



***Директно йонизиращи лъчения.
Инди­ректно йонизиращи лъчения***

***Доц. М. Израел
michelisrael@abv.bg***



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

През последните десетилетия се наблюдава увеличаване на използването на йонизиращите лъчения в редица отрасли на производството, науката, медицината, енергетиката и т.н. Атомната енергия внася значителен принос в прогреса и технологиите и повишава ефективността на промишленото и селскостопанското производство, медицинското обслужване, науката.

Използването на йонизиращи лъчения създава условия за замърсяване на жизнената среда и поставя много въпроси, свързани със защитата на човека от тяхното въздействие.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Нека сега дефинираме **йонизиращите лъчения**: Това са лъчения, които имат достатъчна енергия, за да йонизират средата, през която преминават.

Има различни видове йонизиращи лъчения: **вълнови фотонни лъчения** (рентгенови, γ -лъчи), както и **корпускулни йонизиращи лъчения** (α -лъчи, β -лъчи, електрони, позитрони, протони, неутрони).



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Йонизиращите лъчения се различават по маса, енергия, заряд и взаимодействат с атомите и молекулите на веществото, в което се разпространяват, причинявайки различни ефекти, основно йонизация и възбуждане.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Някои от йонизиращите лъчения (γ -лъчи, α -, β - частици) се излъчват от естествени радиоактивни вещества, намиращи се в обекти на околната среда (елементите от уран-радиевия, ториевия, плутониевия и актиновия ред). Други се излъчват от изкуствени радиоактивни елементи, получени в експериментални ядрени реактори или в енергийни ядрени устройства.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

По характера на взаимодействието си с облъчвания обект, йонизиращите лъчения се делят на директно (пряко) и индиректно (косвено) йонизиращи.

Към **директно йонизиращите лъчения** спадат заредени частици (електрони, протони, α -частици), които притежават кинетична енергия, достатъчна за осъществяване на ударна йонизация на атомите във веществото.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Към **косвено йонизиращите лъчения** се отнасят незаредени частици (неутрони, γ -фотони), които при взаимодействие с веществото освобождават пряко йонизиращи частици.

По това определение, към йонизиращите лъчения не се числят фотоните на инфрачервеното, видимото и ултравиолетовото лъчение, които могат да йонизират някои молекули, но освободените при това взаимодействие електрони не притежават достатъчно енергия, за да предизвикат ударна йонизация.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Взаимодействието на заредените частици с веществото се определя най-вече от електромагнитното взаимодействие между тях и атомните електрони. При това, частица с достатъчна енергия E ще предизвика възбуждане и йонизация на атомите на средата. Този процес се нарича удар. При ударите частицата отдава енергията си на атома, при което губи своята кинетична енергия. Възбудените атоми и молекули отделят получената при възбуждането си енергия под формата на фотони светлина или характеристично рентгеново лъчение.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Мярка за **йонизиращата** **способност** на заредените частици е тяхната линейна йонизация – броят йонни двойки, създавани на единица път в облъчваното вещество. При еднаква енергия алфа-частиците имат значително по-голяма йонизираща способност от бета-частиците.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Проникващата способност на заредената частица се определя от дълбочината на нейното проникване във веществото до изразходването на цялата и енергия. При еднаква енергия алфа частиците имат значително по-ниска проникваща способност от бета-частиците.

Пробегът на алфа-частиците във въздуха е до 10-11 cm, а в мускулната тъкан – до 0,1 – 0,13 mm. Затова алфа-частиците не представляват опасност при външно облъчване, но причиняват многократно по-големи локални лъчеви увреждания при вътрешно облъчване.

