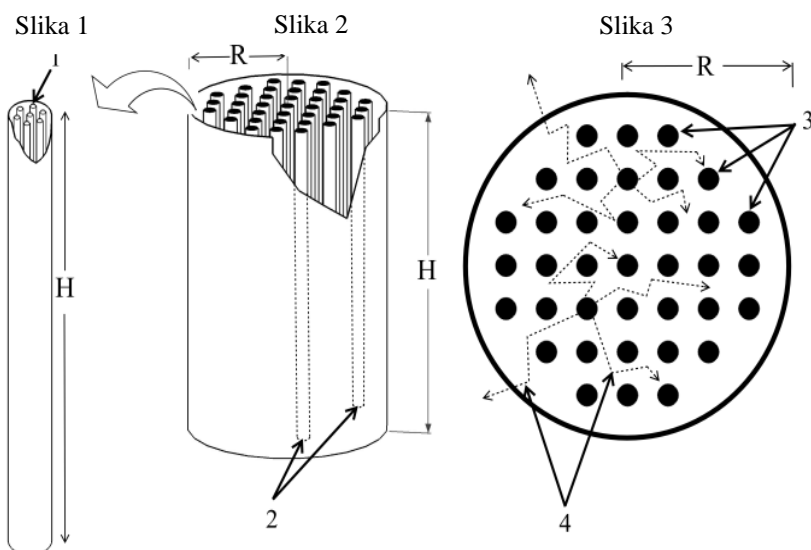


Načrtovanje jedrskega reaktorja

(Skupne točke: 10)

V naravi je uran v obliki uranovega oksida UO_2 , pri čemer je le 0,720% atomov urana izotop ^{235}U . Nevtron, ki trči v jedro ^{235}U , sproži razcep tega jedra, pri čemer se iz jedra sprostijo tudi 2 ali 3 nevtroni z veliko kinetično energijo. Verjetnost, da nevtron, ki trči ob jedro urana, sproži razcep tega jedra, je večja, če ima nevtron majhno kinetično energijo. Če kinetično energijo nevtronov, sproščenih ob razcepu jedra, zmanjšamo, lahko s tem sprožimo verigo razcepov v preostalih jedrih ^{235}U . Opisan mehanizem je osnova delovanja jedrskih reaktorjev (JR).

Tipičen JR je zgrajen iz valjaste posode z višino H in polmerom R , napolnjene s snovjo, ki jo imenujemo moderator. V valjastih ceveh, imenovanih gorivni kanali, so skupki valjastih gorivnih celic naravnega UO_2 v trdnem agregatnem stanju. Višina gorivnih celic je H . Gorivni kanali so v JR postavljeni med seboj vzporedno, v prečnem prerezu pa v kvadratno mrežo. Nevtroni, sproščeni pri razcepih, prihajajo iz gorivnega kanala navzven in trkajo z moderatorjem. Ob trkih izgubljajo energijo in dosežejo sosednje gorivne kanale z dovolj majhno kinetično energijo, da v njih sprožijo verižno reakcijo (slike 1-3). Toplota, ki se ob jedrskih razcepih sprošča v gorivnih celicah, se prevaja v hladilno tekočino, ki gorivne celice obliva. Pri tej nalogi bomo obravnavali nekaj fizike, povezane z gorivnimi celicami (del A), moderatorjem (del B) in valjastim JR (del C).



Shematični prikaz jedrskega reaktorja (JR)

Slika 1: Gorivni kanal z gorivnimi celicami (kaže jih puščica 1)
 Slika 2: JR z gorivnimi kanali (kaže jih puščica 2)
 Slika 3: Pogled z vrha na JR (puščica 3 kaže kvadratno mrežo gorivnih kanalov in puščica 4 kaže primer tirov nevtronov).
 Prikazani so samo tisti sestavni deli JR, ki so pomembni pri tej nalogi (niso prikazane kontrolne palice in hladilna tekočina).

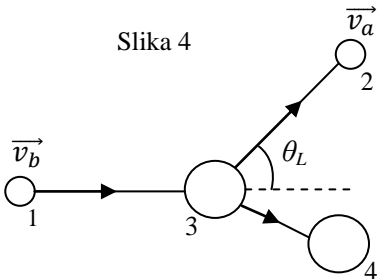
A Gorivna celica

Podatki za UO_2	1. Molekulska masa $M_w = 0,270 \text{ kg mol}^{-1}$	2. Gostota $\rho = 1,060 \times 10^4 \text{ kg m}^{-3}$
	3. Tališče $T_m = 3,138 \times 10^3 \text{ K}$	4. Toplotna prevodnost $\lambda = 3,280 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

