

# XI. SZILÁRD LEÓ NUKLEÁRIS TANULMÁNYI VERSENY

## Beszámoló, I. rész

Sükösd Csaba  
BME Nukleáris Technika Tanszék

Szilárd Leó születésének centenáriuma alkalmából, Marx György professzor kezdeményezésére 1998-ban került először megrendezésre a Szilárd Leó Országos Középiskolai Tanulmányi Verseny. Azóta a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat minden évben megrendezi a versenyt. 2006 óta határon túli magyar anyanyelvű iskolák tanulói részére is megnyitottuk a részvétel lehetőségét. Az idén ezzel három erdélyi iskola, a Báthory István Elméleti Líceum (Kolozsvár), a János Zsigmond Unitárius Kollégium (Kolozsvár), valamint a Nagykárolyi Elméleti Líceum (Nagykároly) élt, ahonnan összesen tizenkét első kategóriás (11–12. osztályos), és huszonkilenc junior kategóriás tanulót neveztek be a versenybe. Sajnos Felvidékről, Vajdaságból és Kárpátaljáról 2008-ban sem kaptunk nevezéseket. Összesen 215 első kategóriás és 113 junior kategóriás nevezés érkezett.

A 2008. február 25-én megtartott első forduló (válogató verseny) tíz feladatát az iskolákban lehetett megoldani három óra alatt. Kijávitás után a tanárok azokat a megoldásokat küldték be a BME Nukleáris Technika Tanszékére, ahol a 9–10. osztályos (junior) versenyzők legalább 40%-os, a 11–12. osztályos (I. kategóriás) versenyzők legalább 60%-os eredményt értek el. Ezeket ellenőrizve egy egyetemi oktatókból álló bírálóbizottság a legjobb 10 junior és a legjobb 20 első kategóriás versenyzőt hívta be a paksi Energetikai Szakközépiskolában 2008. április 19-én megrendezett döntőre. A döntőn minden behívott versenyző megjelent. Az idén négy lány is bejutott a döntőbe, mindannyian az I. kategóriában. A verseny fordulóján (mobiltelefon és internet kivételével) bármilyen segéd-eszköz használható volt.

Az alábbiakban ismertetjük a válogató verseny, valamint a döntő feladatait, és röviden a megoldásokat. Valamennyi feladatra 5 pontot lehetett kapni.

## A válogató verseny (I. forduló) feladatai

### 1. feladat

a) Miért állította le az USA Reaktorbiztonsági Bizottsága a grafit moderátoros, vízhűtésű reaktorokat már 1953-ban?

b) Melyik magyar származású tudós volt elnöke ennek a bizottságnak?

*Megoldás:* a) Mert a grafitall moderált és vízzel hűtött reaktoroknak pozitív üregtényezője lehet, amely a reaktor biztonságos üzemét veszélyeztetheti. b) *Teller Ede.*

### 2. feladat

A következő idézet Marie Curie 1903-ban készült doktori értekezéséből való.

„Indukált radioaktivitás létesíthető úgy is, hogy egyes anyagokat urániummal együtt oldunk fel. A kísérlet báriummal sikerült. Ha *Derierne* eljárása szerint kénsavat töltünk urániumot és báriumot tartalmazó oldatba, a lecsapott bárium-szulfát aktivitást visz magával, ezalatt az urániumsó aktivitásának egy részét elveszíti. *Becquerel* azt találta, hogy többször ismételve ezen eljárást, oly urániumot kapunk, mely már alig aktív. Azt lehetne hinni ezek után, hogy ezen eljárással sikerült az urániumtól egy ezen fémtől különböző radioaktív testet elválasztani, amelynek jelenléte okozza az uránium aktivitását. Ez azonban távolról sincs így, minthogy néhány hónap múlva az uránium visszanyeri eredeti aktivitását, a lecsapott bárium-szulfát ellenben elveszti nyert aktivitását. Hasonló jelenség megy végbe a tóriummal.”

Mi lehet a magyarázata a fenti idézetnek?

*Megoldás:* A kémiai kezeléssel az urán bomlási sorának többi elemét távolították el. A maradék tiszta urán már alig mutat radioaktivitást. Pár hónap múlva ismét felszaporodnak a bomlástermékek, ezért nő meg a minta aktivitása. Az eltávolított bomlástermékek felezési ideje jóval kisebb, mint az uráné, ezért azok aktivitása gyorsan csökken.

