

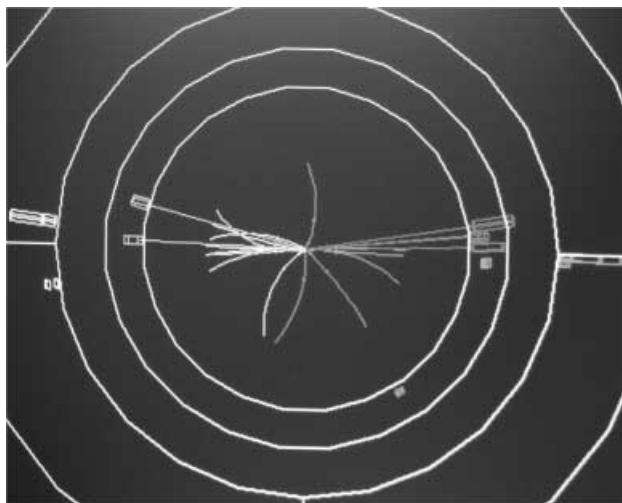


Látogatás az RMKI gyorsítójához

A debreceni program *Trócsányi Zoltán* vezette, 20 diák és három tanár vett részt rajta. A 11 középiskola között négy volt Debrecenből, kettő-kettő Egerből és Miskolcra, valamint egy-egy Gyöngyösről, Hevesből és Nagyváradról.

A székesfehérvári diákműhely számára a szervezője, *Horváth Árpád*, honlapot készített: <http://www.roik.bmf.hu/diakmuhely/>, rengeteg információval. Négy győri, három székesfehérvári és egy dunaújvárosi középiskola 19 diákja vett részt rajta.

A fizika iránt érdeklődő diákok között változatlanul kevés a lány: a budapesti műhelyen csak fiúk voltak,



Egy részecskeütkezés eredménye

a debrecenin két lány vett részt, a székesfehérvárin viszont, öröndetes módon, már hat.

A tesztlapot általában sikeresen töltötték ki a gyerekek. A tíz kérdés között volt jónéhány részecskefizikai, amelyekre elvileg előtte megkapták a választ, volt tréfás és beugrató is. A fizikaiakra többségében jó válaszok születtek, a többire vegyes volt a reakció. A legjobban sikerült budapesti tesztlap, például, nyolc jó választ tartalmazott a tizből.

Horváth Dezső

A diákműhelyek honlapja: <http://www.physicsmasterclasses.org>
EPPOG: <http://eppog.web.cern.ch/eppog>

A MAGFIZIKAI KUTATÁSOK HŐSKORA – NŐI SZEMMEL III.

A mesterséges radioaktivitás, a neutron és a maghasadás felfedezése

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

Irène Joliot-Curie (1897–1956), *Marie Curie* lánya volt és szintén Nobel-díjas fizikus lett, noha férjével együtt kémiai Nobel-díjat kapott. Munkájuk során elő tudtak állítani mesterségesen olyan atommagokat, amelyek instabilak voltak. Az 1935. évi Nobel-díj indoklása: „új, mesterséges radioaktív izotópok kémiaja területén végzett munkájukért”. Ez a felfedezés óriási lehetőséget adott az orvosi alkalmazások körének.

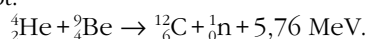


A neutron felfedezése

Irène Curie hosszú éveken keresztül a polónium vizsgálatára szakosodott. A Joliot-Curie házaspár polóniumból kibocsátott α -részecskékkal kísérletezett 1931-

ben. Bór és berillium elemeket sugároztak be, és azt figyelték meg, hogy igen nagy áthatoló képességű, csekély intenzitású sugárzás keletkezett. Amikor a sugárzást hidrogéntartalmú lemezbe, nevezetesen paraffinrétegbe vezették, akkor váratlan és meglepő dolgot tapasztaltak. A sugárzás protonokat lökött ki a viaszból. Megmérték a protonok energiáját, amelyet 5,3 MeV nagyságúnak találtak. A jelenséget úgy magyarázták, hogy a protonok megjelenéséért gamma-fotonok lehetnek a felelősek, amelyeknek az energiája 50 MeV körül van. Ez legalább tízszer akkora energia, mint az addig ismert gamma-energiák.

