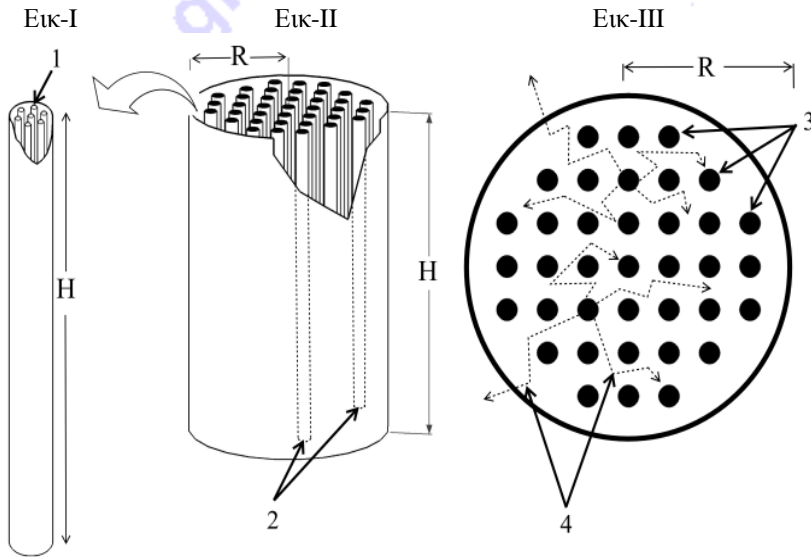


Η δομή ενός πυρηνικού αντιδραστήρα

(Σύνολο Μονάδων: 10)

Το ουράνιο εμφανίζεται στη φύση ως UO_2 και μόνο το 0,720% των ατόμων ουρανίου είναι ^{235}U . Η πυρηνική διάσπαση, που προκαλείται από νετρόνια, συμβαίνει αυθόρμητα στο ^{235}U με την εκπομπή 2-3 Νετρονίων Διάσπασης (ΝΔ) μεγάλης κινητικής ενέργειας. Η πιθανότητα διάσπασης αυξάνεται αν τα ΝΔ έχουν χαμηλές κινητικές ενέργειες. Συνεπώς, μειώνοντας την κινητική ενέργεια των ΝΔ, μπορούμε να προκαλέσουμε μια αλυσιδωτή αντίδραση σε άλλους πυρήνες ^{235}U . Αυτό αποτελεί τη βασική αρχή λειτουργίας ενός Πυρηνικού Αντιδραστήρα (ΠΑ).

Ένας τυπικός ΠΑ αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο ύψους H και ακτίνας R γεμάτο με υλικό που αποκαλείται επιβραδυντής. Κυλινδρικοί σωλήνες, που ονομάζονται κανάλια καυσίμου (με τον καθένα να περιέχει μια δεσμίδα κυλινδρικών ράβδων καυσίμου φυσικού UO_2 σε μορφή στερεού), και έχουν ύψος H , τοποθετούνται αξονικά σε ένα τετραγωνικό πλέγμα. Τα ΝΔ που εξέρχονται από ένα κανάλι καυσίμου συγκρούονται με τον επιβραδυντή, χάνοντας ενέργεια και φτάνουν στα περιβάλλοντα κανάλια καυσίμου με επαρκώς χαμηλή ενέργεια για να προκαλέσουν διάσπαση (Εικ. I-III). Η θερμότητα που παράγεται από τη διάσπαση σε μία ράβδο, μεταφέρεται σε ποσότητα ψυκτικού υγρού που ρέει κατά μήκος της ράβδου. Στο πρόβλημα αυτό θα μελετήσουμε τη Φυσική που σχετίζεται με Α) τη ράβδο καυσίμου, Β) τον επιβραδυντή και Γ) τον ΠΑ κυλινδρικής γεωμετρίας.



Σχηματική αναπαράσταση του Πυρηνικού Αντιδραστήρα (ΠΑ)
 Εικ-I: Μεγέθυνση ενός καναλιού καυσίμου (1- Ράβδοι καυσίμου)
 Εικ-II: Μια όψη του ΠΑ (2- Κανάλια καυσίμου)
 Εικ-III: Όψη του ΠΑ από πάνω (3-Τετραγωνικές διατάξεις των καναλιών καυσίμου, 4-τυπικές τροχιές.
 Εμφανίζονται μόνο τμήματα που σχετίζονται με το πρόβλημα (π.χ. οι ράβδοι ελέγχου και το ψυκτικό υγρό δεν απεικονίζονται).