### 3. feladat

Az  $\alpha$ -bomlást gyakran kíséri negatív  $\beta$ -bomlás, de pozitív  $\beta$ -bomlás és elektronbefogás nem. Mi lehet ennek az oka?

*Megoldás:* Az  $\alpha$ -bomlás a nehéz elemek tulajdonsága, és ezeknél az atommagoknál az energiavölgy már jócskán elhajlik a  $Z = N$  egyenestől a neutrontöbblet felé. A bomlás során a protonok és a neutronok száma ugyanannyival (kettővel) csökken, ezért a neutron/proton arány növekszik. A neutrontöbblet relatív növekedése miatt a negatív béta-bomlás közelebb visz az egyensúlyi állapothoz, hiszen a neutronok száma csökken, a protonok száma pedig nő. Pozitív béta-bomláskor és elektronbefogáskor a neutronok száma nőne és a protonok száma csökkenne, ezért ez az egyensúlyi helyzettől még távolabb vinne.

### 4. feladat

Egy röntgencső másodpercenként  $10^{15}$  darab, átlagosan 150 pm hullámhosszúságú fotont bocsát ki, ha 100 kV feszültségen 50 mA áramot vesz fel. Mekkora határfokkal működik a cső? Mire fordítódik a felvett energia jelentős része?

*Megoldás:* A felvett teljesítmény:  $P_{fel} = U \cdot I = 100 \text{ kV} \cdot 50 \text{ mA} = 5000 \text{ W}$ , a leadott hasznos teljesítmény (az 1 s alatt kibocsátott fotonok által elvitt energia):

$$P_{le} = N \cdot h \cdot f = N \cdot h \cdot \frac{\lambda}{c} = 1,36 \text{ W.}$$

A hatásfok tehát:

$$\frac{P_{le}}{P_{fel}} = \frac{1,326}{5000} = 2,65 \cdot 10^{-4}.$$

A felvett energia legnagyobb része az anód anyagát melegíti!

### 5. feladat

Torinóban őriznek egy leplet, amelyről sokan azt gondolják, hogy Krisztus halotti leple volt. A lepel korát  $^{14}\text{C}$  vizsgálattal kívánták meghatározni. A mérés szerint a lepel a XIV. század közepéből (kb. 1350-ből) származik. Hogy aránylik egymáshoz a minta  $^{14}\text{C}$  aktivitása és az, ami akkor lenne, ha a lepel valóban 2000 éves lenne?

**Megoldás:** Az aktivitás az időnek exponenciális függvénye.  $A(t) = A(0) \cdot 2^{-t/T}$ , ahol  $T = 5568$  év, a radiokarbon felezési ideje. Ebből:  $A(2000) = A(0) \cdot 2^{-2000/5568}$ , illetve  $A(650) = A(0) \cdot 2^{-650/5568}$ . A két aktivitás aránya:

$$\frac{A(2000)}{A(650)} = \frac{0,7796 \cdot A(0)}{0,9223 \cdot A(0)} = 0,845.$$

Tehát, ha 2000 éves lenne, akkor a jelenlegi aktivitás 0,845-szörösét kellene mutatnia.

A megoldás során feltételeztük, hogy a lepel kezdeti aktivitáskoncentrációja  $A(0)$  független attól, hogy mikor készült a lepel.

### 6. feladat

Határozd meg egy ciklotronból kilépő protonok *maximális* mozgási energiáját, ha tudjuk, hogy a ciklotron átmérője  $d$ , a gyorsítófeszültség frekvenciája pedig  $f$ .