Chadwick egészen másképpen magyarázta a jelenséget 1932-ben. Mégpedig úgy, hogy egy olyan elektromosan semleges részecske keletkezett, amelynek tömege közelítőleg egyenlő a proton tömegével. Neutronnak nevezte el. Mai jelöléseinkkel a következőképp írhatjuk le a reakciót:



Felmerül a kérdés, hogy miért nem a Joliot-Curie házaspár jutott erre a kulcsfontosságú felfedezésre? Ennek legvalószínűbb oka az lehetett, hogy nem voltak felkészülve rá. Chadwick *Rutherford* tanítványa volt, aki már az 1920-as évektől kezdve azt hangoztatta, hogy szerinte az atommagban kell lennie egy, a protonéval közel azonos tömegű, de semleges töltésű részecskének. Ezt 1932-ben elnevezte neutronnak.

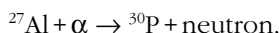
A házaspár (1. ábra) a pozitront is felfedezhette volna. Ugyanis 1932 áprilisában Svájcban 3500 m magasságban tanulmányozták a kozmikus sugárzás hatását az atommagokra. Wilson-kamrájukban észlelték, hogy az elektronnyomvonalak közül néhány ellenkező irányban hajlik. Még ugyanezen évben *Carl Anderson* sok ezrenyi nyom vizsgálata alapján vezette be a pozitront az elemi részecskék sorába.



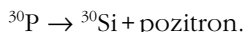
1. ábra. Irène és Pierre Joliot-Curie

A mesterséges radioaktivitás felfedezése

A Joliot-Curie házaspár igazi nagy felfedezése azonban nem sokáig váratott magára. Alumínium atommagok bombázása során a következő magreakció jött létre:



majd a keletkezett foszforizotóp tovább bomlott,



A keletkező pozitron spektruma is folytonos volt, a természetes radioaktív izotópok béta-sugárzásához hasonlóan. Továbbá a besugárzott anyag részecskébocsátása a besugárzást követően csak bizonyos idő után csökkent, akárcsak egy természetes radioaktivitással rendelkező anyag esetében.

A felfedezés óriási jelentőségű napjainkban is, hiszen például így lehet pozitronkibocsátó izotópot létrehozni az orvostudomány számára fontos PET-vizsgálatok céljára.

Irène Curie élete további részében részt vett a francia atomenergia-bizottságban, 1948-ban átvette az édesanyja által alapított Rádium Intézet vezetését, amit professzori katedrájával együtt haláláig megtartott. Továbbá irányította a Párizshoz közeli Orsay-i nagy magfizikai kutatóközpont építését, amely tervei alapján készült el [1].

A maghasadás felfedezése

Másfajta magátalakulás (nukleáris jelenség) a maghasadás, amely a természetben végbemegy (a Földön csak az urán 235-ös izotópjá esetében), de lassú neutronok felhasználásával mesterségesen is elő lehet segíteni. A maghasadás felfedezésének előkészítése *Enrico Fermi* (1901–1954) kísérleteivel kezdődött.

Kísérleteihez a Joliot-Curie házaspártól kapta az ötletet, akik írásukban jelezték, hogy ugyan ők a polónium által kibocsátott alfa-részecskéket használták, de minden bizonnyal érdemes más részecskékkel is atommagokat bombázni. Így esett Fermi választása az éppen ak-

koriban felfedezett neutronra. Mivel a részecske semleges, az atommag nem taszítja a felé közeledő neutron. Fermi és munkatársai szisztematikus kísérletezésbe kezdtek. A periódusos rendszer összes elemének atommagját neutronokkal bombázták, majd a keletkezett termékeket azonosították. Módszeresen jártak el, szigorú rendben végigmentek az egész periódusos rendszeren: a hidrogénnel kezdtek és az uránnal fejezték be.