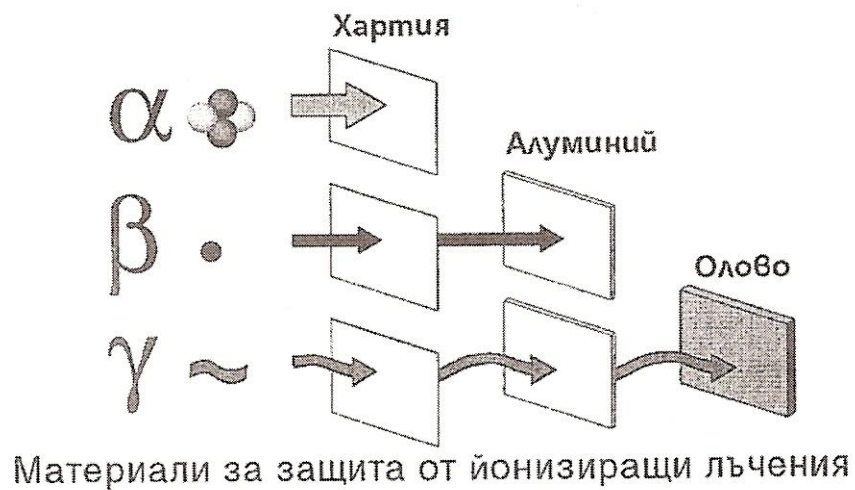


Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Пробегът на бета частиците нараства с тяхната енергия. Например, при енергия 200 keV, техният пробег в мускулна тъкан е 1 mm, а във въздух – 31 cm. При максимална енергия от 4 MeV дълбочината на проникване на бета-частиците в човешкото тяло може да достигне до 20 mm.

При външно облъчване защитата от бета-лъчи се осъществява чрез защитни екрани от пластмаса (1-2 cm) или от алуминий.

Директно и индиректно йонизиращи лъчения





Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Електромагнитните лъчения

(рентгенови, гама- и X-лъчи), наричани още ***фотонни лъчения***, имат по-малка йонизираща способност, но по-голяма проникваща способност от алфа- и бета-лъчите.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

В резултат от взаимодействието на фотонните йонизиращи лъчения с веществото техният интензитет намалява.

За определяне на степента на отслабване на лъчението и на необходимата дебелина на защитния екран се използва величината **слой на полуотслабване** $d_{1/2}$ – дебелината на слоя от определено вещество, при преминаването през който интензитетът на лъчението намалява наполовина. Слой на полуотслабване на гамалъчи с енергия 1,25 MeV (Co-60) в меките тъкани на човешкото тяло е около 20 cm.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

При рентгеновите лъчи съществува силна зависимост на степента на поглъщане от вида на биологичните тъкани. Този ефект се използва в рентгеновата диагностика. Отслабването на рентгеновото лъчение е най-голямо в костите, по-малко в меките тъкани и най-малко във въздушните кухини. Това осигурява необходимия контраст в получения рентгенов образ.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Загуби на енергия на заредените частици

При взаимодействията на заредени частици с атомите се пренебрегват вълновите им свойства и се приема, че структурата на частиците не се променя.

Тогава *механизмите на взаимодействие* се свеждат до две групи – еластично разсейване и нееластични процеси.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

При *еластичното разсейване* частиците обменят кинетичната си енергия с ядрата, с които взаимодействат и променят своята посока на движение. Предадената на ядрото енергия зависи от масата на частицата и от масата на ядрото. Така ядрото остава практически в покой при удар на електрон с енергия под няколко MeV или при удар на тежка частица, ако масата на ядрото е много по-голяма от нейната маса (тежко ядро). При еластично разсейване частиците изобщо отдават малка част от енергията си, а най-вероятно е разсейването под малки ъгли.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Нееластичните процеси на взаимодействие са тези, при които част от кинетичната енергия на частицата се превръща в други видове енергия. Ако енергията на частицата е по-голяма от енергията на йонизация, от атомите могат да бъдат откъснати един или няколко електрона. В противен случай е възможно възбуждане на атоми, последвано от излъчване на светлина (радиолуминесценция).



