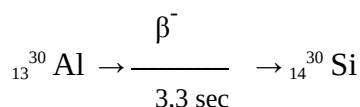


### 3. rész.

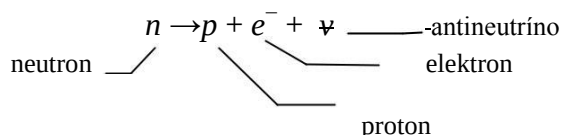
#### 5.1. A negatív béta-bomlás

A negatív béta-bomlás ( $\beta^-$ -bomlás) az a folyamat, amikor egy instabil mag önmagától átalakul 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 alumínium Al-30 tartalmaz 17 neutront +13 protont, a szilícium Si-30 pedig tartalmaz 16 neutront +14 protont.

A  $\beta^-$ -bomlás tehát 1 neutronnak protonná való átalakulásában nyilvánul meg, mégpedig egy elektron keletkezése közben.



Megjegyzendő, hogy ez 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 plusz elektron össztömege. A tömegdifferencia energia formájában távozik.

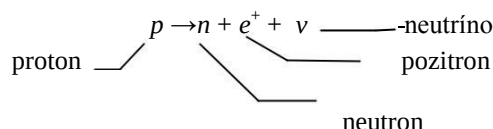
A „melléktermékként” keletkezett antineutrínó ( $\bar{\nu}$ ) töltése 0, tömege mérhetetlenül kicsi, becslések szerint az elektrontömeg egy ezreléke alatti. Nincs mágneses momentuma, viszont a spinje feles ( $1/2$  D). Létezésére egyébként a felfedezése előtt éppen az átalakult mag spinjének látszólagos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

A kimutatásuk utólag igen nehezen, de sikerült.

#### 5.2. A pozitív béta-bomlás

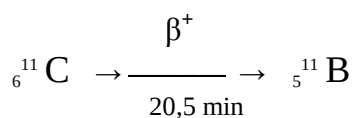
A pozitív béta-bomlás ( $\beta^+$ -bomlás) az a folyamat, amikor egy instabil mag önmagától átalakul egy eggyel kisebb rendszámú magba. A bomlásnak (átalakulásnak) két formája ismeretes:

A  $\beta^+$ -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.

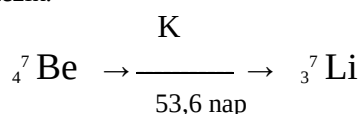
A pozitív  $\beta$ -bomlásra jó példa a 6-os rendszámú szén C-11 izotópjának a  $\beta^+$ -bomlása, amelyet pozitív elektron, azaz pozitron kibocsátása kísér. A szénmagban tehát egy proton átalakul neutronná a kilökődő pozitron megsemmisíti az egyik elektront, és bór B-11 izotóp keletkezik, változatlan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



A szén C-11 tartalmaz 5 neutront és 6 protont, a bór B-11 pedig tartalmaz 6 neutront és 5 protont.

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 izotópja, amely K-elektron befogásával átalakul 3-as rendszámú lítiummá, azaz Li-7 mag keletkezik.



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

Az eredmény a szűkebb értelemben vett  $\beta^+$ -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 találkozásokor kölcsönös megsemmisüléssel (annihiláció), vagy pedig az „elektronbefogás” által.

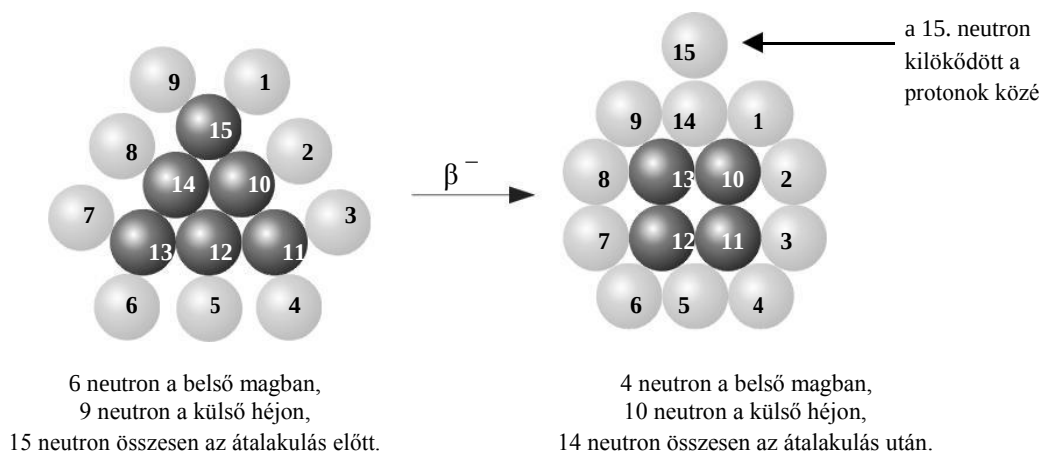
Ezek a mai modern fizika kísérleti eredményei, de az ezekre épített elméletek az átalakulások tényleges okaira vonatkozó magyarázattal nem szolgálnak. Az elkészült modellek viszont a problémát a maga végtelen egyszerűségében láttatják. Azonnal szembetűnik ugyanis a modellek belső magját körülvevő héj 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  $\beta^-$  vagy pedig  $\beta^+$ -átalakulás fog-e bekövetkezni.

