



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО – МАТЕМАТИЧКИ
ФАКУЛТЕТ
ДЕПАРТАМАН ЗА ФИЗИКУ



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО: 19. 12. 2008	
ОРГАНИЗЈЕД.	БРОЈ
0603	9 1851

Стерилизација и очување хране јонизујућим зрачењем

- дипломски рад -

Ментор:
др Наташа Тодоровић

Кандидат:
Драгољуб Ђурић

Нови Сад, 2008.

САДРЖАЈ

1 УВОД.....	3
2 ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ	4
2.1 Појам радиоактивности.....	4
2.2 Врсте и извори јонизујућег зрачења.....	5
2.2.1 Алфа зрачење.....	6
2.2.2 Бета зрачење	6
2.2.3 Гама зрачење.....	7
2.2.4 <i>X</i> -зрачење	8
2.2.5 Неутронско зрачење.....	8
2.3 Интеракција зрачења са материјом	9
2.3.1 Деловање зрачења на живу материју.....	10
2.4 Радијационе величине и јединице	11
2.4.1 Активност	11
2.4.2 Експозициона доза	12
2.4.3 Апсорбована доза	12
2.4.4 Еквивалентна доза.....	13
2.4.5 Ефективна доза.....	14
3 ПРИМЕНА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА У СТЕРИЛИЗАЦИЈИ И ОЧУВАЊУ ХРАНЕ	15
3.1 Ефекти зрачења хране	15
3.2 Процеси зрачења хране.....	20
3.2.1 Зрачење хране брзим електронима	20
3.2.2 Употреба гама зрачења у третману хране.....	21
3.2.3 Употреба <i>x</i> зрака у зрачењу хране	22
3.3 Здравствена исправност означене хране	23
3.4 Законска регулатива	23
4 ЗАКЉУЧАК	26
ЛИТЕРАТУРА	27

1 Увод

Нуклеарне технологије, радиоактивност, зрачење, су појмови који у широј, у највећој мери нестручној, јавности изазивају велико неповерење. Производња нуклеарног оружја, повремене, иако врло ретке, хаварије нуклеарних постројења, као и познате, и непознате, последице зрачења на здравље људи представљају објективне разлоге за страх. Неке од могућих разлога за претерани страх треба тражити у неупућености људи у нуклеарне технологије и последице њихове употребе, као и извесна, за лаике, мистичност невидљивих зрака, који могу да усмрте. Упркос свему томе примене нуклеарних технологија, па према томе и јонизујућих зрачења су у сталном развоју. Разлози су, разумљиво, пре свега економски.

Примена јонизујућег зрачења се углавном заснива на индукованим хемијским, или неким другим променама карактеристика средине кроз коју пролази зрачење, промени интензитета пропуштених (атенуациони ефекат) зрака, као и мерењу активности емитованог зрачења узорака (примена код датирања археолошких узорака). Нарочито је важна висока безбедност и економичност ових поступака. У ту сврху користе се извори зрачења иза којих не остаје дуготрајан радиоактивни отпад, а добро познавање ових процеса гарантује одговарајући квалитет и непостојање штетних последица примене зрачења.

Познате су примене јонизујућих зрачења у очувању хране, примене у медицини (диагностичке, терапеутске, као и примене у стерилизацији фармацеутских производа и медицинске опреме), детекцији дима у противпожарној заштити, примене у разним мерењима у индустрији и науци, пређишњавању вода и отпадних материја, процесуирању материјала (пре свега полимера) и сл..

Потреба за храном је једна од најважнијих потреба у животу људи. Због тога је и производња довољних количина квалитетне хране услов функционисања друштвених заједница (држава), и за њих има стратешки значај. Производња и трговина храном, због тога, има и изузетан економски значај. Главни проблем у вези са већином намирница је ограничен рок употребе због природних хемијско-биолошких процеса који доводе до њиховог кварења, односно неупотребљивости за људску исхрану. Поред економске штете која настаје на овај начин, неопрезно конзумирање овакве хране може довести (и доводи) до штетних последица по здравље људи са не малим бројем смртних исхода. Према подацима Светске здравствене организације (WHO) конзумирање покварене хране (тровање храном) је најчешћи узрок смрти у свету (око 35%), иако се претежно јављају у неразвијеним крајевима. Примера ради, у САД-у се само салмонелом зарази око 2 милиона људи годишње, а умре између једне и две хиљаде оболелих, а трошкови лечења процењују се на 2 милијарде долара годишње [1].

Постоје „класични“ поступци очувања хране као што су термичка обрада, срзавање, димљење, солење, сушење и тд., који, у извесној мери, мењају њене карактеристике: мирис, укус и састав. Ови поступци поред тога што дugo трају имају и високу цену. Због тога је разумљива велика пажња која се посвећује истраживањима на проналажењу нових поступака, који би повећали ефикасност (економичност) поступака очувања хране, са што мањим губитком њених природних својстава. Један од тих поступака јесте стерирање хране јонизујућим



зрачењем. Циљ овог рада је да детаљније објасни феномен стерилизације и очувања хране јонизујућим зрачењем: ефекте зрачења хране, сам процес зрачења, здравствени аспект зрачења, као и законску регулативу која се односи на ову област.

2 Јонизујуће зрачење

„Јонизујуће зрачење“ је уобичајени назив за све врсте зрачења (таласних или честичних) која носе довољну енергију, да у интеракцији са материјом (супстанцом) изазове јонизацију атома, молекула или група молекула. Да би се јонизација могла десити, дакле, зраци (честице зрачења) морају имати довољну енергију, односно енергију која је већа од одговарајуће енергије јонизације за одређену материјалну средину [2]

Да би се боље разумео феномен јонизујућег зрачења, а у вези са тим и његова примена у зрачење хране, неопходно је разумети појаву радиоактивности, знати нешто о изворима и врстама јонизујућег зрачења, и познавати основне механизме интеракције овог зрачења са материјом.

2.1 Појам радиоактивности

Са аспекта стабилности сви хемијски елементи се деле у две групе: стабилне и нестабилне, односно радиоактивне. Не постоји оштра граница између ове две групе пошто се и елементи које сматрамо стабилним могу распадати, али је брзина тог распадања сувише мала да би се могла регистровати.

Радиоактивни елеменати се могу поделити на природне и вештачке. Вештачки радиоактивни елементи не постоје у природи, већ су производ људским деловањем изазваних нуклеарних реакција, и до сада их је регистровано око 2000. У природи је регистровано шездесетак нестабилних изотопа који се распадају [2]. Радиоактивни елементи (изотопи) су, дакле, нестабилини елементи, било природног било вештачког порекла, чије је време полураспада (време за које се распадне половина почетног броја језгара) приближно у интервалу од 10^{-12} секунди до 10^{10} година. Већину радиоактивних елемената чине елементи из једног од три радиоактивна низа: ^{235}U , ^{238}U и ^{232}Th . Радиоактивни низ ^{238}U је приказан на Сл.2.1.1. Сва три низа завршавају неким од стабилних изотопа олова. Поред њих постоји још неколико дугоживећих радиоактивних изотопа који не стварају низове него се одмах трансформишу у неко од стабилних језгара. Најпознатији од њих је ^{40}K , коме је период полураспада $1.4 \cdot 10^9$ година [2].

У природи постоје и неки радиоактивни изотопи којима је период полураспада релативно кратак (много мањи од ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th или ^{40}K). Они се континуирано стварају у вишим слојевима атмосфере деловањем космичких зрака (3H , 7Be и ^{14}C , на пример) [2].

Промена (великог) броја језгара радиоактивног изотопа у зависности од времена се дешава по следећем закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

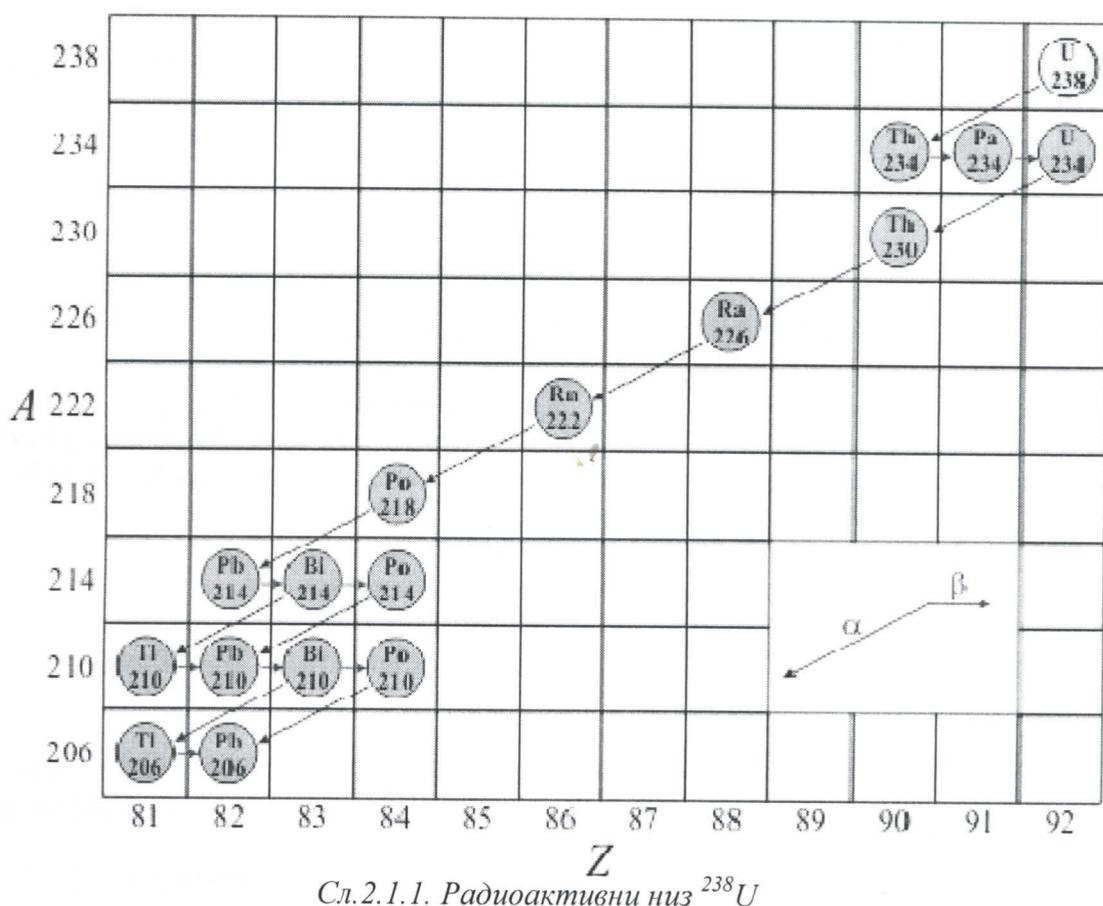
где је N број нераспаднутих језгара за време t , N_0 број атома када је $t=0$, а λ константа карактеристична за сваки појединачни радиоактивни елемент.

