

MODELLEK ÉS SZIMMETRIÁK

BEVEZETÉS

Az atomokról alkotott elképzelésünket állandóan módosítják az újabb felfedezések. Az atom modelljének végleges formája ennek ellenére csak nagyon lassan, nehézkesen alakul ki. Az atomi részecskéket ugyanis szemmel nem érzékelhetjük, nem tehetjük láthatóvá optikai vagy képrögzítő eszközökkel sem, hiszen méretük a látható fény hullámhossztartománya alatt van. Meg kell tehát elégednünk a részecskék formájára, helyzetére, egymáshoz való viszonyára vonatkozó következtetésekkel, sőt néha a találgatásokkal.

Nobel-díjas fizikustól származik a kijelentés, mely szerint ma még nincs olyan atommodell, amely valóban pontosan, a mérési tapasztalatokkal egyezően írna le mindent. A Bohr-féle atommodell szemléletes, de nem helyes. Az újabb modell a kvantumelméletből született, és elnevezése kvantummechanikai vagy más néven hullámmechanikai modell. Ez nem szemléletes, így megértéséhez a klasszikus fizikán nevelkedett szemléletünknek is változnia kell. Alkalmazhatósága is korlátozott, mert bonyolult matematikai háttere miatt ma legfeljebb a hidrogén és a hélium színképeinek értelmezésére alkalmas. Pedig egy jó atommodell szinte egy csapásra rendet teremthetne az egymásnak és sokszor a valóságnak is ellentmondó elméletek kusza világában.

A meglévő és korlátozott használhatóságú atommodellek, továbbá azok javított, módosított változatai többnyire az elektronok mozgásával és helyzetével foglalkoznak, és kevésbé térnek ki arra, hogy az atommagban a protonok és a neutronok miként foglalnak helyet, és hogyan hatnak egymásra. Sok fejtörést okoz az is, hogy az egymást taszító protonok miért tömörülnek mégis stabil atommagokká, és mi tartja össze őket. Még ma is megválaszolatlan ez az ellentmondás éppúgy, mint az a kérdés, hogy mi a szerepük az atommag összetartásánál a semleges neutronoknak. Az pedig végképp homályos pontja a fizikának, hogy a protonok és a neutronok egymásba való átalakulása miért és miként következhet be.

De nemcsak a nukleonok térbeli elhelyezkedése, hanem számuk arányainak összefüggései is tisztázatlannak. Az izotóptáblázat egy tetszőleges helyén ugyanis semmiféle tudományos számítással nem lehet bizonyossággal meghatározni, hogy az adott protonszám és neutronsám mellett az adott elemnek stabil vagy instabil izotópja adódik-e ki. Ha például a Heisenberg-féle empirikus összefüggés

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015 A^{\frac{2}{3}}}$$

képletébe néhány izotóp Z (rendszám) és A (tömegszám) értékeit próbaképpen behelyettesítjük, akkor rájöhettünk használhatóságának korlátozottságára.

Végigtekintve a természetben található elemek izotóptáblázatán (1. sz. melléklet), megállapítható, hogy a neutronok száma 0 és 146 között változik, mégpedig folytonos, de közel sem szabályos növekedéssel a hidrogéntől az uránig terjedő tartományban. Az is kiolvasható a táblázatból, hogy a neutronok száma kis tömegszámoknál azonos, vagy kevéssel több, mint a protonok száma; a nehezebb elemeknél viszont eltolódik az arány a neutronok javára.

Kiválasztva a táblázat kezdő és záró elemei közül példaképpen egyet-egyet, az látható, hogy: míg a 2-es rendszámú hélium 2 protonjára 2 neutron jut, vagyis a neutrontöbbség 0, addig a 92-es rendszámú urán 92 protonját 146 neutron kíséri, tehát a neutrontöbbség 54. A két végétől közti táblázati rész azonban eléggé nagy rendtelenséget mutat.

Rejtélyes, hogy miért olyan hézagos a táblázatban a stabil izotópok oszlopa, vagyis miért helyezkednek el közöttük és mellettük látszólagos rendszertelenséggel instabil izotópok. Az ismert, hogy a neutronok száma befolyásolja egyedül a stabilitást, de arra semmiféle magyarázat nincs, hogy miért stabilak például a nikkel 58, 60, 61, 62 és 64-es tömegszámú izotópjai, és ugyanakkor miért nem stabilak a közöttük lévő 59-es, vagy 63-as, valamint az 58 alatti vagy a 64 feletti tömegszámok.

A szakirodalom alapján vélelmezhető, hogy a tudomány részéről eddig kevés erőfeszítés történt a proton-neutron arány tisztázása érdekében. A fizikusokat, vagy a stabil izotópok neutronsámának rendszertelensége riasztotta el a kutatásoktól, vagy csak harmadrangú problémának minősítik a neutronok szerepét, és ezért nem kutatják kellőképpen a témát.

A fizika mai tanítása szerint:

- a neutronok kaotikus keveredéssel helyezkednek el a protonok között az atommagban,
- a neutronok a semleges „kötőanyag” szerepét töltik be a magban az egymást taszító protonok között,
- a neutronok száma kis rendszámoknál a protonokéval azonos, majd a rendszám emelkedésével a neutron-proton arány növekedése statisztikai összefüggésként kezelhető.

A méréssorozatok eredményei ezzel szemben azt mutatják, hogy közel sem folytonos, nem törésmentes a stabil izotópok sorozata, vagyis az izotóptérképen (0.1. és 0.2. ábra) megjelenő sávja. Feltűnő, hogy a stabilak közé beékelődnek instabil izotópok, mégpedig olyan határozott „szabálytalansággal”, hogy az teljesen kizárja a statisztikai kapcsolat helyességét.

Ha a c. pont szerinti állítás igaz lenne, azaz ha a neutronok száma egyszerűen a protonszám százalékában megadható lenne, akkor a stabil izotópok egy szélesedő sáv belsejében helyezkednének el úgy, hogy a sávot alul a β^+ sugárzó, felül pedig a β^- sugárzó izotópok határolnák, mégpedig középről távolodva egyre növekvő felezési idővel. Mivel ez az egyöntetű kép messze áll a valóságtól, ezért nem szabad és nem lehet a proton-neutron arányt a statisztika szintjére degradálni, hanem tudomásul kell venni, hogy a magok stabilitását nem a „ragasztóanyagként” emlegetett neutronok mennyisége határozza meg – amit statisztikailag szükségesnek, vagy elegendőnek minősítve be lehet határolni –, hanem valami egészen más eredetű ok a meghatározó. De mi lehet az? Erre próbálunk választ adni az alábbiakban.

El kell ismerni, hogy a protonszám és a neutronszám közötti összefüggés zárt matematikai formában való megadása szinte reménytelen. Olyan nagy ugyanis a látszólagos összevisszaság a nukleonok arányának folytonosságában, hogy a közismert matematikai eszközökkel való kifejezhetőség nem vezethet célhoz. Mégis kell lennie egzaktnak kapcsolatnak, mert különben nem mutatnának pontosan ugyanolyan izotóp-megoszlási arányt a világ bármelyik részéből származó ércek, ásványok. Nem lenne továbbá olyan határozottan döntő jelentőségű egyetlen neutronnak a megléte vagy a hiánya. Az urán-238 izotópnál például egy utólag becsapódott többletneutron az izotóp felezési idejét a több százmillió évről lecsökkenti 23 percre, és egy-egy neutronnak a többlete vagy a hiánya a táblázat legtöbb pontján ugyanilyen végzetes módosulást okoz. Az is biztos, hogy ezek a lényegi összefüggések nem az elektronok „szintjén” keresendők, mert azok szerepe ebből a szempontból csak másodlagos.

Bizonyított tény, hogy például a mágnesség és az elektromosság az atomi szinteken lejátszódó folyamatok eredménye. Az elektronok szerepe közismerten – és kellően bizonyítottan – döntő jelentőségű a mágnesség és az elektromosság különböző jelenségeinél. A mérések azonban csupán azt bizonyították, hogy az elektronok valóban közvetítői ennek a két fizikai jelenségnek, az azonban nem bizonyított, hogy az elektronok alapján meghatározók is lennének. Sőt biztos, hogy nem is meghatározók. **Az atom elektronjainak számát ugyanis elsődlegesen a protonok száma határozza meg (!), és sohasem fordítva. Ezért okkal feltételezhetjük, hogy a protonok fontosabb szerepet játszanak ezekben a jelenségekben, annak ellenére, hogy a hatások közvetítői kétségkívül az elektronok.**

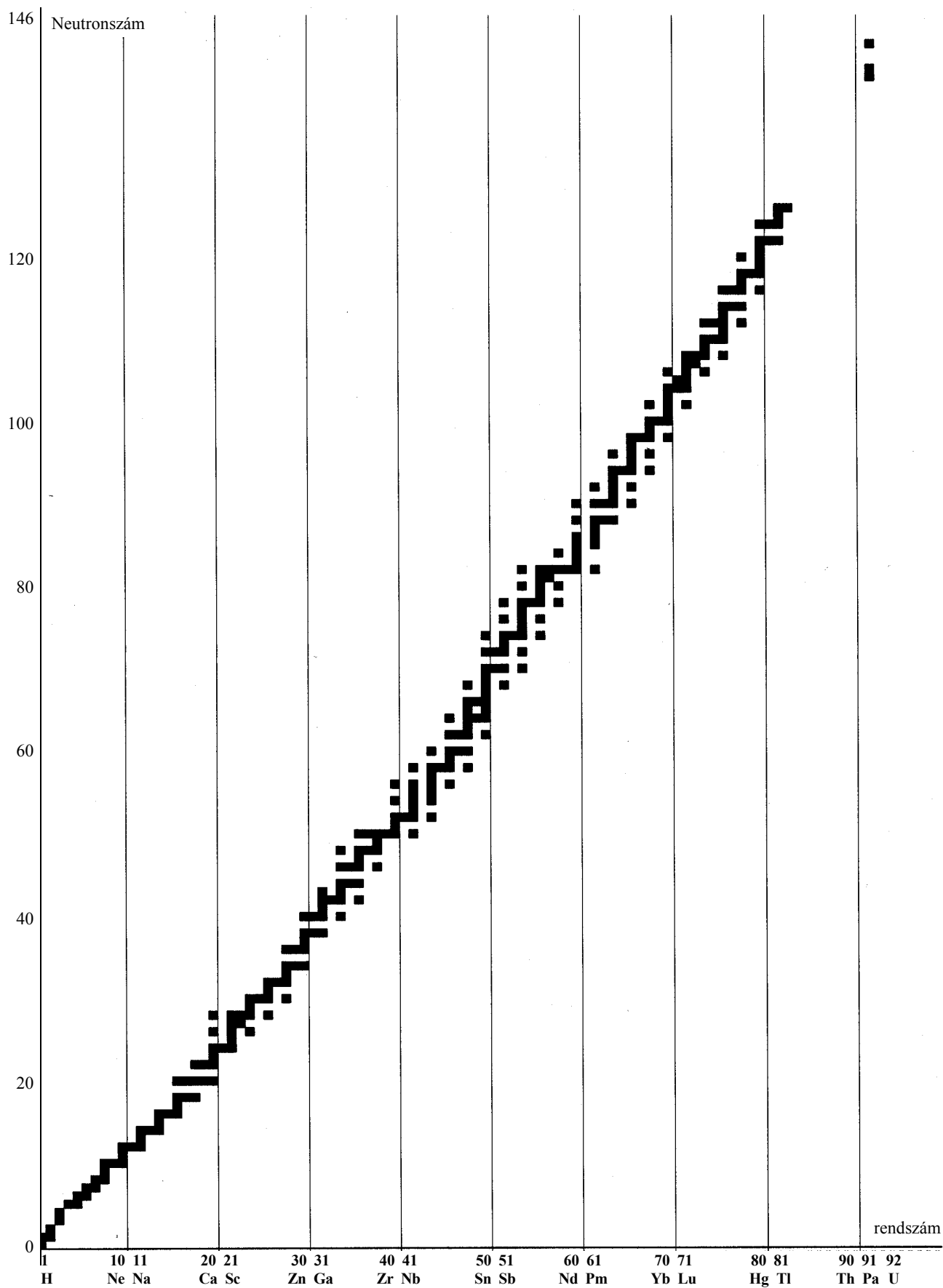
Azért tartjuk tehát fontosabbnak először a protonok és a neutronok (azaz a nukleonok) magbéli helyzetének és szerepének tisztázását, mert úgy véljük, hogy ennek megismerése után érthetőbbé fog válni az elektronok elhelyezkedése, mozgása, valamint ezek okai és a kiváltott következmények is.

Nagyon fontos kísérleti eredmény volt annak megfigyelése, hogy a magból kiszabadult neutron 15-18 perc alatt protonná alakul át. Van tehát valami közös a protonban és a neutronban, mégpedig az, hogy a végső, stabil állapotuk azonos. Ebből a szempontból lényegtelen az átalakulás módja, és az is, hogy közben elektron, antineutrínó és energia szabadult fel, mégpedig tömegdifferencia elvesztése ellenében. A végeredmény a lényeges: hogy a keletkezett részecske ugyanaz. Fontos továbbá az a tény, hogy megvan a visszaút lehetősége is, mégpedig a béta-plusz-bomlásoknál megfigyelt átalakulás, amikor a protonból neutron lesz. Ebből következik, hogy a proton és a neutron ugyanazon részecske két különböző állapota. De mi a különbség közöttük? Miért proton a proton, és miért neutron a neutron?

Induljunk ki abból a tényből, hogy a neutron csakis bezártan létezhet. Ha ugyanis kiszabadul a magból, akkor rövidesen töltéssel rendelkező protonná alakul át, mégpedig ugyanolyan protonná, mint amilyen az a proton, amelyik eredetileg is proton volt. Innen kezdve semmi különbség nincs egy „valódi” proton és egy neutronból keletkezett proton között. A neutron semlegességét tehát egyedül a magbéli kötöttség, a bezártság okozhatja.

Következtetés: a neutron a protonnak bezárt, „lefojtott”, mozgásában korlátozott változata, amely azért semleges, azért töltés nélküli, mert töltése a bezártsága miatt nem tud érvényesülni. De akkor mi a proton? Miért van töltése, és mi egyáltalán a töltés?

A fizikakönyvek kerülnek a pontos definíció megadását, de annyi a hatások ismerete alapján világos, hogy a töltés egyféle vonzási, vagy taszítási képesség, tehát az erő közlésének polarizált változata. Ha a proton a magban is és onnan kiszabadulva is töltéssel rendelkező részecske, azaz proton marad, akkor feltételezhetjük, hogy ez azért lehetséges, mert a magban sincs igazán bezártan, hanem a mag felszínén ül, és ezért érvényesülhet a töltése. (Lásd később részletesen.)



0.1. ábra
 Izotóptérkép a stabil izotópokkal.

71	Neutronsám																										
70																											+
69																									+	+	
68																									+	+	
67																									+	+	
66																									+	+	
65																									+	+	+
64																									+	+	+
63																									+	+	+
62																									+	+	+
61																									+	+	+
60																									+	+	+
59																									+	+	+
58																									+	+	+
57																									+	+	+
56																									+	+	+
55																									+	+	+
54																									+	+	+
53																									+	+	+
52																									+	+	+
51																									+	+	+
50																									+	+	+
49																									+	+	+
48																									+	+	+
47																									+	+	+
46																									+	+	+
45																									+	+	+
44																									+	+	+
43																									+	+	+
42																									+	+	+
41																									+	+	+
40																									+	+	+
39																									+	+	+
38																									+	+	+
37																									+	+	+
36																									+	+	+
35																									+	+	+
34																									+	+	+
33																									+	+	+
32																									+	+	+
31																									+	+	+
30																									+	+	+
29																									+	+	+
28																									+	+	+
27																									+	+	+
26																									+	+	+
25																									+	+	+
24																									+	+	+
23																									+	+	+
22																									+	+	+
21																									+	+	+
20																									+	+	+
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	
	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	

0.2. ábra

Izotóptérkép (részlet) a mérhető felezési idejű β^+ és β^- sugárzó izotópokkal.

	stabil izotópok
	β^+ -instabil izotópok
	β^- -instabil izotópok

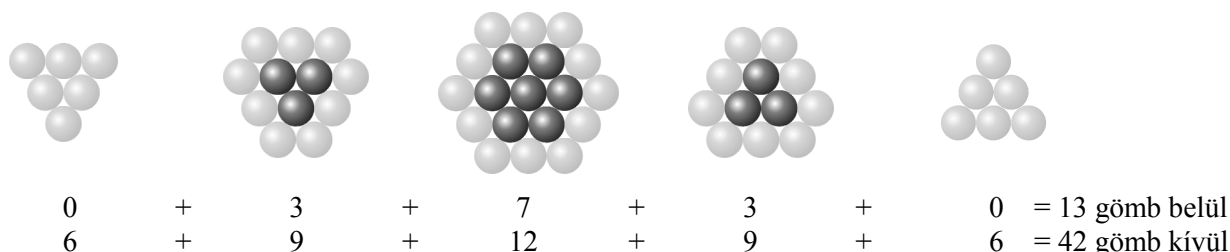
Tételezzük fel tehát, hogy a neutronok az atommag belső részében helyezkednek el, a protonok pedig a mag felszínén. A feltételezés helyessége néhány modell összeállítása után máris megállapítható, és pedig a proton-neutron arányok analízisével. Kiderült ugyanis a modellkísérletekből, hogy a neutronok számával pontosan azonos gömbhalmaz fér el a zárt protonburok belsejében. A neutronszám és a protonszám különbsége nagyon lényeges szerepet játszik az adott atommag stabilitásában, és éppen ez a fogalom az, ami megadta a kulcsot a stabil izotópok neutron-proton viszonyszámának megfejtéséhez. Megoldódott tehát a matematikai kezelhetőség problémája, de nem exponenciális vagy statisztikai függvényekkel, hanem a térgeometria eszközeivel. Legyen a továbbiakban a neutron és proton differencia elnevezése: **neutrontöbblet**. Számértékei az 1. sz. melléklet 5. oszlopában megtalálhatók.

1. A NEUTRONMODELL

Megvizsgálva gömbök szabályos térbeli halmazainál a felszínt határoló gömbök és a halmaz belsejébe záródott gömbök számának a viszonyát egyrészt, másrészt a kémiai elemek stabil izotópjainál a proton-neutron arányokat: párhuzamok, sőt azonosságok mutatkoznak a pusztán geometriai jellemzőkkel bíró gömbhalmazok és az atommag nukleonjai között. Ezek alapján egyértelművé vált, hogy létezik egy matematikai, illetve térgeometriai kapcsolat a protonszám és a neutronszám között. Nagyszámú modellkísérlet nyilvánvalóan pozitív eredményssorozata alapján kimondható:

1. tétel: a gömbökből álló zárt, szabályos térbeli geometriai alakzatok összes elemének a száma úgy aránylik az adott halmaz felszínén lévő gömbök számához, mint a részecskék világában az atommag neutronjainak száma a protonok számához.

Legyen a mintapélda egy 55 gömbből álló olyan halmaz, amelynél a halmaz belsejébe záródott 13 gömböt kívülről 42 gömb fogja körül. A halmaz rétegei az 1.1. ábra szerintiek. A komplett halmaz fotója a 7. fejezet 7.26/c. ábráján látható. A stabil izotópok táblázata (1. sz. melléklet) szerint az 55 neutronot tartalmazó magok közül a 42-es rendszámú molibdénnek a 97-es izotópjá az, amelynél a neutron-proton differencia, vagyis a neutrontöbblet 13. Az 1.1. ábra tehát a Mo-97-es izotóp modellje, illetve annak egyik formai változata.



1.1. ábra

55 gömbből álló halmaz metszeti síkjai (rétegei).

A tétel szerint: a gömbhalmaz összes elemének a száma (itt: 55) úgy aránylik a felszínre kizáródott gömbök számához (42), mint ahogyan az atommag (itt: Mo-97) neutronjainak a száma (55) aránylik a protonok számához (42). A gömbök szabályos halmaza és az atommag nukleonjainak aránya közötti analógia igaz tehát a közölt mintapéldára, de a modellkísérletek szerint ugyanígy igaz a stabil izotópok mindegyikére. A gömbhalmazok felszíni egyedei számának és az ugyanekkora neutronhalmazhoz tartozó protonszámának az azonossága az izotóptáblázat teljes terjedelmében: nem lehet véletlen. A megtalált geometriai analógia minden bizonnyal a maga valóságában mutatja meg a protonok és a neutronok tényleges térbeli elhelyezkedését is. Minden jel arra mutat, hogy az atommag nukleonhalmazát alkotó neutronok és protonok külön héjakba rendeződve építik fel az atommagot, és pedig úgy, hogy az általában többrétegű neutronhalmaz belül van, a protonok pedig –egy rétegben– kívül foglalnak helyet. (1.2. ábra.) Kimondható tehát:

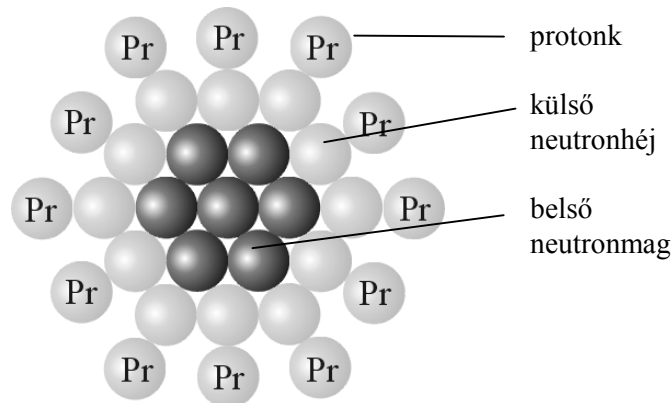
2. tétel: Az atommagban a protonok a mag felszínén helyezkednek el, a neutronok pedig belül, a protonok által körbezárt térrészben.

Megjegyzések az 1.2. ábrához:

1. A protonok modellezése, valamint rajzi megjelenítése a továbbiakban azért felesleges, mert a modellek felszíni gömbjeinek száma éppen a protonszámot mutatja, így a protonhéj ábrázolása csak a neutronhéj megismétlését jelentené.

2. A „belső mag” a modellnek a neutronhéjon belüli része. (Nem tévesztendő össze az általános szóhasználatból ismeretes atommaggal, amely a protonokat és a neutronokat is magában foglalja.)

A modellezés során tapasztalható volt, hogy a gömbhalmazok többsége a szabályosság megmaradásával átrendezhető úgy, hogy a halmaz összessége nem változik meg, csak külső és belső részeinek aránya módosul. A példaként vett 55-ös halmaz, az említett 42 külső + 13 belső gömb esetén éppolyan szabályos, mint a 44+11-es változatnál. A természetben is igaz ugyanez, hiszen az azonos neutronszámú magok az *izotón* atommagok. Az előző mintapéldák a Mo-97 és a Ru-99 izotópok protonszámát és neutrontöbbletét mutatták.



1.2. ábra

Az atommag nukleonhalmaza.

