από το πρόγραμμα χρηματοδότησης ερευνητικών έργων υψηλού ρίσκου – υψηλής απόδοσης Pathfinder Europe του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Καινοτομίας (European Innovation Council - EIC), στο πλαίσιο του έργου TECHNO-CLS: Emerging technologies for crystal-based gamma-ray light sources (101046458 — TECHNO-CLS — HORIZON-EIC-2021-PATHFINDEROPEN-01). Το έργο στοχεύει στην επίτευξη των κρίσιμων επιστημονικών και τεχνολογικών τομών που απαιτούνται για τον σχεδιασμό και την πρακτική υλοποίηση πηγών ακτινοβολίας γ στην ενεργειακή περιοχή φωτονίων από περίπου 100 keV μέχρι και τα GeV [10] Για το σκοπό αυτό, το TECHNO-CLS προτείνει την εκμετάλλευση και διαμόρφωση των ιδιαίτερα ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων που αναπτύσσονται μέσα σε κρυσταλλικά υλικά από τους θετικά φορτισμένους πυρήνες των περιοδικά διατεταγμένων ατόμων του πλέγματος [4]. Σε αυτή την κατεύθυνση, το πρόγραμμα εισάγει καινοτόμες δομές και διατάξεις κατάλληλα διαμορφωμένων γραμμικών, καμπυλωτών και περιοδικά καμπυλωμένων κρυστάλλων, μέσω των οποίων ελέγχεται η κίνηση, και συγκεκριμένα η επιτάχυνση, υπερ-σχετικιστικών δεσμών φορτισμένων σωματιδίων, με αποτέλεσμα την εκπομπή ακτίνων γ σε διάφορες ζώνες ευρέως ή στενού φάσματος, ανάλογα με την εκάστοτε διάταξη [1][2][11]

Η ερευνητική πρόταση του έργου TECHNO-CLS αξιολογήθηκε με 99,5% και έλαβε χρηματοδότηση συνολικού προϋπολογισμού 2.6εκ. Ευρώ. Στο έργο συμμετέχουν 8 ευρωπαϊκοί ερευνητικοί φορείς και 2 ιδιωτικές επιχειρήσεις. Συντονιστής του έργου είναι το ερευνητικό κέντρο MBN με έδρα τη Φρανκφούρτη και ο καθηγητής Andrey Solon'yon, ενώ ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο έργο έχει η ερευνητική ομάδα του Ινστιτούτου Φυσικής Πλάσματος και Λείζερ (IPPL) του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ) με έδρα το Ρέθυμνο και Επιστημονικό Υπεύθυνο τον καθηγητή Νεκτάριο Α. Παπαδογιάννη. Ο ρόλος της ομάδας του ΕΛΜΕΠΑ είναι η ανάπτυξη καινοτόμου τεχνολογίας για την ελεγχόμενη παραγωγή ακτινοβολίας γ στενού φασματικού εύρους με ρυθμιζόμενα χαρακτηριστικά, μέσω της διαμόρφωσης δεσμών σχετικιστικών ποζιτρονίων μέσα σε ακουστικά οδηγούμενους κρυσταλλικούς κυματιστές. Η ομάδα, σε συνεργασία με την ομάδα του MBN, έχουν ήδη παράξει τα πρώτα αποτελέσματα υπολογιστικών προσομοιώσεων που αποδεικνύουν την υλοποιησιμότητα της τεχνολογίας [12]. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των ακουστικά οδηγούμενων κρυσταλλικών κυματιστών, ενώ στην Ενότητα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

1. Ακουστικά οδηγούμενοι κρυσταλλικοί κυματιστές

Ο καινοτόμος Ακουστικά οδηγούμενος Κρυσταλλικός Κυματιστής (Α-ΚΚ) που ανέπτυξε η ομάδα του ΕΛΜΕΠΑ υιοθετεί έναν σχεδιασμό παρόμοιο με τους γνωστούς Ακουστο-Οπτικούς Διαμορφωτές (ΑΟΔ) που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της έντασης των ακτίνων λείζερ. Η συσκευή αναπτύσσεται γύρω από έναν μονοκρυστάλλο με κυβική μοναδιαία κυψελίδα, όπως είναι οι υψηλής ποιότητας κρύσταλλοι Si ή Ge. Το σχηματικό διάγραμμα ενός Α-ΚΚ τύπου ΑΟΔ φαίνεται στο Εικόνα 1. Ένα διάμηκες ακουστικό κύμα (AW) με μήκος κύματος λ_{AW} που παράγεται από πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα συχνότητας δεκάδων MHz, προκαλεί περιοδικές