A modellek elsődleges osztályozása éppen az szerint 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 belső 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  $\beta^-$ -instabil izotópoknak a modelljei, a torlódott, felgyűrődött felszínű halmazok pedig a  $\beta^+$ -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  $\beta^-$ -bomlással, illetve  $\beta^+$ -átalakulással. A legérdekesebb a  $\beta^-$ -átalakulásoknál az, hogy mindig 2 neutronnal változik a belső neutronmag mérete.

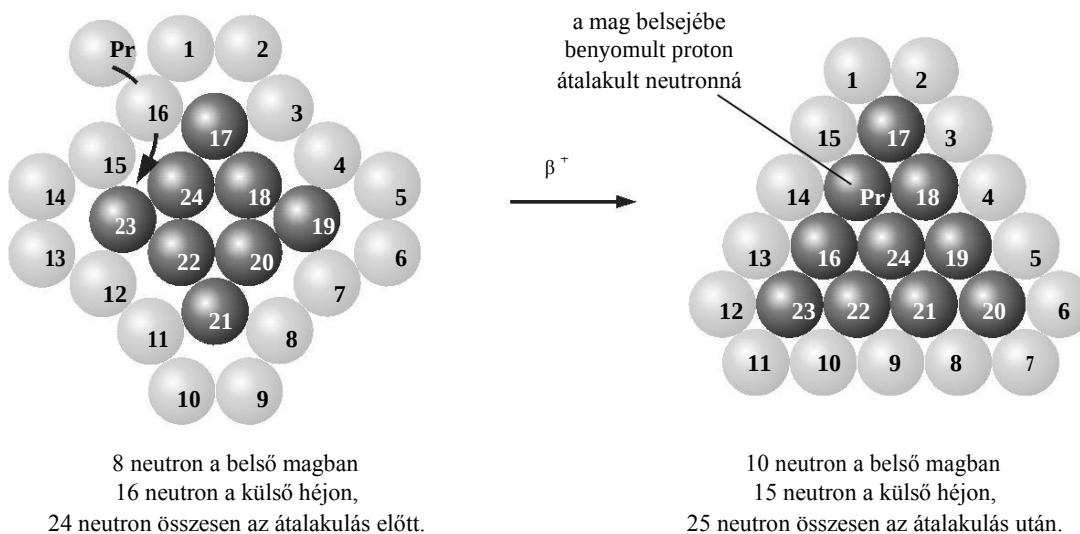
A  $\beta^-$ -bomlásnál a belső neutronmagból kilökődik 2 neutron, és ezek egyike a külső neutronhéjban állapotodik meg, a másik pedig a protonhéjban, miközben átalakul protonná. A 5.1. ábra szerinti síkbeli ábrázolás ezt próbálja szemléltetni, bár nem tudja valóságghűen visszaadni a térbeli halmazok átalakulását.



5.1. ábra

A  $\beta^-$ -átalakulás síkbeli ábrázolása.

A  $\beta^+$ -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 neutron-mag így két nukleonnal nagyobb lett, a külső neutronhéj és a protonhéj pedig egy-egy nukleonnal csökkent.



5.2. ábra

A  $\beta^+$ -átalakulás síkbeli ábrázolása.

A **4. sz. mellékletben** az izotóptáblázat egy részlete látható az egyes izotópok sugárzási típusának feltüntetésével.

Az izotóptáblázatból az tűnik ki, hogy egy-egy elem stabil izotópjait körülvevő instabil izotópok közül a kisebb tömegszámúak a  $\beta^+$ -sugárzók, a nagyobbak pedig a  $\beta^-$ -sugárzók.

Az izotópcsoport közepe táján bizonytalanság mutatkozik a hovatartozást illetően, ezért is volt nehéz korábban – megfelelő elmélet hiányában – a szabályszerűséget megtalálni. Ha azonban az elemzést az adatok megfelelő szelektálásával végezzük, akkor előtűnik a szabályszerűség és bebizonyosodik az előző fejezetekben tett megállapítások igazsága.