Az urán esetében sokféle sugárzó anyag keletkezését tapasztalták. Az egyik, 13 perces felezési idejű izotóp különösen érdekesnek tűnt. De a kor szemléletmódjának megfelelően a keletkező új atommagokat mind a besugárzott anyaghoz a periódusos rendszerben közel állónak gondolták.

A maghasadás folyamatát csak 1939 elején fedezték fel, bár *Ida Noddack* német vegyész már 1934-ben írt cikkében felvetett egy ilyen magátalakulási lehetőséget [2]. Cikkében élesen támadta Fermi, mivel szerinte nem járt el elég körültekintően és alaposan a kémiai azonosításban és a radioaktivitás okának kivizsgálásában, különösen egy 13 perces felezési idejű anyag esetében. (Ez valószínűleg az urán hasadása során keletkező bárium 12 s-os felezési idejű béta bomlásakor keletkező lantán lehetett, amelynek 14 perces felezési ideje.)

Cikkében elsősorban a különböző elemek kémiai azonosításának hiányosságairól írt. Hiányolta, hogy Fermi nem végezte el jóval több elemre az azonosítást, mint például polóniumra, illetve az összes ismert elemre. Majd megjegyzi a következőket:

„De éppolyan módon feltételezhető, hogy ha neutronokat használunk magátalakítás céljára, valami teljesen új típusú magreakció megy végbe, (...) elképzelhető, hogy az atommag széthasad több nagy töredékre, amelyek természetesen ismert elemek izotópjai lennének, de egyáltalán nem a besugárzott elem szomszédságában.”¹ Itt merül fel először a maghasadás gondolata [3].

¹ „Es wäre denkbar, dass bei der Beschiessung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere grössere Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der bestrahlten Elemente sind.“

1 H 1,0080																	2 He 4,0026
3 Li 6,941	4 Be 9,0122																
11 Na 22,9898	12 Mg 24,305																
19 K 39,102	20 Ca 40,08	21 Sc 44,956	22 Ti 47,90	23 V 50,941	24 Cr 51,996	25 Mn 54,9380	26 Fe 55,847	27 Co 58,9332	28 Ni 58,71	29 Cu 63,54	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,9216	34 Se 78,96	35 Br 79,909	36 Kr 83,80
37 Rb 85,467	38 Sr 87,62	39 Y 88,906	40 Zr 91,22	41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc (99)	44 Ru 101,07	45 Rh 102,906	46 Pd 106,4	47 Ag 107,870	48 Cd 112,40	49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75	52 Te 127,60	53 I 126,905	54 Xe 131,30
55 Cs 132,905	56 Ba 137,34	57 La 138,906	58 Ce 140,12	59 Pr 140,908	60 Nd 144,24	61 Pm (147)	62 Sm 150,4	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,925	66 Dy 162,50	67 Ho 164,930	68 Er 167,26	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97	
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)															

Lantanidák

58 Ce 140,12	59 Pr 140,908	60 Nd 144,24	61 Pm (147)	62 Sm 150,4	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,925	66 Dy 162,50	67 Ho 164,930	68 Er 167,26	69 Tm 168,934	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97
--------------------	---------------------	--------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	--------------------

Aktinidák

90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (242)
-------------------	-------------------	------------------	-------------------	-------------------

2. ábra. A periódusos rendszer

Inzelt György a következőképp jellemzi a helyzetet: „A fizikusok saját elméletük csapdájában vergődtek, ugyanis úgy gondolták, hogy az atommag lényegi tulajdonsága a nagyfokú stabilitás, és a magban bekövetkező változások jellemzően csak kicsik lehetnek.” [4]

A periódusos rendszert (2. ábra) szemlélve látható, hogy mely elemet melyikkel tévesztették „szándékosan” össze: Bárium (Ba) és rádium (Ra), továbbá lantan (La) és aktínium (Ac), mivel egymás alatt vannak a rendszerben, kémiai tulajdonságaik hasonlóak.

