ПРЕДГОВОР

Књига „Радијациона физика“ писана је с циљем да буде уџбеник за студенте физике, али и да послужи студентима других факултета који се интересују за радијацију - зрачење. У њој се аутор определио за разматрање три наслова: Нејонизујуће зрачење, Јонизујуће зрачење и Ефекти јонизујућих зрачења. Открића два природна феномена, радијације и радиоактивности су стицајем околности упарена, али се углавном поистовећују, иако електромагнетни спектар зрачења не чини искључиво радиоактивно, већ свако зрачење које постоји у природи и које је створио човек. Наравно, имајући у виду значај познавања процеса интеракције различитих врста зрачења и ефекте на биолошке системе, примарни акценат у овом уџбенику дат је јонизујућем зрачењу.

Стога се надам да ће заинтересовани читалац у књизи наћи одговоре на многа питања у вези врста и извора зрачења, њихових интеракција са материјом и ефектима које зрачење производи у материји.

Свако дело без обзира на пажњу којом је његово настајање праћено садржи одређене недостатке, па се унапред захваљујем свима који ће примедбама указати на њих.

Посебно се захваљујем рецензентима на пажљивом читању и сугестијама којима су допринели квалитету текста.

Аутор

Садржај

Увод.....- 1 -

НЕЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ

1. Појам и извори нејонизујућег зрачења..... - 5 -

1.1.Ултраљубичасто зрачење..... - 6 -

1.1.1.Извори и примена UV зрачења..... - 7 -

1.2.Видљиво зрачење..... - 8 -

1.3.Инфрацрвено зрачење..... - 9 -

1.3.1.Извори и примена IC зрачења..... - 10 -

1.4. Радиофрекфенцијско (RF) зрачење..... - 10 -

2.Ефекти интеракције нејонизујућег зрачења и материје. Мере заштите.....- 13 -

2.1. Дејство и ефекти UV зрачења..... - 14 -

2.2. Инфрацрвено зрачење и здравље људи..... - 16 -

2.3.Ефекти и дејство RF зрачења на здравље..... - 17 -

2.4.Технике и мере заштите од нејонизујућих зрачења..... - 18 -

2.4.1.Заштита од UV зрачења..... - 18 -

2.4.2.Заштита од вештачког IC-зрачења..... - 18 -

2.4.3.Мере заштите у области RF зрачења и електромагнетних поља…….....- 19 -

РЕЗИМЕ: НЕЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ.....- 22 -

ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ

3. Подела, врсте и извори јонизујућег зрачења.....- 23 -

3.1.Подела јонизујућих зрачења..... - 23 -

3.2. Опште карактеристике честица и зрачења..... - 24 -

3.3. Извори јонизујућег зрачења..... - 37 -

3.3.1.Природни извори јонизујућих зрачења..... - 37 -

3.3.2.Вештачки извори јонизујућих зрачења ..... - 38 -
4.Интеракција наелектрисаних честица са материјом ..... - 40 -
4.1. Судари ..... - 41 -
4.1.1. Еластични судари ..... - 41 -
4.1.2. Нееластични судари са омотачем ..... - 44 -
4.2. Губитак енергије ..... - 47 -
4.2.1. Зауставна моћ (*-dE/dx*) ..... - 47 -
4.2.2. Релативна зауставна моћ ..... - 49 -
4.2.3. Енергија по јонском пару ..... - 50 -
4.3. Продирање снопа наелектрисаних честица ..... - 50 -
4.3.1. Ширење снопа ..... - 50 -
4.3.2.Домет ..... - 52 -
5. Пролаз тешких наелектрисаних честица кроз материју ..... - 54 -
5.1. Механизми губитка енергије ..... - 54 -
5.1.1. Максимална пренета енергија у судару ..... - 54 -
5.2. Зауставна моћ ..... - 56 -
5.2.1. Bethe-ова формула ..... - 56 -
5.2.2. Средња енергија ексцитације ..... - 57 -
5.2.3. Ограничења и корекције Bethe-ове формуле ..... - 59 -
5.3. Природа трага ..... - 60 -
5.4. Домет ..... - 60 -
6. Интеракција бета честица са материјом ..... - 65 -
6.1. Механизми губитка енергије ..... - 65 -
6.2. Зауставна моћ ..... - 65 -
6.2.1. Сударна зауставна моћ ..... - 65 -
6.2.2. Радијациона зауставна моћ ..... - 68 -
6.2.3. Радијациони принос ..... - 69 -
6.3. Природа трага ..... - 70 -
6.4. Домет ..... - 70 -