Négy mintapélda kapcsán mutatjuk be az izotópcsoportok jellegzetes elhelyezkedéseit.

| Foszfor<br>Z = 15 | Réz<br>Z = 29                   | Neon<br>Z = 10  | Nikkel<br>Z = 28 |
|-------------------|---------------------------------|-----------------|------------------|
|                   | Cu-58 $\beta^+$                 |                 |                  |
|                   | Cu-59 $\beta^+$                 |                 | Ni-56 K          |
|                   | Cu-60 $\beta^+$                 |                 | Ni-57 $\beta^+$  |
| P-28 $\beta^+$    | Cu-61 $\beta^+$                 | Ne-18 $\beta^+$ | Ni-58 stabil     |
| P-29 $\beta^+$    | Cu-62 $\beta^+$                 | Ne-19 $\beta^+$ | Ni-59 K          |
| P-30 $\beta^+$    | Cu-63 stabil                    | Ne-20 stabil    | Ni-60 stabil     |
| P-31 stabil       | Cu-64 $\beta^-$ , $\beta^+$ , K | Ne-21 stabil    | Ni-61 stabil     |
| P-32 $\beta^-$    | Cu-65 stabil                    | Ne-22 stabil    | Ni-62 stabil     |
| P-33 $\beta^-$    | Cu-66 $\beta^-$                 | Ne-23 $\beta^-$ | Ni-63 $\beta^-$  |
| P-34 $\beta^-$    | Cu-67 $\beta^-$                 | Ne-24 $\beta^-$ | Ni-64 stabil     |
|                   | Cu-68 $\beta^-$                 |                 | Ni-65 $\beta^-$  |
|                   |                                 |                 | Ni-66 $\beta^-$  |

5.3. ábra

5.4. ábra

5.5. ábra

5.6. ábra

Mintapéldák az izotópcsoportok tipikus elhelyezkedésére.

- Megj.: 1. A „K” és a  $\beta^+$ -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  $\beta^+$ - és a  $\beta^-$ -instabil izotópok.

A két instabil csoportot szétválasztó stabil izotóp mindig páros neutronszámú (tehát páratlan rendszáma miatt páratlan tömegszámú). A modellek mutatta kép tökéletesen megegyezik a valóságban mért adatokkal, hiszen az adott külső neutronhég (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  $\beta^+$ , az utóbbi pedig a  $\beta^-$ -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 -hég aránya ideális, tehát valójában nem is a geometriai aránytalanságok kényszerítik a bomlásra, hanem neutronszámának 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  $\beta^+$ -instabil izotópok, alatta pedig a  $\beta^-$ -instabilak.

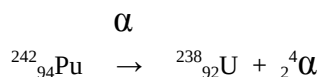
A 5.6. ábra a magasabb rendszámú páros elemekre szolgál példaként. Középen egy csoportban 3 stabil izotóp, majd kifelé haladva a páratlan neutronszámú radioaktív izotópot ismét stabil követi. Egyes elemeknél a középső csoportban 4-8 is lehet, és a széleken is gyakori a 2-3 egymást követő páros (!) neutronszámú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

Összefoglalva elmondható, hogy a  $\beta$ -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 neutronhég geometriai aránytalansága, illetve a neutronszám páratlansága.

## 6. Az alfa-bomlás

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

A bomlás reakcióegyenlete:



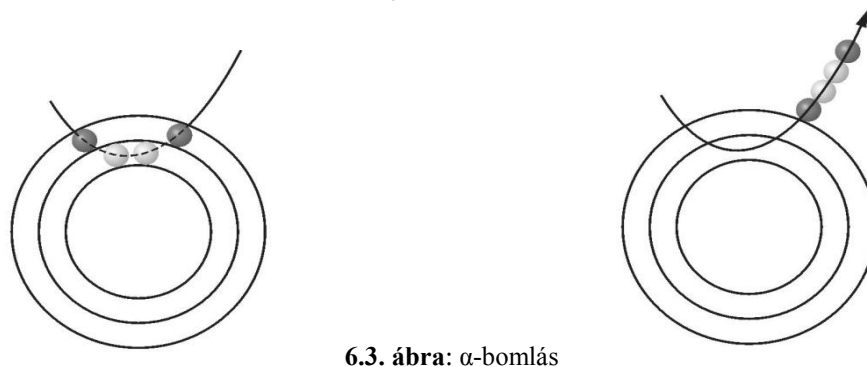
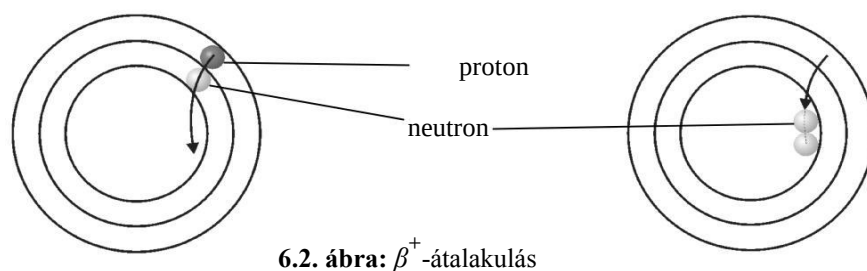
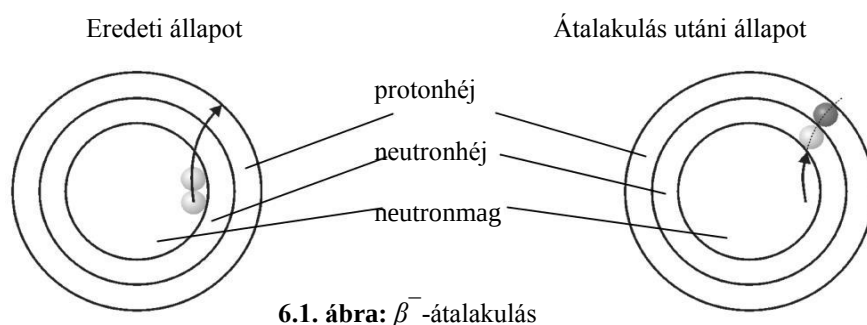
A plutónium tömegszáma tehát négyvel csökkent, rendszáma pedig kettővel, és ezáltal egy új elem keletkezett, ez esetben az urán. A keletkező  $\alpha$ -részecske és uránmag együttes tömege kisebb, mint a plutónium-mag eredeti tömege. A hiányzó tömeg és a felszabaduló energia ekvivalens.

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

Ha megvizsgáljuk bármely  $\alpha$ -aktív izotópot és annak bomlástermékét a nukleonarány szempontjából, akkor azonnal kiderül, hogy az  $\alpha$ -bomlás során a proton-neutron differencia, más szóval a neutronfelesleg 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  $\alpha$ -bomlás a  $\beta$ -bomlásokkal abból a szempontból is, hogy az átalakulás a mag belsejében, vagy a külső részén játszódik-e le.

A 6.1. ábra a  $\beta^-$ -átalakulás, a 6.2. ábra a  $\beta^+$ -átalakulás, a 6.3. ábra pedig az  $\alpha$ -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:

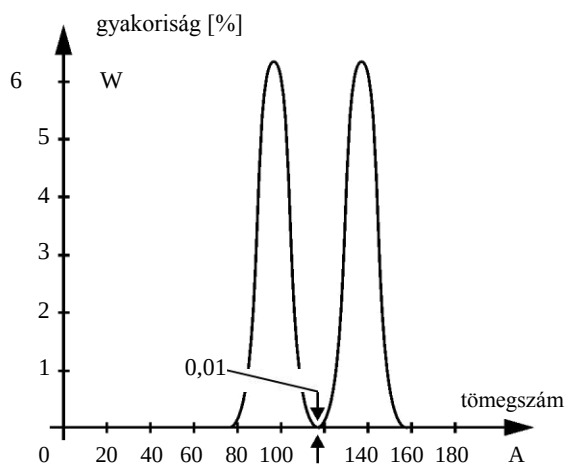
| Tömegszám | Előfordulási gyakoriság | Felezési idő         |
|-----------|-------------------------|----------------------|
| U-234     | 0,0051 %                | $2,5 \times 10^5$ év |
| U-235     | 0,71 %                  | $8,2 \times 10^8$ év |
| U-238     | 99,28 %                 | $4,5 \times 10^9$ 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 az ún. lassú 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 neutronot tartalmaznak. Ettől a fenti izotópok mindegyike béta-mínusz ( $\beta^-$ ) bomlások sorozatán keresztül igyekszik megszabadulni. Minden béta-mínusz bomlási lépcső egy-egy magasabb rendszámmá 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 hasadásos láncreakciót hozzunk létre,
- találhatók ugyan a transzurán elemek izotópjai között is hasadó magok, például a plutónium-239, de ezek csak mesterséges úton állíthatók elő.

## 7.1. A 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 kurcsatóvium (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 hasadásos láncreakcióra, másrészt a  $2,4 \times 10^4$  éves felezési idejével kellően stabil ahhoz, hogy atombomba, vagy más nukleáris fegyver töltetét lehessen gyártani belőle.

A Pu-239 egy mesterségesen előállított izotóp. 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  $\alpha$ - és  $\beta$ -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. A modellekből sok olyan összefüggés olvasható ki, amely választ ad ezek közül néhány – eddig még tisztázatlan – problémára.

