

Környezeti radioaktivitás

Az atom

A kémiában az atom a kémiai elemek azon legkisebb részecskéje, ami még őrzi az elem kémiai tulajdonságait. Parányi, gömb alakú, semleges részecske, mely atommagból és elektronburokból áll. Kémiai úton nem bontható fel alkotó elemeire. Ilyen értelemben az atomok a molekulák és az anyag alapvető összetevői. A modern természettudományok kísérletileg igazolták azt, hogy az anyag ilyen részecskékből áll.

Démokritosz, az atomelmélet megalapítója, az atomokat még oszthatatlannak tartotta, de ma már tudjuk, hogy nevükkel ellentétben az atomok maguk is szubatomi részecskékből épülnek fel.

Az atom a filozófiában valaminek – például a térnek, az időnek, a folytonosságnak, vagy az anyagnak – a valamilyen szempontból való elemi, tovább már nem osztható egységeit jelenti (*atomosz* gör. „oszthatatlan”). A fizikában ezeket elemi részecskéknak nevezzük.

Az atom szerkezete

Az atom átmérője 100 pm (10^{-10} m) nagyságrendű; térfogatának nagy része üres. A középpontjában található egy nagyon kis méretű atommag: tipikus átmérője 10 fm (10^{-14} m). Ez a nagyságrendi különbség annyit jelent, hogy ha egy atomot 100 méter átmérőnyire nagyítanánk (mint egy nagyobb vár vagy egy harmincemeletes toronyház), akkor atommagja mindössze kavics méretű lenne (1 cm).

Mivel pozitív protonokból és semleges neutronokból (közös nevükön: nukleonokból) áll, az atommag töltése pozitív. A teljes atom azonban semleges, mivel a protonok pozitív töltését azonos számú elektron negatív töltése semlegesíti. A protonok és a neutronok relatív (viszonylagos) tömege 1 atomtömegegység, az elektronok tömege pedig elhanyagolhatóan kicsi, ezért az atommag hordozza az atom tömegének szinte teljes egészét. Az atom üresen maradó térfogatának nagy részét elektronok töltik ki, és együttesen alkotják az elektronburokot. Az elektronburok felosztható héjakra, alhéjakra, és orbitálokra vagy más néven elektronpályákra (atompályákra).

A protonok, neutronok és elektronok az atomot alkotó legfontosabb elemi részecskék.

Az atomokat általában Z rendszámuk – ami egyenlő a magban levő protonok számával – alapján osztályozzuk. Az azonos rendszámú atomfajták alkotják a kémiai elemeket. A már felfedezett atomfajtákat a periódusos rendszer sorolja fel. A legegyszerűbb atomfajta a hidrogén, amelynek rendszáma 1, a periódusos rendszer első eleme. A tudományban nagy érdeklődésnek örvendett, különösen a kvantumelmélet fejlődésének korai szakaszában.

Az azonos rendszámú, de különböző neutronszámú atomfajtákat izotópoknak hívjuk: eltérő neutronszámuk miatt a tömegük is különböző. Adott kémiai elem (atomfajta) különböző izotópjait a tömegszámmal jellemezzük, melyet megkapunk, ha a protonok számát összeadjuk a neutronok számával. A hidrogénnek ($Z=1$) például három, a szénnek ($Z=6$) pedig hét izotópja van. Ezeket a következőképpen jelöljük: ^1H , ^2H , és ^3H , illetve ^{10}C , ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C , ^{15}C , ^{16}C . Az izotópok kémiai tulajdonságai mindig azonosak, de fizikai tulajdonságaik kis mértékben eltérőek lehetnek. Élettartamuk is rendkívül eltérő lehet (radioaktív izotópok). A természetben rendszerint valamelyik izotóp van túlsúlyban: a hidrogén izotópjai közül például 6500 db 1-es tömegszámú atomra jut egy db 2-es tömegszámú izotóp.

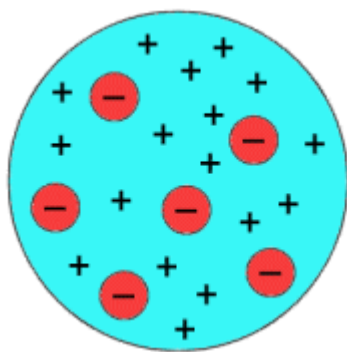
Egy atomfajta (kémiai elem) relatív atomtömegét izotópjainak átlagtömegéből számítjuk ki, úgy, hogy figyelembe vesszük azok előfordulási arányát. Ebből kifolyólag az atomtömegek nem egész számok.

Atommodellek

Az atom szerkezetéről az első tudományos igényességű modellt J.J. Thomson adta 1904-ben.

A Thomson féle atommodell

A Thomson-féle atommodell vagy más néven mazsolás puding modell (*angolul*: plum pudding model) egy olyan atommodell, amely szerint az atomban egyenletesen oszlik el a tömeg nagy része, mely pozitív töltésű, és abban mozognak a kis tömegű elektronok. A modellt 1904-ben Joseph John Thomson fejlesztette ki.



1. ábra:

Alapállapotban az elektronok úgy oszlanak el, hogy a helyzeti energiájuk minimális legyen. Ha megzavarják az elektronokat, akkor rezegni kezdenek. Thomson kísérleteket végzett röntgensugárzással, melynek eredménye azt mutatta, hogy az elektronok száma nagyjából a tömegszámmal egyezik.

Thomson atommodelljét Philipp Lenard (Lénárd Fülöp, magyar származású) cáfolta meg, aki elektronokkal bombázott egy fémfóliát (Lénárd-ablak) amin eltérülés nélkül haladtak át az elektronok. Tehát az atom nem lehet tömör.

A modellt Ernest Rutherford aranyfólián végzett szórási kísérlete döntötte meg, ami kimutatta, hogy az atom tömegének nagy része koncentráltan, kis térfogatban helyezkedik el, amit ma atommagnak hívunk.

Az atommag felfedezése. A Rutherford kísérlet.

Az atommag felfedezéséhez, az alfa sugárzás tulajdonságainak vizsgálata vezetett el. Rutherford az alfa részecskék eltérülését vizsgálta különböző anyagokon való áthaladáskor, így aranyfűstlemezen is. A sugárzás nagy része akadálytalanul haladt át, viszont voltak olyan részecskék is melyek nagyobb szögben eltértek eredeti irányuktól. A jelenség nehezen volt összeegyeztethető a Thomson-féle atommodellel, ezért Rutherford a következő feltételezéseket fogalmazta meg:

- az atom pozitív töltései egy kis részben, magban, összpontosulnak.
- a magban koncentrálódik az atom majdnem teljes tömege.

Ezen feltételezések alapján Rutherford kiszámította a szórt sugárzás intenzitása hogyan csökken az eltérítés szögének függvényében. A számítás eredménye jól talált a mérési tapasztalatokkal, ami igazolta az atommag létezésére tett feltételezéseket.

A Rutherford-féle atommodell

Az atommag felfedezését követően, Rutherford az atomot a naprendszerhez hasonlóan képzelte el. E szerint az atommag körül úgy keringenek a kis tömegű, negatív töltésű pontszerű elektronok mint a bolygók a Nap körül.

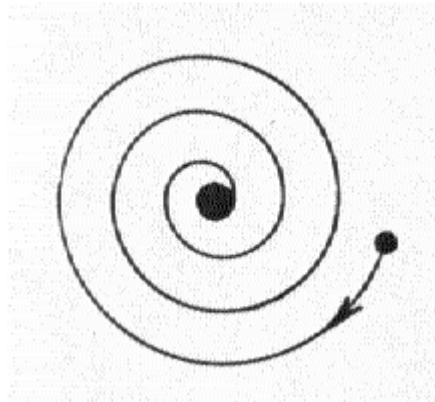
Összefoglalva a Rutherford-féle atommodell a következő módon írható le: Az atom nem elemi, hanem összetett objektum. Egy Z rendszámú elem atomjának tömege túlnyomórészt a Ze pozitív töltésű, kb. 10^{-14} m sugarú atommagban összpontosul, és e mag körül kering kb. 10^{-10} m távolságban a Z számú elektron (az atom "bolygómodellje").

Az hogy az elektronok nem lehetnek nyugalomban nyilvánvaló, hiszen a negatív töltésű elektronokra a pozitív töltésű mag által kifejtett Coulomb-féle vonzóerő hatására az elektron

belezuhanna a magba. Stabilis tehát csak úgy lehet, ha a mag mint centrum körül körpályán mozog, és a körpályán tartáshoz szükséges centripetális erőt éppen a Coulomb-erő szolgáltatja.

