XXV. ORSZÁGOS SZILÁRD LEÓ FIZIKAVERSENY – 2. rész

Sükösd Csaba
BME Nukleáris Technika Tanszék

A XXV. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny döntője 2022. április 22–24. között volt Pakson az Energetikai Technikum és Kollégiumban (ESZI). A COVID19 pandémia jelenléte beárnyékolta az előkészületeket, hiszen bizonytalan volt, hogy ebben az évben sikerül-e a hagyományos, jelenléti formában megrendezni a Verseny döntőjét, vagy pedig az előző két pandémiás évhez hasonlóan valamilyen szükségmegoldáshoz kell nyúlni.

A pandémiás helyzet azonban szerencsésen alakult, így sikerült a Verseny döntőjét a szokásos színvonalon és a korábbi évek hagyományainak megfelelően megszervezni. A helyi szervezési feladatokat az ESZI végezte; ők biztosították a Verseny során az étkezéseket is, valamint az ESZI kollégiumában volt a versenyzők és kísérőtanáraik szállása. A Verseny megnyitása és az elméleti feladatok megírása éppúgy az ESZI nagy előadótermében zajlott, mint a „Hogyan kellett?” feladatmegoldási ismertető, és az ünnepélyes eredményhirdetés. A kísérő tanárok és a paksi tanárkollégák részére *Pesznyák Csilla* egyetemi docens (BME NTI), valamint *Nagy Tibor* szegedi fizikatanár (SZTE Gyakorló Gimnázium és Általános Iskola, Szeged) tartottak érdekes, továbbképző előadásokat:

– Pesznyák Csilla: *Orvosi-fizika kutatás és képzés Magyarországon*

– Nagy Tibor: *A Szilárd Leó Verseny egy felkészítő tanár szemével*

Ebben a cikkben a döntő elméleti/számításos feladatait és a megoldásokat ismertetjük. A kísérleti forduló, valamint a számítógépes szimulációs feladat a cikksorozat harmadik, utolsó részében kerül sorra.

Az első hét elméleti feladat közös volt mindkét korcsoportnak, a maradék három feladat pedig különböző (8., 9. és 10. csak a Junioroknak, 11., 12. és 13. csak a Szenioroknak).

1. feladat

kitűzte: *Sükösd Csaba*

Az orosz–ukrán háború során a sérült csernobili atomerőmű környezetéből megnövekedett dózisteljesítményt jelentettek. Egyesek szerint emiatt jódtablettákat kellene szedni.

a) Miért javasolják a hatóságok jódtabletta szedését atomerőmű-baleset környezetében?

b) Valóban ajánlott-e a 2022-ben Csernobil környékén megemelkedett dózisteljesítmény miatt jódtablettákat szedni? A választ indokoljuk!

Megoldás

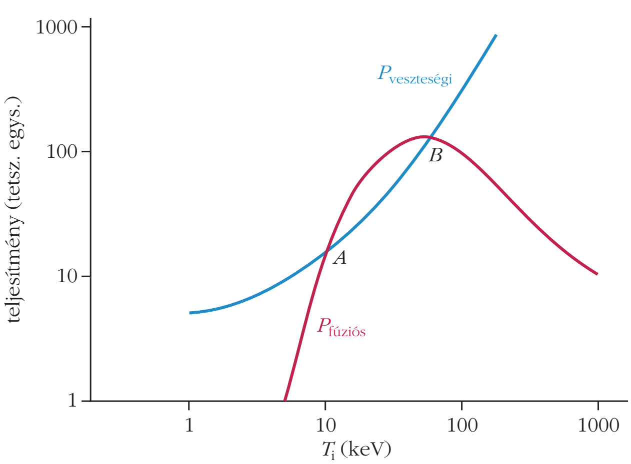
a) A maghasadásban keletkező ^{131}I izotóp felezési ideje 8 nap. Atomerőmű-balesetnél a jód a környezetbe (levegőbe, táplálékláncba stb.) kerülve bejut az emberi szervezetbe, és ott a pajzsmirigyben felhalmozódva komoly lokális sugárterhelést okozhat. Ezt „előzi meg” a jódtabletták előzetes szedése, amelyek inaktív jóddal „telítik” a pajzsmirigyet, és így megakadályozzák, de legalábbis jelentősen lecsökkentik a radioaktív jód felvételét.

b) A radioaktív jód a rövid, 8 napos felezési idő miatt gyorsan elbomlik a környezetben. Mivel a csernobili telephelyen nukleáris láncreakció már több, mint 20 éve nincs (az utolsó reaktort 2000-ben állították le), ezért a korábban keletkezett – és például a baleset időpontjában még jelen lévő – radioaktív jód mára már teljesen lebomlott. Tehát, ha meg is sérülne a sugárvédelmet biztosító szarkofág, radioaktív jód már nincs jelen. A jódtabletták indokolatlan szedésének esetleges negatív következményei is lehetnek. Emiatt a stabil jód nagy adagját csak akkor és azoknak célszerű bevenni, amikor és akik számára a hatóságok azt elrendelik!

2. feladat

kitűzte: Sükösd Csaba

Egy fúziós reaktorban a magas hőmérsékletű deutérium-trícium plazma hősugárzással (és más módon is) veszít energiát. A plazmát fűtő fúziós reakciók teljesítménye is függ a hőmérséklettől. E két teljesítmény hőmérsékletfüggését mutatja a mellékelt ábra. A vízszintes tengelyen a hőmozgás átlagos mozgási ener-



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatással kapcsolatos program vezetője.

giája van, a függőleges tengely a teljesítménnyel arányos. Az ábra tengelyei logaritmikusak.

a) Hány kelvin a plazma hőmérséklete az *A* pontban?

b) A plazma hőmérséklete akkor állandó, ha a veszteségi és a fűtési teljesítmény egyenlő. Az egyenlőség az *A* és a *B* pontban is fennáll, de csak az egyik pontban stabil a plazma hőmérséklete. Vajon melyikben és miért?

