

1. ПРЕДАВАЊЕ

ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ И РАДИОАКТИВНОСТ

Зрачење се класификује у две главне категорије: нејонизујуће и јонизујуће, у зависности од способности да јонизује материју. Јонизациони потенцијал атома, тј. минимална енергија која може да изврши јонизацију атома, је у опсегу неколико eV за алкалне елементе до 24.5 eV за хелијум. Нејонизујуће зрачење не може да јонизује материју, док јонизујуће зрачење врши јонизацију материје директно или индиректно.

ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ

Основни појмови

Под јонизујућим зрачењем подразумева се било које зрачење, које, у интеракцији са материјалном средином доводи до стварања електричних наелектрисања оба знака. Јонизујуће зрачење је флукс брзих наелектрисаних и (или) ненаелектрисаних честица. Говорећи о интеракцији зрачења и средине, има се у виду интеракција тих честица са материјом средине у којој се простире зрачење. Разликује се непосредно и посредно јонизујуће зрачење.

Непосредно јонизујуће зрачење се састоји из наелектрисаних честица, чија је кинетичка енергија довољна да се у сударима са атомима материје догоди јонизација. Примери таквих зрачења су α , β зрачења радиоактивних нуклида, протонско зрачење на акцелераторима и др.

Посредно јонизујуће зрачење се састоји из ненаелектрисаних (неутралних) честица чија интеракција са материјом доводи до стварања наелектрисаних честица које су даље способне да непосредно изазивају јонизацију.

Пример посредно јонизујућих зрачења може бити неутронско зрачење, које је флуks неутрона и фотонско зрачење које је у ствари електромагнетско јонизујуће зрачење.

Јонизујуће зрачење које се састоји од честица једне врсте исте енергије, назива се моноенергетско зрачење.

Јонизујуће зрачење које се састоји од честица једне врсте разних енергија је немонаенергетско. Такво је, на пример β зрачење радиоактивних нуклида пошто се оно састоји од честица различитих енергија. Немонаенергетско је и закочно зрачење; моноенергетско зрачење је на пример карактеристично рендгенско зрачење.

Зрачење, које се састоји од честица разних врста се назива мешано.

У зависности од карактера распрострања у простору разликујемо управљена и неуправљена зрачења. Управљена зрачења имају одредјени правац простирања. Ово треба схватити на такав начин да у једној тачки простора зрачење долази само из једног правца. На пример, зрачење једног тачкастог извора у вакуму и колимирани сноп зрачења са акцелератора у вакуму су управљена зрачења. Ако би се та зрачења распростирала, не у вакуму већ у некој расејавајућој средини, то би строго говорећи постојало неуправљено зрачење јер би расејано зрачење долазило у неку тачку простора из разних правца. Ако разматрамо, не један, већ два тачкаста извора у вакуму, а који се не налазе на истој линији као и тачка посматрања онда зрачење у ту тачку стиже из два правца и не може се сматрати управљеним.

У неуправљеним зрачењима понекада је могуће издвојити доминантан правац простирања. У посебном случају симетрично распоредјених тачкастих извора у односу на тачку посматрања могуће је издвојити више равноправних доминантних правца. Медјутим, ако су такви извори довољно густо и равномерно распоредјени у простору, онда сви правци простора постају равноправни. У том случају зрачење је изотропно.

Зрачење се распростире у простору и времену. Према карактеру временског простирања разликујемо непрекидно и импулсно зрачење. Ово су два крајња случаја простирања зрачења у времену. Зрачење можемо да сматрамо непрекидним

ако се његове карактеристике остају непромењене у разматраном интервалу времена. Међутим, карактеристике зрачења се могу мењати у посматраном интервалу времена. Импулсно зрачење траје знатно краће време од времена посматрања. Критеријум «знатно краће» одредјује се у сваком конкретном случају.

Најопштије речено, под зрачењем се подразумева зрачење природног и вештачког порекла.

Природно зрачење

Природно зрачење се према пореклу може груписати у три групе, и то :

- космичко зрачење, које потиче од Сунца и из космичког простора и састоји се од врло брзих наелектрисаних елементарних и других честица;

- космогени радионуклиди који се стварају дејством космичког зрачења и атмосфере, на пример ^{14}C и

- примордијални праисконски радионуклиди који су створени у тренутку стварања космоса, али је њихово време полураспада толико велико да се нису распали до сада. То су радионуклиди који припадају природним радиоактивним серијама (^{232}Th , ^{238}U и ^{235}U) и ^{40}K . Уз те, касније је вештачки формирана нептунска фамилија. Низови које се јављају у природи настају од језгара чији је живот дуг у поредјењу са старошћу Земље. Нептун има релативно кратак живот, али је најдуже живећи члан тога низа. Сваки се низ завршава стабилним изотопом, који је у ствари крајњи члан; полазни и крајњи чланови низова су дати у Табели 1.1.

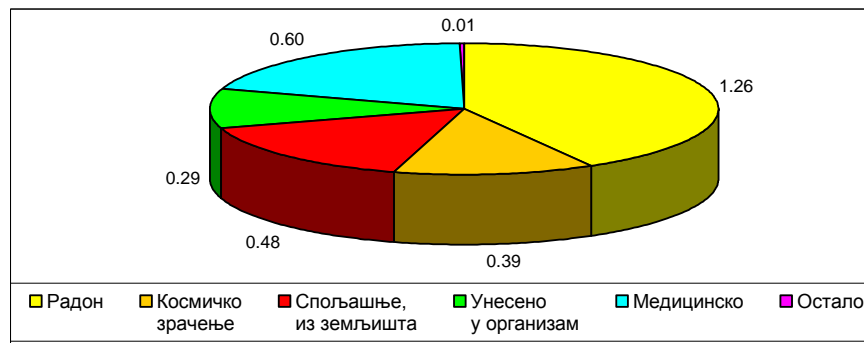
Природни радиоактивни низови се завршавају изотопима олова.

Природно зрачење у земљишту потиче од хомогено расподељених радионуклида природних радиоактивних низова уранијума ^{238}U и торијума ^{232}Th као и од изотопа калијума ^{40}K . На појединим местима са нарочито радиоактивним стенама или тлом дозе су знатно више од просека, а на другим местима су пак знатно ниже. Коришћење посебног грађевинског материјала за куће, кување на плину, отворено огњиште на коме сагорева угаљ, облагање куће изолационим материјалима - све то знатно повећава природно озрачивање. Иако су сви

становници Земље изложени природном зрачењу, неки приме много већу дозу него други, што зависи од тога где ко живи. Генерално говорећи, земаљски извори су одговорни за највећи део човекове изложености природном зрачењу (Слика 1.1).

Табела 1.1 Полазни и крајњи чланови радиоактивних низова

<i>Име низа</i>	<i>Масени број</i>	<i>Полазно језгро</i>	<i>Полуживот</i>	<i>Крајњи члан</i>
Торијумски	4n	^{232}Th	1.4×10^{10}	^{208}Pb
Уранско-радијумски	4n + 2	^{238}U	4.5×10^9	^{206}Pb
Уранско-актинијумски	4n + 3	^{235}U	7.2×10^8	^{207}Pb
Нептунски	4n + 1	^{237}Np	2.2×10^6	^{209}Bi



Слика 1.1. Дозе зрачења које прима становништво из различитих извора (mSv), UNSCEAR¹ 2008 [1].

Прецизније, у Табели 1.2. наведено је у којој мери поједини извори природног зрачења доприносе ефективној годишњој дози.

¹ Научни комитет Уједињених нација о ефектима атомског зрачења (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

Табела 1.2. Годишња ефективна доза од природних извора зрачења
(mSv по години) - UNSCEAR 2008.

