

Radiológiai technikák

Előadásvázlat, készítette: Dr. Sükösd Csaba

(Az Orvosbiológia Mérnökképzés "Radiológiai Technikák" című tantárgyának egy részlete.

A további részeket :Dr. Blaskó Katalin és Dr. Makó Ernő (SOTE), Dr. Zagyvai Péter és Dr. Lévai Ferenc (BME) adták le.)

Gammasugárzás

Gammasugárzás keletkezése

- Gerjesztett állapotból való *atommagbomlás* elektromágneses természetű sugárzás kibocsátása révén, melynél a kibocsátó atom-magnak sem a rendszáma sem a tömegszáma nem változik meg. Ez nagyon gyors folyamat, ezért az atommagok általában csak alapállapotban találhatók. Gerjesztett állapot csak más, lassabb, s *atommag-átalakulással járó* bomlási módot követően jön létre nagyon rövid ideig (kb. 10^{-12} s), s ebből a frissen keletkezett atommag γ -bomlással ill. egyes esetekben *több* γ -bomlással (kasz-kád) gyorsan visszatér az alapállapotába. Leggyakrabban β -*bomlást* követő gamma-kibocsátásokat használunk. Itt a gamma-sugárzó preparátum felezési idejét a gamma-bomlást megelőző béta-bomlás felezési ideje határozza meg.
- Különleges gamma-sugárzás keletkezik *pozitronok* elektronokkal történő *megsemmisülésekor* (annihiláció). Ilyenkor az energia- és impulzus-megmaradás miatt nem egyetlen, hanem 2 gamma-foton keletkezik. Ezek mindegyikének energiája 511 keV, s egymással gyakorlati szempontból ellentétes irányba (180^0 -os szögben) haladnak. Ez lehetőséget ad pozitronbomló izotópok hely szerinti eloszlásának meghatározására (PET, positron emission tomography).

Gammasugárzás tulajdonságai és jellemző paraméterei

- Elektromosan semleges, ezért sem elektromos sem mágneses mezővel nem téríthető el. Nagy energiája és kis hullámhossza miatt inkább a részecske- (foton) kép használható rá. (Ld. később: intenzitás, fluxus, stb.)
- Nagy áthatolóképességű.
- Paraméterei: fotonenergia (használatos <SI által tolerált> egység: 1 MeV = 0.16 pJ), fluxus (foton/cm²/s), intenzitás (foton/s)
- Intenzitás: $1/r^2$ -es távolságtörvény (ha nincs elnyelődés).

Neutronsugárzás

A neutron tulajdonságai

- Neutron: semleges atomi részecske, az atommag alkotóeleme. Tömege kb. egyenlő a proton tömegével. Szabad állapotban nem stabil, kb. 1000 s-os felezési idővel béta-bomlással elbomlik. Ezért szabad állapotban *csak folyamatosan működő* neutronforrások közelében található meg.
- Az atommaggal erős kölcsönhatásba lép. Mivel az atommag elektromos taszítása nem hat rá, ezért könnyen behatol az atommagba, s oda befogódik. A keletkezett atommag általában nem stabil. Ezért neutronsugárzásnak kitett anyagokban *radioaktív* atommagok jönnek létre, az anyagok felaktiválódnak.

A neutronsugárzás jellemző paraméterei

- Neutronok energiája. Termikus, epitermikus, gyorsneutronok. Neutronok lassítása
- Neutronok kölcsönhatása az anyaggal. Atommagreakciók.
- Reakciósebesség és neutronfluxus. Neutronnal létrehozott atommag-reakciók valószínűsége ($1/v$ törvény, rezonancia- és küszöbreakció)

Neutronok előállítása

- Radioaktív preparátummal. Ra-Be, Pu-Be neutronforrások. Neutron- és gamma-hozam aránya. Kevert sugártér.
- Neutrongenerátorral (deutérium-trícium magreakció, 14 MeV energiájú neutronok.)
- Ciklotronnal, atomreaktorral, spallációs neutronforrással (ld. később)

