

## ЙОНИЗИРАЩИ ЛЪЧЕНИЯ

*Йонизиращо лъчение*, наричано още *йонизираща радиация*, е поток от заредени и електронеутрални частици и фотони, които могат да йонизират веществата, през които преминават. *Йонизация* е процесът на образуване на йони от електронеутрални атоми или молекули чрез освобождаване на един или повече електрони от електронната обвивка на атома.

Йонизиращи лъчения са алфа- и бета-частиците, гама-лъчите, електроните, позитроните, протоните, рентгеновите лъчи, неутроните, тежките йони и др. Те се получават в естествени и изкуствени радиоактивни източници, в рентгенови тръби, ускорители на заредени частици, ядрени реактори и други генератори на лъчения.

Ще припомним основни понятия от атомната физика, както и основни процеси, при които се получават йонизиращи лъчения.

Веществото е съставено от атоми на различни химични елементи. Атомът е електронеутрален и е съставен от атомно ядро и електронна обвивка. Ядрото е изградено от частици с положителен заряд – протони, и електронеутрални частици – неутрони. *Нуклид* е атом с определен атомен номер  $Z$  и масово число  $A$ . Атомното ядро е съставено от  $A$  нуклони, от които  $Z$  протони и  $(A-Z)$  неутрони. Атомният номер е равен още и на броя на електроните в атомната обвивка на електронеутрален атом и отговаря на мястото на нуклида в периодичната система на химичните елементи. Протоните и неутроните са тежки частици с маса, приблизително 1800 пъти по голяма от тази на електрона. Поради това над 99,9 % от масата на атома е съсредоточена в неговото ядро.

Нуклидите се означават с  ${}^A_Z X$ , където  $X$  е символът на химичния елемент. Понякога при изписване на нуклида се изпуска атомният номер, в други случаи се изписва символът или името на химичния елемент, а след него – масовото число. Например, атом на уран с атомен номер  $Z = 92$  и масово число  $A = 235$  може да се означава по един от следните начини:  ${}^{235}_{92}U$ ,  ${}^{235}U$ , U-235 или уран-235.

*Изотопи* се наричат нуклиди с еднакъв атомен номер, т.е. на един и същ химичен елемент, които се различават по масовото число. Например водородът има три изотопа –  ${}^1H$ ,  ${}^2H$  и  ${}^3H$ , а въглеродът – осем:  ${}^9C$ ,  ${}^{10}C$ ,  ${}^{11}C$ ,  ${}^{12}C$ ,  ${}^{13}C$ ,  ${}^{14}C$ ,  ${}^{15}C$ ,  ${}^{16}C$ .

**Радиоактивност.** Някои от нуклидите притежават свойството радиоактивност. *Радиоактивност*, наричана още *радиоактивно превръщане* или *радиоактивно разпадане*, е

спонтанното изменение на масата, електричния заряд или енергията на атомните ядра, придружено с излъчване на алфа- или бета-частици или гама-лъчение. Явлението е открито от френския учен Анри Бекерел през 1896 г. и изследвано по-късно от Мария и Пиер Кюри, за което тримата учени получават Нобелова награда по физика за 1903 г.

На Земята съществуват около 339 *природни (естествени)* нуклиди, от които около 269 са стабилни, а останалите 70 притежават свойството радиоактивност и затова се наричат *радионуклиди*. Радиоактивни са изотопите на всички химични елементи от края на периодичната система след  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ , както и някои изотопи на по-леки елементи, като  ${}^{40}\text{K}$ ,  ${}^{87}\text{Rb}$ ,  ${}^{147}\text{Sm}$ ,  ${}^{152}\text{Gd}$ .

Голямо приложение във всички сфери на живота на човека имат *изкуствените (техногенните)* радионуклиди, получавани чрез ядрени реакции в ядрени реактори и ускорители, от радионуклидни генератори и др. Явлението изкуствена радиоактивност е открито през 1934 г. от френските учени Ирен и Фредерик Жолио-Кюри – Нобелови лауреати по химия за 1935 г. Досега са известни около 2700 изкуствени радионуклиди.

Трябва да се прави разлика между термините радионуклид и радиоактивен източник. *Радиоактивен източник* е тяло или вещество, съдържащо радионуклиди от един или повече вида. Радиоактивният източник обикновено съдържа и нерадиоактивни вещества. Затова е въведена величината *специфична активност* – активността на източника, на единица маса (обем, дължина, площ), измервана съответно в  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  (или напр. в  $\text{Bq}\cdot\text{ml}^{-1}$ ,  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Специфичната активност в  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$  се използва за оценка на повърхностно радиоактивно замърсяване (контаминация) на почвата, хранителните продукти и др.