## 7.2. Az urán-izotópok neutronmodelljei

Az urán-235 neutronmodellje a külső héjon (felületen) 92, a belső részén pedig 51 neutront jelképező gömbből áll (7.2. ábra).

A neutronmodell külső burkolója csaknem gömbforma, enyhén hexaéderes jelleggel.

Az 51-es 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).

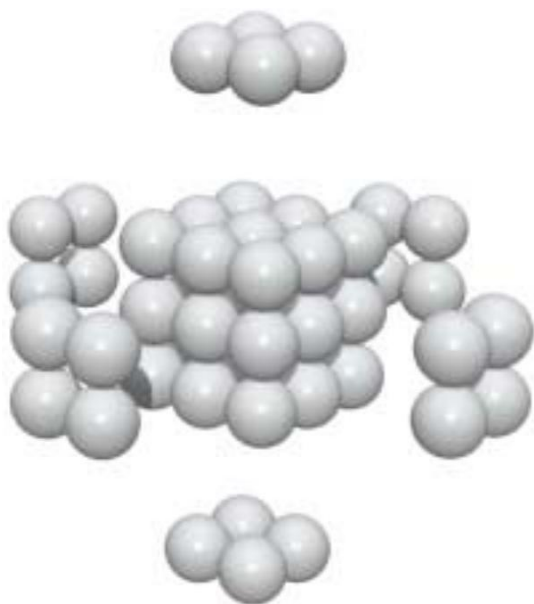


7.2. ábra  
Az urán-235  
neutronmodellje.



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 az U-235 neutronfeleslegének megfelelő belső neutronmag (7.5. ábra), amely 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.



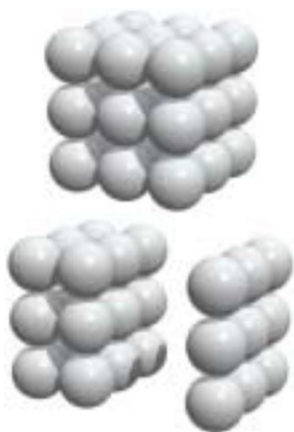
7.5. ábra

Az U-235 komplett 51-es belső magja.

A felépítést látva előre megjósolható, hogy bármely irányból jövő külső hatásra a neutronmag 3x3x3-as központi része  $\frac{2}{3} + \frac{1}{3}$  részre fog szétválni (7.6. ábra) a hasadási síkjainak valamelyike mentén.

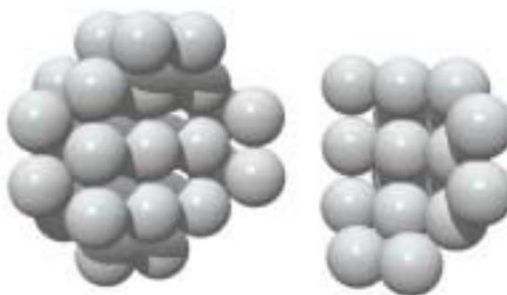
Az 51-es komplett belső mag (7.5. ábra) hasadásánál keletkező arány is ugyanekkora (ld. 7.7. ábrát), hiszen a hasadékok neutronszáma: 34+17.

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



7.6. ábra

A 3x3x3-as belső blokk hasadása. Az 51-es belső mag két hasadékanak részletei.