Hamarosan kiderültek azonban a Rutherford-féle atommodell hiányosságai is. Az elektrodinamika törvényei szerint a rezgő töltés elektromágneses sugárzást bocsát ki. A kisugárzott hullámok energiát visznek magukkal, így az elektron folyton veszítene energiájából, sebessége fokozatosan csökkenne, egyre közelebb kerülne a maghoz, míg végül teljes energiáját kisugározva egy spirál alakú pályán belezuhanna a magba. Ez a modell tehát nem jól írja le az atom belső dinamikáját, mivel a tapasztalattal ellentmondó következményekhez vezet:

1. Az atom e modell szerint végül is összeomlana, amikor az elektron teljes energiáját kisugározza (2 ábra).



2.ábra:

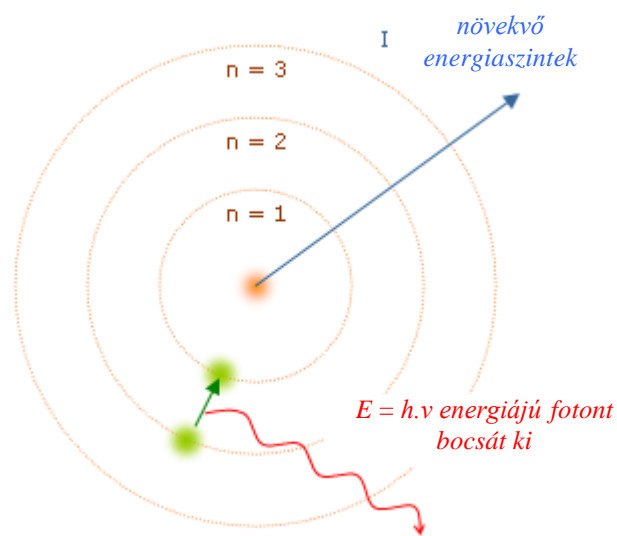
2. A kibocsátott sugárzás minden frekvenciát tartalmazna, tehát folytonos lenne az atomok emissziós spektruma.

A tapasztalat mindkét következtetésnek ellentmond. Az atom stabil képződmény, a színek pedig nem folytonos, hanem diszkrét vonalak sokaságából áll.

A Bohr-féle atommodell

A Rutherford-féle atommodell nem volt összeegyeztethető a klasszikus elektrodinamika törvényeivel (az atommag körül keringő elektronnak elektromágneses hullámokat kellene kisugároznia, így energiája csökkenne, végül a magba zuhanna), és nem magyarázta meg a vonalas színeképet. A **Bohr-féle atommodell** a Rutherford-féle atommodell javított változata. A Rutherford féle atommodell hiányosságait, Bohrnak hipotézisek segítségével sikerült megoldania:

1. Az atom elektronjai csak meghatározott pályákon keringhetnek a mag körül. Ezeken a pályákon - ellentétben a klasszikus elektrodinamika törvényeivel - az elektron nem sugároz.
2. Az atom csak akkor sugároz, ha az elektron az egyik pályáról a másikra ugrik. Ilyenkor energiáját egy foton formájában bocsátja ki. Ennek frekvenciáját a $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ egyenlet határozza meg, ahol E_2 , E_1 az egyes pályákhoz tartozó energiák, $h \cdot \nu$ a kibocsátott foton energiája (h - Planck állandó, ν - a kibocsátott foton frekvenciája). Fordítva: az atom csak olyan foton befogására képes, amelynek energiája éppen egyenlő két pályenergia különbségével.



3. ábra:

A Bohr-féle atommodell lényeges előrelépést jelentett a Rutherford modellhez képest, viszont alapvető fogyatékoságai is vannak. A modell alapján érthetővé vált a gázok vonalas színe, illetve magyarázhatóak lettek a spektroszkópia empirikus törvényei is. A Bohr-modell alapján a hidrogén spektrumát lehetett értelmezni, viszont a magasabb rendszámú elemek spektrumait nem.

Figyelembe véve eredményeit és hiányosságait, a Bohr modellt már szinte a megalkotásától nem tekintették véglegesnek, emiatt dolgoztak továbbfejlesztésén.

Az egyre pontosabb kísérleti vizsgálatok és elméletek alapján beigazolódott, hogy a klasszikus fizikában megismert törvények általában nem alkalmazhatók az atomi szintű jelenségek értelmezésére.

Az atomi részecskék tulajdonságait leíró törvényrendszert a fizika új ága a kvantummechanika foglalja össze, melynek alapján az atomok tulajdonságai egységesen értelmezhetők.

A röntgensugárzás

Annak ellenére, hogy a röntgensugárzás keletkezési mechanizmusa eltérő a radioaktív sugárzásoktól, ezen kurzus témáját képezi, mivel élettani hatása hasonló a radioaktív sugárzásokhoz.

A röntgensugárzás, a látható fényhez hasonló elektromágneses sugárzás, de frekvenciájuk (tehát energiájuk is $h \cdot \nu$) sokkal nagyobb. A röntgensugarak hullámhossz tartománya 10^{-2} nm - 100 nm, így az ibolyántúli és a gamma sugárzás közé esik.

A XIX. sz. végén a fizikusok különös érdeklődéssel tanulmányozták az elektromos kisüléseket ritkított gázokban. A felfedezett katódsugarakat a légritkított kisülési csőből először Lénárd Fülöpnek sikerült a szabad levegőre hozni. A kisülési cső üvegfalát Lénárd a megfelelő helyen átfúrta, és a nyílást olyan vékony alumínium lemezzel fedte be, amelyen a nagy sebességű elektronok át tudtak hatolni.

Wilhelm Conrad Röntgennek, a würzburgi egyetem professzorának szokása volt mások kísérleteit, amelyek érdemleges felfedezésre vezettek, megismételni. Ezért olyan kisülési csövet készíttetett, amilyent Lénárd használt. 1895. november 8-án este, sötét laboratóriumában, kísérletezés közben észrevette, hogy a fekete kartonba burkolt kisülési cső közelében levő bárium-platina-cianid ernyő zöldes fényt bocsát ki. Ekkor a cső és ernyő közé deszkát, majd könyvet tett. Meglepetésére a zöldes fény csak gyengült, de nem szűnt meg, amint ez katódsugárzás esetében várható lett volna.

Az új, még ismeretlen sugarakat Röntgen X-sugaraknak nevezte el. Az angolok, amerikaiak és franciák mai napig is X-sugaraknak (X-Rays, ill. Rayons-X), míg a németek és a többi népek a nagy felfedező után röntgensugaraknak nevezik.

Röntgen már 1896. január 23-án a würzburgi orvosi és fizikai társaság előtt nyilvánosan beszámol az újfajta sugarakról.

Hallgatósága igen nagy meglepetésére, két röntgenfelvételt mutatott be: egyet saját kezéről és egy másikat vadászfegyverének szerkezetéről. Ezzel útnak indított két új tudományt, az orvosi röntgendiagnosztikát és az anyagvizsgálat röntgensugarakkal.

Röntgen nemcsak szerencsés felfedezője a róla elnevezett sugaraknak, hanem további kísérletei során néhány hét alatt megállapította az új sugarak főbb jellemzőit is:

- a röntgensugarak a térben általában egyenes irányban terjednek, - a fényképezőlemez feketítik,
- bizonyos anyagokat fluoreszkálásra gerjesztenek, - a levegőt vezetővé teszik,
- át nem látszó anyagokon, mint papír, fa, emberi testrészek, sőt fémeken is, áthatolni képes,
- sugarait sem elektromos, sem mágneses mező útjából el nem téríti, és hogy
- áthatolóképességük a sugár előállítására használatos kisülési cső légritkításának fokától is függ.

A röntgensugárzás előállítása

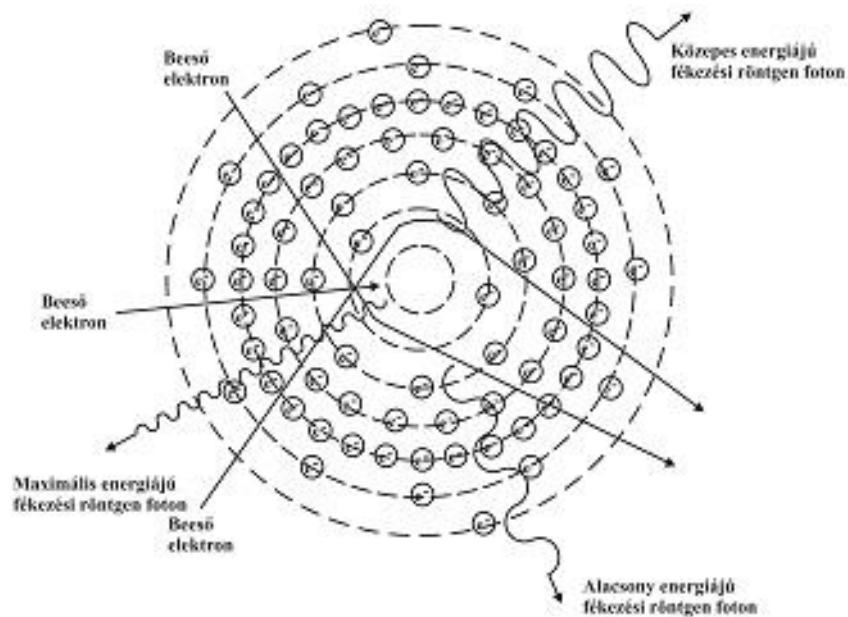
Röntgensugárzás akkor jön létre, ha egy céltárgyba nagy sebességű elektronok ütköznek. Előállítása ún. röntgensugárcsőben történik, ahol az erősen ritkított csövekben az izzókatódból kilépő elektronokat 60-125 kV feszültséggel felgyorsítják, majd ezek nagy sebességgel az anódra ütköznek. Általában, a röntgensugárzást kibocsátó elem, szilárd paszta formájában vonja be a katódot.