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Енергията на частицата, изразходвана за *йонизация и възбуждане*, се нарича общо *йонизационни загуби на енергия*. Йонизационните загуби са основният механизъм на взаимодействие при преминаване на *тежки заредени частици* (алфа-частици, протони, части от ядра) през веществото. Тогава и отделените при йонизацията електрони (δ -електрони) могат да имат значителна енергия, така че самите те да предизвикат йонизация или възбуждане.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Частта от спиращната способност, дължаща се на йонизационни загуби, се описва с различни зависимости, повечето от които са доста сложни. Те включват величини, характеризиращи веществото (плътност, атомен номер, атомна маса, йонизационен потенциал) и частицата (заряд, маса, скорост). Някои от величините са свързани помежду си и това затруднява тълкуването и прилагането на тези зависимости.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Затова с приближение се приема, че тази част на S не зависи от вида на веществото, а при ориентировъчни оценки се използват данни за алуминия. Често при сравняване на спирачната способност за различни частици с еднаква енергия, неправилно се отчита само зависимостта ѝ от квадрата на техния заряд, а не и различната им скорост. Така например, S за α -частицата не е само 4 пъти по-голяма от тази за електрона, а още около 8000 пъти, колкото е отношението на квадратите на техните скорости.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

От електродинамиката е известно, че електричен заряд, който се движи ускорително, излъчва електромагнитно лъчение с енергия, пропорционална на квадрата на ускорението. Това се отнася най-вече за електроните, които могат да отдадат цялата си енергия в един акт на взаимодействие и да спрат, като излъчат един квант електромагнитно лъчение.

Тези загуби на енергия се наричат *радиационни*, а полученото лъчение – *спирачно*.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

По този начин се получава и спирачното рентгеново лъчение – чрез забавяне и спиране на ускорените електрони в анода на рентгеновата тръба. Тежките заредени частици слабо променят енергията си и посоката на движение при удар с електрон. Те могат да придобият значително отрицателно ускорение при удар с ядро, но вероятността за това е малка.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Енергийният спектър на спиращото лъчение е непрекъснат – от нула до енергията на електроните, а броят на фотоните намалява приблизително обратно пропорционално на тяхната енергия.

Спиращото лъчение се разпространява предимно в първоначалната посока на електроните и има значително по-голяма проникваща способност от тях.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Спирачната способност на едно вещество за електрони при радиационни загуби на енергия е пропорционална на концентрацията на атомите му c , квадрата на атомния номер Z и кинетичната енергия на електроните E_k :

$$S \sim cZ^2E_k.$$



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Радиационните загуби за електрони с по-ниска енергия са значително по-малки от йонизационните – например за енергия около 1 MeV те са пренебрежимо малки, тъй като йонизационните загуби са около 95%, а загубите от еластично разсейване – около 5%. При по-висока енергия на електроните, радиационните загуби за определено вещество стават сравними с йонизационните. Тази енергия е около 10 MeV в олово и около 100 MeV във вода.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

В резултат на разгледаните по-горе процеси на взаимодействие, кинетичната енергия на заредената частица намалява и достига стойностите на енергията на топлинното движение (под 0,1 eV). С такава енергия електронът може да остане свободен, да образува йон с неутрална молекула, да рекомбинира с йон или да анихилира с позитрон.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Анихилацията на електрон и позитрон се състои в образуване на свързана система от двете частици с много кратко време на живот (от порядъка на 10^{-7} s или 10^{-10} s), наречена *позитроний*. След това масите в покой на електрона и на позитрона се превръщат в енергия на анихилационни γ - фотони.

Най-вероятният брой на тези γ - фотони е 2, и според законите за запазване на енергията и на импулса, те имат енергия по 0,511 MeV и се разпространяват в противоположни посоки. При получаване на друг брой фотони (възможен е и четен, и нечетен), сумарната им енергия също е 1,022 MeV, както беше споменато по-рано при обсъждане на рентгеновите лъчения.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Както казахме по-горе, **индиректно йонизиращите лъчения** са фотонните лъчения – рентгеновите и гама лъчи, също и неутроните. Фотонните лъчения не йонизират директно, а чрез отделените от веществото заредени частици и затова често се наричат *индиректно йонизиращи лъчения*.

Неутронните потоци също не йонизират директно, тъй като при взаимодействие с ядрата предизвикват ядрени реакции и делене на ядрата, при което се отделят заредени частици, γ -кванти и радиоактивни фрагменти.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Подобно на светлината, част от навлязлото във веществото фотонно йонизиращо лъчение се поглъща, друга част от него се разсейва, а трета преминава през обекта без изменение.

