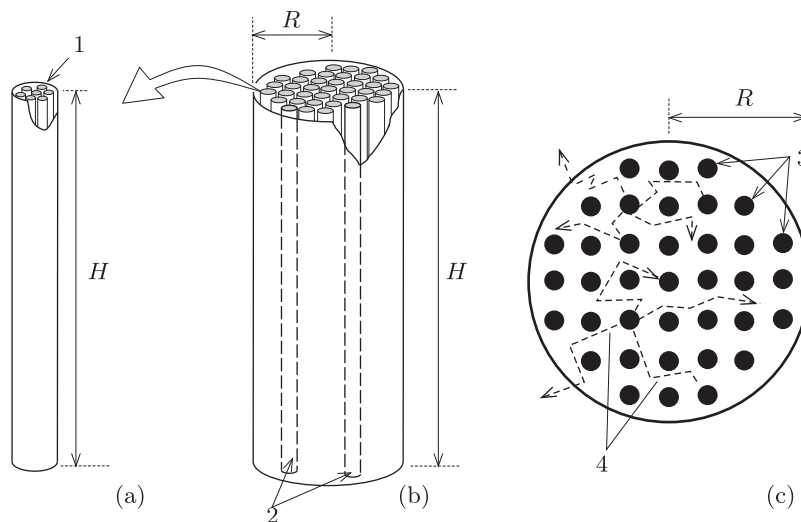


### 3. feladat. Nukleáris reaktor tervezése (összesen 10 pont).

Az urán a természetben  $\text{UO}_2$  formájában fordul elő, és az uránatomoknak csupán 0,720%-a  $^{235}\text{U}$ . Neutron hatására az  $^{235}\text{U}$  könnyen elhasad, melynek során 2-3 nagy mozgási energiájú hasadványneutron is kibocsátódik. Ennek a hasadásnak a valószínűsége megnő, ha a hasadást kiváltó neutronok mozgási energiája kicsi. Tehát a hasadványneutronok mozgási energiájának csökkentésével az  $^{235}\text{U}$  magok hasadási láncreakciója idézhető elő. Ez képezi az energiatermelő nukleáris reaktor (NR) elvét.

Egy tipikus NR egy  $H$  magasságú,  $R$  sugarú hengeres tartályból áll, ami az ún. moderátoranyaggal van feltöltve. Ebben tengelyirányban hengeres csövek, az ún. üzemanyag-kazetták helyezkednek el négyzetrácsba rendezve, melyek belsejében  $H$  magasságú, szilárd állapotban lévő, természetes  $\text{UO}_2$  üzemanyagrudak találhatók. A kazettából kilépő hasadványneutronok ütköznek a moderátorral, így energiát veszítenek, hogy aztán a környező kazettákat a hasítás-hoz szükséges kicsi energiával éri el. A 6. ábrán csak a feladat szempontjából releváns alkatrészek láthatók (pl. a szabályozórudak és a hűtőközeg nem). A hasadás miatt az üzemanyagrudakban fejlődő hő a hosszirányban áramló hűtőközegnek adódik át. Ebben a feladatban az üzemanyagrudakban (A rész), a moderátorban (B rész) és a hengeres geometriájú NR-ben (C rész) zajló fizikai folyamatokat tanulmányozzuk.



6. ábra. A nukleáris reaktor (NR) vázlatos rajza.

(a) Egy üzemanyag-kazetta nagyított képe (1 – üzemanyagrúd).

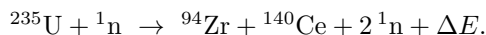
(b) Az NR képe (2 – üzemanyag-kazetta).

(c) NR felülnézetben (3 – az üzemanyag-kazetták négyzetrácsba rendezve; 4 – tipikus neutronpályák).

#### A rész. Az üzemanyagrúd

$\text{UO}_2$  adatai: móltömege  $M = 0,271 \text{ kg mol}^{-1}$ ; sűrűsége  $\rho = 1,060 \text{ kg m}^{-3}$ ; olvadáspontja  $T_{\text{olv}} = 3,138 \cdot 10^3 \text{ K}$ ; hővezetési tényezője  $\lambda = 3,280 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

**A.1.** Tekintsük a következő hasadási reakciót, melyben egy álló  $^{235}\text{U}$  elnyel egy elhanyagolható mozgási energiájú neutron:



Becsüljük meg a hasadás során felszabaduló teljes  $\Delta E$  energiát MeV-ben! Az atommagtömegek:  $m(^{235}\text{U}) = 235,044 \text{ u}$ ;  $m(^{94}\text{Zr}) = 93,9063 \text{ u}$ ;  $m(^{140}\text{Ce}) = 139,905 \text{ u}$ ;  $m(^1_0\text{n}) = 1,00867 \text{ u}$  és  $1 \text{ u} = 931,502 \text{ MeV}c^{-2}$ . A töltés megmaradásával ne foglalkozzunk. (0,8 pont)

**A.2.** Adjunk becslést a természetes  $\text{UO}_2$ -ban lévő  $^{235}\text{U}$  atomok térfogategységre eső  $N$  számára! (0,5 pont)