Keletkezési mechanizmusa alapján két fajta röntgensugárzásról beszélhetünk: fékezési- és karakterisztikus röntgensugárzásról.

A fékezési röntgensugárzás

A fékezési sugárzás a beeső nagyenergiájú elektron és az atommag erőterének kölcsönhatásából származik. Fékezési sugárzás tehát csak akkor jön létre, ha az elektronnak megfelelően nagy energiája van az elektronthéjak között áthaladni. Mivel az atommagnak pozitív töltése van és a beeső elektronnak pedig negatív, ezek egymást vonzzák. Ugyanakkor, ha a beeső elektron az atommaghoz túl közel kerül, az atommag erőterén az elektron nem képes áthatolni. Ezért a beeső elektron lelassul és haladási iránya megváltozik.

A fékezés során elvesztett energia röntgen fotonná alakul, mely röntgen foton energiája megegyezik a beeső és kilépő elektron energiájának különbségével. A beeső elektron kinetikus energiavesztését a lefékezés során az elektronnak az atommagtól való távolsága határozza meg (5.ábra).



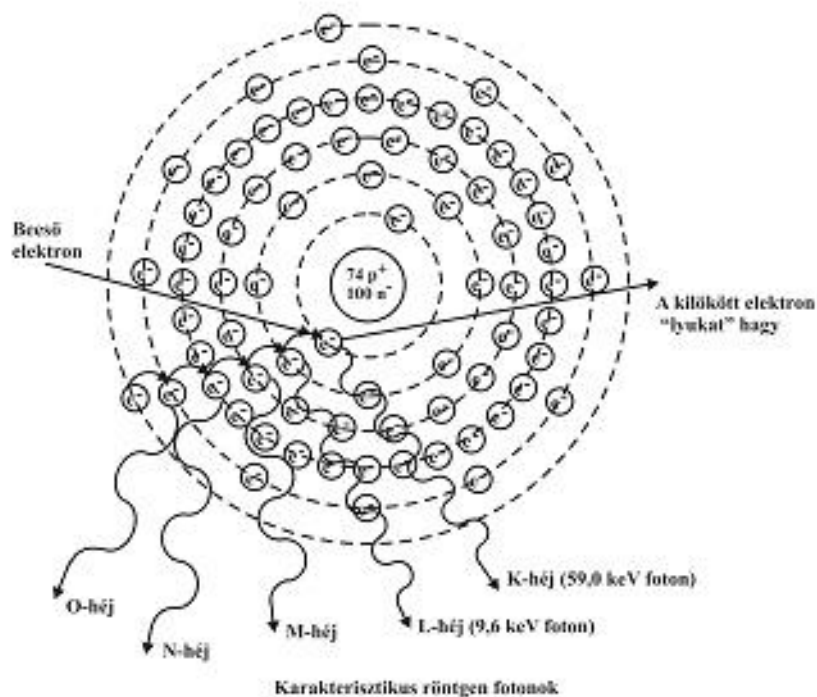
5. ábra:

Nagyobb távolság esetén az energiavesztés kisebb és ennek megfelelően alacsony energiájú fékezési sugárzás keletkezik. Kis atommag-elektron távolság esetén nagyenergiájú röntgen fotonok, illetve fékezési sugárzás jön létre. A beeső elektron valójában az atommaggal is ütközhet, mely a beeső elektron teljes kinetikus energiájának elvesztéséhez vezet.

A fékeződési folyamat során keletkező röntgen fotonok energiája a fentiekből következően más és más lehet, ezért a fékezési sugárzás színekepe folytonos.

A karakterisztikus röntgensugárzás

Karakterisztikus röntgensugárzás akkor keletkezik, ha a beeső nagyenergiájú elektron az atom egyik belső héján levő elektronjával ütközik (6. ábra).



6. ábra:

Mivel a beeső elektronnak megfelelően nagy energiája van ahhoz, hogy a belső héjjon levő elektront kiüsse, az atomot ionizálja. A beeső elektron a kölcsönhatás után általában tovahalad egy kicsit más irányba. Az ionizáció miatt az adott atomban „lyuk” keletkezik, mely az atomot instabillá teszi és ebbe a lyukba egy másik, magassabb héjjon levő elektron ugrik. Ez a folyamat röntgen foton kibocsátással jár, mely foton energiája a két elektronhéj kötési energiájának különbségével megegyezik. Külső héjról beugró elektron a külső héjjon szintén egy lyukat generál, melyet egy még külsőbb héjjon tartózkodó elektron tölt meg és ez a folyamat addig folytatódik, míg a legkülső elektronhéj is lyuk keletkezik. Ezt a folyamatot karakterisztikus kaszkádnak is hívják, mely több meghatározott energiájú röntgen foton kibocsátásával jár. A kilökött belső héj elektron általában elegendő energiával rendelkezik, hogy további kölcsönhatásokat okozzon és ezen kölcsönhatásokból is származhatnak további röntgen fotonok.

A karakterisztikus röntgensugárzás spektruma vonalas, ami jellemző a kibocsátó anyagra.

A röntgensugárzás élettani hatása hasonló a magból kiinduló gamma sugarak hatásaihoz, (csak keletkezése más) ezért élettani hatásait együtt tárgyaljuk a gamma sugarakkal.

Az atommag

Az atomok tömegének legnagyobb része egy, az atom térfogatához képest igen kisméretű, pozitív töltésű **atommagban** koncentrálódik. Az atommag átmérőjének nagyságrendje 10^{-14} m. Az atommag protonokból és neutronokból tevődik össze, amit együttesen nukleonoknak nevezünk. Az atommagban található pozitív protonoknak a száma megegyezik az atom elektronjainak a számával, ezt a számot rendszámnak nevezzük. A neutronok elektromos szempontból semlegesek, a protonok és neutronok számának az összege adja a tömegszámot. Az atommagok tömegét ún. atomtömegegységben (jele: u vagy ate) szokták megadni, ami definíciója szerint egyenlő a ^{12}C atom tömegének 12-ed részével.

$$1u = \frac{m_{^{12}\text{C}}}{12} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (1)$$

Miután a 20. század elején sikerült pontosabb tömegspektrométereket megépíteni, kiderült, hogy egy-egy elem atomjának tömege nem mindig azonos. A különböző tömeget az atommagban lévő különböző számú neutron adja. Az ilyen atommagokat amelyben a protonok száma megegyezik, de a neutronok száma különböző, **izotópoknak** nevezzük. Például a hidrogénnek 3 izotópja létezik: ^1H - (1 proton, 1 neutron), ^2H (1 proton, 2 neutron), ^3H (1 proton, 3 neutron).

Atommagok stabilitása

Amikor a fizikusok az atommag szerkezetét kezdték vizsgálni, azzal a problémával találták magukat szemben, hogy bár a magban lévő pozitív protonok a Coulomb-erő miatt nagy erővel taszítják egymást, az atommag mégis stabil állapotban van. Nehéz megérteni, hogy az elektromos szempontból pozitív protonok és semleges neutronok, hogyan alkothatnak stabil rendszert. E problémának csak az lehet a megoldása, ha a természetben létezik egy nagyon kis hatótávolságú, de nagyon intenzív erőhatás, amely az elektromos taszítást kompenzálja. Ez a nukleonokat összetartó erő, a magerő. Az atommagot összetartó erő (a magerő) a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

- Vonzó típusú, mert le kell győznie az elektromos taszítást.
- Nagyságrendje sokszorososa az elektromos kölcsönhatás nagyságrendjének.
- Független az elektromos töltéstől. Ez azt jelenti, hogy föllép proton-proton, proton-neutron és neutron-neutron között is, és nagysága - a kísérletek eredményei szerint - azonos körülmények esetén mindhárom esetben egyenlő.

- Nagyon kis hatótávolságú kölcsönhatás, és a kritikus távolságon túl nagyon gyorsan nullára csökken az erőssége.

Az atommag kötési energiája

Általánosságban a kötési energia az az energia, melyre ahhoz van szükség, hogy szétszedjünk egy egész dolgot részeire.

Az atommag kötési energiája az az energia, amely ahhoz szükséges, hogy az atommagot szabad neutronokra és protonokra szedjük szét.