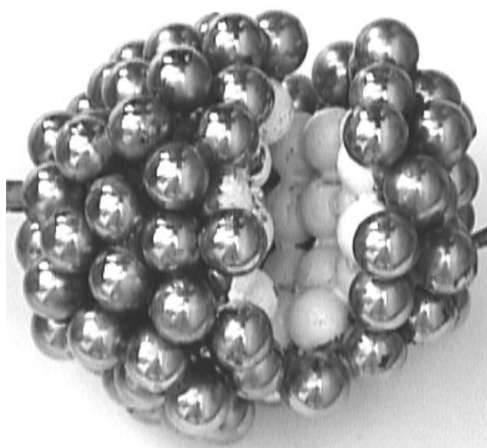


7.7. ábra

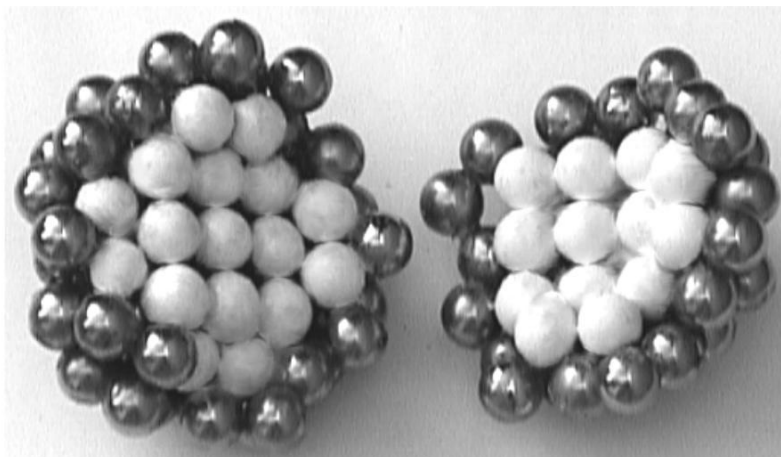
A hasadás utáni nukleonmegoszlás az urán-235 teljes neutronhalmazára vonatkoztatva csak bonyolult térbeli rajzzal volna szemléltethető, ezért fotó (7.8. ábra) mutatja meg a hasadás után kialakult viszonyokat a hasadékok nukleonmérlegének megadásával. A hasadási sík peremén elhelyezkedő neutronok, valamint az itt nem ábrázolt protonok a modellezésnél feleslegesen 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 jód-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

$^{139}_{53}\text{J}$  (jód) = 53 proton  
+ 86 neutron  
139 tömegszám

$^{96}_{39}\text{Y}$  (itterbium) = 39 proton  
+ 57 neutron  
96 tömegszám

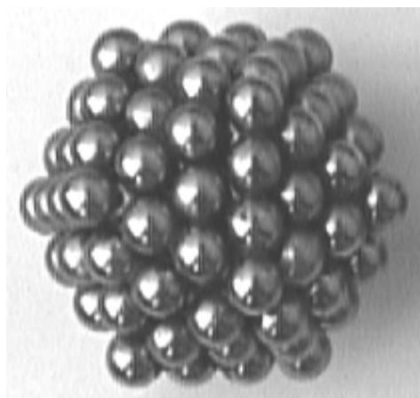
Ha a hasadékok peremén lévő, bizonytalan hovatartozású protonok és neutronok túlnyomórészt a baloldali (nagyobb) hasadékhoz adódnának, akkor 20-22-es proton-differencia jelentkezne, vagyis Kr-Ba (kripton-bárium) vagy Br-La (bróm-lantán) primer hasadékpárok keletkeznének.

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 (nióbbium-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.

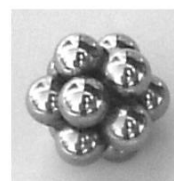
**Az urán-238 neutronmodellje** a geometriai tökéletesség talán legszebb példája. A modell a gömbi formát csaknem teljesen megközelítve egy olyan 146 gömbből álló szabályos alakzat, melynek a felszínén 92, a középső rétegében 42, annak belsejében pedig további 12 nukleont szimbolizáló gömb helyezkedik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



a.) külső héj



b.) középső héj



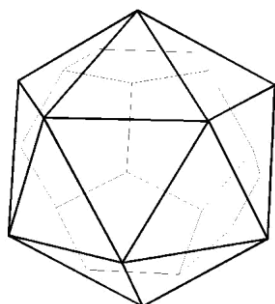
c.) belső blokk

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 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 kvázistabil. Mi történik azonban akkor, ha ezt a geometriai tökéletességet egy neutron behatolása megzavarja? Erre ugyanis a sugárzó környezetbe helyezett U-238-nak jó esélye van. Geometriai tény, hogy a legbelső, 12 gömbből álló egyrétegű halmaz (7.9/c. ábra) közepébe nem fér bele a tizenharmadik gömb a teljes zártság 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.



**7.10. ábra**  
Ikozaéderben  
dodekaéder.



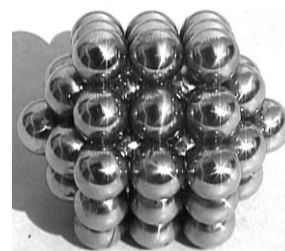
**7.11. ábra**  
A (12+1)-es gömb-  
halmaz transzformációja.