Megoldás

a) Az ábra vízszintes tengelyén a hőmérséklet keV egységekben adott. Ez az adott hőmérsékleten a részecskék átlagos energiáját mutatja. Mivel a plazma hőmérsékletén a részecskék már nem kötöttek, ezért tömegpontokként viselkednek, így 3 szabadsági fokuk van, amelyre egyenként $kT/2$ energia jut, így a részecskék teljes energiája, $E = 3\,kT/2$. Az ábra alapján az *A* pontban $E \approx 10$ keV, ezért a kelvinben kifejezett hőmérséklet:

$$T = \frac{2\,E}{3\,k} = \frac{2 \cdot 10\ (\mathrm{keV}) \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-16} \left(\dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{keV}}\right)}{3 \cdot 1{,}38 \cdot 10^{-23} \left(\dfrac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}\right)} \approx 77{,}3 \cdot 10^{6}\ \mathrm{K}.$$

b) Az *A* pontbeli működés instabil. Ha kicsit is elmozdulunk ebből a pontból (például kicsit megnövekszik a hőmérséklet), akkor a fúziós teljesítmény meghaladja a veszteségit, és akkor a plazma még tovább melegszik. Fordítva is, ha a másik irányba – az alacsonyabb hőmérsékletek felé – mozdulunk el, akkor pedig a veszteségi teljesítmény fogja meghaladni a fúziós teljesítményt, és ekkor a plazma még tovább hűl. A *B* pontban történő üzem viszont stabil, hiszen bármilyen irányban is mozdulunk el egy kicsit, olyan hatás keletkezik, amely visszatéríti a rendszert a stabil egyensúlyi *B* pontba.

3. feladat

kitűzték: *Radnóti Katalin,* Sükösd Csaba és *Halász Máté*

A jó neutronelnyelő anyagok fékezik, sőt le is állíthatják a láncreakciót. Ezen az alapon működnek a mozgatható szabályozó rudak is, vagy a reaktor hűtővízébe kevert bórsav. A Paksi Atomerőműben újabban olyan üzemanyag-kazettákat használnak friss üzemanyagként, amelynek néhány pálcájába jó neutronelnyelő gadolíniumot is belekevertek.

a) Vajon mi értelme van az üzemanyaghoz láncreakciót fékező anyagot keverni, ha a szabályozó kazettákkal ellentétben nem tudjuk őket mozgatni?

b) Van-e olyan, jó neutronelnyelő izotóp, amely az atomerőmű működése során keletkezik?

Megoldás

a) Annak érdekében, hogy egy üzemanyag-kazettából összességében több energiát lehessen kinyerni, magasabb dúsítású uránt használnak. A több energia viszont nem jelentheti a reaktor teljesítményének növekedését, ezért azt kell elérni, hogy a kazetták hoszszabb ideig bent lehessenek a reaktorban – hosszabb idő alatt „égjenek ki”. A reaktornak a magasabb ^{235}U tartalom mellett is kritikus állapotban, állandó teljesítményen kell üzemelnie. A kezdeti, potenciálisan nagyobb neutronsokszorozási tényező csökkentésére szolgál – a bórsav és a szabályozókazetták mellett – a gadolínium. Mivel a gadolínium elnyeli a neutronokat („mérgezi” a reaktort), de a reaktor működése közben elfogy („kiég”), ezért kiégő méregnek is nevezik. A kiégő mérgek másik jelentős szerepe a teljesítményeloszlás egyenletesebbé tétele.

Megjegyzés: a pontosabb magyarázathoz összetett reaktorfizikai fogalmak szükségesek, ezért ezt csak említés szintjén tesszük meg. Eszerint a gadolínium a kampány kezdetén extra reaktivitást köt le, részben ellensúlyozva a magasabb kezdeti urándúsítást (reaktorbiztonsági okokból sem a bórsav-koncentrációt, sem pedig a szabályozó rudakban lévő neutronelnyelő anyagok mennyiségét nem lehet határ nélkül növelni), ezáltal a zóna nagyobb kezdeti reaktivitástartalékkal rendelkezik, és hosszabb idő telhet el két üzemanyag-átrakás között.

b) A reaktor működése közben, a maghasadás során folyamatosan keletkezik a xenon 135-ös tömegszámú izotóp, amely nagyon jó neutronelnyelő, s emiatt folyamatosan számolni kell vele a reaktor működése során. A keletkező reaktormérgek közül a legjelentősebb a ^{135}Xe, de ezen felül keletkeznek más, jó neutronelnyelő magok is, például a ^{149}Sm.

4. feladat

kitűzte: *Szűcs József*

Marx György (1927–2002), az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny alapítójának emlékére.

a) Magyarázzuk meg a Marx György által felvetett kérdést: miért nem sérül az energiamegmaradás törvénye a trícium radioaktív bomlásánál, hiszen a keletkező $^{3}_{2}$He atommag gyengébben kötött, mint a kezdeti $^{3}_{1}$H mag volt, és még szabad elektron is keletkezik $E_\beta > 0$ mozgási energiával!

b) Mi okozhatja a $^{3}_{2}$He atommag $^{3}_{1}$H magénál gyengébb kötését, ha mindkét atommagban 3-3 nukleon van?

Adatok: $E_k(^{3}_{1}\mathrm{H}) = 1{,}334$ pJ, $E_k(^{3}_{2}\mathrm{He}) = 1{,}214$ pJ és $E_\beta^{max} = 18{,}6$ keV.

Megoldás

a) A megmaradási törvény azért nem sérül, mert az energiamérlegnél figyelembe kell venni a $^{3}_{1}$H kezdeti magot és a keletkező $^{3}_{2}$He magot alkotó nukleonok nyugalmi energiáját is. Az előbbi 2 neutront és egy protont, az utóbbi viszont 2 protont és egy neutront tartalmaz, így (mivel a neutron nyugalmi tömege nagyobb a proton nyugalmi tömegénél) a $^{3}_{2}$He mag nukleonjainak nyugalmi energiája kisebb lesz, mint a $^{3}_{1}$H esetében. A nukleonok nyugalmi energiájának különbsége fedezi a $^{3}_{2}$He mag magasabb energiaszintre kerülését (kisebb kötési energiáját), és a keletkező szabad elektron teljes energiáját is.

b) A ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$ mag kötési energiáját a magban lévő két (egymást taszító) proton pozitív elektrosztatikus potenciális energiája gyengíti.