	Извор зрачења	Ефективна годишња доза	
		Средња	Уобичајени
Космичко зрачење	Директно јонизујућа и	0,28	
	Неутронска компонента	0,10	
	Космогени радионуклиди	0,01	
	Укупно космичко и	0,39	0,3-1,0 ²
Спољашње земаљско зрачење	Спољашње	0,07	
	Унутрашње	0,41	
	Укупно спољашње	0,48	0,3-1,0 ³
	земаљско зрачење		
Удисањем	²³⁸ U и ²³² Th низ	0,006	
	Радон (²²² Rn)	1,15	
	Торон (²²⁰ Rn)	0,10	
	Укупно излагање	1,26	0,2-1,0 ⁴
	удисањем		
Уношењем у организам	²³⁸ U и ²³² Th низ	0,12	
	⁴⁰ K	0,17	
	Укупно излагање	0,29	0,2-1,0 ⁵
	уношењем у организам		
Укупно		2,4	1,0-3,0

На основу процена UNSCEAR из 2008. године, просечна примљена доза по становнику износи 2,4 mSv годишње. Највеће дозе зрачења добијају становници Земље удисањем радона ²²²Rn и торона ²²⁰Rn (1,26 mSv по години). Наредни већи део потиче од зрачења ⁴⁰K и одређених потомака уранијумовог и торијумовог низа (0,29 mSv по години).

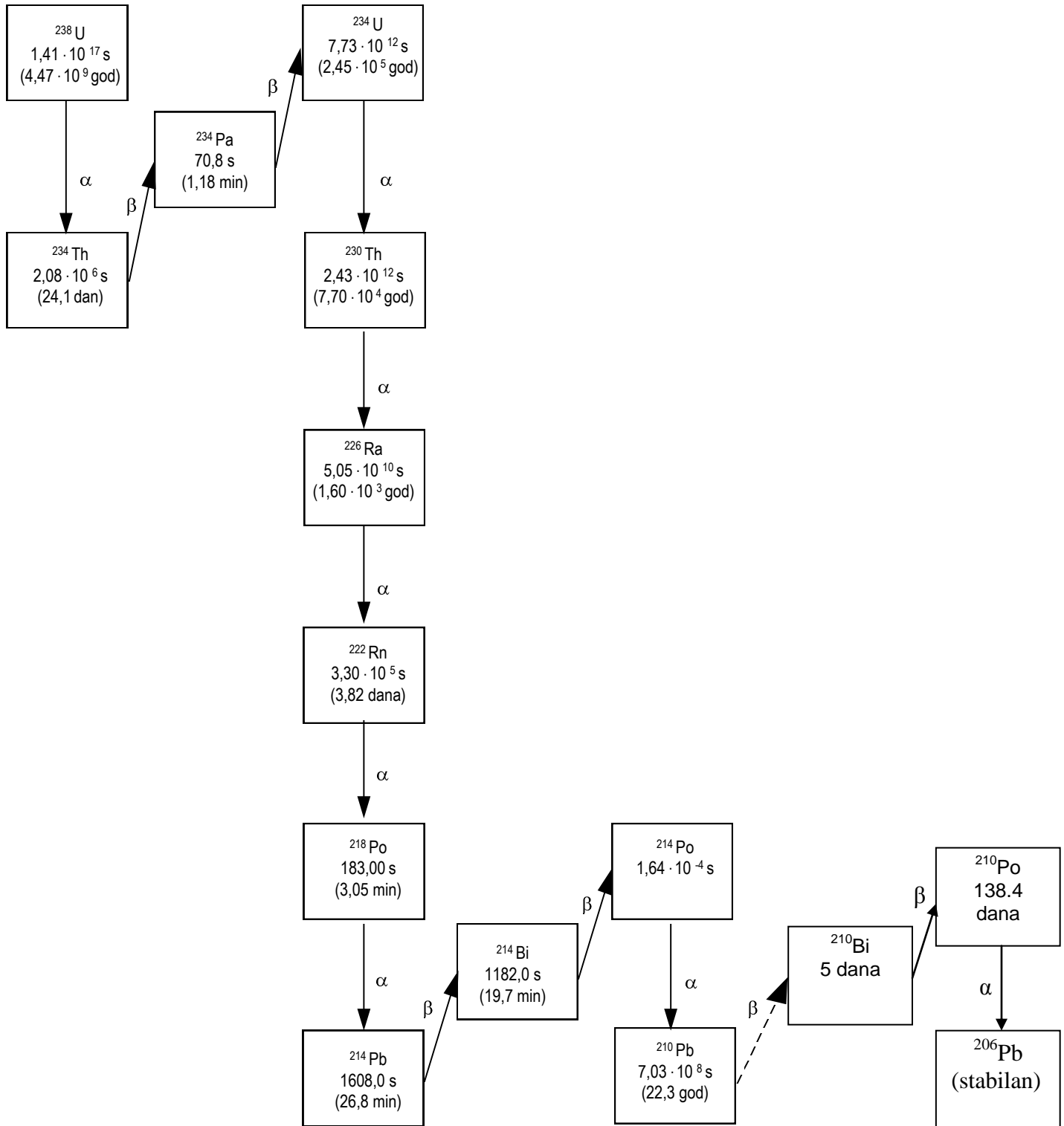
² Зависно од надморске висине (од нивоа мора до врхова планина).

³ Зависно од радионуклида у тлу и у грађевинском материјалу.

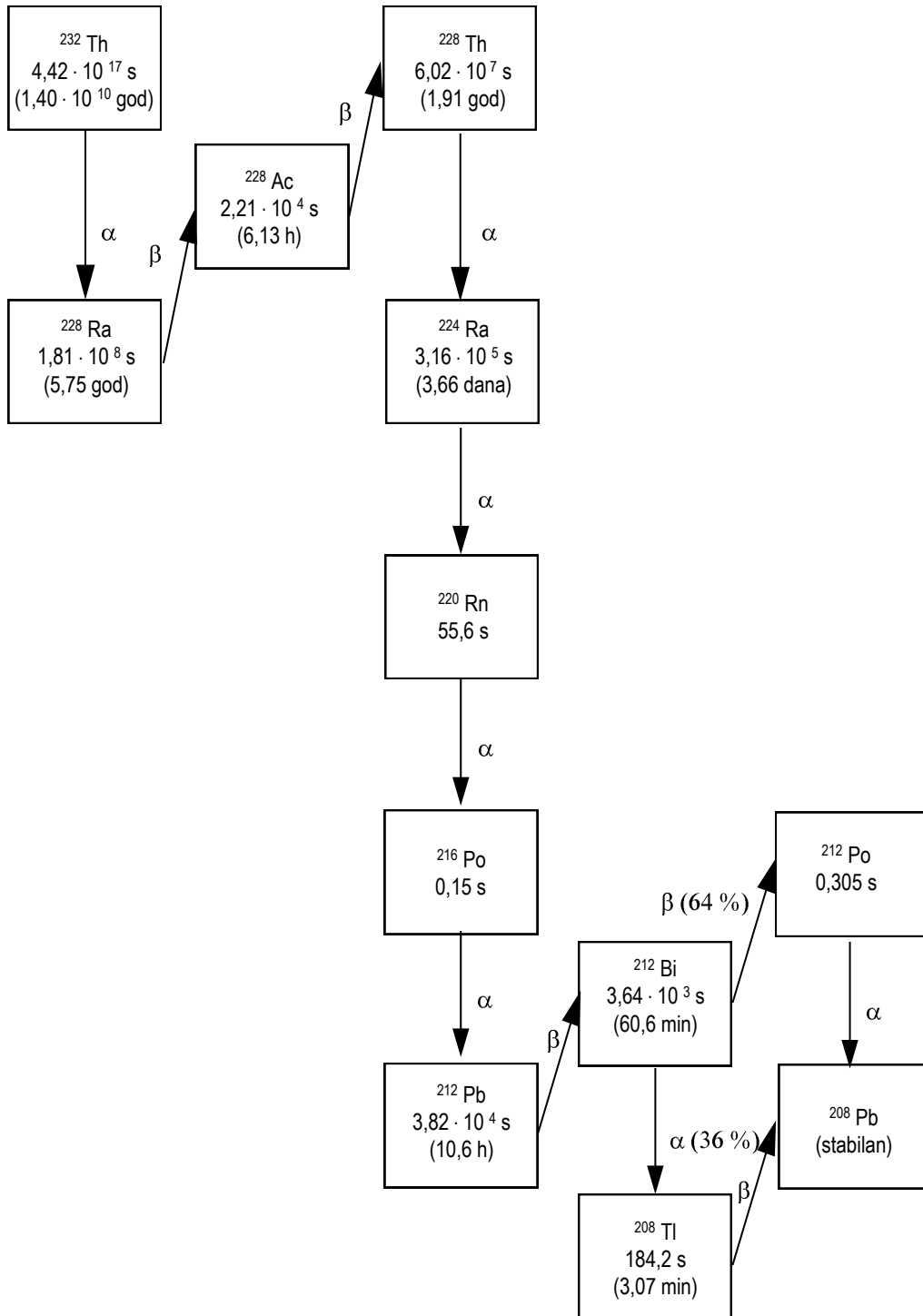
⁴ Зависно од концентрације радона унутар објеката.