6.5. Спектар једноструких судара и трагови електрона у води ... - 73 -
7. Феномени који прате трагове наелектрисаних честица.....- 76 -
7.1.1. Делта зраци ..... - 76 -
7.2. Специфична јонизација ..... - 77 -
7.3. Ограничена зауставна моћ ..... - 78 -
7.4. Линеарно пренета енергија (LET) ..... - 80 -
7.5 Раштркавање ..... - 81 -
7.5.1. Енергетско раштркавање ..... - 81 -
7.5.2. Раштркавање домета ..... - 83 -
7.6. Вишеструко Кулоново расејање ..... - 85 -
7.7. Брзина и време успоравања ..... - 86 -
8. Интеракција фотона са материјом.....- 87 -
8.1. Фотоелектрични ефекат ..... - 88 -
8.1.1. Угаона расподела фотоелектрона ..... - 90 -
8.1.2. Зависност од енергије и атомског броја ..... - 90 -
8.2. Комптонов ефекат ..... - 91 -
8.2.1. Комптонов померај ..... - 92 -
8.2.2. Угаона расподела Комптонових електрона ..... - 93 -
8.2.3. Зависност од енергије и атомског броја ..... - 95 -
8.3.1. Угаона расподела и зависност од енергије и Z ..... - 96 -
8.4.Остали процеси интеракције фотона са материјом ..... - 97 -
8.4.1. Томсоново расејање ..... - 97 -
8.4.2. Рејлијево расејање ..... - 98 -
8.4.3.Фотонуклеарне реакције ..... - 98 -
8.5.Интеракција рендгенског зрачења са материјом ..... - 99 -
8.5.1. Интеракција *x*- фотона и ткива ..... - 101 -
9. Атенуирање фотонског снопа зрачења.....- 103 -
9.1. Коефицијенти слабљења, апсорпције и расејања ..... - 103 -
9.2.Ефикасни пресеци ..... - 108 -

10. Интеракција неутрона са материјом.....- 112 -
10.1. Еластично расејање неутрона..... - 114 -
10.1.1. Потенцијално расејање..... - 114 -
10.1.2. Резонантно расејање неутрона..... - 115 -
10.2.Нееластично расејање неутрона ..... - 116 -
10.3. Губитак енергије неутрона при расејању..... - 118 -
10.3.1. Доплерово ширење резонанце ..... - 120 -
10.4. Апсорпција неутрона..... - 121 -
10.4.1.Радијативна апсорпција неутрона ..... - 121 -
10.4.2.Фисија ..... - 122 -
10.4.3.Густина неутронског флукса и ефикасни пресеци..... - 123 -
10.4.4.Енергетска расподела неутрона у успоравању..... - 124 -
РЕЗИМЕ: ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ.....- 126 -

ЕФЕКТИ ЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА

11.Фазе радијационих ефеката.....- 131 -
11.1. Физичке и физичкохемијске промене у води ..... - 131 -
11.2. Хемијске промене..... - 133 -
11.3. Биолошка фаза - процеси у ћелијама и ткиву..... - 134 -
11.3.1. Директна интеракција..... - 134 -
11.3.2. Индиректна интеракција ..... - 136 -
11.3.3.Утицај зрачења на ДНК..... - 137 -
12. Биолошки ефекти зрачења.....- 139 -
12.1. Соматски ефекти..... - 141 -
12.1.1.Ефекти зрачења на различитим органима и ткивима..... - 143 -
12.2.Генетски ефекти..... - 144 -
12.3. Акутни радијациони синдром ..... - 146 -
13. Подаци о озрачивању људи.....- 148 -
13.1.Професионално излагање..... - 148 -
13.2.Медицинско излагање..... - 150 -

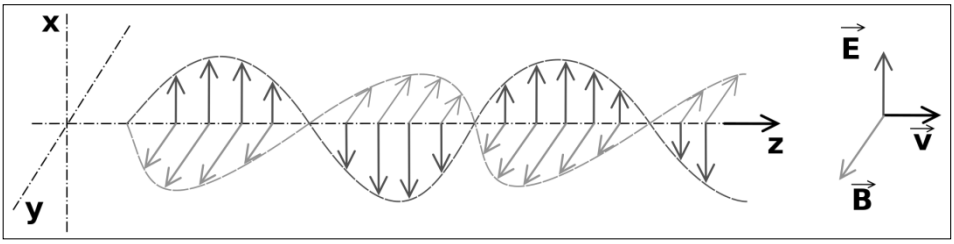
13.3. Нуклеарна оружја ..... - 150 -
14. Методе заштите од зрачења..... - 153 -
14.1.Заштита од алфа зрачења..... - 154 -
14.2.Заштита од бета зрачења..... - 154 -
14.3.Заштита од неутрона ..... - 155 -
14.4.Заштита од гама и рендгенског зрачења..... - 157 -
14.4.1.Заштита од гама зрачења..... - 158 -
14.4.2.Заштита од х-зрачних уређаја..... - 158 -
РЕЗИМЕ: ЕФЕКТИ ЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА.....-162-
Литература..... - 163 -