(Kívül a protonok, belül a héjakba rendeződött neutronok)

Ha a gömbhalmaznak a héjméretét hagyjuk változatlanul, akkor tapasztalhatjuk, hogy a szabályosság és a zártság feltételei többféle belső mag esetén is teljesülnek. Például egy 42-es gömbhéj szabályosan rátehető egy 8, 10, 11, 12, 13, 14 vagy 16-os belső gömbhalmaz bármelyikére. A természetben is ugyanígy van ez, hiszen a 42-es rendszámú molibdénnél éppen 8, 10, 11, 12, 13, 14 vagy 16 lehet a neutrontöbblet. Ezek tehát ugyanazon elem *izotópjainak* a modelljei. A neutronmodell felületi neutronrétegének *zártságát* a héj optimális mérete biztosítja. A neutronmodell belső magjának és külső héjának elrendeződési variánsai egyes esetekben akár 10-12 változatot is eredményezhetnek azon a tartományon belül, ahol a héj még zárt marad. Az ezen túli pozitív vagy

negatív irányú eltérés – vagyis a neutronhéj túlságosan „szűk” vagy túlságosan „bő” mérete – egy különleges bomláshoz, az úgynevezett béta-bomláshoz fog vezetni.

A β^- -instabil és a β^+ -instabil izotópok modelljeinek elkészítése során láttuk, hogy azok a magok fognak β^- -bomlással magasabb rendszámú elemmé átalakulni (pl. a Ni-65 átalakul Cu-65 izotóppá), melyeknek neutrontöbblete (példánkban: 9) túl sok ahhoz, hogy annak befedését a meglévő protonszámmal egyező neutronhéj geometriailag teljesíteni tudja. Másként fogalmazva: a Ni-65-ös izotóp 28 héjneutronja nem tudja lefedni a 9 neutronból álló belső neutronmagot, ezért β^- instabil. Az átalakulás során keletkezett réz Cu-65 izotópja viszont stabil, mert 29 héjneutronja tökéletesen lefedi a belül lévő 7-es neutronmagot. A 9-es belső mag a β^- -átalakulás során ugyanis 7-re csökkent.

Minden bizonnyal geometriai okok kényszerítik a β^+ instabil izotópokat is arra, hogy kisebb rendszámú elemmé alakuljanak. Például az instabil (radioaktív) Cu-60 átalakul Ni-60 izotóppá, ami stabil. A Cu-60-nál ugyanis túlságosan kicsi a belső neutronmag, így az azt körbefogó, geometriailag bő neutronhéj egyik neutronja mintegy begyűrődik a belső neutronmagba éppúgy, mint ahogyan a protonburok egyik protonja a külső neutronhéjba benyomul. (A béta-bomlásokat lásd részletesebben az 5. fejezetben.) Ezek az átalakulások – ahol protonból neutron lesz, vagy egy neutron átalakul protonná – arra engednek következtetni, hogy az atommagban kizárólag a nukleon pozíciója határozza meg az adott nukleon milyenségét. Közismert, hogy a neutron csak az atommagon belül stabil, a magból kiszabadulva viszont néhány perc alatt protonná alakul át, mégpedig elektron, antineutrínó és felszabaduló energia kíséretében. Kimondható tehát:

3. tétel: Az atommagban a nukleon pozíciója határozza meg azt, hogy az adott nukleon proton lesz, vagy pedig neutron.

Az atommag legkülső héján elrendeződő protonok töltése kifelé szabadon tud érvényesülni, és szomszédait egyáltalán nem zavarják az egymás mellett sorakozó protonok (lásd az 1.2. ábrát). Ilyen elrendeződés mellett nem érvényesülhet a taszítás hatása sem, mely a szabadon mozgó protonok esetében észlelhető, ill. mérhető. Ezáltal megmagyarázhatóvá vált a protonok taszításának hatástalansága az atommagon belül! A magfizikának erre a nagy kérdésére egyébként mindeddig nem született másféle kielégítő válasz.

Kísérleti úton – modellezéssel – megállapítottuk, hogy az összes létező elem minden stabil izotópjára, és a kvázistabil transzuránokra is igazak a tételek. Ez elegendő ok annak feltételezésére, hogy a szabályos gömbhalmazok a stabil atommagok neutronhalmazát modellezzik. Ezért a leírás további részében az egyszerűség kedvéért a feltételes mód használatát mellőzni fogjuk.

Az atommag stabilitásának feltételei

Minden proton a mag középpontja felé igyekszik tolni azt a neutron, amelyen éppen helyet foglal. Az előzőek alapján megfogalmazható:

Az atommag stabilitásának 1. feltétele: a neutronok elrendeződésének térbeli szimmetriája, a belső neutronmag elemeinek érintkezéses kapcsolódása, és a neutronhalmaz külső héjának zártsága a feltétel ahhoz, hogy az adott izotóp stabil legyen.

A *térbeli szimmetria* a feltétel egyik eleme. Ennek követelménye azért szükségszerű, mert az atommag neutronhalmazára nehezedő erőrendszernek egyensúlyban kell lennie. Ez az erőrendszer az egyes protonok befelé irányuló tolóerőinek összessége, és eredője nulla kell, hogy legyen. Térbeli szimmetria, vagy szabályosság alatt a modellek külső héján lévő nukleonok elhelyezkedését, illetve az ezekből származó, és a geometriai középpont felé mutató erők rendszerének azon elrendeződését értjük, amely a térbeli erővektorok kölcsönös kiegyenlítéséhez szükséges. Azonos nagyságú erők esetében ez akkor áll fenn, ha az erők a szabályos testek (tetra-, hexa-, okta-, dodeka- és ikozaéder) csúcsaitól, lapközepeitől, vagy élfelezőitől befelé mutattva hatnak. Ezeknél az egymáshoz viszonyított térszögek azonosak. Az összes ilyen erőrendszer *páros* számú erőkből áll.

Az 1. feltételnek a **héjméretekre vonatkozó kritériuma** a stabil izotópok számát átlagosan 10-12-re korlátozza. A **szimmetriára vonatkozó kritérium** ezt a számot a páros elemeknél alig befolyásolja, míg a páratlan elemeknél átlagosan 3 izotópnnyira szűkíti a tartományt.

A térbeli szimmetria a **páros rendszámú elemeknél** azért teljesül annyira könnyen, mert minden páros elem besorolható a szabályos testek térfelosztási kategóriáinak valamelyikébe. A **páratlan rendszámú elemek** modelljeinél viszont teljes mértékben hiányoznak a magasabbrendű szimmetriák, ezért minden esetben egytengelyű (tengelyszimmetrikus) alakzat adódik. Ennek a "kötelező" formának a kizárólagos létezése csökkenti le a páratlan elemek kiviteli variánsait a fenti szűk tartományra. A neutronhalmaz geometriai formája, szimmetriája, továbbá a felszíni gömbök elhelyezkedési zártsága csak az egyik feltétele a gömbhalmaz által modellezett izotóp stabilitásának.

Léteznek ugyanis olyan neutronmodellek, amelyeknél a gömbhalmazok tökéletesen illeszkedve, szabályos alakzatot alkotnak zárt, mindenütt konvex felszínnel, mégsem stabil az izotóp, amit modelleznek. Ezek mindegyikénél a neutronsám páratlansága okozza az instabilitást, és a 2. feltétel erre vonatkozik.

Az atommag stabilitásának 2. feltétele: hogy a neutronok az atommag belsejében

- a.) vagy párosan helyezkedjenek el,
- b.) vagy zárják körbe geometriailag tökéletesen a mag középpontjában lévő páratlan neutron (ill. a középsikban elhelyezkedő 3-as vagy 5-ös neutroncsoportot).

A páros elemeknek értelemszerűen csak a páratlan neutronsámú izotópjait tizedeli meg a 2. feltétel. Megmarad azonban csaknem minden elem stabil sávjának a közepe táján, 1-2 páratlan neutronsámú izotóp. Ez annak köszönhető, hogy a b. pont teljesülését elősegíti a páros elemek külső héjának, gyakran magasfokú térbeli szimmetriája. (Lásd részletesebben a 3.2. táblázatban.)

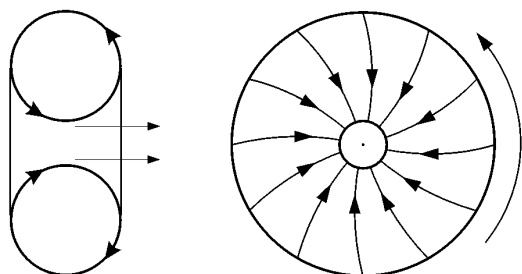
A páratlan elemeknél a külső neutronburkok a térbeli szimmetria legalacsonyabb fokát képviselik. A külső héj geometriai tökéletlensége miatt a 2. feltétel b. pontját nem tudják teljesíteni a páratlan elemek. Következmény a stabil tartomány beszűkülése. Így végül csak a sáv közepén elhelyezkedő 1-2 páros neutronsámú izotóp marad stabil. (Lásd a 4.1. táblázatban.)

A 2. feltétel megtalálását a stabil izotópok modelljeinek geometriai elemzése tette lehetővé. Az elemzések kiderítették a stabilitás feltételeit a szabályszerűség geometriai hátterének feltárásával. Megállapítottuk, hogy a neutronhalmazok rétegeinek megfelelő arányossága mellett akkor stabil az adott halmaz, ha az páros, vagy ha megvalósult a középre tolódott páratlan egyedek teljes és hibátlan szimmetriájú közrezárása. A feltétel behatárolja a neutronoknak a stabilitáshoz szükséges elhelyezkedését, az okokra azonban nem ad választ. Nem derül ki belőle, hogy miért szükséges a stabilitáshoz a neutronok párossága, illetve a páratlanok körbezártsága. Ezek szükségességének okát keresve minden logikai következtetés oda vezet, hogy a 2. feltétel hátterében egy olyan geometriai eredetű oknak kell lennie, amely nem a teljes neutronhalmazra, vagy annak formájára vonatkozik, hanem az egyes neutronok alakjára.

Igen egyszerű és kényelmes a részecskéket gömbformájának feltételezni, ezért első megközelítésben mi is ezt tettük, vagyis a modelleknél a neutronok alakját gömbnek tételeztük fel. Hangsúlyozzuk azonban, hogy ez nem azért történt, mert a részecskéket gömbnek képzeljük el, hanem azért, mert az összes itt tárgyalt feltétel ennél az alaknál teljesül. Meggyőződésünk ennek ellenére, hogy a neutron formája mégsem lehet tökéletes gömb, hanem csupán egy, azt jól megközelítő tengelyszimmetrikus geometriai forma, de ez az itt elhangzott állításokat nem befolyásolja.

A neutronok alakjára vonatkozó elképzelés részleteinek elemzése a neutronmodell helyességének bizonyításához nem feltétlenül szükséges, sőt a témától való elkalandozást jelentené. Ezért itt elegendő csupán arra vonatkozóan néhány részlet említése, hogy a neutronok különleges viselkedésének mi lehet az eredete.

A tapasztalat szerint a neutronok csakis a magban, tehát csak bezártan léteznek. Túlnyomórészt párosan fordulnak elő a stabil atommagokban, vagyis nehezen tűrik a páratlan létezést. Köztudott továbbá, hogy a neutronok a magból kiszabadulva protonokká alakulnak. Ennek a furcsa viselkedésnek is nyilvánvalóan objektív oka van, amely természetesen az evilági fizika kelléktárával is érthetővé és szemléletessé tehető.



1.3. ábra
Örvénytér

Az elemi részecskék alakja (formája) összefügg a viselkedésükkel. Számunkra az alak megfigyelése reménytelen, a viselkedés azonban nem. A viselkedésből viszont lehet következtetni az alakra, és most ezt tesszük.

Keressük tehát azt a fizikai objektumot, amely a geometriai formájából adódóan a neutron és a proton összes tulajdonságát magában hordozza.

Minden jel arra enged következtetni, hogy ezekkel a tulajdonságokkal csakis egy önmagában záródó, a palástja és a tengelye mentén is forgó tórusz alakú örvénytér rendelkezhet. (1.3 ábra) Bár az így jellemzett örvénytereknek még a keletkezése is kísértetiesen hasonlít azoknak a folyamatoknak a melléktermékeihez, amelyek az ősrobban

náskor, a „nagy bum” bekövetkezésekor létrejöhetnek, a modell helyességének szempontjából ennek igen csekély jelentősége van. Hiba volna azonban nem észrevenni azt, hogy az ősrobbanáshoz hasonló folyamatok során keletkező sok-sok milliárdnyi örvénytérnek a tulajdonságai minden – általunk ismert – fizikai jelenség magyarázatához tökéletes alapul szolgálhatnak.

Ha csak a részecskék viselkedésére szorítkozunk, akkor észre kell vennünk, hogy két ilyen szembefordulva összeborult tórusz alakú zárt örvénytér legalább annyi furcsa mozgást és átalakulást tud elkövetni, mint az atomi részecskék. Füstgyűrűkkel vagy nagyobb intenzitású légörvényekkel, esetleg folyadékörvényekkel mindezek szemléletessé is tehetők. Ezek tudnak a térben haladni, megállni, visszafelé mozogni, mégpedig függően a belsejükre vagy a külsejükre ható „gerjesztéstől”. Tudnak rotáció nélküli örvénylést végezni, vagy éppen tengelyük körül forogva haladni. Tudnak együttforogni, egymásba olvadni és annihilálódni.

Az örvénylés és a rotáció irányai alapján a tórusz alakú örvénytérnek létezhet kétféle változata, éspedig jobbmenetű és balmenetű. Az azonos értelmű rotációval bírók taszítják egymást, az ellentétesek viszont kölcsönösen megsemmisítik egymást. Végzetes tehát a találkozásuk éppúgy, mint két ellentétes forgószele, hiszen kioltják egymás örvénylését, azaz annihilálódnak. Ugyanezt tapasztalhatjuk a részecskék és antirészecskék esetében is.

Ha két azonos forgásirányú (pl. két jobbmenetű) tórusz alakú örvényteret szembefordítunk egymással, akkor a hatásuk kölcsönös semlegesítése fog mutatkozni éppúgy, mint a neutronok esetében. Miért kell ehhez két neutron? Miért fontos az atommag stabilitáshoz a neutronok páros jelenléte? A stabilitás 2. feltételénél feltett kérdés már nem is kérdés többé. Ezek taglalása azonban nem témája jelen műnek.

2. A NEUTRONMODELLEK SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE

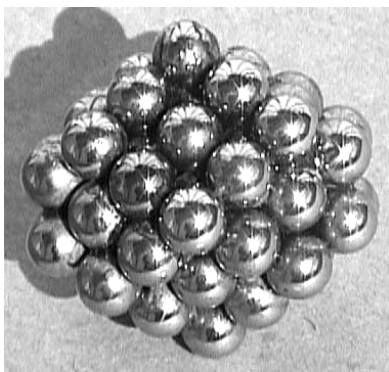
Az elemek tudományos csoportosítása a periódusos rendszer (3. sz. melléklet) oszlopai mentén, egyrészt függőleges irányban szokásos, másrészt a táblázat egyes szakaszain vízszintesen. A függőleges irányú közismert csoportosítás az elemek kémiai tulajdonságainak hasonlóságára épül, és bázisvonalként a nemesgázokat szokás választani. A vízszintesen kiemelt részek a lantanoidák (ritkaföldfémek), és az aktinoidák (radioaktív fémek). A csoportokon belül a hasonlóság, a tudomány feltevései szerint, az elektronhéjak számára és azok betöltöttségére vezethető vissza.

A neutronmodellek egy merőben más szempont szerinti osztályozást kínálnak, az eredmények azonban egyezőséget mutatnak a fentiekkel. Az osztályozások a modellek külső és belső formai jegyei alapján készültek. Az így levonható következtetések utalnak az egyes elemek, illetve az egyes csoportok jellemző tulajdonságaira. Az elemzési szempontok között számításba jött a neutronmodellek geometriai formája, felszíne, héjmérete, belső magja, rétegszáma és a halmazt alkotó neutronok száma.

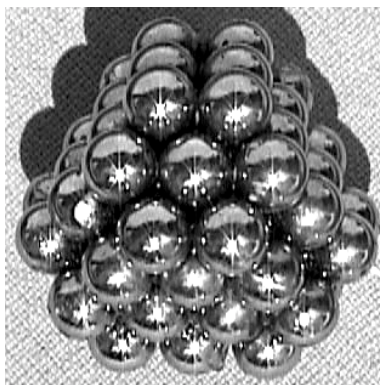
2.1. A neutronmodellek geometriai formája

A neutronmodellek külső formája igen változatos. Vannak egyszerű, tengelyszimmetrikus formák, de nagy számban jelen vannak a szabályos testeket (2. sz. melléklet) idéző geometriai alakzatok is. Minden egyes modellre érvényes a szimmetria valamelyik fokának jelenléte. Meggyőződésünk, hogy a szimmetria a stabilitás alapvető feltételei közé tartozik, hiszen e nélkül nem lehetnének egyensúlyban az atommag közepe felé igyekvő protonok. A protonok befelé hatolási szándékát előidéző erők egyensúlya mindenképpen igényli a térbeli szimmetriát.

A szabályosság fokát illetően a legalacsonyabb osztályba a tengelyszimmetrikus gömbhalmazok sorolhatók, és ettől felfelé haladva vezet az út a tetraéderes formán, valamint a hexa- és oktaéderes változaton át a dodeka- és ikozaéderes formákig (2.1.-2.6. ábrák)



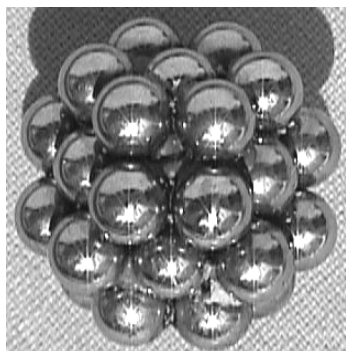
2.1. ábra: tengelyszimmetrikus



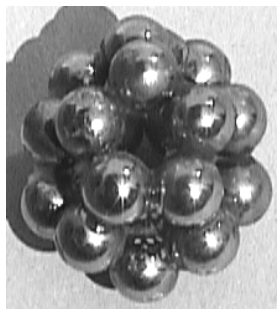
2.2. ábra: tetraéderes



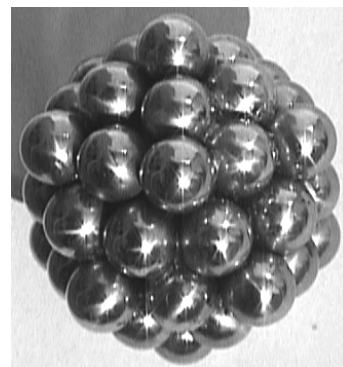
2.3. ábra: hexaéderes



2.4. ábra: oktaéderes



2.5. ábra: dodekaéderes



2.6. ábra: ikozaéderes

Gömbhalmazok térbeli szimmetriája.

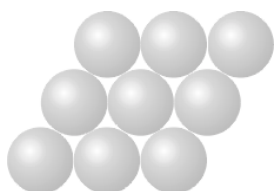
A tengelyszimmetriát nevezhetnénk egytengelyű szimmetriának, a tetraéderest kéttengelyűnek, a hexaéderest háromtengelyűnek stb., de jelen esetben a féltengelyekre való felosztás célszerűbb. A fenti elnevezések nem jelentik szó szerint azt, hogy pontosan a nevezett szabályos test kinézetét mutatja a gömbhalmaz, illetve a modell formája. Csupán arra vonatkozik a jelző, hogy a modell ismétlődő felszíni egységeinek orientációja azonos a nevezett szabályos test tengelyeinek irányával. A hexaéderes forma például nem azt jelenti, hogy a modell tökéletes kocka alakú, hanem azt, hogy a modellt határoló gömbök 3 egymásra merőleges tengely, azaz 6 féltengely felől nézve pontosan azonos képet mutatnak.

Mivel a tengelyszimmetrikus modell csak a 2 féltengelye felől nézve mutat ugyanolyan felszíni alakzatokat, az ikozaéderes modell pedig mutathat 20, sőt 30 féltengely felől is, ezért belátható, hogy az utóbbi alakzat ún. térbeli szabályossága lényegesen magasabb fokú. Az összes páratlan rendszámú elem modellje csak tengelyszimmetrikus lehet, a párosaké pedig periodikusan változva a teljes skálát átfogja.

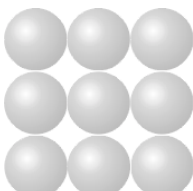
2.2. A neutronmodellek felszíne

A modellek felszínét határoló gömbök oldalirányú csatlakozása (érintkezése) háromféle lehet:

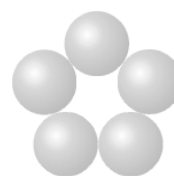
- soronként eltolódott, szoros illeszkedésű (2.7. ábra)
- négyzetes, kvadratikus elrendezésű (2.8. ábra)
- ötszögös illeszkedésű (2.9. ábra)



2.7. ábra



2.8. ábra



2.9. ábra

A gömbök illeszkedése a modellek felszínén.

Ezek a felszíni alakzatok egymással általában váltakozva fordulnak elő. A felszín jellegét befolyásolja a fentiekén kívül még a felszín görbületének mértéke, továbbá a modell belső struktúrája is.

2.3. A neutronmodellek héjmérete

A modellek felszínén lévő gömbök száma, vagyis a modell héjmérete közvetlenül a rendszámot mutatja. A definícióból következően ugyanis, a külső neutronhéjat alkotó gömbök száma azonos a protonok számával. A héjon belüli rész a neutrontöbbség, vagyis a belső mag. Eltérő rendszámú elemek sorozatát kapjuk, ha egy kiválasztott belső magméretre különböző méretű héjakat illesztünk. Erre példaként egy ábrásor a „Radioaktív bomlási sorok” c. fejezetben lesz található.

2.4. A neutronmodellek belső magja

A neutronhalmaznak a külső héj által közrefogott része – azaz a modell belső magja – igyekszik összerendeződni a legkisebb térfogatú és a lehető legszabályosabb alakzatra.

A belső neutronmag szerkezete, vagyis alkotó elemeinek tipikus elrendeződése lehet:

- szoros gömbi illeszkedésű (2.10. ábra)
- köbös illeszkedésű (2.11. ábra)
- dodekaédes illeszkedésű (2.12. ábra)



2.10. ábra



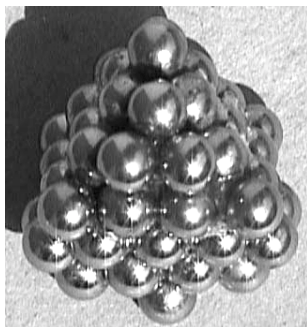
2.11. ábra



2.12. ábra

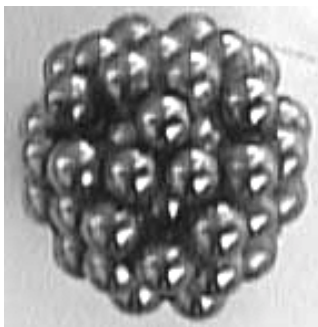
A belső neutronmag szerkezete.

A halmaz formája elsősorban a halmazt alkotó gömbök számától függ. A belső mag alakja természetesen befolyásolja az egész modell formáját, amely adott külső héj esetén – a belső mag méretétől függően – lehet összehúzódtabb, vagy éppen a gömbformához közelebb álló.



2.13. ábra

A Pd-102 modellje.



2.14. ábra

A Pd-108 modellje.

Válasszuk példaként a 46-os rendszámú palládiumot. Ennek 46 protonja egy olyan neutronhalmazt fog közre, melynek héja ugyancsak 46, a belső neutronmagja pedig a tömegszámától függően 10, 12, 13, 14, 16 vagy 18 neutron valamelyikét tartalmazza. Míg a 10-es neutrontöbbségű Pd-102 izotóp modellje (2.13. ábra) egy igencsak karcos tetraéder, addig a nagyobb tömegszámú izotópok modelljei egészen kikerekedett formájú halmazok. A 16-os belső magú Pd-108 izotóp modellje például egy, a gömbformát egészen megközelítő halmaz (2.14. ábra), az előbbinél sokkal lazább szerkezetű felszínnel.