A Η ράβδος καυσίμου

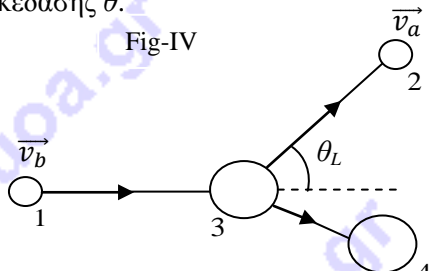
Δεδομένα για UO_2	1. Μοριακό βάρος $M_w = 0,270 \text{ kg mol}^{-1}$	2. Πυκνότητα $\rho = 1,060 \times 10^4 \text{ kg m}^{-3}$
	3. Σημείο τήξης $T_m = 3,138 \times 10^3 \text{ K}$	4. Θερμική αγωγιμότητα $\lambda = 3,280 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

A1	Θεωρήστε την ακόλουθη αντίδραση διάσπασης ενός ακίνητου πυρήνα ^{235}U μετά την απορρόφηση ενός νετρονίου αμελητέας κινητικής ενέργειας. $^{235}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{94}\text{Zr} + ^{140}\text{Ce} + 2 ^1_0\text{n} + \Delta E$ Να εκτιμήσετε τη ολική ενέργεια διάσπασης ΔE που απελευθερώνεται (σε MeV). Δίνονται οι πυρηνικές μάζες: $m(^{235}\text{U}) = 235,044 \text{ u}$, $m(^{94}\text{Zr}) = 93,9063 \text{ u}$, $m(^{140}\text{Ce}) = 139,905 \text{ u}$, $m(^1_0\text{n}) = 1,00867 \text{ u}$ και $1 \text{ u} = 931,502 \text{ MeV c}^{-2}$. Να αγνοήσετε την ύπαρξη μη μηδενικού φορτίου.	0,8
A2	Να εκτιμήσετε το πλήθος N των ατόμων ^{235}U ανά μονάδα όγκου στο φυσικό UO_2 .	0,5
A3	Υποθέστε ότι η πυκνότητα ροής νετρονίων $\phi = 2.000 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ στο καύσιμο είναι ομοιόμορφη. Η ενεργός διατομή διάσπασης (δηλ. το εμβαδό που καλύπτει ο πυρήνας-στόχος) του πυρήνα ^{235}U είναι $\sigma_f = 5,400 \times 10^{-26} \text{ m}^2$. Αν 80.00% της ενέργειας διάσπασης προκύπτει υπό μορφή θερμότητας, να εκτιμήσετε μια τιμή του Q (σε W m^{-3}), δηλ. του ρυθμού παραγωγής θερμότητας στη ράβδο ανά μονάδα όγκου. Δίνεται $1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$	1,2

A4	<p>Η διαφορά θερμοκρασίας στη σταθερή κατάσταση μεταξύ του κέντρου (T_c) και της επιφάνειας (T_s) της ράβδου μπορεί να εκφραστεί ως $T_c - T_s = k F(Q, a, \lambda)$, όπου $k = 1/4$ είναι μια αδιάστατη σταθερά και a είναι η ακτίνα της ράβδου. Να βρείτε την έκφραση του $F(Q, a, \lambda)$ εφαρμόζοντας διαστατική ανάλυση. Επισημαίνεται ότι λ είναι η θερμική αγωγιμότητα του UO_2.</p>	0,5
A5	<p>Η επιθυμητή θερμοκρασία του ψυκτικού είναι $5,770 \times 10^2$ K. Να εκτιμήσετε τη μέγιστη τιμή a_n της ακτίνας a της ράβδου.</p>	1,0

B Ο Επιβραδυντής

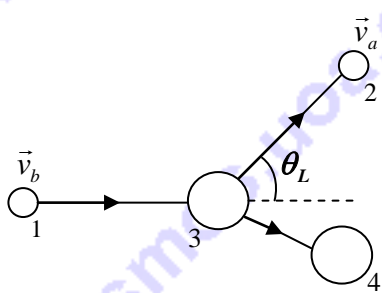
Ας θεωρήσουμε τη διδιάστατη ελαστική κρούση ενός νετρονίου μάζας $1 u$ και ενός ηλεκτρονίου επιβράδυνσης μάζας $A u$. Πριν την κρούση όλα τα άτομα επιβράδυνσης μπορεί να θεωρηθούν σε ηρεμία στο Σύστημα Αναφοράς Εργαστηρίου (ΣΑΕ). Έστω \vec{v}_b και \vec{v}_a οι διανυσματικές ταχύτητες του νετρονίου πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα στο ΣΑΕ. Έστω \vec{v}_m η διανυσματική ταχύτητα του Συστήματος Αναφοράς Κέντρου Μάζας (ΣΑΚΜ) σε σχέση με το ΣΑΕ και θ η γωνία σκέδασης του νετρονίου στο ΣΑΚΜ. Όλα τα σωματίδια που εμπλέκονται σε κρούσεις κινούνται με μη σχετικιστικές ταχύτητες.