⁵ Зависно од радионуклида у храни и води за пиће.

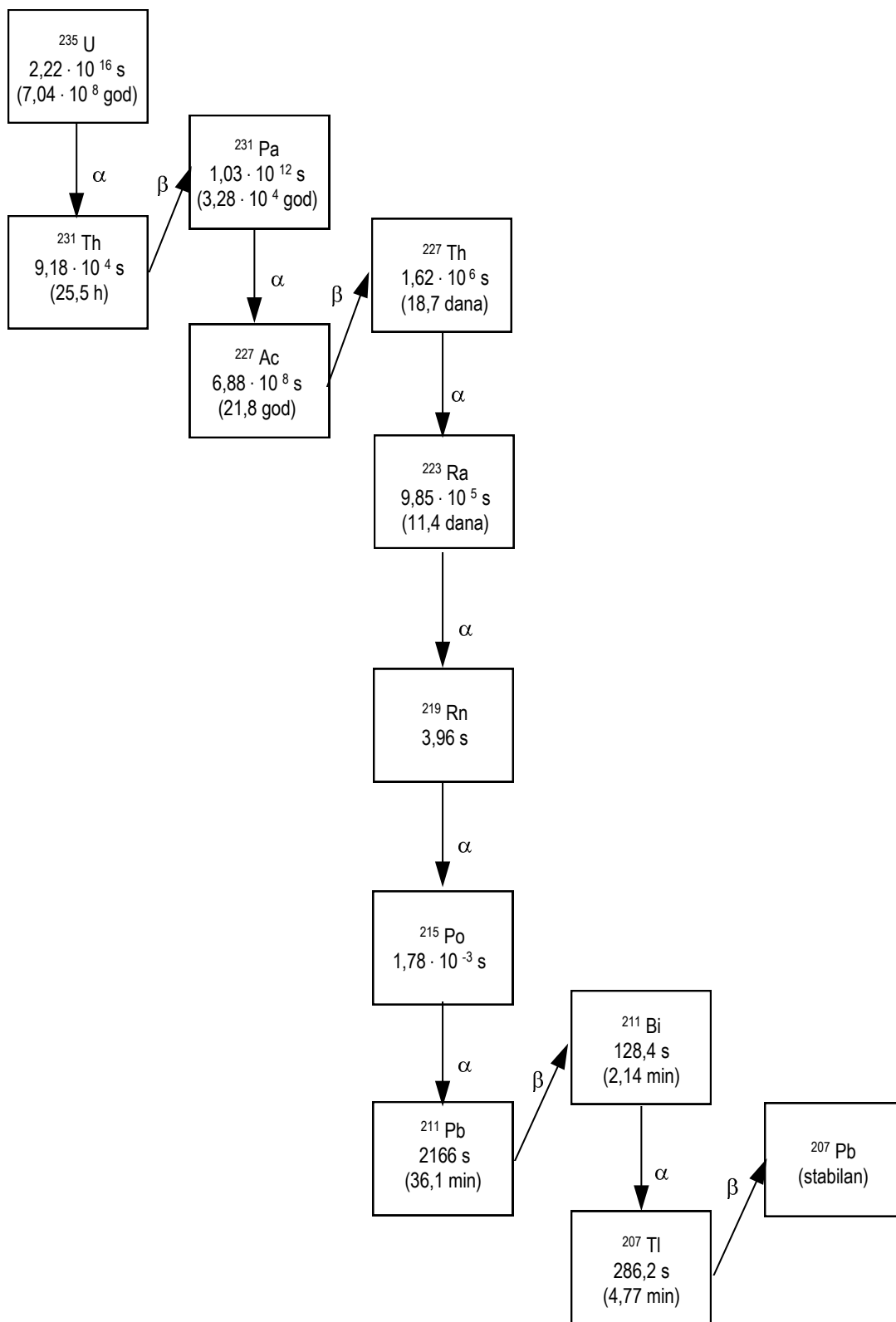
На сликама 1.2. до 1.4. су приказани радиоактивни низови са временима полураспада и основним зрачењем њихових чланова.



Слика 1.2 Уранов низ



Слика 1.3 Торијумов низ



Слика 1.4 Актинијумов низ

Са слика 1.2 до 1.4 се види да је у сва три радиоактивна низа присутан радон, али не са подједнаком важношћу за радијациони ризик људи услед излагања њему и његовим потомцима. Радон је радиоактивни хемијски елемент који, у периодном систему елемената, припада групи племенитих, инертних гасова.

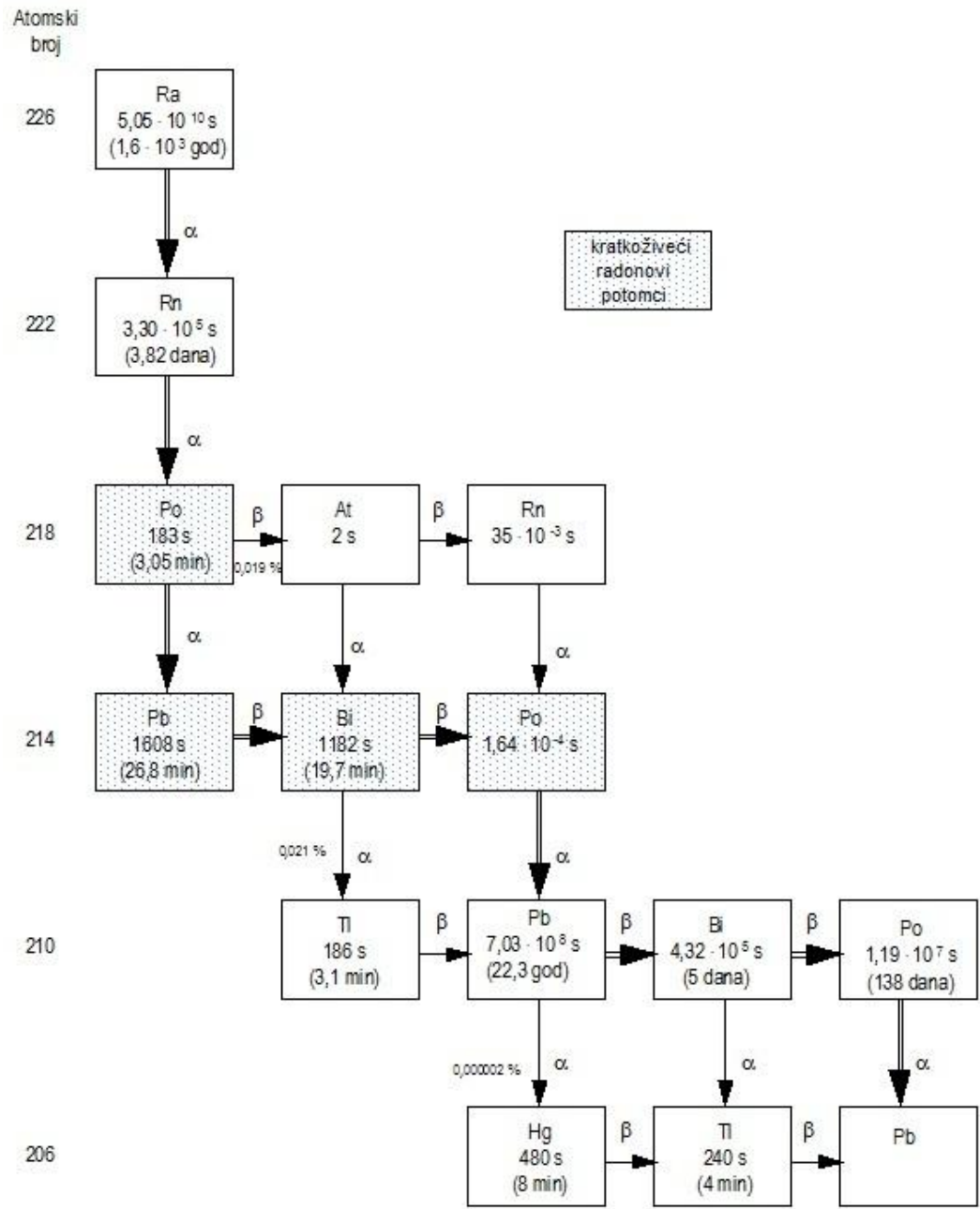
У природи се налази у елементарном облику, јер не гради никаква једињења због своје хемијске инертности. Настаје распадом радијума у тлу и разним материјама, одакле се дифузијом и конвекцијом преноси у ваздух и водене токове. Спонтано се радиоактивно распада, а његови краткоживећи потомци се дисањем уносе у респираторни тракт, где се делимично талоче. Ту радонови потомци емитују α и β зрачење, које изазива оштећење осетљивих ткива у људском организму.