2.5. A neutronmodellek rétegszáma

A gömbhalmazokban rétegek alakulnak ki, és a rétegekben a geometria szabályai szerinti mennyiségű gömb tud elhelyezkedni. Ezek bizonyos tartományon belül átrendezhetők, sőt spontán át is rendeződnek (pl. a béta-átalakulásoknál), de a variációs korlátok eléggé szűkek. A gömbök illeszkedésében talált egyszerűbb szabályszerűségek némelyike iránymutatásul szolgált a további összefüggések megtalálásához. Ilyenek többek között az alábbiak:

- legalább 12 gömb szükséges egy középponti gömb hézagmentes eltakarásához,
- 20 gömbből álló szabályos halmaz belsejébe feltétlenül befér legalább egy további gömb.

Ezek a határesetek, ahol határozott váltások vannak a modellek felépítésében éppúgy, mint az elemek bizonyos tulajdonságaiban. A 12 alatti rendszámoknál a valóságban is jellemző a 0 neutrontöbbletű izotópok túlsúlya. (Az ettől való eltérések és azok okai a 3. és 4. fejezetben találhatók.) A többrétegű neutronhalmazoknál is a 12-es legbelső magoknál van váltás a halmaz következő rétegének megjelenése miatt. A 13. neutron ugyanis a halmaz közepére fog rendeződni. Legyen a rétegszámok elnevezése az alábbi:

- a) 1 rétegűnek nevezhetők a 12-es és az az alatti neutronhalmazok.
- b) 2 rétegűek a 13 és 54 közötti halmazok, mert 12 gömb már hézagmentesen közre tudja zárni a tizenharmadikat (ld. a 7.25/b és a 7.26/b ábrákat).
- c) 3 rétegűek az 55 és 146 közötti halmazok. Ezek a technécium és az urán közötti tartományt képviselik. A technécium környékén jelenik meg a 13-as belső mag, amely már önmagában kétrétegű.
- d) 4 rétegűek a 146 feletti halmazok, melyek külső burka 92 feletti, középső rétege 43 feletti, legbelül pedig egy minimum 12-es héj által közrefogott, legalább 1 neutron van. Ezek a transzuránok (a 92-es rendszám felett).

2.6. A neutronok száma

Vannak a gömbhalmazok elemeinek számát illetően kedvező számok (v.ö. mágikus számok), vannak viszonylag kedvezőtlenek (például a páratlan számok), és léteznek határozottan „tiltott” számok. Ez utóbbiakra, vagy a szimmetria hiánya, vagy a neutronsám páratlanságának már említett kedvezőtlenége miatt, maga a természet talál kedvezőbb megoldást a proton-neutron arány átrendezésével. Ennek eredménye, hogy kialakult a nem létező neutronsámok sorozata 19, 21, 35, 39, 45, 61, 71, 89, 115 és 123 neutronnál.

A gömbhalmazok és a stabil izotópok neutronsámjai közötti összefüggés megtalálását az izotóptáblázatban található káosz késleltette, de a felismerés után a bizonyosságot éppen az erősítette meg, hogy a geometriai kivételek és a kémiai elemek sorozatában található anomáliák helye pontosan egyezik. Az egyezőségek vitathatatlan megléte felhatalmazást ad arra, hogy a kijelentéseket ne csak geometriai, hanem magfizikai vonatkozásban is megtehesük. Ezért beszélünk sokszor gömbök helyett neutronokról, és gömbhalmazok helyett izotópok neutronhalmazáról.

3. A PÁROS RENDSZÁMÚ ELEMÉK

A páros rendszámú elemek elkülönített tárgyalása azért célszerű, mert lényeges eltérés van a páratlan elemekhez képest, egyrészt a stabil izotópok számában, másrészt az elemek előfordulási gyakoriságában. Míg a páros elemekből a földi körülmények között az uránnal együtt összesen 46 létezik, és ezeknek 224 izotópja stabil, addig a páratlan elemek száma csupán 44, mindössze 60 stabil izotóppal. Az előfordulási gyakoriság „toplistáján” is a páros elemek vezetnek, nagyságrenddel megelőzve a páratlan elemeket. Az eltérés rendkívül szembetűnő, a tények közismertek, az okok tudományos magyarázatával azonban a fizikatudomány eddig még nem tudott szolgálni.

A páros elemek általános jellemzői

Az izotópok száma a páros rendszámú elemeknél általában 4-6, bár létezik alsó határként 1, felső határként pedig 10 stabil izotóppal rendelkező elem is. A tömegszámok az izotópok többségénél párosak, de csaknem mindegyik páros elemnek létezik egy-két páratlan tömegszámú, és ebből következően páratlan neutronsámú stabil izotópja is.

A páros rendszámú modellek külső formája

A páros rendszámú elemek modelljeinek formája igen változatos. Vannak egyszerű tengelyszimmetrikus formák, de jelen vannak a modellek között a szabályos testek összes változatának megfelelő geometriai alakzatok is. (Lásd a 2. sz. mellékletet)

Rend- szám	Vegyjel	Név	Tetra	Hexa +okta	Dodeka +ikoza
4	Be	berillium	T		
6	C	szén		H	
8	O	oxigén		H	
10	Ne	neon	T		
12	Mg	magnézium			D
14	Si	szilícium		H	
16	S	kén	T		
18	Ar	argon		H	
20	Ca	kalcium			D
22	Ti	titán	T		
24	Cr	króm		H	
26	Fe	vas		H	
28	Ni	nikkel	T		
30	Zn	cink			D
32	Ge	germánium			D
34	Se	szelén	T		
36	Kr	kripton		H	
38	Sr	stroncium		H	
40	Zr	cirkónium	T		
42	Mo	molibdén			D
44	Ru	ruténium		H	
46	Pd	palládium	T		
48	Cd	kadmium		H	
50	Sn	ón			D
52	Te	tellur	T		
54	Xe	xenon		H	
56	Ba	bárium		H	
58	Ce	cérium	T		
60	Nd	neodímium			D
62	Sm	szamárium			D
64	Gd	gadolinium	T		
66	Dy	diszprozium		H	
68	Er	erbio		H	
70	Yb	itterbium	T		
72	Hf	hafnium			D
74	W	volfrám		H	
76	Os	ozmium	T		
78	Pt	platina		H	
80	Hg	higany			D
82	Pb	ólom	T		
84	Po	polónium		H	
86	Rn	radon		H	
88	Ra	rádium	T		
90	Th	tórium			D
92	U	urán			D
94	Pu	plutónium	T		
96	Cm	kúrrium		H	
98	Cf	kalifornium		H	
100	Fm	fermium	T		
102	No	nobélium			D
104	Ku	kurcsatóvium		H	
106			T		
108				H	

3.1. táblázat

Páros elemek szimmetriájának fokozatai.

sebb, mint a páros-páros magoké, és érdekes módon mindig az izotópcsoport közepe táján foglalnak helyet. A páros-páratlan izotópok tipikus elhelyezkedése látható például a volfrámnál:

A volfrám páratlan neutronszámú izotópjai közül csak a W-183 stabil, és az éppen a stabil izotópok közepén helyezkedik el. A középtől kifelé haladva növekszik az izotópok radioaktivitása, azaz csökken a felezési idő. Más páros elemekre is érvényes a stabil izotópok ilyen elrendeződése.

A modellek külső formájának jellege az összes páros elemre a 3.1 táblázatban látható, azzal a megjegyzéssel, hogy az ott szereplő besorolás az a legmagasabb szabályossági fok, amelyet az adott elem valamelyik izotópja el tud érni. Elemenként általában csak egy-két izotóp éri el a megadott szabályossági fokot, a többi izotóp pedig az alacsonyabb fokozatok valamelyikébe sorolható.

A 3.1 táblázatban a T, H és D betűk jelentése:

T jelöli a tetraédes jelleget, *H* jelöli a hexaédes és az oktaédes típusokat, mégpedig azért összevontan, mert az oldalak, az élfelezők és a csúcsok tengelyei felváltott funkcióval ugyan, de azonosak. *D* jelöli a dodekaédes és az ikozaédes felépítés jegyeit magánviselő modelleket, melyeknél egyaránt a 12, 20 és 30 féltengely térfeosztása határozza meg az irányokat. A fenti kategóriákba való besorolás jelentősége a kémiában és a kristályfizikában lehetne nagy, de sem az osztályozás meghatározási módjára, sem az esetleges alkalmazási lehetőségekre itt nem kívánunk kitérni.

A páros elemek modelljének mindegyikére jellemző, hogy az elrendeződésből adódóan a felszín bármelyik gömbjének megvan a térbeli tükörképe, vagyis az ellentett párja a halmaz átellenes oldalán. Ennek a térbeli szimmetriának köszönhető az atommag egyensúlya. A

neutronhalmaz felszíni egyedeire egyenként ránehezedő protonoknak a középpont felé ható nyomása ugyanis páronként és ezáltal összességében kiegyenlítődik. Ez alól geometriai kivétel a tetraédes szimmetria, melynél a 4 féltengelynek nincs ellentett párja, azaz nincs a meghosszabbításában másik tengely, és emiatt a 4

neutronból és a 4 protonból álló berilliumnak (Be-8) komoly „stabilitási problémái” keletkeznek. A geometriai kivétel magfizikai kivételt eredményez, amint az a későbbiekben látható lesz. A magfizikában a páros protont és páros neutron tartalmazó magokat „páros-páros” magoknak nevezik. A modelleknél ennek megfelelője a páros halmaz páros felszínnel, aminek következtében a belső neutronmag is páros lesz.

Páros-páratlan izotópok modelljei

A páros rendszámú elemeknek léteznek páratlan neutronszámú stabil izotópjai is. Ezek atommagjait nevezik „páros-páratlan” magoknak. Számuk lényegesen kevesebb, mint a páros-páros magoké, és érdekes módon mindig az izotópcsoport közepe táján foglalnak helyet.

7. Az ólom és az urán közötti elemeknél (aktinoidák) a 43-49 közötti neutrontöbblet csakis 11-es legbelső maggal lenne elképzelhető a modellek szerint. A belső neutronmagnak ez a mérettartománya a stroncium neutron-halmazának környékére, a felépítése pedig a technéciuméra hasonlít. Ezért nem is csoda, hogy az egész csoport radioaktív.
8. Az urán-235 az egyetlen stabil páros-páratlan magú izotóp az ólom (ill. a bizmut) feletti tartományban. Ezt rendkívül különleges belső neutronmagjának köszönheti. (Lásd bővebben a 7. fejezetben.)
9. A transzuránoknál szükségszerűen megjelent a neutronhalmaz legbelső részében a kívülről számított negyedik réteg, mégpedig azáltal, hogy a legbelső neutronmag 13-as halmazából a mag középpontjába benyomult 1 neutron már külön „rétegnek” számít. Ezáltal a földi körülmények között véglegesen megszűnik a stabilitás a tapasztalat szerint.

4. A PÁRATLAN RENDSZÁMÚ ELEMÉK

4/1. A páratlan rendszámú elemek jellemzői

A páratlan rendszámú elemeknek több olyan jellemzője van, amely a párosakhoz képest szokatlan különbséget mutat. Ilyen például, hogy a páratlan elemeknél:

- a.) mindig van neutrontöbblet,
- b.) a neutrons szám mindig páros,
- c.) elemenként csak 1 vagy 2 stabil izotóp létezik,
- d.) sokkal kisebb az előfordulási gyakoriságuk, mint a páros elemeké.

Ezek mindegyike tapasztalati eredmény, amit vélemény, vagy elmélet nem befolyásol.

Az **a. pont** alatti megállapítás az első négy páratlan elemre csak azzal a kiegészítéssel érvényes, hogy azoknak van olyan izotópjuk is, melynél nincs neutrontöbblet. Ezek a hidrogén, a lítium, a bór illetve a nitrogén egy-egy izotópja, nevezetesen a H-2, a Li-6, a B-10, ill. a N-14.

A **b. pont** szerinti megállapítás alól is ugyanez a négy mag a kivétel. Ennek egyébként a definícióból szükségszerűen következnie is kell, hiszen a neutrontöbblet hiánya (vagyis a protonszám és a neutrons szám egyezősége) egyúttal a neutrons szám páratlanságát is jelenti. A H-2, a Li-6, a B-10 és a N-14 tehát a létező négy, ún. páratlan-páratlan stabil mag. Két másik nagyobb izotóp, a V-50 és a Ta-180 is páratlan-páratlan magú ugyan, de tökéletes stabilitásuk kérdéses, mert elméleti megfontolások alapján valószínűsítik a béta-instabilitásukat annak ellenére, hogy a jelenlegi mérések szerint megfigyelhetetlenül hosszú élettartammal rendelkeznek.

A **c. pont** azzal a kiegészítéssel válik teljessé, hogy 1 vagy 2 izotóp létezik legfeljebb. Nincs ugyanis egyetlen stabil izotópja sem a 43-as rendszámú technéciumnak és a 61-es rendszámú proméciumnak, vagyis ezek az elemek a természetben nem fordulnak elő.

A **d. pont** az átlagot tekintve igaz, az ok azonban ismeretlen.

A mai modern fizika egyébként nem tud elfogadható magyarázattal szolgálni ezeknek a lényeges eltéréseknek az okaira. Úgy tűnik, hogy a tények feltárásával a témát lezárták, az okok kutatására azonban nem fordítanak kellő figyelmet. Megmagyarázatlanul maradnak tehát egyelőre a tények, de nézzük meg, hogy mit mutatnak a neutronmodellek a páratlan rendszámú elemek területén, és hogy adnak-e ezek választ az előbbiekben felmerült kérdésekre?

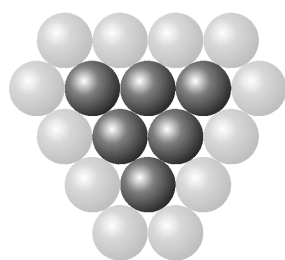
4/2. A páratlan elemek neutronmodelljei

A neutronmodell a neutronok olyan elrendeződése, amelynél a halmaz felszíni elemeinek száma az adott elem protonszámával azonos. Ebből következően a páratlan elemek modelljeinél a felszíni alkotóelemek száma is páratlan. A páratlanság már önmagában is azt jelenti, hogy sérül a szimmetria a modell felszínén, illetve a neutronhalmaz külső rétegén. Ennek következtében a páratlan rendszámú elemek modelljeiből szükségszerűen hiányoznia kell a töbtengelyű szimmetriának, amely a páros elemeknél lehetővé tette poliéderek felépítési struktúra kialakulását, és ezáltal a sok variánst adó szabályos alakzatok létrejöttét.

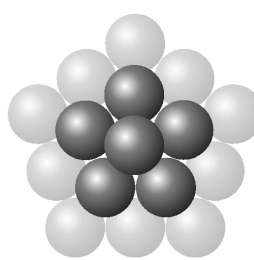
A párosságot igénylő poliéderek hiánya miatt drasztikusan csökken a térbeli szimmetriával rendelkező halmazok száma. A páratlan elemeknél egyetlen lehetőségként az egytengelyű szimmetria maradt meg, így a modellek csak nyújtott, vagy lapított ellipszoidok lehetnek.

A modellfelszín páratlansága csak a modell középsíkjaiban jelentkezhet. Erre a középsíkra is szimmetrikusnak kell lennie a modellnek a tengelyszimmetrián kívül, mert a térbeli szimmetria feltétlenül szükséges a

statikai egyensúly megvalósulásához. A középsík metszete sokféle lehet, de leginkább a 3 és az 5-szögű metszet a jellemző (lásd a 4.1. és 4.2. ábrákat).



4.1. ábra



4.2. ábra

A páratlan elemek neutronmodelljeinek középsík-metszetei.

A fenti geometriai okok miatt az „életképes” alakzatok száma a párosakéhoz képest a negyed-, ötödrészére csökkent. Csak azok maradtak meg, amelyeknél a felszíni neutronok és a belső neutronhalmaz méretviszonyai éppen optimálisak. Tovább ritkítja a bevezetésben közölt 2. feltétel is az izotópok sorait, amely miatt végül csak a páros neutronszámúak maradnak meg. Ez elemenként csak 1 vagy 2 izotópot jelent.

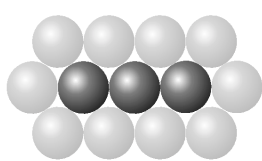
[illegible]

4.1. táblázat

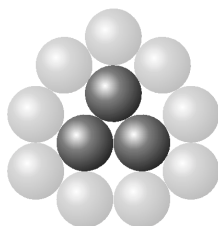
A páratlan rendszámú elemek belső neutronmagjai.

A 4.1. táblázatban látható a páratlan elemek neutrontöbbleteinek számértéke. A fenti számértékek elemzése során a következő megállapításokat tehetjük a modellek felépítésének ismerete alapján:

- 1.) A 17 alatti rendszámoknál (a már említett hidrogén és nitrogén kivételével) dominál az 1 neutrontöbblet. Mivel a halmazok mérete ezeknél a kis rendszámoknál nem indokolná a +1 neutron megjelenését, vagyis helykitöltőként nem lenne rá szükség, ezért megjelenésének más oka kell legyen. A modellek elemzéséből az derült ki, hogy sajátos funkciója van ennek a neutrontöbbletnek. Egyrészt a 2. feltétel teljesülését biztosítja ez az 1 neutrontöbblet azáltal, hogy a páratlan neutronszaámot párossá egészíti ki, másrészt megkönnyíti a statikai egyensúly megmaradását a neutronhalmaz középsíkjában, ahol páratlan számú erő hatása érvényesül a középpont felé.
- 2.) A 17 és 19-es rendszámoknál (klór és kálium esetében) átfedés van, mert megjelennek az 1-es mellett a 3-as neutrontöbbletű stabil izotópok is, azonban lényegesen ritkább előfordulási gyakorisággal.
- 3.) A 21-es rendszámú szkandium a természetben ugyan nem kifejezetten ritka előfordulását, nincsenek azonban gazdag szkandium tartalmú egybefüggő ásványtelepek. Ez az elem több száz ásványban előfordul, de mindenütt csak kis mennyiségben. A világ teljes készlete ma is csak néhány kilogramm, ezért az ára kétszázszorosa az arany árának. A szkandium neutrontöbblete is 3, és úgy tűnik, hogy a 3-as neutronhalmazokat a természet nehezen tűri meg az atommagok közepében. Az ok az, hogy 3 neutron elrendeződése vagy hosszúka (4.3. ábra), vagy lapos formát (4.4. ábra) tud csak eredményezni. Márpedig e formák egyike sem igazán jó belső indítás az atommag külsejétől elvárható gömbforma megközelítéséhez. (A „lapos” forma az ábra síkjára merőlegesen értendő.)



4.3. ábra



4.4. ábra

A 3-as belső neutronmag elhelyezkedési lehetőségei.

- 4.) A 43-as rendszámú technécium neutronhéj méretéhez a 11-es belső magméret kicsi. A 12-es közelebb áll az ideális mérethez, ezzel azonban páratlanná válik a neutronszaám, ami nem kedvez a stabilitásnak. A 13-as belső mag párossá egészíti ki ugyan a 43-as külső héjat, mérete azonban már túl nagy ehhez a héjhoz. Nincs tehát geometriai megoldás. A természetben sem található technécium. Bizonyára nem véletlen a geometriai és a magfizikai tények itteni egybeesése sem.

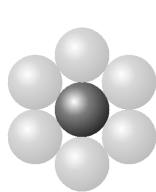
A mesterséges technécium-izotópok felezési ideje:

Tc-97 $2,6 \times 10^6$ év (belső neutronmag: 11)

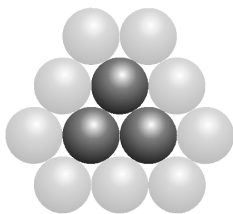
Tc-98 $1,5 \times 10^6$ év (belső neutronmag: 12)

Tc-99 $2,1 \times 10^5$ év (belső neutronmag: 13)

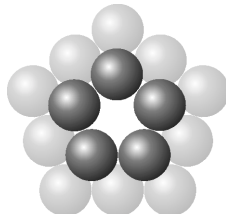
A technéciumnál egy igen határozott váltás van az atommagokat felépítő héjak számában. A technécium alatti elemek külső neutronhéja alatt 1-11 neutronból álló egyrétegű belső mag van, a technécium felettiekénél pedig a 13-43 neutronból álló belső mag már kétrétegű. A „kétrétegűség” közvetlenül a technécium feletti elemeknél úgy jelentkezik, hogy megjelenik a középpontban először 1 neutron (4.5.



4.5. ábra



4.6. ábra



4.7. ábra

Páratlan neutronhalmazok a mag közepén.

ábra), majd felfelé haladva egyre több neutronból álló halmaz (4.6. és 4.7. ábra). Ez a halmaz a neutronmodellnek a legbelső „rétege”, amely kívülről számítva már a harmadik, és állhat akár 11 neutronból is. Látni fogjuk, igen nagy jelentősége van annak, hogy ezek közül éppen milyen méretű halmaz foglal helyet a középpontban.

- 5.) A technéciumtól a céziumig terjedő tartományban a neutronhalmaz belsejében 1 neutron ül. Ez a szimmetriát egyáltalán nem befolyásolja rossz irányban. A szakasz a céziummal zárul, melynek 23-as neutrontöbblete sajátos módon helyezkedik el. Kívül ugyanis 22, belül pedig 1 neutron van. A „20-ban a 3” verzió tehát nem tetszik a természetnek, valószínűleg a geometria törvényeinek kényszere miatt. A

22/1-es arányú változat ugyanis sokkal közelebb áll a gömbformához, mint a 20/3-as, éppen a 3-as halmaz előbb említett kedvezőtlen formája miatt.