Карактеристичан ток радиоактивног распада може се врло верно представити помоћу времена полураспада $T_{1/2}$, које представља време за које се почетни велики број атома сведе путем трансформација на половину. Према томе у времену $t=T_{1/2}$, $N=N_0/2$ и

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2} \text{ или } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69315}{\lambda}.$$

У практичном раду са радиоактивним материјалом број N се не израчунава непосредно. Уобичајени поступак је да се преко електричног, фотографског или неког другог ефекта одреди количина која је пропорционална λN , а која се уобичајено назива активност A , где је $A = c\lambda N = c \left(-\frac{dN}{dt} \right)$. Коефицијент c , такозвани детекциони коефицијент зависи од природе инструмента за детектовање, ефикасности детектовања појединих зрачења у датом инструменту и геометријског распореда узорка и детектора [3]. Зато је уобичајено да се сви ови фактори контролишу током експеримента. Напокон се закон радиоактивног распада може писати на уобичајени начин

$$A = A_0 e^{-\lambda t}.$$



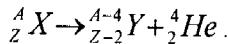
2.2 Врсте и извори јонизујућег зрачења

Једна од могућих подела јонизујућег зрачења је на **природно** и **вештачко** (човековом активношћу створено).

Најчешћих подела јонизујућих зрачења је на честична: **алфа зрачење (језгра хелијума)**, **бета зрачење (електрони и позитрони)**, **протони, јони и неутрони**, и електромагнетна (фотонска): **x-зрачење и гама зрачење**.

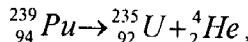
2.2.1 Алфа зрачење

Алфа честице (зрачење) представљају језгра хелијума настала распадом нестабилних језгара (урана, на пример). Механизам настанка алфа честица (алфа распад) се одвија тако што се језgro предак трансформише у језgro потомак емисијом једне алфа честице по следећој шеми



Дакле, алфа распадом настаје елемент (језгро) редног броја мањег за 2 и масеног броја мањег за 4. У складу са тим се трансформише и електронски омотач, при чему се ослободе два електрона да би се обезбедила електронеутралност атома.

На пример, алфа распад Плутонијума ${}^{239}Pu$ се одвија на следећи начин:



при чему настаје уран редног броја мањег за 2 и масеног броја мањег за 4, као и алфа честица (језгро хелијума).

Алфа честица емитована од ${}^{239}Pu$ има енергију од око 5 MeV, типичну енергију алфа распада. Ова честица је релативно велика и креће се релативно споро, око 15 000 000 метара у секунди (пет посто брзине светlostи), али генерише око 44 000 јонских парова по центиметру пута. Она при томе сву своју енергију изгуби на око 3,5 см пута (у ваздуху), што значи да направи укупно око 150 000 јонских парова [3]. Након губитка енергије алфа честица захвата два електрона и наставља живот као нормални хелијум.

У гушћој материји, као што је људско ткиво, пут алфа честице енергије 5 MeV је само 32 μm, што представља само површински слој коже [3].

Само 20%-40% свих јонизација изазваних алфа честицама су директне, а све остale су секундарне јонизације изазване електронима виших енергија (100-200 eV), које су добили у директним сударима са алфа честицама [3].

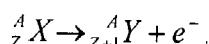
Ако је извор алфа зрачења ван људског тела он неће изазвати штетне последице, јер ће се јонизација десити између извора и коже па неће бити апсорпције енергије унутар тела, већ у ваздуху изван тела. Ситуација је сасвим другачија ако је извор алфа зрачења унутар тела (прогутан, удахнут и сл.), јер се енергија коју еmitује извор у потпуности апсорбује у близини самог извора, па се јавља интензивна јонизација у малој запремини. Обзиром на велику енергију у малој запремини (маси), апсорбована доза је изразито велика, па је и штетност зрачења велика.

Највећи губитак енергије алфа честица има при kraju своје, праволинијске, путање (Брегов пик).

2.2.2 Бета зрачење

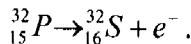
Електронски бета распад је најчешћи облик спонтане трансформације језгра. Периоди полураспада познатих бета емитера су од најмањег, који је реда величина 10^{-2} s, па до највећег $4 \cdot 10^{12}$ година. Енергије остварене у бета распаду су у интервалу од 18 keV до 16,6 MeV [2]. Приликом бета распада долази до трансформације појединачних нуклеона при чему се стварају честице које пре распада нису постојале у језгру.

Елементи који еmitују бета зрачење се трансформишу у елементе који имају редни број за један већи и једнаку атомску масу, што се може приказати као:



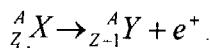
Из горње шеме се лако може закључити да језгротомак, добијено бета распадом, има један протон у језгру више од језгра претка, а пошто је број нуклеона остао непромењен, значи да се један неутрон трансформисао у протон, уз емисију електрона (бета честице). То даље значи да у бета распаду учествују изобари (елементи који имају једнак број нуклеона у језгру).

На пример Фосфор ^{32}P се електронским бета распадом трансформише у ^{32}S по следећој шеми

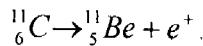


Код вештачке радиоактивности могуће је да нестабилна језгра емитују позитроне (позитивне бета честице). При томе је производ распада језгра које има један протон мање од језгра претка и то без промене атомског броја.

Позитронски бета распад се дешава по следећој шеми:



На пример, позитронски распад ${}_{6}^{11}C$ се може представити следећом шемом:



Конкурентска реакција позитронском бета распаду је захват електрона (обично најближег, К електрона) са истом последицом-потомком са истим масеним бројем и једним местом улево у периодном систему. Овде нема емисије бета честице већ фотона због преласка електрона са вишег енергетског нивоа на упражњено место настало К-захватом [2].

У бета распаду долази и до емисије антинеутрина уз електрон (неутрина уз позитрон), који у произвољним односима деле енергију са електроном (позитроном), па је због тога енергетски спектар електрона, на пример, континуалан. То је до теорије неутрина (Паули 1930.) збуњивало научнике.

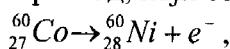
За практичне потребе, за добијање снопова високо-енергетских електрона, користе се акцелератори електрона.

За дату енергију брзина електрона је много већа од брзине алфа честице, па је због тога специфична јонизација (број јонских парова по јединичној дужини путање, при нормалном притиску и температури 15°C) за електроне мања [3]. За разлику од алфа честица, број електрона у снопу се, због честих скретања, знатно смањује.

2.2.3 Гама зрачење

Гама зрачење је електромагнетно зрачење, таласне дужине која се креће, приближно, у опсегу од 10^{-10} до 10^{-12} м. Енергија гама зрачења се креће у опсегу од десетак keV-а па до приближно 5 MeV-а [2]. Гама зрачење настаје у процесу преласка језгра из побуђеног стања у ниже или основно стање. Побуђено стање језгра је последица нуклеарних реакција, приликом интеракције са наелектрисаним или ненаелектрисаним честицама или фотонима. Потомак алфа или бета распада може да настане у побуђеном стању, који се енергије побуде ослобађа гама зрачењем.

Гама зраци (фотони) настају у нуклеарним (најчешће алфа или бета распадима) реакцијама као последица деекситације језгра потомка. У пракси се најчешће користи ${}^{60}\text{Co}$, и његов бета распад, који се одвија по шеми



При томе настаје ${}^{60}\text{Ni}$ у побуђеном стању. У основно стање прелази емисијом гама фотона различитих енергија. ${}^{60}\text{Co}$ је најчешће коришћени извор гама зрачења код примена у индустрији, медицини, конзервацији хране и тд..

Средња специфична јонизација коју изазивају фотони је 10-100 пута мања од оне коју изазивају електрони исте енергије [3]. Код зрачења малих енергија у средини великог редног броја, најважнији ефекат у интеракцији са материјом је photoелектрични ефекат. На средњим енергијама доминантан је Комптонов ефекат, а на енергијама од неколико MeV (најмање 1,022 MeV) и више доминантно је креирање електрон-позитронских парова.

2.2.4 X-зрачење

X зраке је 1895. године открио Рентген. Њему у част често се називају и рендгенским зрацима.