Увод

Зрачење представља усмерени пренос енергије преко честица или таласа, у коме енергетске честице или енергетски таласи путују кроз вакуум или кроз материју. Ако се зрачење састоји од честица (корпускула) зове се корпускуларно зрачење, а ако се преноси у облику таласа (кванта енергије, фотона) зове се електромагнетно зрачење.

Електромагнетни талас базиран је на појму физичког поља, специфичног вида постојања материје у коме се у свакој тачки простора осећа дејство сила. Електромагнетно поље (приказано на слици) представља нераскидиво јединство променљивог електричног $\vec{E}(\vec{r},t)$ и променљивог магнетног поља $\vec{B}(\vec{r},t)$. Карактеристика ових поља је да једно поље својом променом ствара оно друго, и обрнуто. Друга важна особина електроманетног поља је да не може бити локализовано у простору, тј. кад год постоји електромагнетно поље, оно се шири кроз простор у виду електромагнетног таласа и на тај начин преноси електромагнетну енергију. Код електромагнетног таласа осцилују вектори електричног и магнетног поља за чије постојање нису неопходне честице средине као код механичких таласа, па се он може простирати и кроз вакуум. Брзина простирања електромагнетих таласа у вакууму је универзална физичка константа и може се изразити преко диелектричне (ε_0= 8,85·10^{-12} F/m) и магнетне (μ_0 = 4π 10^{-7}H/m) пропустљивости вакуума:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$



Простирање електромагнетног таласа у простору

Основне физичке величине које описују таласе су брзина простирања c, фреквенција ν и таласна дужина λ, које су у вези:

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

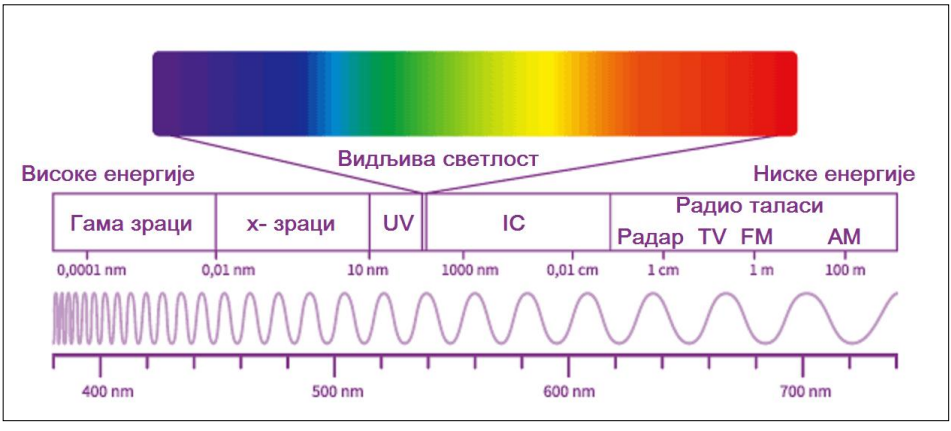
Тела зраче електромагнетне таласе у одређеним „порцијама“ (квантима) енергије. Кванти електромагнетног поља су фотони; маса мировања је једнака нули, а енергија фотона (електромагнетног таласа) је:

$$E = h \cdot \nu = h\frac{c}{\lambda}$$

где је h=6.625·10^{-34} J·s, Планкова константа.

Према савременом схватању дуалистичка теорија важи за све електромагнетне таласе без обзира на њихову фреквенцију (таласну дужину). Честична (квантна) и таласна (електромагнетна) теорија не искључују једна другу, већ се допуњују. На основу де Брољеве релације таласна дужина таласа придруженог честици је обрнуто пропорционална импулсу честице (λ=h/p) и да ће се честична својства електромагнетног зрачења осећати утолико више уколико је њихова таласна дужина мања.