περιοχές πύκνωσης και αραίωσης στον κρύσταλλο κατά μήκος της κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης [100] (στην εικόνα υποδεικνύονται με διαβαθμισμένη σκίαση). Η παραμόρφωση οδηγεί σε περιοδική μετατόπιση των κρυσταλλικών επιπέδων (110), που χαρακτηρίζεται από το προφίλ κάμψης $y = S(z)$, το οποίο είναι κατά προσέγγιση αρμονικό. Δεδομένου ότι η γωνία μεταξύ των αξόνων [100] και [110] είναι 45° , η περίοδος κάμψης λ_u , και κατά συνέπεια το μήκος κύματος του κυματισμού των ποζιτρονίων, σχετίζεται με το μήκος κύματος του ακουστικού κύματος λ_{AW} ως $\lambda_u = \sqrt{2} \lambda_{AW}$. Το πλάτος a της περιοδικής κάμψης είναι ευθέως ανάλογο της μετατόπισης ρ των επιπέδων (100) από την αρχική τους θέση ή ισοδύναμα με το πλάτος A_{AW} του ακουστικού κύματος. Μια δέσμη υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων κατευθύνεται κατά μήκος της διεύθυνσης του επιπέδου (110). Καθώς τα σωματίδια διασχίζουν τον κρύσταλλο, η κίνησή τους ακολουθεί την περιοδική κάμψη, οδηγώντας στην εκπομπή ισχυρής ακτινοβολίας κυματιστή (undulation radiation). Υπό συνθήκες αρκετά μικρής περιόδου λ_u , μεγάλου πλάτους a , κατάλληλου πάχους κρυστάλλου L και υψηλής ενέργειας δέσμης ϵ , αυτή η ακτινοβολία εκτείνεται στην περιοχή των ακτίνων γ .

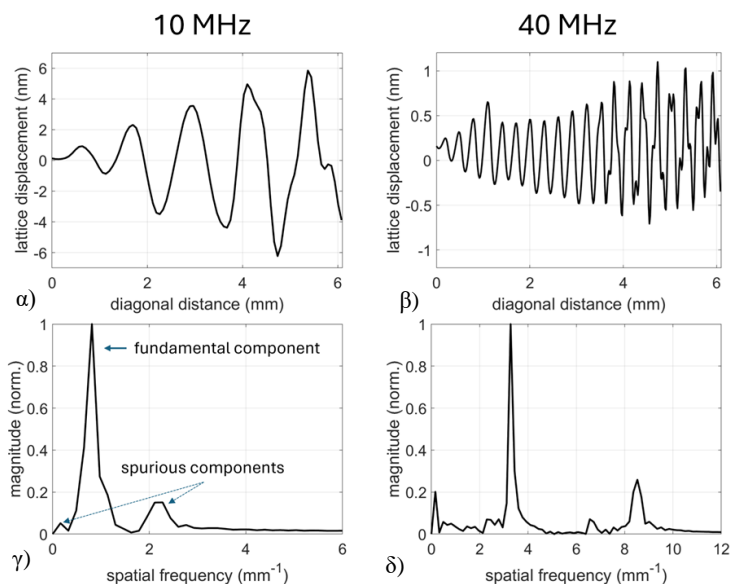


Εικόνα 1: σχηματικό διάγραμμα α) ακουστικά οδηγούμενου κρυσταλλικού κυματιστή τύπου ακουστο-οπτικού διαμορφωτή και β) μοριακής δομής μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Προσαρμοσμένη από [12].

