

Nukleáris alapok

(Magfizika, Detektorok, Sugárvédelem, Reaktor)

1. Magfizikai alapismeretek

Az atommagok felépítése

Az atommagok 10^{-15} m méretű részecskék. Pozitív elektromos töltésű (+e) protonokból és semleges neutronokból állnak. A protonokat és neutronokat összefoglaló néven nukleonoknak nevezzük. A proton és a neutron nem elemi részecskék, bennük kvarkok találhatók. Egy atommagot az összetételével jellemezzük. A benne lévő protonok számát rendszámunknak nevezzük, és általában Z betűvel jelöljük. Nem a neutronok számát szokás megadni második adatként, hanem az atommagban található összes nukleon számát. Ezt tömegszámunknak hívjuk, és „ A ” betűvel jelöljük. Nyilván $A = Z + N$ (ahol N a neutronok száma). Egy meghatározott atommag jele: ${}^A_Z X$, ahol X helyébe a Z rendszámú elem kémiai vegyjelét kell írni. Pl. ${}^{16}_8 O, {}^{208}_{82} Pb, {}^{238}_{92} U$. Időnként a rendszámot is elhagyjuk, hiszen a vegyjel azt egyértelműen meghatározza. Pl. ${}^{16} O, {}^{208} Pb, {}^{238} U$.

Kölcsönhatások az atommagban

A nukleonokat az atommagban egy, az elektromágneses kölcsönhatásnál erősebb kölcsönhatás tartja össze, legyőzve a protonok rövid távolságon fennálló igen erős Coulomb-taszítását. Ez az intenzív kölcsönhatás a **magerő**. Ez egy másodrendű kölcsönhatás. Egy alapvető kölcsönhatást általában úgy írunk le, hogy töltések között hat. (Kivételek a gravitáció, melynek más leírásai is ismertek.) Egy kölcsönhatás másodrendű változata az, amikor a saját töltései szerint semleges objektumok között hat. Távolról nézve nem is lenne erőhatás, de az objektumok szerkezete miatt közelről a kölcsönhatás érezhető. Ezek mindig rövid hatótávolságú erők. Ilyen például a semleges atomok között ható másodrendű elektromágneses kölcsönhatás, a Van der Waals erő. A kvarkok között ható erős kölcsönhatás a természet egyik alapvető kölcsönhatása. Ennek másodlagos formája a magerő, ami kvarkokból álló szerkezettel bíró objektumok között a nukleonok között hat. A magerő hatótávolsága néhány femtométer, az atommagok mérete is ekkora.

Radioaktivitás

Radioaktivitásnak nevezzük az atommagok spontán átalakulását, amely általában gyorsan mozgó, nagy energiájú részecskék kibocsátásával jár együtt. A gyors mozgás a fénysebesség egy tizedét elérő, legtöbbször meg is haladja sebességet jelent. A kibocsátott részecskék energiája a kémiai folyamatokban felszabaduló energiáknál kb. milliószor nagyobb. Mivel ilyenkor általában egy kezdeti részecskéből spontán módon több részecske keletkezik, **radioaktív bomlás**nak is nevezzük ezeket az átalakulásokat. Ez az elnevezés kicsit félrevezető, mert nem a bomlás radioaktív, hanem az az atommag, ami spontán átalakul. **Radioaktív sugárzás**nak nevezzük a radioaktív bomlásban keletkező gyorsan mozgó részecskék áramát.

Ionizáló sugárzás

A töltött részecskék, ha ilyen gyorsan mozognak, akkor az őket körülvevő közeg atomjainak és molekuláinak elektronjait gerjesztik vagy ionizálják. Ezért az ilyen radioaktív sugárzásokat **ionizáló sugárzás**nak is nevezzük. Az ionizáló sugárzás tágabb fogalom. Ide tartozik még például a röntgensugárzás, ami nem közvetlen radioaktív bomlás terméke, de annak kísérő jelensége lehet. A **röntgensugárzás** legtöbbször kétféle módon keletkezhet: vagy atomi elektronok átmenetei során, vagy fékezési sugárzásként. Gyorsítóban kellően felgyorsított töltött részecskék árama is az ionizáló sugárzások csoportjába tartoznak.

Radioaktivitás fajtái

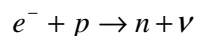
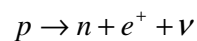
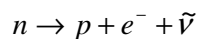
A radioaktív sugárzásokat elektromos térben történő eltérülésük alapján három csoportra lehet osztani.