Ida Noddack Tacke (1896–1978) elismert német vegyész volt, 1919-ben doktorált a Berlieni Műszaki Egyetemen. Férjével, Walter Noddackkal együtt többek közt felfedezték a rénum elemet. A technécium elem felfedezésében is részt vettek, de mivel nem ők izolálták először, így nem őket tekintik a felfedezőnek. Három alkalommal is jelölték kémiai Nobel-díjra.



Ida Noddack írása azonban nem keltett feltűnést, bár ismert volt magfizikai körökben. A cikk hatására Fermi végzett is ezzel kapcsolatos számításokat, de az akkor rendelkezésre álló adatok még nem voltak elég pontosak. Az atommagok tömegének mérése nem volt elég pontos – a J.J. Thomson ötlete nyomán Aston által tökéletesített tömegspektroszkópia még csak ígéretes eljárás volt.

Az atommag kötési energiája a következő módon „mérhető” meg: Az atommag Z számú protonból és $N = A - Z$ számú neutronból áll, ahol A a nukleonok száma, a tömegszám. Az $M_{mért}$ tömegű atommag nukleonjainak $M_{számolt}$ össztömege:

$$M_{számolt} = Z m_p + (A - Z) m_n,$$

ahol m_p a proton, m_n a neutron tömege. Azonban a tömegmérések az ily módon számított tömegnél mindig kisebb értéket szolgáltatottak az atomtömegekre (2. ábra). A tömegkülönbség:

$$\Delta M = M_{számolt} - M_{mért} = [Z m_p + (A - Z) m_n] - M_{mért},$$

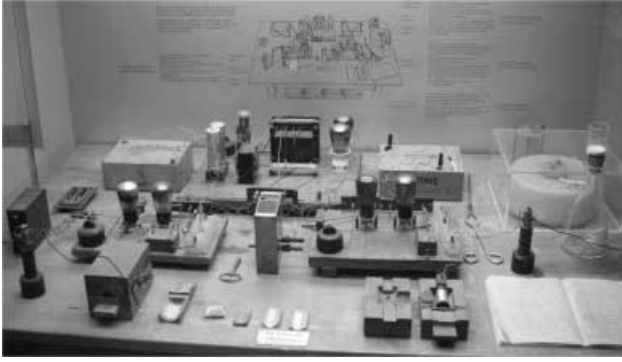
amelyet tömegdefektusnak nevezünk. Ez a tömegdefektus szorozva fénysebesség négyzetével adja a mag kötési energiáját.

1938-ban Irène Joliot-Curie laboratóriumából is érkeztek olyan hírek, hogy az urán neutronnal történő besugárzásakor kisebb rendszámú elemek is keletkeznek. A nyert anyag esetében lantanra és aktíniumra gyanakodtak. (A lantan a bárium hasadási terméke.) Fermihez hasonlóan a Joliot-Curie házaspár és Pavle Savić is létrehozott mesterséges maghasadást, de a jelenségre – a kísérleti evidencia ellenére – teljesen más magyarázatot adtak. Ők is uránt sugároztak be neutronokkal, de szerintük ekkor a 89-es rendszámú aktínium keletkezett. A periódusos rendszerben az aktínium felett található az 57-es rendszámú lantan, vagyis ezek kémiai hasonlóan viselkednek. Szétválasztásuk frakcionált kristályosítással történhet. (Kisebbségi atomtömege miatt a lantan előbb kristályosodik.) A radioaktivitás azonban a lantánt látszott követni. Végül kimutatták, hogy a radioaktivitás az aktíniumtól származott. Ezután döntött Otto Hahn (1879–1968) úgy, hogy részletesen megvizsgálja a kérdést, és ő is elvégzi a kísérleteket, az urán neutronnal történő besugárzását, valamint a kémiai azonosításokat. Ma már tudjuk, hogy a radioaktivitás a lantántól származott. Így Joliot-Curie-ék egy hasadási terméket fedeztek fel, de szinte szándékosan félreértelmezték a kísérletek eredményét, annyira hihetetlen volt számukra a helyes következtetés.