Részecskegyorsítók

Elektrosztatikus gyorsítók

- Kaszkádgenerátor
Ionok előállítása, gyorsító feszültség előállítása, vákuum szerepe. Korlátok.
- Van de Graaff generátor
Ionforrás, nagyfeszültségű elektród, töltéstranszport. Feszültség növelésének korlátai. Nagynyomású tartály és a töltőgáz szerepe.
- Tandem Van de Graff
Negatív és pozitív ionok, stripping. A megoldás előnyei és hátrányai.

Ciklikus gyorsítók

- betatron
Változó mágneses mező gyorsító hatása elektronokra.
- mikrotron

Mikrohullámú gyorsító tér (klisztron), állandó mágneses mező.

- ciklotron
Rezonanciafeltétel. A mágneses mező és a frekvencia. Fázisfókuszálás és erős fókuszálás. Méret, frekvencia és végenergia összefüggése. Nyalábkivonás.
- izokrón ciklotron
Relativisztikus effektusok miatt kifelé növekvő mágneses mező. Defókuszáló hatás kompenzálására azimutális váltakozás.
- szinkrotron.
Rögzített pályasugár miatt gyorsításkor változó mágneses mező és változó frekvencia. Nyalábvezetés és mágneses lencsék (kvadrupólusok). Fázisfókuszálás.

Lineáris rezonanciagyorsítók

- LINAC
Rezonanciafeltétel. A lineáris megoldás előnyei a ciklikus megoldással szemben

Gyorsítók nyalábparaméterei

- Nyalábtípusok
elektron- proton- nehézion nyalábok
Ionforrások és a nyaláb tisztasága
- Nyalábenergia . Energiafelbontás
- Nyalábintenzitás.
Nyalábprofilok, intenzitáseloszlás. Szóródott szatellit-nyaláb ("Halo")
Fluktuációk
- Nyaláb térbeli kiterjedtsége
Nagy felületű, egyenletes eloszlású besugárzás, ill. vékony ceruzabél-nyalábok
Fókuszáltság és divergencia
- Nyaláb időbeli struktúrája.
Impulzus- ill. folyamatos üzem. Előnyök és hátrányok.

Másodlagos nyalábok

- Szinkrotronsugárzás
Létrejötté, intenzitása, hullámhossza, monokromatikussága és hangolhatósága

- Egzotikus nyalábok (pozitron-nyaláb, mezonok, radioaktív ionnyalábok)

Behatolási mélység, Bragg csúcs

Elektromos töltésű részecskék ionizáló hatásából adódó lassulás

- Nagy tömegű ionizáló töltött részecske energiaátadása egyetlen elektronnak: adiabatikus közelítés, Bethe formula. Hosszegységre eső energiaátadás függ a bejövő részecske energiájától. Kis- és nagy energiák esete.
- Elektron-elektron ütközés következtében átadott energia. Ütközés leírása. Tömegközépponti rendszer, és redukált tömeg.
- Pozitron által átadott energia, pozitronium létrejötte és szétsugárzása. Orto- és para-pozitronium.
- Behatolási mélység fogalma és használhatósága

$$R = \int 1/(\partial E/\partial x) dE$$

A gyengülési törvény alakja :

A gyengülési törvény alakja függ az egyedi kölcsönhatások valószínűségétől. A részecskét az anyagdarabban történt elnyelődéséig nyomon követjük, és nem teszünk különbséget a különböző energiájú és különböző irányokba haladó (szóródott) részecskék között.

- kis kölcsönhatási valószínűség (gamma-, neutron): *exponenciális gyengülés*

Kis kölcsönhatási valószínűség azt jelenti, hogy egy beeső részecske legfeljebb egyszer lép kölcsönhatásba az anyagdarabon belül (nagy hatótávolság), s a szóródott részecske másodszor már nem lép kölcsönhatásba.