Az **alfa-bomlás** során a kezdeti atommag egy hélium atom pozitív elektromos töltésű atommagját bocsátja ki általában 5-10 MeV mozgási energiával ($1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$). Az alfa-részecske (a hélium atommagja) két proton és két neutron erősen kötött rendszere, ezért energetikailag kedvező a megvalósulása. Az alfa-bomlás során az atommag pozitív töltése kettővel csökken, így az atommagon belül a protonok taszításából származó, a nukleonok kötését gyengítő elektrosztatikus energia is jelentősen csökken. Emellett alfa-bomlás során a magszerkezet átrendeződése is a magerők erősebb kötését eredményezi.

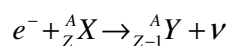
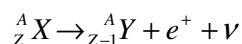
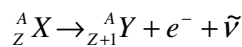
Az alfa-bomlás reakcióegyenlete a következő: ${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$. Itt X helyébe a Z rendszámú „anyamag” kémiai vegyjelét, Y helyébe pedig a Z-2 rendszámú leányelem kémiai vegyjelét kell írni. Pl. ${}_{88}^{226} Ra \rightarrow {}_{86}^{222} Rn + {}_2^4 He$

A **béta-bomlás**nak több fajtája van. A negatív béta-bomlásban elektron keletkezik, ez – negatív elektromos töltése miatt – ellenkező irányban térül el elektromos térben, mint az alfa-részecske. A pozitív béta-bomlásban az elektron helyett pozitron lép ki, ami az elektron pozitív töltésű, de vele azonos tömegű antirészecskéje. A béta-bomlás lezajlása a gyenge kölcsönhatás eredménye, ami a természet eddig nem említett, negyedik alapvető kölcsönhatása. A béta-bomlásban neutrínók is részt vesznek. A béta-bomlások mindig az atommagon belüli protonok és neutronok egymásba történő átalakulásai. Ha neutron alakul át protonná, akkor egy negatív töltésű elektron keletkezik, így marad meg az elektromos töltés a folyamatban. Az elektronnal együtt keletkezik egy antineutrínó.

Az elektron és a neutrínó könnyű elemi részecskék: leptonok, az ő antirészecskéi (pozitron, antineutrínó) antileptonok. A béta-bomlás során fennáll a **leptonszám-megmaradás** törvénye. Az elektronnak és a neutrínónak egy a leptonszáma, az antirészecskéknél -1. A béta-bomló atommag leptonszáma 0 (ez nem lepton, hanem hadron), így a béta bomlás termékeinek összes leptonszáma is 0. A harmadik gyakran előforduló béta-bomlás, amikor a proton úgy alakul át neutronná egy atommagon belül, hogy egy elektront befog a K-héjról egy elektront. Ilyenkor a kezdeti állapotban van egy lepton, és a végállapotban is kell lennie a leptonszám megmaradás miatt, tehát egy neutrínó is keletkezik. A három bomlás reakcióegyenlete a nukleonok szintjén a következő:



Az atommagok szintjén a három fenti bomlás a következőképpen írható:



A **gamma-bomlás** egy adott tömegszámú és rendszámú atommag gerjesztett állapotából indul, és ugyanazon atommag alapállapotában (vagy alacsonyabb energiájú gerjesztett állapotában) végződik. Az atommagok gerjesztett állapotait sokféleképpen elképzelhetjük. Ilyen lehet, hogy egy atommag forog, rezeg vagy benne egy nukleon más kvantummechanikai pályára áll.

Cseppmodell

Az atommagok sugarát többféle módszerrel megmérték, és az általános érvényű tapasztalat adódott jó közelítéssel a stabil atommagok esetére, hogy a sugár a tömegszám egyharmadik hatványával arányos, azaz $R = r_0 \sqrt[3]{A}$. Ez azt jelenti, hogy az atommagok térfogata a tömegszámmal, azaz a bennük lévő nukleonok számával arányos. Ezt úgy képzelhetjük el, mint állandó sugarú golyók egymáshoz érintkező térkitöltése. Őket a magerő tarja össze, és ez mindig csak az első szomszédok között hat. Ezen modell neve a cseppmodell.

Kötési energia

Egy atommag pontos tömege kisebb, mint az öt összetevő protonok és neutronok tömegének összege. A hiányzó tömeg neve tömeghiány. Ennek eredete az Einstein féle $E = mc^2$ képlettel a következőképpen magyarázható. Az atommagban a protonok és neutronok kötött rendszert képeznek, az atommag képződésekor a kötési energia felszabadul. Ennek az eltávozott energiának megfelelő „hiányzó” tömeg a tömeghiány. Ennek alapján az atommagok kötési energiája az atommag tömegéből meghatározható: az az energia, ami egy atommag nyugalmi tömegéből származó energia és az összetevőinek nyugalmi tömegéből származó energia különbsége.