В зависимост от енергията на квантите, са възможни няколко процеса на взаимодействие: *фотоелектрично поглъщане* (вътрешен фотоефект), *комптъново разсейване* и *образуване на двойка електрон-позитрон*. За първите два процеса, освен енергията на квантите, е от значение и съотношението между тази енергията и енергията на свързване на електроните в атомите на веществото.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Фотоелектричното поглъщане на фотонните йонизиращи лъчения има еднакъв механизъм с този на поглъщането на светлината, но има и някои особености. При външния фотоефект светлинните фотони взаимодействат с валентните електрони на металите, които са отделени от атомите или са слабо свързани с тях. Тяхната енергия се изразходва за отделяне на електроните от повърхността на метала (отделителна енергия) и за придаване на кинетична енергия на тези електрони. При вътрешния фотоефект светлината предизвиква промяна в енергийното състояние на електроните във валентната зона и в зоната на електронната проводимост на полупроводниците и изолаторите.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Енергията на фотоните на рентгеновите и γ -лъчите е много по-голяма от тази на светлинните фотони и се отдава изцяло за отделяне на здраво свързаните с ядрото на атома електрони. По тази причина вероятността за фотоелектричното им поглъщане (фотоефект) е най-голяма за вътрешните електрони от К-слоя на атомите и нараства с увеличаване на атомния номер на елемента. Следователно, фотоефектът на фотонните йонизиращи лъчения се състои в *пълно поглъщане на енергията на фотона $h\nu$* (той преставя да съществува) и *отделяне на електрон* с кинетична енергия E_k (фотоелектрон) от вътрешните слоеве на атома.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Този процес е възможен, само ако , т.е. енергията на фотона трябва да е по-голяма от енергията на свързване на електрона в атома:

$$h\nu = E_i + E_k$$

Мястото на фотоелектрона в атома се заема от електрон от външните слоеве, при което се излъчва фотон характеристично рентгеново лъчение.

Горното уравнение представя законът за запазване на енергията, приложен за фотоелектричното поглъщане.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

За биологичните тъкани E_i не надвишава 0,5 keV и затова почти цялата енергия на падащия фотон се трансформира в кинетична енергия на фотоелектрона. Тъй като фотоелектронът изразходва енергията си в малък обем около мястото на възникването си, терминът фотоелектрично поглъщане в най-голяма степен съответства на характера на взаимодействието в биологичните тъкани. Характеристичното лъчение, получавано при взаимодействието в биологичните тъкани, е с много малка енергия и изцяло се поглъща в тях.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Ясно е, че фотоелектричното поглъщане зависи от вида на веществото, през което преминава рентгеновото лъчение.

Вероятността за фотоелектрично поглъщане зависи от вида на веществото, освен от енергията на квантите. Тя се изразява с *линейния коефициент на фотоелектрично поглъщане τ* . Той се дефинира като относителното намаление на мощността на енергийния преход (интензитета) ψ на фотонно йонизиращо лъчение при преминаването му през слой от определено вещество с единица дебелина, дължащо се на фотоелектрично поглъщане.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Вторият процес на взаимодействие на рентгеновите лъчи с веществото, при което те се поглъщат, е ***Комптъновото разсейване***. При този процес падащият фотон взаимодейства със свободен или слабо свързан електрон от веществото. Електронът придобива кинетична енергия $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ и се насочва в посока, сключваща ъгъл ϕ с посоката на падащия фотон; той се нарича *комптънов електрон*. Фотонът с намалена енергия $E' = h\nu'$ се разсейва под ъгъл θ и се нарича *разсеян фотон*.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Комптъново разсейване се получава, когато енергията на фотона е много по-голяма (хиляди пъти) от енергията на свързване на електрона, с който той взаимодейства ($h\nu \gg E_j$). За разлика от фотоефекта, в този случай фотонът предава само част от енергията си на електрона, който придобива кинетична енергия E_k и излита под ъгъл φ спрямо падащия фотон. Точно той е комптъновият електрон и има посока, близка до тази на падащия фотон ($\varphi \ll 90^\circ$).

Разсеяният фотон с намалена енергия $h\nu'$ се отклонява на ъгъл θ .