- 6.) Az 57-es rendszámú lantánnak egyik izotópja stabil, egy másik pedig kvázistabil. Rendkívül szép felépítése külön fejezetet érdemel.
- 7.) A lantánt követő 15 elem a lantanoidák (ritkaföldfémek) csoportja.
Ebből a lutéciummal bezárólag 7 elem tartozik a most tárgyalt páratlan elemekhez. Az 59-es rendszámú prazeodímium a rendkívül kedvezőtlen formájú $3+20=23$ -as belső neutronstruktúrájával még éppen stabil, de a 61-es rendszámú promécium már nem fordul elő a természetben. Ennek oka az, hogy a 61-es neutronhéjhoz egy 24-es belső neutronmag tartozna a gömbhalmazok méretviszonyai szerint. Ez azonban páratlan neutronhalmazt eredményezne, amely éppúgy instabil izotóphoz vezet, mint a túl kicsi 23-as, vagy a túl nagy 25-ös neutronhalmazok. Nincs tehát megoldás éppúgy, mint ahogyan a technéciumnál sem volt. Mindehhez hozzájárul még az a kedvezőtlen tény is, hogy ezeknek az illeszkedéseknek 3-as legbelső neutronmaggal kellene történnie.
Az eurórium és a lutécium közötti öt páratlan elem mindegyikének a legbelső magja 5-ös, és valószínűleg ez okozza tulajdonságaik hasonlóságát. Középső neutronhéjuk egyébként 20 és 30 közötti, a külső pedig 63 és 71 közötti, ami a rendszámmal azonos.
- 8.) A lantanoidákat (lantanidákat) követő tantál határesetként éppúgy átmenetet képez egy másik legbelső magú csoportba, mint ahogyan a lantán, vagy a nióbium. Nióbe, Tantalosz lánya ugyanúgy jelzi a rokonságot, mint a periódusos rendszerben az egy oszlopba tartozás, vagy az a tény, hogy ásványaikból a két elemet csak bonyolult módon, több lépésben lehet elválasztani egymástól. (Periódusos rendszer V. alcsoport: vanádium, nióbium, tantál.)
A tantál és a lantán hasonlósága abban mutatkozik, hogy mindkettőnek van egy kvázistabil páratlan-páratlan magú izotópja, és ez ismét egy külön fejezetet érdemelne. A kisebbik tantál-izotóp (Ta-180), amelynek a magfizikai számítások szerint nem volna szabad stabilnak lennie, mégis stabil, de előfordulása csak 0,0123%-os. Legbelső neutronmagja 6-os.
- 9.) A nagyobbik tantál-izotóp (Ta-181), továbbá a 75, 77 és 79 rendszámú elemek (a rénium, az irídium és az arany) legbelső magja már 7-es. Ez egy rendkívül kedvező alakzat, ezért ezek a fémek igen "nemes" tulajdonságokkal rendelkeznek.
- 10.) A 81, ill. a 83-as rendszámú tallium és bizmut zárják a stabil elemek sorát. Neutronmagjuk 41-es és 43-as, melyek 9-es legbelső neutronmag köré épülnek.
- 11.) A bizmut és az urán közötti páratlan elemek többségénél a relatíve legstabilabb izotópok legbelső magja 11-es. A 11-es halmaz a formáját tekintve éppolyan kedvezőtlen, mint a 3-as, mert ez is csak nyújtott, vagy lapított ellipszoid lehet. Ezek mind radioaktív fémek.
- 12.) A transzuránokra jellemző, hogy legbelső neutronmagjuk már 13-as és afeletti. A 13-as legbelső mag már önmagában is kétrétegű, így a teljes neutronhalmaz négyrétegű lesz, és a stabilitás ebben a tartományban végleg megszűnik.

Figyelemreméltó, hogy a 3. fejezet 3.2.-es táblázatának és a 4. fejezet 4.1.-es táblázatának a vonalvezetése nagy hasonlóságot mutat. Az összehasonlításhoz csúsztassuk össze fésűszerűen ezeket. Az eredmény a 4.2. táblázatban látható. Megdöbbentő az egybeesés. A keletkező vonal adja az izotóptérkép (a Segré-táblázat) gerincét, vagyis a stabil izotópok sávjának középvonalát. A két eredeti táblázat geometriai magyarázata pontosan fedi a természetben található tényeket. Azt is lehet mondani, hogy geometriai eszközökkel meg lehetett volna határozni az elemek felfedezése előtt azok stabil izotópjainak tömegszámát. Ugyanezen módszerrel meg lehet határozni a transzuránok csoportjában is a viszonylag stabilabb izotópok tömegszámait. Mindez bizonyítja a geometriai modellek helyességét.

[illegible]

[illegible]

4.2. táblázat
Páros-páratlan és páratlan-páros izotópok belső neutronmagjai.

5. A BÉTA-BOMLÁS

A radioaktív nuklidok (magok) külső hatás nélkül alakulnak át, és közben jellegzetes sugárzást bocsátanak ki. A természetben előforduló természetes radioaktivitás eredménye lehet α -, β - és γ -sugárzás.

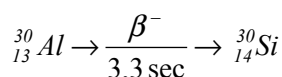
Kimutatták, hogy az α -részecskék voltaképpen He-4 atommagok (azaz 2 protonból és 2 neutronból állnak), a β -részecskék elektronok, a γ -sugárzás pedig rendkívül rövid hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás.

A β -bomláson azokat a folyamatokat értjük, amelyek során az atommag elektront vagy pozitront bocsát ki. A β -részecske tehát lehet elektron vagy pozitron. A pozitron az elektron antirészecskéje. Tömege azonos az elektron tömegével, töltéseik nagysága is megegyezik, a pozitron azonban pozitív töltésű. Negatív (β^-) bomlásról beszélünk akkor, ha a mag elektront bocsát ki, pozitív (β^+) bomlásról pedig akkor, ha a kibocsátott részecske pozitron. A β^- -bomlás esetén a rendszám eggyel növekszik, β^+ -bomlás esetén pedig eggyel csökken, a töltésmegmaradásnak megfelelően. A tömegszám mindkét esetben változatlan marad, hiszen a magot alkotó nukleonok száma nem változik az átalakulás során.

A természetes radioaktivitáson kívül ismerjük a mesterséges radioaktivitást is, amelyet magátalakulásokkal mesterségesen hozunk létre. A mesterséges magátalakítások során megfigyeltek olyan folyamatot is, ahol a mag a burokból elektront fogott be. Elnevezése elektronbefogás, és a végeredményt tekintve ez a β^+ -bomlással egyenértékű átalakulás. A β^+ -folyamatok (beleértve az elektronbefogást is) a mag szempontjából nézve nem tekinthetők valódi bomlásnak, ezért helyesebb lenne inkább β^+ -átalakulásnak nevezni őket.

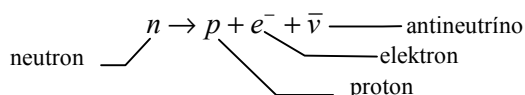
A β^- -bomlás

A β^- -bomlás az a folyamat, amikor egy instabil mag önmagától átalakul egy eggyel nagyobb rendszámú magba a tömegszám megmaradásával, egy elektron kibocsátása mellett. Például a 30-as tömegszámú instabil alumínium-izotóp önmagától átalakul 14-es rendszámú stabil szilíciummá a tömegszám megváltozása nélkül.



Az allionium Sn-301 pediatartalmaz 17 neutronon 13 proton.

A β^- -bomlás tehát 1 neutronnak protonná való átalakulásában nyilvánul meg, mégpedig egy elektron keletkezése (*) közben.



(*) Minthogy az elektron nem tartozik az atommag alapvető alkotórészei közé, ezért annak a béta-átalakulásban kellett keletkeznie. A neutronnak protonná való átalakulása a magon kívül, azaz szabad neutronok esetében is végbemehet (sőt spontán végbe is megy), mivel a neutron tömege nagyobb, mint az átalakulás során keletkező proton + elektron össztömege. A tömegdifferencia energia formájában távozik.

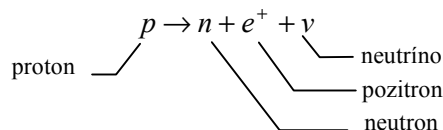
A „melléktermékként” keletkezett antineutrínó ($\bar{\nu}$) töltése 0, tömege mérhetetlenül kicsi, becslések szerint az elektrontömeg egy ezreléke alatti. Nincs mágneses momentuma, viszont a spinje feles ($1/2 \hbar$). Létezésére egyébként a felfedezése előtt éppen az átalakult mag spinjének látszólagos hiányából következtek, vagyis abból, hogy a β -bomlás sérti az energia- és az impulzusmomentum-megmaradási törvényeket. Ezt Pauli hátrította el, feltételezve, hogy β^+ -bomláskor 0 nyugalmi tömegű, feles spinű $\bar{\nu}$ neutrínó keletkezik, a β^- -bomlás során pedig $\bar{\nu}$ antineutrínó. A kimutatásuk utólag igen nehezen, de sikerült.

A β^+ -átalakulás

A β^+ -átalakulás az a folyamat, amikor egy instabil mag önmagától átalakul egy eggyel kisebb rendszámú magba.

Az átalakulásnak két formája ismeretes:

- a.) A β^+ -bomlás, ahol a mag egy protonja neutronná alakul át, miközben egy pozitron és egy neutrínó keletkezik.

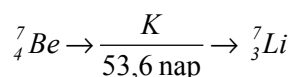


Ez az átalakulás szabad protonok esetén nem lehetséges, mivel a proton tömege kisebb a neutron tömegénél. Magban kötött proton esetén azonban végbemehet ilyen átalakulás, mert a hiányzó energiát a mag többi része pótolja.

A pozitív β -bomlásra jó példa a 6-os rendszámú szén C-11 izotópjának a β^+ -bomlása, amelyet pozitív elektron, azaz pozitron kibocsátása kísér. A szénmagban tehát egy proton átalakul neutronná, a kilökődő pozitron megsemmisíti az egyik elektront, és bór B-11 izotóp keletkezik, változatlan tömegszám mellett.

A szén C-11 tartalmaz	5 neutron + 6 protont,
a bór B-11 pedig	6 neutron + 5 protont.

- b.) Elektronbefogás (e-befogás), amely általában a maghoz közeli K-héjról történik, ezért a neve K-befogás. Megfigyeltek már az L-héjról és az M-héjról történő elektronbefogást is, melyek elnevezései, L-befogás, illetve M-befogás. K-radioaktív magra példa a 4-es rendszámú berillium Be-7 izotópjá, amely K-elektron befogásával átalakul 3-as rendszámú lítiummá, azaz Li-7 mag keletkezik.



A berillium Be-7 tartalmaz	3 neutron + 4 protont,
a lítium Li-7 pedig	4 neutron + 3 protont.

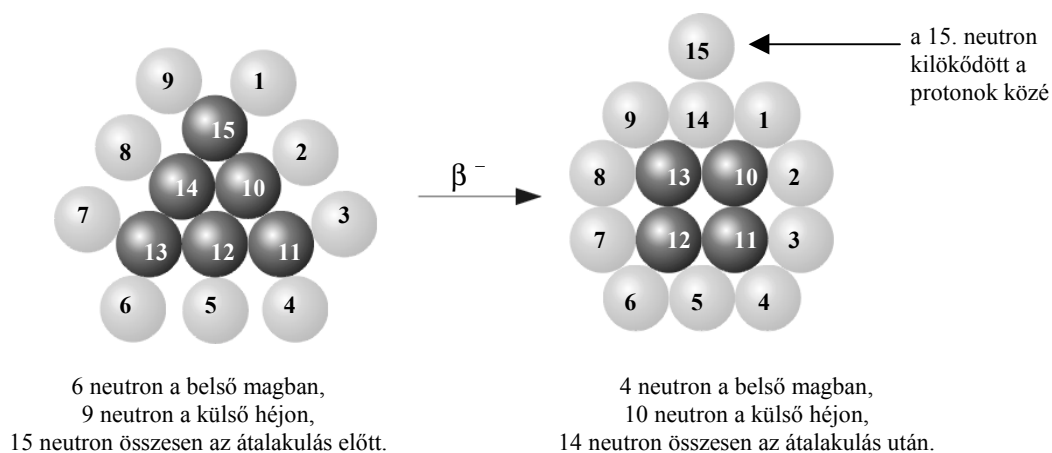
Az eredmény a szűkebb értelemben vett β^+ -bomlás és a K-befogás esetén is ugyanaz: az anyamag egy protonja átalakul neutronná, így a leánymag rendszáma az anyamagénál eggyel kisebb lesz, továbbá eltűnik egy elektron a mag körüli elektronpályák valamelyikéről, mégpedig

- vagy a keletkező pozitronnal való találkozáskor kölcsönös megsemmisüléssel (annihiláció),
- vagy az „elektronbefogás” által.

Ezek a mai modern fizika kísérleti eredményei, de az ezekre épített elméletek az átalakulások tényleges okaira vonatkozó magyarázattal nem szolgálnak. Az elkészült modellek viszont a problémát a maga végtelen egyszerűségében láttatják. Azonnal szembeűnik ugyanis a modellek belső magját körülvevő héj méretének bő vagy szűk volta. A modelleken tehát – adott esetben – szemmel láthatók az instabilitás jelei, sőt abból az átalakulás irányára is következtetni lehet, vagyis egészen jól lehet valószínűsíteni, hogy β^- vagy β^+ -átalakulás fog-e bekövetkezni. A modellek elsődleges osztályozása éppen aszerint történt, hogy a belső neutronmagot körülvevő héj hézagosságot mutatott-e, vagy éppen felgyűrődéseket. Az első esetben nyilvánvalóan túl kicsi a héj, az utóbbi esetben viszont túl nagy a héj a maghoz képest. A stabil izotópok modelljeinél a külső héj hézagmentesen illeszkedik a belső neutronmagra.

A modellek magját és héját alkotó gömbök számarányának elemzése és az izotóptáblázati proton-neutron aránnyal való összevetése azt mutatta, hogy a hézagos felépítésű gömbhalmazok a β^- -instabil izotópoknak a modelljei, a torlódott, felgyűrődött felszíni halmazok pedig a β^+ -instabil izotópoké.

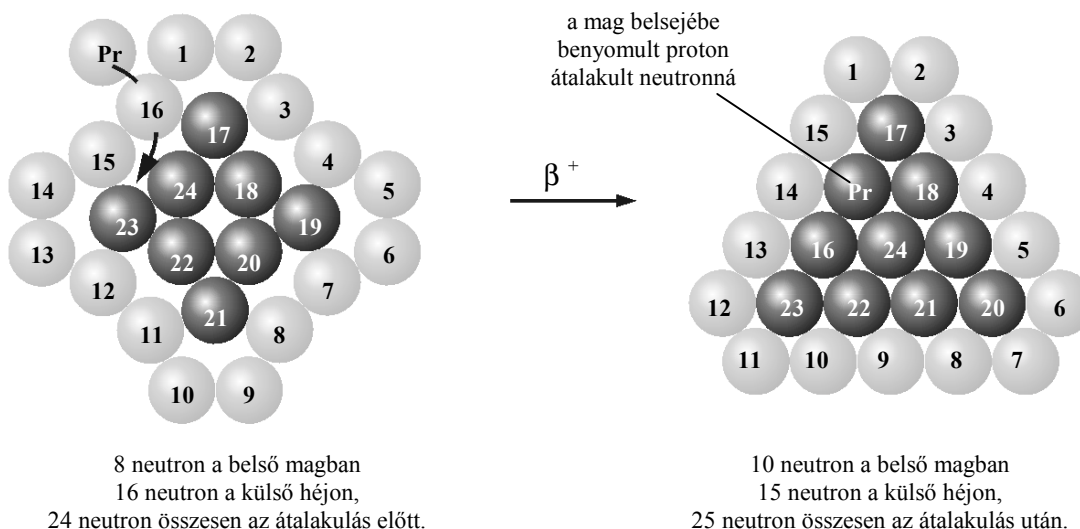
A természet megtalálta a megoldást, úgy a túl laza, mint a túl szoros felszíni héjjal rendelkező halmazok kiegyenlítésére, mégpedig a halmazok magja és héja arányának átrendezésével. Ez úgy valósul meg, hogy neutronok préselődnek át a neutronmagból a héjba, vagy fordítva, tehát β^- -bomlással, illetve β^+ -átalakulással. A legérdekesebb a β^- -átalakulásoknál az, hogy mindig 2 neutronnal változik a belső neutronmag mérete. A β^- -bomlásnál a belső neutronmagból kilökődik 2 neutron, és ezek egyike a külső neutronhéjban állapodik meg, a másik pedig a protonhéjban, miközben átalakul protonná. A 5.1. ábra szerinti síkbeli ábrázolás ezt próbálja szemléltetni, bár nem tudja valósághűen visszaadni a térbeli halmazok átalakulását.



5.1. ábra

A β^- -átalakulás síkbeli ábrázolása.

A β^+ -átalakulásnál (5.2.ábra) az előző folyamat fordítottja játszódik le, vagyis egy proton és egy neutron nyomul be a belső neutronmagba. A behatoló proton természetesen át is alakul neutronná. A belső neutronmag így két nukleonnal nagyobb lett, a külső neutronhéj és a protonhéj pedig egy-egy nukleonnal csökkent.



5.2. ábra

A β^+ -átalakulás síkbeli ábrázolása.

A **4. sz. mellékletben** az izotóptáblázat egy részlete látható az egyes izotópok sugárzási típusának fel-tüntetésével. Az izotóptáblázatból az tűnik ki, hogy egy-egy elem stabil izotópjait körülvevő instabil izotópok közül a kisebb tömegszámúak a β^+ -sugárzók, a nagyobbak pedig a β^- -sugárzók. Az izotópcsoport kö-zepe táján bizonytalanság mutatkozik a hovatartozást illetően, ezért is volt nehéz korábban – megfelelő el-mélet hiányában – a szabályszerűséget megtalálni. Ha azonban az elemzést az adatok megfelelő szelektálá-sával végezzük, akkor előtűnik a szabályszerűség és bebizonyosodik az előző fejezetekben tett megállapítá-sok igazsága. Négy mintapélda kapcsán mutatjuk be az izotópcsoportok jellegzetes elhelyezkedéseit.

Foszfor Z = 15	Réz Z = 29	Neon Z = 10	Nikkel Z = 28
	Cu-58 β^+		
	Cu-59 β^+		Ni-56 K
	Cu-60 β^+		Ni-57 β^+
P-28 β^+	Cu-61 β^+	Ne-18 β^+	Ni-58 stabil
P-29 β^+	Cu-62 β^+	Ne-19 β^+	Ni-59 K
P-30 β^+	Cu-63 stabil	Ne-20 stabil	Ni-60 stabil
P-31 stabil	Cu-64 β^-, β^+, K	Ne-21 stabil	Ni-61 stabil
P-32 β^-	Cu-65 stabil	Ne-22 stabil	Ni-62 stabil
P-33 β^-	Cu-66 β^-	Ne-23 β^-	Ni-63 β^-
P-34 β^-	Cu-67 β^-	Ne-24 β^-	Ni-64 stabil
	Cu-68 β^-		Ni-65 β^-
			Ni-66 β^-
5.3. ábra	5.4. ábra	5.5. ábra	5.6. ábra

Mintapéldák az izotópcsoportok tipikus elhelyezkedésére.

- Megj.: 1. A „K” és a β^+ -átalakulások az itt taglalt téma szempontjából azonosnak vehetők.
2. A szaggatott vonalpárral behatárolt izotópok helyezkednek el az izotóptérkép gerincvonalán.

5.3. ábra: Az egyetlen stabil izotóppal rendelkező páratlan rendszámú elemeknél (fluor, nátrium, alumínium, foszfor, ... stb.) igen egyöntetű a kép, hiszen itt válnak szét a leghatározottabban a β^+ -és a β^- -instabil izotópok. A két instabil csoportot szétválasztó stabil izotóp mindig páros neutronsámú (tehát páratlan rendszáma miatt páratlan tömegszámú). A modellek mutatta kép tökéletesen megegyezik a valóságban mért adatokkal, hiszen az adott külső neutronhéj (amit közvetve a rendszám határoz meg) kis tömegszámánál túl kicsi belső neutronmagot tartalmazva begyűrődni, azaz csökkenni igyekszik, míg túlságosan nagy mag esetén neutronok fognak kinyomulni a laza héjon át a felszínre. Az előbbi a β^+ , az utóbbi pedig a β^- -átalakulás.

A 5.4. ábra a páratlan rendszámú, két stabil izotóppal rendelkező elemek tipikus elrendeződését mutatja. Ez a kategória (klór, kálium, réz, gallium, bróm, ... stb.) a radioaktív bomlási kategóriát tekintve ugyanolyan elrendeződésű, mint az előző. Bizonytalanság mutatkozik azonban az átalakulás irányának tekintetében a stabil izotópok közötti tömegszámánál, vagyis a mintapéldában a Cu-64-nél. Úgy tűnik, hogy ez a közrefogott izotóp mindegy, hogy milyen irányban, de bomlani akar. A modellek szerint a bomlás iránya azért közömbös számára, mert a neutronmag és -héj aránya ideális, tehát valójában nem is a geometriai aránytalanságok kényszerítik a bomlásra, hanem neutronsámának páratlansága. A Cu-64-nek ugyanis 35 neutronja van, és ezt nem tűri a természet a protonszám páratlansága esetén.

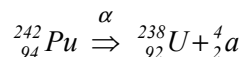
A 5.5. ábra mintapéldát mutat az alacsony rendszámú páros elemekre. Középen egy csoportban a stabil izotópok, felette a β^+ -instabil izotópok, alatta pedig a β^- -instabilak.

A 5.6. ábra a magasabb rendszámú páros elemekre szolgál példaként. Középen egy csoportban 3 stabil izotóp, majd kifelé haladva a páratlan neutronsámú radioaktív izotópot ismét stabil követi. Egyes elemeknél a középső csoportban 4-8 is lehet, és a széleken is gyakori a 2-3 egymást követő páros (!) neutronsámú stabil izotóp, a páratlan neutronsámú radioaktívak közbeékelődésével.

Összefoglalva elmondható, hogy a β -átalakulás a belső neutronmagot is érintő olyan folyamat, amely csak a nukleonok átrendeződésében nyilvánul meg, de nem jár a nukleonok távozásával, vagyis a mag tömegszáma változatlan marad. Az átalakulást kiváltó ok a belső neutronmag és a neutronhéj geometriai aránytalansága, illetve a neutronsám páratlansága.

6. AZ ALFA-BOMLÁS

Az α -sugárzást kibocsátó radioaktív anyagokból pozitív elektromos töltésű sugárzás indul ki. A sugárzás α -részecskékből áll, amelyek tulajdonképpen héliumatommagok, mivel 2 protonból és 2 neutronból állnak. Ezért a tömegszámuk: 4. Az α -bomlással átalakuló mag tömegszáma tehát négygyel csökken, rendszáma pedig kettővel, hiszen a héliummag 2 protont is tartalmaz. Mintapélda a magreakcióra a plutónium-242 bomlása, melynek folyamán 238-as urán keletkezik egy α -részecske kibocsátása mellett. (${}^4_2\alpha = {}^4_2\text{He}$) A bomlás reakcióegyenlete:



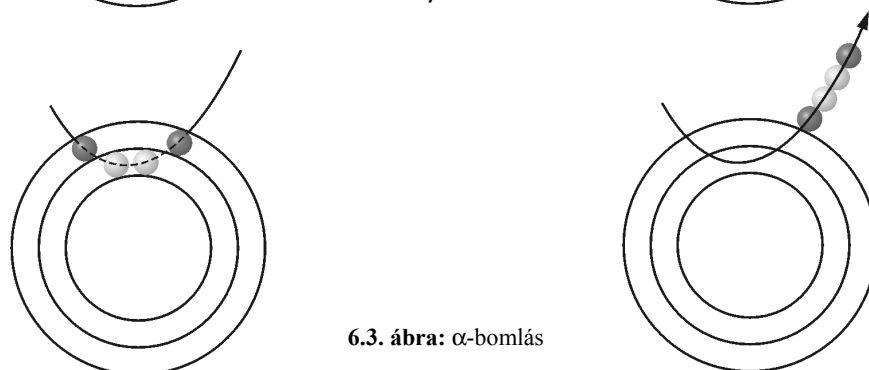
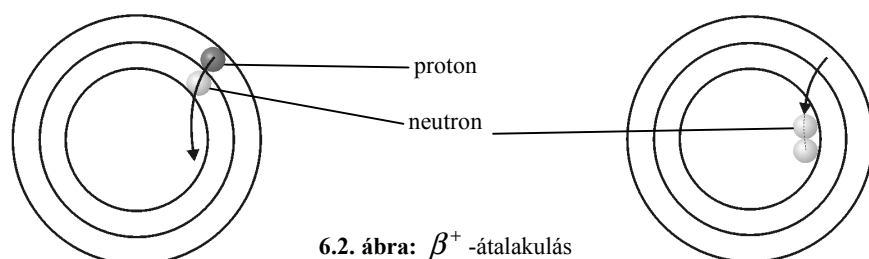
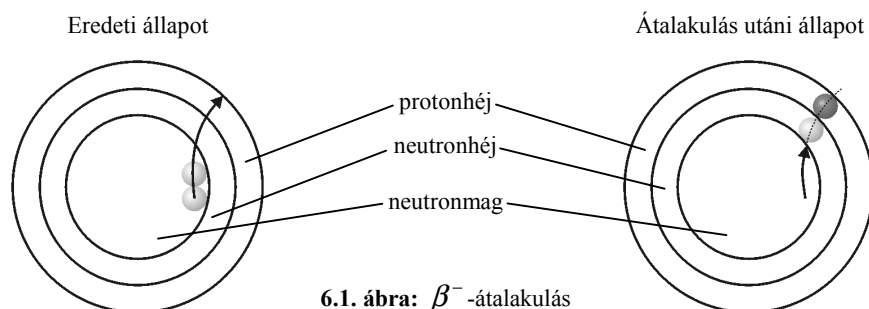
A plutónium tömegszáma tehát négygyel csökkent, rendszáma pedig kettővel, és ezáltal egy új elem keletkezett, ez esetben az urán. A keletkező α -részecske és uránmag együttes tömege kisebb, mint a plutóniummag eredeti tömege. A hiányzó tömeg és a felszabaduló energia ekvivalens.