5. feladat kitűzték: Szűcs József és Halász Máté

A vegytiszta (kizárólag uránizotópokat tartalmazó) urán dúsítási szintjét annak Bq/mol-ban mért fajlagos aktivitásából kívánjuk meghatározni.

a) Maximálisan hányszorosára növelhető dúsítással a fajlagos aktivitás a vegytiszta természetes uránéhoz képest?

b) Adjuk meg a fajlagos aktivitás maximumát!

Adatok: az ${}^{235}\mathrm{U}$ felezési ideje 704 millió év, az ${}^{238}\mathrm{U}$ izotópé 4,47 milliárd év. A vegytiszta dúsítatlan uránban az ${}^{235}\mathrm{U}$ atomok számának az aránya 0,7%, az ${}^{238}\mathrm{U}$ atomok számának az aránya 99,3%, valamint kis mennyiségben jelen van az ${}^{238}\mathrm{U}$ bomlási sorából származó, vele szekuláris egyensúlyban lévő ${}^{234}\mathrm{U}$ is. Vegyük figyelembe, hogy az ${}^{234}\mathrm{U}$ és ${}^{235}\mathrm{U}$ izotópok a dúsítás során együtt maradnak.

Megoldás

a) Írjuk fel a radioaktivitás bomlástörvénye alapján mólnyi mennyiségű természetes izotóparányú, vegytiszta urán összaktivitását! Figyelembe véve, hogy az ${}^{234}\mathrm{U}$ szekuláris egyensúlyban van az ${}^{238}\mathrm{U}$-cal (aktivitásaik megegyeznek):

$$\begin{aligned} A_\mathrm{t} &= N_\mathrm{A}\left(0{,}007\cdot\lambda_{235} + 2\cdot 0{,}993\cdot\lambda_{238}\right) = \\ &= N_\mathrm{A}\left(0{,}007\cdot k\cdot\lambda_{238} + 2\cdot 0{,}993\cdot\lambda_{238}\right) = \\ &= 2{,}0304\cdot\lambda_{238}N_\mathrm{A}, \end{aligned}$$

ahol

$$k = \frac{\lambda_{235}}{\lambda_{238}} = \frac{T_{238}}{T_{235}} = 6{,}349.$$

Mivel $\lambda_{235} > \lambda_{238}$, ezért 100% dúsítottságnál lesz maximális az aktivitásnövekedés a természetes összetételű vegytiszta uránhoz képest. A dúsított urán mólnyi mennyisége összaktivitásának számolása során vegyük figyelembe, hogy az ${}^{234}\mathrm{U}$ és ${}^{235}\mathrm{U}$ izotópok a dúsítás során együtt maradnak, emiatt az ${}^{234}\mathrm{U}$ aktivitása a természetes uránban lévő aktivitásának 100%/0,7%-szerese lesz (az ${}^{234}\mathrm{U}$ mennyiségét elhanyagolhatjuk a 100%-hoz képest):

$$\begin{aligned} A_{100} &= N_\mathrm{A}\left(1\cdot\lambda_{235} + \frac{1}{0{,}007}\cdot 0{,}993\cdot\lambda_{238}\right) = \\ &= N_\mathrm{A}\left(k\cdot\lambda_{238} + 141{,}857\cdot\lambda_{238}\right) = \\ &= 148{,}206\cdot\lambda_{238}\cdot N_\mathrm{A}, \end{aligned}$$

azaz a növekedés a dúsítás hatására

$$\frac{148{,}206\cdot\lambda_{238}\cdot N_\mathrm{A}}{2{,}0304\cdot\lambda_{238}\cdot N_\mathrm{A}} = 72{,}99 \approx 73\text{-szoros}.$$

Ha a természetes uránban „elhanyagolhatóan” kis mennyiségben jelen lévő ${}^{234}\mathrm{U}$ hatását a dúsított uránban nem vennénk figyelembe, akkor csak 6,349-szeros aktivitásnövekedést találnánk. A dúsított urán aktivitásának legnagyobb része a jelen lévő ${}^{234}\mathrm{U}$-ből származik!

b) A 100% dúsítású urán fajlagos aktivitása:

$$A_{100} = 148{,}206\cdot\lambda_{238}\cdot N_\mathrm{A} = 4{,}386\cdot 10^{8}\,\frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{mol}}.$$

6. feladat kitűzte: *Tarján Péter*

Csikai Gyula (1930–2021) debreceni fizikus emlékére.

Szalay Sándor és Csikai Gyula 1956-os kísérlete szolgáltatta az első közvetlen bizonyítékot a neutrínó létezésére. A kísérletben egy béta-bomlásból származó elektron és leánymag nyomait figyelték meg ködkamrában. A ${}^{6}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{6}_{3}\mathrm{Li} + \mathrm{e}^{-} + \bar{\nu}$ folyamatban keletkező Li mag és az elektron indulási nyomait mutatja az ábra. (A bomlás előtt az anyamag állónak tekinthető.)

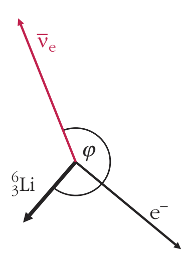
a) Magyarázzuk meg, miért bizonyíték az ábrán látható ködkamrakép arra, hogy egy harmadik részecske is keletkezik a bomlás során?

b) Mekkora és milyen irányú lendületet visz el a keletkező antineutrínó, ha az elektron a bomlásban felszabaduló energia 40%-át, a Li mag pedig $1{,}5\cdot 10^{-17}$ J-t visz el mozgási energiaként? (Tegyük fel, hogy a Li mag és az elektron kezdeti sebességei éppen merőlegesek egymásra. Válasszuk x tengelynek a leánymag, y tengelynek pedig az elektron pályairányát!)