Ezt az energiát a következőképpen adhatjuk meg:

$$W_{köt} = Z \cdot m_p \cdot c^2 + (A - Z) \cdot m_n \cdot c^2 - M_N \cdot c^2, \quad (2)$$

ahol: $W_{köt}$ - az N atommag kötési energiája, Z - rendszám, A - tömegszám, m_p - proton tömege, m_n - neutron tömege, c - fény sebessége, M_N - az N atommag tömege.

Egy atommag akkor stabilis, nem esik szét protonokra és neutronokra, ha kötési energiája $W_{köt} > 0$. A természetben található minden atommag esetében teljesül ez a feltétel. Az egynél több nukleont tartalmazó atommag tömege mindig kisebb, mint az őt alkotó nukleonok tömegének összege. Ezt a jelenséget **tömeghiánynak (tömegdefektus) nevezzük**. Viszont vannak olyan atommagok, amelyek szétbomlanak két vagy több részre. Ezek az ún. radioaktív atommagok. Általánosan, ha N -el jelöljük a szétbomlandó atommagot, amely egy a és X részre bomlik:

$$N \rightarrow a + X, \quad (3)$$

akkor az N magban az a és X részecskék kötési energiáját a következő összefüggéssel adhatjuk meg:

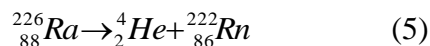
$$W_{köt}^{a,X} = m_a \cdot c^2 + m_X \cdot c^2 - M_N \cdot c^2, \quad (4)$$

ahol: $W_{köt}^{a,X}$ - az N magban az a és X részecskék kötési energiája, m_a - az a atommag tömege, m_X - az X atommag tömege, M_N - az N atommag tömege, c - fény sebessége.

A (4) összefüggésből látható, hogy az N atommag stabilis az a és X bomlásra vonatkozóan ($W_{köt}^{a,X} > 0$), ha $m_a + m_X > M_N$. Ebben az esetben az N atommag önmagától nem bomlik el az a és X részecskékre.

Az N atommag instabil az a és X bomlásra vonatkozóan ($W_{köt}^{a,X} < 0$), ha $m_a + m_x < M_N$. Ilyenkor önmagától szétbomlik az a és X részekre. Az ilyen típusú atommagot, amely önmagától szétbomlik két vagy több részre, **radioaktív atommagnak** nevezzük.

Például ilyen radioaktív atommag a rádium, amely önmagától elbomlik egy hélium és egy radon atommagra.



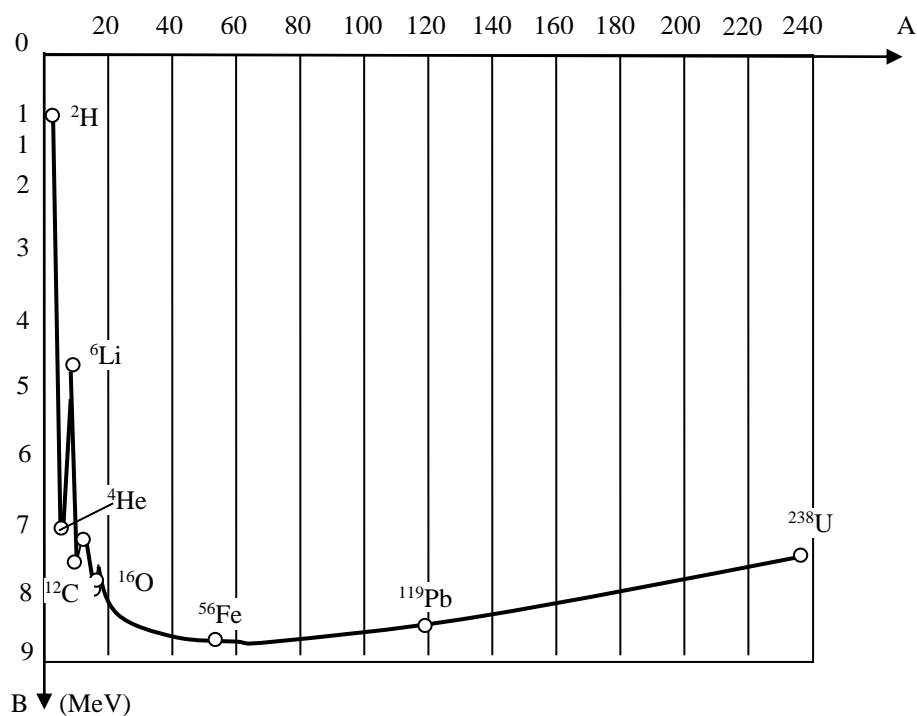
A radioaktív bomlás során az elbomló atommag nyugalmi energiája (tömege) nagyobb mint a keletkező atommagok nyugalmi energiája (tömege), viszont ez az energiakülönbség nem veszlődik el, hanem megjelenik a keletkező magok mozgási energiájaként. Emiatt a keletkező atommagok nagy sebességgel fognak kirepülni az elbomló atommagból. Minden egyes maghasadás során nagyságrendileg néhány 100 MeV energia szabadul fel. Ezzel szemben a legtöbb kémiai oxidációs reakció (pld. szén égése) néhány eV energia felszabadulással jár egy atomra vonatkoztatva.

Nukleonok kötési energiája

Csak az atommagok kötési energiája alapján nem lehet megmagyarázni, hogy a nagy tömegszámú atommagok miért bomlékonyabbak, mivel ezeknek a kötési energiája nagyobb. Az atommagokban a kötések erősségét sokkal inkább az egy nukleonra jutó kötési energiával (B) jellemezhetjük. Ezt úgy kaphatjuk meg, hogy a kötési energiát ($W_{köt}$) elosztjuk a nukleonok számával (az atom tömegszámával - A):

$$B = \frac{W_{köt}}{A} \quad (6)$$

A (7)-es ábrán látható az egy nukleonra jutó kötési energia változása a tömegszám függvényében.



7. ábra: Az egy nukleonra jutó kötési energia a tömegszám függvényében

Ezen a grafikonon a függőleges tengely lefelé irányított. Ezt azért szokás így ábrázolni, mivel egy részecske teljes energiáját általában akkor tekintik nullának, ha az szabadon, azaz kötetlen állapotban van. A kötött állapot ehhez képest negatív energiát jelent, hiszen energiát kell közölnünk a részecske kiszabadításához. Ez a közölt energia éppen a kötési energiának felel meg. Összefoglalva tehát minél nagyobb az egy nukleonra jutó kötési energia, annál mélyebb az egy nukleonra jutó teljes energia, vagyis annál kötöttebbek a nukleonok.

A görbe elején látszik, hogy az egy nukleonra jutó kötési energia erősen nő. Vagyis a könnyű magok esetén a tömegszám növekedésével a nukleonok egyre kötöttebb állapotba kerülnek. Egyes magok, a szomszédaikhoz viszonyítva kiemelkedő stabilitást mutatnak (^4He , ^{12}C , ^{16}O), ezek esetében a nukleonok erősebben kötődnek egymáshoz mint a szomszédaiknál. Az egy nukleonra jutó kötési energia maximuma az 55-60-as tömegszám körül van, ezekben a magokban kötődnek a nukleonok a legerősebben egymáshoz, ezeket a magokat a legnehezebb alkotóelemeikre bontani. A 60-as tömegszámú magoktól felfele, az egy nukleonra jutó kötési energia csökken, amiből következik, hogy a nagy tömegszámú magok esetében a nukleonok gyengébben kötődnek egymáshoz. Ezért ezek az atommagok elbomlással igyekeznek olyan állapotba kerülni, ahol az egy nukleonra jutó kötési energiájuk nagyobb (mélyebb állapotban vannak). Ez a folyamat megfelel a kötött rendszerek esetében megfigyelhető energiaminimumra törekvés elvével.

A természetes és mesterséges radioaktivitás

Radioaktivitásnak nevezzük a nem stabil magok (radioaktív magok) spontán módon történő elbomlását. A jelenséget 1896-ban fedezte fel Henry Becquerel (1852-1908) francia tudós, majd 1898-ban Marie Curie nevezi el radioaktivitásnak. A radio- latin szó jelentése sugárzó, az aktív, szintén latin szó, jelentése tevékenység, cselekvő. A radioaktivitás felfedezéséért, Becquerel a Curie házaspárral megosztva 1903-ban fizikai Nobel díjat kapott.

Ezek a spontán elbomlások statisztikus törvények alapján jönnek létre. Sok esetben az újonnan létrejött mag is radioaktív, így ezek a magok úgynevezett radioaktív sorokba rendeződnek, amelyeknek az utolsó eleme valamely stabil ólom izotóp.

Egy anyagról akkor mondjuk, hogy radioaktív, ha radioaktív izotópokat tartalmaz.

A környezet radiokativitása két nagy csoportra osztható: a **természetes-** és **mesterséges radioaktivitásra**.