Закочно x-зрачење, „Бремштрапунг“ (немачки Bremsstrahlung=закочно зрачење), настаје када се електрони успоравају електричним пољем атомског језгра. Овај тип радијације настаје када год брзи електрони пролазе кроз неки материјал, а ефикасност претварања кинетичке енергије у закочно зрачење расте са растућом енергијом електрона и повећањем редног броја материјала. У Волфраму, на пример, електрони од 10 MeV губе на зрачење око 50 %, а при 100 MeV око 90% своје енергије [3]. Извори x зрака могу бити било који убрзавач електрона у комбинацији са метом коју ти електрони погађају. Сваки акцелератор електрона се може, дакле, користити као извор x зрака, мада се у ове сврхе најчешће користе вакуумске рендгенске цеви, где се електрони емитовани са катоде (термоелектронска емисија) убрзавају напоном и усмеравају на аноду (антикатоду) која представља мету сачињену од одговарајућег материјала. Укупна енергија насталих x зрака зависи од напона убрзавања (енергије електрона) и материјала (атомског броја) од кога је сачињена мета (антикатода).

Слабљење спона x или гама зрака при проласку кроз неки материјал (атенуација) се одвија по закону

$$N = N_0 e^{-\mu x},$$

где N означава број фотона у спону након проласка кроз неки материјал дебљине x , N_0 је почетни број фотона, док је атенуациони коефицијент, μ , производ ефикасног пресека и броја атома по јединици запремине материјала.

2.2.5 Неутронско зрачење

Јасно је да неутрони због своје електронеутралности могу лакше доспети у језгро од наелектрисаних честица. Термални (спори) неутрони, тј. неутрони малих енергија имају велику вероватноћу да реагују са језгром-метом. Показало се да се већа вештачка радиоактивност може изазвати ако је присутан материјал који садржи водоник (парафин, на пример) који може да успори неутронски спон. Ферми је исправно претпоставио да ће брзи неутрони губити енергију у сударима са протонима (приближних су маса), те да ће им узастопни судари смањити енергију до термичке, и да ће ти спори неутрони имати знатно већи ефикасни пресек за апсорпцију [3].

Главни извори неутрона су нуклеарне реакције у којима се неутрони емитују из јако ексцитираних језгара и због тога имају у почетку врло велике кинетичке енергије. Слој парafина дебљине 12 см око извора неутрона довољан је да смањи енергију већине неутрона до термалне расподеле енергије, за мање од 0,001 секунди [3].

Вероватни могући крај термалног неутрона у водоничној средини као што је вода или парафин је такав што са протоном, након око 150 судара у термалном стању, надгради деутерон [3].

Врста интеракције неутрона са језгром зависи од енергије неутрона:

- *Еластично расејање* је доминантно за зрачење мале енергије (неколико MeV) у средини малог редног броја. Неутрон реагује са језгром атома и мења свој правац кретања.
- *Нееластично расејање* је доминантно за неутроне великих енергија у средини великог редног броја. Неутрон предаје део енергије језгру, које постаје нестабилно и распада се у ново језгра уз емисију неутрона и гама фотона.
- *Захват неутрона* се одвија у случају неутрона веома мале енергије (до неколико eV). Језгро "хвата" неутрон и формира сложено и нестабилно језгро. Оно се распада у ново језгро уз емисију гама зрачења.

Неутрони, дакле, не јонизују средину директно већ индукују радиоактивност, због које долази до јонизације средине кроз коју се крећу.

2.3 Интеракција зрачења са материјом

Основни механизми путем којих зрачење интерагује са материјом кроз коју се простире су јонизација и ексцитација. Постоје, наравно, и други механизми путем којих честице зрачења губе енергију приликом интеракције са материјом. Тако на пример, бета честице приликом проласка кроз неку материју могу да емитују електромагнетно зрачење. Такође, фотони високих енергија могу да стварају електрон-позитронски пар. У оба наведена примера не долази до директне јонизације атома средине кроз коју се зрачење простире, мада се јонизација може јавити као секундарна последица ових појава [2].

Интеракције зрачења са материјом се у највећој мери одвијају у електронском омотачу посредством електромагнетних сила, а интеракцију са језгром, због заклоњености електронским омотачем као и због самих димензија језгра (око 10000 пута мања од димензија атома) могу имати само зраци (честице) високих енергија. Протони, додатно, морају и да савладају одбојни потенцијал језгра.

Основне интеракције путем којих наелектрисане честице интреагују са средином су [2]

- Кулоново расејање
- Јонизација
- Радиациони ефекти
- Черенковљев ефекат,

а фотони при проласку кроз супстанцу могу да доживе

- Расејање (Томпсоново, Комптоново)
- Фотоелектрични ефекат
- Ефекат стварања парова.

И наелектрисане честице и фотони могу изазвати и нуклеарне реакције ако имају доволно високе енергије

У процесима ексцитације, или јонизације, поједине честице неког зрачења предају енергију орбиталним електронима, при чему се након сваког таквог процеса енергија честице зрачења смањи за идентичан износ енергије предате електрону. На тај начин честице зрачења троше своју енергију све до нивоа када јонизација више није могућа. Бета честице (електрони код природних извора) тада бивају захваћени од атома и настављају живети као „обични“ електрони. Алфа честице (језгра хелијума) захватају два електрона и претварају се у атоме хелијума [2].

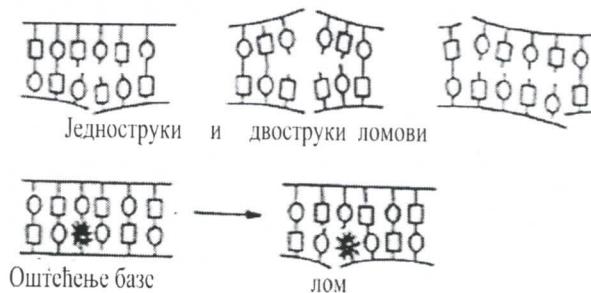
Када је енергија јонизујућих зрачења у питању типичне енергије су реда 1 MeV. Тако, на пример ^{60}Co емитује гама фотоне енергија 1,33 и 1,17 MeV, бета зраци ^{90}Sr имају кинетичку енергију 0,55 MeV, а алфа зраке ^{222}Rn енергију од 5,49 MeV [1].

2.3.1 Деловање зрачења на живу материју

Са становишта неких употреба јонизујућих зрачења, као и заштите од њиховог штетног дејства за здравље људи, посебно су важне квантитативне процене хемијских ефеката таквих зрачења на живу материју. Фактори који утичу на степен оштећења организма су апсорбована доза зрачења, врста зрачења, брзина примања дозе, расподела дозе, као и осетљивости ткива на која зрачење делује.

При дози од 1 kGy на сваких милион молекула воде јонизује се мање од десет. Сличан проценат директних јонизација, десетак до стотињак на милион молекула при дози од 1 kGy, претрпе и мање органске молекуле чија маса не прелази неколико стотина атомских јединица. Код већих организама сваки молекул ДНК, молекулске масе око једне милијарде, добија неколико директних тешких оштећења (Сл.2.3.1.1.) при дози од 1 kGy, што врло вероватно узрокује ометање биолошке функције, па и смрт ћелије [1]. Једноструки прекиди се ефикасно и брзо поправљају, без грешке. Ако су прекинута оба ланца ДНК молекуле за време које је потребно ћелији да поправи једноструки лом, а ломови су настали на удаљености мањој од три паре база, настају дволанчани ломови. Део тих прекида ће се поправити, али поправке неће бити без грешке.

Директно деловање јонизујућег зрачења, при таквој дози на живо ткиво не делује хемијски импресивно, али су биолошки ефекти драстични.



Сл.2.3.1.1. Шеме оштећења ДНК молекула зрачењем

Индиректни хемијски ефекат деловања зрачења може бити већи од директног. Ефекат се углавном огледа у томе да на органске молекуле делују продукти радиолизе воде. Након зрачења у води настају радикали, који су врло реактивни. Слободни радикали су делови молекула, групе атома или појединачни атоми који поседују неспарени електрон. Ове форме су врло нестабилне и из тог разлога и врло реактивне. Слободни радикали реагују међусобно или са другим молекулима. Слободни радикали „нападају“ ћелијске мембрane (протеини, фосфолипиди) и генетски материјал (ДНК и РНК).. Доказано је да садржај радиолитичких продуката расте линеарно с апсорбованом дозом У озраченој органској материји са већим садржајем воде, ови производи радиолизе изазивају знатно веће хемијске промене него директно зрачење [12].

Посебна пажња при ирадијацији хране се посвећује могућностима стварања индуковане радиоактивности у зраченој храни. Најосетљивија мерења могу

детектовати радиоактивност која је 1% од природне радиоактивности у храни [4]. Данас су, према *Codex Alimentarius Commission* (Комисија за прехрамбени кодекс), дозвољена зрачења хране енергијама до 10 MeV, за брзе електроне, и до 5 MeV, за фотонска зрачења, максималним дозама до 10 kGy. Овакви радиоактивни извори неће индуковати мерљиву радиоактивност у храни, а калкулације показују да је било каква индуцирана радиоактивност много мања од дозвољене [4].

Три су главна начина за индукцију радиоактивности у храни: изомеријска активација, фото-нуклеарна активација и неутронска активација. Анализе показују да у случају ирадијације електронима до 10 MeV и фотонима до 5 MeV, неутронска активација, иако беззначајна, је већа од активације произведене на остала два начина, и да је неутронска активација произведена фотонима до 5 MeV око 60 пута већа него произведена електронима енергије до 10 MeV [4].