Радионуклид ^{219}Rn (који се назива и актинон) је члан актинијумовог низа (Слика 1.4); мало време полураспада од 3,96 s му ограничава могућност миграције кроз средину. Томе доприноси и релативно ниска концентрација његовог претка, ^{235}U , у природном окружењу.

Већу могућност распрострањања у животној и радној средини има ^{220}Rn (са посебним називом торон); припада торијумовом низу (слика 1.3) и има време полураспада 55,6 s. У географским регионима са богатим садржајем торијума у тлу, он може знатно допринети радијационој дози код људи. Такође значајан извор торона могу бити градјевински материјали.

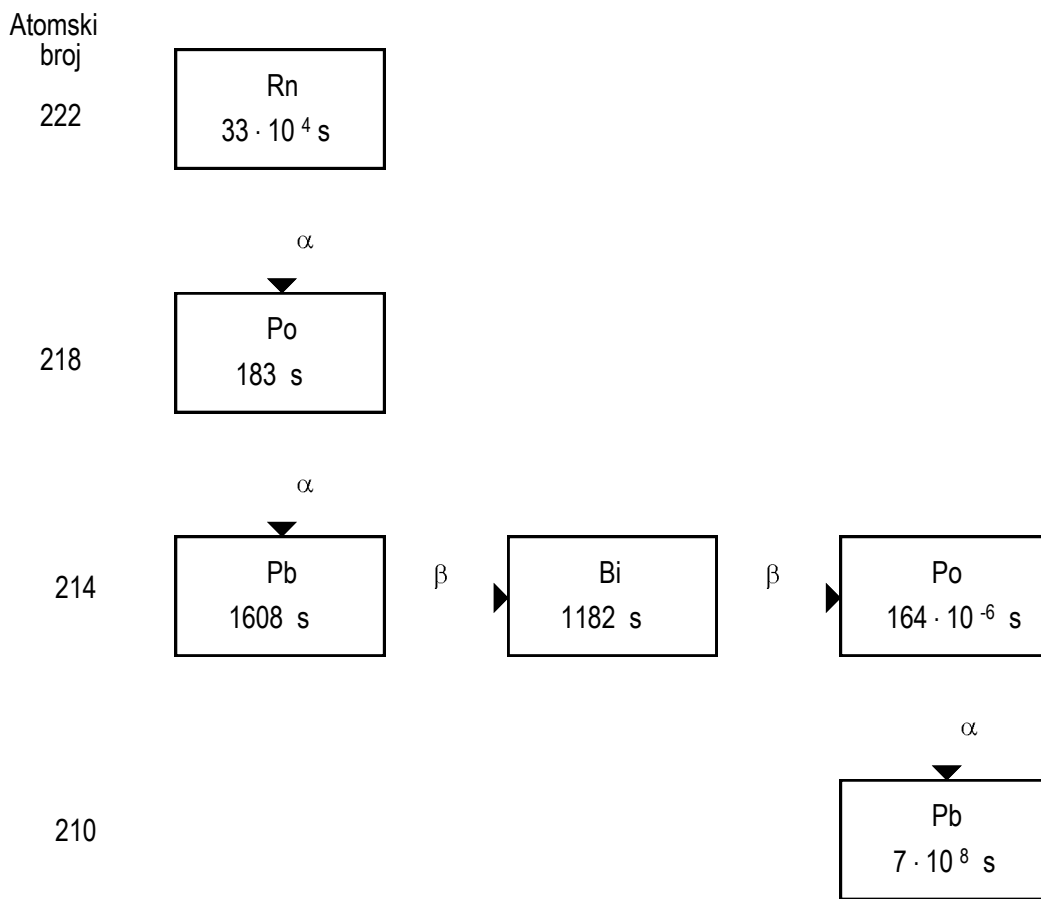
Ипак, највећу важност за радијациони ризик има изотоп ^{222}Rn . Он припада урановом низу (слика 1.2) и од свих изотопа ^{222}Rn има најдуже време полураспада од $3.3 \cdot 10^5$ s (3,825 дана). Присутан је у Земљиној атмосфери у свим географским областима, јер његови претходници (^{226}Ra и ^{238}U) прожимају саму Земљину кору. Када се у процесима радиоактивних распада формирају атоми ^{222}Rn , они путем дифузије "обезбеђују" своју присутност у људском окружењу. За људску популацију, мерења радона имају кључну улогу у мониторингу људског здравља и безбедности у затвореним просторијама, (^{222}Rn).

Распад ^{222}Rn , са могућим гранама у низу, приказан је шематски на слици 1.5.



Слика 1.5. Ланац распада ^{222}Rn , са временима полураспада, основним зрачењем и вероватноћом прелаза

Шема распада ^{222}Rn се може поједноставити ако се занемаре распади $^{218}\text{Po} \rightarrow ^{218}\text{At}$ и $^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Tl}$, који се догађају са врло малом вероватноћом ($< 0,02\%$), и ако се шема распада »скрати« код ^{210}Pb , које има дуго време полураспада од $7 \cdot 10^8 \text{ s}$ (22 године) и мали утицај на радијациони ризик. Онда су од радијационог значаја само три радионуклида, који су и алфа емитери: ^{222}Rn , ^{218}Po и ^{214}Po . Треба назначити да је ^{214}Po , због свог врло кратког времена полураспада од $164 \mu\text{s}$, увек у радиоактивној равнотежи са ^{214}Bi . Упрошћена шема распада ^{222}Rn дата је на Слици 1.6.



Слика 1.6 Поједностављена шема распада ^{222}Rn

У Табели 1.3 су приказане неке физичке особине ^{222}Rn и његових краткоживећих потомака, који имају утицај на контаминацију атмосфере и људи.

Табела 1.3. Физичке особине ^{222}Rn и његових краткоживећих потомака

Елемент	Историјски симбол	Основна радијација	Енергија распада [$1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$]=[MeV]	Време полураспада [s]	Број атома по Bq
^{226}Ra	Ra	α	4,8	$51 \cdot 10^9$	$7,4 \cdot 10^{10}$
^{222}Rn	Rn	α	5,5	$33 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^5$
^{218}Po	RaA	α	6,0	183	$2,6 \cdot 10^2$
^{214}Pb	RaB	$\beta\gamma$	1,0max	1608	$2,3 \cdot 10^3$
^{214}Bi	RaC	β,γ	3,3max	1182	$1,7 \cdot 10^3$
^{214}Po	RaC	α	7,69	$164 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$

Као што је већ речено, ^{226}Ra је члан радиоактивног низа ^{238}U , који је у траговима присутан у готово свим природним материјалима. Распадом ^{226}Ra формира се ^{222}Rn . Атоми ^{222}Rn су хемијски инертни, те као слободни атоми могу да дифундују кроз материјал у којем су створени. Један део атома ^{222}Rn се распадне још пре досезања атмосфере, док други део успе да пређе у атмосферу. Стога у атмосфери увек постоји одређена концентрација радона и његових краткоживећих потомака. Може се усвојити гледиште о природној "контаминираности" атмосфере радоном.