**Megoldás:** A ciklotronban a protonok körpályán tartásához szükséges centripetális erőt a mágneses Lorentz-erő biztosítja. Az erők abszolút értékére vonatkozó egyenlet:

$$m \frac{v^2}{R} = e v B$$

(mivel a sebesség és a mágneses mező merőlegesek egymásra). Ebből kapjuk:

$$v = \frac{e B R}{m} \quad (*)$$

A maximális mozgási energiához  $v_{\max}$  kell, ami akkor következik be, amikor a protonok pályasugara a lehető legnagyobb:  $R = d/2$ . Így kapjuk:

$$E_{kin(\max)} = \frac{m v_{\max}^2}{2} = \frac{1}{2} m \left( \frac{e B d}{2 m} \right)^2 = \frac{e^2 B^2 d^2}{8 m}.$$

A gyorsítás feltétele, hogy az alkalmazott feszültség periódusideje ( $1/f$ ) egyezzen meg a protonok körülfordulási idejével, azaz

$$\frac{1}{f} = \frac{2 \pi R}{v}.$$

Ide (\*)-ból behelyettesítve a sebességet kapjuk

$$f = \frac{e B}{2 \pi m}.$$

Ebből  $e B = 2 \pi \cdot f \cdot m$ , amelyet a maximális energia kifejezésébe helyettesítve kapjuk:

$$E_{kin(\max)} = \frac{4 \pi^2 f^2 m^2 d^2}{8 m} = \frac{1}{2} \pi^2 d^2 f^2 m.$$

### 7. feladat

A technécium ( $Z = 43$ ) egyik izotópjá sem stabil, messerségesen állítják elő. Az Észak-Amerika  $^{99}\text{Tc}$  ellátásáért felelős kanadai kutatóreaktort (NRU, Chalk River, Ontario) 2007 novemberében biztonsági problémák miatt a tervezettnél hosszabb időre le kellett állítani. A földrész technécium-ellátása ezzel megbénult. Figyelembe véve a heti átlag 300 000 db  $^{99}\text{Tc}$  alapú orvosi vizsgálatot, a kanadai kormány a biztonsági aggályok ellenére egy hónappal később újraindította a reaktort.

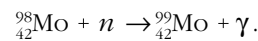
A  $^{99}\text{Tc}$  izotópnak van egy körülbelül 6 óra felezési idejű gerjesztett (metastabil) állapot  $^{99m}\text{Tc}$ , amelyből  $\gamma$ -sugárzás kibocsátásával bomlik el. Emiatt, és egyéb tulajdonságai miatt is, alkalmas szív- és érrendszeri diagnosztikai vizsgálatokra. (Teller Edénél is alkalmazták 1979-ben, amikor infarktusa volt.) Rövid felezési ideje miatt a helyszínen, a kórházban kell elválasztani egy „szülő” izotóptól, amelyből keletkezik, és amellyel radioaktív egyensúlyban van. Ezt a szülő izotópot állítják elő atomreaktorokban.

a) Mi lehet a „kezdő” stabil atommag (amit be kell tenni a reaktorba)?

b) Mi lehet a „szülő” atommag (amelynek a bomlásából a  $^{99m}\text{Tc}$  keletkezik)?

c) Általában milyen feltételeknek kell eleget tегyen egy diagnosztikára használt radioizotóp felezési ideje, illetve az őt szülő izotóp felezési ideje?

**Megoldás:** a) A „kezdő”-mag a molibdén ( $Z = 42$ ) 98-as tömegszámú stabil izotópjá lehet, mert reaktorban neutronnal besugározva nem stabil 99-es izotópot kapnak az alábbiak szerint:



b) A „szülő”-mag természetesen a  $^{99}_{42}\text{Mo}$  radioaktív mag a következők szerint  $^{99}_{42}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}_{43}\text{Tc} + \beta^-$  (a Tc metastabil gerjesztett állapotban keletkezik, ezt jelzi az „m”)  $^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow ^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$  (felezési idő kb 6 óra). A vizsgálatban ezt a  $\gamma$ -sugárzást detektálják. A Mo-Tc rendszerben körülbelül egy nap alatt beáll a radioaktív egyensúly. A keverékből a technéciumot kémiai módszerekkel a kórházban elválasztják, és így használják nyomjelzésre.

c) A vizsgálat szempontjából az a jó, ha a beadott radioaktív izotóp felezési ideje rövid, mert ekkor kis mennyiség is viszonylag nagy aktivitású, viszont hamar lebomlik, és nem terheli sokáig a beteg szervezetét. A szülő-izotóp esetében viszont nem szabad túl rövidnek lenni a felezési időnek, mivel ezt *el kell szál-*

lítani a reaktortól a kórházba, és közben nem szabad nagyon lebomlania. Túl hosszú felezési idő sem jó, mert akkor a szükséges aktivitás eléréséhez nagy anyagmennyiségre lenne szükség. A  $^{99}\text{Mo}$  felezési ideje 66 óra, ami egy ésszerű kompromisszum.