A természetes radioaktivitás

A Földön található természetes eredetű radionuklidok két nagy csoportra oszthatóak. Az egyik csoportba tartoznak a hosszú felezési idejű **földkérgi eredetű radioizotópok**, míg a másik csoportot azok a rövid felezési idejű ún. **kozmozgén radioizotópok** alkotják amelyek a kozmikus sugárzás atmoszférával való kölcsönhatása során keletkeztek.

A földkérgi eredetű radioizotópok nagy része együtt formálódott a Földön található többi atommaggal. Valószínű, hogy a Föld keletkezésekor, a jelenleginél több radioaktív atommag volt található, de ezek egy része elbomlott, így ma már csak a nagy felezési idejű magok sorai találhatóak meg. A legtöbb földkérgi eredetű radioizotóp valamely radioaktív bomlási sornak a tagja. Jelenleg a természetben 3 bomlási sor elemei találhatóak meg:

- a ^{238}U (felezési ideje $4,468 \cdot 10^9$ év) bomlási sora,
- ^{232}Th (felezési ideje $1,4 \cdot 10^{10}$ év) bomlási sora,
- ^{235}U (felezési ideje $7 \cdot 10^8$ év) bomlási sora.

Léteznek olyan földkérgi eredetű radioizotópok is amelyek nem tagjai egyetlen bomlási sornak sem. Ezek közül, sugárterhelés szempontjából a legnagyobb jelentősége a ^{40}K (felezési ideje $1,28 \cdot 10^9$ év) és ^{87}Rb (felezési ideje $4,923 \cdot 10^{10}$ év) izotópoknak van.

A legfontosabb kozmozgén radioizotópok a ^7Be , ^{14}C , ^3H . Jelenleg, a természetben található két utóbbi izotóp mesterséges forrásból is keletkezhet.

A természetes radiokativitás, más nevén, **természetes háttérsugárzás** értéke a Föld különböző részein nagyon eltérő lehet. Egy adott helyen belül is erősen változhat a napszak illetve a meteorológiai körülmények függvényében.

A természetes radioaktivitás egy normális dolog, így alakult ki az élet a Földön, ezért nincs miért feltételeznünk, hogy ez káros lehet az élő szervezetekre. Nem lehet viszont tudni, hogy a természetes radioaktivitás teljes megszüntetése milyen hatással lenne az élő szervezetekre. Viszont, ha egy ember kisebb háttérsugárzású helyről, nagyobb háttérsugárzású helyre költözik, nagyobb kockázatnak lesz kitéve.

A természetes háttérsugárzás ismerete nagyon fontos, ennek függvényében lehet becsülni a mesterséges radioaktív sugárzás nagyságát is.

A természetes háttérsugárzásból származó sugárterhelés, az össz sugárterhelés kb. 85%-át teszi ki. A maradék 15%, a mesterséges sugárterhelés számlájára írható.

A természetes források közül a legnagyobb terhelés a radontól és leányelemeitől származik. Ez a sugárterhelés eléri az össz terhelés 50%-át.

A radioaktív bomlási sorok

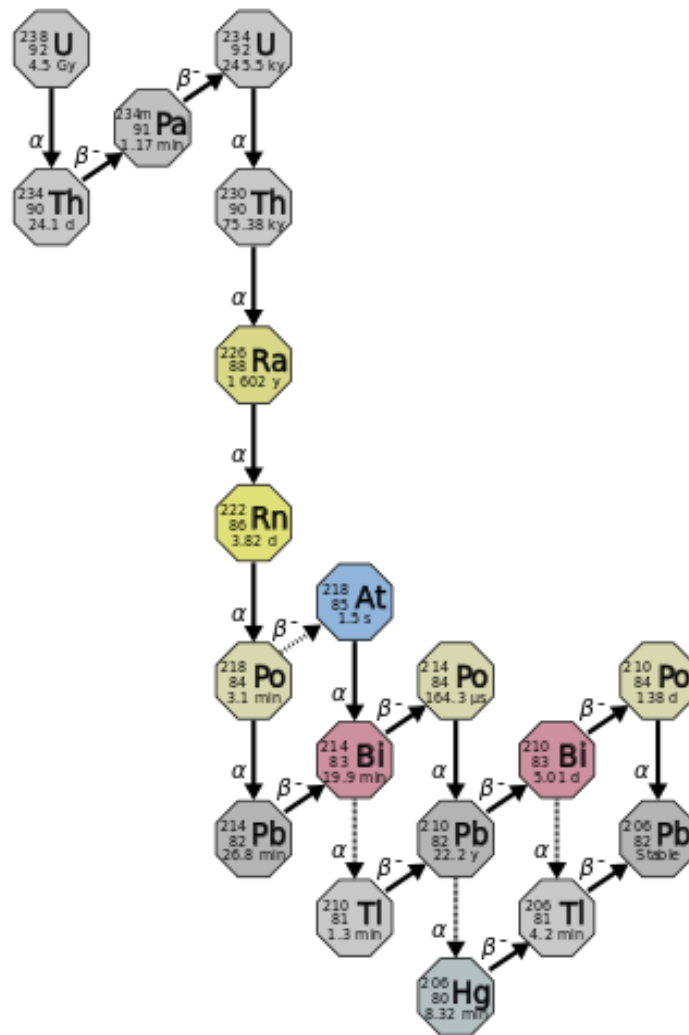
A radioaktív bomlás következtében új atommag keletkezik. Gyakori jelenség, hogy a keletkező új atommag szintén radioaktív, ezért tovább bomlik. Ha az új atommag bomlásakor keletkező atommag is radioaktív, akkor az is tovább bomlik. Ilyen módon különböző radioaktív izotópokból álló bomlási sorok alakulnak ki. A bomlási sor elején mindig a legnagyobb tömegszámú izotóp áll, utolsó tagja pedig stabil, nem radioaktív elem.

A radioaktív bomlás során az atommagok alfa (^4He atommag) vagy beta (e^- vagy e^+) részecskék kibocsátásával bomlanak el, melyeket gamma bomlás kísérhet. (lásd xxx fejezet). Alfa bomlás során az elbomló mag tömegszáma (A) 4-el csökken, míg beta és gamma bomlás során a tömegszám változatlan marad. Ezek szerint egy adott sorban levő atommagok tömegszámának 4-el való osztási maradéka minden bomlás során ugyanannyi marad, mint amennyi a sor elején lévő mag tömegszámának a 4-el való osztási maradéka. A fentieknek megfelelően, a 4-el való oszthatóság alapján 4 radioaktív bomlási sort írhatunk fel: $4k$, $(4k+1)$, $(4k+2)$, $(4k+3)$.

Ezek közül, a természetben csak 3 radioaktív bomlási sor tagjai találhatók meg, mivel a neptunium (^{237}Np) $(4k+1)$ sor tagjai rövid felezési idejüknek köszönhetően mára már elbomlottak.

A tórium sor (4k) a ^{232}Th -ből, az urán sor (4k+2) a ^{238}U -ból, az aktínium sor (4k+3) a ^{235}U -ból indul ki és stabil végtermékként minden esetben valamely ólom (Pb) izotópja keletkezik.

A 3 természetben található bomlási sor közül a legjelentősebb az ^{238}U (4k+2) bomlási sora, ebben a sorban található az az elemek amelyek a legjelentősebben járulnak hozzá a természetes sugárterheléshez és szintén ehhez a sorhoz köthető a radioaktivitás felfedezése is. Kiinduló eleme a ^{238}U (felezési ideje, $T_{1/2}=4,468 \cdot 10^9$ év), utolsó stabil eleme a ^{206}Pb . A bomlási sor diagrammja a (8) ábrán látható.