Az atommagok tömege $m_\mathrm{He} = 9{,}9928\cdot 10^{-27}$ kg, $m_\mathrm{Li} = 9{,}9856\cdot 10^{-27}$ kg, $m_\mathrm{e} = 9{,}1094\cdot 10^{-31}$ kg $\approx 0{,}511$ MeV/c^2. A Li magot kezelhetjük nem-relativisztikusan.

Megoldás

a) Az anyamag állt, azaz a rendszer kezdeti lendülete 0. Így a végállapoti lendületnek is nullának kell lennie, ami a Li maggal és az elektronnal szemmel láthatóan nem teljesülhet. A lendület csak úgy tud megmaradni, ha legalább még egy részecske keletkezik, ami az ábrán



nagyjából felfelé mutató irányban indul. A keletkezett részecske elektromosan semleges, mert nem hagy nyomot a ködkamrában, és mert nélküle is teljesül a töltésmegmaradás.

b) Számítsuk ki a bomlási energiát! A neutrínó nyugalmi tömegét nem tudjuk pontosan, de azt igen, hogy az elektron tömegénél sokkal kisebb, így elhanyagolható.

$$Q \approx \left(m_{\mathrm{He}} - m_{\mathrm{Li}} - m_{\mathrm{e}}\right) c^2 =$$

$$= 5{,}6523 \cdot 10^{-13}\ \mathrm{J} = 3{,}5279\ \mathrm{MeV}.$$

Az elektron mozgási energiája ekkor $E_{\mathrm{e}} = 0{,}4 \cdot Q = 2{,}2609 \cdot 10^{-13}$ J. A részecskék lendülete a mozgási energia és a nyugalmi tömeg segítségével számítható; az elektron relativisztikus.

$$p_x = p_{\mathrm{Li}} = \sqrt{2\, m_{\mathrm{Li}}\, E_{\mathrm{Li}}} = 5{,}4733 \cdot 10^{-22}\ \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}},$$

$$p_y = p_{\mathrm{e}} = \sqrt{\frac{E_{\mathrm{e}}^2}{c^2} + 2\, E_{\mathrm{e}}\, m_{\mathrm{e}}} = 9{,}9029 \cdot 10^{-22}\ \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

Az antineutrínó lendületkomponensei ugyanekkorák, de ellentétes előjelűek:

$$\boldsymbol{p}_\nu = -\left(\boldsymbol{p}_{\mathrm{Li}} + \boldsymbol{p}_{\mathrm{e}}\right) = (-5{,}4733;\ -9{,}9029) \cdot 10^{-22}\ \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

A lendület nagysága (Pitagorasz-tétellel)

$$p_\nu = \sqrt{\boldsymbol{p}_{\mathrm{Li}}^2 + \boldsymbol{p}_{\mathrm{e}}^2} = 1{,}1315 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{kg}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}},$$

iránya pedig (szögfüggvénnyel) olyan, hogy az x tengellyel bezárt szöge $\varphi = 241°$ (lásd az ábrát, a nyilak hossza itt már a lendülettel arányos.)

Megjegyzés: A neutrínó mozgási energiájának és lendületének ismeretében *elvileg* ki lehet számítani a tömegét is. A feladat adataiból azonban irreálisan nagy értéket kapnánk, mert a feladathoz megadott adatok már a neutrínó tömegénél nagyságrendekkel nagyobb kerekítéseket és elhanyagolásokat tartalmaznak.

7. feladat

kitűzte: Sükösd Csaba

1991. október 15-én az USA-ban lévő Fly's Eye detektor észlelte az addigi legnagyobb $(3{,}2 \pm 0{,}9) \cdot 10^{20}$ eV energiájú részecskét a kozmikus sugárzásban. Ezt a részecskét „Oh My God” (OMG) részecskének nevezték el, mivel észlelésekor a kutatók így kiáltottak fel meglepetésükben.

a) Mekkora sebességű teniszlabdának (tömege körülbelül 57 g) van ekkora mozgási energiája?

b) Tegyük fel, hogy az OMG részecske proton volt! Mennyivel térne el a sebessége a vákuumbeli fénysebességtől?

c) Tegyük fel, hogy egy ilyen energiájú proton és egy foton egyszerre indul el a Földről, ugyanabba az irányba. Mennyi idő múlva „maradna le” ez a proton 1 cm-rel a foton mögött, a földi koordináta-rendszerben? (A földi koordináta-rendszert tekinthetjük inerciarendszernek).

A proton nyugalmi tömege: $m_{\mathrm{p}} = 0{,}938\ \mathrm{GeV}/c^2$. A felmerülő numerikus probléma kikerüléséhez használhatjuk az $1-(a/b)^2 \approx 2 \cdot (1-a/b)$ közelítést, ha $a \approx b$.

Megoldás

a) A teniszlabda makroszkopikus test, így mozgási energiáját számíthatjuk klasszikusan:

$$E = \frac{m\, v^2}{2},$$

amiből

$$v = \sqrt{\frac{2\, E}{m}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{20}\ (\mathrm{eV}) \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ (\mathrm{J/eV})}{0{,}057\ (\mathrm{kg})}} =$$

$$= 42{,}41\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 152{,}7\ \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} (!!)$$

b) A proton nyugalmi energiája $m_0 c^2 = 938$ MeV $= 9{,}38 \cdot 10^8$ eV. A mért energia ennél sok nagyságrenddel nagyobb, ezért mindegy, hogy azt teljes vagy csak kinetikus energiának tekintjük. A részecske energiájára felírhatjuk:

$$E = \frac{m_0\, c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \left(\frac{m_0\, c^2}{E}\right)^2 = \left(\frac{9{,}38 \cdot 10^8\ (\mathrm{eV})}{3{,}2 \cdot 10^{20}\ (\mathrm{eV})}\right)^2 =$$

$$= 8{,}59 \cdot 10^{-24}.$$

A bal oldalt célszerű tényezőkre bontani:

$$1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right) = 8{,}59 \cdot 10^{-24}.$$

