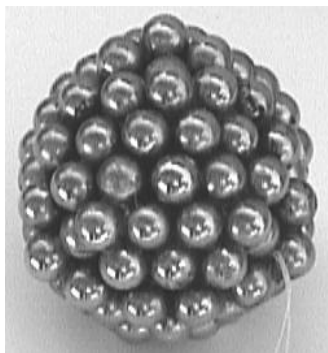


4. rész.

A modellezések alapján bizonyossá vált, hogy a plutónium-239 belső magja is egy ugyanolyan felépítésű 51-es neutronhalmaz, mint az urán-235 izotópé. (A 7.4 és a 7.5. ábrákon látható ez a belső mag.)

Minden bizonnyal ebből következik az U-235 és a Pu-239 hasadási tulajdonságainak hasonlósága is.



7.27. ábra

A plutónium-239 modellje.

## 8. Kivételes neutronszerű 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 neutronfelesleg, 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 neutronszerűségek 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 neutronszerű, jóllehet minden más páros rendszámú elemnél a páros neutronszerű a domináns. A 18-as rendszám alatti összes többi páros elem (hélium, szén, oxigén, magnézium, szilícium és kén) leggyakoribb izotópjainál a protonszám és a neutronszerű azonos. Ezek 90,9-99,9% közötti előfordulási részaránnyal szerepelnek az adott elemnél.

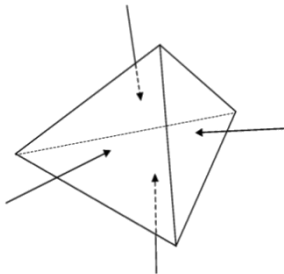
A berilliumtól is elvárható lenne tehát, hogy stabil legyen egy vagy több páros neutronszerű izotópja, és ezek között legelső sorban a neutronfelesleg nélküli, vagyis a 4 neutronnal és 4 protonnal rendelkező 8-as tömegszámú izotóp.

A Be-8 azonban mégsem stabil. Miért nem stabil tehát a Be-8, és miért stabil ezzel szemben a páratlan neutronszerű 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 neutronszerű és a protonszám azonosságára, vagyis a neutrontöbblet hiányára, hiszen nem fér bele két további neutron a 18 alatti neutronhéjakra.

Belekényszeríthetnek ugyan rendkívüli körülmények a mag közepébe még két neutront, hiszen közismert ezen neutrontöbbletes 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 neutronfelesleg nélküli, vagyis az azonos proton- és neutronszerű 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, és pedig a középponton átmenő tengely folytatásában. Kivétel a páros osztásoknál: a tér 4 részre osztásának esete, mert itt a vizsgált térréssel szemben lévő oldalon nem a saját tükörképe foglal helyet, hanem a másik három térrész találkozási pontja. A 4-es (tetraéderez) térbeli szimmetriánál tehát a térrészek középvonalai, tengelyei módosulnak féltengelyekké. A féltengelyek jól szemléltethetők a tetraéder lapközepeiből befelé mutató félegyenesekkel (8.1. ábra.).



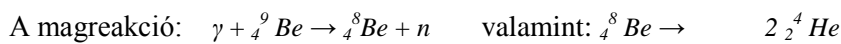
8.1. ábra  
A tetraéder féltengelyei.

A (a többlet neutron miatt) kivételt képviselő berillium 4 protonja igyekszik az alatta lévő 1-1 neutront a mag középpontja felé nyomni, éspedig 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. Így kialakul 2-2 egymásra támaszkodó proton-neutron párosból egy-egy független egység (alfa-részecske), és ezek függetlenednek egymástól.

A nem egy vonalba eső erők esetében tehát 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 hélium-atomra), 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, amelynél 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 kilökni onnan. A természetes radioaktív elemek által kibocsátott  $\gamma$ -kvantumok hatása is elegendő a Be-9 mag hasításához. Megfigyelt magreakció, miszerint a RaC'  $\gamma$ -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.



Ennek a megjegyzésnek a fontossága akkor válik igazán érdekessé, ha folytatjuk azzal, hogy a berilliumon kívül csak a deuteron (a deutérium ionja:  ${}_1^2\text{H}$ ) hasítható a természetes radioaktív elemek által kibocsátott  $\gamma$ -kvantumok viszonylag alacsony energiájával. Az összes többi magnál a nukleon leválasztásához szükséges nagyobb energiát csak mesterségesen előállított  $\gamma$ -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 nitrogénél azonban az N-14-es izotóp gyakorisága vezet 99,63%-os részaránnyal, 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.

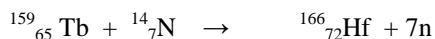
A nitrogén esetében, a 7 neutronból álló neutronhalmaz, az egy övben, gyűrűként elhelyezkedő 5 gömb közepén kétoldalt elhelyezkedő 1-1 gömb (8.2. ábra), egy igazán hibátlan alakzatot eredményez. Ez a modellje a stabil N-14-es nitrogén-izotópnak. Az N-14 az miatt kivételes, hogy páratlan neutronszáma 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 neutron párossá tevő nyolcadik neutronja jelen? A válasz a modellek alapján kézenfekvő: azért, mert geometriai méreteinél fogva nem fér el. Ha mégis belekényszeríti valamilyen erő közepre a nyolcadik neutron, akkor az elrontja a 7-es alakzat hibátlanságát. Bár a mérések szerint az így keletkezett páros neutronsámú N-15-ös izotóp is stabil, de előfordulási részaránya csak 0,37 %-os.