Az α -bomlás túlnyomórészt a nehézmagok esetében lép fel, a 83-as rendszámú bizmuttól kezdődően, de "folt-szerűen" előfordul a ritkaföldfémeknél is, pontosabban az 58-72 rendszámok között, továbbá az egészen kis rendszámoknál, nevezetesen a hélium és a bór közötti tartományban. Figyelemreméltó, hogy az α -bomlás többnyire a β^+ -bomlások mellett vagy helyett szokott jelentkezni, és csak az aktinoidák tartományában, valamint néhány transzuránnál párosul a β^- -bomlással. Ez azt jelenti, hogy az α -bomlás a kisebb neutronmagú és ezáltal bővebb neutronhéjjal rendelkező magok átalakulási formája. Ezt tökéletesen bizonyítani látszik az is, hogy a neutronmodellek szerint az α -bomlás a belső neutronmagot egyáltalán nem érintő magfelszíni bomlási folyamat.

Ha megvizsgáljuk bármely α -aktív izotópot és annak bomlástermékét a nukleonarány szempontjából, akkor azonnal kiderül, hogy az α -bomlás során a proton-neutron differencia, más szóval a neutrontöbblet nem változott, vagyis a kiindulási és a végtermék belső neutronmagja ugyanakkora maradt. Az átalakulás eredménye tehát egy kisebb rendszámú elem lett, változatlan belső neutronmaggal.

Ezek alapján most már összehasonlítható az α -bomlás a β -átalakulásokkal abból a szempontból is, hogy az átalakulás a mag belsejében, vagy a külső részén játszódik-e le.

A 6.1. ábra a β^- -átalakulás, a 6.2. ábra a β^+ -átalakulás, a 6.3. ábra pedig az α -bomlás sematikus ábrázolását mutatja.



7. AZ URÁN ÉS A MAGHASADÁS

Az urán a legnagyobb rendszámú elem, amely földi körülmények között a természetben előfordul. Fajsúlya igen nagy ($19,05 \text{ kp/dm}^3$), szilárdsága közepes, keménysége erősen növekszik a tisztaság csökkenésével. További tulajdonságai a lexikonokban és a kémiakönyvekben megtalálhatók, ezért itt csak a modell szempontjából érdekes adatok említésére szorítkozunk. Három urán-izotóp fordul elő a természetben:

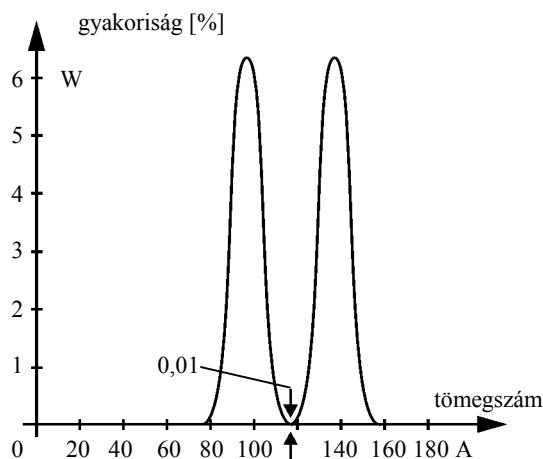
tömegszám	előfordulási gyakoriság	felezési idő
U-234-es	0,0051 %	$2,5 \times 10^5 \text{ év}$
U-235-ös	0,71 %	$8,2 \times 10^8 \text{ év}$
U-238-as	99,28 %	$4,5 \times 10^9 \text{ év}$

Valójában egyik urán-izotóp sem tökéletesen stabil, de felezési idejük jóval meghaladja bolygónk korát, így még bőven megtalálhatók ásványok formájában. Az U-234-es izotóp előfordulása és gyakorlati jelentősége csekély. Az U-235 a harcászati atomtöltetek hasadóanyaga, valamint az atomreaktorok fűtőanyaga. Az U-238 a legstabilabb és a legnagyobb mennyiségben előforduló urán-izotóp. A hasadás és ezzel együtt az energiatermelés szempontjából azonban káros a jelenléte, mert elnyeli a neutronokat, ezért az U-235-től szét kell választani. Mivel a két izotóp fizikai és kémiai tulajdonságai kissé eltérnek, ezért a szétválasztás technikailag megoldható.

Érdekes, hogy neutronok hatására az urán-izotópok különböző módon reagálnak. A **238-as izotóp** befogja a neutront és 239-es uránná alakul. Ebből béta-sugárzással előbb neptúnium lesz, abból pedig plutónium. A tömegszámát eközben megtartja. A folyamat részletezésére a későbbiekben kerül sor. A **235-ös urán**, a neutronok hatására két új atommá hasad szét. Eközben 2-3 neutron is felszabadul, melyek újabb 235-ös atomokat hasítanak szét. Elegendő anyagmennyiség, úgynevezett kritikus tömeg megléte esetén ez a folyamat láncreakciószerűen terjed, és az urán-235 tömegének egy része így óriási mennyiségű energiává alakul.

Fontos tapasztalati tény, hogy rendkívül ritkán fordul elő az uránatom azonos részekre való hasadása, ugyanis a megfigyelések szerint csak kb. minden ezredik hasadás szimmetrikus. A maghasadáskor az esetek túlnyomó részében két különböző tömegű hasadási termék keletkezik: az egyik tömege 95 és 100 közé, a másiké 135 és 140 közé esik. Másként fogalmazva: a hasadási termékek tömegeloszlásai erős gyakorisági maximumot mutatnak a kiindulási tömeg $2/5$ és $3/5$ részének környezetében. Ezt mutatja a 7.1. ábra.

A híres orosz atomtudós, K. N. Muhin írta egyik művében: „A hasadás aszimmetriájának mennyiségi elmélete, mely kielégítő pontossággal egyezne a tapasztaltakkal, jelenleg még nem létezik.”



7.1. ábra: A hasadási tömegeloszlás gyakorisági diagramja.

A hasadékpárok, amiket eddig észleltek, az elől álló rendszám megadásával a következők:

35Br	36Kr	37Rb	38Sr	39Y	40Zr	41Nb
57La	56Ba	55Cs	54Xe	53J	52Te	51Sb

Az egymás felett álló pároknak a rendszáma együtt 92-t tesz ki (az itt nem közölt), tömegszámuk összege pedig 235-öt, ha hozzászámítjuk a hasadáskor szabadon szétrepülő 2-3 neutront is. Ezen primer hasadási termékek mindegyike erősen radioaktív, mert az urán-235 neutronbőségét örököelve, a rendszámukhoz képest

viszonylag sok neutron tartalmaznak. Ettől a fenti izotópok mindegyike béta-mínusz (β^-) bomlások sorozatán keresztül igyekszik megszabadulni. Minden béta-mínusz bomlási lépcső egy-egy magasabb rendszámú való átalakulást jelent, a tömegszám megtartásával.

Érdekes tapasztalati eredmény, hogy 1 millió hasadás során csupán 5-ször fordul elő, hogy nem 2, hanem 3 töredékmag jön létre. Megjegyzendő, hogy

- egyedül az U-235 izotóp alkalmas a Földön található több száz természetes izotóp közül arra, hogy vele hasadási láncreakciót hozzunk létre,
- találhatók ugyan a transzurán elemek izotópjai között is hasadó magok, például a plutónium-239, de ezek csak mesterséges úton állíthatók elő.

Transzurán elemek

Neutronok, alfa-részecskék és további nehéz bombázó részecskék alkalmazásával mesterséges elemeket állítottak elő az 1940-es évek után. Ezek a periódusos rendszerben az uránt követik 93-104-es rendszámmal. Közös nevük: transzurán elemek. Ide tartozik: a neptúnium (93Np), a plutónium (94Pu), az amerícium (95Am), a kúrium (96Cm), a berkélium (97Bk), a kalifornium (98Cf), az einsteinium (99Es), a fermium (100Fm), a mendelévium (101Md), a nobélium (102Nb), a laurencium (103Lw), és a kurzatóvium (104Ku). Tágabb értelemben ide tartoznak az elnevezés megalkotása óta felfedezett további elemek is, mint pl. a 105-ös, a 106-os, valamint az 1976-ban felfedezett 107-es elem is. Gyakorlati jelentősége a transzuránok közül csak a plutónium-239-nek van, amely az U-235-höz hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, vagyis egyrészt képes a hasadási láncreakcióra, másrészt a $2,4 \times 10^4$ éves felezési idejével kellően stabil ahhoz, hogy atom-bomba, vagy más nukleáris fegyver töltetét lehessen gyártani belőle.

A Pu-239 egy mesterségesen előállított elem. Létrehozásához sugárzó környezetbe, például atomreaktor aktív zónája köré U-238-at helyeznek el, amely befogja a lassú neutronokat, miáltal U-239 izotóppá alakul át. Miután az U-239 instabil, ezért tovább alakul először neptúniummá, majd plutóniummá.

A magfizikai számításokra alapozott tudományos megállapítások szerint a nagyon távoli transzuránok tartományában létezhetnek „stabilitási szigetek”, vagyis olyan magok, melyek α - és β -bomlásának, valamint spontán hasadásának valószínűsége nagyon kicsi. Ezek a szigetek a megjósolt mágikus számok, a $Z=114$, $Z=126$, $N=184$, és a $Z=164$ közelébe esnek. Sok vizsgálat tárgyát képezi, különösen a 114-es rendszámú elem megtalálása, illetve előállítása, ugyanis a 114-es elem bizonyos izotópjaira hosszú élettartamokat feltételeznek.

Felmerül a tények és a ma elfogadott magmodellek összevetésekor egy sor kérdés, melyekre a magmodellekhez kapcsolt elméletek és tudományos fejtegetések nem adnak valódi magyarázatot. Ilyenek például, hogy:

- miért hasad az U-235 és a Pu-239 úgy, hogy a láncreakció be tud indulni, és mi a közös ezekben az izotópokban?
- ha az U-235 hasad, akkor miért nem hasad a 234-es ill. a 236-os vagy a többi U-izotóp, vagy éppen más elemek 235-ös és 239-es tömegszámú izotópjai?
- miért nem szimmetrikus a hasadási termékek tömege, vagyis miért hasad az U-235 két lényegesen különböző tömegű leánymagra?
- miért stabil, miért található meg a természetben az urán 234, 235 és 238-as izotópjai, és miért nem stabilak a környezetében lévő elemek, vagyis az aktinoidák és a transzuránok?

Ezek voltak a tapasztalatok, a mérések eredményei és a velük kapcsolatban felmerült kérdések. De milyen összefüggések olvashatók ki az itt bemutatásra kerülő neutronmodellekből?

Az urán-izotópok neutronmodelljei

Az urán-235 neutronmodellje a külső héjon (felületen) 92, a belső részén pedig 51 neutron jelképező gömbből áll (7.2. ábra). A neutronmodell külső burkolója csaknem gömbforma, enyhén hexaéderes jelleggel. Az 51-es belső neutronmag felépítése a többi stabil izotóp belső szerkezetéhez képest rendkívül különleges. Legbelül három párhuzamos síkban 9-9 gömb támaszkodik egymásnak egy $3 \times 3 \times 3$ -as köbös alakzatot alkotva (7.3. ábra).



7.2. ábra

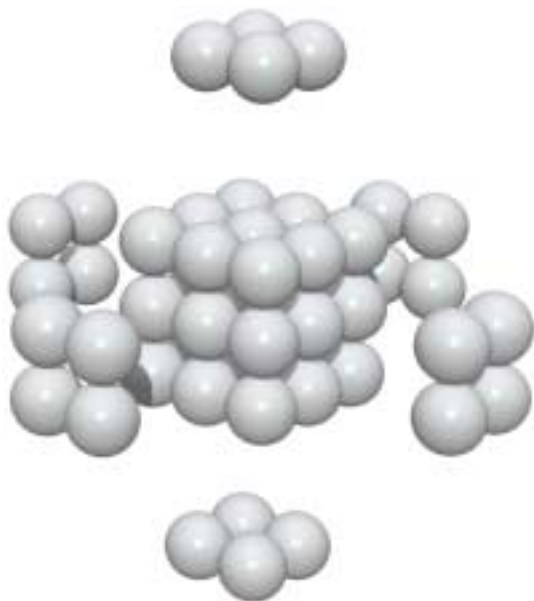
Az urán-235 neutronmodellje.



7.3. ábra

$3 \times 3 \times 3$ -as köbös alakzat (belső blokk).

Az urán-235-nek ezt a középponti részét a hat oldalról ráilleszkedő 4-4 gömb stabilizálja. A 7.4. ábra a láthatóságot elősegítő ábrázolással mutatja meg ezt. Az így keletkezett 51 gömbből álló alakzat (7.5. ábra) ép állapotában hihetetlenül stabil, de bármely elemének eltávolítása, átrendezése, vagy egyéb külső behatás esetén kártyavárként omlik össze.



7.4. ábra

Az urán-235 belső magjának szerkezete.



7.5. ábra

Az U-235 komplett 51-es belső magja.

A felépítést látva előre megjósolható, hogy bármely irányból jövő külső hatásra a neutronmag $3 \times 3 \times 3$ -as központi része $2/3 + 1/3$ részre fog szétválni (7.6. ábra) a hasadási síkjainak valamelyike mentén.

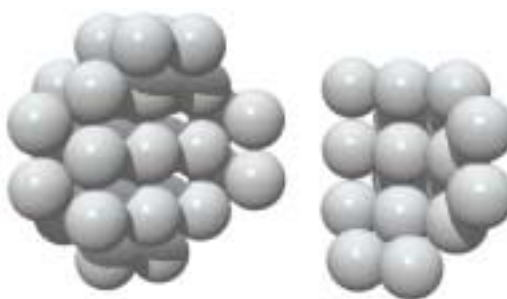
Az 51-es komplett belső mag (7.5. ábra) hasadásánál keletkező arány is ugyanekkora (ld. 7.7. ábrát), hiszen a hasadékok neutronszáma: $34 + 17$.

A 235-ös tömegszámú urán $235 - 92 = 143$ neutronot tartalmaz. Erre a teljes neutronszámra vonatkoztatott hasadási arány $86/57$ körüli lesz a modellek (7.8. ábra) szerint. A protonokat is magában foglaló 235-ös tömegszámra vonatkoztatva ez, a már korábban említett $3/5 : 2/5$ arányt adja, vagyis pontosan megegyezik a magfizikai mérések eredményeiből származó 135...140, ill., 95...100 közötti hasadási tömegszámokkal.



7.6. ábra

A $3 \times 3 \times 3$ -as belső blokk hasadása.

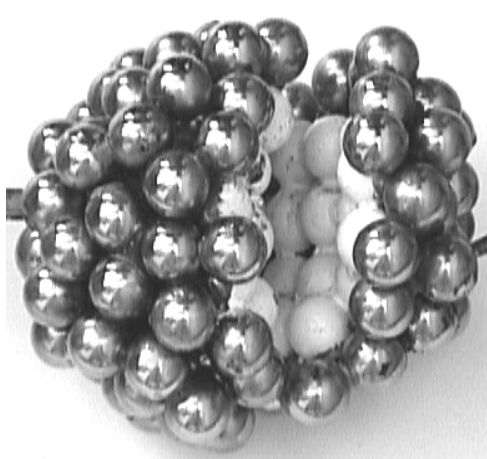


7.7. ábra

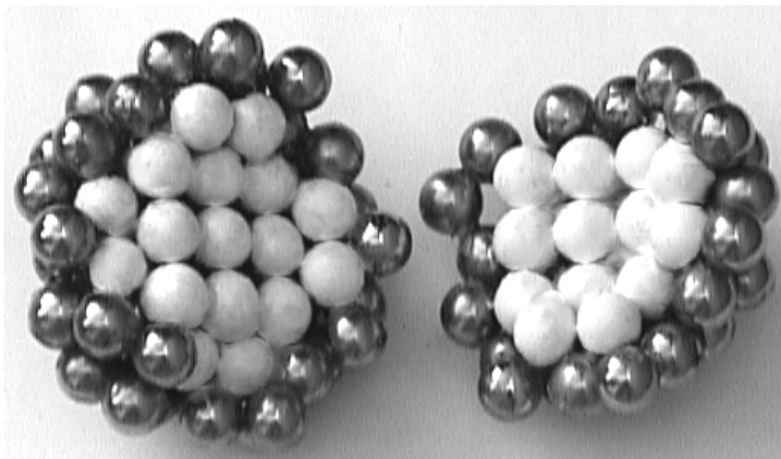
Az 51-es belső mag két hasadékának részletei.

A hasadás utáni nukleonmegoszlás az urán-235 teljes neutronhalmazára vonatkoztatva csak bonyolult térbeli rajzzal volna szemléltethető, ezért fotó (7.8. ábra) mutatja meg a hasadás után kialakult viszonyokat a hasadékok nukleonmérlegének megadásával. A hasadási sík peremén elhelyezkedő neutronok, valamint az itt nem ábrázolt protonok a modellezésnél felesben lettek megosztva a két töredékmag között. Így az egyik félen 53 proton és 86 neutron maradt, a másik félen pedig 39 proton és 57 neutron. Az előző a jódt-139, az utóbbi pedig az itterbium-96 proton-neutron arányát eredményezi.

(A modell középső részének fehérre festése az 51-es belső magnak a neutronhéjtól való elkülönítését segíti.)



7.8/a. ábra
Az U-235 hasadás kezdete.



7.8/b. ábra
Az U-235 hasadás utáni tömegeloszlása.
baloldali hasadék jobboldali hasadék

$$\begin{aligned} {}^{139}_{53}\text{J} \text{ (jód)} &= 53 \text{ proton} \\ &+ \underline{86 \text{ neutron}} \\ &139 \text{ tömegszám} \end{aligned}$$

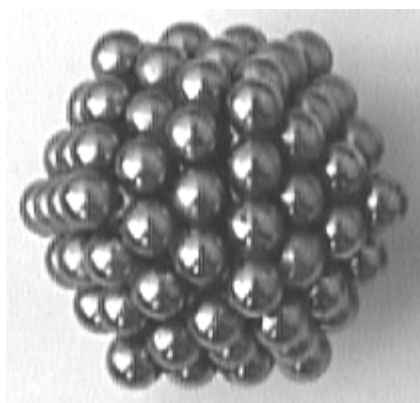
$$\begin{aligned} {}^{96}_{39}\text{Y} \text{ (itterbium)} &= 39 \text{ proton} \\ &+ \underline{57 \text{ neutron}} \\ &96 \text{ tömegszám} \end{aligned}$$

Ha a hasadékok peremén lévő, bizonytalan hovatartozású protonok és neutronok túlnyomórészt a baloldali (nagyobb) hasadékhoz adódnának, akkor 20-22-es proton-differencia jelentkezne, vagyis Kr-Ba (kripton-bárium) vagy Br-La (bróm-lantán) primer hasadékpárok keletkeznének. Ha viszont ugyanezek a nukleonok többségükben a jobboldali (kisebb) hasadékban maradnának, akkor a 10-12-es protonszám-eltérés Zr-Te (cirkónium-tellur), vagy Nb-Sb (nióbium-antimón) hasadékpárokat eredményezne.

Az előző ábrákon az is egyértelműen látható, hogy a teljes gömbhalmaz felezése, középen való szétválasztása szinte sehogyan sem lehetséges, mint ahogyan a valóságban sem szokott az U-235 két azonos méretű magra hasadni.

Számszerűségében ugyanígy jelentkezik a valóságban is az urán-235 hasadásánál itt felsorolt, illetve modellezéssel kimutatott részlet mindegyike, tehát a modellek hibátlanul mutatják a valóságos folyamatot.

Az urán-238 neutronmodellje a geometriai tökéletesség talán legszebb példája. A modell a gömbi formát csaknem teljesen megközelítve egy olyan 146 gömbből álló szabályos alakzat, melynek a felszínén 92, a középső rétegében 42, annak belsejében pedig további 12 nukleont szimbolizáló gömb helyezkedik el a 7.9.-es ábrán látható módon. A külső héj alatt lévő $42+12=54$ -es gömbhalmaz az U-238 neutrontöbbletének felel meg. A modell protonszáma, neutronszáma és neutrontöbblete tehát pontosan egyezik a valóságos adatokkal.



a.) külső héj



b.) középső héj

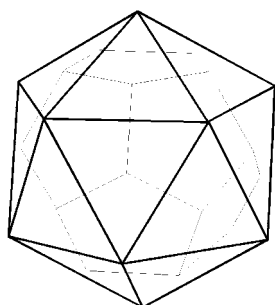


c.) belső blokk

7.9. ábra
Az urán-238 neutronmodelljét alkotó héjak

Mindhárom gömbhalmaz váza egy-egy ikozaéder, sőt az U-238 modelljében fel lehet fedezni az ikozaéderben megbúvó dodekaédert is (7.10. ábra), melynek csúcsai az U-238 modelljének lapközepein vannak.

Már Euler is bebizonyította, hogy ennél magasabb rendű geometriai szabályosság a sokszögek világában keresve sem található, ezért a gömbökből kirakott poliéderek között sem érdemes a tökéletességet tovább kutatni az urán feletti rendszámoknál. Sajnos tudomásul kell vennünk, hogy az uránon túl nem fogunk találni



7.10. ábra
Ikozaéderben elhelyezkedő dodekaéder.

stabil elemet, legalábbis földi körülmények között nem. Le kell tehát mondanunk arról, hogy a transzuránok között a 114-es rendszám környezetében megjósolt stabilitási szigeten valóban stabil izotópokat találhassunk. Viszonylagosan jó stabilitás **a modellek szerint** az urán felett – geometriai okok alapján – egyébként nem a 114-es, hanem a 120-as rendszámnál remélhető, mégpedig 196-os neutronszám, azaz 316-os tömegszám közvetlen környezetében. Ennek részleteivel azonban itt nem érdemes foglalkozni.