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

При комптъновия тип взаимодействие, при описване на закона за запазване на енергията, енергията на свързване на несвободните електрони се пренебрегва, поради малката ѝ стойност спрямо енергията на фотона.

Вероятността за комптъново разсейване се характеризира с *линейния коефициент за комптънов ефект σ* . Той е равен на относителното намаление на интензитета на първичното фотонно лъчение при преминаването му през слой от определено вещество с единица дебелина, дължащо се на комптъновия ефект.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Третият процес, при който рентгеновото лъчение се „поглъща“ от веществото е **образуването на двойка електрон-позитрон** под действието на фотони с енергия $h\nu \geq 1,022 \text{ MeV}$, попаднали в електрическото поле на ядрата на атомите.

При това енергията фотона се превръща в енергия на една новообразувана двойка електрон-позитрон. Минималната енергия E_{min} която трябва да има един фотон, за да се осъществи този процес, е равна на енергията, съответстваща на общата маса в покой на един електрон и един позитрон.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Тази енергия се определя от известната формула на Айнщайн на връзката между масата и енергията

$$E = mc^2.$$

Този вид взаимодействие се осъществява между фотоните и атомните ядра, когато падащият фотон попадне в електричното поле на ядрото, по-точно в сфера с радиус

$$\Lambda = \frac{h}{mc_0} \approx 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m.}$$



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

В резултат, фотонът изчезва, като неговата енергия се изразходва за създаването на двойката електрон-позитрон и за придаването на кинетична енергия на частиците. За образуването на двете частици е необходимо енергия, равна на сумата от енергийния еквивалент на техните маси в покой. Електронът и позитронът имат еднаква маса в покой m и оттам се получава горната стойност на енергията:

$$2mc_0^2 = 2 \cdot 0,511MeV = 1,022MeV$$



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Образуването на двойка електрон-позитрон, както казахме по-горе, е възможно при енергия на фотона $h\nu \geq 1,022 \text{ MeV}$. Над тази гранична стойност, наричана още прагова, вероятността за този вид взаимодействие се увеличава приблизително с първата степен на енергията ($h\nu - 1,022$) и плътността ρ , както и приблизително с квадрата на атомния номер на веществото. Аналогично на другите две взаимодействия, това се характеризира също с *линеен коефициент за образуване на двойка електрон-позитрон χ* .



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Общ линеен коефициент на отслабване

Както става ясно от изложеното дотук, основните процеси на взаимодействие на фотонните йонизиращи лъчения с веществото протичат с различна вероятност, която зависи от енергията на квантите и природата на веществото. При ниски енергии основна роля има фотоефектът, при средни – комптъновото разсейване, а при енергии над 10 MeV – образуването на двойки електрон-позитрон. Фотоните с още по-голяма енергия, получени в ускорителите на електрони, взаимодействат с атомните ядра и предизвикват *фотоядрени реакции*.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Такива реакции са възможни, ако енергията на фотона надвишава енергията на свързване на един нуклон в ядрото. За фотони с енергии в областта 10 – 20 MeV приносът на фотоядрените реакции в общото взаимодействие може да достигне 5 – 10%. В резултат от всички процеси на взаимодействие се получават заредени частици, разсеяни или излъчени фотони и неутрони.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Вероятността един фотон да взаимодейства с електрон или с атомно ядро от веществото се изразява чрез *общия линейен коефициент на отслабване* μ . Той се дефинира като относителното намаление (отслабване) на интензитета на фотонно йонизиращо лъчение при преминаването му през слой от определено вещество с единица дебелина. Тази вероятност за взаимодействие е сума от вероятностите за фотоелектрично поглъщане, за комптънов ефект и за образуване на двойка електрон-позитрон.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Сумата от линейните коефициенти (вероятностите) за основните процеси на взаимодействие на фотонните лъчения с веществото изразява общата вероятност за взаимодействие μ :

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa.$$

Коефициентът μ се нарича *общ линейен коефициент на отслабване*, тъй като в резултат на тези процеси интензитетът на лъчението намалява.



Директно и индиректно йонизиращи лъчения

Благодаря на вниманието!