**7.12. ábra**

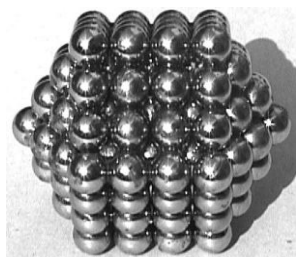
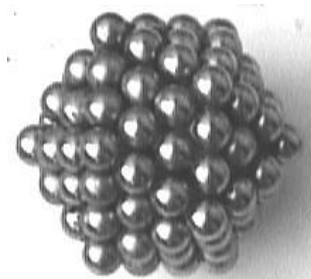


**7.13. ábra**

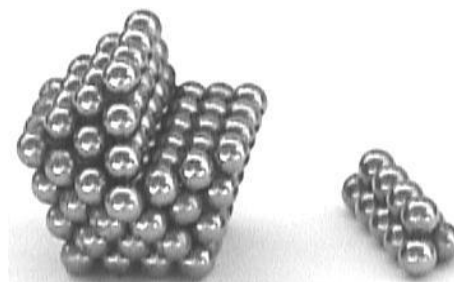


**7.14. ábra**  
A (42+12+1)-es gömb-  
halmaz transzformációja.

A középső réteg (további 42 gömb) ugyanilyen átalakuláson megy át. (7.13. és 7.14. ábra). Elkezdődött tehát az U-238 neutronhalmazának geometriai átrendeződése. A közepébe belőtt plusz neutron hatására, belülről kiindulva elkezdi 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 e síkok gömbökből álló gyűrűi befordulnak egymással párhuzamos helyzetbe, és kialakul az ikozaéderes formából a 7.16. ábra szerinti tengelyszimmetrikus változat.



**7.15. ábra és 7.16. ábra**  
A 92-es felszínű gömbhalmaz transzformációja  
(Urán-239 modell egyik változata.)



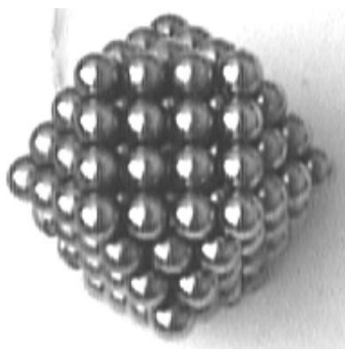
**7.17. ábra**  
A 92+42+12+1-es halmaz első változatának metszeti képe

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 középre behatolt neutron beágyazódását, vagyis a környezetével való teljes azonosulását.

Az U-238 befogadja tehát a pontosan középre irányított, de nem túl gyorsan érkező neutronot, és U-239 lesz belőle.

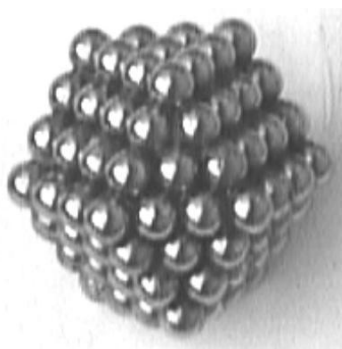
Az előbb közölt modell csak egy átmeneti változata az U-239 modelljeinek, az egzakt geometriai szerkezete ellenére. A belső struktúra tranzformálódása ugyanis folytatódik, amelynek két további lépcsője látható a 7.18. és a 7.19. ábrán.

Ezek is teljes zártágú belső szerkezettel rendelkeznek, amint azt a metszeti kép (7.20. ábra) bizonyítja.



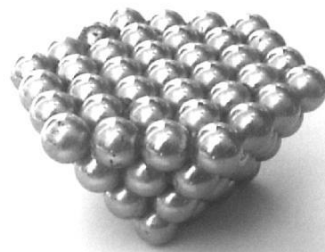
7.18. ábra

Az urán-239 második változata.



7.19. ábra

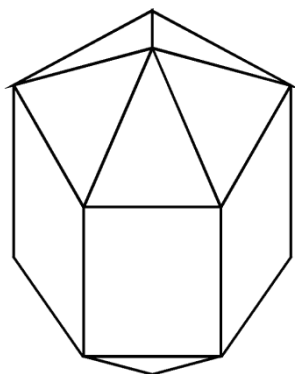
Az urán-239 harmadik változata.



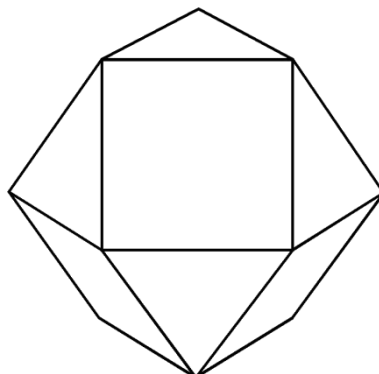
7.20. ábra

Az urán-239 modell belső szerkezete

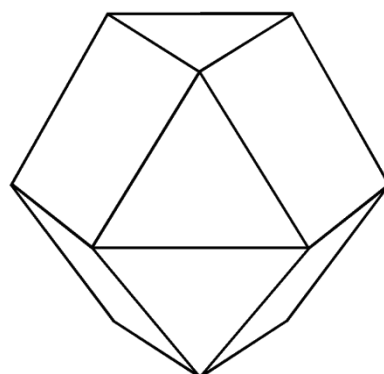
Geometriai törvényszerűség diktálja ezt az egész radikális átrendeződést, melynek megértéséhez érdemes tudni azt, hogy a testközből az ikozaéder 12 csúcsába irányított sugarak merőben más módon osztják fel a teret, mint a hexaéder (kocka) vagy az oktaéder középpontjából a 12 élközéphe irányított sugarak. 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, és pedig a modellek szerint azért, mert az U-238 neutronhalmaza a lehető legnagyobb olyan gömbhalmaz, amely még csupán háromrétegű. Efelett, vagyis  $238-92=146$ -os gömbhalmazon túl, szükségszerűen megjelenik a negyedik réteg is.