A1	<p>Za razcepno reakcijo, pri kateri mirujoče jedro ^{235}U najprej absorbira nevtron z zanemarljivo kinetično energijo in se potem razcepi,</p> $^{235}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{94}\text{Zr} + ^{140}\text{Ce} + 2 ^1_0\text{n} + \Delta E$ <p>oceni energijo ΔE (v MeV), ki se pri tem jedrskem razcepu sprosti. Mase jeder so: $m(^{235}\text{U}) = 235,044 \text{ u}$; $m(^{94}\text{Zr}) = 93,9063 \text{ u}$; $m(^{140}\text{Ce}) = 139,905 \text{ u}$; $m(^1_0\text{n}) = 1,00867 \text{ u}$, kjer je u tako imenovana atomska masna enota, $1 \text{ u} = 931,502 \text{ MeV c}^{-2}$. V reakciji ignoriraj neohranitev naboja.</p>	0.8
A2	Oceni N , število atomov ^{235}U na enoto prostornine v naravnem UO_2 .	0.5
A3	Predpostavi, da je gostota toka nevtronov $\varphi = 2,000 \times 10^{18} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na gorivo povsod enaka. Presek jedra ^{235}U za zapisano reakcijo (efektivni presek jedra kot tarče) je $\sigma_f = 5,400 \times 10^{-26} \text{ m}^2$. Če se 80,00 % energije pri razcepih sprošča kot toplota, oceni Q (v W m^{-3}), toplotno moč gorivne celice na prostorninsko enoto. $1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$.	1.2
A4	Med središčem gorivne celice (T_c) in njeno površino (T_s) obstaja stalna temperaturna razlika, za katero velja $T_c - T_s = k F(Q, a, \lambda)$, kjer je $k = 1/4$ brezdimenzijska konstanta, a je polmer gorivne celice in λ je koeficient toplotne prevodnosti UO_2 . Z dimenzijsko analizo poišči $F(Q, a, \lambda)$.	0.5
A5	Optimalna temperatura hladilne tekočine je $5,770 \times 10^2 \text{ K}$. Oceni zgornjo mejo a_u za polmer gorivne celice.	1.0

B Moderator

Obravnavajmo elastični trk nevtrona z maso 1 u in atomom moderatorja z maso A u v dveh dimenzijah. Pred trkom naj v laboratorijskem sistemu (LS) vsi atomi moderatorja mirujejo. Označimo z \vec{v}_b in \vec{v}_a po vrsti hitrosti nevtrona pred ($b...$ before) in po trku ($a...$ after) v LS. Z \vec{v}_m označimo hitrost težišča obeh v trku sodelujočih delcev glede na LS in s θ sipalni kot nevtrona v težiščnem sistemu TS (v TS težišče miruje). Vse v trku sodelujoče delce obravnavaj nerelativistično.

B1	<p>Na sliki 4 je shema trka v LS, s θ_L je označen sipalni kot. Podobno skiciraj shemo trka v TS: na skici označi θ in hitrosti delcev 1, 2 in 3, ki jih izrazi z \vec{v}_b, \vec{v}_a in \vec{v}_m.</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>Slika 4</p>  </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-left: 20px;"> <p style="text-align: center;"><i>Trk v laboratorijskem sistemu</i></p> <p>1-Nevtron pred trkom 2-Nevtron po trku 3-Atom moderatorja pred trkom 4- Atom moderatorja po trku</p> </div> </div>	1.0
B2	S parametroma A in v_b izrazi v TS hitrost nevtrona v in hitrost atoma moderatorja V .	1.0
B3	Izpelji izraz $G(\alpha, \theta) = E_a/E_b$, kjer je E_b kinetična energija nevtrona pred in E_a kinetična energija nevtrona po trku v LS. Parameter α definiramo kot $\alpha = \left[\frac{(A-1)}{(A+1)} \right]^2$.	1.0
B4	Predpostavimo, da zgornji izraz drži za molekulo težke vode D_2O . Izračunaj največji možni delež izgube energije nevtrona f_l (kjer je $f_l = 1 - \frac{E_a}{E_b}$) na molekuli moderatorja iz težke vode D_2O z maso 20 u.	0.5

C Jedrski reaktor

Da JR deluje pri katerem koli konstantnem toku nevtronov ψ (stacionarno stanje), moramo pobegle nevtrone nadomeščati z nevtroni, ki med razcepom jeder nastajajo v reaktorju. Za reaktor valjaste oblike je število pobeglih nevtronov na časovno enoto $k_1[(2,405/R)^2 + (\pi/H)^2] \psi$, medtem ko je število novih nevtronov zaradi razcepov jeder na časovno enoto enako $k_2 \psi$. Konstanti k_1 in k_2 sta odvisni od izvedbe JR.

C1	Obravnavaj JR s $k_1 = 1,021 \times 10^{-2} \text{ m}$ in $k_2 = 8,787 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. Iz pogoja, da mora biti za učinkovito porabo goriva pri konstantni prostornini število pobeglih nevtronov na časovno enoto minimalno, določi dimenzije JR v stacionarnem delovanju.	1.5
C2	Gorivni kanali so razporejeni v kvadratno mrežo (slika 3) z razdaljo med najbližjimi sosedi 0,286 m, polmer gorivnega kanala je $3,617 \times 10^{-2} \text{ m}$. Oцени število gorivnih kanalov F_n v reaktorju in maso M uranovega oksida UO_2 , potrebno za stacionarno delovanje JR.	1.0
Cx	Kdo ima najlepše noge v Domžalah ☺?	0.0