Az U-238 ennek a tökéletes geometriai formának köszönhetően a nagy tömegszáma ellenére stabil. **Mi történik azonban akkor, ha ezt a geometriai tökéletességet egy neutron behatolása megzavarja?** Erre a sugárzó környezetbe helyezett U-238-nak van jó esélye. Geometriai tény, hogy a legbelső, 12 gömbből álló egyrétegű halmaz (7.9/c. ábra) középebe nem fér bele a tizenharmadik gömb a teljes zárttság megzavarása nélkül, bár ennek nem sok híja van. Ha mégis belekényszerítjük – mint ahogyan az U-238 belsejébe behatol a bombázó neutron –, akkor ennek következtében a 12-es gömbhalmaz először kissé fellazul (7.11. ábra), majd a halmaz egyik fele egy fél osztással elfordul. Így beáll a két fél egy párhuzamos pozícióba (7.12. ábra), megtalálva ezáltal a keletkezett alakzat geometriai stabilitását. A középső réteg (további 42 gömb) ugyanilyen átalakuláson megy át. (7.13. és 7.14. ábra)

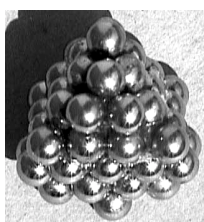


7.11. ábra

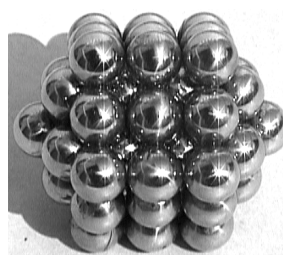


7.12. ábra

A 12+1-es gömbhalmaz transzformációja.

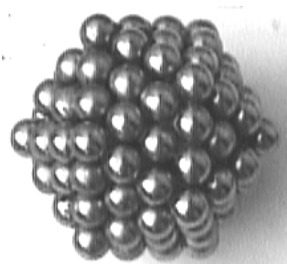


7.13. ábra

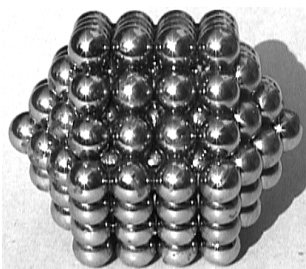
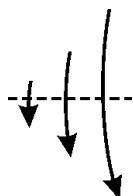


7.14. ábra

A 42-es felszínű gömbhalmaz transzformációja.

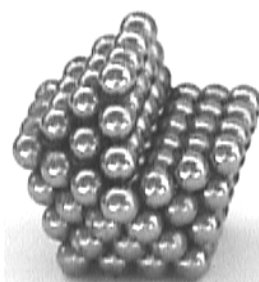


7.15. ábra



7.15. ábra

A 92-es felszínű gömbhalmaz transzformációja.

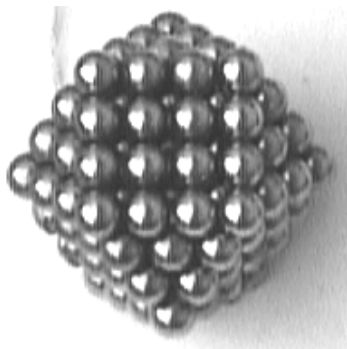


7.17. ábra

kiindulva elkezd elfordulni az összes réteg a stabil helyzet megtalálása érdekében, az annak megfelelő mértékig. Első lépésben a fellazulás síkjával párhuzamos négy középsík (7.15. ábra) geometriai transzformációja zajlik le úgy, hogy a síkok gömbökből álló gyűrűi befordulnak egymással párhuzamos helyzetbe, és kialakul az ikozaédes formából a 7.16. ábra szerinti tengelyszimmetrikus változat.

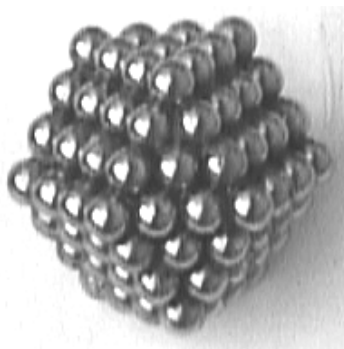
Érdekes, szinte geometriai csoda, hogy az eredetileg fellazítással átranzformálódásra kényszerített, bonyolult alakzatnak az elfordulás után kialakult változatánál mégis teljesen szoros lesz a gömbök illeszkedése a modell teljes térfogatában. A metszeti kép (7.17. ábra) mutatja a belső részletek tökéletes, hibátlan illeszkedését, valamint a közepre behatolt neutron beágyazódását, vagyis a környezetével való teljes azonosulását. Az U-238 befogadja tehát a pontosan középebe irányított, de nem túl gyorsan érkező neutron, és U-239 lesz belőle.

Az előbb közölt modell csak egy átmeneti változata az U-239 modelljeinek – egzakt geometriai szerkezete ellenére. A belső struktúra transzformálódása ugyanis folytatódik, amelynek két további lépcsője látható a 7.18. és a 7.19. ábrán. Ezek is teljes zártágú belső szerkezettel rendelkeznek, amint azt a metszeti kép (7.20. ábra) bizonyítja.



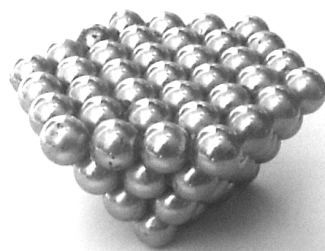
7.18. ábra

Az urán-239 második változata.



7.19. ábra

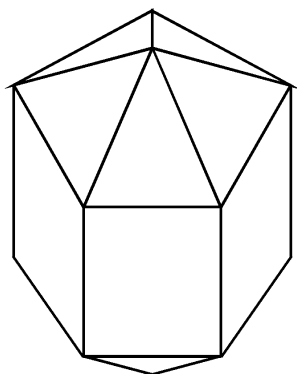
Az urán-239 harmadik változata.



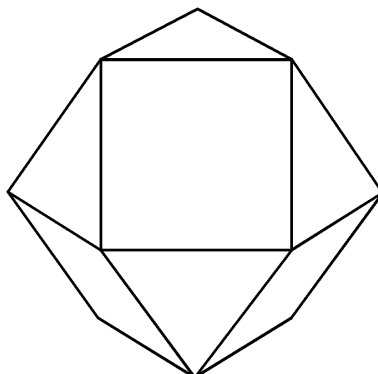
7.20. ábra

Az urán-239 2. ill. 3. változatának belső szerkezete.

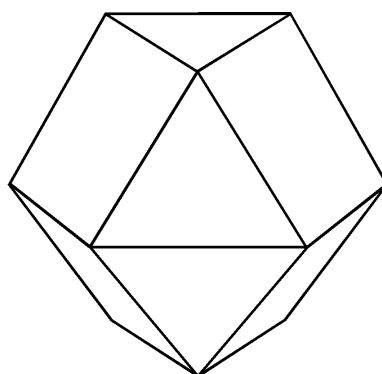
Geometriai törvényszerűség diktálja ezt az egész radikális átrendeződést, melynek megértéséhez érdemes tudni azt, hogy a testközépből az ikozaéder 12 csúcsába irányított sugarak merőben más módon osztják fel a teret, mint a hexaéder (kocka) vagy az oktaéder középpontjából a 12 élközépbé irányított sugarak. A három U-239 neutronmodell határvonalainak könnyebb felismerését segítik elő a gömbhalmazok felszíni struktúráját kiemelő vonalvezetési sémák (7.21., 7.22. és 7.23. ábrák).



7.21. ábra



7.22. ábra



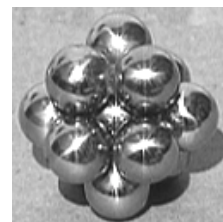
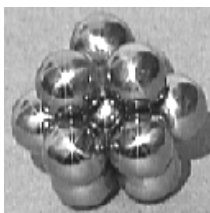
7.23. ábra

Vonalvezetési sémák a 7.16., 7.18. és 7.19. ábrák szerinti modellekhez.

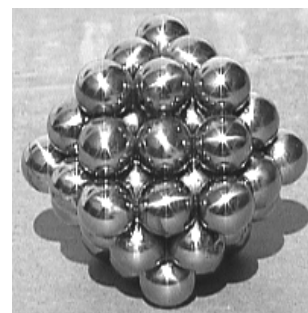
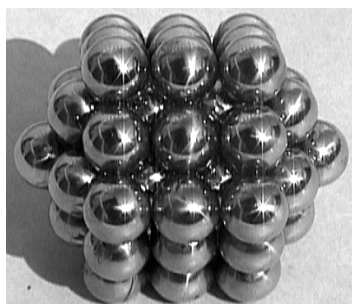
Érdekes, hogy mindhárom U-239 modell külső neutronhéját is beleszámítva a középpontjában elhelyezkedő gömb már a negyedik „réteget” képviseli. A modellek szerint az U-238-nál fejeződik be a stabil izotópok létezése, éspedig a modellek szerint azért, mert az U-238 neutronhalmaza a lehető legnagyobb olyan gömbhalmaz, amely még csupán három rétegű. Efelett, vagyis $238-92 = 146$ -os gömbhalmazon túl, szükségszerűen megjelenik a negyedik réteg is. Az U-239 modelljei mind 1-1 gömböt zárnak közre a geometriai középpontjukban. Figyelemreméltó, hogy mindhárom változatnál ugyanolyan a belső (13-as) gömbhalmaz és a középső (42-es felszínű) gömbhalmaz vonalvezetése, mint az adott változat legkülső (92-es) héjának geometriai struktúrája. Ezt mutatják a 7.24., 7.25 és 7.26. ábrák.



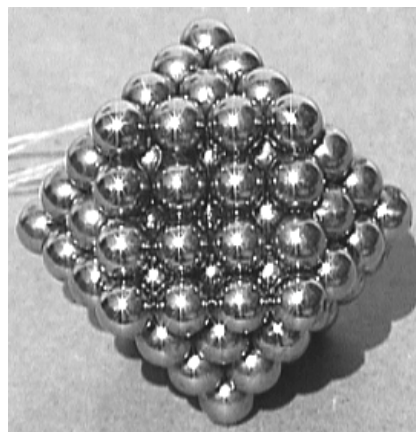
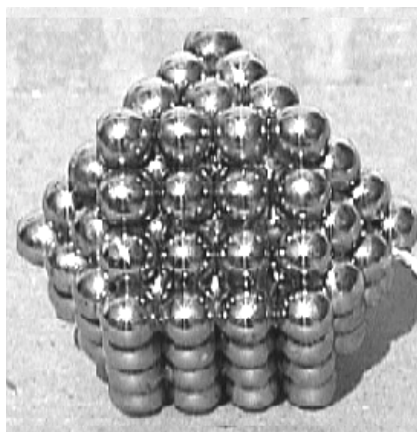
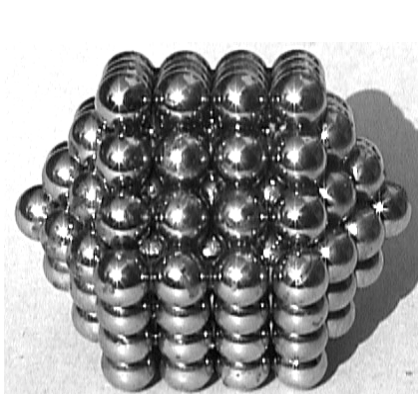
1-1 gömb legbelül.



12-es felszínű halmazok (+belül: 1).



42-es felszínű halmazok (+belül: 12+1).



147-es halmazok (U-239 modellek) 92-es felszínnel (+belül: 42+12+1).

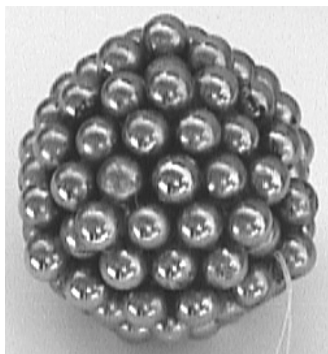
7.24. ábra

7.25. ábra

7.26. ábra

Ezek mind az U-239 modelljei, melyeknél kezd szűkké válni a 92 neutronból álló burok. Szemmel látható jelei ennek a felszínen túlsúlyba került négyzetes (kvadratikus) gömbelrendeződések, azaz a jellegzetes 4x4-es rácsszerű oldallapok, melyek mind a nagyobb felszín elérésére való törekvés jelei. Emiatt alakul ki a külső neutronhéj alatt azoknak a 3x3-as gömbrétegeknek a képe, melyek az 51 neutronból álló ún. hasadó belső mag (7.3. és 7.4. ábra) jellegzetes összetevői lesznek a következő átalakulási lépcsőkben.

A geometria szabályai a neutronmag-neutronhéj arányának megváltozását követelik, amit a természet törvényei a belső magból két neutron kiválásával oldanak meg. Kibökődik tehát a belső neutronmagból két neutron, és ezek egyike a külső neutronhéjban marad, a másik pedig a protonhéjat bővíti, a protonná való átalakulása után. A rendszám tehát eggyel növekedett. Ez a folyamat, vagyis a β^- -bomlás még egyszer megismétlődik, majd beáll a viszonylag hosszú távú stabilitás. A belső neutronmag tehát 2x2-vel csökkenve 51-es lett, miközben a protonszám 92-ről 94-re nőtt, vagyis az uránból plutónium lett. Ez a plutónium hasadó izotópja: a Pu-239, amely egy mesterségesen előállított izotóp, $2,4 \times 10^4$, azaz 24,000 éves felezési idővel. Modellje (7.27. ábra) 94 felszíni neutronot tartalmaz. Felépítésének jellege tetraéderes, a gömböt egészen megközelítő burkolóval.



7.27. ábra
A plutónium-239 modellje.

A modellezések alapján bizonyossá vált, hogy a plutónium-239 belső magja is egy ugyanolyan felépítésű 51-es neutronhalmaz, mint az urán-235 izotópé. Minden bizonnyal ebből következik a hasadási tulajdonságaik hasonlósága is.

8. KIVÉTELES NEUTRONSZÁMÚ IZOTÓPOK

Mint az előzőekben látható volt, a stabil izotópoknál egy adott protonszámhoz, egy meghatározott tartományon belüli mennyiségű neutron tartozik. A neutronok száma a protonok számánál kevéssel több, és ez a különbség a rendszám emelkedésével növekszik. A neutron-proton differencia megjelenési formája a neutronhalmaz belsejében – a héj által közrefogottan – helyet foglaló neutrontöbbslet, vagyis a belső neutronmag. A neutronhéj neutronjainak száma ugyanis mindig azonos a protonszámmal, amint azt az 1. fejezet 1.2. ábrája mutatta.

Ennek a szabálynak a megtalálása azért nem volt egyszerű, mert az egyöntetű képet több különleges felépítésű izotóp létezése zavarja. A modellezésnél azonban kiderült, hogy a kivételes neutronszámok megjelenése mögött mindig geometriai anomáliák húzódnak meg, melyeket a természet sem tud kikerülni. Ezek között vannak szerencsés esetek, azaz pozitív kivételek is, mint például a stabilitási szigetnek számító urán esete, de előfordulnak negatív eredményű kivételek is, mint a stabil izotóppal nem rendelkező technécium és promécium példája. A kivételek mindegyike jól magyarázható geometriai indoklással, pontosabban a gömbhalmazok illeszkedésében esetenként fellépő különlegességgel. Ebben a fejezetben ezeket foglaljuk össze, a teljesség igénye nélkül.

1.) **A páros rendszámú elemek** talán egyetlen kirívóan kivételes esete a berillium. A 4-es rendszámú berilliumnak egyedül a 9-es tömegszámú izotópja stabil. Kivételessége abban van, hogy az egyetlen stabil berillium-izotóp páratlan neutronsámú, jóllehet minden más páros rendszámú elemnél a páros neutronsám a domináns. A 18-os rendszám alatti összes többi páros elem (hélium, szén, oxigén, magnézium, szilícium és kén) leggyakoribb izotópjainál, a protonszám és a neutronsám azonos. Ezek 90,9-99,9% közötti előfordulási részarányal szerepelnek az adott elemnél.

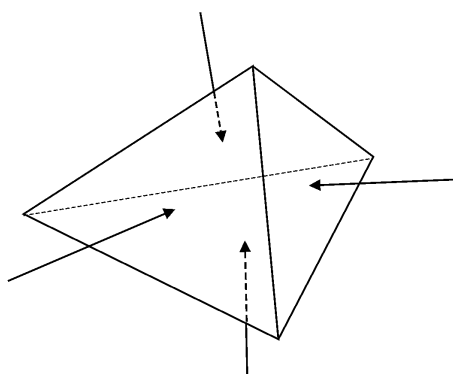
A berilliumtól is elvárható lenne tehát, hogy stabil legyen egy vagy több páros neutronsámú izotópja, és ezek között legelső sorban a neutrontöbbslet nélküli, vagyis a 4 neutronnal és 4 protonnal rendelkező 8-as tömegszámú izotóp. A Be-8 azonban mégsem stabil. Miért nem stabil tehát a Be-8, és miért stabil ezzel szemben a páratlan neutronsámú Be-9?

A magyarázat nagyon egyszerű a szabályra is, és a berillium kivételességére is. A többséget, vagyis a szabályt képviselő páros-páros magok elsőbbségének oka a 2. fejezetben már magyarázatot kapott. A 18-as rendszám alatti elemeknél szintén kézenfekvő a válasz a neutronsám és a protonszám azonosságára, vagyis a neutrontöbbslet hiányára, hiszen nem fér bele két további neutron a 18 alatti neutronhéjakba.

Belekényszeríthetnek ugyan rendkívüli körülmények a mag közepébe még két neutron, hiszen közismert ezen neutrontöbbsletes stabil változatok létezése is (O-18, Ne-22, Mg-26, Si-30, S-34). Ezek azonban csak nagyon csekély részarányban fordulnak elő: a fenti sorrendben csupán 0,2%, 8,8%, 11,1%, 3,1%, illetve 4,2%-ban. Mind az öt elem esetében kedvezőbb ugyanis a neutrontöbbslet nélküli, vagyis az azonos proton- és neutronsámú változat, mint ahogyan azt a sokszorta nagyobb előfordulási részarány meg is mutatja. De miért kivétel a 4-es rendszámú berillium?

Ha a tér felosztási lehetőségeinek elemzése közben a keletkezett részek egymáshoz viszonyított állásait megvizsgáljuk, akkor azonnal feltűnik, hogy a térnek egyenlő részekre való felosztása csak páros számú osztással sikerülhet. A másik eredménye a vizsgálatnak az, hogy minden térrész fordított tükörképe megjelenik az ellenoldalon, éspedig a középponton átmenő tengely folytatásában. Kivétel a páros osztásoknál: a tér 4 részre osztásának esete, mert itt a vizsgált térrésszel szemben lévő oldalon nem a saját tükörképe foglal helyet, hanem a másik három térrész találkozási pontjának környezete. A 4-es (tetraéderes) térbeli szimmet-

riánál tehát a térrészek középvonalai, tengelyei féltengelyekké módosulnak. A féltengelyek jól szemléltethetők a tetraéder lapközepeiből befelé mutató félegyenésekkel (8.1. ábra.).



8.1. ábra

Tetraéder féltengelyei.

A kivételt képviselő berillium 4 protonja igyekszik az alatta lévő 1-1 neutront a mag középpontja felé nyomni, és pedig a tér 4 irányából. A tér 4 egyenlő részre való szimmetrikus felosztódása azonban azt eredményezi, hogy a befelé ható 4 erővektor egyikének sincs ellentett párja a saját hatásvonalában. Amíg tehát az összes többi, páros rendszámú elemnél minden egyes protonnak, illetve az általa kifejtett befelé irányuló erőnek van egy ellentett erőpárja, addig a 4 erőből álló térbeli rendszerrel az egyensúlyt nem egy-egy valódi ellenerő biztosítja, hanem mindig a másik 3 erő ellenirányú komponensének az összege.

A nem egy vonalba eső erők esetében, a beállt egyensúly csak látszólag stabil. Bármely erő nagyságának vagy irányának kismértékű megváltozásakor ugyanis azonnal felbomlik az egyensúlyi helyzet. Az atomi rezgések és az esetleges sugárzások hatásai bármikor előidézhetnek ilyen változást. A következmény az,

hogy a Be-8 felbomlik két alfa részecskére (két héliumatomra), mégpedig a másodperc tört része alatt. A természet úgy oldotta meg a berillium stabilitási problémáját, hogy elhelyezett a geometriai középpontba egy "kiegyenlítő" neutront éppúgy, mint ahogyan a 20 alatti rendszámú páratlan elemeknél is. Erre a középső, ötödik neutronra támaszkodik fel a tér 4 irányából 1-1 neutron, azokra pedig kívülről 1-1 proton. A keletkezett alakzat, vagyis a Be-9 így már stabil.

Mivel a 4 az egyetlen páros szám, amelyenél a középpontba mutató egyenesek csak féltengelyek, ezért a berillium lesz az egyetlen páros elem, amely kizárólag csak úgy tud stabil izotópot alkotni, ha egy pótlólagos neutron épül be a mag középpontjába. Meg kell jegyezni, hogy a modellek szerint eléggé fedetlenül, védtelenül áll a középpontban a „kiegyenlítő” neutron, amit a valóságban nem is túl nehéz kilökní onnan. A természetes radioaktív elemek által kibocsátott γ -kvantumok hatása is elegendő a Be-9 mag hasításához. Megfigyelt magreakció, miszerint a RaC' γ -kvantumai ($E_\gamma = 1,78 \text{ MeV}$) elhasítják a Be-9 magot egy neutron felszabadulása mellett, a keletkező Be-8 pedig spontán szétesik (kettéhasad) két héliummagra.

A magreakció: $\gamma + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + n$

valamint: ${}^8_4\text{Be} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$

Ennek a megjegyzésnek a fontossága akkor válik igazán érdekessé, ha folytatjuk azzal, hogy a berilliumon kívül csak a deuteron (a deutérium ionja: ${}^2_1\text{H}$) hasítható a természetes radioaktív elemek által kibocsátott γ -kvantumok viszonylag alacsony energiájával. Az összes többi magnál a nukleon leválasztásához szükséges nagyobb energiát csak mesterségesen előállított γ -sugárzásból lehet nyerni.

2.) A páratlan rendszámú elemek általános jellemzői az előző fejezetben olvashatók. A neutronok többlete, továbbá a neutronsám párossága volt a stabilitás feltételeiként említve. Az első négy páratlan elemnek (a hidrogén, lítium, bór és nitrogén) kivételesen van egy-egy páratlan neutronnal felépülő izotópja is (H-2, Li-6, B-10 és N-14), az ugyancsak stabil páros neutronsámú izotópok (H-1, Li-7, B-11 és N-15) mellett. Az első három elem esetében lényegesen gyakoribbak a páros neutronsámú izotópok (H-1, Li-7 és B-11). A nitrogénnél azonban az N-14-es izotóp gyakorisága vezet 99,63%-os részarányal, mégpedig annak ellenére, hogy 7 neutronja páratlan, tehát kivételesnek mondható. Miért létezhetnek páratlan neutronsámú izotópok, és ezek között miért különösen kivételes a nitrogén N-14-es izotópja azáltal, hogy az előfordulási részaránya kiugróan magas? Vegyük sorra mind a négy elemet:

A nitrogén esetében, a 7 neutronból álló neutronhalmaz, az egy övben, gyűrűként elhelyezkedő 5 gömb közepén kétoldalt elhelyezkedő 1-1 gömb (8.2. ábra), egy igazán hibátlan alakzatot eredményez. Ez a modellje a stabil N-14-es nitrogén-izotópnak.



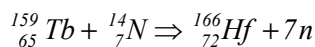
8.2. ábra

A nitrogén (N-14) modellje.