*Активността*  $A$  е основна характеристика на радиоактивния източник. Тя се дефинира като отношение на средния брой спонтанни ядрени превръщания  $dN$  в радиоактивния източник, които стават за малък интервал от време  $dt$ , и продължителността на този интервал:  $A = \frac{dN}{dt}$ . Измерителната единица за активност в SI е бекерел (Bq), определяна като едно радиоактивно разпадане за секунда:  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Популярна е извънсистемната единица кюри, Ci:  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ . Кратни единици са килобекерел ( $1 \text{ kBq} = 1000 \text{ Bq}$ ), мегабекерел ( $1 \text{ MBq} = 1\,000\,000 \text{ Bq}$ ), гигабекерел ( $1 \text{ GBq} = 10^9 \text{ Bq}$ ), терабекерел ( $1 \text{ TBq} = 10^{12} \text{ Bq}$ ) и т.н. *Примери*: активността на 1 l минерална вода от Чепино е около 300 Bq; средно около 3 kBq е активността на човешкото тяло, дължаща се главно на радиоактивния изотоп на миотропния калий  ${}^{40}\text{K}$ ; между 20 и 1000 MBq е активността на

радиофармацевтиците, въвеждани в тялото на пациента при радионуклидната диагностика, а между 3,7 MBq и 9,2 GBq – при метаболитната брахитерапия при рака на щитовидната жлеза; огромна е активността на радиоактивните източници с  $^{60}\text{Co}$  в телегаматерапевтичните уредби – 220 TBq, а напоследък и 440 и 550 TBq.

Радиоактивността на естествените и на изкуствено получаваните радионуклиди се подчинява на едни и същи закони. Радиоактивното превръщане (разпадане) е спонтанен и случаен процес, който не може да се предскаже във времето. Превръщането на съвкупност от голям брой ядра се подчинява на статистически закони и се характеризира с константата на радиоактивното превръщане (разпадане)  $\lambda$ , която определя каква част от радиоактивните ядра се разпада за единица време. Измерва се в  $\text{s}^{-1}$ ,  $\text{min}^{-1}$ ,  $\text{h}^{-1}$  и т.н. Например, ако  $\lambda = 0,1 \text{ s}^{-1}$ , за 1 секунда се разпаднат 1/10 или 10 % от наличните ядра.

Законът за радиоактивното превръщане гласи, че активността на един радиоактивен източник намалява експоненциално с времето:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t},$$

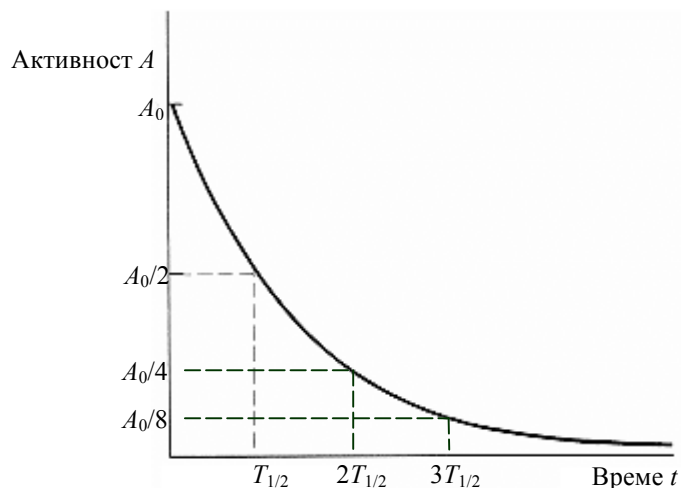
където  $\lambda$  е константата на радиоактивното превръщане (разпадане). По-често в практиката се използва величината *период на полуразпадане*  $T_{1/2}$  – времето, за което началната активност на източника намалява наполовина. Тя се измерва в единиците за време – секунда (s), час (h), година (a). Величините константа на радиоактивното превръщане и период на полуразпадане са характерни за радионуклида, а не на химичния елемент, към който той принадлежи. Радионуклиди на един и същ химичен елемент имат различни стойности на  $\lambda$  и  $T_{1/2}$ . Двете величини са свързани помежду си:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

откъдето законът за радиоактивното превръщане придобива вида:

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}.$$

Графично законът за радиоактивното превръщане се представя с експоненциална крива: след изтичане на един период на полуразпадане активността намалява 2 пъти, след два периода – 4 пъти, след 3 периода – 8 пъти и т.н. (фиг. 1). От закона следва, че теоретично активността на един радиоактивен източник никога не намалява до нула, но в практиката тя се приема такава, когато не може да бъде измерена.