2. Προσομοίωση ακουστικά οδηγούμενων κρυσταλλικών διαμορφωτών

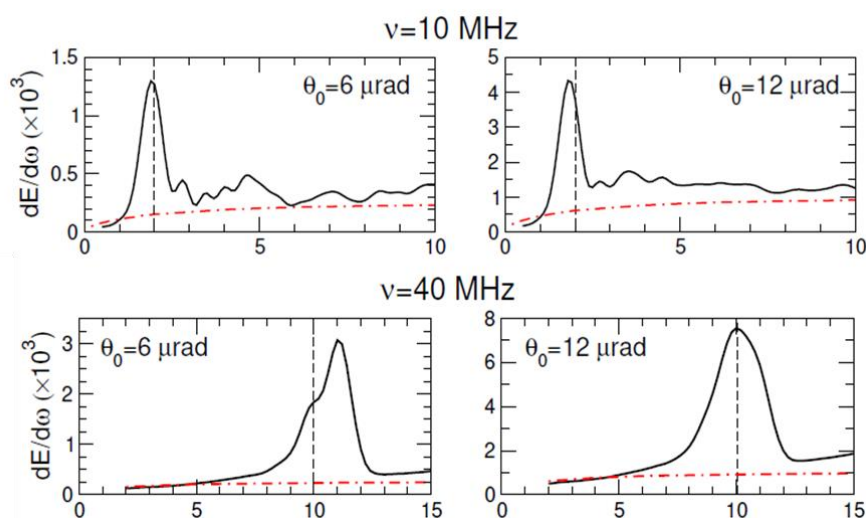
Προσομοιώθηκε σχήμα A-KK κατάλληλο για δέσμες ποζιτρονίων 20 GeV σχετικά με την ακουστικά επαγόμενη παραμόρφωση του πλέγματος χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM). Ο μονοκρυσταλλός πυριτίου που εξετάστηκε είχε τις ακόλουθες διαστάσεις: $Z_c = 4.3$ mm, $Y_c = 5.3$ mm και $X_c = 0.9$ mm. Η υπερ-σχετικιστική δέσμη ποζιτρονίων διέρχεται μέσα από τον κρύσταλλο κατά μήκος της διεύθυνσης [110]. Κατά συνέπεια, το μήκος της πορείας της δέσμης είναι $L = \sqrt{2}Z_c = 6,1$ mm, το οποίο αντιστοιχεί περίπου στο μισό του μήκους $L_d(0)$ απόδρασης των ποζιτρονίων από τα κανάλια του κρυσταλλικού πλέγματος (dechanneling length).

Η εφαρμοζόμενη αρμονική πίεση στο επάνω επίπεδο XZ έχει πλάτος 4 MPa. Δύο περιπτώσεις συχνότητας, δηλαδή 10 MHz και 40 MHz, εξετάστηκαν, με ελεύθερα όρια στα δύο περιφερειακά επίπεδα XY και XZ και με απορροφητικό όριο στο κάτω επίπεδο (100) XZ. Η μετατόπιση του πλέγματος κατά τον άξονα y και τα αντίστοιχα χωρικά συχνοτικά φάσματα φαίνονται στην Εικόνα 2. Παρά την απόκλιση του προφίλ της κάμψης του πλέγματος των Εικόνων 2α) και β) από το τέλειο ημίτονο, οι θεμελιώδεις αρμονικές συνιστώσες κυριαρχούν στα συχνοτικά συχρότητας των Σχημάτων 2γ) και δ). Και στις δύο συχνότητες διέγερσης, εμφανίζονται παρασιτικές φασματικές συνιστώσες με ενέργεια της τάξης του 10% σε σχέση με τη θεμελιώδη.



Εικόνα 2: α) και β) προφίλ κάμψης πλεγματικών επιπέδων στη διεύθυνση διάδοσης των ποζιτρονίων, γ) και δ) χωρικά συχνοτικά φάσματα των προφίλ κάμψης. Προσαρμοσμένη από [12].

Η επίδραση του προφίλ κάμψης του πλέγματος στο φάσμα της παραγόμενης οπτικής ακτινοβολίας από την κυμάτωση ποζιτρονίων 20 GeV μελετήθηκε υπολογιστικά χρησιμοποιώντας μεθόδους κλασικής σχετικιστικής μοριακής μηχανικής μέσω του λογισμικού MBN Explorer. Και στις δύο περιπτώσεις, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενισχύεται σημαντικά στη συχνότητα κυματισμού σε μικρές γωνίες παρατήρησης σε σχέση με την κατεύθυνση διάδοσης των ποζιτρονίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Αυτό το αποτέλεσμα αποδεικνύει ουσιαστικά την πειραματική υλοποιησιμότητα του προτεινόμενου σχήματος A-KK, αλλά και την ρυθμισιμότητα μιας τέτοιας καινοτόμου πηγής ακτίνων γ , καθώς η αλλαγή στη συχνότητα του ακουστικού κύματος οδηγεί σε φασματική μετατόπιση της παραγόμενης ακτινοβολίας γ [12].