Végül Otto Hahn és Fritz Strassmann (1902–1980) vegyészek, valamint Lise Meitner fizikus szisztematikus kísérletei és pontosabb adatokkal, a cseppmodell felhasználásával végzett számításai segítségével fedezték fel a maghasadást (3. ábra). Lise Meitner unokaöccsével, Otto R. Frischsel közösen írt, 1939. február 11-én megjelent cikkükben adták meg a folyamat magyarázatát.² A felszabaduló összes mozgási energiára napjainkban is elfogadott becslést adtak, amely 200 MeV [5].

A maghasadás elméletének alapgondolata az atommag cseppmodellje alapján röviden a következő: Két energiatagot kell figyelembe venni, a Coulomb-energiát és a felületi energiát. Az utóbbi annak következménye, hogy az atommag felületén lévő nukleonok kevésbé járulnak hozzá az atommag kötési energiájához, mint a mag belsejében lévők.

² “possible that the uranium nucleus has only small stability of form, and may, after neutron capture, divide itself into two nuclei of roughly equal size (the precise ratio of sizes depending on finer structural features and perhaps partly on chance). These two nuclei will repel each other and should gain a total kinetic energy of c. 200 MeV, as calculated from nuclear radius and charge.”



3. ábra. A mérési összeállítás – amellyel Otto Hahn, Lise Meitner és Fritz Strassmann felfedezte a maghasadást – rekonstrukciója a müncheni Deutsches Múzeumban.

Az atommagot gerjesztve, például egy neutron befogódása során felszabaduló energiával, a mag oszcillálni kezd, felülete, ezzel együtt a felületi energiája is megnövekszik, amely a mag eredeti alakjának visszaállítására törekszik. Az elektrosztatikus taszítás azonban a mag még nagyobb deformációját segíti elő. Amennyiben az elektrosztatikus erő nagyobb lesz a felületi feszültségnél, a deformáció tovább növekszik, és a mag széthasadhat. A legtöbb atommag esetében a felületi feszültség sokkal nagyobb, mint a Coulomb-taszítás, és gyorsan helyreáll a stabil magalak. A gerjesztést a mag gamma-sugárzással, vagy nukleonok kibocsátásával leadja. Csak a legnehezebb elemek atommagjaiban akkora a protonok száma, hogy az atommag viszonylag kis deformációja hasadáshoz vezethet. A Földön csak egyetlen ilyen természetes atommag létezik, az urán 235-ös tömegszámú izotópjá.

Az egy nukleonra jutó átlagos energia a következőképp írható fel:

$$\epsilon = \frac{E}{A} = -\epsilon_V + \epsilon_F A^{-1/3} + \epsilon_C A^{-4/3} Z^2 + \epsilon_p (A - 2Z)^2 A^{-2},$$

amelyben E az energia, A a tömegszám, Z a protonok száma (a rendszám), ϵ_V térfogati, ϵ_F felületi, ϵ_C Coulomb- és ϵ_p Pauli-tagok, amelyek állandók és minden mag esetében azonosak. A függvény minimumhellyel rendelkezik, amelyet meghatározva a tömegszámra közelítőleg 52 adódik, amelyhez a 26-os rendszámú vas tartozik.

Összefüggésünk segítségével azt is meg lehet becsülni, hogy a maghasadás mekkora protonszám felett járna energiaszabadulással. Egyszerűség kedvéért a könnyű magokra érvényes fele proton, fele neutron arányt használva, továbbá feltételezve azt, hogy két egyforma mag keletkezik, a $Z = 36$, vagyis a kripton-tól kezdve a maghasadás energia felszabadulással jár. Ez azért nem következik be mégsem, vagyis a nagyobb rendszámú atommagok azért stabilak, mert a gömb alakú mag deformációja két egymást érintő kisebb gömb alakú hasadvánnyá a felületi energia erőteljes növekedésével jár, azaz potenciálgátat kell leküzdeni. Csak ez után repül szét a két hasadványmag, ami a Coulomb-taszítás folytán jelentős energiaszabadulás mellett történik.