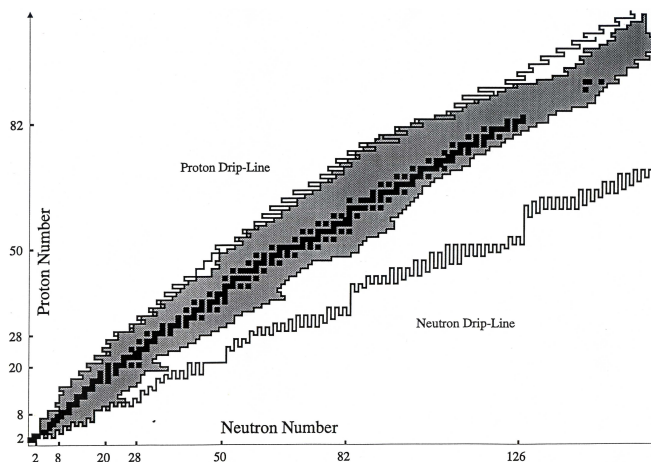
$$E_{köt} = m_A c^2 - N m_n c^2 - Z m_p c^2$$

Az egy nukleonra jutó kötési energia a kötési energia és a tömegszám hányadosa: $\varepsilon = \frac{E_{köt}}{A}$. Az

atommag akkor jobban kötött, ha az egy nukleonra jutó kötési energiája abszolút értékben nagyobb. A stabil atommagok egy nukleonra jutó kötési energiája a tömegszám növekedésével nagyjából úgy változik, hogy a kis atommagoktól a ^{56}Fe -ig erősödik a kötés. A ^{56}Fe a legkötöttebb atommag, majd a tömegszám további növekedésével a kötés gyengül, a protonok taszítása miatt. Az egy nukleonra jutó kötési energia a $Z = 15$ rendszám feletti atommagok esetén mindig 7,5 - 8,5 MeV/nukleon között van. Ez meglepően állandó, aminek magyarázata az, hogy a kötési energia döntő részben a szomszédos nukleonok között fennálló magerő miatt van, és egy nagy magban mindig ugyanannyi szomszédja van egy nukleonnak. A felületi effektusok és az elektromágneses taszítás módosít kis mértékben ezen.

Maghasadás

A radioaktív bomlások negyedik fajtája a hasadás. A maghasadás az, amikor egy atommag spontán, vagy egy neutron befogás hatására két részre ún. hasadványra esik szét. A hasadás csak a legnagyobb rendszámú radioaktív atommagok között fordul elő. A legismertebb eset a ^{235}U neutronok befogása utáni hasadása. Ilyenkor a befogott neutron miatt a ^{236}U atommag, mint egy csepp, rezegni kezd, közel piskóta alakúra megnyúlik, majd középen elszakad. A ^{244}Pu példa a spontán hasadó atommagokra, ilyenkor a hasadás (0,12%) és az alfa-bomlás (99,88%) egyaránt megvalósulhat, a két folyamat versenyez egymással.



Izotóptérkép

Ha egy koordináta-rendszer x-tengelyére az atommagban található neutronok számát mérjük fel, az y-tengelyre pedig a protonok számát (a rendszámot), és a negyedsíkot egységnégyzetekből rakjuk ki, akkor minden atommagot egy négyzet reprezentál. A stabil atommagok egy az $y=x$ egyenes mentén induló vonalban helyezkednek el, majd ez a vonal elgörbül, mert a nehezebb atommagokban már neutrontöbblettel kell kompenzálni a több proton atommagot szétfeszíteni akaró tasztítását. Az urán a természetben található legnehezebb atommag. Ennek hasadásakor a protonok és a neutronok véletlenszerűen kerülnek az egyik vagy a másik hasadványba, ezért a proton/neutron arány azonos lesz az uránban, és a két hasadványban is. A nehéz uránból két kisebb hasadványmag keletkezik, amelyek stabil összetételű izotópjaiban azonban jóval kevesebb neutronra lenne szükség. Az erős neutronfelesleg miatt a maghasadást egyrészt neutronok kilépése (prompt, vagy azonnali neutronok), másrészt negatív béta-bomló hasadási termékek keletkezése kíséri. A hasadási termékek béta-bomlásainak felezési ideje perces nagyságrendű. Van olyan béta-bomlás, ami a keletkező atommag erősen gerjesztett állapotára érkezik. Néha annyira nagy a gerjesztési energia, hogy elég egy neutron leválasztásához. Ilyenkor a neutron magától leválik az atommagról. Ezek a neutronok – a megelőző béta-bomlás miatt – a hasadás után sok másodperccel keletkeznek, és a nevük **késő neutronok**. A reaktorok szabályozásában nagyon fontos szerepük van.