### 8. feladat

Hidrogénatom gerjesztett elektronja az  $n = 5$  állapotból az  $n = 1$  állapotba kerülve kibocsát egy fotont. Legfeljebb mekkora mozgási energiájú fotoelektront képes ez a foton kiváltani fém nátriumból? A nátrium kilépési munkája 2,75 eV.

*Megoldás:* A hidrogénatomban lévő elektron energiája alapállapotban:  $E_1 = -2,19$  aJ. Az  $n = 5$  gerjesztett állapotban az energia  $E_n = E_1/n^2$ , azaz  $E_5 = -2,19/25$  aJ. Az energiakülönbség, és egyben a kilépő foton energiája:  $\Delta E = E_5 - E_1 = 2,1$  aJ. A nátrium kilépési munkája:  $W_{ki} = 2,75$  eV =  $4,4 \cdot 10^{-19}$  J = 0,44 aJ. A maximális mozgási energia nyilván a két energia különbsége, azaz 1,66 aJ.

### 9. feladat

a) Becsüld meg, mekkora sugárdózist jelenthet egy 50 kg tömegű ember számára percnként a tőle 1 méterre álló, 20 MBq aktivitású jódizotóppal kezelt beteg, ha feltételezzük, hogy annak testét a 356 keV energiájú fotonok fele hagyja el, és az emberünket érőknek is a fele nyelődik el benne? (Vegyük úgy, hogy az ember a testének 1 m<sup>2</sup>-nyi felszínét fordítja a sugárforrás felé.)

b) Hány vízmolekula felbontásához lenne elegendő ez az energia? (Adatok a függvénytáblázatban.)

*Megoldás:* Az egy perc alatt keletkezett fotonok összes energiája  $6,8 \cdot 10^{-5}$  J. Ennek csak fele lép ki, azaz a kilépő energia percnként  $3,4 \cdot 10^{-5}$  J. A jód az ember pajzsmirigyében nyelődik el, ezért pontszerű sugárforrásnak tekinthető. Emiatt az összes kibocsátott foton  $F/(4\pi R^2) = 1/(4\pi)$ -ed része esik az emberre (mivel  $F = 1$  m<sup>2</sup> és  $R = 1$  m). A testét elérő fotonoknak (és így az energiának is) csak a fele nyelődik el, tehát az elnyelt energia

$$\frac{1}{4\pi} \cdot 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{2} \text{ J} = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ J}.$$

Az elnyelt dózis:

$$D = \frac{1,36 \cdot 10^{-6} \text{ J}}{50 \text{ kg}} = 2,71 \cdot 10^{-8} \text{ Gy}.$$

A víz kötési energiája 498 kJ/mol, tehát egy vízmolekula elbontásához

$$\frac{498 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^{23}} \text{ J} = 8,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

energia kell. Így az egész testben elnyelt energia

$$n = \frac{1,36 \cdot 10^{-6}}{8,3 \cdot 10^{-19}} \approx 1,64 \cdot 10^{12}$$

vízmolekulát tud elbontani.

### 10. feladat

A Genf melletti CERN-ben épül a világ legnagyobb részecskegyorsító berendezése, az LHC (Nagy Hadronütköztető). A föld alatti alagútban lévő gyorsító gyűrűnek 27 km a kerülete, és benne 7 TeV (=  $7 \cdot 10^{12}$  eV) energiájú protonok keringenek majd. Mekkora mágneses indukciót kell létrehozni az eltérítő mágnesekben a protonok körpályán tartásához, ha az 1232 db eltérítő mágnes mindegyike 14,3 m hosszú?