A nehéz magok teljes E kötési energiája a következő összefüggéssel becsülhető meg:

$$E(A, Z) = -\epsilon_V A + \epsilon_F A^{2/3} + \epsilon_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \epsilon_p \frac{(N - Z)^2}{A}.$$

Ennek segítségével az urán esetében valóban megkapható a körülbelül 200 MeV hasadási energia.

A hasadás energianyereséges, ha a Coulomb-energiatag nagyobb értékkel csökken, mint amennyivel a felületi tag növekszik. A hasadás E_b energiáját megbe-csülő modellszámításunkban vegyük azt, hogy két feleakkora tömegszámú és feleakkora magra hasad szét az urán 235-ös izotópjá!

$$E_b = E(A, Z) - 2E\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right).$$

Írjuk fel a második tagot!

$$2E\left(\frac{A}{2}, \frac{Z}{2}\right) = 2\left[-\epsilon_V \frac{A}{2} + \epsilon_F \left(\frac{A}{2}\right)^{2/3} + \epsilon_C \left(\frac{Z}{2}\right)^2 \left(\frac{A}{2}\right)^{-1/3} + \epsilon_p \left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 \left(\frac{A}{2}\right)^{-1}\right]$$

Írjuk fel a hasadás során felszabaduló energiát! Vegyük észre, hogy eben már csak a felületi tag és a Coulomb tag marad meg!

$$E_b = \epsilon_F A^{2/3} \left[1 - 2\left(\frac{1}{2}\right)^{2/3}\right] + \epsilon_C Z^2 A^{1/3} \left[1 - 2\left(\frac{1}{2}\right)^2 \left(\frac{1}{2}\right)^{-1/3}\right]$$

A számításokat elvégezve:

$$E_b \approx -0,74 \text{ pJ } A^{2/3} + 0,04 \text{ pJ } Z^2 A^{1/3} \approx 0,04 \text{ pJ } A^{2/3} \left(\frac{Z^2}{A} - 19\right).$$

Helyettesítsük be az $A = 235$, és a $Z = 92$ értékeket, akkor a hasadás energiájára körülbelül 27 pJ adódik. Egy 235-ös uránmag hasadásakor körülbelül 30 pJ energia szabadul fel, ami nagyjából 200 MeV.

Lise Meitner (1878–1968) *Boltzmann* tanítványa volt. 1906-ban doktorált Bécsben, értekezésének témája: *Hővezetés homogén testekben*. 1907-ben ment Berlinbe, ahol Otto Hahn-nal dolgozott 30 éven keresztül a Vilmos Császár Intézetben. Az első években csak az alagsorban dolgozhatott, mint fizetés nélküli segéderő. 1907-ben kimérte a béta-sugárzás energiaspektrumát, amely folytonos, nem pedig az atomok esetében megszokott diszkrét szintekből áll. Gammaspektrum-méréseket is végzett. 1917-ben Hahn-nal közösen felfedezték a tórium és az urán közt lévő elemet, amely a protaktínium nevet kapta. 1919-ben kinevezték az első női profesz-



szornak Németországban. 1932-ben a neutron tömegének pontos megmérése fűződik a nevéhez. Az általa meghatározott neutrontömeg kicsit nagyobb a proton tömegénél – ez a különbség sokáig vita tárgya volt abban az időben. Ő mutatta ki először az elektron–pozitron párképződést.

1938-ban Németország bekebelezte Ausztriát, és Meitnernek, zsidó származása miatt, menekülnie kellett. Végül Svédországba ment. Élete további részét Svédországban töltötte, ahol az atomerőművekkel kapcsolatos program egyik fontos személyiségként tevékenykedett. Emlékére a 109-es rendszámú elem a meitnerium (Mt) nevet kapta.



Cikksorozatunkban néhány, a radioaktivitás korai történetéhez tartozó felfedezést, kutatót mutattunk be, különös tekintettel a nőkre. Célunk az emlékezés, a múlt azon értékeinek bemutatása volt, amelyre büszkék lehetünk.