Распадом језгара ^{222}Rn настају краткоживећи радонови потомци: ^{218}Po (RaA), ^{214}Pb (RaB), ^{214}Bi (RaC) и ^{214}Po (RaC'). Дугоживећи ^{210}Pb се не узима у обзир. Највећи део дозе коју човек, односно његов респираторни тракт, прими од удахнутог радона (^{222}Rn), не потиче од самог гаса радона, већ од његових краткоживећих потомака.

Аеросоли којима су припојени краткоживећи радонови (^{222}Rn) потомци у атмосфери настају у два сукцесивна корака. Непосредно након распада ^{222}Rn , свеже формиран атом ^{218}Po се врло брзо (за мање од 1 s) везује са молекулима водене паре који се налазе у атмосфери, формирајући кластере који расту до форме честица, величине око 1 nm. Оваква форма потомака радона се води као невезана (унаттацхед) или слободна фракција. За ову моду аеросола карактеристична је вредност дијаметара у опсегу (0.5 nm до 3.5 nm).

Након тога, могуће је припајање ових кластера постојећим честицама аеросола у атмосфери, у току наредних 100 s, чиме долази до формирања тзв. везане (аттачед) или припојене фракције.

Од великог је значаја познавање понашања радонових потомака у атмосфери, јер је њихов допринос радијационом здравственом ризику већи него од самога радона. Они из атмосфере, путем дисања, доспевају у плућа. Ту се распадају уз емисију високоенергетских алфа честица. Као резултат тих процеса може доћи до оштећења ћелија које граде дисајне путеве. У крајњем случају, ова ћелијска оштећења могу, довести до појаве плућног канцера.

ISTORIJSKI PREGLED ZDRAVSTVENE PROBLEMATIKE RADONA

Међу првим радиоактивним елементима, које је човек спознао, налази се радон. Та спознаја потиче са почетка овог века. Међутим, знатно пре фактичког открића радона, уочено је дејство његовог зрачења на здравље човека.

Наиме, историјски корени здравствене проблематике радона потичу још из XV века. Из тог периода потичу Агриколини рукописи о необично високом морталитету рудара у подземним рудницима метала у планинама Ерц, у Средњој Европи (NRC, 1991). Узрок смрти су биле болести респираторних органа и представљале су, вероватно, комбинацију плућног канцера, силикозе и туберкулозе, што су иначе, уобичајена обољења код рудара. Ове болести су једним именом означене као "горска болест" (Bergkrankheit).

Око 1470. године почело се са обилнијом експлоатацијом руде сребра у региону Шнеберг (Schneeberg) у Саксонији (Saxony, Germany), на северним падинама тзв. Рудних Планина (Mine Mountain). У исто време отворен је рудник сребра и на јужним обронцима истих планина, и то у чешком градићу Јоачимов. У Јоачимов-у се копала руда на површини или близу површине земље, док су копови у Schneeberg-у били дубински, на дубинама већим од 400 m.

Почетком XVI века примећена је висока смртност млађих рудара у региону Schneeberg. Узрок смрти су биле болести плућа. Записи о томе потичу од Paracelsus-а који је ову болест назвао "рударска болест". Њен други назив је "Schneeberg плућна болест". Учестаност појаве ове плућне болести је расла са повећањем времена проведеног у руднику.

Године 1879. објављени су јавности налази аутопсија код рудара из области Schneeberg (Harting and Hesse, 1879). Изнета је чињеница да је 75 % рудара умрло од плућног канцера. Овај проценат је био знатно мањи код рудара из Јоачимов-а. Прихваћено је мишљење да је плућни канцер инициран удисањем металне прашине, која садржи различите метале и арсеник.

Године 1898. Марја и Риерге Сурие су екстраховали ^{222}Ra и ^{210}Po из руда из Јоачимов-а. Такозвана "радијумова еманација" је названа, касније, радон. Радон је

идентификован као радијумов племенити гас, који настаје радиоактивним распадом радијума.

Почетком XX века (1901. год.) Elster и Geitel су почели са мерењем радона у рудницима у Schneeberg-у и Joachimov-у. Показало се да у атмосфери рудника постоји висок садржај радона (од 70 kBq/m³ до преко 500 kBq/m³). Директор рудника у Zwickau-у, извесни Muler, је први уочио узрочну везу радона и плућних канцера.

Ипак, није генерално прихваћено да је радон узрочни фактор за учестале плућне канцере у Schneeberg-у. Радон је сматран само могућим узроком ових фаталних здравствених исходишта. Такође, није постављена ма каква квантитативна веза између изложености људи радону и плућних канцера. Још није била уочена ни улога коју имају удахнути краткоживећи радонови потомци.

Касније патолошке студије су показале да рудари имају повећан број примарног карцинома плућа (Arnstein, 1913), (Rostoski et al., 1926). Епидемиолошке студије из 30-их година овог века су, такође, означиле радон као важан чинилац у повећаном броју плућних канцера код рудара (Pirchan and Sikl, 1932).

Након другог светског рата почело се са интензивном експлоатацијом уранове руде у многим земљама: Белгијском Конгу, Канади, САД, СССР-у, Источној Немачкој, Француској итд. У том периоду, који се, иначе, назива раном фазом рударства урана, посвећивало се врло мало пажње радиолошкој заштити рудара. Веровало се, наиме, да је у овим новоотвореним рудницима присутан много нижи ниво радона него у старим рударским коповима. Ово гледиште није било тачно.

Поред тога, није успео ниједан од покушаја да се плућни канцер објасни утицајем удахнутог радона, самог по себи.

Тек је 1951. год. William Vale објављивањем свог, "Бале-овог меморандума" изнео идеју да узрочни агенти за плућни канцер могу бити радонови потомци, а не сам гас радон (Vale, 1980). Наиме, недвосмислено је показано да удахнути радон и његови потомци емитују алфа честице у људском респираторном тракту, што изазива оштећења ткива и појава канцера.

У годинама које су долазиле спроведене су експерименталне студије о депозицији и ретенцији радонових потомака у плућима. Те студије су омогућиле и квантитативну процену алфа дозе у бронхијалном епителу.

Ове студије су за последицу имале развој поузданијих метода за мониторинг радона. Године 1957. уведен је концепт РАЕС-а (концепт "Концентрације потенцијалне алфа енергије" радонових потомака). Усвајање овог концепта нашло је своју примену у пракси.

Резултати исцрпних дугогодишњих студија, које су се бавиле здравственом проблематиком радона у рудницима, објављени су 1971. год. (у САД) и 1972. год. (у Чехословачкој). Закључак ових студија је био да ризик од плућног канцера расте линеарно са повећањем укупне човекове изложености радоновим потомцима. Неке касније студије су истраживале и квантитативну везу између излагања радону и ризика од појаве плућног канцера (NCR, 1988; Lubin, 1988; Samet, 1989). Резултати везани за ову проблематику су обједињени у публикацији ICRP 65 (ICRP, 1993).