Границна енергија за гама-неутронску реакцију (неутронску активацију) је изнад 10 MeV за већину изотопа у храни. Границне енергије за фотонску активацију неутрона у угљенику, кисеонику и азоту су 18,72 MeV, 15,67 MeV и 10,55 MeV, респективно. Неколико изотопа има ниску енергију фотон-неутронске реакције: 2,225 MeV за деутеријум, 4,85 MeV за ^{13}C и 4,15 MeV за ^{17}O . Концентрација ових изотопа је веома мала, а изотопи који од њих настану су стабилни [4].

Неутрони емитовани у овим процесима обично имају иницијалну енергију од неколико MeV, која се постепено смањује у сударима са атомима хране и они се „термализују“. Неки од ових неутрона ће изаћи из хране а неки ће бити апсорбовани у храни. Око 89,4% ових неутрона, апсорбованих у храни апсорбоваће водоник и надградиће деутеријум, око 8,5% ће бити апсорбовано од ^{14}N да се формира ^{14}C или ^{15}N , око 1,1% ће бити апсорбовано од ^{35}Cl при чему се формира ^{36}Cl и 3000 пута мање ^{35}S , са полуживотом од 86,7 дана, око 0,54% ће бити апсорбовано у ^{39}K при чему се формира ^{40}K , и 0,17% ће бити апсорбовано у ^{12}C да се надгради ^{13}C . Остатак ће бити апсорбован у другим атомима формирајући стабилне изотопе или формирати изотопе који се распадају у микросекунди, а неколицина ће бити апсорбована атомима формирајући изотопе полуживота од неколико минута [4].

2.4 Радијационе величине и јединице

Јединице међународног система мерних јединица (СИ), као и неке старе јединице, које се користе у мерењима везаним за радиоактивност и јонизујућа зрачења као и ефекте интеракције зрачења са материјом (дозиметријске јединице):

2.4.1 Активност

Активност је број нуклеарних трансформација или распада у јединичном временском интервалу, тј.:

$$A = -\frac{dN}{dt}.$$

Јединица активности је **Бекерел (1 Bq)**, а једнака је активности неког радиоактивног извора коме се сваке секунде распадне тачно једно језгро. То значи да је

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}.$$

У употреби је још стара јединица Кири (1 Ci) која је дефинисана као активност једног грама ^{226}Ra и износи $3,7 \cdot 10^{10}$ распада у једној секунди [2].

Константа распада, λ , је величина која показује вероватноћу распада језгра у јединичном временском интервалу. То значи да активност окарактерисана константом распада λ зависи једино од количине радиоактивног елемента, односно броја радиоактивних атома у тој количини, N [2], тј.,

$$A = \lambda \cdot N$$

Период полураспада, $T_{1/2}$, представља време за које ће се тачно једна половина почетне количине радиоактивног елемента распасти. Веза између периода полураспада и константе радиоактивног распада је:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (\ln 2 \approx 0,693)$$

2.4.2 Експозициона доза

Експозициона доза је количина наелектрисања коју неко зрачење произведе приликом проласка кроз јединичну масу неког тела. Према томе, експозициона доза се дефинише као:

$$X = \frac{\Delta q}{\Delta m},$$

имајући при томе на уму да је Δq апсолутна вредност укупне количине наелектрисања истог знака која се створи у ваздуху масе Δm у одређеној запремини. Јединица за експозициону дозу је 1 C/kg (Кулон по килограму). Још се користи и стара јединица Рендген и износи $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$.

Пошто је често важна и брзина којом зрачење депонује своју енергију у средини кроз коју се креће, уведена је и **брзина експозиционе дозе**. Она се дефинише као:

$$\dot{X} = \frac{\Delta q}{\Delta m \cdot \Delta t}$$

где је Δt дужина временског интервала у коме је дошло до стварања количине наелектрисања Δq у количини ваздуха Δm . У СИ систему јединица за брзину експозиционе дозе је $\text{Ckg}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Експозициона доза, као и брзина експозиционе дозе описују интеракцију x и гама зрака са материјом и не користе се за алфа или бета зрачење [2].

2.4.3 Апсорбована доза

Због тога што ефекат зрачења на ткива првенствено зависи од енергије коју је зрачење депоновало у њима, уведена је нова величина-апсорбована доза

Апсорбована доза је количина енергије коју зрачење преда јединици масе тела кроз које се креће., тј.,

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}.$$

Јединица за апсорбовану дозу је 1 J/kg и назива се Греј (Gy). Користи се и стара, мања јединица rad,

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 0,01 \text{ Gy}. \\ (\text{rad}-\text{radiation absorbed dose})$$

Аналогно брзини експозиционе дозе може се говорити и о брзини апсорбоване дозе, тј.,

$$\dot{D} = \frac{\Delta E}{\Delta m \cdot \Delta t}.$$

Јединица брзине апсорбоване дозе је Gy s⁻¹

Између експозиционе и апсорбционе дозе у ваздуху постоји једноставна веза. Пошто је средња енергија за стварање једног јонског пара у ваздуху 33,7 eV, за стварање једног Кулона наелектрисања неопходно је депоновати 33,7 J енергије. То значи да је 1Gy=33,7 C/kg, или у старим јединицама 1 rad=0,87 R. Доза која би се депоновала у неком другом материјалу под истим геометријским условима као у ваздуху се може добити из релације:

$$D_m = D_v \frac{(\mu_a)_m}{(\mu_a)_v},$$

где је D_v апсорбована доза у ваздуху, D_m апсорбована доза у материјалу, а $(\mu_a)_v$ и $(\mu_a)_m$ су одговарајући масени коефицијенти [2].

2.4.4 Еквивалентна доза

Дејство различитих врста јонизујућих зрачења на биолошки систем није једнако. Увођењем радиационог тежинског фактора (w_R) као односа биолошке ефикасности изабраног зрачења и биолошке ефикасности x зрачења енергије 250 keV омогућило је формулисање еквивалентне дозе зрачења.

$$H=D w_R$$

Ако нека честица преда 3,5 MeV при 1 μm пређеног пута онда ће њен тежински радиациони фактор бити 1. Уколико више енергије предаје w_R ће бити већи и обрнуто [5].

таб. 2.5.4.1. Радиациони тежински фактори за поједине врсте зрачења [6]

Тип и енергија зрачења, R	Радиациони тежински фактор, w_R
Фотони свих енергија	1
Електрони и миони свих енергија	1
Неутрони	
<10 keV	5
од 10 до 100 keV	10
од 0,1 до 2 MeV	20
од 2 до 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Протони, > 2 MeV	5
Алфа честице, фисиони фрагменти, тешка језгра	20

Јединица еквивалентне дозе у СИ систему мерних јединица је Сиверт, Sv.

$$1 \text{ Sv}=1 \text{ Gy } w_R$$

Пошто је Сиверт производ Греја и радиационог тежинског фактора, а тај фактор за фотонско и електронско зрачење је један, онда за фотонско и електронско зрачење не постоји разлика између апсорбоване и еквивалентне дозе. Стара јединица за еквивалентну дозу је rem и једнака је стотом делу Сиверта, тј.:

$$1 \text{ rem}=0,01 \text{ Sv}$$

Еквивалентна доза се односи само на спољашње зрачење.

таб.2.4.4.2. ICRP (међународна комисија за радиолошку заштиту) препоруке за границе еквивалентних доза на годину

граница еквивалентне дозе	mSv/god
професионално озрачење	50 mSv
озрачење појединца	5 mSv
озрачење становништва	1 mSv

2.4.5 Ефективна доза

Због различитог дејства једног истог зрачења на различите органе и ткива уведен је и ткивни тежински фактор w_T , па је због тога уведена ефективна доза зрачења или еквивалентна ефективна доза.

$$H_{ef} = H w_T$$

На пример, ако цело тело (сва ткива) буде контаминирано зрачењем интензитета 1 Sv, ризик од стохастичких учинака ће бити 1 (100%). А, ако се човек пијући млеко контаминирао са ^{131}I и ако је само штитњача примила дозу од 1 Sv штета (опасност од штете) ће бити таква као да је цело организам примио дозу од 0.05 Sv. Ту смо дозу добили тако што смо дозу контаминације штитњаче помножили с тежинским фактором [5].

Ефективна доза за цело тело добија се сабирањем ефективних доза за свако ткиво [16]:

$$H_{ef} = \sum_T H w_T = \sum_R \sum_T D w_R w_T$$

Досадашња истраживања су недвосмислено показала да су ткива чије се ћелије чешће деле осетљивија на зрачење. Ћелије које граде мишићна, нервна, коштана и слична ткива, с обзиром да се врло ретко, односно готово никад не деле, мање су осетљиве на изложеност зрачењу [7].

таб.2.5.5.1. Ткивни тежински фактори за поједине врсте ткива (органе) [8]

Ткиво или орган	Ткивни тежински фактор, w_T
Гонаде	0.20
Коштана срж	0.12
Дебело црево	0.12
Плућа	0.12
Стомак	0.12
Бешика	0.05
Груди	0.05
Јетра	0.05
Једњак	0.05
Штитњача	0.05
Кожа	0.01
Површина костију	0.01
Остатак	0.05
Цело тело укупно	1.00

Апсорбована доза се мери, а еквивалентна и ефективна израчунавају.