De ezen kívül célunk volt az is, hogy olyan gondolatmeneteket ismertessünk meg, amelyekről úgy gon-

doljunk, hogy az oktatás számára hasznosak lehetnek – nem csak a közoktatásban, hanem a felsőoktatásban is. A történet során alkalmunk adódott, hogy ne csak a végeredményt mutassuk be, hanem az ahhoz vezető utat, megvitassuk a felmerült kérdéseket, elemezzük a nemegyszer rendkívül ötletes kísérleti elrendezéseket is. Az első részben bemutatott számításaink, becsléseink érdekessé tehetik a feladatmegoldó órákat, gyakorlatokat, hiszen konkrét kutatások során felmerült kvantitatív problémákat lehet megoldani.

Irodalom

1. Goldsmith, M.: *Frédéric Joliot-Curie*. Gondolat Könyvkiadó, Budapest, 1979.
2. Hráskó P.: Epizódok a maghasadás felfedezésének történetéből. *Természet Világa* különszám (2006) 59–66.
3. Noddack, I.: On Element 93. *Zeitschrift für Angewandte Chemie* 47 (September, 1934) 653.
4. Inzelt G.: *Vegykönyhájában szintén megteszi*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2006.
5. Meitner, L., Frisch, O.R.: Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction. *Nature* 143 (Febr. 11, 1939) 239–240.

MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

SZÉNHYDROGÉNEK SZEREPE A JÖVŐ ENERGIAELLÁTÁSÁBAN

Az utóbbi időben hazánk és a világ energiaellátása az érdeklődés homlokterébe került. Napjainkban a világ energiafelhasználásának közel 60 százalékát a kőolaj és a földgáz szolgáltatja. Ugyanakkor az optimista előrejelzéseket megcáfolva a kőolaj ára az utóbbi hónapokban eddig sohasem látott magasságokba szökkent. Meggyőződésem, hogy a jövő kilátásait nem lehet a geológiai adottságok figyelembe vétele nélkül helyesen megítélni. Ezt kívánja elősegíteni ez a rövid ismertetés.

A szénhidrogén-előfordulásokat konvencionális és nem-konvencionális csoportra osztják. Ezek évmilliókkal ezelőtt élt tengeri élőlények szerves anyagának 80–110 fokos hőmérsékleten és nagy nyomáson történt vegyi átalakulása révén jöttek létre. A keletkezett kőolaj és földgáz elkezdett a kisebb nyomás irányába vándorolni, amíg egy záró kőzet meg nem akadályozta a vándorlást. Csapdákknak nevezik ezeket a földtani szerkezeteket. Ezek többnyire boltozatok, vagy törésvonalak menti kiemelkedések (1. ábra). A csapdák felső részén helyezkedik el a földgáz, alatta a kőolaj és legalul víz. A mai termelés zöme konvencionális előfordulásokból történik.

A nem-konvencionális kőolaj-előfordulásokhoz tartoznak az *olajhomokok*, amelyek erősen viszkózus bitument tartalmaznak. Legnagyobb ismert előfordulásuk Kanadában, Alberta tartományban van, ahol e homokok nagy területen a felszínre is kibukkannak. Itt nagy külfejtésekben, hagyományos bányászati

módszerekkel termelhetők ki. A költségeket nagyon megnöveli, hogy a bitument csak forró gőzzel és kémiai oldószerekkel lehet a homoktól elválasztani.

A közepesen viszkózus *nehéz olajok* átmenetet képeznek a hagyományos kőolaj és a bitumen között. Legnagyobb ismert előfordulásuk Venezuelában, az Orinoco torkolatvidékén van. Gazdaságos kitermelésük ma még nem megoldott.

Az *olajpalák* olyan márgás kőzetek, melyek pórusait kerogén tölti ki. Erősen viszkózus, éretlen kőolaj ez. Fő ismert előfordulásai az Egyesült Államokban, Utah, Colorado és Wyoming államokban vannak. Hatalmas készletekről van szó, de gazdaságos kitermelésüket és feldolgozásukat eddig nem sikerült megoldani.

1. ábra. Kőolaj- és földgázlelőhelyek kialakulása