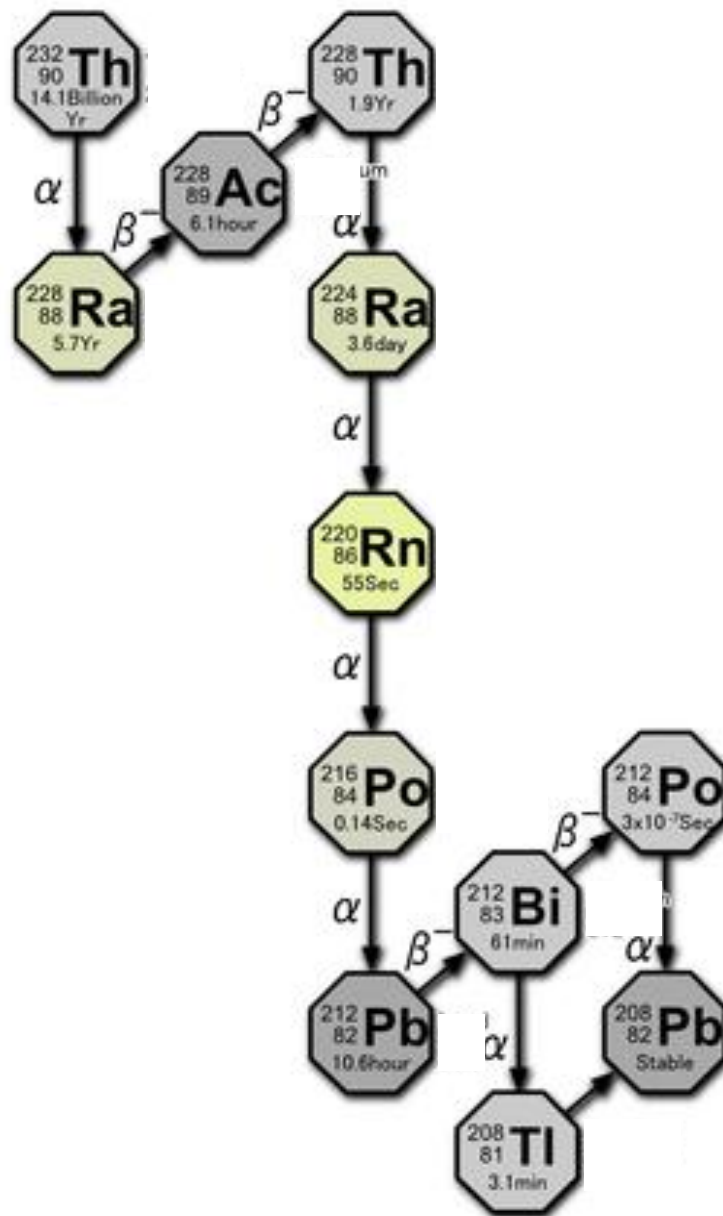
8. ábra: A ^{238}U bomlási sora

Ebben a sorban található a ^{222}Rn (radon), amely a természetes sugárterhelésnek a legnagyobb hányadát adja, illetve a ^{222}Rn anyaeleme a ^{226}Ra (rádium), amelynek szintén nagy jelentősége van az emberi belső sugárterhelés szempontjából.

Az emberi sugárterhelés szempontjából a második helyen a ^{232}Th (4k) bomlási sora található, amely szintén tartalmaz radon (^{220}Rn , más nevén toron) és rádium (^{224}Ra) izotópokat is, de

ezeknek a jelentősége sugárterhelés szempontjából kisebb mint az ^{238}U bomlási sorába tartozó radon és rádium izotópoké, mivel felezési idejük jóval kisebb. A sor kiinduló eleme a ^{232}Th utolsó stabil eleme a ^{208}Pb .

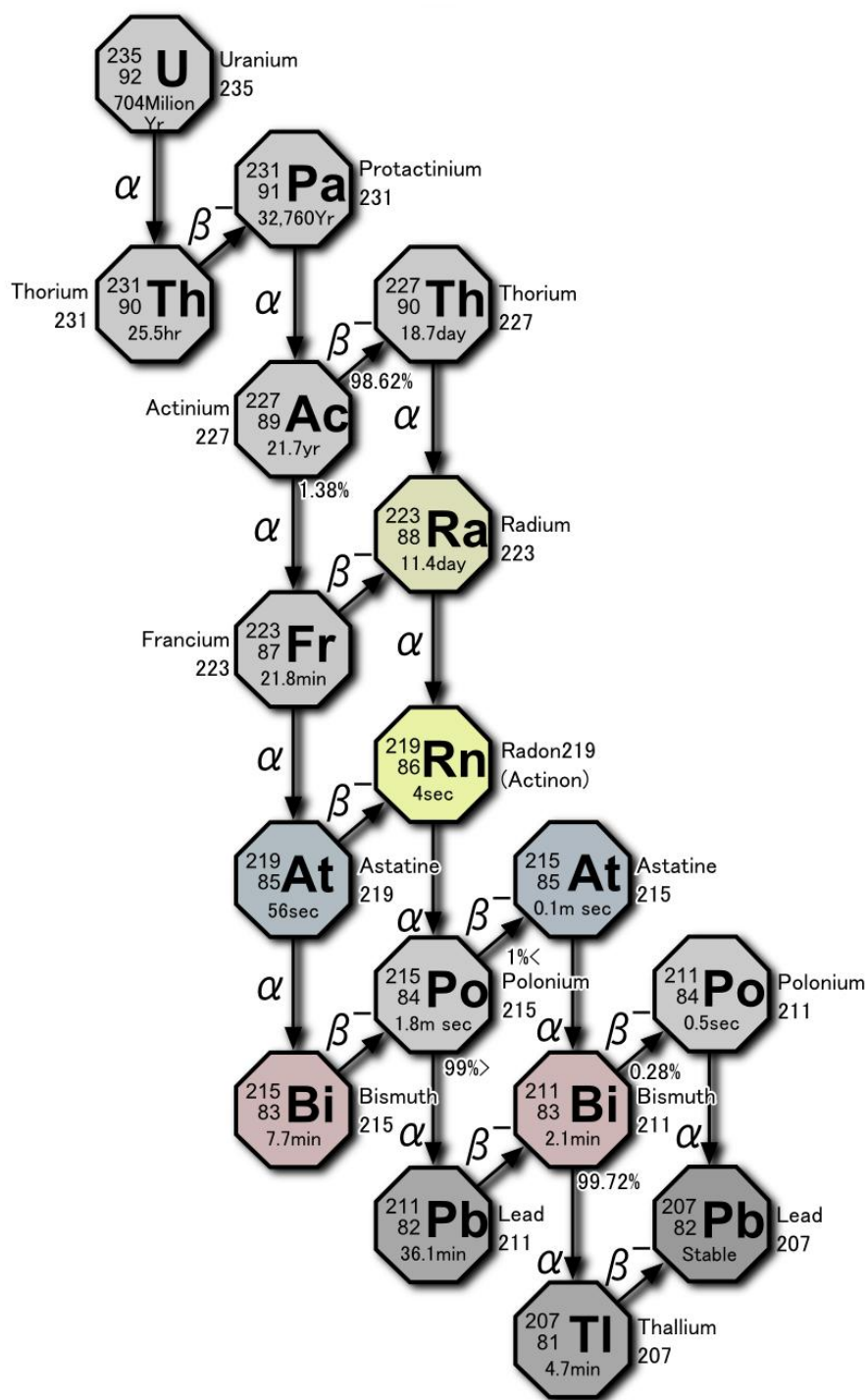
A ^{232}Th bomlási sora a 9. ábrán látható.



9. ábra: ^{232}Th bomlási sora

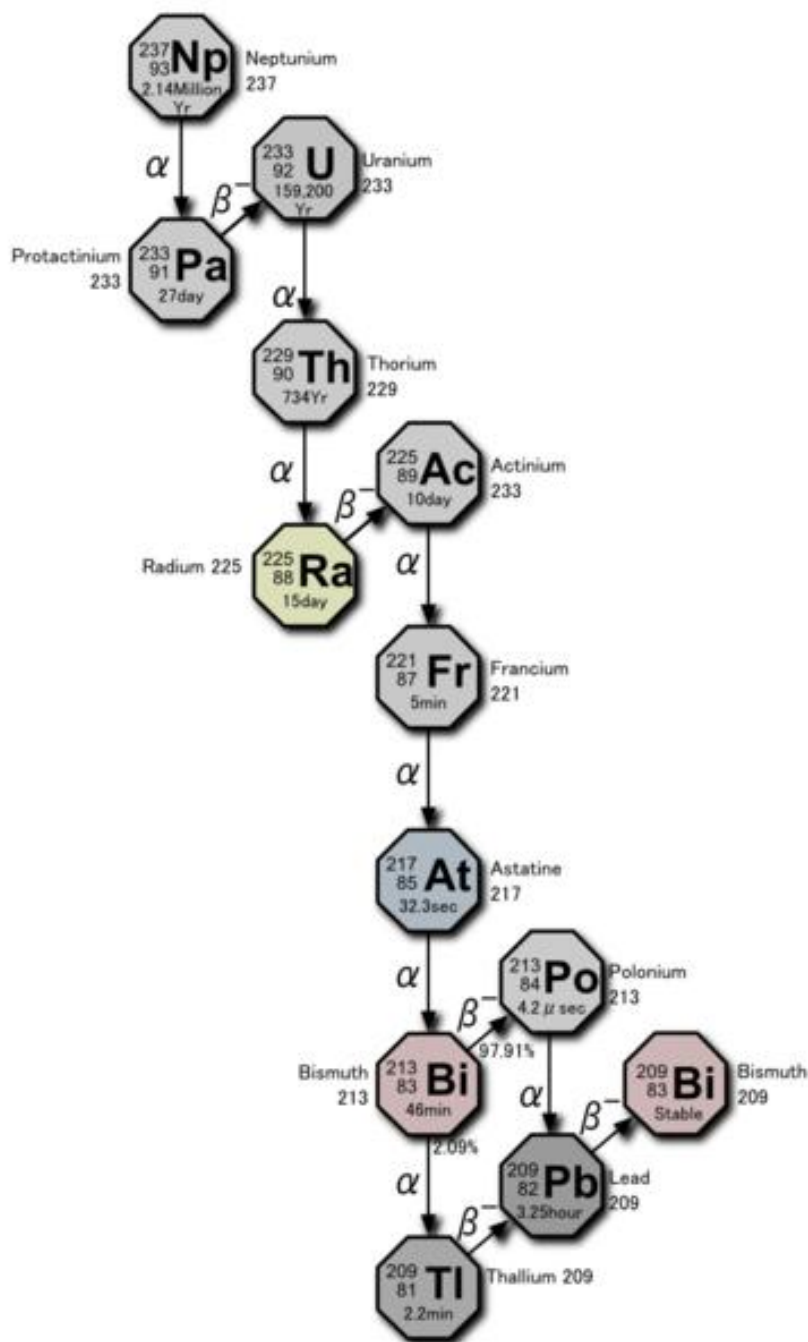
A 3. sor ami még megtalálható a természetben az aktínium ($4k+3$) bomlási sora. Kiindulóeleme a ^{235}U , utolsó stabil eleme a ^{207}Pb .