Bomlástörvények

A radioaktív atommagok száma egy adott mintában a bomlások miatt csökken. A minta **aktivitásának** az időegységenkénti bomlások számát nevezzük. Ez egy egyszerű bomlás esetén arányos a még el nem bomlott magok számával. $A = -\Delta N/\Delta t \propto N$. (A negatív előjel azért van, mert az atommagok száma csökken, viszont az aktivitás pozitív) Az arányossági tényező abszolút értékét **bomlási állandónak** hívjuk, és λ -val jelöljük. Ez megadja az időegységre jutó bomlási valószínűséget. Azaz $-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$ Minél több atommag bomlott már el, annál kevesebb marad, így annál kisebb az időegység alatt elbomló magok száma, a bomlás üteme csökken. A differenciálegyenletet megoldva kapjuk az exponenciális bomlástörvényt: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ A **felezési idő** az az idő, ami alatt a kezdeti magok számának fele elbomlik. Az exponenciális bomlástörvénybe behelyettesítve, a felezési idő és a bomlási állandó kapcsolata: $T_{1/2} = \ln 2/\lambda$

A bomlási állandót definiáló bomlási ütemet megadó egyenletből adódik az aktivitás és a mintában lévő radioaktív magok számának összefüggése, ami a legtöbb nukleáris analitikai meghatározás alapja. $A = \lambda N$

2. Detektor-alapismeretek

A radioaktív sugárzások detektálása során azt használjuk ki, hogy a gyorsan mozgó töltött részecskék ionizálják a közeget, amin áthaladnak. A sugárzás energiát hagy az anyagban, és ezt az energiát (vagy ennek egy részét) általában elektromos impulzussá alakítják a detektorok. Az elektromos impulzusok időbeli hossza a nanoszekundum és a mikroszekundum időtartományába esik. Ezek elég rövid idők ahhoz, hogy minden egyes részecskét külön-külön detektálni lehessen.

Az elektromos impulzussá alakítás módja és a detektor anyaga alapján a detektorok három csoportját különböztetjük meg: félvezető-, szcintillációs- és a gáztöltésű detektorokat. Ezen kívül vannak még a vizuális detektorok, amelyekben a részecskék nyoma fényképezés után láthatóvá válik. Ilyenek a ködkamrák és a nyomdetektor, többek között.

Félvezető detektorok

A félvezető detektorok anyaga szilícium vagy germánium egykristály. A detektorra működése során nagyfeszültséget kapcsolnak. Ideális esetben a kristály nem vezeti az áramot, csak az ionizáló részecskék hatására válik vezetővé rövid időre. Ez teszi lehetővé a részecskék detektálását. A kristályok elektronszerkezete sávszerkezet, és a félvezetőkre az jellemző, hogy a vegyértékelektronok alkotta energiasáv kb. 1 eV energiával a vezetési sáv alatt helyezkedik el. Ha egy elektromosan töltött ionizáló részecske (pl. elektron) halad át a kristályon, akkor abban lead energiát, amely elég ahhoz, hogy elektronokat gerjessen fel a vezetési sávba. Általában egyszerre sokat. Ezek az elektronok kijutnak a kristály szélére, és elektromos impulzust okoznak. Az impulzus magassága az ionizáló részecske által leadott energiával arányos. Az impulzusok száma másodpercenként pedig a mért minta aktivitásával arányos. Lehet olyan jó a detektor, hogy minden a bomláskor felszabaduló sugárzást tudunk detektálni, de általában nem ez a helyzet. Az időegységenként detektált és a keletkező részecskék hányadosát hatásfoknak nevezzük. Egyszerűen már azért is kisebb a hatásfok 100%-nál, mert a detektor nem tudja teljesen körbevenni a mintát, és így lesznek olyan részecskék, melyek éppen nem a detektor anyaga felé indulnak el. Másrészt például gamma-sugárzás detektálásakor a gammák át is mehetnek a detektor anyagán úgy, hogy nem hatnak vele kölcsön.

Az egyes impulzusok a detektort lefoglalják egy időre. Ha ilyenkor jön egy újabb detektálandó részecske, ezt nem tudjuk detektálni. Az ilyen időtartamot, ami alatt a detektor nem érzékeny holtidőnek nevezzük, és általában %-ban adják meg egy mérésnél.

Mivel a félvezetőkben a vezetési sáv csak kevéssel van a vegyérték-elektronok alkotta sáv fölött, ezért sajnos már a termikus mozgás hatására is elektronok ugorhatnak fel a vezetési sávba. A rákapcsolt nagyfeszültség hatására ezek az elektronok is kijutnak a kristály szélére, és a kristály kismértékben vezeti az áramot. Ez az áramvezetés zavarja a részecskék detektálását, ezért ezeket a detektorokat hűteni kell.