B1	<p>Η κρούση στο ΣΑΕ φαίνεται σχηματικά (Εικ-IV), όπου θ_L είναι η γωνία σκέδασης (Fig-IV). Να σχεδιάσετε την εικόνα της κρούσης στο ΣΑΚΜ. Να γράψετε πάνω στο σχήμα τις διανυσματικές ταχύτητες των σωματιδίων 1, 2 και 3, οι οποίες θα εκφραστούν συναρτήσει των \vec{v}_b, \vec{v}_a και \vec{v}_m. Επίσης να σχεδιάσετε τη γωνία σκέδασης θ.</p>	
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;"> <p><i>Κρούση στο Σύστημα Αναφοράς Εργαστηρίου</i></p> <p>1-Νετρόνιο πριν την κρούση</p> <p>2-Νετρόνιο μετά την κρούση</p> <p>3- Άτομο επιβράδυνσης πριν την κρούση</p> <p>4- Άτομο επιβράδυνσης μετά την κρούση</p> </div>
B2	<p>Να εκφράσετε τις αριθμητικές ταχύτητες (μέτρα ταχυτήτων) v και V, του νετρονίου και του ατόμου επιβράδυνσης στο ΣΑΚΜ μετά την κρούση, συναρτήσει των A και v_b.</p>	1,0
B3	<p>Να εξαγάγετε τη σχέση για το $G(a, \theta) = E_a / E_b$, όπου E_b και E_a είναι οι κινητικές ενέργειες του νετρονίου, στο ΣΑΕ, πριν και μετά την κρούση αντίστοιχα και $a \equiv [(A - 1) / (A + 1)]^2$.</p>	1,0
B4	<p>Υποθέστε ότι η προηγούμενη σχέση ισχύει για μόριο D_2O. Να υπολογίσετε τη μέγιστη δυνατή κλασματική απώλεια ενέργειας $f_l \equiv \frac{E_b - E_a}{E_b}$ του νετρονίου για το άτομο επιβράδυνσης D_2O ($20 u$).</p>	0,5

C Ο Πυρηνικός Αντιδραστήρας

Για να λειτουργήσει ένας ΠΑ για οποιαδήποτε σταθερή ροή ψ (σταθερή κατάσταση), τα διαφεύγοντα νετρόνια πρέπει να αναπληρώνονται από παραγωγή πλεοναζόντων (επί πλέον) νετρονίων μέσα στον αντιδραστήρα. Για έναν αντιδραστήρα με κυλινδρική γεωμετρία ο ρυθμός διαρροής είναι $k_1 [(2,405/R)^2 + (\pi/H)^2] \psi$ και ο ρυθμός παραγωγής πλεοναζόντων νετρονίων είναι $k_2 \psi$. Οι σταθερές k_1 και k_2 εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού του ΠΑ.

C1	<p>Θεωρήστε έναν ΠΑ με $k_1 = 1,021 \times 10^{-2} m^{-1}$ and $k_2 = 8,787 \times 10^{-3} m^{-1}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι υπό σταθερό όγκο ο ρυθμός διαρροής πρέπει να μειωθεί για αποτελεσματική χρήση του καυσίμου, να υπολογίσετε τις διαστάσεις του ΠΑ στην σταθερή κατάσταση.</p>	1,5
C2	<p>Τα κανάλια των καυσίμων σχηματίζουν τετραγωνική διάταξη (εικ. III). Η ενεργός ακτίνα κάθε καναλιού (αν ήταν στερεό) είναι $3,617 \times 10^{-2} m$ και η μικρότερη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών καναλιών είναι $0,286 m$. Να εκτιμήσετε το πλήθος των καναλιών καυσίμου F_n στον αντιδραστήρα και τη μάζα M του UO_2 που απαιτείται για να λειτουργήσει ο ΠΑ σε σταθερή κατάσταση.</p>	1,0

Αρ. Ερ.	Απάντηση	Μονάδες
A1	$\Delta E =$	0,8
A2	$N =$	0,5
A3	$Q =$	1,2
A4	$T_c - T_s =$	0,5
A5	$a_u =$	1,0
B1	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Σύστημα Αναφοράς Εργαστηρίου</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Σύστημα Αναφοράς Κέντρου Μάζας</p> </div> </div>	1,0



B2	$v =$	$V =$	1,0
B3	$G(\alpha, \theta) =$		1,0
B4	$f_i =$		0,5
C1	$R =$	$H =$	1,5
C2	$F_n =$	$M =$	1,0