Az N-14 amiatt kivételes, hogy páratlan neutronszáma ellenére ez a 99,63%-os gyakoriságú izotópja a nitrogénnek. A páratlan elemek között nincs másik példa arra, hogy a páratlan neutronsámú legyen a gyakoribb izotóp. Kérdés, hogy miért nincs a nitrogénnek is a közepén a 7 neutront párossá tevő nyolcadik neutronja jelen? A válasz a modellek alapján kézenfekvő: azért, mert geometriai méreteinél fogva nem fér el. Ha mégis belekényszeríti valami-

ilyen erő középre a nyolcadik neutron, akkor az elrontja a 7-es alakzat hibátlanságát. Bár a mérések szerint az így keletkezett páros neutrons számú N-15-ös izotóp is stabil, de előfordulási részaránya csak 0,37%-os.

Egy-egy izotópnak tehát nemcsak a stabil vagy instabil voltát határozza meg a modelljének formai tökéletessége, hanem – mint a nitrogén esetében is – az adott izotóp előfordulási gyakoriságát, illetve részarányát. A következő magreakciónál az N-14 bombázó magként (gyorsított nehéz ionként) szerepel:



A 100 MeV feletti bombázó energiával végrehajtott magreakció szerint a nitrogén belövése a terbiumba azt eredményezi, hogy a protonok a terbiumban maradván megnövelik annak rendszámát, miáltal hafnium keletkezik. Megfigyelték továbbá 7 neutron kibocsátását, és ez utóbbi rendkívül figyelemreméltó. Hogyan lehetséges az, hogy éppen a töltéssel rendelkező protonok maradnak benn a magban, a semleges neutronok pedig eltávoznak? Miért távozik el a magreakció folyamán a nitrogénnek mind a 7 neutronja, miközben a keletkezett mag a hafnium egyik erősen neutronhiányos izotópja?

A neutronmodell alapján nagyon könnyű megválaszolni a kérdést: a nagy energiájú ütközés következtében, a terbium mintegy lekopaszította a nitrogén atommag neutronhalmazát. Az ilyen típusú kölcsönhatások stripping reakció néven ismertek, de a megnevezést leginkább a deuteronnak az egyéb magokkal való kölcsönhatása esetén szokásos használni. Szerintünk itt is ilyen jelenségről (stripping = lekopaszítás, lenyúzás, levetkőztetés) van szó, a fenti végeredmény azonban csak akkor lehetséges, ha a nitrogén neutronjai egy olyan zárt és geometriailag viszonylag tökéletes formát képeznek, amelyet a nagy energiájú ütközés sem tud szétzilálni. Nem lehet véletlen, hogy a nitrogén neutronmagja a modellek szerint éppen ilyen!

Ez a kísérleti eredmény önmagában is elegendő bizonyíték lehetne arra, hogy a nitrogén atommagjában a neutronok egy zárt tömbben foglalnak helyet, éspedig a mag belsejében. Ha nem így lenne, vagyis ha a nitrogén magja a mai magmodellek szerinti kevert proton + neutronhalmaz lenne, akkor a fenti magreakció egy egészen más végeredményt adna.

A bór két stabil izotópjának egyike 5 neutronnal, a másik pedig 6 neutronnal épül fel. A B-10-es izotóp 5 neutronjának térbeli elrendeződésére leginkább valószínű a 8.3. ábra szerinti 1+3+1 alakzat. Ez hasonlít a nitrogén neutronhalmazára, bár közel sem olyan tökéletes. A természetben mégis előfordul ez a változat 19,61%-os részarányal. Középen, a hatodik gömb megjelenésekor egyrészt mind az öt külső gömb megtámasztása biztosított lesz, másrészt párossá válik a neutrons szám. Ez a B-11 modellje (8.4. ábra), és az izotóp előfordulási részaránya 80,39%-os.



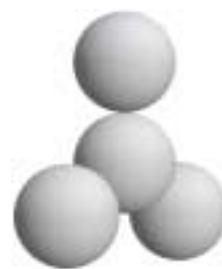
8.3. ábra: Bór-10.



8.4. ábra: Bór-11.



8.5. ábra: Lítium-6.



8.6. ábra: Lítium-7.

A lítium stabilnak mutatkozik 3 és 4 neutronnal is. Az előző, a Li-6-os izotóp 7,4% részarányal, az utóbbi pedig a Li-7-es, 92,6%-kal. A Li-6 három protonja, a mag középpontja felé igyekezve szükségszerűen mindig egy síkban marad, mert az egyensúly csak így állhat fenn. A lítium-6 izotóp 3 neutronja is (8.5. ábra) egy síkban helyezkedik el éppúgy, mint Li-7-es 4 neutronja (8.6. ábra). A 3 neutronból álló halmaz stabilitása, minden valószínűség szerint azért maradhat fenn páratlansága ellenére, mert ez is egy csaknem annyira zárt blokk, mint a nitrogén központi neutronjainak halmaza. A Li-7 izotóp 4 neutronja már nem sérti a neutrons szám páratlanságára vonatkozó ún. 2. feltételt.

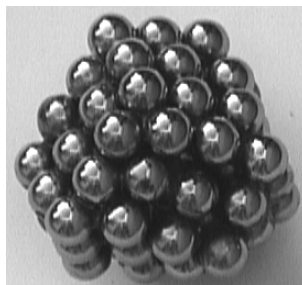
A hidrogén normál esetben egyetlen protonból áll, és ebben bennfoglaltatik minden kivételenség magyarázata. Éppúgy nem beszélhetünk ugyanis a hidrogén esetében neutronok és protonok halmazáról, mint ahogyan nem tudja „közrefogni” a hidrogén egyetlen protonja az esetleg előforduló neutront. A hidrogénatom önmagában egy kivétel az egyetlen protonjával, ezért csak találgatni lehet, hogy miként került a hidrogénatomok 0,0156%-a kapcsolatba azzal a neutronnal, amelyet viszonylag stabilan a maga közelében képes tartani. A protonból és neutronból álló deutérium (nehézhidrogén) ugyanis stabil, bár fenti %-os előfordulása igencsak csekélynek mondható a normál hidrogén mellett. Felépítéséből adódóan kötési energiája olyan kicsi, hogy természetes radioaktív elemek által kibocsátott γ -részecskék is felbomlásra készíthetők. Az első

magfoto-effektust 1934-ben, Chadwick és Goldhaber éppen a deuteron (a deutérium atommagja) a fotonok hatására bekövetkező hasadásának példáján figyelte meg.

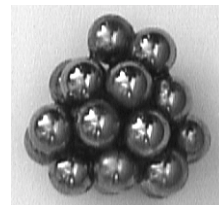
A magreakció: $\gamma + {}^2_1\text{H} \rightarrow n + p$,

azaz, a deuteron felbomlik neutronra és protonra. A kísérletben a radioaktív Tl-208 által kibocsátott 2,62 MeV energiájú γ -kvantumokat használták.

A lantán 138-as izotópjja stabilnak mondható, hiszen felezési ideje $1,1 \times 10^{11}$ év, ami bolygónk korához mérten is jelentős. A La-138 azért nevezhető kivételesnek, mert a neutronszáma páratlan. A periódusos rendszer III. alcsoportjának elemei: Sc, Y, La. Oxidációs számuk egyaránt +3. A III. alcsoport mindhárom elemének modelljét a háromszögű külső forma jellemzi. A szkandium és az ittrium, tulajdonságaikat tekintve átmenetet képeznek az alumínium és a lantán, illetve a lantanoidák között. A lantán-138 modelljének (8.7. ábra) belső magja egy 24 neutronból álló halmaz, éspedig ugyanolyan 3+21-es struktúrával, mint amilyen a szkandium neutronmodellje (8.8. ábra). Meglepő a formai hasonlóság a La-138 és a szkandium neutronmodelljei között. Nehezen lehetne tagadni a közöttük lévő rokonságot. Az elemek periódusos rendszerében egyébként más helyeken is előfordul ilyen feltűnő hasonlóság a táblázat azonos oszlopában lévő elemeknél. A lantán-138 külső neutronhéja – páratlan rendszáma ellenére – kivételesen precíz zárttsággal fogja körül a szkandium modelljével azonos méretű és formájú belső magját. Ezért nem is meglepő, hogy a La-138 a páratlan neutronszáma ellenére kvázistabil.



8.7. ábra
Lantán (La-138).



8.8. ábra
Szkandium (Sc-45).

Egyes neutronszámokkal nem léteznek atommagok a természetben. Ezek a stabil elemek tartományában a 19, 21, 35, 39, 45, 61, 71, 89, 115 és 123-as neutronszámok. Látható, hogy mindegyikük páratlan. Az 1. sz. melléklet segítségével könnyedén kiszámítható, hogy ezeknek a természetben nem található neutronszámú magoknak (*Megj.) a következő elemekhez (izotópokhoz) kellene tartozniuk:

19 neutronnal, a klór ${}^{36}_{17}\text{Cl}$ izotópjához;	61 neutronnal, az ezüst ${}^{108}_{47}\text{Ag}$;
21 neutronnal, a kálium ${}^{40}_{19}\text{K}$;	71 neutronnal, az antimon ${}^{122}_{51}\text{Sb}$;
35 neutronnal, a réz ${}^{64}_{29}\text{Cu}$;	89 neutronnal, az eurórium ${}^{152}_{63}\text{Eu}$;
39 neutronnal, a gallium ${}^{70}_{31}\text{Ga}$;	115 neutronnal, az irídium ${}^{192}_{77}\text{Ir}$;
45 neutronnal, a bróm ${}^{80}_{35}\text{Br}$;	123 neutronnal, a tallium ${}^{204}_{81}\text{Tl}$ radioaktív izotópjához.

Ha megnézzük a páratlan rendszámú elemek neutronmodelljeinek belső magjait tartalmazó 4.1. táblázatot, akkor azonnal érthetővé fog válni stabilitásuknak ill. létezésüknek a hiánya. **Ezek ugyanis a két-két stabil izotóppal rendelkező páratlan rendszámú elemek** (klór, kálium, réz, gallium, bróm, ezüst, antimon, eurórium, irídium és tallium) **stabil izotópjai közé beékelődő radioaktív izotópok. Számítással tehát úgy lehet meghatározni a nem létező neutronszámokat, hogy a kétizotópos páratlan elem rendszámához hozzáadjuk a neutrontöbbletek számtani középértékét.** (Például réz esetén $29+6=35$ adja a kritikus neutronszámot.)

Már a 4. fejezetből is kiderült, hogy ezek az izotópok radioaktívak, de itt most az is látható, hogy a neutronszámuk is „tiltott”. Kizárólag a fenn megjelölt helyeken fordul elő ez a „tiltás”, vagyis a közölt szabály alól nincs kivétel. Ez is aligha véletlen! Mindegyik tiltott neutronszámmal rendelkező izotóp bizonytalan irányú bomlásra hajlamos, azaz egyaránt lehet béta-plusz vagy béta-mínusz sugárzó. Ez éppen annak következménye, hogy pontosan a Segré-táblázat gerincvonalán foglalnak helyet. A neutronmodellek szerint az ún. 2. feltételnek estek áldozatul, mert bár geometriai arányosságuk a lehető legideálisabb, mégis radioaktívak a páratlan protonszámhoz társuló páratlan neutronszám miatt.

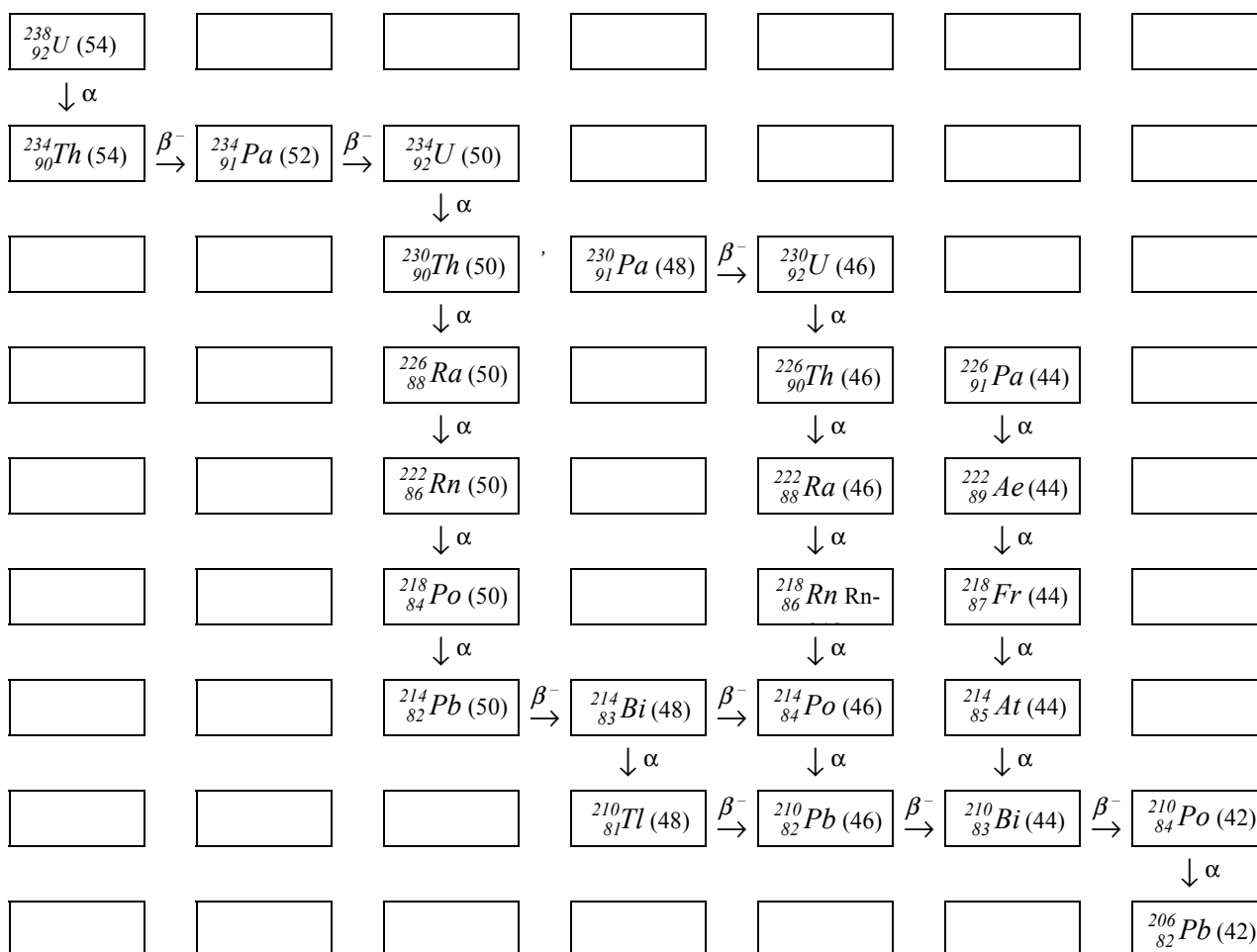
Megj.(*): A kálium ${}^{40}_{19}\text{K}$ izotópjja megtalálható ugyan a természetben, 0.0118%-os előfordulási részaránnal, de ez az izotóp radioaktív. Felezési ideje: 1.3×10^9 év.

9. A RADIOAKTÍV BOMLÁSI SOROK

A természetes radioaktivitást az urán-235, az urán-238, valamint a tórium-232 okozzák. Mindhárom izotóp felezési ideje milliárd éves nagyságrendű. A radioaktív bomlási sorozatok az egymással genetikus kapcsolatban levő radioaktív elemek sorai, melyeket a kiindulási elemekről, az ún. anyaelemekről nevezték el. A bomlási sorok közül a fenti három előfordul a természetben is, a negyedik sor kiinduló eleme, a neptúnium-237, viszont csak mesterségesen állítható elő. A négy bomlási sort az anyaelemmel, az A tömegszámmal és a végmaggal szokás megadni:

	Anyaelem	Végmag	Tömegszám	
1./	U-238	Pb-206	$A=4n+2$	urán-rádium sor
2./	U-235	Pb-207	$A=4n+3$	urán-aktínium sor
3./	Th-232	Pb-208	$A=4n+0$	tórium sor
4./	Np-237	Bi-209	$A=4n+1$	neptúnium sor

A kiindulási elemtől a végmagig alfa- és bétamínusz-átalakulások sorozatával jutnak el az atommagok a bomlás során. Néhol több lehetséges „elérési útvonal” is kínálkozik a végmag felé, és a sorozatoknak mellékágaik is vannak. Ezek, továbbá a bomlási sorokra vonatkozó egyéb ismeretek a fizikakönyvekben megtalálhatók. Az alábbiakban csak a modellezésnél tapasztaltakat részletezzük, éspedig az urán-rádium bomlási sor példáján keresztül. A 9.1. ábrán az urán-rádium bomlási sor tagjainak jele utáni zárójelben megadott szám az adott atommag neutrontöbbletét mutatja, amely a modellek elemzésénél különös jelentőséggel bír.



9.1. ábra

Az urán-rádium bomlási sor.

A 9.1. ábrán a jobb felé haladó **vízszintes lépések**, a **béta-mínusz** bomlásokat mutatják, amelyeknél a tömegszám változatlan marad, a rendszám viszont növekszik. A **függőleges lépések** az **alfa-bomlásokat** jelzik, lefelé haladva négyesével csökkenő tömegszámmal, és kettesével csökkenő rendszámmal. Ez a bom-

lások következményének a klasszikus értelmezés szerinti megközelítése. A modellekhez kapcsolódó értelmezést a 6. fejezetben adtuk meg úgy az alfa-bomlásra, mint a kétféle béta-átalakulásra.

A neutronmodellek a bomlási sorok egyes lépéseinél végbemenő átalakulásokat úgy mutatják, hogy:

- a béta-mínusz bomlásoknál, a kiinduló izotópot (jobb felé haladva) egy olyan izotóp követi, amelynek belső magja kettővel kisebb, külső neutronhéja viszont eggyel nagyobb. A hiányzó egy neutron, kipréselődött a neutronhalmazt körülvevő protonhéja és átalakult protonná.
- az alfa-bomlásoknál (függőlegesen haladva) a következő izotóp magja változatlan, külső héja viszont két neutronnal kevesebbet tartalmaz. A hiányzó 2 neutron ugyanis eltávozott a lehasadt alfa-részecskével.

Hétköznapi szóhasználatlalt:

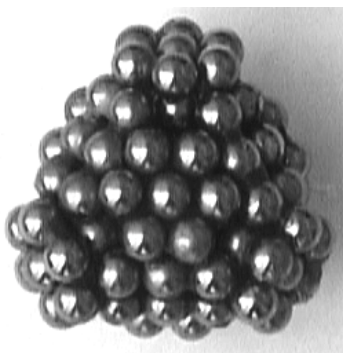
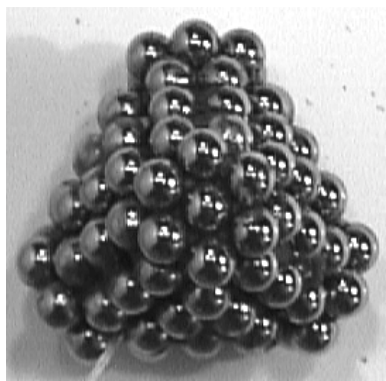
- a béta-mínusz bomlási lépcsőknél a neutronfelesleg a belső neutronmagból távozik. A párosan távozó neutronok egyike a neutronhéjba nyomul, a másik pedig a protonhéjba.
- az alfa-bomlásoknál a változatlan belső magot körülvevő neutronburok szűkül az alfa-részecske alkotórészeként kirepülő két neutron miatt.

Bizonyára nehéz elképzelni az alfa-bomlások sorozatánál azt, hogy a változatlan belső magot körülvevő egyre csökkenő héj hogyan tud öt lépcsőben megfelelni a zártság követelményének. Magyarázat helyett mutassák ezt meg az U-234 – Pb-214 közötti függőleges bomlási ág modelljeinek fotói. Megjegyzés: nevezett modellek mindegyike határozottan tetraéderes jellegű. Az egyik fotósorozat a tetraéder csúcsa felőli nézetet mutatja, a másik felvételsorozat pedig az oldallap felől készült.

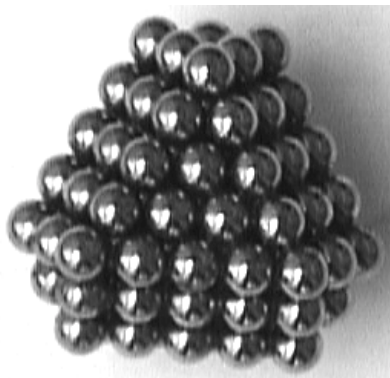
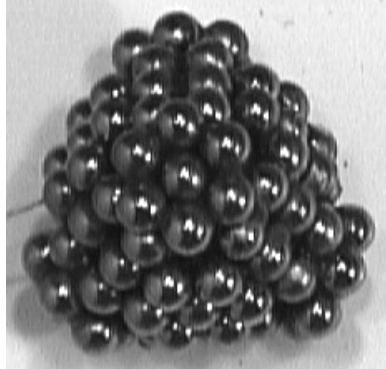
A 9.2.-9.7. ábrásorozat az urán-rádium bomlási sor egyik függőleges ágának elemeit mutatja be.

Csúcs felőli nézet.

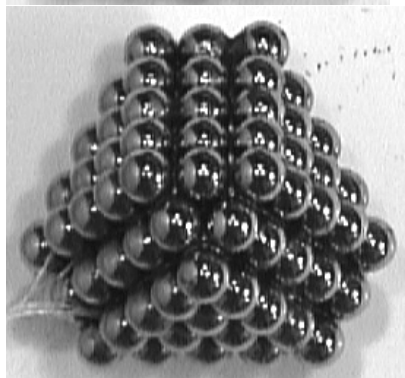
Oldallap felőli nézet.