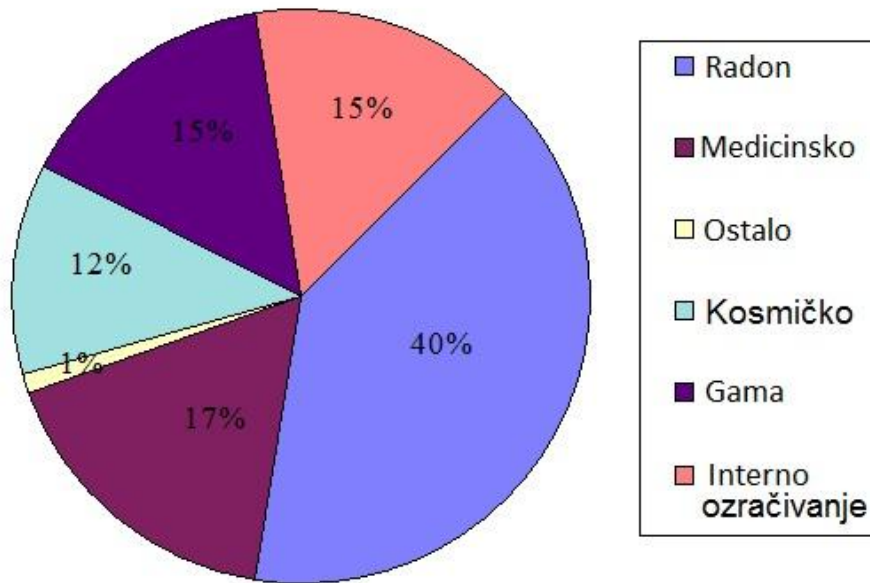
Студије, базиране прво на рударима, проширене су и на општу популацију. Тражена је веза, квалитативна и квантитативна, између излагања људи радону у уобичајеној стамбеној (не-рудничкој) атмосфери и ризика од плућног канцера. Пошто људи проводе највећи део свога живота у затвореним просторијама, преко 80% укупног времена (Moschandreas, 1981), посебна пажња је посвећена излагању становништва радону у затвореним просторијама.

Постојање проблематике радона у условима становања објавио је први Nultquist, 1956. године на основу испитивања 225 кућа у Шведској. Међутим, међународна научна удружења нису томе придавала већи значај, сматрајући да је то само локални шведски проблем.

Тек двадесетак година касније почело је масовније мерење радона у стамбеним објектима у многим земљама. Ти резултати су објављени у публикацијама UNSCEAR-а (UNSCEAR, 1982; 1988; 1993; 2009).

Повећање интересовања за радон, у односу на остале, бројне, изворе јонизујућег зрачења, потиче од његовог доминантног удела у укупној озрачености становништва од свих тих извора. Наиме, на основу извештаја међународних

организација за радијацију, укупна годишња ефективна еквивалентна доза становништва је процењена на 2.4 mSv (UNSCEAR, 1982; ICRP, 1983). На основу процене доприноса појединих извора зрачења тој дози, сачињена је тзв. "карта доза", која је приказана на слици 1.7 (Sinaeve et al, 1984).



Слика 1.7. Карта доза за општу популацију
(годишња ефективна еквивалентна доза износи 2.4 mSv)

Са слике 2.6 се може видети да изразито највећу дозу (40 % укупне дозе) општа популација прими од радона и његових потомака, и то путем инхалације, што има директно дејство на респираторни систем.

Радиоактивност

- Радиоактивност је својство извесних врста језгара да сама од себе прелазе у друга језгра.
- За ова језгра се каже да су радиоактивна.
- Језгра која немају ово својство су стабилна.
- Процес преласка радиоактивног језгра у друго назива се радиоактивни распад.
- Радиоактивност се појављује код оних језгара где је неповољан однос броја протона ка неутронима или језгро има динамичку нестабилност

Откриће радиоактивности и издвајање раијума

1896. Becquerel је проучавао луминисценцију уранових соли њиховим ексцитовањем природном светлошћу. Примио је да луминисцентно зрачење ствара сенку непровидних предмета која се могла забележити на фотографској плочи увијеној у црну хартију. Исти феномен је био постигнут, као врло карактеристичан и потенцијално важан за примену, за тада новооткривеним х-зрацима, те је изгледало у почетку да је луминисцентно зрачење урана слично х-зрацима. Међутим, Becquerel је направио важно откриће запазивши да зрачење из урана остаје и кад се уклони светлост која га је побудјивала. Такође је показао да се зрачење јавља код свих уранових једињења у пропорцији садржаја урана и да је спонтана емисија зрачења или **радиоактивност** особина самог урановог атома у његовом нормалном стању. По објављивању Becquerelovog рада, Rierre и Marie Сигие су испитали многе друге елементе, показавши да торијум има сличне особине као уран. Нашли су такође да руда урана, позната као *пехбленда* садржи више активности него што се очекивало на основу хемијске анализе садржаја урана. Закључили су да мора да постоје у руди и други активни елементи. Започели су издвајање тих активних елемената из урана као и других елемената

присутних у пехбленди. Прво су хемијским путем концентрисалу супстанцу која се хемијски понашала слично бизмуту, али која је показивала знатно већу активност од урана. Ту супстанцу су издвојили од бизмута и тако је добијен први нови радиоактивни елемент коме је по Пољској, домовини Марије Цурије, дато име **полонијум**. Активност полонијума није била довољна да објасне вишак активности пехбленде. Цирријеви су наставили свој рад на издвајању и нашли један други врло активан елемент, који се хемијски понашао врло слично баријуму и дали му име **радијум**. За радијум је надјено да је неколико милиона пута активнији од урана (исте тежинске количине). Атомска тежина полонијума је одредјена и износила је 225, док су доцнија мерења показала да је масени број радијума 226, а полуживот 1622 године.

Око 1897 године зрачење урана је привукло пажњу Rutherforda, који је био професор на универзитету у Монреалу (1898-1907) и који се бавио изучавањем радиоактивности.

Суигие и Rutherford су својим првим експериментима показали да зрачење из радиоактивних елемената садржи компоненте разних моћи продирања на основу апсорпције зрачења у материјалу.

Закон радиоактивног распада

Ако у тренутку $t=0$, кад почиње посматрање, у радиоактивном извору постоји N_0 атома датог радиоизотопа са временом полураспада $T_{1/2}$), поставља се питање којим ће се темпом овај број смањивати како време протиче.

-Време полураспада је време за које количина неког радиоактивног материјала опадне на половину.

Закон радиоактивног распада показује колики ће број атома почетног радиоизотопа остати нераспаднут у извору по истеку времена t од почетка посматрања.

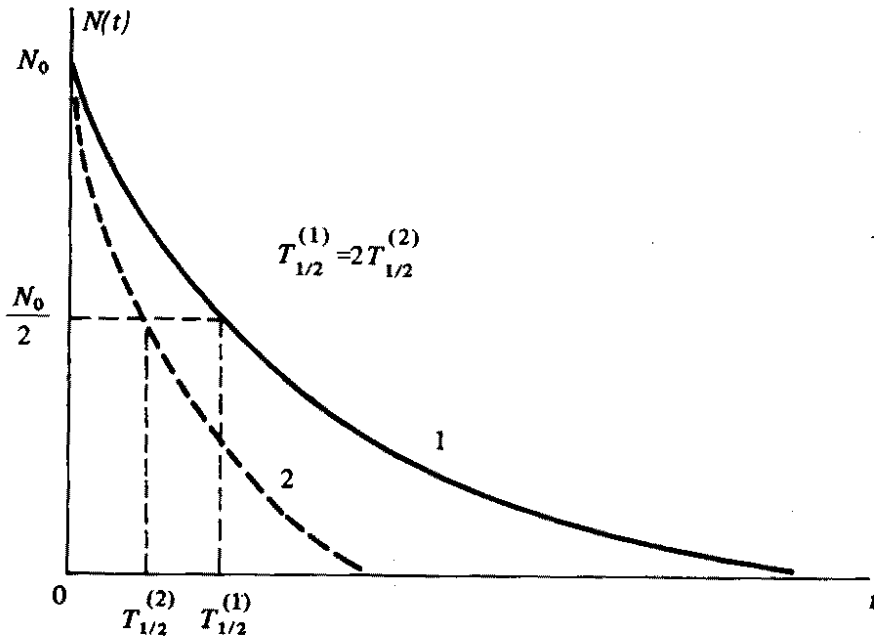
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Као карактеристика темпа распада датог радиоизотопа често се уместо времена полураспада користи такозвана константа распада- λ , која је дефинисана као:

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

Константа распада говори о томе колика је вероватноћа распада језгра у јединици времена. Јединица константе распада је s^{-1} .

Графички приказ овог закона дат је на Слици 1.7.



Слика 1.7. Графички приказ закона радиоактивног распада

Активност радиоактивног извора

Број распада који се у радиоактивном извору деси у јединици времена назива се **активност извора**. Активност извора зависи од две величине:

-што је већи број још нераспаднутих језгара у датом тренутку времена, биће већи и број распада у јединици времена;

-што је време полураспада изотопа мање, темпо распада биће бржи и број распада у јединици времена биће већи.