A ^{235}U bomlási sora a 10. ábrán látható.



10. ábra: A ^{235}U bomlási sora

A neptunium bomlási sora ($4k+1$) már nem található meg a természetben. Feltételezik, hogy a Föld formálódásának pillanatában a többi bomlási sor elemeivel együtt jöttek létre ezen bomlási sor elemei is, de a legstabilabb elem (^{237}Np) viszonylag rövidebb felezési idejének köszönhetően ($T_{1/2}=2,14 \cdot 10^6$ év), ezek máig már elbomlottak. A sor feje valójában a ^{241}Pu , de rövid felezési ideje miatt ($T_{1/2}=14$ év), inkább a neptunium bomlási sorának nevezik. A 11. ábrán követhető ezen bomlási sor elemeinek az elbomlása.



11. ábra: A ^{237}Np bomlási sora

A mesterséges radioaktivitás

Amint azt az előbbi fejezetben is említettük az embert ért össz sugárterhelés 15%-a a mesterséges sugárterhelés számlájára írható.

A mesterséges eredetű sugárterhelés 95%-a az orvosi diagnosztikai- és terápiás eljárások következménye. A maradék 5%-ot elsősorban a légköri kísérleti atomrobbantások máig ható

következményei okozzák. Ezután következik csak a nukleáris technológiákból adódó sugárterhelés.

Normális körülmények között ezeknek az aránya a természetes radioaktivtáshoz viszonyítva nagyon kicsi.

Sokszor nagyon nehéz elválasztani a természetes és mesterséges radioaktivitást. Például egyes folyamatok során ahol nagymennyiségű kőzetet használnak fel, a természetes eredetű radioizotópok bedúsulhatnak, így szennyezve a környezetet. Például szénérőművek környezetében megnőhet a természetes eredetű, de mesterségesen koncentrált ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{40}K izotópok koncentrációja. Hasonlóan az építkezések a természetes eredetű radon (^{222}Rn) feldúsulásához vezethetnek.

A radioaktív bomlás törvényei

Amint az előbbi fejezetben is tárgyaltuk, a radioaktív bomlás egy az atommagra jellemző jelenség, amely csak ennek a belső felépítésétől függ. Előbb vagy utóbb minden radioaktív atommag elbomlik, de azt nem tudjuk megmondani, hogy pontosan mikor. A bomlás egy statisztikai törvény alapján történik, úgy, hogy az elbomlás valószínűsége egy radioaktív elem minden atommagjánál ugyanakkora, de a bomlás nem egyszerre megy végbe minden atommagnál. Igen nagy számú atommag esetén ez a valószínűség már törvényszerűséggé válik, s így az időegység (dt) alatt elbomlott atommagok száma (dN), a bomlatlan instabil atommagok számával egyenesen arányos (N):

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (7)$$

ahol λ egy arányossági tényező, amelynek a neve **bomlási valószínűség**, vagy **bomlási állandó**. Amint a nevében is benne van, jellemzi az illető atommag időegység alatti elbomlásának a valószínűségét. Mértékegysége $\frac{1}{s}$. A negatív előjel azért jelenik meg, mivel $dN < 0$.

Az időegységre eső bomlások számát aktivitásnak (Λ) nevezzük.

$$\Lambda = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N \quad (8)$$

Az aktivitás mértékegysége $[\Lambda]_{SI} = \frac{1 \text{ bomlás}}{1s} = 1\text{Bq}$ (Bequerel).

Ha egy radioaktív elem kezdeti atommagjainak a számát (N_0)-val jelöljük, megkaphatjuk egy adott (t) idő múlva a még elbomlatlan atommagjainak a számát (N), integrálva a (7)-es egyenletet. A kezdeti feltételek: $t = 0$ - kor $N = N_0$. A változók szétválasztása után kapjuk:

$$\int_{N_0}^N -\frac{dN}{N} = \int_0^t \lambda dt \quad (9)$$

Elvégezve az integrálást kapjuk: $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t$. Ebből megkapjuk a radioaktív bomlás

törvényét:

$$\boxed{N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}} \quad (10)$$

Ennek az egyenletnek a segítségével kiszámíthatjuk bármely időpontban a még elbomlatlan atommagoknak a számát (N), ha ismerjük a kezdeti időpontban meglévő atommagok számát (N_0), a bomlás kezdete óta eltelt időt (t), illetve az illető atommag bomlási állandóját (λ).

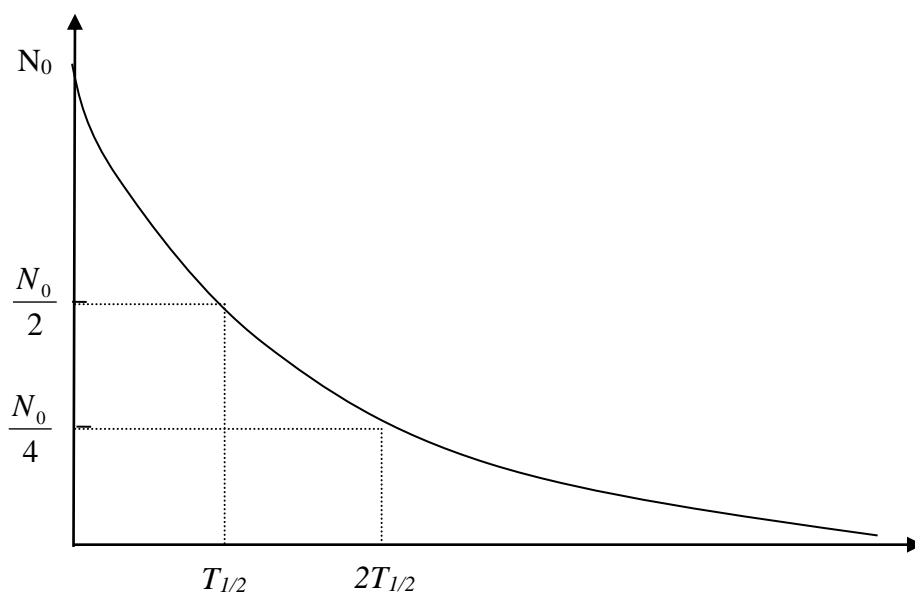
Figyelembe véve a (8)-as és (10)-es egyenleteket, beszorozva mindkét oldalt a bomlási állandóval, hasonló típusú összefüggést kaphatunk az aktivitás változására is:

$$\lambda \cdot N = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\boxed{\Lambda = \Lambda_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}}, \quad (11)$$

ahol a (Λ_0) - a kezdeti aktivitást jelöli.

A (11)-es összefüggésből látható, hogy egy anyag aktivitása is exponenciálisan csökken az idő függvényében, akárcsak az elbomlatlan atommagoknak a száma. Grafikusan a következőképpen lehet ábrázolni:



12. ábra: Az elbomlatlan atommagok számának időbeli változása

Az atommagok elbomlásával kapcsolatosan bevezettek egy másik mennyiséget is, amely sokkal szemléletesebben jellemzi az elbomlási folyamatot mint a bomlási valószínűség. Ez a mennyiség a **felezési idő** ($T_{1/2}$), amely az az idő amely egy radioaktív anyag atommagjainak a fele elbomlik. A radioaktív bomlás törvényéből egyszerűen igazolható, hogy újabb felezési idő elteltével ismét megfeleződik az atommagoknak a száma, majd még egy felezési idő múlva újra feleződik és így tovább. Ez a folyamat követhető a 12. ábrán is.

A felezési idő és a bomlási állandó közötti kapcsolatot a (10)-es összefüggésből kiindulva határozhatjuk meg, figyelembe véve, hogy $t = T_{1/2}$ idő alatt, a kezdeti radioaktív atommagoknak (N_0) a fele marad meg, tehát $N = \frac{N_0}{2}$. Ezeket az értékeket behelyettesítve a

(10)-es összefüggésbe, kapjuk: $\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$. Egyszerűsítés és logaritmálás után megkapjuk a felezési idő és a bomlási állandó közötti kapcsolatot:

$$\boxed{T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}} \quad (12)$$

A (12) összefüggésből látható, hogy a felezési idő fordítottan arányos a bomlási állandóval, vagyis a nagy bomlási állandójú (valószínűséggel) atommagokból álló anyagok gyorsan bomlanak, tehát felezési idejük rövid.