(Megjegyzendő, hogy az aktinidák és a transzuránok instabilitásának csak közvetett oka a 4. héjrég megjelenése. A nagyobbik probléma ugyanis ezeknél a gömbhalmazoknál az, hogy a halmazok felszíni kiemelkedéseinél lesznek olyan pozícióban lévő gömbök, amelyek a zárt felszínű alakzatok éléről, vagy csúcsáról egy mélyebb potenciálra tudnak kerülni az alakzat valamely lapközepén, és ezzel megbomlik a halmaz-felszín geometriai harmóniája.)

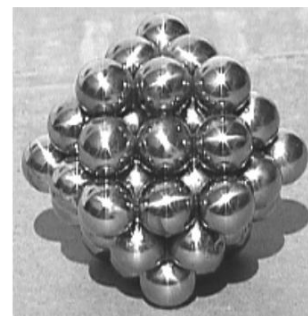
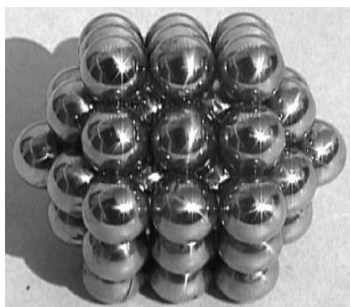
Az U-239 modelljei mind 1-1 gömböt zárnak közre a geometriai középpontjukban. Figyelemreméltó, hogy mindhárom változatnál ugyanolyan a belső (13-as) gömbhalmaz és a középső (42-es felszínű) gömbhalmaz vonalvezetése, mint az adott változat legkülső (92-es) héjának geometriai struktúrája. Ezt mutatják a 7.24., a 7.25. és a 7.26. ábrák.



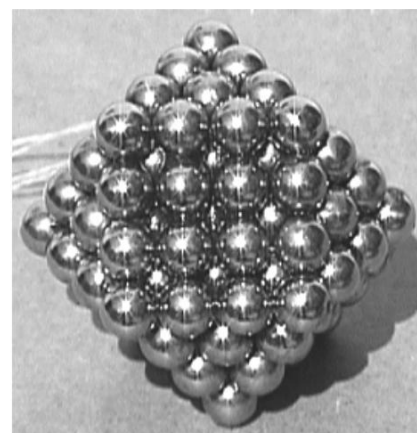
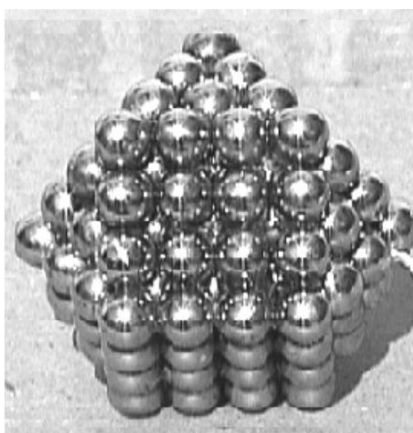
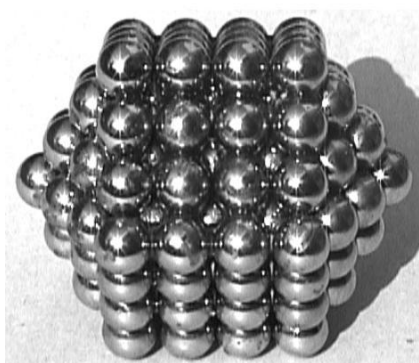
1-1 gömb legbelül.



1+12-es halmazok; felszín: 12.



1+12+42-es halmazok; felszín: 42



1+12+42+92=147-es halmazok; felszín: 92 (U-239 modellek)  
 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 (kvadratis) 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 lépésekben.

A geometria szabályai a neutronmag-neutronhéj arányának megváltozását követelik, amit a természet törvényei a belső magból két neutron kiválásával oldanak meg. Kilöködik 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  $\beta^-$ -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 neutront tartalmaz. Felépítésének jellege tetraédres, a gömböt egészen megközelítő burkolóval.