Ekkor a részecskék számának csökkenése egyenesen arányos lesz a megtett dx úttal, valamint a beérkezett részecskék számával:

$$dI = -\mu I dx$$

Ennek az egyenletnek a megoldása az exponenciális távolságtörvény:

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

- nagyobb kölcsönhatási valószínűség (pl. elektron, pozitron): *torzult exponenciális*
 Figyelembe kell venni *néhány* kölcsönhatást (tehát azt, hogy a szóródott részecske újra kölcsönhatásba lép az anyaggal, de más energiája miatt most más lesz a kölcsönhatás valószínűsége). Az elektronnyaláb gyengülésének összehasonlítása a gamma-gyengüléssel.
- nagy kölcsönhatási valószínűség (proton, alfa, nehézion): *Bragg csúcs*
 A kölcsönhatások nagyon sűrűn következnek be az anyagban, ezért a részecske pályája mentén sűrűn ionizál, és *nagyon sok* kis lépésben adja le az energiáját. Kialakul a jellegzetes Bragg-csúcs. A Bragg csúcs helyének és kiterjedésének (straggling) meghatározása. Transzverzális és longitudinális straggling.

Az atomreaktor, mint neutronforrás

Az atomreaktor működésének fizikai alapjai

- Neutronokkal kiváltott hasadási láncreakció. Sokszorozási tényező, reaktivitás.
- Moderátor szerepe. Moderátoranyagok minősítése. Víz, nehézvíz, grafit.
- Természetes urán és urándúsítás.
- Prompt neutronok és késő neutronok. A hasadványok radioaktivitása.

Reaktorneutronok energiaspektruma és fluxusa

- Hasadási neutronok és termikus neutronok energiaspektruma. Neutronlassulás. Termikus neutronok sebességének Maxwell-Boltzmann eloszlása. Reaktorhőmérséklet szerepe.
- Fluxuseloszlás egy atomreaktor belsejében. Reflektor hatása.
- Neutronnyaláb kivételi lehetőségei atomreaktorból. Neutroncsatornák. Neutronfluxus a neutroncsatornában.

Gamma-háttér

- Az aktív zóna, mint gamma-forrás. A gamma fotonok energiaspektruma
- A felaktiválódott szerkezeti anyagok gamma-spektruma.

- Neutronbefogást követő prompt gamma-sugárzás energiaspektruma
- A gamma-háttér csökkentésének módjai

Neutron- ill. gammaszűrők

- A termikus oszlop.
- Bizmut-szűrő szerepe, felépítése és funkciói.

A BNCT fizikai alapjai (Boron Neutron Capture Therapy)

- Termikus és epitermikus neutronok kölcsönhatása a bórral



A felszabadult energia a ${}^4\text{He}$ és a ${}^7\text{Li}$ között tömegeikkel fordított arányban oszlik meg. Mindkettő nehéz, elektromosan töltött részecske, ezért erősen ionizál. Energiájukat gyakorlatilag egyetlen sejtben adják le, ezért erős sejtroncsoló hatásuk van.

- Bór bevitele tumorsejtekbe+neutronbesugárzás = szelektív tumorpusztító hatás, miközben az egészséges sejtek csak kis mértékű sugárkárosodást szenvednek az enyhén ionizáló neutronsugárzástól.
- A BNCT kutatások helyzete a világban. Elért eredmények és megoldatlan problémák (neutronbehatolás mélyen fekvő daganatokhoz, epitermikus neutronok használata, stb.)

Neutronforrások gyorsítókkal

Neutrongenerátor

- Neutronok előállítás fúziós magreakciókkal:



Mindkét reakció létrejöttéhez a deuteronokat fel kell gyorsítani 100-200 keV energiára annak érdekében, hogy a reakciópartner elektrosztatikus taszítását le tudja győzni, s a reakció végbemenjen. A felszabadult energián a keletkezett neutron és a másik reakciótermék a tömegeikkel fordított arányban osztozik.