Доза коју прими појединац, из било ког извора, број изложених особа односно вероватност излагања јонизујућем зрачењу, мора се одржавати толико ниско колико је разумно могуће, а у складу са привредним и социјалним чиниоцима који се морају узети у обзир. За овај принцип често се користи скраћеница од енглеског As Low as Reasonably Achievable, ALARA.

3 Примена јонизујућег зрачења у стерилизацији и очувању хране

Велике количине хране се „покваре“ пре него што стигну до потрошача, што поред велике економске штете може изазвати и велике здравствене проблеме, ако се таква храна, због пропуста у дистрибуцији, конзумира. У сврху избегавања оваквих штетних последица храна се стерилише и конзервира. Поред већ познатих метода термичке стерилизације и конзервирања, у ту сврху се све више користи и јонизијуће зрачење.

3.1 Ефекти зрачења хране

Зрачењем хране јонизујућим зрачењем се постиже лакше (дуготрајније) чување хране, делимична или чак потпуна стерилизација, контрола клијања, сазревања и штетних инсеката, као и контрола болести чији је узрок или преносилац храна.

Зрачење хране у сврху дуготрајнијег чувања се углавном врши електронским или електромагнетним зрачењем. Због избегавања индуковане, вештачке радиоактивности постављена је горња граница енергије фотона (до 5 MeV) и електрона (до 10 MeV). Ограниченим дозе, зависно од врсте, припреме и намене хране (најчешће око 1 kGy), не нарушава се прехранбена вредност намирница. Одговарајућим избором дозе постиже се равнотежа између убијања наметника и микроорганизама, и делимичне разградње хранљивих састојака. Та делимична разградња има и својих предности-побољшана је пробављивост неких компоненти, али, слично као и код стерилизације загревањем, са већим дозама зрачења, оштећују се неки витамини: A, B-1, C, E, K [1].

Хемијска разградња је мања код мањег садржаја воде у намирницама (сушене намирнице, залеђена храна) и без присуства кисеоника (вакуумирана паковања). Пошто се препорученим ограничењима доза не постиже потпуна стерилизација хране, неопходно је придржавати се уобичајених правила поступања са хранон (одговарајући хигијенск услови и расхлађивање).

Зрачење је посебно употребљиво у спречавању клијања намирница као што су лук и кромпир, применом доза од само 0,05-0,15 kGy, тим пре што је употреба хемијских средстава у ове сврхе све непопуларнија. Већим дозама (1-2 kGy) успорава се презревање и одржава свежина јагода, гљива, и слично [1].

Убијање инсеката у хани зрачењем је, такође, привлачније од хемијског убијања. Инсекти се могу потпуно истребити у неким намирницама применом доза 0,25-0,5 kGy. У Украјини, на пример, два већа постројења са електронским акцелераторима процесуирају око 400 000 тона жита годишње.

Намирнице попут зачина и сувог поврћа нарочито су подесне за зрачење због малог садржаја воде (могу се користити и дозе веће од 10 kGy).



Уништавање микроорганизама у храни, вируса и бактерија пре свих, се одвија путем директног деловања јонизујућих зрака на њихову ћелијску структуру, пре свега кидањем веза у ДНК молекулама, али и индиректног деловања путем индукованих, слободних радикала, који такође разарају ћелијску структуру. Поред директног утицаја на кварење хране ови микроорганизми су још опаснији као узрочници тровања и разних оболења. Приближне смртоносне дозе за инсекте и поједине микроорганизмe су дате у таб.3.1.1. Резистентност живих организама на зрачење зависи, пре свега, од величине ДНК молекула и њихове способности репарације (поправљања) оштећења на тим молекулама насталих дејством зрачења. Бактерије због релативно великих ДНК молекула нису много отпорне на зрачење. Међу најотпорније организаме, изузимајући вирусе који су најрезистентнији на зрачење, спада бактерија *Deinococcus radiodurans R1*, због способности брзог поправљања мноштва једноструких или двоструких прекида на ланцима ДНК [9].

*таб.3.1.1.Приближне смртоносне дозе јонизујућег зрачења за неке организме.**

Организми	Приближна смртоносна доза (kGy)
Инсекти	0.22 до 0.93
Вируси	10 до 40
Квасци	3,7 до 18
Плесни	1.3 до 11
Бактерије:	
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	1.4
<i>Staphylococcus aureus</i>	1.4 до 7.0
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	4.2
<i>Salmonella</i> spp.	3.7 до 4.8
<i>Escherichia coli</i>	1.0 до 2.3
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1.6 до 2.3
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	1.2 до 2.3
<i>Enterobacter aerogenes</i>	1.4 до 1.8
<i>Lactobacillus</i> spp.	0.23 до 0.38
<i>Streptococcus faecalis</i>	1.7 до 8.8
<i>Leuconostoc dextranicum</i>	0.9
<i>Sarcina lutea</i>	3.7
Бактеријске споре:	
<i>Bacillus subtilis</i>	12 до 18
<i>Bacillus coagulans</i>	10
<i>Clostridium botulinum</i> (A)	19 до 37
<i>Clostridium botulinum</i> (E)	15 до 18
<i>Clostridium perfringens</i>	3.1
<i>Putrefactive anaerobe</i> 3679	23 до 50
<i>Bacillus stearothermophilus</i>	10 до 17

* Прилагођено од Frazier, W.C., and Westhoff, D.C. 1988. Chapter 10. Preservation by radiation. In *Food Microbiology* (Fourth edition). McGraw-Hill. New York, NY.

Због што мањих штетних ефеката зрачења хране користи се и комбиновани третман са класичним методама очувања и стерилизације хране: зрачење комбиновано са хлађењем или грејањем, зрачење у вакуумираним паковањима и сл., ради постизања синергичког ефекта.

Примена зрачења је посебно повољна за стерилизацију одређених прехрамбених производа, чији је хемијски састав осетљив на деловање високих температура (у случају примене термичке стерилизације), пошто се температура зрачене хране при третману незнатно повећа ($1-2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

У зависности од дозе зрачења, корисни ефекти зрачења хране, се најчешће класификују на следећи начин:

Радапертизација је зрачење хране енергијом зрачења у опсегу $25-45\text{ kGy}$, довољном да се спречи кварење или тровање од стране микроорганизама, без обзира на начин склаиштења након третмана зрачењем, једино под условом да се спречи реконтаминација. Овај поступак се такође зове и стерилизација и најчешће се користи за стерилизацију меса и месних производа.

С обзиром да велике дозе зрачења најчешће имају и своје негативне утицаје на сензорна својства третираног производа, неопходно је зрачење вршити на температурама испод $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Најбољи резултати су постигнути на температури $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Производи запаковани вакуумом и зрачени на ниским температурама и после две године чувања на температури од $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ имали су добре сензорне особине и потпуно одсуство патогених бактерија. Многобројна истраживања, хемијске анализе и експериментално храњење животиња нису показала штетне ефекте зрачења [10]. Код нас зрачење хране овако високим дозама није дозвољено, али је дозвољена стерилизација (деконтаминација) амбалаже. Радапертизација је, у ствари, потпуна стерилизација хране. У пракси се не иде на потпуно уништавање патогених микроорганизама јонизујућим зрачењем, због штетних и недовољно испитаних ефеката таквог третмана, већ се иде на њихову редукцију (90%-99%), тј. смањење до мере када не представљају опасност по здравствену исправност хране (Радицидација и Радуризација) [9].

Радицидација је зрачење хране дозом јонизујуће енергије довољном да смањи број животних облика способних за живот, као и аспорогених и патогених бактерија до нивоа да се ни једна од ових форми не може детектовати приликом испитивања хране било којом познатом бактериолошком методом. Овакав третман инактивира и паразите присутне у храни. Дозе које су неопходне су у опсегу $2-8\text{ kGy}$. Поступак се може применити и на уништавање паразита, као што су трихинела и пантљичара у месу, али са мањим дозама, $0,1-1\text{ kGy}$ [10].

Радуризација је третирање хране дозама зрачења, $0,4-10\text{ kGy}$, довољним за повећање и одржавање квалитета хране који може бити угрожен од стране узрочника супстанци редукције које се стварају повећењем броја живих микроорганизама узрочника кварења хране [10].

Дезинфекција је процес уништавања инсеката ларви и јајашаца смештених у неким житарицама и другим врстама хране, дозама мањим од 1 kGy , како би се избегло деловање хемијских агенаса на храну.

Контрола физиолошких процеса као што је спречавање клијања неких пољопривредних производа, посебно кромпира и лука, за шта су потребне врло ниске дозе јонизујућег зрачења и то $0,06\text{ kGy}$ за лук и $0,1\text{ kGy}$ за кромпир. Овај начин контроле физиолошких процеса се заснива на деструкцији ензима, чиме се продужава време сазревања воћа, а тиме се продужава и време транспорта и

складиштења (нпр. банане озрачене дозом од 0,1-0,4 kGy сазревају 10 до 20 дана касније од неозрачених банана) [1].

Ако се јагоде, шпаргле или шампиньони изложе дејству јонизујућег зрачења од 0,5 - 2 kGy, омогућава се дупло време складиштења. У Јужној Африци се због тога зраче банане, манго, папаја, урме и друго воће.

Намирнице животињског порекла могу да садрже како патогене (салмонеле, стафилококе, клостридије), тако и непатогену микрофлору, а могу садржавати и разне паразите (трихинеле, ехинококе). Такве намирнице су ризичне за здравље човека. Зрачењем ових намирница дозама од 5-10 kGy уништавају се и паразити и салмонеле, стафилококе и сл [10][9].

У наредној табели (таб. 3.1.1) дат је приказ неких функција зрачења са одговарајућим дозама и озраченим производима.