**A.3.** Tegyük fel, hogy a neutronfluxus-sűrűség az üzemanyagban homogén, nagysága  $\varphi = 2,000 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Egy  $^{235}\text{U}$  atommag hasadási hatáskeresztmetszete (a céltárgy atommag effektív keresztmetszete)  $\sigma_f = 5,400 \cdot 10^{-26} \text{ m}^2$ . Határozzuk meg az üzemanyagrúdban térfogategységenként fejlődő hő  $Q$  keletkezési ütemét ( $\text{W m}^{-3}$ -ben), ha a hasadásból származó energia 80,00%-a alakul hővé!  $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ . (1,2 pont)

**A.4.** Az üzemanyagrúd közepének ( $T_c$ ) és felületének ( $T_s$ ) hőmérséklete közötti különbség állandósult állapotban  $T_c - T_s = kF(Q, a, \lambda)$  alakban írható fel, ahol  $k = \frac{1}{4}$  egy dimenziótlan állandó, a pedig az üzemanyagrúd sugara. Határozzuk meg  $F(Q, a, \lambda)$ -t dimenzióanalízissel! Itt  $\lambda$  az  $\text{UO}_2$  hővezetési tényezője. (0,5 pont)

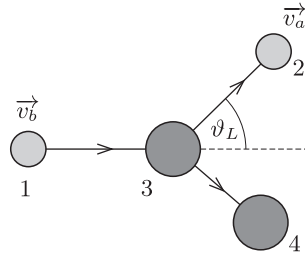
**A.5.** A hűtőközeg kívánt hőmérséklete  $5,770 \cdot 10^2 \text{ K}$ . Adjunk becslést meg az üzemanyagrúd a sugarának  $a_n$  felső határára! (1,0 pont)

#### B rész. A moderátor

Tekintsünk egy kétdimenziós rugalmas ütközést egy  $1 \text{ u}$  tömegű neutron és egy  $A \cdot \text{u}$  tömegű moderátoratom között. Az ütközés előtt mindegyik moderátoratomot tekintünk nyugvónak a laboratóriumi vonatkoztatási rendszerben (LR).

Jelölje  $\vec{v}_b$  és  $\vec{v}_a$  a neutron sebességvektorát rendre az ütközés előtt (before) és után (after) az LR-ben. Legyen  $\vec{v}_m$  a tömegközépponti (TKP) vonatkoztatási rendszer sebességvektora az LR-hez képest,  $\vartheta$  pedig a neutron szóródási szöge a TKP rendszerben. Az ütközésekben résztvevő összes részecske nemrelativisztikus sebességgel mozog.

**B.1.** A 7. ábrán látható az ütközés vázlatja az LR-ben, ahol  $\vartheta_L$  a szóródási szög. Vázzuk fel az ütközést a TKP rendszerben!



7. ábra. Az ütközés a laboratóriumi rendszerben.

1 – a neutron az ütközés előtt; 2 – a neutron az ütközés után;  
3 – moderátoratom ütközés előtt; 4 – moderátoratom ütközés után

Tüntessük fel a részecskék sebességvektorát az 1-es, 2-es és 3-as állapotokban  $\vec{v}_b$ ,  $\vec{v}_a$  és  $\vec{v}_m$  segítségével! Jelöljük be a  $\vartheta$  szóródási szöget is! (1,0 pont)

**B.2.** Adjuk meg a neutron  $v$ , illetve a moderátoratom  $V$  ütközés utáni sebességét a TKP rendszerben  $A$  és  $v_b$  segítségével! (1,0 pont)

**B.3.** Fejezzük ki a  $G(\alpha, \vartheta) = E_a/E_b$  mennyiséget, ahol  $E_b$  és  $E_a$  a neutron LR-beli mozgási energiája rendre az ütközés előtt és után, valamint

$$\alpha \equiv \left( \frac{A-1}{A+1} \right)^2 ! \quad (1,0 \text{ pont})$$

**B.4.** Tegyük fel, hogy az előző kifejezés érvényes  $D_2O$  molekulára is. Számítsuk ki a neutron lehetséges legnagyobb relatív energiavesztését, az  $f_l \equiv \frac{E_b - E_a}{E_b}$  mennyiséget,  $D_2O$  (20 u) moderátor esetén. (0,5 pont)

### C rész. A nukleáris reaktor

Ahhoz, hogy az NR-t állandó  $\psi$  neutronfluxussal működtessük (állandósult állapot), az elszökő neutronokat a reaktorban keletkező többletneutronoknak pótolniuk kell. Egy hengeres geometriájú reaktornál a neutronok szökési üteme  $k_1 [(2,405/R)^2 + (\pi/H)^2] \psi$ , a többletneutronok keletkezési üteme pedig  $k_2 \psi$ . A  $k_1$  és  $k_2$  állandók az NR anyagi tulajdonságaitól függenek.

**C.1.** Tekintsünk egy NR-t, melyre  $k_1 = 1,021 \cdot 10^{-2} \text{ m}$  és  $k_2 = 8,787 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ . Figyelembe véve, hogy adott térfogat mellett szeretnénk minimalizálni a szökési ütemet a hatékony üzemelés érdekében, határozzuk meg az NR méreteit állandósult állapotban! (1,5 pont)

**C.2.** Az üzemanyag-kazetták négyzettrácsba vannak rendezve (6/c. ábra), a legközelebbi szomszédok közötti távolság 0,286 m. Az üzemanyag-kazetták effektív sugara (mintha tömörök lennének)  $3,617 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ . Becsüljük meg az üzemanyag-kazetták  $F_n$  számát a reaktorban, valamint az NR állandósult állapotban történő üzemeltetéséhez szükséges  $UO_2$  anyag  $M$  tömegét! (1,0 pont)