Szcintillációs detektorok

A szcintilláció látható és/vagy UV fény felvillanását jelenti. A szcintillációs detektor szcintillátor anyagból és fotoelektron-sokszorozóból áll. A szcintillátoron keresztülhaladva egy elektromos töltésű részecske (pl. elektron) gerjeszti a detektor anyagában lévő elektronokat. Amikor ezek visszatérnek alapállapotba, akkor bocsátják ki a szcintillációs fotont. A szcintillátorra nem kell nagyfeszültséget kapcsolni, de a fotonokat valahogy elektromos impulzussá kell alakítani. A keletkező felvillanásban egyszerre sok foton keletkezik. A fotonok száma arányos a leadott energiával. A fotonokat a **fotoelektron-sokszorozó** alakítja elektromos jellé. A nagy

felvillanásokból nagyobb feszültség-impulzus lesz. Ez a detektor is képes a leadott energia mérésére. A fotoelektron-sokszorozó (FES) működése: a szcintillátorban keletkező fotonok a FES fotokatódjára esnek, ahol fotoeffektussal elektront löknek ki kb. 20% valószínűséggel. A keletkezett fotoelektronokat meg kell sokszorozni. Ezért néhány száz volt feszültséggel felgyorsítva egy speciális fémlapra fókuszáljuk őket. Ezen minden becsapódó gyors elektron kb. 3 új, de lassú elektront lök ki. A keletkezett elektronokat újra felgyorsítva és egy dinódára vezetve már 9 elektront kapunk, és így tovább még 8-10 dinódát használva egy elektrontól 10^5 – 10^6 elektron lesz. Ilyen erősítés mellett a felvillanásban keletkező fotonok már mérhető nagyságú áramimpulzust keltenek. (Van olyan FES, ami egyetlen fotoelektront is képes érzékelni.) A FES-ra kb. 1–3 ezer volt feszültséget kell általában kapcsolni.

Gáztöltésű detektorok

A gáztöltésű detektorok legismertebb példája a GM-cső. A gáztöltésű detektorokban gázzal töltött kondenzátor lemezei között halad át az elektromosan töltött részecskékből álló ionizáló sugárzás, és elektronokat kelt ionizációval, ugyanúgy mint az előző két esetben. Itt az elektronok a gázban mozognak a kondenzátoron belüli térerősség miatt. Ha csak az ionizáló sugárzás által keltett elektronokat (és ionokat) gyűjtjük be, akkor ionizációs kamráról beszélünk. Nagyobb feszültséget kapcsolva a kamrára, az elektronok a gázban lévő atomokkal történő két ütközés között annyira fel tudnak gyorsulni, hogy ionizálni tudják az atomokat az ütközés során, és ezzel újabb elektronokat szabadítanak ki. Az elektronok száma növekszik, a cső több elektront (és iont) gyűjt be, mint amennyit a primer ionizáló részecske létrehozott, a cső erősíti is az áramimpulzust. Amíg az anódra érkező áramerősség arányos marad a primer részecske által keltett töltéssel, addig a detektort „proporcionális” (arányos) számlálónak hívjuk. Az ilyen detektor még tudja mérni a detektorban leadott energiát. Még tovább növelve a feszültséget, a cső telítésbe megy, a kiadott impulzus ugyan nagy lesz, de már nem áll fenn az arányosság. Minden ionizáló részecskét ugyanakkora impulzussal jelez a detektor. Ilyen üzemmódban működik a **GM-cső** (Geiger-Müller féle számlálócső). A GM-csőnél gondoskodni kell az elektron-lavina kioltásáról is, emiatt a detektor holtideje is elég nagy.

Gamma-sugárzás detektálása: Mindegyik detektortípusnál hangsúlyoztuk, hogy közvetlenül csak elektromosan töltött részecskét (pl. elektronokat) tudnak detektálni. Gamma-sugárzás közvetlenül nem detektálható. Közvetett módon azonban igen, mert a gamma-sugárzás három folyamat során is tud elektronokat „kelteni” az anyagban, amelyeket azután a detektorok már érzékelni tudnak:

- **Fotoeffektus.** Ennek során a gamma-foton egy atom erősen kötött elektronját „kiüti”, annak lényegében teljes energiáját átadja. Így nagy energiájú elektron keletkezik.
- **Compton-szórás.** A gamma-foton rugalmasan ütközik az anyagban lévő lazán kötött elektronnal. Azt meglöki, energiájának egy részét átadja, ő maga pedig kisebb energiával más irányban továbbhalad.
- **Párkeltés.** Egy nagy energiájú gamma-foton elektron-positron párt kelt. Az Einstein-féle $E=mc^2$ összefüggés alapján ehhez legalább az elektron-positron pár nyugalmi tömegének megfelelő 1,022 MeV energia szükséges. A párkeltés kísérőjelensége az annihilációs sugárzás, amikor egy, az anyagban lelassult pozitron egy elektronnal megsemmisül, és ismét gamma-sugárzás – két, egymással ellentétes irányba induló, egyenként 0,511 MeV energiájú foton – keletkezik.