Пошто се број радиоактивних атома у извору, $N(t)$, са временом смањује по закону радиоактивног распада, јна (1), на исти начин ће се смањивати и активност извора. Активност извора у функцији времена једнака је:

$$A(t) = \ln 2 \frac{N(t)}{T_{1/2}} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$A_0 = \lambda N_0$ је почетна активност извора, тј број распада од тренутка када је у извору било N_0 активних атома.

Јединица за активност радиоактивних извора у међународном систему јединица (SI) је бекерел Вq. Активност од 1 Вq има онај извор у коме се у једној секунди дешава један распад. Медјутим у пракси се среће и вансистемска јединица за активност, кири Си. Активност од 1Ci има онај извор у коме се у једној секунди дешава 3.7×10^{10} распада:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Вq} \text{ или}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

О распаду језгара у извору суди се искључиво по зрачењима која се при распадима емитују.

Радиоактивни распад низа

Поставља се питање колика је активност узорка где један радионуклид се распада на потомак или више потомака који су такође радиоактивни. Могу се разликовати неколико генералних случајева који ће бити обрађени.

Секуларна равнотежа ($T_1 \gg T_2$)

Одредимо прво укупну активност присутну у неком тренутку времена када се дугоживећи родитељски радионуклид распада на релативно краткоживећи потомак који се пак распада на стабилан потомак. Времена полураспада оваквих радионукида испуњавају услов $T_1 \gg T_2$. Разматрајмо интервале времена који су мали у поређењу са T_1 , тако да се активност A_1 родитељског радионуклида може

сматрати константном. Укупна активност у било коме тренутку је збир активности родитељског радионуклида A_1 и потомка A_2 . Број језгара потомка N_2 који се распадне у јединици времена, $\frac{dN_2}{dt}$ једнака је броју потомака који настају распадом родитељских језгара у јединици времена, A_1 умањену за брзину распада, $\lambda_2 N_2$:

$$\frac{dN_2}{dt} = A_1 - \lambda_2 N_2 \quad (4)$$

Решавањем горње једначине узимајући да је у почетном тренутку број језгара потомка био N_{20} , и да је $\lambda_2 N_2 = A_2$ добија се релација:

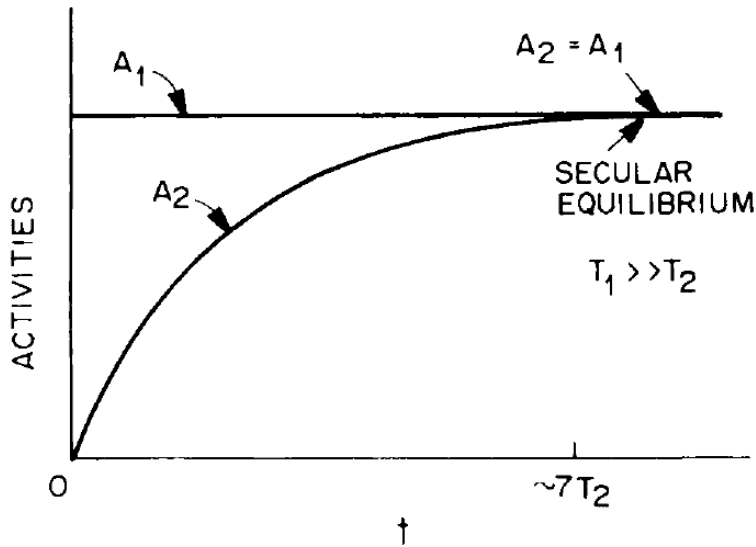
$$A_2 = A_1(1 - e^{-\lambda_2 t}) + A_{20}e^{-\lambda_2 t} \quad (5)$$

Уколико је узорак у почетном тренутку садржао само радионуклеид активности A_1 , тј $A_{20}=0$, онда се активност A_2 повећава са временом као на Слици 1.8.

После реда велићине седам времена полураспада потомка, $e^{-\lambda_2 t} \approx 1$ и постаје $A_2 = A_1$ када је активност потомка практично једнака активности родитељског радионуклида. Тада је укупна активност $2A_1$. Што се тиче броја језгара родитеља и потомка секуларна равнотежа се може изразити у облику:

$$\lambda_1 A_1 = \lambda_2 A_2 \quad (6)$$

У ланцу који садржи n краткоживећих радионуклида сви могу бити у равнотежи са дугоживећим родитељским радионуклидом. Тада је активност сваког члана једнака активности родитељског радионуклида и укупна активност је $n+1$ активност родитељског дугоживећег радионуклида.



Слика 1.8. Секуларна равнотежа

Уопштени случај

Када не постоји специјални случај у коме се T_1 и T_2 односе може се записати:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (7)$$

Када је испуњен услов да је $N_{20} = 0$, решење једначине је :

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) \quad (8)$$

У случају када је $\lambda_2 \gg \lambda_1$ добијамо услов секуларне равнотеже.

Пролазна равнотежа ($T_1 \gtrsim T_2$)

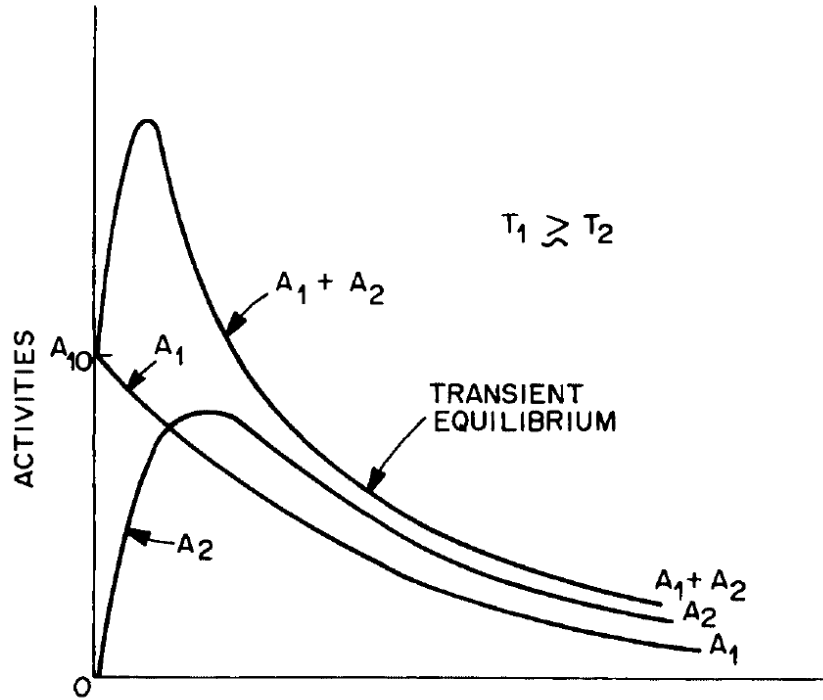
Још један практичан случај настаје када је $N_{20} = 0$ и време полураспада родитељског радионуклида је веће од времена полураспада потомка али не много. У том случају активност потомка се повећава до одређеног максимума када почиње поново да опада истом брзином као и родитељски потомак. Временом члан $e^{\lambda_2 t}$ у претходној формули постаје занемарљиво мали и множењем са λ_2 добијамо

$$\lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_2 \lambda_1 N_{10} e^{\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (9)$$

С обзиром да је $A_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_1 N_{10} e^{-\lambda_1 t}$, имамо да је :

$$A_2 = \frac{\lambda_2 A_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (10)$$

Под овим условима постоји пролазна равнотежа, приказана на Слици 1.9.