8.2. ábra. A nitrogén (N-14) neutron-modellje

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:



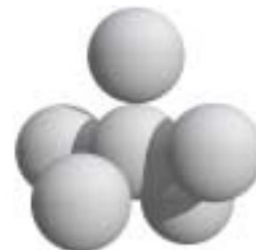
A 100 MeV feletti bombázó energiával végrehajtott magreakció szerint a nitrogén belövése a terbiumba azt eredményezi, hogy a protonok a terbiumban maradván megnövelik annak rendszámát, miáltal hafnium keletkezik. Megfigyelték továbbá 7 neutron kibocsátását, és ez utóbbi rendkívül figyelemreméltó. Hogyan 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 izotópjá?

A neutronmodell alapján nagyon könnyű megválaszolni a kérdést: a nagy energiájú ütközés következtében, a terbiium mintegy lekopasztotta 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 = lekopasztás, 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 nitrogénatom magja a ma ismert magmodellek szerinti kevert nukleonhalmaz 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 neutronszám. Ez a B-11 modellje (8.4. ábra). A B-11 izotóp előfordulási részaránya 80,39%-os.

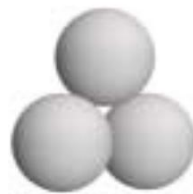


8.3. ábra: Bór-10.

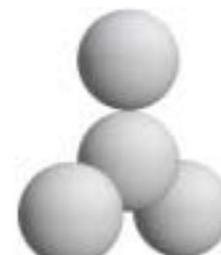


8.4. ábra: Bór-11.

**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 a 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 neutronszám páratlanságára vonatkozó ú. n. 2. feltételt.



8.5. ábra: Lítium-6.

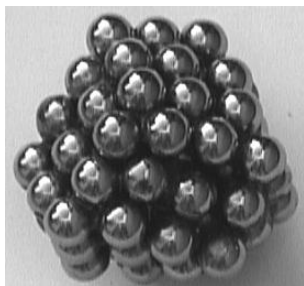


8.6. ábra: Lítium-7.

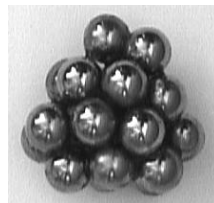
**A hidrogén** normál esetben egyetlen protonból áll, és ebben bennfoglaltatik minden kivétel magyarázata. Éppúgy nem beszélhetünk ugyanis a hidrogén esetében neutronok és protonok halmazáról, mint ahogyan nem tudja „közrefogni” a hidrogén egyetlen protonja az esetleg előforduló neutron. A hidrogénatom önmagában egy kivétel az egyetlen protonjával, ezért csak találgatni lehet, hogy miként került a hidrogén-atomok 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  $\gamma$ -részek 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 kísérletben a radioaktív Tl-208 által kibocsátott 2,62 MeV energiájú  $\gamma$ -kvantumokat használta.

A magreakció:  $\gamma + {}^2_1\text{H} \rightarrow n + p$ , azaz, a deuteron felbomlik neutronra és protonra.

A neutronmodell jóslata szerint stabil kétszer páratlan magok nem létezhetnek. A Segré-térképen ennek ellenére kettőt is találunk, igaz rendkívül kis gyakoriságúakat, ám alaposabb vizsgálatuk megmutatja, hogy a modellnek alapvetően igaza van. Amit  $^{180}\text{Ta}$ -ként ismerünk, az nem a mag alapállapota, ami 8 órás felezési idővel elbomlik, hanem a második gerjesztett állapota, egy legalább  $7 \cdot 10^{15}$  év felezési idejű, ún. izomerállapot ( $^{180}\text{Ta}^m$ ). Ez azért képtelen a szokványos fotonkibocsátás mellett az alapállapot (pontosabban az első gerjesztett állapot) felé bomlani, mert 7 egység spin különbség van közöttük, azaz az átmenet nagyon erősen tiltott, és az energiakülönbség is csekély.



8.7. ábra  
Lantán (La-138)



8.8. ábra  
Szkandium (Sc-45)

A La-138 sem stabil:  $1,1 \times 10^{11}$  év felezési idővel a szomszédos kétszer páros magok felé bomlik. A Világegyetem eddigi élettartamával összevethető felezési idő oka hasonló, mint a  $^{180}\text{Ta}^m$  esetében: nagy – itt 5 egység – a spin- és csekély az energiakülönbség a kiinduló és a végmag között.

A lantán La-138-as izotópjá azért nevezhető kivételesnek a létezése ellenére, 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 a páratlan rendszáma ellenére kivételesen precíz zártsággal fogja körül a szkandium modelljével azonos méretű és formájú belső magját. Ezért nem is meglepő, hogy a La-138 a páratlan neutronszáma ellenére csaknem stabil.

**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 a következő elemek nevezett izotópjaihoz 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 európium $^{152}_{63}\text{Eu}$ ;
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.

Megjegyzés(\*): A kálium  $^{40}_{19}\text{K}$  izotópjá megtalálható ugyan a természetben, 0.0118%-os előfordulási részarányal, de ez az izotóp radioaktív. Felezési ideje:  $1,3 \times 10^9$  év.

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, európium, 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-minusz 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.