Használjuk ki, hogy nagyon jó közelítéssel $v/c \approx 1$, ezért $(1 + v/c) \approx 2$, azaz

$$\left(1 - \frac{v}{c}\right) \cdot 2 \approx 8{,}59 \cdot 10^{-24},$$

ahonnan kapjuk, hogy

$$\Delta v = c - v = c \cdot 4{,}295 \cdot 10^{-24} =$$

$$= 3 \cdot 10^8 \left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right) \cdot 4{,}295 \cdot 10^{-24} = 1{,}288 \cdot 10^{-15}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

c) Ahhoz, hogy a foton és a proton között 1 cm = 0,01 m útkülönbség létrejöjjön,

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\Delta v} = \frac{0{,}01\ \text{(m)}}{1{,}288 \cdot 10^{-15} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 7{,}76 \cdot 10^{12}\ \text{s}$$

idő szükséges. Ez több, mint 246 000 év!

8. feladat (Junior kategória)

kitűzte: *Veres Gábor*

Az LHC-ben a protonok energiája 7 TeV. Az alagút 27 km kerületű gyűrű. Milyen hosszúnak érzékelik a protonok ezt a kört? A proton m_p = 0,938 GeV/c^2 tömegű.

Megoldás

A Lorentz-kontrakció miatt a protonok a gyűrű kerületét rövidebbnek „látják”: $s' = s/\gamma$. A γ-faktor a teljes energia és a nyugalmi energia hányadosából meghatározható:

$$E = m c^2 = \gamma \cdot m_0 c^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{E}{m_0 c^2} = \frac{7000\ \text{(GeV)}}{0{,}938\ \text{(GeV)}} \approx 7463.$$

Ezzel

$$s' = \frac{27\ \text{(km)}}{7463} = 0{,}003618\ \text{km} = 3{,}618\ \text{m}.$$

Megjegyzés: a feladat nem adta meg, hogy a 7 TeV a protonok mozgási energiája vagy a teljes energia. Vegyük észre, hogy mivel ez az érték sokkal nagyobb, mint a nyugalmi energia, ezért lényegében mindegy, hogy melyiknek tekintjük.

9. feladat (Junior kategória)

kitűzte: Szűcs József

Gondolatban helyezzünk el az éjjeliszekrényünkre egy dobozban 1000 darab ^{238}U uránatomot! Hányszor nagyobb annak a valószínűsége, hogy egy hatoldalú dobókockával egymás után 10-szer hatost dobunk, mint annak, hogy reggelre az uránatomok közül akár-csak egy is elbomlik?

Adatok: Az ^{238}U felezési ideje 4,47 milliárd év, az alvási időt vegyük 8 órának.

Megoldás

Számítsuk ki az 1000 atomos ^{238}U aktivitását:

$$A = \frac{|\Delta N|}{\Delta t} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N = 1{,}55 \cdot 10^{-7}\ \frac{1}{\text{év}} =$$

$$= 4{,}91 \cdot 10^{-15}\ \frac{1}{\text{s}} = 1{,}41 \cdot 10^{-10}\ \frac{1}{8\text{h}}.$$

Annak valószínűsége, hogy 1 darab bomlás fog történni 8 óra alatt, nagyon jó közelítéssel $1{,}41 \cdot 10^{-10}$. (A kettő vagy több bomlás valószínűsége elhanyagolható.)

Annak az esélye, hogy hatoldalú dobókockával tízszer egymás után hatost dobunk:

$$\left(\frac{1}{6}\right)^{10} \approx 1{,}65 \cdot 10^{-8}.$$

Így a kockadobások esélye körülbelül 117-szer nagyobb, mint az uránbomlás esélye.

Megjegyzések

1. Az ötös lottón telitalálat elérésének valószínűsége 1 : 43 949 268 = $2{,}28 \cdot 10^{-8}$, ami körülbelül 162-szer nagyobb, mint ezerből egy uránmag 8 órán belüli elbomlásának valószínűsége.

2. Hasonló a gondolatmenet, ha onnan indulunk, hogy a λ bomlási állandó fizikai jelentése az időegység alatti bomlási valószínűség, és figyelembe vesszük, hogy 1000 atom van.

10. feladat (Junior kategória)

kitűzték: Mester András és Tarján Péter

Az EU-ban a legtöbb élelmiszert Belgiumban kezelik ionizáló sugárzással. A kezeléshez használt izotópok γ-fotonjainak energiája körülbelül 1,2 MeV.

a) Miért kezelnek bizonyos élelmiszereket ionizáló sugárzással?

b) Hány gray (Gy) az elnyelt dózis, ha 50 dkg csirkehús besugárzása esetén annak hőmérsékletemelkedése 1,2 °C? (A csirkehús fajhője: $c \approx 3370$ J/(kg·°C).)

c) Mennyi ideig tart a besugárzás, ha a γ-forrás aktivitása 420 TBq, és a kibocsátott energia 25%-a nyelődik el a húsban?