таб. 3.1.2. Функције зрачења хране (Извор WHO (1988))

Функција	Доза (kGy)	Озрачени производи
Ниске дозе испод 1 kGy		
Инхибиција клијања	0,05-0,15	кромпир, лук, корен ћумбира и тд.
Дезинфекција инсеката и дезинфекција паразита	0,15-0,5	Житарице и махунарке, свеже и сушено воће, сушена риба и месо, свежа свињетина и тд.
Одлагање физиолошки процеса (зрења нпр.)	0,5-1,0	Свеже воће и поврће
Средње дозе 1-10 kGy		
Продужетак века трајања	1,0-3,0	Свежа риба, јагоде и тд.
Одстрањивање патогених микроорг. и микроорг. узрочника кварења	1,0-7,0	Свежа и смрзнута морска храна, свежа или смрзнута живина и месо итд.
Побољшавање технолошких особина хране	2,0-7,0	Грејпфрут (повећање приноса сока), сушено поврће (редуковање времена кувања) и тд.
Високе дозе 10-50 kGy*		
Индустријска стерилизација (у комбинацији са благим загревањем)	30-50	Месо, живина, морска храна, готова јела, стерилизована дијетална храна за болнице
Деконтаминација проверених адитива хране и састојака	10-50	Зачини, ензимски препарати, природна гума, и тд.

*Дозвољено само за специјалне потребе (FAO/IAEA/WHO)

таб.3.1.3.Храна дозвољена да буде третирана зрачењем према FDA прописима [11]

Врста хране	Намена	Доза [kGy]
Свежа свињетина	контрола трихинеле	0,3 мин, 1 макс
Свежа храна	Успоравање раста и сазревања, Дезинфекција	1 макс 1 макс
Суви ензимски препарати	Микро дезинфекција	10 макс
Суви зачини	Микро дезинфекција	30 макс
Живина	Контрола патогених организама	3 макс
Хлађено месо	Контрола патогених организама	4,5 макс
Замрзнуто месо	Контрола патогених организама	7 макс
Залеђено месо (NASA)	Стерилизација	44 макс

И код третмана хране зрачењем у сврху њеног очувања присутни су извесни непожељни ефекти. Губитак тиамина (витамин B_1) (таб.3.1.2.) и полузаједићених масних киселина је један од најштетнијих ефеката зрачења. Губици зависе од температуре и дозе зрачења. Ради смањења губитака зрачи се при ниским температурама (-30°C до -40°C) без кисеоника, паковањем у вакууму или атмосфери азота. Зрачење у присуству кисеоника утиче на оксидацију липида и стварање карбонила, који реагују са протеинима и аминокиселинама и тако се губи садржај протеина. Зрачењем воћа и поврћа смањује се садржај витамина С и каротена. Губитак витамина Е се може смањити паковањем у вакууму.

таб.3.1.2. Упоредни приказ задржаног тиамина (витамин B_1) [12]

Месо	Процент у зраченом узорку	Процент у конзервираном узорку
Говедина	21	44
Пилетина	22	66
Свињетина	12	57

таб.3.1.3. Упоредни приказ задржаног витамина у 1 kg куване пилетине у зраченом и незраченом узорку [12]

Витамин	Незрачени узорак	Зрачени узорак
Витамин А (међун.јед.)	2200	2450
Витамин Е (mg)	3,3	2,15
Тиамин (mg)	0,58	0,42
Рибофлавин (mg)	2,10	2,25
Ниацин (mg)	58,0	55,5
Витамин B_6 (mg)	1,22	1,35
Витамин B_{12} (mg)	21	28

Параметри који одређују садржај радиолитичких продуката, који су најзаслужнији за негативне ефекте зрачења, су: радијациона доза која је апсорбована, температура хране, састав, вискозитет, и околина за време третмана.

3.2 Процеси зрачења хране

Три су комерцијално примењивана начина зрачења хране: снопом брзих електрона, гама зрацима и, ређе, γ зрацима.

Упоредни приказ неких карактеристика зрачења хране разним методама [13]

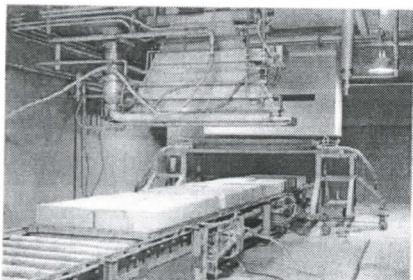
таб. 3.2.1. Упоредни приказ неких карактеристика зрачења хране разним методама [13]

	Гама зраци	X-зраци	Брзи електрони
Типична снага (активност) извора	3,5 MCi (1 MCi \equiv 15 kW)	25 kW	35 kW
Типична процесиона брзина	12 t/h 4 kGy	10 t/h 4 kGy	5-10 t/h 4 kGy
Енергија извора	1,33 MeV	5 MeV	5-10 MeV
Дубина проридања	80-100 cm	80-100 cm	8-10 cm
Хомогеност дозе	Висока	Висока	Ниска
Величина дозе	Ниска	Висока	Највиша
Најбоља примена	Процесирање расутог терета у великим кутијама или производа допремљених на палетама у складишним условима	Процесирање расутог терета у великим кутијама или производа допремљених на палетама у складишним условима	Секвенцијално процесирање примарно или секундарно упакованих производа у линији или на линији

Цене постројења за зрачење хране је нешто већа од класичних постројења за исту намену. Примера ради, у САД изградња једног комерцијалног постројења за третман хране зрачењем са ^{60}Co као извором кошта од 3 до 5 милиона долара, зависно од величине, процесионог капацитета и осталих фактора. Постројење умерене величине, са истом функцијом, са класичним високо-температурним третманом хране, кошта око 2 милиона долара [14].

Упркос нешто већој цени уређаји за зрачење хране су економски исплативи због своје ефикасности.

3.2.1 Зрачење хране брзим електронима



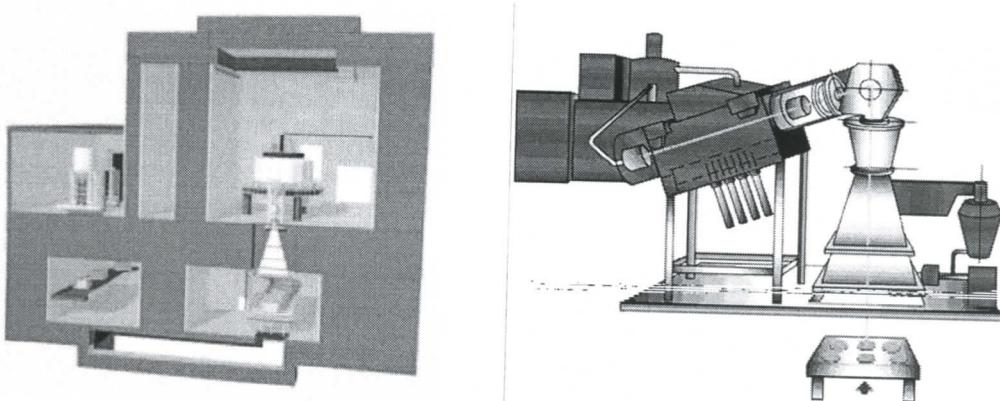
Сл.3.2.1.1.Зрачење хране високоенергетским електронима

Усмерени сноп високоенергетских електрона, energije 5-10 MeV и снаге до 10 kW, се „испаљује“ из акцелаторске апаратуре (обично линеарни акцелератор), и он се може по потреби искључити и укључити. Поред ове изразите предности у односу на гама зрачење, предност је и одсуство потенцијално опасног радиоактивног материјала. Највећи недостатак овог начина зрачења хране је, због масе електрона, мала продорна моћ-свега око 3-6 cm

(зависно од врсте хране). Ефикасност се може повећати постављањем два спона у опозициони положај чиме се дебљина зраченог узорка може повећати.

Због наведених ограничења паковање хране која се зрачи мора имати мале димензије (Сл.3.2.1.1.). Недостаци овог начина зрачења су и комплексност и захтевно одржавање уређаја, као и велика потрошња електричне енергије.

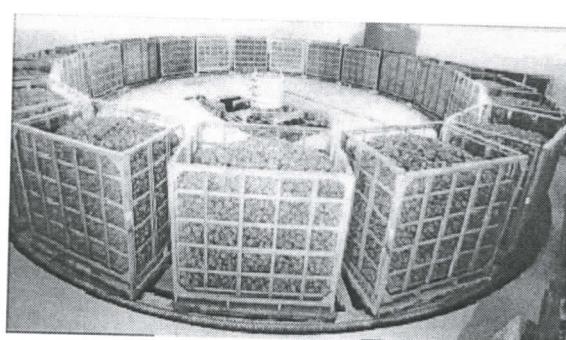
Упрошћен начин рада оваквог уређаја је следећи: покретна трака доводи прехранбене производе испод електронског спона (Сл.3.2.1.2.) предодређеном брзином, која омогућава пријем одговарајуће дозе зрачења, а покретна трака, након зрачења, одводи производе ван зоне зрачења [15].



Сл.3.2.1.2. Шематски приказ уређаја за електронско озрачивање хране

3.2.2 Употреба гама зрачења у третману хране

Предност зрачења хране употребом гама зрака се огледа у већој продорности од брзих електрона (преко 50 cm), који се користе у претходно описаном поступку зрачења хране брзим електронима. Због тога се на овај начин могу зрачити веће количине материјала у расутом стању у већим кутијама, или производи на палетама спремни за превоз или складиштење.