Εικόνα 3: προσομοίωση φάσματος εκπεμπόμενης ακτινοβολίας γ από κυματισμό υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων ενέργειας 20 GeV μέσα σε ακουστικά οδηγούμενο κρυσταλλικό κυματιστή. Προσαρμοσμένη από [12].

3. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι υπολογιστικές ερευνητικές δραστηριότητες της ομάδας του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου TECHNO-CLS με στόχο την ανάπτυξη ακουστικά οδηγούμενων κρυσταλλικών κυματιστών για την παραγωγή ακτίνων γ μέσω κυματισμού δεσμών υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων. Παρουσιάστηκε καινοτόμο σχήμα κατάλληλο για την ανάπτυξη πειραματικής διάταξης ακουστικά οδηγούμενου κρυσταλλικού κυματιστή καθώς και υπολογιστικά αποτελέσματα από προσομοίωση της λειτουργίας. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από την προσομοίωση της μετατόπισης των κρυσταλλικών επιπέδων λόγω των πυκνωμάτων και αραιωμάτων που προκαλεί η ακουστική πίεση μέσα στον κρύσταλλο. Από τις μετατοπίσεις υπολογίστηκαν τα προφίλ κάμψης των καναλιών που σχηματίζουν τα κρυσταλλικά επίπεδα στην διεύθυνση διάδοσης της δέσμης ποζιτρονίων. Τέλος, τα προφίλ κάμψης χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης

ακτινοβολίας γ κατά τον κυματισμό δέσμης υπερ-σχετικιστικών ποζιτρονίων. Βρέθηκε ότι η ακουστική διαμόρφωση των κρυσταλλικών επιπέδων πράγματι οδηγεί σε ενίσχυση της φωτεινής ακτινοβολίας σε στενό ενεργειακό εύρος γύρω από την συχνότητα κυματισμού. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την πειραματική υλοποιησιμότητα του εν λόγω σχήματος καθώς και την ρυθμισιμότητα του ως προς το ενεργειακό φάσμα και την ισχύ της οπτικής ακτινοβολίας γ .

4. Αναφορές

- [1] Korol, A. V., Solov'yon, A. V., & Greiner, W., Channeling and radiation in periodically bent crystals. Springer Berlin Heidelberg, (2014)
- [2] Korol, A., & Solov'yon, A. V., Novel Lights Sources Beyond Free Electron Lasers (No. PUBDB-2023-04589). Springer (2022)
- [3] Baskar R, Lee KA, Yeo R, Yeoh KW. Cancer and radiation therapy: current advances and future directions. *Int J Med Sci.*, **9**, 3 2012
- [4] Olive, K. A. et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. *Chin. Phys.*, **38**, 090001 (2014)
- [5] Korol, A. V., & Solov'yon, A. V., Crystal-based intensive gamma-ray light sources. *Eur. Phys. J. D*, **74**, 1-17 (2020)
- [6] A. V. Korol, G. B. Sushko, and A. V. Solov'yon, All-atom relativistic molecular dynamics simulations of channeling and radiation processes in oriented crystals, *Europ. Phys. J. D* **75**, 107 (2021)
- [7] S. Schreiber and B. Faatz, The free-electron laser flash, *High Power Laser Science and Engineering*, **3**, 1020 (2015)
- [8] Camattari, R. et al., Silicon crystalline undulator prototypes: Manufacturing and x-ray characterization. *Phys. Rev. Accel. Beams*, **22**, 4, 044701 (2019).
- [9] Tabrizi, M., Korol, A. V., Solov'yon, A. V., & Greiner, W., Feasibility of an electron-based crystalline undulator. *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 16, 164801 (2007)
- [10] <https://mbnresearch.com/TECHNO-CLS/Main>
- [11] Bandiera, L. et al., Investigation on radiation generated by sub-GeV electrons in ultrashort silicon and germanium bent crystals. *Eur. Phys. J. C*, **81**, 1-9 (2021)
- [12] Kaleris, K. et al, Narrowband gamma-ray radiation generation by acoustically driven crystalline undulators, submitted for review in *Physical Review Accelerators and Beams*.