Megoldás

a) A besugárzás során az élelmiszerben jelen lévő mikroorganizmusok és kártevők elpusztulnak, így hatékonyan megelőzhetők az étel okozta megbetegedések. Mivel a sugárzás az élelmiszer további érését (például gyümölcsök), illetve csírázását (burgonya, hagyma) is jelentősen lelassítja, az eltarthatóság is megnövekszik. Fontos látni, hogy ilyen célra többnyire γ-sugárzást használnak. Ettől a besugárzott anyag nem aktiválódik fel, azaz nem lesz radioaktív. Az ilyen módon kezelt élelmiszerekben semmilyen érzékszervi változás nem érzékelhető a kezeletlenhez képest (ellentétben más tartósítási eljárásokkal).

b) A besugárzás során elnyelt hő:

$$Q = c\, m\, \Delta T = 3370 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg °C}}\right) \cdot 0{,}5\ \text{(kg)} \cdot 1{,}2\ \text{(°C)} =$$

$$= 2022\ \text{J},$$

ebből az elnyelt dózis

$$D = \frac{Q}{m} = c\, \Delta T = 3370 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg °C}}\right) \cdot 1{,}2\ \text{(°C)} =$$

$$= 4044\ \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 4044\ \text{Gy}.$$

c) A forrás aktivitása $A = 420$ TBq $= 4{,}2 \cdot 10^{14}$ 1/s. Az általa kibocsátott sugárzás összteljesítménye

$$P_ö = A\,E_\gamma = 4{,}2 \cdot 10^{14} \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 1{,}2\ (\mathrm{MeV}) =$$

$$= 5{,}04 \cdot 10^{14}\ \frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{s}} = 80{,}75\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = 80{,}75\ \mathrm{W}.$$

A hasznos teljesítmény ennek a 25%-a: $P_h = \eta P_ö =$ 20,19 W. Ezzel a besugárzás ideje:

$$\Delta t = \frac{Q}{P_h} = \frac{2022\ (\mathrm{J})}{20{,}19\ (\mathrm{W})} \approx 100\ \mathrm{s}.$$

11. feladat (Szenior kategória) kitűzte: Radnóti Katalin

Vegyünk egy 500 nm hullámhosszú (zöld színű) fény hullámhosszával megegyező sugarú gerjesztett hidrogénatomot.

a) Ezen hidrogénatom elektronja mekkora főkvantumszámú pályán van a Bohr-modellben?

b) Mekkora hullámhosszúságú fotonnal lehetne ezt az atomot ionizálni?

c) Előfordulhat-e egy ekkora méretű hidrogénatom szobahőmérsékleten?

Adatok: $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js, $c \approx 3 \cdot 10^{8}$ m/s, az alapállapotú hidrogénatom sugara $r_0 \approx 0{,}05$ nm-rel közelíthető, energiája −2,2 aJ.

Megoldás

a) A hidrogénatom mérete a Bohr-modellben a következőképpen függ az elektron n főkvantumszámától: $r = r_0 n^2$. Ebbe behelyettesítve $n = 100$ adódik.

b) A hidrogénatom energiája a következőképpen függ az elektron n főkvantumszámától:

$$E_n = \frac{-2{,}2\ (\mathrm{aJ})}{n^2}.$$

Ennek mínusz egyszerese a keresett ionizációs energia, ami $2{,}2 \cdot 10^{-22}$ J. Ez a keresett foton energiája. A hullámhossza

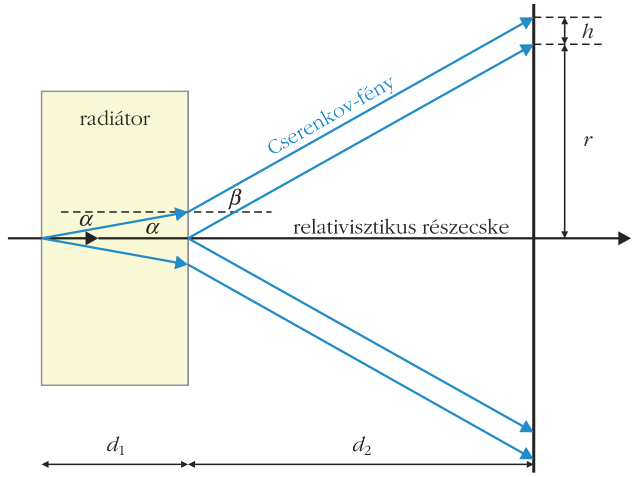
$$\lambda = \frac{hc}{E_n} = 0{,}9\ \mathrm{mm},$$

ami a mikrohullámú tartományba esik.

c) A körülbelül 290 K-es környezetben egy részecske átlagos kT energiája $\approx 4 \cdot 10^{-21}$ J, ami körülbelül 20-szor akkora, mint a kiszámított ionizációs energia; tehát nem lenne stabil az ütközésekkel szemben.

12. feladat (Szenior kategória) kitűzte: Tarján Péter

A részecskefizikai detektorrendszerek egyik hasznos összetevője a RICH (Ring Imaging CHerenkov) detektor. Ennek elve, hogy egy vékony átlátszó közegen (radiátoron) nagy sebességgel áthaladó töltött részecske Cserenkov-fényt kelt; ez a kúpalakban szétterjedő sugárzás egy távolabb elhelyezkedő ernyőn



gyűrű alakú fényfoltot hoz létre. A fényt pozícióérzékeny elektronikus detektorokkal érzékeljük. Egy ilyen detektor vázlatát mutatja az ábra. Egy nagy energiájú π^- áthaladásakor az ernyőn kapott fénygyűrű belső sugara $r = 118{,}2$ mm.

a) Milyen vastag a fénygyűrű az ernyőn?

b) Mekkora az átmenő töltött részecske lendülete?

c) Egy adott típusú részecskénél vajon mi korlátozza a meghatározható legkisebb és legnagyobb lendületet?

Adatok: a radiátor törésmutatója $n = 1{,}2988$, $d_1 = 15$ mm, $d_2 = 80$ mm, $m_\pi = 0{,}1396$ GeV/c^2 $= 2{,}489 \cdot 10^{-28}$ kg, a radiátor és az ernyő közötti közeget tekintsük vákuumnak. A Cserenkov-sugárzás kibocsájtási szögére írhatjuk, hogy

$$\cos\alpha = \frac{c/n}{v},$$

ahol v a részecske sebessége, n a törésmutató és c a fénysebesség vákuumban.