*Megoldás:* A 27 km kerületű LHC-nek vannak egyes szakaszai is, ezért nagyobb a kerülete, mint a mágnesek teljes hosszúsága! A „körpályán” tartás azonban csak az eltérítő mágnesekben történik. A mágnesek teljes hossza  $1232 \cdot 14,3 \text{ m} = 17617,6 \text{ m}$ . Ez azt jelenti, hogy ha a mágneseket egymás mellé helyeznénk, akkor egy ekkora kerületű kört kapnánk. Ennek a körnek a sugara:  $R = 2804 \text{ m}$  lenne. A körpályán tartáshoz szükséges centripetális erőt a mágneses Lorentz-erő biztosítja:

$$\frac{m v^2}{R} = q v B.$$

Ebből kapjuk:

$$B = \frac{m v}{q R} = \frac{p}{q R}.$$

Itt  $p$  a részecske lendületét jelenti. A protonok nyugalmi tömegére  $mc^2 \sim 0,938 \text{ GeV} \sim 0,001 \text{ TeV}$ . Ezért a 7 TeV-es protonok erősen relativisztikus részecskék, így lendületükre nagyon jó közelítéssel:  $p = E/c$ . Ezt beírva kapjuk:

$$B = \frac{E}{q R c}.$$

Az ismert mennyiségek behelyettesítésével egyszerűen adódik:  $B = 8,32 \text{ T}$ . Ilyen nagy mágneses indukciót csak szupravezető mágnesekkel lehet előállítani.

Az elődöntő feladatait 51 fő I. kategóriás, és 16 fő junior versenyző teljesítette olyan szinten, hogy dolgozataikat a javító tanárok tovább tudták küldeni a BME Nukleáris Technika Tanszékére további rangsorolás végett. A beküldött dolgozatokból választotta ki a zsűri a legjobb húsz I. kategóriás, és a legjobb tíz junior versenyzőt, akiket behívtak a döntőbe.

### A döntő versenyfeladatai

Ezen a versenyen is, mint az első Szilárd Versenyen (valamint 2004 óta ismét), a Junior kategória versenyfeladatai részben eltértek az I. kategória (11–12. osztályosok) feladataitól.

#### 1. feladat (kitűzte: Radnóti Katalin)

Mikor, hol és kivel együtt kezdett el foglalkozni Teller Ede a magfúzióval? Milyen felismerésekre vezetett ez?

*Megoldás:* 1938-ban George Gamow-val dolgozta ki a magfúzió elméletét, ezzel magyarázták meg a csillagok energiatermelését. Ekkoriban Gamow és Teller a

George Washington Egyetemen tanított. A Manhattan-projekt során *Fermi* tette fel neki a kérdést, hogy egy atombombával be lehetne-e indítani a magfúziót (1942). Ez az ötlet vezetett el a hidrogénbombához (első amerikai kísérleti robbantás 1952. november 1-jén volt).

### 2. feladat (kitűzte: *Sükösd Csaba*)

A napállandó értéke  $1388 \text{ W/m}^2$ . Ezt az adatot (valamint a Nap működésének ismeretét) felhasználva határozzuk meg, hogy másodpercenként hány, a Napból származó neutrínó szeli át testünk minden négyzetcentiméterét!

*Megoldás:* A Nap fúzióból nyeri az energiáját. Ennek során (több részfolyamat eredményeképpen) gyakorlatilag 4 protonból keletkezik egy darab  ${}^4\text{He}$  mag, „meléktermékként” pedig két neutrínó és  $26,71 \text{ MeV} = 4,2794 \text{ pJ}$  energia. Feltesszük, hogy a neutrínók és az energia kibocsátása egyaránt izotróp, és hogy terjedésük az űrben egyformán  $1/R^2$ -es törvény szerint gyengül. Ekkor azt lehet mondani, hogy minden  $2,1397 \text{ pJ}$ -os energiacsomag mellé egy neutrínó is társul. Ez adja meg az összefüggést az energia és a neutrínószám között. Eszerint egy négyzetméterre másodpercenként  $N = 1388 / (2,1397 \cdot 10^{-12}) = 6,486 \cdot 10^{14}$  darab neutrínó jut, ami egy négyzetcentiméterre számolva  $64,86$  milliárd neutrínó másodpercenként.

*Megjegyzés:* A megoldás során feltételeztük, hogy a felszabaduló energia teljes egészében olyan formában sugárzódik ki, ami beleszámít a napállandó értékébe. Ez a valóságban nincs így, mert a kisugárzott neutrínók is visznek el több-kevesebb energiát (a részfolyamattól függ, hogy éppen mennyit).