- A neutrongenerátor felépítése: feszültségsokszorozós kaszkád gyorsító, megfelelő nyalábvezető (vákuumos) rendszerrel. A céltárgy általában fémben (titánban, cirkóniumban) oldott hidrogénizotóp (^2H ill. ^3H). A tríciumos generátor sugárvédelme külön problematikus a trícium-inkorporáció miatt.
- A keletkezett neutronok tipikus fluxusa, energiaeloszlása, és térbeli eloszlása.

Neutronok előállítása ciklotronnal

- Elektromosan töltött részecske által kiváltott neutronkeltő atommagreakciók.
- A keletkezett neutronok irány szerinti eloszlása
- A keletkezett neutronok energiaspektruma
- Orvosi alkalmazásokra alkalmas ciklotronos neutronnyalábok Európában és Magyarországon

Spallációs neutronforrás

A spalláció fogalma

- Nagy energiájú protonok nehéz atommaggal való kölcsönhatásakor nagy energiájú neutronok lépnek ki a magból nagy hozamban. Az (n, xn) reakció.

Spallációs neutronforrás felépítése

- Nagyenergiás gyorsító. Ionforrás, előgyorsító, főgyorsító.
- A gyorsított ionnyaláb energiája és intenzitása
- Spallációs céltárgy. A céltárgy felépítésével kapcsolatos műszaki problémák. Hűtés, sugárkárosodás, kezelés.
- A keletkezett neutronok energiaspektruma
- A neutronok térbeli eloszlása.
- Moderátorok és neutronnyaláb-vezetők alkalmazása a térbeli ill. energia szerinti eloszlás módosítására.
- A műszaki sugárvédelem speciális kérdései spallációs neutronforrásnál

Spallációs neutronforrás neutronnyalábjának főbb paraméterei

- A neutronnyaláb intenzitása (fluxusa)

- A neutronnyaláb energiaspektruma
- A neutronnyaláb időstruktúrája

Létező és tervezett spallációs neutronforrások Európában

A besugárzásos tumorterápia fizikai alapjai

Elektronbesugárzás

- A különböző energiájú elektronok behatolása a testszövetbe, és az ott térfogategységenként leadott energia nagysága.
- A besugárzott térfogat pontos definiáltsága.
- Elektron-sugárterápia Magyarországon. A létesítmények fontosabb paraméterei.

Gammabesugárzás

- Gamma-sugárzás behatolása a testszövetbe, és az ott térfogategységenként leadott energia nagysága.
- A besugárzott térfogat pontos definiáltsága. Különböző irányokból történt besugárzások összegzett hatása.
- Gamma-sugárterápia Magyarországon. A létesítmények fontosabb paraméterei.

Protonbesugárzás

- Különböző energiájú protonok behatolása a testszövetbe, és az ott térfogategységenként leadott energia nagysága.
- A besugárzott térfogat pontos definiáltsága. Maszkok és energiaváltók.
- Egy működő proton sugárterápiás központ fontosabb paraméterei (Louvain-la-Neuve, Belgium)

Neutronbesugárzás

- Különböző energiájú neutronok behatolása a testszövetbe, és az ott térfogategységenként leadott energia nagysága.
- A besugárzott térfogat pontos definiáltsága. Neutronmaszkok és szűrők.

- Egy működő neutron sugárterápiás központ fontosabb paraméterei (Louvain-la Neuve, Belgium)

Nehézion-besugárzás

- Különböző tömegszámú, töltésű és energiájú nehézionok behatolása a testszövetbe, és az ott térfogategységként leadott energia nagysága.
- A besugárzott térfogat pontos definiálása, felhasználva a Bragg-csúcsot. Radioaktív ionnyalábok szerepe a besugárzást megelőzően, a nyalábparaméterek pontos beállításában.
- Áttekintés a nehézion besugárzásos kutatások helyzetéről a világban. Elért eredmények és tervek.