A különböző radioaktív anyagok felezési ideje változó, tízmilliárd évtől a másodperc milliárdomod részéig terjedhet. Egy adott anyag esetében a felezési idő állandó.

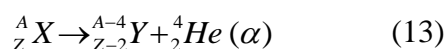
A radioaktív eltolódás törvényei

Az alfa sugárzás

Nehéz instabil atommagok, melyekben a protonok száma 82-nél nagyobb, ${}^4_2\text{He}$ atommag (alfa részecske) kilépésével stabilizálódhatnak. Tehát az α részecske két protonból és két neutronból áll. Az α -bomlás következtében a mag tömegszáma négygyel, rendszáma kettővel csökken, ezáltal az atom egy másik elem atomjává alakul át.

Feltételezik, hogy az α részek nincsenek jelen a magban és a protonok és neutronok kölcsönhatása során alakulnak ki, amelynek így megnő a valószínűsége, hogy kilökődjön a magból.

Ha egy (X) atommag, α bomlással elbomlik, új (Y) elemet hozva létre, a folyamatot a következőképpen lehet felírni:



Az atommagból kirepülő α részek nagy mozgási energiával rendelkeznek, energiájuk 4-9 MeV közé esik, amiből sebességére 10 000-20 000 km/s közötti érték adódik.

Nagy mozgási energiájuknak és töltésüknek (+2) köszönhetően erős ionizációra képesek, ezért a környezettel való kölcsönhatásuk során hamar leadják energiájukat.

Az α részek távozása után a mag gerjesztett állapotban maradhat, ilyenkor mikor visszatér alapállapotába gamma sugárzást bocsát ki (ld. **xxx fejezet**). Ilyenkor az alfa (α) és gamma (γ) sugárzást gyakorlatilag együtt észleljük.

A béta sugárzás

Ha az instabil atommag proton-neutron (p-n) aránya kedvezőtlen, akkor béta (β) sugárzás kibocsátásával közelíthet a stabilabb állapothoz. A β részecske lehet elektron vagy pozitron. A pozitron az elektron antirészecskéje, tömege megegyezik az elektron tömegével, töltéseik nagysága is megegyezik, csak a pozitron pozitív töltésű.

A β bomlás észlelésekor felmerült a kérdés, hogy a kibocsátott részecske azonos-e az atomban található elektronnal, illetve, hogyan bocsáthat ki egy atommag elektront vagy pozitront, úgy, hogy a magban csak protonok és neutronok találhatók. Bebizonyosodott, hogy a bomlás során kibocsátott negatív részecske azonos az atom elektronjaival, ez nincs jelen a magban hanem átalakulás során jön létre.

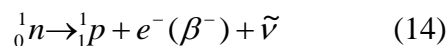
A β bomlások kétfélék lehetnek: **negatív β bomlás (β^-)** és **pozitív β bomlás (β^+)**.

A negatív béta bomlás (β^-)

Abban az esetben, ha a magban magas a neutronok (${}_0^1n$) száma a protonokéhoz (${}_1^1p$) viszonyítva, a neutron átalakul protonná és elektronná. Ez a negatív β bomlás.

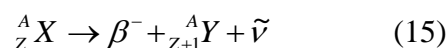
Energetikailag vizsgálva a folyamatot, észrevették, hogy a bomlás során egy másik részecske is kell keletkezzen, amelyet a bomlás felfedezésekor még nem tudtak észlelni. Wolfgang Pauli, volt az a fizikus aki feltételezte, hogy a hiányzó energiát egy másik részecske viszi el ("energiatolvajnak" becázte), aminek a létezését később kísérletileg is bizonyították. A β bomlások során keletkező "energiatolvaj" a neutrínó (ν) illetve az antineutrínó ($\bar{\nu}$). A neutrínó és antineutrínó tömege majdnem nulla, ezért az anyaggal való kölcsönhatása (detektálása) nehezen kimutatható.

A negatív β bomlás során létrejövő átalakulás képletesen a következőképpen írható fel:



A (14)-es összefüggésből látszik, hogy a magban a neutronból proton keletkezik, tehát a keletkező mag rendszáma egyel nő, tömegszáma változatlan marad. Ezért a (β^-) bomlást szokás még rendszámnövelő β bomlásnak is nevezni.

Ha egy (X) atommag, (β^-) bomlással elbomlik, új (Y) elemet hozva létre, a folyamatot a következőképpen lehet felírni:

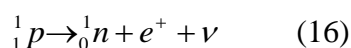


A bomlás során felszabaduló energián a keletkező elektron és az antineutrínó véletlenszerűen osztozik, ezért a kilépő (β^-) sugárzás (elektron) energiája folytonos eloszlású lesz.

A pozitív béta bomlás (β^+)

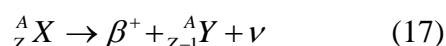
A (β^+) bomlás olyankor jön létre, ha magas a protonok száma a neutronokéhoz viszonyítva. Ilyenkor a proton átalakul neutronná és pozitronná (e^+) egy neutrínó (ν) kíséretében.

A (β^+) átalakulás képletesen a következőképpen írható fel:



Mivel a bomlás során a magban protonból neutron keletkezik, ezért a létrejövő mag rendszáma egyel csökken, tömegszáma ugyanaz marad. Ezért a (β^+) bomlást szokás még rendszámcsökkentő (β) bomlásnak is nevezni.

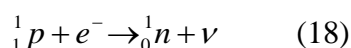
Ha egy (X) atommag, (β^+) bomlással elbomlik, új (Y) elemet hozva létre, a folyamatot a következőképpen lehet felírni:



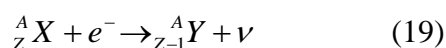
A kilépő pozitron energiája itt is folytonosan változhat.

Elektronbefogás (K-befogás)

Abban az esetben mikor a protonok száma magas a neutronokéhoz viszonyítva, de nem áll rendelkezésre elegendő energia a pozitron (β^+) sugárzáshoz, létrejöhet egy másik jelenség is, a **K-befogás**. Ilyenkor a proton az atom legbelső elektronhéjjáról befog egy elektront. A K-befogásnál a teljes energiát a neutrínó (ν) viszi el. A folyamat a következőképpen írható fel:



Az atommagok átalakulását, képletesen a következőképpen írhatjuk fel:



Az elektronbefogást mindig röntgensugárzás kíséri, amely a befogott elektron üres helyére történő beugráskor keletkezik. A K befogás csak közvetett úton érzékelhető, hiszen a keletkező neutrínó csak nagyon kis valószínűséggel lép kölcsönhatásba az anyaggal. Ezért a bomlás létrejöttéről csak a kibocsátott röntgen foton ad hírt.

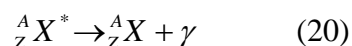
Mind a három típusú β bomlásnál előfordulhat, hogy a keletkező atommag gerjesztett állapotban marad, a gerjesztés megszűnése gamma sugárzás kibocsátásával történhet.

A gamma sugárzás

A gamma (γ) sugárzás jellege eltér az előbbieken tárgyalt alfa illetve béta részecskesugárzásoktól. A γ sugárzás elektromágneses sugárzás, nagy energiájú fotonokból áll. Nem rendelkeznek töltéssel és nyugalmi tömeggel, a röntgensugarakhoz hasonlóan nagy

áthatoló képességgel rendelkeznek, viszont keletkezési mechanizmusuk eltér a röntgensugarakétól. A gamma sugárzás az atommag belső átalakulása során keletkezik.

A nukleonok a magon belül különböző energiaszinteken helyezkednek el. Ha a gerjesztett atommag kisebb energiaszintre kerül, miközben energiatöbbletét foton kibocsátásával adja le, **gamma sugárzásról** beszélünk. Amint az előbbi fejezetekben már említettük az α illetve β bomlások sokszor gerjesztett állapotban hagyják az atommagot, ilyenkor ennek a gerjesztésnek a megszűnése γ sugárzás kibocsátásával jár. A gerjesztett állapot időtartama nagyon rövid, (10^{-18} - 10^{-13} s közötti), ezért gyakorlatilag a gamma bomlást egyidejűleg észleljük az alfa illetve béta bomlással. Képletesen a gamma bomlás a következőképpen írható fel:



ahol a * a mag gerjesztett állapotát jelöli. Látható, hogy a γ bomlás során az atommag tömege és rendszáma nem változik.

A gamma fotonok energiája diszkrét értéket vehet fel, színeképe vonalas, minden elemre meghatározott értékkel rendelkezik. A kibocsátott gamma sugárzás energiája alapján azonosítható a kibocsátó atommag.