Megoldás

a) A radiátorból kilépő Cserenkov-fény törési szögére felírható:

$$\mathrm{tg}\,\beta = \frac{r}{d_2},$$

ahonnan $\beta = 55{,}91°$. Ekkor a beesési szög (= a Cserenkov-fény fél kúpszöge) a Snellius–Descartes-törvényből számítható:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \Rightarrow \alpha = 39{,}62°,$$

így a gyűrű vastagságának meghatározása geometriai feladattá egyszerűsödött:

$$\frac{h}{d_1} = \mathrm{tg}\,\alpha,$$

ahonnan $h = d_1\,\mathrm{tg}\,\alpha = 12{,}42$ mm.

b) A Cserenkov-sugárzásról tudjuk, hogy

$$\cos\alpha = \frac{c/n}{v}.$$

Innen a pion sebessége:

$$v = \frac{c}{n \cos\alpha} = 0{,}9995\, c = 2{,}996 \cdot 10^8 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

A relativisztikus (látszólagos) tömeg:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = 30{,}88\, m_0 = 4{,}311 \ \frac{\mathrm{GeV}}{c^2} =$$

$$= 7{,}686 \cdot 10^{-27} \ \mathrm{kg}.$$

A lendület:

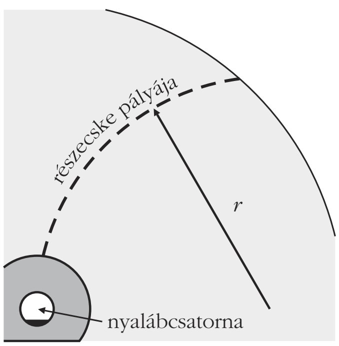
$$m\,v = 30{,}88\, m_0 \cdot 0{,}9995\, c = 4{,}309 \ \frac{\mathrm{GeV}}{c} =$$

$$= 2{,}303 \cdot 10^{-18} \ \mathrm{kg}\, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

c) A meghatározható legkisebb lendületre a Cserenkov-küszöb ad alsó korlátot. (A küszöbérték ennél a radiátornál $1{,}207\, m_0 c$ – ennek kiszámítását nem várjuk el.) A Cserenkov-küszöböt kicsivel meghaladó lendületek pontos meghatározását az ernyő detektorainak helyfelbontása korlátozza. Nagyon nagy lendületeknél az α szög nagy lesz, széles a Cserenkov-kúp, tehát ilyenkor az ernyő mérete a korlátozó tényező.

13. feladat (Szenior kategória) kitűzte: Tarján Péter

Egy gyorsítóban egymással szemben 1 GeV energiára gyorsított elektronokat és pozitronokat ütköztetünk. Az ütközés után keletkező töltött részecskéket egy úgynevezett sokszálas proporcionális kamrával mérjük, amely a töltött részecskék lendületének mérésére alkalmas. A detektor belsejében a homogén mágneses tér párhuzamos a nyalábbal (az ábra síkjára merőleges) és nagysága B = 2 T. Egy észlelt, egyszeres elemi töltésű részecske pályasugara r = 1,59 m.



a) Mekkora az észlelt részecske lendületének nyalábirányra merőleges összetevője?

b) A lenti táblázatból adjuk meg az összes lehetséges részecskét, amihez ez a pálya tartozhat! m_0 értéke MeV/c^2 egységekben van megadva.

jel	γ	ν_e	e^-	μ^-	π^0
m_0	0	$<2{,}2\cdot10^{-6}$	0,511	105,7	135
jel	π^-	K^-	p	n	τ^-
m_0	139,6	493,7	938,3	939,6	1776,9

Megoldás

a) A részecske görbült pályáját a Lorentz-erő okozza (v_T a transzverzális sebesség, azaz a sebességnek az ábra síkjába eső komponense):

$$m \frac{v_T^2}{r} = Q\, v_T\, B \ \Rightarrow \ m\, v_T = r\, Q\, B.$$

Ide behelyettesítve a görbületi sugarat:

$$p_T = m\, v_T = r\, Q\, B = 5{,}09 \cdot 10^{-19} \ \mathrm{kg}\, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} =$$

$$= 0{,}951 \ \frac{\mathrm{GeV}}{c}.$$

b) Az ütközőnyalábos gyorsítóban a lendületmegmaradás miatt mindig legalább két részecske keletkezik az elektron-pozitron annihiláció után. A részecskék keltésére rendelkezésre álló energia 2·1 GeV+ 2·511 keV ≈ 2 GeV, ennek kell fedeznie a részecskepár nyugalmi tömegét és mozgási energiáját is. A keletkezett részecskéknek a kvantumos megmaradási törvények miatt azonos részecske-antirészecske párnak és a feladat szövege értelmében elektromosan töltötteknek kell lenniük. A két részecske a lendületmegmaradás miatt éppen ellentétes irányba (egymással 180°-ot bezáróan) indul az ütközési pontból. A részecske-antirészecske pár ellentétes töltése miatt pedig, ha az egyik jobbra kanyarodik, a másik balra. Egy p lendületű, m_0 nyugalmi tömegű részecske teljes relativisztikus energiája

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4},$$

ezt átrendezve:

$$m_0 = \frac{1}{c^2} \sqrt{E^2 - p^2 c^2}.$$

A részecskepár egyik felére az energiamegmaradás miatt E = 1 GeV. Az előzőekben kapott lendületet behelyettesítve:

$$m_0 \le 0{,}309 \ \frac{\mathrm{GeV}}{c^2} = 5{,}51 \cdot 10^{-28} \ \mathrm{kg}.$$

Az e feltételnek megfelelő részecskepárok a következők: $\gamma\gamma$, $\nu\bar{\nu}$ (bármelyik fajtájú), e^-e^+, $\mu^-\mu^+$, $\pi^-\pi^+$, $\pi^0\pi^0$, hiszen a többi megadott részecske keltéséhez a nagy tömeg miatt nem áll rendelkezésre elegendő energia. Ezek közül az elektromosan semleges fotonpárt, a neutrínókat és a semleges pionokat ki kell zárni, mert ezek az ionizációs elven működő kamrában nem hagynak nyomot (ráadásul – rövid életideje miatt – a π^0 a el sem jut odáig). Marad tehát az e^-e^+, $\mu^-\mu^+$ és a $\pi^-\pi^+$. (A részecsketömeg azért lehet kisebb is, mint a kiszámított érték, mert a számított transzverzális lendület csak alsó becslést ad a teljes lendületre, hiszen a részecskének lehet nyalábirányú sebességkomponense is.)