Mivel a gamma-sugárzás kölcsönhatása az anyaggal három bonyolult folyamat révén történik, a detektorokban gamma-sugarak hatására leadott energia eloszlása is bonyolult alakot mutathat.

Amplitúdó-analizátor

A mérések során a sugárzások által a detektorban leadott energia gyakoriság-eloszlását kell felvennünk, és ezt energiaspektrumnak hívjuk. Az energiaspektrum egy digitális elektronikai feldolgozás eredménye. Az analóg elektromos impulzusok nagyságát digitalizálni kell, és egy

0–1024 (10 bit) vagy 0–4096 (12 bit) közötti egész számmal jellemezzük a jel nagyságot, ami az energiával arányos. Ezt a leadott energiával arányos egész számot (legyen i a jele) gyakran **csatornaszámnak** hívjuk, mert egy hosszú mérés alkalmával azt számoljuk meg, hogy hányszor érkezett be ilyen i nagyságú impulzus, és ezt úgy is mondhatjuk, hogy az i -edik csatornába hány beütés érkezett. Ez a berendezés az amplitúdó analízátor, vagy sokcsatornás analízátor.

3. Sugárvédelmi alapismeretek

Kockázat

Az emberi tevékenységek során gyakran vállaljuk valamilyen káros esemény bekövetkezésének valószínűségét valamilyen előnyért cserében. Például, annak ellenére, hogy a repülőgépek nem teljesen biztonságosak, az emberek döntő többsége használja őket hosszú utazásokra. Minden munkahelyi tevékenységnek is van kockázata. Ezt számszerűsíteni nem könnyű, de az évenkénti halálzási arány az egyik olyan mennyiség, amivel le tudjuk írni a kockázatot. A pénzügyi műveleteknek is van kockázata, és ezt a banki matematika világában precízen számolják is. Az ionizáló sugárzásokkal történő munka is kockázatos. Például a röntgensugárzással pontos diagnózis adható csontok állapotáról, de a gépet működtetők is szenvedhetnek kárt, sőt a megröntgenezett páciens is kis mértékben kockázatnak van kitéve. A reaktoros energiatermelésben dolgozók is ki vannak téve kockázatnak, de az egész társadalom számára termelnek energiát. Mindig a tevékenység haszna és a kockázat mértéke együtt kell eldöntse, hogy egy adott tevékenység a társadalom számára elfogadható-e.

Dózisfogalmak

A radioaktív sugárzások dózisa. A dózisokat leíró legalapvetőbb fogalom az elnyelt dózis, ami a tömegegységben elnyelt energiát jelent. Mértékegysége a gray [Gy], ami J/kg. A sugárvédelem gondolkörében abból indulunk ki, hogy a sugárzás biológiai hatása ezzel arányos. Azonban a tapasztalatok szerint az egyes sugárzások esetén az arányossági tényező nem azonos. A sugárzás biológiai hatásait leíró mennyiség az **egyenértékdózis**. Ez a H , az előbb említett sugárzási tényező és az elnyelt dózis szorzata: $H = w_r \cdot D$. Az egyén különböző szerveit más és más egyenértékdózis érheti. A hosszú idő távlatában várható károsodás megállapításához egyes szervekre meg kell nézni ezt az egyenértékdózsit, és ezeket tapasztalati súlyfaktorokkal megszorozva kell átlagolni az egész testre. Ez már az egész testre vonatkozó ún. **effektív dózis**. A sugárvédelmi szabályozásban az effektív dózis az a mennyiség, amelynek értékeire általában a korlátok vonatkoznak. Az egyenértékdózis és az effektív dózis egysége a sievert [Sv]. A embert érő effektív dózisok nagyságrendjeit jól kell ismernünk. A természetes háttérsugárzás dózisa, ami a föld gamma-sugárzásától kezdve, a bezárt levegő radontartalmán keresztül az élelmiszerek radioaktivitásáig mindent magában foglal átlagosan 2,4 mSv évente. A sugárveszélyes munkahelyeken dolgozók megengedett dózisa 20 mSv/év. Az előző kb. tízszerese. A determinisztikusan orvosi elváltozásokat okozó dózis kb. 300 mSv, ismét egy több, mint tízes faktorialább. A félhalálos dózis kb. 5 Sv.