**Фигура 1.** Закон за радиоактивното превръщане (разпадане)

Периодът на полуразпадане на радионуклидите варира в много големи граници: от части на секундата до милиарди години. Радионуклидите с малък период на полуразпадане се наричат *краткоживеещи*, а тези с голям период на полуразпадане – *дългоживеещи*. Няколко примера:  $T_{1/2}({}^{214}\text{Po}) = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ ;  $T_{1/2}({}^{99\text{m}}\text{Tc}) = 6,02 \text{ h}$ ;  $T_{1/2}({}^{238}\text{U}) = 4,47 \cdot 10^9 \text{ a}$ ;  $T_{1/2}({}^{60}\text{Co}) = 5,27 \text{ a}$ .

Йонизиращите лъчения се делят на три групи: *заредени частици* (алфа- и бета-лъчи, протони, тежки йони, мезони и др.), *електронеутрални частици* (неутрони) и *фотони* (рентгенови, гама-лъчи и X-лъчи).

*Алфа-лъчите* ( $\alpha$ -лъчите) са ядра на хелий (He), които се излъчват при радиоактивно превръщане на ядрата на химичните елементи, по-тежки от оловото ( $Z = 82$ ) – полоний, радий, радон, торий, уран, плутоний и др., или се образуват при ядрени реакции. Алфа-частицата има положителен електричен заряд. Енергията на алфа-частиците на естествените радионуклиди е от 2 до 12 MeV.

*Бета-лъчите* ( $\beta$ -лъчите) са електрони или позитрони, образувани при радиоактивно превръщане на ядрата на химични елементи от цялата периодична таблица от най-леките, до най-тежките – водород, натрий, калий, йод, иридий, уран и др. Бета-частицата е около 7300 пъти по-лека от алфа-частицата. Бета-частиците имат максимална енергия от десетки keV до около 3,3 MeV.

Другите видове заредени частици – протони, тежки йони, мезони и др. – се получават при различни ядрени реакции.

*Неутроните* са тежки частици без електричен заряд с маса, приблизително равна на тази на протона. Неутроните се получават чрез различни ядрени реакции, при бомбардиране

на атомни ядра със заредени частици или фотони. Нeutрони се отделят и при спонтанното делене на тежки ядра – на уран, торий, плутоний и др. Получават се в ядрени реактори, неутронни генератори или източници на неутрони.

Фотонните йонизиращи лъчения са електромагнитни лъчения с енергия  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ,

където  $\nu$  е честотата,  $\lambda$  - дължината на вълната,  $h$  – константа на Планк, а  $c$  - скоростта на светлината във вакуум. Връзката между енергията (в електронволти, eV)\*, дължината на вълната (в метри, m) и честота (в херци, Hz) е:

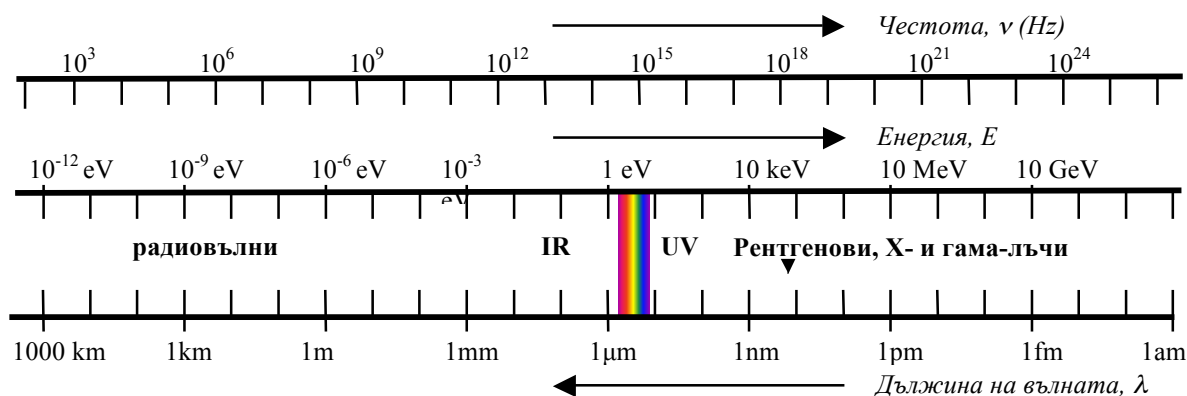
$$E \approx 4,1 \cdot 10^{-15} \nu \approx \frac{1,2 \cdot 10^{-6}}{\lambda}.$$

Спектърът на електромагнитните лъчения е много широк – радиовълни, инфрачервена светлина (IR), видимата светлина, ултравиолетовата светлина (UV), рентгеново, гама-и високоенергийно спирачно лъчение (X-лъчи) (фиг. 2). Йонизиращи лъчения са рентгеновото, гама- и X-лъчите. Видимата светлина, IR, UV и радиовълните нямат достатъчна енергия да йонизират веществото и затова не са йонизиращи лъчения. Обръщаме внимание, че рентгеновите и гама-лъчите се различават по начина на получаването си, но имат еднакви свойства. Те се прекриват в долната част на енергийния спектър до около 450 keV.