### 3. feladat (kitűzte: *Czifrus Szabolcs*)

A közeli jövő egyik legnagyobb neutronfizikai kutatócentruma az ESS (Európai Spallációs Forrás) lesz, amely reményeink szerint Magyarországon fog megépülni. A berendezésben egy protonnyalábbal valamilyen nehézfémről készült céltárgyat bombáznak, amelyből a protonok neutronokat váltanak ki. A protonok energiája  $1 \text{ GeV}$ , a protonnyaláb árama  $150 \text{ mA}$ . A nyaláb impulzusszerűen működik, másodpercenként  $16$ -szor  $2 \text{ ms}$  időtartamra. Tegyük fel, hogy az ehhez szükséges elektromos energia atomerőműből származik. Évente hány mol uránt kell elhasítani az erőműben az ESS nyalábjához szükséges elektromos energia biztosítására, ha az atomerőmű hatásfokát  $33\%$ -nak tekintjük? Hogyan aránylik az ezekben a hasadásokban másodpercenként keletkező neutronok száma az ESS-ben keletkező neutronok számához képest? (Az ESS-ben  $1$  proton becsapódása átlagosan  $30$  neutronot vált ki.)

*Megoldás:* Az ESS-ben egy impulzus teljesítménye  $1 \text{ GV} \cdot 150 \text{ mA} = 0,15 \text{ GW}$ . Egy másodperc alatt csak  $16 \cdot 2 \text{ ms} = 32 \text{ ms}$ -ig működik a nyaláb, tehát az átlagos teljesítmény  $P = 0,032 \cdot 0,15 \text{ GW} = 4,8 \text{ MW}$ . Az átlagos áram  $4,8 \text{ mA}$ , amiből kapjuk, hogy a céltárgyba átlagosan becsapódó protonok száma  $4,8 \cdot 10^{-3} / (1,602 \cdot 10^{-19}) \sim 3 \cdot 10^{16}$  proton/s. Tehát a neutronok átlagos forrás-erőssége (azaz a másodpercenként kibocsátott neutro-

nok száma) az ESS céltárgya mögött ennek körülbelül harmincszorosa, vagyis nagyjából  $9 \cdot 10^{17}$  neutron/s.

Számoljuk ki, hogy másodpercenként hány hasadás kell ehhez a teljesítményhez! Egy hasadásban  $198 \text{ MeV}$  energia szabadul fel, ami  $3,17 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ . Nekünk másodpercenként  $3 \cdot 4,8 \text{ MJ}$  hasadásból származó energiára van szükségünk (figyelemmel az atomerőmű hatásfokára), amihez másodpercenként  $4,54 \cdot 10^{17}$  hasadás kell. Az összes felszabaduló neutronszám ekkor átlagosan ennek  $2,4$  szerese, azaz  $1,09 \cdot 10^{18}$  neutron másodpercenként. Látható, hogy ez a szám alig  $20\%$ -kal nagyobb, mint az ESS-ben egy másodperc alatt felszabaduló neutronszám. Mivel a láncreakció fenntartásához hasadásonként egy neutronra szükség van, és a neutronok jó része el is nyelődik, ezért nyilvánvaló, hogy a spallációs forrás ilyen felépítésben hatékonyabban „konvertálja” a nukleáris energiát neutronokká, tehát hatékonyabb neutronforrás, mint egy reaktor. (Sőt, nem beszéltünk még arról, hogy az ESS-ben átlagos fluxust számoltunk. Az impulzuscsúcsban körülbelül harmincszor nagyobb lehet a forrás-erősség!)

A feladat kérdezi még az évente elhasítandó urán mennyiségét. A másodpercenkénti hasadások számából ez könnyen adódik:  $23,769 \text{ mol } {}^{235}\text{U}$  mag hasad el azért, hogy biztosítsa az ESS nyalábjához szükséges energiát.

### 4. feladat (kitűzte: *Papp Gergely*)

Mi történne, ha a paksi reaktorokban a hűtésre és moderálásra szolgáló vizet nehézvízre cserélnénk? (A deutérium tömegét közelíthetjük a hidrogén tömegének kétszeresével.)