Biológiai hatás

A sugárzás biológiai hatása két alapvetően elkülönülő esetre bontandó. A kisebb dózisok esetén **sztochasztikus** hatásról beszélünk. Ekkor a megbetegedés (leukémia, vagy rákos daganatok) *valószínűsége* arányos a dózissal. Ilyenkor a megbetegedés azonban csak sok év múlva jelentkezik. A **determinisztikus**, biztosan bekövetkező károsító hatást, tehát a besugárzott szövet akut pusztulását okozó legkisebb effektív dózis 300 mSv (ez az egész testre van vonatkoztatva). Ez közvetlenül a dózis elszívése után (napoktól 2-3 hónapig terjedő idő alatt) kialakuló, orvosilag diagnosztizálható elváltozásokat jelent.

A küszöbdózis közelében például bőrpír, hányinger alakulhat ki. A determinisztikus hatás esetén a megbetegedés *súlyossága* arányos a dózissal, és csak kb. 5 Sv egésztest dózis körül van a halálzásnak jelentős valószínűsége. Meg kell említeni, hogy több Sv dózist orvosi felügyelet mellett megkapva, és azt rosszul működő szervekre koncentrálna gyógyulást is el lehet érni a sugárzásokkal. Egy további hatás a genetikai elváltozás. Nem ez a sugárzások biológiai hatásai közül a legfontosabb. Ez kis valószínűséggel bekövetkező folyamat, és a szervezet reagálóképessége ki tudja védeni ezeket az elváltozásokat.

A védekezés szabályai

A sugárvédelem egyik legfontosabb gondolata, hogy a sugárveszélyes munkahelyeken megadott dóziskorlátokat hogyan kell kialakítani. A fő elv a **társadalmilag átlagos munkahelyi kockázat** fogalma köré csoportosul. Ez az ország összes munkahelyén a munkahelyi kockázatok súlyozott átlaga. Ha sugárveszélyes munkakörben dolgozók a sugárzás miatt ennél kisebb kockázatnak vannak kitéve, akkor az elfogadható. Ez a szint függ az ország fejlettségi állapotától. A sugárveszélyes tevékenység tervezésénél az **ALARA-elv** követendő. Ez azt fejezi ki, hogy indokolatlanul nem szabad dózist kapni a dolgozóknak. Amilyen alacsony dózis mellett csak lehet, úgy kell elvégezni a műveleteket. Például árnyékolni kell, vagy nem szabad sokáig a sugárzási térben lenni. (ALARA = As Low As Reasonable Achievable = annyira alacsony, amennyire az még ésszerűen megvalósítható.)

A sugárzások elleni védelem három fő formája az **idő-, a távolságvédelem, és az árnyékolás**. Egy radioaktív forrást csipesszel megfogva nagyobb távolságban van a kezünk, a kapott dózis a századrészére csökkenthető. Ha nem tartózkodunk a forrás közvetlen közelében, és csak rövid ideig dolgozunk vele, szintén nagy dózis küszöbölhető ki. Bizonyos esetekben, például egy reaktor üzemeltetésekor árnyékolással kell dolgozni. Az aktív zóna aktivitása természetesen nagy, de körülötte több méter beton és számos sugárzásmérő készülék ügyel arra, hogy az ott dolgozók ne legyenek kitéve felesleges dózisnak.

A sugárvédelmi rendelkezések napjainkban kevéssé vonatkoznak természetes sugárzásokra. Általában zárt preparált sugárforrásokkal, röntgensövekkel történik a munka. Ha természetes eredetű forrással például demonstrációt végzünk, vagy napokig tartózkodunk egy magas radontartalmú barlangban, akkor ez a természetes sugárzás dózisának tárgykörébe tartozik, nincs ezekre hivatalos korlátozás.

A természetes sugárzások dózisának világátlagban kb. 50%-a a radon és leányelemeinek sugárzásból származik. Ezért egyre több EU országban az új építésű lakások éves átlagos radonkoncentrációjára küszöbszinteket vezetnek be.

4. Reaktor alapismeretek

A BME Oktatóreaktora nem energiatermelő reaktor, de aktív zónájában nagy **neutronfluxus** található. Ezzel reaktorfizikai kutatások mellett alkalmazott pl. környezetfizikai kutatások végezhetőek. A reaktor hasadásos reaktor, a hasadás az urán 235-ös izotópjával történik, ez a reaktor **üzemanyaga**. Az urán természetes körülmények között a talajokban is megtalálható, de két izotópjából a 235-ös sokkal kisebb százalékban található meg (0,7%), mint a 238-as. Ezért dúsítani kell az uránt ahhoz, hogy üzemanyag legyen. Az urán hasadását egy lassú neutron befogása váltja ki a reaktor aktív zónájában. A hasadáskor 2-3 új neutron is keletkezik, amelyek sokkal gyorsabban mozognak, mint a termikus energiájú neutronok. A termikus energia az

ekvipartíció tételéből számítható ki. Például 25 °C szobahőmérséklettel termikus egyensúlyban lévő neutronok 3/2 kT energiával rendelkeznek átlagosan, ami 0,025 eV mozgási energiát jelent.