Цео опсег таласних дужина (фреквенција) зрачења који постоји у природи и који је настао људском делатношћу представља *спектар електромагнетног зрачења*. Он обухвата скуп електромагнетних таласа у широком интервалу таласних дужина (од 10^{-15}-10^{4} m). У зависности од таласне дужине (фреквенције) електромагнетни таласи се деле на неколико група: *γ*-зраци, *x*-зраци, ултраљубичасти зраци, видљива светлост, инфрацрвени зраци и радиофреквенцијско зрачење (микроталаси и радио таласи). Према различитом дејству на материју електромагнетни спектар је подељен на област *јонизујућег и нејонизујућег* зрачења.



Спектар електромагнетног зрачења

Јонизујуће зрачење при проласку кроз материју врши јонизацију њених атома. У општем смислу, зрачење или радијација подразумева емитовање тзв. јонизујућих, нуклеарних, или радиоактивних зрачења, разноврсних честица и таласа великих енергија у различитим спонтаним или вештачки изазваним процесима трансмутације атомских језгара. Зрачења могу настати и у акцелераторима, рендгенским цевима, а са феноменом радиоактивности немају везе. Таласна дужина ових зрачења је мања од неколико десетина нанометара. На свом путу кроз материју, због велике енергије коју носе, зрачења изазивају различите промене на атомима и молекулима средине. У зависности од типа и енергије, зрачења могу бити продорна и мање продорна, што имплицира штетан или користан ефекат. Постоји још једна подела на: наелектрисане честице (α-честице, β-честице, протони) и ненаелекрисане честице и зрачење (неутрони, γ-зраци, x-зраци и високоенергетски ултраљубичасти зраци). Овде се убрајају још фисиони фрагменти и секундарно космичко зрачење (миони и пиони).

Нејонизујуће зрачење обухвата електромагнетна зрачења чији фотони имају довољно ниске енергије (испод 12,4 eV) тако да не могу да изврше јонизацију средине са којом интерагују. Ова зрачења доводе до ексцитације атома, тј. до побуђења, када је предата енергија довољна да се ослаби веза електрона са језгром. Нејонизујуће зрачење обухвата део спектра од 10^{-9} m до 10^{4} m, а подела се врши према фреквенцији, или таласној дужини на: ултраљубичасто (UV), видљиво, инфрацрвено (IC) зрачење, микроталасно и радиоталасно зрачење. Овде спада и вештачко ласерско зрачење (креирано помоћу уређаја емисијом електромагнетног зрачења из UV, видљивог и IC дела спектра). Широк интервал таласних дужина условљава потпуно различите ефекте на материју и жива бића. Нејонизујућа зрачења надокнађују ниску енергију честица великим бројем, а корисне и штетне ефекте остварују другачијим начином интеракције са материјом. Треба имати у виду да између јонизујућих и нејонизујућих зрачења не постоји оштра граница, јер нека језгра емитују γ-зраке енергије испод 5 eV, док с друге стране постоји високоенергетско ултраљубичасто зрачење које има довољну енергију да изазове јонизацију средине.

Јонизујућа и нејонизујућа зрачења могу бити природног и вештачког порекла (о изворима зрачења се говори детаљније у наставку). Природни извори јонизујућих зрачења су космичко (космички зраци и космогени радионуклиди) и терестрично зрачење (зрачења ^{40}K и радионуклида из низова ^{238}U, ^{235}U и ^{232}Th). У нуклеарним реакцијама стварају се вештачки

радионуклиди; велики број њих налази примену у медицини, индустрији, итд. У животној средини су присутни након проба нуклеарног оружја и акцидената. Природни извори нејонизујућих зрачења су Сунце и свемир; вештачки извори су ласери, ултразвук, вештачко осветљење, усијани извори. Природно статичко магнето поље Земље је развојем науке и технологије појачано вештачким изворима: акцелераторима, спектрометрима, итд.

Врсте електромагнетног зрачења и енергије фотона

Врста зрачења	Енергија фотона
Радио таласи	1 μeV
Микроталаси	1 meV
IC	1 eV
Црвена светлост	2 eV
Љубичаста светлост	3 eV
UV	4 eV
***x*- зраци**	100 keV
Гама зраци	1 MeV

Иако се ризици од јонизујућих и нејонизујућих зрачења разматрају посебно, треба имати у виду да је живи свет истовремено неизбежно изложен и једним и другим, као и да постоји синергијски утицај и других агенаса. За размазрање утицаја било ког зрачења неопходно је познавати:

- изворе (врсту и карактеристике емитованог зрачења);
- путеве озрачивања;
- интеракције зрачења са организмом (карактеристике погођених молекула/ћелија/ткива/органа);
- ефекте (морфолошке/физиолошке/генетске).