Сл.3.2.2.1.Зрачење кромпира у Јапану

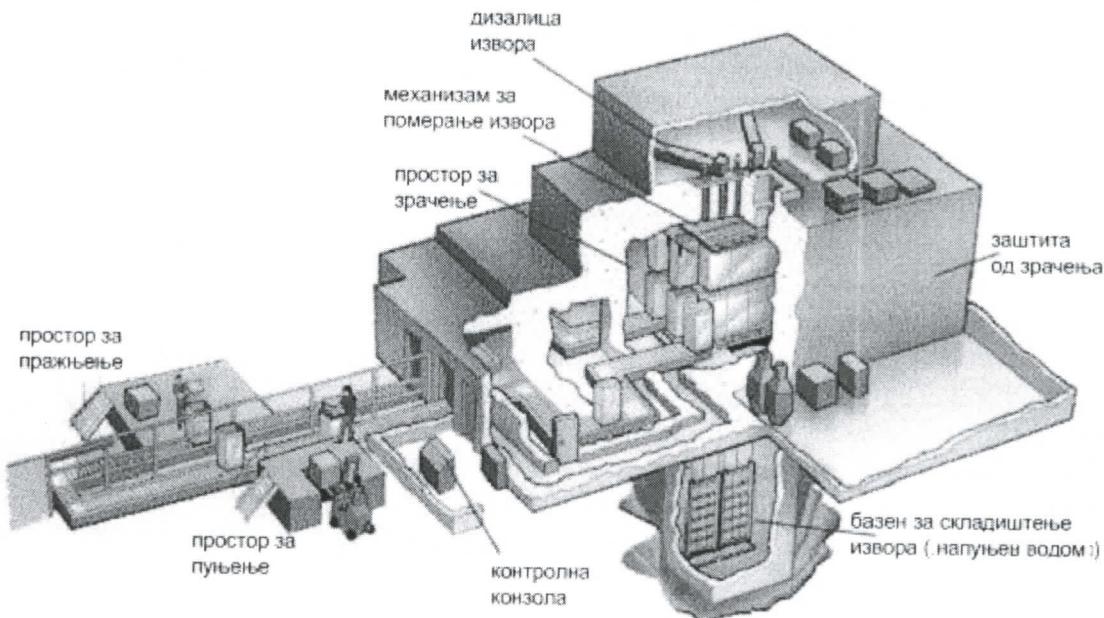
Један од недостатака употребе гама зрачења је управо њихова велика продорност и штетност по здравље људи. Мана овог начина зрачења хране је, поред немогућности да се извор зрачења по потреби искључи, потреба за мерама заштите од зрачења, које се огледају у потреби за врло дебелим бетонским зидовима (1,5-1,8 m) око просторије за зрачење (Сл.3.2.2.2.), као и потреби за спуштањем извора под земљу (око 6 m) у водени базен у време када постројење не ради или када се храна поставља за зрачење. Проблем је и потреба за релативно честим допуњавањем извора, као и складиштењем

радиоактивног отпада (иако је време полураспада кратко).

Као извор зрачења у овим уређајима се најчешће користи ^{60}Co , а много ређе ^{137}Cs .

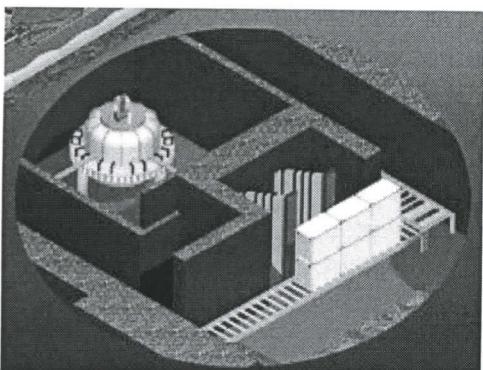
Радиоактивни ^{60}Co је откривен 1930. на Калифорнијском универзитету Беркли. Он се за комерцијалну употребу добија у линеарним акцелераторима или излагањем ^{59}Co неутронској радијацији. Његов полуживот је 5,27 година а распада се у стабилан Никл уз емисију бета честице и гама зрачења. Преко 80% ^{60}Co доступног на светском тржишту произведено је у Канади. Остали производи су Руска Федерација, Народна Република Кина, Индија и Јужна Африка.

Радиоактивни ^{137}Cs се добија као један од могућих фрагмената фисије урана или плутонијума након апсорбције неутрона (неизбежан је заостатак нуклеарних проба). Време полураспада овог изотопа је 30,17 година, а распада се емисијом бета честице и гама зрачења на ^{137m}Ba , а овај, даље, емисијом гама зрака у стабилни ^{137}Ba .



Сл. 3.2 2.2. Постројење за зрачење хране гама зрацима

3.2.3 Употреба X зрака у зрачењу хране



Сл. 3.2.3.1. Шематски приказ уређаја за зрачење хране X зрацима

Постројења која као извор радијације користе X зраке обједињују извесне предности два претходно описана начина зрачења: релативно велику продорну моћ (одлика гама зрачења) и могућност искључивања и укључивања уређаја по потреби (одлика зрачења брзим електронима), али и њихове мане: захтевно одржавање постројења, велики утрошак електричне енергије (као код зрачења електронима) и потреба заштите од продорног зрачења (као код гама зрачења). Мана овог поступка је и мала ефикасност

претварања енергије брзих електрона у енергију γ зрака. Ова врста третмана хране је мање комерцијално заступљена од третмана брзим електронома и гама зрачењем [13].

3.3 Здравствена исправност означене хране

Приликом сагледавања здравствене безбедности зрачене хране посебна пажња је посвећена утицају зрачења на здравствену исправност намирница, могућности стварање токсичних и канцерогених супстанци под дејством зрачења и могућности да означене хране постане радиоактивна.

Енергија гама зрака, γ зрака и убрзаних електрона није довољна да доспеју до атомског језгра, јер делују само на периферни слој електрона, па намирнице означене овим поступцима, не могу постати радиоактивне.

Да би се означена намирница означила као нешкодљива, морају бити испуњена четири услова:

- Да у њој нема индуковане радиоактивности,
- Да нема патогених микроорганизама и њихових токсина,
- Да нема значајних губитака храњивих састојака и
- Да нема токсичних, мутагених или канцерогених радиолитичких производа.

Прва три услова се могу проверити детаљним хемијским и микробиолошким анализама третираног производа. Зрачење хране се ограничава на коришћење гама и γ зрака, као и брзих електрона, који при проласку кроз материју не индукују радиоактивност. Подаци о одсуству токсичних, мутагених и канцерогених једињења, добијају се из експеримената са храњењем животиња означеном храном.

WHO (1981) је дала прелиминарни извештај у коме се каже да је заједнички Комитет експерата у оквиру FAO/IAEA/WHO закључио да зрачење било ког прехранбеног артикла у распону просечне дозе зрачења до 10 kGy није токсиколошки опасно, тако да токсиколошки тестови овако третиране хране нису даље обавезни. Закључци експертног Комитета су, dakле, јасно засновани и кажу да је означена храна дозом зрачења до 10 kGy здравствено исправна и ослобођена је испитивања на токсичност, канцерогеност, радиоактивност и антигеност [1].

3.4 Законска регулатива

Дугогодишња истраживања и проучавања означене хране одредила су оквире у којима се може гарантовати нешкодљивост хране процесуиране јонизујућим зрачењем. Међународно усклађене стандарде у овој области објавила је 1983. године Комисија за прехранбени кодекс (CAC), здруженог програма организација FAO и WHO [1].

У нашој земљи је 28.12.1984. године, на основу претходно наведене препоруке Комитета експерата FAO/IAEA/WHO, а по предлогу наших стручњака за нуклеарне науке, донет Правилник (Сл. лист СФРЈ бр. 68/84), којим се одобрава употреба јонизујућег зрачења за стерилизацију следећих врста хране: жита, легуминозе, црни и бели лук, кромпир, дехидрирано воће и поврће, сушене печурке, јаја у праху, чајеви, зачини, свеже месо перади, као и амбалаже за намирнице, средстава за одржавање личне хигијене, негу и улепшавање лица и тела.

У службеном листу бр. 42/98 Савезне Републике Југославије, из 1998. године, је донесен правилник о условима под којима се могу стављати у промет

намирнице и предмети опште употребе који су конзервисани јонизујућим зрачењем чиме је престао да важи правилник из 1984. године. Саставни део правилника је листа намирница и предмета опште употребе који се могу конзервирати јонизујућим зрачењем, где је за сваки предмет приказана сврха зрачења, као и одговарајућа максимална дозвољена доза зрачења (таб.3.4.1.)

Поред осталог, у члану осам овог правилника стоји да правно лице које се бави конзервисањем намирница и предмета опште употребе јонизујућим зрачењем мора да поседује документацију и да води евиденцију за сваку поједину серију производа, и то:

1. назив производа и његово трговачко име ако га производ има;
2. назив и седиште произвођача, односно предузећа које пакује или продаје производ и власника производа;
3. број серије производа;
4. услове чувања и складиштења код овлашћеног правног лица које врши јонизујуће озрачивање производа;
5. податке о квалитету и здравственој исправности производа пре озрачивања, које обезбеђује наручилац услуге озрачивања;
6. податке о оптималној дози да би се постигао ефекат озрачивања;
7. тип амбалаже која се користи за време озрачивања;
8. датум озрачивања, име и презиме лица одговорног и овлашћеног за озрачивање;
9. податке о раду постројења и контроли процеса, укључујући и резултате дозиметријске контроле;
10. друге податке који могу бити од значаја за оцену означеног производа.