Гама-лъчението се получава при радиоактивното разпадане на някои атомни ядра, когато новополучените ядра, наричани дъщерни, са във възбудено състояние. При преминаването на ядрото в основно състояние излишъкът от енергия се излъчва под формата на фотон гама-лъчи. Гама-лъчите имат точно определена една или няколко енергии, характерни за радионуклида, т.е. техният спектър е линеен. Енергията на гама-лъчите е в обхвата от около 10 keV до около 3,5 MeV.

---

\* · Електронволт eV е извънсистемна единица за енергия;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .  
 $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$ ;  $1 \text{ MeV} = 1\,000\,000 \text{ eV}$ .



**Фигура 2.** Спектър на електромагнитните лъчения

Рентгеновото лъчение е електромагнитно лъчение с енергии на фотоните между 124 eV и 420 keV. То възниква при рязкото спиране на ускорени електрони в метални мишени. Най-широко разпространеният източник на рентгеново лъчение е рентгеновата тръба – електровакуумно устройство с два електрода – катод и анод. Катодът е нажежаема жичка от волфрам, излъчваща електрони, които се ускоряват в електрично поле и бомбардират мишена (анод) от вещество с относително голям атомен номер и висока температура на топене (най-често волфрам). Рентгеновата тръба е източник на два вида рентгеново лъчение – спирачно и характеристично, които се различават по механизма на получаване и по своя спектър. *Спирачното рентгеново лъчение* има непрекъснат спектър. Максималната енергия на фотоните в неговия спектър се определя от ускоряващото напрежение в рентгеновата тръба. В зависимост от приложението се използват ускоряващи напрежения от няколко киловолта до стотици киловолта. По-ниски напрежения (10-60 keV) се използват при рентгенови изследвания на меки тъкани, напр. млечна жлеза, или за лъчелечение на кожен рак. Рентгеновото лъчение, получавано при ускоряващи напрежения от 60 до 150 keV, има по-голяма енергия и по-голяма проникваща способност, поради което се използва най-широко в диагностиката. По-високи напрежения (150 – 300 kV) се използват в т.нар. дълбока рентгенова терапия. Рентгеновите лъчи се използват и в безразрушителната дефектоскопия.

Освен рентгеновите тръби, източник на спирачно лъчение са и медицинските ускорители на електрони, в които бомбардиращите мишената електрони се ускоряват до енергии между 4 и 25 MeV. Това високоенергийно спирачно лъчение, използвано в лъчелечението, се нарича X-лъчи.

Характеристичното рентгеново лъчение има прекъснат спектър, т.е. енергията на фотоните има определени дискретни стойности, характерни за веществото, от което е направена мишената. То възниква при преходи на електрони от по-външни към по-вътрешни електронни слоеве на атомната обвивка. Интензитетът на характеристичното лъчение, получавано в медицинските рентгенови тръби и в ускорителите, е по-нисък от този на спирачното лъчение. Изключение са рентгеновите тръби за мамография с анодна мишена от молибден, при които приносът на характеристичното лъчение в спектъра е съществен. Характеристичното рентгеново лъчение се използва в промишлеността за рентгеноструктурен и рентгенофлуоресцентен анализ.

Рентгеновото лъчение е открито през 1895 г. от германския физик Вилхелм Конрад Ръонтген, който изучава свойствата му и е първият, който показва възможността за получаване на образ на структурите на човешкото тяло върху флуоресциращ екран или фотографска плака. Образът се дължи на нееднаквата степен на отслабване на рентгеновото лъчение в различните тъкани (фиг. 3).



а)



б)

**Фигура 3.** Първите образи на анатомични структури, получени от В. К. Ръонтген

а) рентгенова снимка на ръката на г-жа Ръонтген, направена на 22 декември 1895 г.;

б) рентгенова снимка на ръката на проф. Кьоликер, направена от Ръонтген по време на лекцията му пред Физико-медицинското дружество във Вюрцбург на 23 януари 1896 г.