Értékelés

Minden feladatra maximálisan 5 pontot lehetett kapni. A maximális 50 pontból a Szenior kategóriások legjobbjának 37-et, a Juniorok legeredményesebbjének pedig 34 pontot sikerült szereznie.

A Szenioroknál a leggyengébben a 13. feladat sikerült; erre a maximálisan lehetséges pontszám (5) helyett az átlagosan elért eredmény mindössze 1,84 volt. Meglepő módon a Junioroknál az első és a harmadik feladat sikerült leggyengébben, az átlag mindkettőnél 1,10 volt. Az 5., 8., 10., és 11. feladatok kivételével valamennyi feladatra érkezett tökéletes (5 pontos) megoldás is. Az 5., 10. és 11. feladatra maximum 4 pontos megoldások érkeztek, míg a 8. feladatnál maximum 3 pontot értek el a Junior tanulók.

A legjobb átlagos pontszámot a második feladatra érték el a Szenior kategóriás versenyzők (4,11), a Junior tanulók legjobb átlagát (3,20) a kilencedik – kifejezetten Junior versenyzők számára készült – feladatnál találtuk.

(*Folytatjuk*)

BIG BANG FIZIKAKURZUS ELEKTRONIKUS TANULÁSTÁMOGATÁSSAL – 1. rész

Keresztesi Miklós
Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar

A huszonegyedik század elejére a természettudományos képzés háttérbe szorult,[1] a reáltantárgyak és -pályák kedveltsége visszaesett. *Csapó Benő* vizsgálata szerint a 11. osztályos tanulók a fizika kedveltségét az 1–5 skálán 2,5-re értékelték.[2] Ez a legalacsonyabb érték a reáltantárgyak között. Az alacsony kedveltség következménye, hogy kevesen jelentkeznek fizikaalapozó tárgyat tanító felsőoktatási intézménybe, kevesen akarnak fizikusok, fizikatanárok lenni.

A Big Bang,[3] ingyenes fizikakurzussal célunk a fizika tantárgy iránti érdeklődés felkeltése. Célcsoport a középiskolák 11. osztályos tanulói. A fizikatanárokkal úgy szeretnénk együttdolgozni, hogy számottevően ne emelkedjen terhelésük. Ennek érdekében rendszerünket elektronikus tanulástámogatással fejlesztettük Moodle eLearning felületen, automatizált távoktatással. A PTE Informatikai és Innovációs Igazgatóság eLearninges számítógépe kész az ország bármely településéről jelentkező tanulók fogadására.[4]

A kurzust a Pécsi Tudományegyetem és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat közösen üzemelteti.

[1] Józsa Krisztián, Lencsés Gyula, Papp Katalin: Merre tovább iskolai természettudomány? Vizsgálatok a természettudomány iskolai helyzetéről, a középiskolások pályaválasztási szándékairól. *Fizikai Szemle 46/5* (1996) 167–170.

[2] Csapó Benő: A tantárgyakkal kapcsolatos attitűdök összefüggései. *Magyar Pedagógia 100/3* 343–366.

[3] *Fred Hoyle* angol matematikus, csillagász nem fogadta el az ősrobbanás-elméletet, az állandó állapotú Világegyetemben hitt. Gúnyból találta ki a Big Bang nevet. Az ősrobbanás-elmélet híveinek ez a név megtetszett és átvették.

Keresztesi Miklós fizika–matematika és a műszaki ismeretek tanár. 1964-től nyugdíjazásáig a tanárképzőn, majd a PTE TTK-n dolgozott; elektronikát, számítógépes és mikroprocesszoros irányítást tanított, számítógéppel támogatott távoktatási kurzusokat tartott. Tíz évig működött az általa fejlesztett informatika, kiegészítő szakos tanárképzés, offline számítógépes irányítással. A 2010-es években szaktárgyához eLearninges kérdésbankot fejlesztett és online vizsgáztatott.

Az oktatás tartalma

A kurzus tartalmi anyaga a fizika huszadik századi fejlődésének egy jelentős szelete, amely megismételhetetlenül szép és egyedülállóan csodálatos történet.[5] Az *1. ábrán*[6] huszonkilenc kutató látható az 1927-es Solvay-konferencián, közülük tizenhét Nobel-díjas volt vagy lett.

A huszadik század első évtizedeiben tudományos körökben elfogadott volt az Univerzum statikussága, amelyet kezdetben (1933-ig) *Einstein* is képviselt. Az ó- és középkortól örökölt statikus világszemléletet az állandóság és a fejlődést tagadó tulajdonság jellemezte. Az *1. ábrán* az első széksor közepén ül az őszülő Albert Einstein, aki 1915-ben hozta nyilvánosságra gravitációs egyenletét (*2. ábra,* felső egyenlet). Félt, hogy a gravitációt, az időt és a teret ötvöző modellje gravitációsan összeomlik, ezért 1917-ben beiktatta egyenletébe az antigravitációs tulajdonságú Λ kozmológiai állandót (*2. ábra,* alsó egyenlete).

1922-ben *Alexander Friedmann* orosz–szovjet elméleti fizikus megoldotta Einstein egyenletét és azt kapta, hogy a téridő görbülete időben változik. Észrevette, hogy az einsteini egyenlet az Univerzum egészét modellezi. Friedmann azt is megállapította, hogy

[4] A kurzusra a következő címen lehet jelentkezni: Eötvös Loránd Fizikai Társulat, Ujvári Sándor, ujvasa36@gmail.com

[5] *Ember az erőtérben.* Staar Gyula beszélgetése Nagy Károly akadémikussal; http://forrasfolyoirat.hu/0410/staar.html

[6] *Ritka történelmi fotók.* Solvay-konferencia, 1927. https://rarehistoricalphotos.com