*Megoldás:* A feladat szövege utal rá, hogy a deutérium tömege szerepet játszik. Mint tudjuk a deutérium jobb moderátor mint a víz, mivel nem nyeli el a neutronokat. A kétszeres tömeg miatt azonban egy ütközésben átlagosan kevesebb energiát veszít a neutron, mint víz esetében. Ezért a lassulásig megtett út megnő. A paksi reaktorokban a fűtőelem-pálcák távolsága könnyű vízre van optimalizálva, ezért ha nehézzvízzel töltenénk fel, akkor a neutronok még nem lennének termikusak, amikor eléri a következő fűtőelem-pálcát. Így a reaktorokat valószínűleg el sem lehetne indítani.

### 5. feladat (kitűzte: *Papp Gergely*)

Magyarország éves energiaigénye  $\sim 3 \cdot 10^{10} \text{ kWh}$  (mindenféle energia, nemcsak villamosenergia). Tegyük fel, hogy ennyi energiát tisztán szabályozott magfúzióból szeretnénk felszabadítani. A zárt rendszerben lejátszódó folyamatok:  ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{He} + \text{T} + 4,8 \text{ MeV}$ ,  $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He} + n + 17,62 \text{ MeV}$ . Itt D és T a deutériumot, illetve tríciumot jelzi. Számoljuk ki, hogy hány kg  ${}^6\text{Li}$  és hány liter nehésvíz lenne szükséges ehhez! Hány kg héliumgáz keletkezik? (A nehésvíz sűrűsége  $1100 \text{ kg/m}^3$ .)

*Megoldás:* Az egy reakcióban összesen felszabaduló energia  $E_{\text{tot}} = (4,8 + 17,62) \text{ MeV} = 2,242 \cdot 10^7 \text{ eV}$ , azaz  $3,592 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ . Mivel az energia megtermeléséről (és nem villamosenergia termeléséről) szól a feladat, ezért a hatásfok  $100\%$ . Az éves energiaigény  $3 \cdot 10^{10} \text{ kWh} = 1,08 \cdot 10^{17} \text{ J}$ . Ebből látható, hogy évente  $3,0 \cdot 10^{28}$  fúziós reakcióra van szükség. Ez  $A \sim 50\,000$  molnyi reakció.

Egy fúziós reakcióhoz egy darab lítium atom és egy darab deutérium atom szükséges, és két hélium atom keletkezik. Tehát szükség van  $A$  mol  ${}^6\text{Li}$ -ra,  $A/2$  mol  $\text{D}_2\text{O}$ -ra, és  $2A$  mol He keletkezik.  $M_{\text{Li}} = 6$ ,  $M_{\text{He}} = 4$ ,  $M_{\text{D}_2\text{O}} = 20$ . Tehát  $m_{\text{Li}} = 300$  kg,  $m_{\text{He}} = 400$  kg és  $V_{\text{D}_2\text{O}} = 500/1,1 = 455$  liter. (Nem kérdeztük, de a természetes lítiumban csak 7,6% a  ${}^6\text{Li}$  részaránya, így jóval több természetes lítiumra lenne szükség!)

### 6. feladat (kitűzte: Sükösd Csaba)

Az alábbi táblázat a természetes uránban előforduló uránizotópok néhány adatát tartalmazza:

izotóp	százalék	felezési idő
${}^{238}\text{U}$	99,275	4,51 milliárd év
${}^{235}\text{U}$	0,72	0,71 milliárd év
${}^{234}\text{U}$	0,0055	247 000 év

Adjunk magyarázatot ezeknek az izotópoknak az előfordulási gyakoriságára!

**Megoldás:** A két gyakoribb izotóp arányára magyarázatot ad a felezési idejük és a Föld kora. (Ezek különböző bomlási sorok tagjai, egymást nem befolyásolják.) A  ${}^{234}\text{U}$  izotóp azonban nem magyarázható így, ő ugyanis a 238-as urán bomlási sorának tagja. Felezési ideje jóval kisebb annál, így a  ${}^{238}\text{U}$ -nal radioaktív (szekuláris) egyensúlyban van. (A Föld keletkezése óta elegendő idő eltelt ahhoz, hogy ez beálljon.) A két izotóp összaktivitása meg kell egyezzen, amit ellenőrizhetünk is: a felezési idők aránya meg kell egyezzen a koncentrációk arányával.

$$\frac{99,275}{0,0055} \cdot 247\,000 \text{ év} = 4,458 \text{ milliárd év.}$$

Ez elég jó egyezés.