Члан 3 истог правилника прописује начин како се предмети из листе (таб.3.4.1.) могу конзервисати:

1. гама зрацима радионуклида ^{60}Co и ^{137}Cs ;
2. рендгенским зрачењем из уређаја који раде на енергетском нивоу од 5 MeV или ниже;
3. електронима произведеним уређајима који раде на енергетском нивоу од 10 MeV или ниже

Код нас се зрачење хране, или неких других материјала, обавља у Институту за нуклеарне науке "Винча" у Винчи. Као извор гама зрака најчешће се користи ^{60}Co .

Немају све земље исти однос према зрачењу хране. Свега педесетак земаља дозвољава третман хране зрачењем.

Храна која је изложена зрачењу се обавезно означава светски признатим симболом који се назива "радура" (Сл.3.4.1.). Поред тога озачена храна која се продаје мора бити означена написом

RADIATED, TREATED WITH IRRADIATION
(ЗРАЧЕНО, ТРЕТИРАНО ЗРАЧЕЊЕМ)



Сл.3.4.1. Радура-симбол зрачене хране.

таб.3.4.1. Намирнице и предмети опиште употребе који се могу конзервисати јонизујућим зрачењем и максимално дозвољене дозе зрачење (Сл. лист CPJ бр 42/98).

P. бр.	Намирнице и предмети опште употребе	Сврха озрачења	Максимално дозвољена доза зрачења (kGy)
1.	Жита	уништавање инсеката	1
2.	Млевени производи од жита	уништавање инсеката деконтаминација *	1 10
3.	Легуминозе	уништавање инсеката	1
4.	Млевени производи од легуминоза	уништавање инсеката деконтаминација	1 10
5.	Дехидрирано воће и поврће, сушене печурке	уништавање инсеката деконтаминација	1 10
6.	Црни и бели лук, кромпир	спречавање клијања	0,15
7.	Чајеви и екстракти чајева у праху	уништавање инсеката деконтаминација	1 10
8.	Зачини и смеше зачина	уништавање инсеката деконтаминација	1 10
9.	Сурутка и јогурт у праху	деконтаминација	2
10.	На-казеинат у праху	деконтаминација	6
11.	Јаја у праху	деконтаминација	3
12.	Рибе и производи од рибе	уништавање инсеката деконтаминација	1 2,2
13.	Пилеће месо	деконтарниција, продужење одрживости	3
14.	Дехидрирани производи од крви закланих животиња	деконтаминација	8
15.	Арапска гума	деконтаминација	10
16.	Дехидрирани ензимски препарати	деконтаминација	10
17.	Средства за одржавање личне хигијене, негу и улепсавањелица и тела	деконтаминација	10
18.	Амбалажа за намирнице	деконтаминација	25

* бактеријска (радиопастеризација, радиостерилизација)

4 Закључак

Непосредне штете од кварења хране у земљама у развоју процењују се на десетак милијарди долара. Према подацима светске здравствене организације конзумирање здравствено неисправне хране је на првом месту узрочника тровања и разних оболења, са смртним исходом као последицом [1].

Очигледна је потреба за даљим унапређивањем поступака за очување хране. Иако до сада мало коришћена, употреба јонизујућег зрачења у ове сврхе могло би да доведе до побољшања у овој области, нарочито у неким применама, као и у комбинацији са другим методима.

Зрачење хране обезбеђује сигурније снабдевање становништва храном, смањује губитке хране после жетви и убирања, смањује број оболелих и умрлих узрокованих патогеним организмима из хране, успорава зрење и спречава клијање неких биљних култура (кромпира и лука) па тиме повећава могуће време складиштења.

Упркос технолошким и другим предностима, метод третирања хране јонизујућим зрачењем је оптерећен многим предрасудама, и релативно мало је примењиван. И потрошачи и прехранбена индустрија показују отпор овој технологији. Разлози су првенствено у слабој информисаности и едукацији, па је за промену таквог стања неопходно чинити напоре управо у том смеру.

Примена третмана хране зрачењем ће доживети успех само када се сложе законодавац, прехранбена индустрија и потрошачи да је тај начин третмана хране ефикасан и сигуран. Одговарајућа контрола и инспекцијске процедуре су неопходни услови за ту сагласност.

Скраћенице

US FDA-US Food and Drug Administration (Амерички владин уред за храну и лекове)

IAEA-International Atomic Energy Agency (Међународна Агенција за Атомску Енергију)

WHO – World Health Organization (Светска Здравствена Организација)

FAO-Food and Agriculture Organization (of the United Nations)
(Организација Уједињених Нација за храну и пољопривреду)

CAC-Codex Alimentarius Commission (Међународна комисија за прехранбени кодекс)

ICRP - International Commission on Radiological Protection (Међународна комисија за радиолошку заштиту)

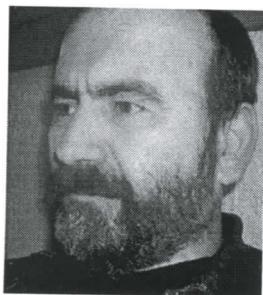
Литература

- [1] *Јонизирајуће зрачење у свакодневници*, Ивица Левант
- [2] *Скрипта из Нуклеарне физике*, проф др Мидраг Крмар, ПМФ Нови Сад
- [3] *Нуклеарна и радиохемија*, Gerhart Friedlander, Joseph W. Kennedy, Научна Књига, Београд, 1962.
- [4] The development x-ray machines for food irradiation (proceedings of a consultants' meeting), Vienna, Austria, 16-18 October 1995.
- [5] <http://www.radiobiologija.vef.hr/skripta/RAD11-20.htm>
- [6] <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/r/radiation-weight-factor.htm>
- [7] <http://www.mans.edu.eg/facscim/english/courses/zoology/Radiobiology-1/L%207.ppt>
- [8] <http://www.gla.ac.uk/services/radiationprotection/rp4.doc>
- [9] <http://www.tehnologijahrane.com/mikrobiologija/metode-konzervisanja/primena-zracenja-kao-metod-konzervisanja-namirnica>
- [10] www.consumer.org.rs/saveti/hrana/iradijacija/ekons.htm
- [11] http://www.tempus16140.rs.sr/seminars/modul5/jonizacija_5.pdf
- [12] <http://www.physics.isu.edu/radinf/food.htm>
- [13] http://www.reviss.com/products/pdfs/File/Food/Food_Key%20to%20Units.pdf
- [14] http://www.cherry.gatech.edu/mot/97/group/food_irrad.pdf
- [15] <http://www.extension.iastate.edu/foodsafety/irradiation/index.cfm?articleID=23&parent=3>
- [16] <http://www.npl.co.uk/server.php?show=ConWebDoc.1526>

Кратка биографија

Рођен сам у селу Лозна, општина Бановићи, Република Босна и Херцеговина, 15.09.1963. године. У истом месту сам завршио основну школу.

Гимназију сам завршио у Бановићима, а Педагошку академију, на смеру математика-физика завршио сам у Тузли 1986. године.



Радио сам у основним школама у Хајдеровићима (општина Завидовићи, Б и Х), Бановићима, Село Бановићима, Лозној (Б и Х) и Борову Селу (Република Хрватска-1995-1997. година), као наставник математике и физике.

Сада радим у основној школи „Иван Горан Ковачић“ у Станишићу (код Сомбора) као наставник математике и физике.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Monografska dokumentacija

TZ

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada:

VR

Diplomski rad

Autor:

AU

Dragoljub Đurić

Mentor:

MN

dr Nataša Todorović

Naslov rada:

NR

Sterilizacija i očuvanje hrane ionizujućim zračenjem

Jezik publikacije:

JP

srpski (ćirilica)

Jezik izvoda:

JI

srpski/engleski

Zemlja publikovanja:

ZP

Srbija

Uže geografsko područje:

UGP

Vojvodina

Godina:

GO

2008.

Izdavač:

IZ

Autorski reprint

Mesto i adresa:

MA

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Fizički opis rada:

FO

(broj poglavlja/broj strana/broj referenci/broj tabela/broj slika): (4/28/16/10/8)

Naučna oblast:

NO

FIZIKA

Nuklearna fizika, zaštita životne sredine

4.1.1.1 ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

jonizujuće zračenje, sterilizacija hrane

UDK

Čuva se:

ČU

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

Važna napomena:

VN

nema

Izvod:

IZ

Opisane metode sterilizacije i očuvanja hrane ionizujućim zračenjem

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

9.12.2008.

Datum odbrane:

DO

23.12.2008.

Članovi komisije:

KO

prof. dr Miodrag Krmar

član:

dr Sonja Skuban

član:

dr Nataša Todorović

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

LT

Language of abstract:

LA

Country of publication:

CP

Locality of publication:

LP

Publication year:

PY

Publisher:

PU

Publication place:

PP

Physical description:

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

HD

Note:

N

Abstract:

AB

Monograph publication

Textual printed material

Final paper

Dragoljub Đurić

dr Nataša Todorović

Processing of food by ionizing radiation

Serbian

English

Serbia

Vojvodina

2008

Author's reprint

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

(chapter / pages /literature / tables / pictures):(4/28/16/10/8)
Physics

Nuclear physics, environmetal sciences

ionizing radiation, food processing

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

none

The methods of processing of food by ionizing radiation were described.

Accepted by the Scientific Board: 9.12.2008.

ASB

Defended on: 23.12.2008.

DE

Thesis defend board:

DB

President: prof. dr Miodrag Krmar

Member: dr Sonja Skuban

Member: dr Nataša Todorović