A **láncreakció** elve az, hogy a keletkező neutronokat felhasználjuk további hasadások előidézésére. Mivel több neutron keletkezik, mint 1, ezért – ha minden neutron újabb hasadást hozna létre – a neutronok száma exponenciálisan növekedne. A neutronok azonban ki is szökhetnek a reaktorból, vagy pedig különböző anyagok – maga az urán is – elnyelhetik őket. Ezek elvesznek a láncreakció számára. Ezért általában nehéz láncreakciót megvalósítani. A hasítás valószínűségének növeléséhez először le kell lassítani őket. Ezt végzi a **moderátor**. A moderátor többféle anyag is lehet, grafit, nehézvíz vagy könnyűvíz. A maghasadás során nagy energiafelszabadulás is történik, ezt el kell a reaktorból szállítani. Ezért a stabil működéshez, és egyébként az energiatermeléshez is nélkülözhetetlen harmadik elem a hűtőközeg. A vízzel hűtött és vízzel moderált reaktorokban a hűtőközeg ugyanaz a víz, mint a moderátor. Ennek az az előnye, hogy ha valamilyen üzemzavar folytán elfolya a hűtőközeg, egyúttal a moderátor is eltűnik, és a láncreakció automatikusan leáll (hiszen a fenntartásához a moderátorra szükség van). A reaktoroknak kiterjedt **biztonsági rendszere** van (mint a repülőknél). A rudak formájában az aktív zónában lévő üzemanyag mellett vannak biztonsági rudak és szabályzó rudak. A szabályzó rudak jó neutronelnyelő anyagból készülnek (ilyen például a kadmium vagy a bór), és szabályozható neutronelnyeléssel fenntartják az egyenletes neutronfluxust a reaktorban (stacionárius üzemmód). A biztonsági rudak vészleálláshoz használhatók. Ha bármi rendellenességet észlelnek a műszerek, a rudakat az üzemanyagrudak mellé benyomják, és a teljes neutronfluxus rohamosan csökken.

A neutronfluxus az egységnyi (képzelt) felületen időegység alatt átmenő bármilyen energiájú és irányú neutronok száma. A hasadásban nagy energiával keletkeznek a prompt neutronok, a hasadványok béta-bomlása után a késő neutronok. Ebből a két részből áll össze a teljes neutronfluxus, aminek a neutronlassítás (moderálás) miatt van egy energia szerinti jellegzetes eloszlása (energiaspektruma). Ebben mindig található még a hasadáskor keletkező energiához közeli „gyors” neutronok, és már teljesen lelassult neutronok is.

A **nyomott vizes típus** (PWR, pressurised water reactor) az energiatermelő reaktorok (mint a paksi is) egyik legbiztonságosabb fajtája. Benne kb. 300 fokos víz kering, ez hozza el a hőt és lassítja a neutronokat. A víz mégsem forr fel, mert nagy nyomást (kb. 125 bar) biztosít benne a túlnyomástartály. Ez az ún. **primer kör**, ami az energiatermelő reaktorokban egy hőcserélőn keresztül csatlakozik a **szekunder kör**hez, amiben alacsonyabb nyomáson (kb. 42 bar) vizet forralnak, és a keletkezett gőz hajtja meg a turbina kerekeit, ami aztán áramot fejleszt elektromos indukcióval.

A láncreakciót az **effektív (neutron)sokszorozási tényezővel** szokás jellemezni (k_{eff}). Az effektív sokszorozási tényező a neutronok számának relatív változását adja meg egy neutron-ciklusra vonatkoztatva (pl. a maghasadástól a következő maghasadásig). $k_{eff} = \frac{N_{i+1}}{N_i}$. Itt N_{i+1} és N_i a

reaktorban lévő neutronok száma két egymást követő ciklusban. A sokszorozási tényező függ a hasadáskor keletkező neutronok átlagos számától, a neutronok kiszökésétől (kidiffundálásától) a zónából, és a neutronok elnyelődésétől is.

A reaktor működését gyakran a **reaktivitással** írják le. A reaktivitás az effektív sokszorozási tényező 1-től való relatív eltérését adja meg: $\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$. A reaktivitás és az effektív sokszorozási

tényező nagyon hasonló paraméterek. Stabil működéskor a reaktivitás 0, ezt hívjuk **kritikus** reaktornak. Ha a reaktivitás pozitív, a neutronfluxus és a reaktor teljesítménye nő és **szuperkritikus** reaktorról beszélünk. **Szubkritikus** a reaktor, ha a reaktivitás negatív.