Слика 1.9. Пролазна равнотежа

Диференцирањем горњег израза може се наћи време када је активност потомка највећа:

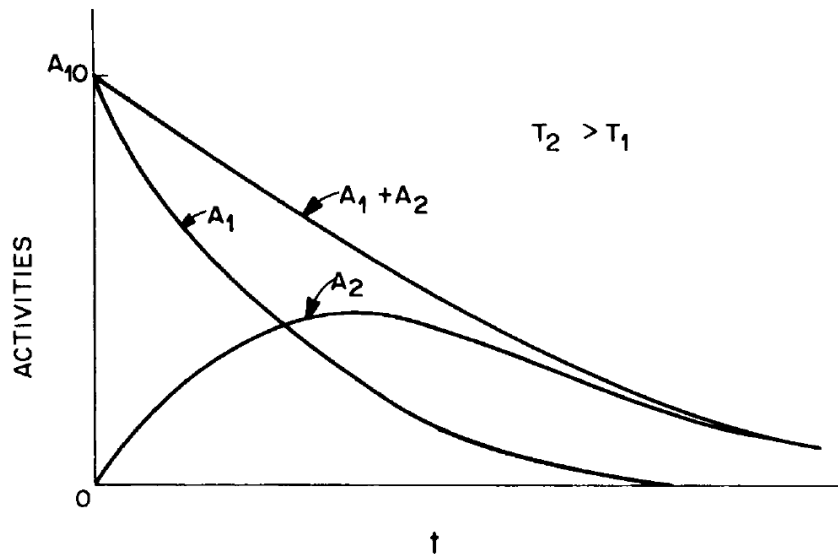
$$t = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \text{ за максимално } A_2. \quad (11)$$

Укупна активност је највећа у тренутку

$$t = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2^2}{2\lambda_1\lambda_2 - \lambda_1^2}. \quad (12)$$

Не постоји равнотежа

Када потомак који није присутан у узорку у почетном тренутку има дуже време полураспада од родитељског радионуклида његова активност се нагомилава до максималне и онда опада. због краћег времена полураспада родитељ радионуклеид се временом распадне и остају само језгара потомака. у том случају не долази до успостављања икакве равнотеже. Активности се временом мењају као на Слици 1.10.



Слика 1.10. Активности у случају кад не долази до формирања равнотеже

Врсте радиоактивног зрачења

Радиоактивна зрачења можемо поделити у две основне групе:

- Честице и
- Електромагнетска зрачења

Под честицама се овде подразумевају микросистеми карактерисани масом. То могу да буду или елементарене честице као што су нуклеони и електрони или системи сложени из из више таквих честица.

Електромагнетско зрачење се разликује од честица по томе што нема масу. У себи уједињује два аспекта таласни и честични

Основне честице, њихове интеракције и закони очувања

Под основним честицама физике сматрају се оне честице које немају очигледну подструктуру. Оне поседују дефинисане физичке карактеристике као и способности за одређена узајамна деловања-интеракције

1. Електрон e , e^-

Електрони су међу собом апсолутно идентични. То су стабилне елементарне честице. Маса електрона у миру износи $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg, и то су најлакше честице од свих оних које поседују масу као своју примарну карактеристику. Наелектрисање електрона назива се елементарно наелектрисање:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Наелектрисање које поседује електрон условно се назива негативним.

2. Proton p

Протони су такође стабилни. Маса протона у миру износи $m_p = 1.6724 \times 10^{-27}$ kg, те су они око 2000 пута веће масе од електрона. Они спадају у групу тзв. тешких елементарних честица. Наелектрисање протона је такође елементарно, али је позитивно.

3. Неутрон n

Маса неутрона у миру веома је блиска маси протона, али је нешто већа и износи $m_n = 1.6748 \times 10^{-27}$ kg. Наелектрисање неутрона једнако је нули, то су неутралне честице. Заједничким именом протони и неутрони се називају нуклеони. Слободни неутрони су нестабилни; усамљени неутрон се спонтано распада у протон, електрон и неутрино. Време полураспада слободног неутрона износи око 10 минута, па слободних неутрона у природи нема.

4. Позитрон e^+

Маса позитрона једнака је маси електрона. Наелектрисање је једнако елементарном, али је позитивно. У процесу анихилације спорог позитрона и електрона емитују се два фотона енергије по 511 keV (анихилационо зрачење). Позитрони се иначе емитују и из процеса β^+ распада.

5. Неутрино ν

Маса мировања неутрина једнака је нули и он нема наелектрисање. Неутрино је стабилан и једном створен, више практично не интерагује са материјом. Он се емитује у свим типовима процеса β распада нестабилних језгара и при том односи знатан део енергије.

6. π -мезон и мион

То су честице маса између електрона и протона које су важне за теорију сила језгра и за тумачење феномена космичког зрачења, респективно.

7. Фотон γ

Фотон је квант електромагнетног зрачења. По класичној теорији електромагнетно зрачење (ЕМ) се описује учестаношћу ν која представља број промена електричног и магнетног поља у јединици времена у области простора кроз коју се зрачење простире. Зрачење се истовремено описује и таласном дужином која представља најмање просторно растојање између тачака у којима се електрично и магнетно поље мењају у фази, тј. у којима исте вредности достижу у истим тренуцима времена. Учестаност и таласна дужина су повезани једноставном релацијом обрнуте пропорционалности:

$$\nu \cdot \lambda = c$$

$$c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

где је c брзина светлости у вакууму.

По квантној теорији, зрачење дате учестаности се сматра састављеним од идентичних честица-фотона, при чему је енергија фотона:

$$E = h \cdot \nu$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

где је h Планк-ова константа.

Почев од тренутка емисије (стварања) фотон је све до интеракције са неким системом наелектрисања стабилна честица. Наелектрисање фотона једнако је нули.

Остале елементарне честице

Познатих елементарних честица данас има преко 500. Општа класификација по маси:

а) лептони (лаке честице) су електрони, нетрина, μ -мезони лептонске природе (миони).

б) мезони (честице средње масе) имају масу између масе електрона и протона

с) бариони (тешке честице) које се деле на:

нуклеоне (неутрон и протон) и

хипероне, честице које имају већу масу од неутрона, али које се понашају као да садрже само по један нуклеон.

Хадрони се понашају као да су састављени од мањег броја стабилних елементарних честица, тзв. кваркова. Постоји шест кваркова, који се називају: *up* (*u*), *down* (*d*), *charm* (*c*), *strange* (*s*), *top* (*t*) и *bottom* (*b*). Слободни кваркови, међутим нису опажени.

У следећој табели дате су особине неких основних елементарних честица

Табела 1.7. Особине неких основних елементарних честица

Име	Честица	Античестица	Маса мировања (m_e)	Наелектрисање (e)	Спин ($\hbar/2\pi$)	Средње време живота (s)	Начин распада
Електрон	e^-	e^+	1	± 1	1/2	стабилна	-
Протон	p	\bar{p}	1836	± 1	1/2	стабилна	-
Неутрон	n	\bar{n}	1839	0	1/2	939.6	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
Неутрино	ν	$\bar{\nu}$	0	0	1/2	стабилна	-
Фотон	γ	исто	0	0	1	стабилна	-
Наелектр. π -мезон	π^+	π^-	273	± 1	0	2.6×10^{-8}	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
Неутрални π -мезон	π^0	исто	264	0	0	10-10	$\pi \rightarrow 2\gamma$
μ -мезон (мион)	μ^-	μ^+	207	± 1	1/2	2.2×10^{-6}	$\pi^+ \rightarrow e + \bar{\nu} + \nu$

Интеракције елементарних честица

Елементарне честице, и системи састављени од њих, узајамно делују једне на друге преко четири врсте интеракција (сила).

I **Гравитационе интеракције** делују међу свим честицама и манифестују се у њиховом узајамном привлачењу. Ово привлачење у случају микросвета је толико слабо да готово никако не утиче на њихово понашање. Постојање силе која иначе управља васионом, у структури микросвета се потпуно занемарује.

II **Електромагнетске интеракције** опажају се само између наелектрисаних честица, како у миру тако и у кретању, као и дејства електричног и магнетског поља зрачења на наелектрисање.

III **Слабе интеракције**, које описују производјење и понашање лептона (на пример, код нуклеарног бета распада), као и процесе распада већине чудних честица.

IV *Јакe интеракције*, су нуклеарне силe између нуклеона, које су одговорне за везивање тих честица у неком језгру. Њихово дејство почиње да се осећа тек кад растојање међу честицама постане мање од око 10^{-13} цм, што отприлике одговара димензијама самих честица; то су силе кратког домета. То су привлачне силе и независне су од наелектрисања.