9.2. ábra

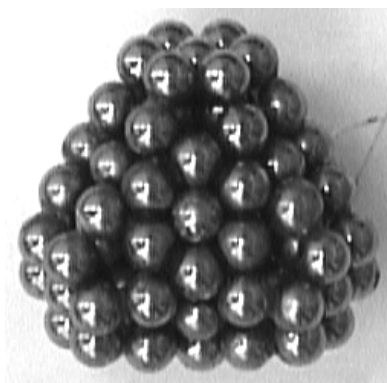
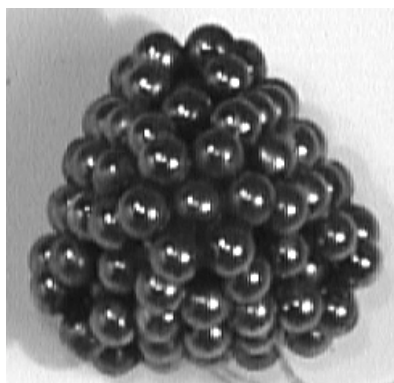


9.3. ábra

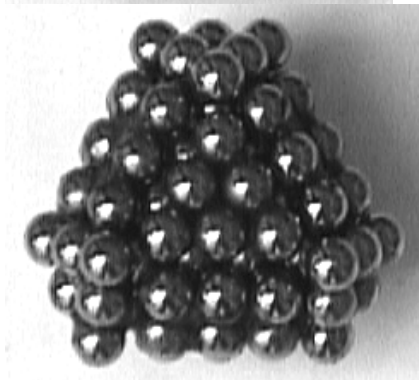
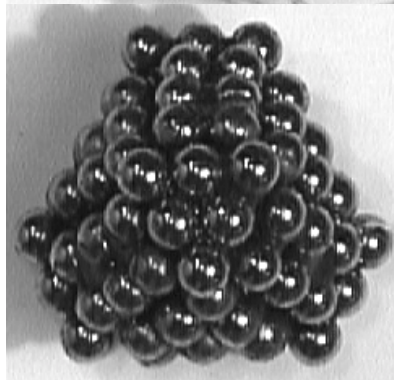


9.4. ábra

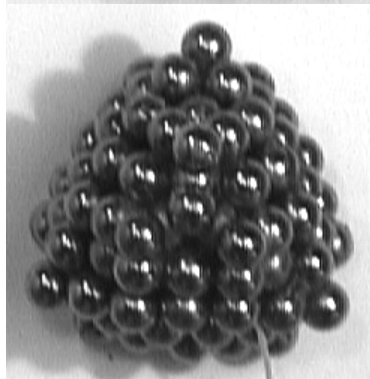




9.5. ábra



9.6. ábra



9.7. ábra



A fotókon látható, hogy az első négy átalakulás után a modellek felszíne még megőrizte zárttságát, azaz a felszín gömbjei még érintkeztek, az ötödik alfa-bomlás után keletkezett Pb-214 modelljén azonban már látszanak a belső mag viszonylagosan nagy méretének jelei, éspedig a neutronháj fellazultságának formájában. A modellek alapján valószínűsíthető, hogy az egyensúlyra való törekvés következő lépcsője nem egy ismételt alfa-bomlás lesz, hanem a belső neutronmag méretét csökkentő béta-mínusz átalakulás fog következni. Mindez azt bizonyítja, hogy a magátalakulásoknak a modellek által szemléltetett lefolyása tökéletes összhangban van az idevonatkozó magfizikai kísérleti eredményekkel és tapasztalásokkal.

UTÓSZÓ

Több száz modell készült el ragasztott kivitelben mintegy 40.000 darab acélgolyó felhasználásával. Legalább ugyanilyen mennyiségű további modell készült mágnes térben összetartott acélgolyókkal is. Ezeknek a szétszedhető kivitelű modelleknek az alkatrészeit újra felhasználtuk a modellek adatainak és formai jegyeinek regisztrálása után. Az ilyen ideiglenes összeállítású változatok az elkészítendő modellek nagy száma miatt voltak szükségesek.

A modellezés elsődleges célja az atommagok stabilitási jegyeinek megállapítása volt, ezért a modellek elsősorban a stabil izotópokról készültek el. A stabil izotópok tartományánál azonban lényegesen szélesebb a radioaktív izotópoké, ezért az összes ismert izotópot magában foglaló modellszéria elkészítése nem egyszerű. Tovább növeli az el nem készült modellek arányát annak felismerése is, hogy a neutronmodellek nagy

részének több változata létezik, másként fogalmazva: több geometriai megoldása van. Ezáltal egy teljesen ismeretlen területre tévedve, eleinte nehéz volt mit kezdeni a geometriai variánsokkal.

Részben megnyugtató volt, hogy a magfizika tudománya is átélte már egy ilyen meglepetést az izoméria felfedezésekor. A magizoméria jelenségének lényege abban áll, hogy egyes magok gerjesztett állapotból az alapállapotba visszatérve a stabilitást tekintve másként viselkednek, mint a gerjesztetlen magok. Ugyanolyan mag nagyságrendekkel eltérő felezési időt mutathat az alapállapothoz képest a gerjesztett állapotból visszatérve.

Meggyőződésünk, hogy nemcsak egy távoli analógiáról van szó a több geometriai változatban előforduló modellek és az izomer magok között, hanem annál sokkal többről. Egy erre vonatkozó kijelentés azonban nem lenne hiteles a létező összes modellvariáns tényleges összeállítását és kiértékelését megelőzően.

Az elkészült több száz modell további kutatási témákat is kínált a magfizika legkülönbözőbb területéről. Elképzelhető lett volna még néhány fejezet összeállítása. A modellek korlátozott száma azonban nem volt elegendő az esetleg levonható következtetésekhez, vagyis a csak részben megfogalmazott kijelentések megalapozottsága még nem volt biztosított. Több félkész fejezet vár kidolgozásra: többek között a nemesgázok modelljeinek közös jellemzőiről, a mágikus számokról, a periódusos rendszerben egymás alatt álló elemek modelljeinek formai hasonlóságáról, a többféle módosulatban előforduló elemek modelljeinél észlelt különlegességekről... stb.

Teljesen kimaradt a rendkívül érdekesnek ígérkező ferromágnesesség témája is annak ellenére, hogy a modellek szinte tálcán kínálják a megoldást a ferromágnesség okozati magyarázatához. A neutronmodellek ugyanis jól láttatják, hogy a valódi ferromágnességet felmutató elemek (vas, kobalt, nikkel) stabil izotópjainak modelljei mintegy bennfoglaltatnak azoknak az elemeknek a modelljeiben, melyekből újabban szupererős állandó (remanens) mágneseket készítenek. Ezek a ritkaföldfémek páros elemei, élükön a neodímiummal, samáriummal, gadolíniummal és a diszpróziummal.

Akik már kapcsolatba kerültek ezekkel a ritkaföldfém mágnesekkel, és tapasztalták ezeknek a rendkívüli mágneses térerősségét, azok tudják, hogy mekkora jelentősége lenne e téma legbelső rejtjelmeit ismerni. A téma feldolgozását azonban felfüggesztettük mindaddig, míg a megfelelő következtetések levonására alkalmas kísérleteket el nem végeztük. Ugyanez vonatkozik a fent említett, valamint a fent szándékosan nem említett további témákra is.

I. MELLÉKLET — Stabil izotópok táblázata (a neutronszámokkal)

Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbbség (A-2Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
1	<i>Hidrogén</i>	H	1	-1	0	99,984
		H	2	0	1	0,016
2	<i>Hélium</i>	He	3	-1	1	0,000
		He	4	0	2	100,000
3	<i>Lítium</i>	Li	6	0	3	7,400
		Li	7	1	4	92,600
4	<i>Berillium</i>	Be	9	1	5	100,000
5	<i>Bór</i>	B	10	0	5	19,610
		B	11	1	6	80,390
6	<i>Szén</i>	C	12	0	6	98,900
		C	13	1	7	1,100
7	<i>Nitrogén</i>	N	14	0	7	99,630
		N	15	1	8	0,370
8	<i>Oxigén</i>	O	16	0	8	99,757
		O	17	1	9	0,039
		O	18	2	10	0,204
9	<i>Fluor</i>	F	19	1	10	100,000
10	<i>Neon</i>	Ne	20	0	10	90,920
		Ne	21	1	11	0,257
		Ne	22	2	12	8,820
11	<i>Nátrium</i>	Na	23	1	12	100,000
12	<i>Magnézium</i>	Mg	24	0	12	78,700
		Mg	25	1	13	10,130
		Mg	26	2	14	11,170
13	<i>Alumínium</i>	Al	27	1	14	100,000
14	<i>Szilícium</i>	Si	28	0	14	92,200
		Si	29	1	15	4,700
		Si	30	2	16	3,100
15	<i>Foszfor</i>	P	31	1	16	100,000
16	<i>Kén</i>	S	32	0	16	95,000
		S	33	1	17	0,760
		S	34	2	18	4,220
		S	36	4	20	0,014
17	<i>Klór</i>	Cl	35	1	18	75,400
		Cl	37	3	20	24,600
18	<i>Argon</i>	Ar	36	0	18	0,337
		Ar	38	2	20	0,063
		Ar	40	4	22	99,600
19	<i>Kálium</i>	K	39	1	20	93,100
		K	41	3	22	6,880
20	<i>Kalcium</i>	Ca	40	0	20	96,970
		Ca	42	2	22	0,640
		Ca	43	3	23	0,145
		Ca	44	4	24	2,060
		Ca	46	6	26	0,000
		Ca	48	8	28	0,185

Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbbség (A-2Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
21	<i>Szkandium</i>	Sc	45	3	24	100,000
22	<i>Titán</i>	Ti	46	2	24	7,930
		Ti	47	3	25	7,280
		Ti	48	4	26	73,940
		Ti	49	5	27	5,510
		Ti	50	6	28	5,340
23	<i>Vanádium</i>	V	50	4	27	0,240
		V	51	5	28	99,760
24	<i>Króm</i>	Cr	50	2	26	4,310
		Cr	52	4	28	83,760
		Cr	53	5	29	9,550
		Cr	54	6	30	2,380
25	<i>Mangán</i>	Mn	55	5	30	100,000
26	<i>Vas</i>	Fe	54	2	28	5,820
		Fe	56	4	30	91,660
		Fe	57	5	31	2,190
		Fe	58	6	32	0,380
27	<i>Kobalt</i>	Co	59	5	32	100,000
28	<i>Nikkel</i>	Ni	58	2	30	67,880
		Ni	60	4	32	26,230
		Ni	61	5	33	1,190
		Ni	62	6	34	3,660
		Ni	64	8	36	1,080
29	<i>Réz</i>	Cu	63	5	34	69,090
		Cu	65	7	36	30,910
30	<i>Cink</i>	Zn	64	4	34	48,890
		Zn	66	6	36	27,810
		Zn	67	7	37	4,110
		Zn	68	8	38	18,570
		Zn	70	10	40	0,620
31	<i>Gallium</i>	Ga	69	7	38	60,400
		Ga	71	9	40	39,600
32	<i>Germánium</i>	Ge	70	6	38	20,520
		Ge	72	8	40	27,430
		Ge	73	9	41	7,760
		Ge	74	10	42	36,540
		Ge	76	12	44	7,760
33	<i>Arzén</i>	As	75	9	42	100,000
34	<i>Szelén</i>	Se	74	6	40	0,870
		Se	76	8	42	9,020
		Se	77	9	43	7,580
		Se	78	10	44	23,520
		Se	80	12	46	49,820
35	<i>Bróm</i>	Br	79	9	44	50,540
		Br	81	11	46	49,460

Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbbség (A-Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
36	Kripton	Kr	78	6	42	0,354
		Kr	80	8	44	2,278
		Kr	82	10	46	11,560
		Kr	83	11	47	11,550
		Kr	84	12	48	56,900
		Kr	86	14	50	17,370
37	Rubídium	Rb	85	11	48	72,150
		Rb	87*	13	50	27,850
38	Stroncium	Sr	84	8	46	0,560
		Sr	86	10	48	9,860
		Sr	87	11	49	7,020
		Sr	88	12	50	82,560
39	Ittrium	Y	89	11	50	100,000
40	Cirkónium	Zr	90	10	50	51,460
		Zr	91	11	51	11,230
		Zr	92	12	52	17,110
		Zr	94	14	54	17,400
		Zr	96	16	56	2,800
41	Nióbium	Nb	93	11	52	100,000
42	Molibdén	Mo	92	8	50	15,840
		Mo	94	10	52	9,040
		Mo	95	11	53	15,720
		Mo	96	12	54	16,530
		Mo	97*	13	55	9,460
		Mo	98	14	56	23,780
43	Technécium	Tc	97	11	54	
		Ru	96	8	52	5,510
		Ru	98	10	54	1,870
		Ru	99	11	55	12,720
		Ru	100	12	56	12,620
		Ru	101	13	57	17,070
44	Ruténium	Ru	102	14	58	31,610
		Ru	104	16	60	18,580
45	Ródiium	Rh	103	13	58	100,000
46	Palládium	Pd	102	10	56	0,960
		Pd	104	12	58	10,970
		Pd	105	13	59	22,230
		Pd	106	14	60	27,330
		Pd	108	16	62	26,710
		Pd	110	18	64	11,810
47	Ezüst	Ag	107	13	60	51,350
		Ag	109	15	62	48,650
48	Kadmium	Cd	106	10	58	1,220
		Cd	108	12	60	0,870
		Cd	110	14	62	12,390
		Cd	111	15	63	12,750
		Cd	112	16	64	24,070
		Cd	113	17	65	12,260
		Cd	114	18	66	28,860
		Cd	116	20	68	7,580

Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbbség (A-Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
49	Indium	In	113	15	64	4,280
		In*	115	17	66	95,720
50	Ón	Sn	112	12	62	0,960
		Sn	114	14	64	0,660
		Sn	115*	15	65	0,350
		Sn	116	16	66	14,300
		Sn	117	17	67	7,610
		Sn	118	18	68	24,030
		Sn	119	19	69	8,580
		Sn	120	20	70	32,850
		Sn	122	22	72	4,720
		Sn	124	24	74	5,940
51	Antimon	Sb	121	19	70	57,250
		Sb	123	21	72	42,750
52	Tellúr	Te	120	16	68	0,089
		Te	122	18	70	2,460
		Te	124	20	72	4,610
		Te	125	21	73	6,990
		Te	126	22	74	18,710
		Te	128	24	76	31,790
		Te	130	26	78	34,480
53	Jód	I	127	21	74	100,000
54	Xenon	Xe	124	16	70	0,096
		Xe	126	18	72	0,090
		Xe	128	20	74	1,919
		Xe	129	21	75	26,440
		Xe	130	22	76	4,080
		Xe	131	23	77	21,180
		Xe	132	24	78	26,890
		Xe	134	26	80	10,440
		Xe	136	28	82	8,870
55	Cézium	Cs	133	23	78	100,000
56	Bárium	Ba	130	18	74	0,101
		Ba	132	20	76	0,097
		Ba	134	22	78	2,420
		Ba	135	23	79	6,590
		Ba	136	24	80	7,810
		Ba	137	25	81	11,320
57	Lantán	Ba	138	26	82	71,660
		La	138	24	81	0,089
58	Cérium	La	139	25	82	99,911
		Ce	136	20	78	0,193
59	Prazeodí-mium	Ce	138	22	80	0,250
		Ce	140	24	82	88,480
		Ce	142	26	84	11,070
59	Prazeodí-mium	Pr	141	23	82	100,000

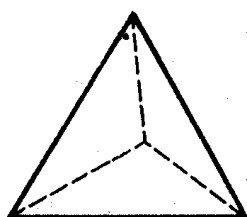
Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbbség (A-Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
60	Neodímium	Nd	142	22	82	27,110
			143	23	83	12,170
			144	24	84	23,850
			145*	25	85	8,300
			146	26	86	17,220
			148	28	88	5,730
			150	30	90	5,620
61	Promécium	Pm*	145	23	84	
62	Szamárrium	Sm	144	20	82	3,090
			147	23	85	14,970
			148	24	86	11,240
			149	25	87	13,830
			150	26	88	7,440
			152	28	90	26,720
			154	30	92	22,710
63	Eurórium	Eu	151	25	88	47,820
			153	27	90	52,180
64	Gadólínium	Gd	152	24	88	0,200
			154	26	90	2,150
			155	27	91	14,730
			156	28	92	20,470
			157	29	93	15,680
			158	30	94	24,870
			160	32	96	21,900
65	Terbium	Tb	159	29	94	100,000
66	Diszprózium	Dy	156	24	90	0,052
			158	26	92	0,090
			160	28	94	2,294
			161	29	95	18,880
			162	30	96	25,530
			163	31	97	24,970
			164	32	98	28,180
67	Holmium	Ho	165	31	98	100,000
68	Erbium	Er	162	26	94	0,136
			164	28	96	1,560
			166	30	98	33,410
			167	31	99	22,940
			168	32	100	27,070
			170	34	102	14,880
69	Túrium	Tu	169	31	100	100,000
70	Itterbium	Yb	168	28	98	0,135
			170	30	100	3,030
			171	31	101	14,340
			172	32	102	21,820
			173	33	103	16,130
			174	34	104	31,840
			176	36	106	12,730
71	Lutécium	Lu	175	33	104	97,410
			176	34	105	2,590

Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbbség (A-Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
72	Hafnium	Hf	174	30	102	0,180
			176	32	104	5,300
			177	33	105	18,500
			178	34	106	27,140
			179	35	107	13,750
			180	36	108	35,240
73	Tantál	Ta	180	34	107	0,012
			181	35	108	99,988
74	Volfrám	W	180	32	106	0,135
			182	34	108	26,410
			183	35	109	14,400
			184	36	110	30,640
			186	38	112	28,410
75	Rénium	Re	185	35	110	37,070
			187*	37	112	62,930
76	Ozmium	Os	184	32	108	0,018
			186	34	110	1,590
			187*	35	111	1,640
			188	36	112	13,300
			189	37	113	16,100
			190	38	114	26,400
			192	40	116	41,000
77	Iridium	Ir	191	37	114	37,300
			193	39	116	62,700
78	Platina	Pt	190	34	112	0,013
			192	36	114	0,780
			194	38	116	32,900
			195	39	117	33,800
			196	40	118	25,300
			198	42	120	7,210
79	Arany	Au	197	39	118	100,000
80	Higany	Hg	196	36	116	0,146
			198	38	118	10,020
			199	39	119	16,840
			200	40	120	23,130
			201	41	121	13,220
			202	42	122	29,800
81	Tallium	Tl	203	41	122	29,500
			205	43	124	70,500
82	Ólom	Pb	204	40	122	1,480
			206	42	124	23,600
			207	43	125	22,600
			208	44	126	52,300
83	Bizmut	Bi	209	43	126	100,000
84	Polónium	Po	210	42	126	
85	Asztácium	At	215	45	130	
			216	46	131	
			218	48	133	
86	Radon	Rn	222	50	136	

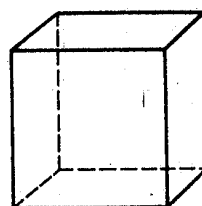
Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutronöb- let (A-2Z)	Összes neu- tron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
87	Francium	Fr	223	49	136	
88	Rádium	Ra	226	50	138	
89	Aktínium	Ac	227	49	138	
90	Tórium	Th	232	52	142	100,000

Rendszám (Z)	Név	Vegyjel	Tömegszám (A)	Neutrontöbblet (A-2Z)	Összes neutron (A-Z)	Előfordulási arány (%)
91	<i>Protaktínium</i>	Pa	231	49	140	100,000
92	<i>Úrán</i>	U	234	50	142	0,006
		U	235	51	143	0,711
		U	238	54	146	99,274

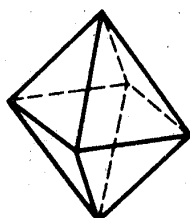
2. MELLÉKLET — Szabályos testek



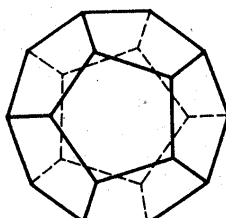
Tetraéder



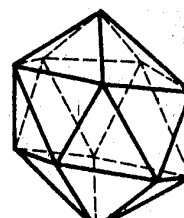
Hexaéder



Oktaéder



Dodekaéder



Ikozaéder

3. MELLÉKLET — Elemek periódusos rendszere

1 H	II.a.																III.a.	IV.a.	V.a.	VI.a.	VII.a.	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne					
11 Na	12 Mg	III.b.	IV.b.	V.b.	VI.b.	VII.b.	VIII.b.			I.b.	II.b.	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar					
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu						
			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn					
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fn	101 Md	102 No	103 Lr						
			104	105	106	107																

4. MELLÉKLET — Atommag táblázat (részlet)

O (8)	13	β^+	S (16)	30	β^+	Ti (22)	43	β^+	Ni (28)	56	K	As (33)	68	β^+	Kr (36)	74	β^+
	14	β^+		31	β^+		44	β^+, K		57	β^+		69	β^+		75	β^+
	15	β^+		32	stabil		45	β^+, K		58	stabil		70	β^+, K		76	K
	16	stabil		33	stabil		46	stabil		59	K		71	β^+, K		77	β^+, K
	17	stabil		34	stabil		47	stabil		60	stabil		72	β^+		78	stabil
	18	stabil		35	β^-		48	stabil		61	stabil		73	K		79	β^+, K
	19	β^-		36	stabil		49	stabil		62	stabil		74	β^+, β^-		80	stabil
	20	β^-		37	β^-		50	stabil		63	β^-		75	stabil		81	K
F (9)	17	β^+	Cl (17)	38	β^-	V (23)	51	β^-	Cu (29)	64	stabil	Se (34)	76	β^-, K	Rb (37)	82	stabil
	18	β^+		32	β^+		47	β^+		58	β^+		70	β^+		83	stabil
	19	stabil		33	β^+		48	β^+, K		59	β^+		71	β^+		84	stabil
	20	β^-		34	β^+		49	K		60	β^+		72	K		85	β^-
Ne (10)	21	β^-		35	stabil		50	stabil		61	β^+		73	β^+, K		86	stabil
	22	β^-		36	β^-, K		51	stabil		62	β^+		74	β^+, K		87	β^-
	23	β^-		37	stabil		52	β^-		63	stabil		75	K		88	β^-
	24	β^-		38	β^-		53	β^-		64	β^+, β^-, K		76	stabil		89	β^-
Na (11)	20	β^+	Ar (18)	39	β^-	Cr (24)	54	β^-	Zn (30)	65	stabil	Br (35)	77	stabil		90	β^-
	21	β^+		40	stabil		46	β^+		66	β^-		78	stabil		91	β^-
	22	β^+		41	β^-		48	K		67	β^-		79	β^-		92	β^-
	23	stabil		42	β^-		49	β^+		68	β^-		80	stabil		93	β^-
Mg (12)	24	β^-		43	β^-		50	stabil		69	β^-		81	β^-		94	β^-
	25	β^-		44	β^-		51	K		70	stabil		82	stabil		95	β^-
	26	stabil		45	β^-		52	stabil		71	β^-		83	β^-			
	27	β^-		46	β^-		53	stabil		72	β^-		84	β^-			
Al (13)	28	β^-	K (19)	47	β^-	Mn (25)	54	K	Ga (31)	69	β^-		85	β^-			
	24	β^+, α		48	stabil		55	stabil		70	stabil		86	β^-			
	25	β^+		49	β^-		56	β^-		71	β^-		74	β^+			
	26	β^+		50	β^+		57	β^-		72	β^-		75	β^+, K			
Si (14)	27	stabil		51	β^+		58	β^-		73	β^-		76	β^+			
	28	β^-		52	β^+, K		59	β^-		74	β^-		77	β^+, K			
	29	β^-		53	K		60	β^-		75	β^-		78	β^+			
	30	β^-		54	K		61	β^-		76	β^-		79	stabil			
P (15)	31	β^-	Ca (20)	55	stabil	Fe (26)	62	β^-	Ge (32)	77	stabil		80	β^+, β^-			
	32	β^-		56	β^-		63	β^-		78	stabil		81	stabil			
	33	β^-		57	β^-		64	β^-		79	stabil		82	β^-			
	34	β^-		58	β^-		65	β^+		80	β^+, β^-		83	β^-			
				59	stabil		66	β^+		81	stabil		84	β^-			
				60	β^-		67	K		82	stabil		85	β^-			
				61	β^-		68	β^+		83	β^-		86	β^-			
				62	β^-		69	stabil		84	β^-		87	β^-			
			Sc (21)	63	β^-	Co (27)	70	β^-		85	β^-		88	β^-			
				64	β^-		71	stabil		86	β^-		89	β^-			
				65	β^+, K		72	stabil		87	β^-		90	β^-			
				66	K		73	stabil		88	β^-		91	β^-			
				67	β^+, K		74	stabil		89	β^-		92	β^-			
				68	stabil		75	β^-		90	β^-		93	β^-			
				69	stabil		76	β^-					94	β^-			
				70	stabil		77	β^-					95	β^-			