### 7. feladat (kitűzte: Kopcsa József)

A Paksi Atomerőmű egy blokkjának átlagos teljesítménye 480 MW, hatásfoka 34%.

a) Mennyivel csökken a fűtőanyag tömege 1 nap alatt?  
b) Naponta mekkora tömegű kohókokszt elégetésével lehetne ezt a teljesítményt biztosítani?

c) Mekkora tömegű  $\text{CO}_2$ -dal szennyeznék a légkört naponta a b) esetben számított kohókokszt elégetésével? (A kohókokszt tekintjük tiszta szénnek; égéshője 29,75 MJ/kg.)

**Megoldás:** A maghasadásból származó teljesítmény  $480/0,34 = 1411,76$  MW. Ez egy nap alatt  $1,2197 \cdot 10^{14}$  J energia felszabadítását jelenti. Ezt elosztva  $c^2$ -tel kapjuk, hogy a fűtőanyag tömege naponta 1,357 grammal csökken. Az egy nap alatt megtermelendő energiát elosztva a kohókokszt égéshőjével kapjuk, hogy naponta 4100 tonna kocszra lenne szükség. A széndioxid mennyiségét a moláris tömegek arányából kapjuk: 15 033,3 tonna  $\text{CO}_2$  keletkezne.

### 8. feladat (kitűzte: Radnóti Katalin)

Ha a KI (káliumjodid) kristályból eltávolítunk egy jodid iont, akkor az üresen maradt helyet egy – ugyancsak negatív töltésű – elektron foglalhatja el („elektron-színcentrum”). Ezt az elektront úgy tekinthetjük, mint ha egy  $2d$  oldalélű kocka alakú dobozba lenne bezárva, ahol  $d = 0,7$  nm a KI-kristály rácsállandója. Milyen hullámhosszúságú fényt képes elnyelni a kristály?

**Megoldás:** A dobozba zárt elektron energiája:

$$E_{x,y,z} = \frac{h^2}{2 m_e} \left[ \frac{(n_x + 1)^2 + (n_y + 1)^2 + (n_z + 1)^2}{4 D^2} \right] =$$

$$= \frac{h^2}{8 m_e D^2} \sum_{i=1}^3 (n_i + 1)^2.$$

Itt  $D = 1,4$  nm a kocka oldaléle,  $n_i$  az adott tengelyre merőleges csomósíkok száma,  $m_e$  az elektron tömege, és  $h$  a Planck-állandó. Vegyük a legegyszerűbb,  $E_{000} \rightarrow E_{100}$  átmenetet. Ekkor az első szumma értéke 6, a másodiké 3, tehát a keresett frekvencia

$$f = \frac{3 h}{8 m_e D^2} = 1,39 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

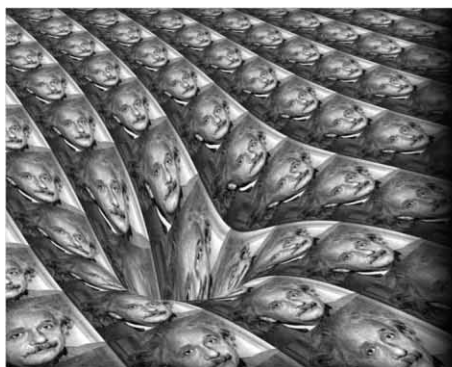
Ennek a hullámhossza:

$$\lambda_1 = \frac{c}{f} = 2160 \text{ nm.}$$

Ez még erősen az infravörös tartományba esik. A látható fény tartományába esne például az  $E_{000} \rightarrow E_{300}$  átmenet, hiszen ekkor az summák értékei 18 és 3, a különbség 15. Az ennek megfelelő hullámhossz értéke:

$$\lambda_3 = \frac{3}{15} \lambda_1 = 433 \text{ nm.}$$

*A folytatás a februári számban következik.*



**A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kéri mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tételé, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Szemle hasábjain az olvasókkal.**

