

Физика на йонизиращите лъчения

Основни понятия, величини, единици

- **Йонизираща радиация** - излъчване, което при взаимодействие с материалната среда, през която преминава, образува електрически заряди с различни знаци.
- Видове йонизиращи лъчения
 - **Корпускулярни**
 - **Електромагнитни** (фотонни)

Физика на йонизиращите лъчения

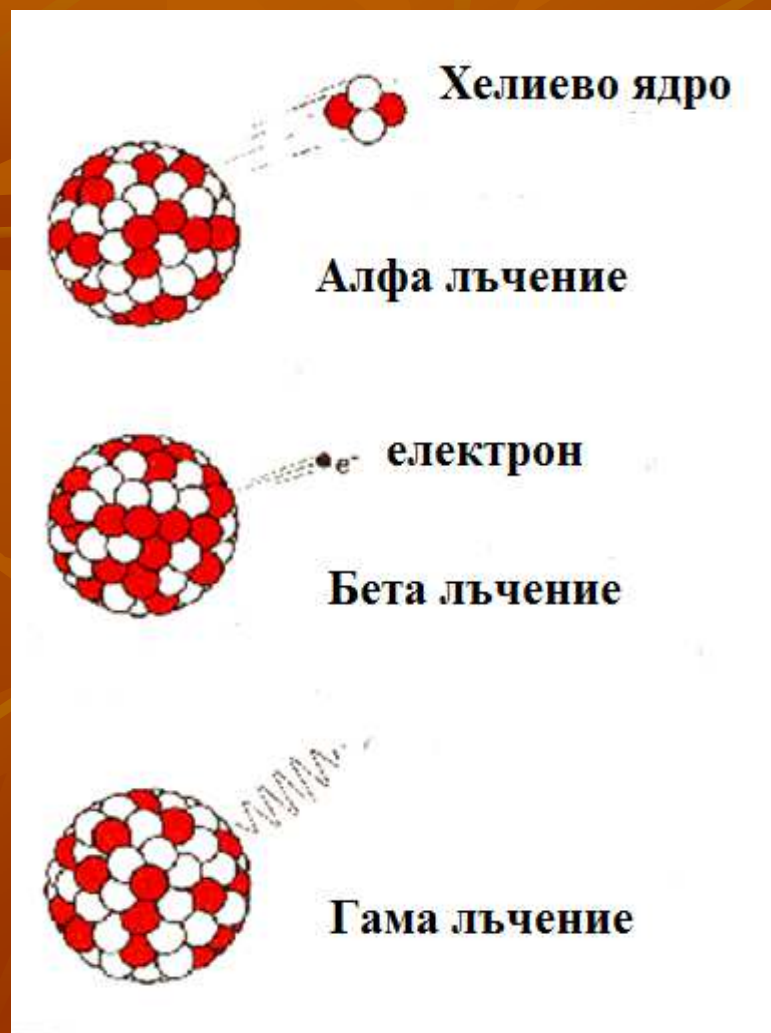
Корпускулярните се
делят на:

- α -лъчения- (α , ${}^2_4\text{He}$)
- β -лъчения- (β , e_{-1})
- неутронни лъчения –
(n^1_0)

Електромагнитните
лъчения се делят на:

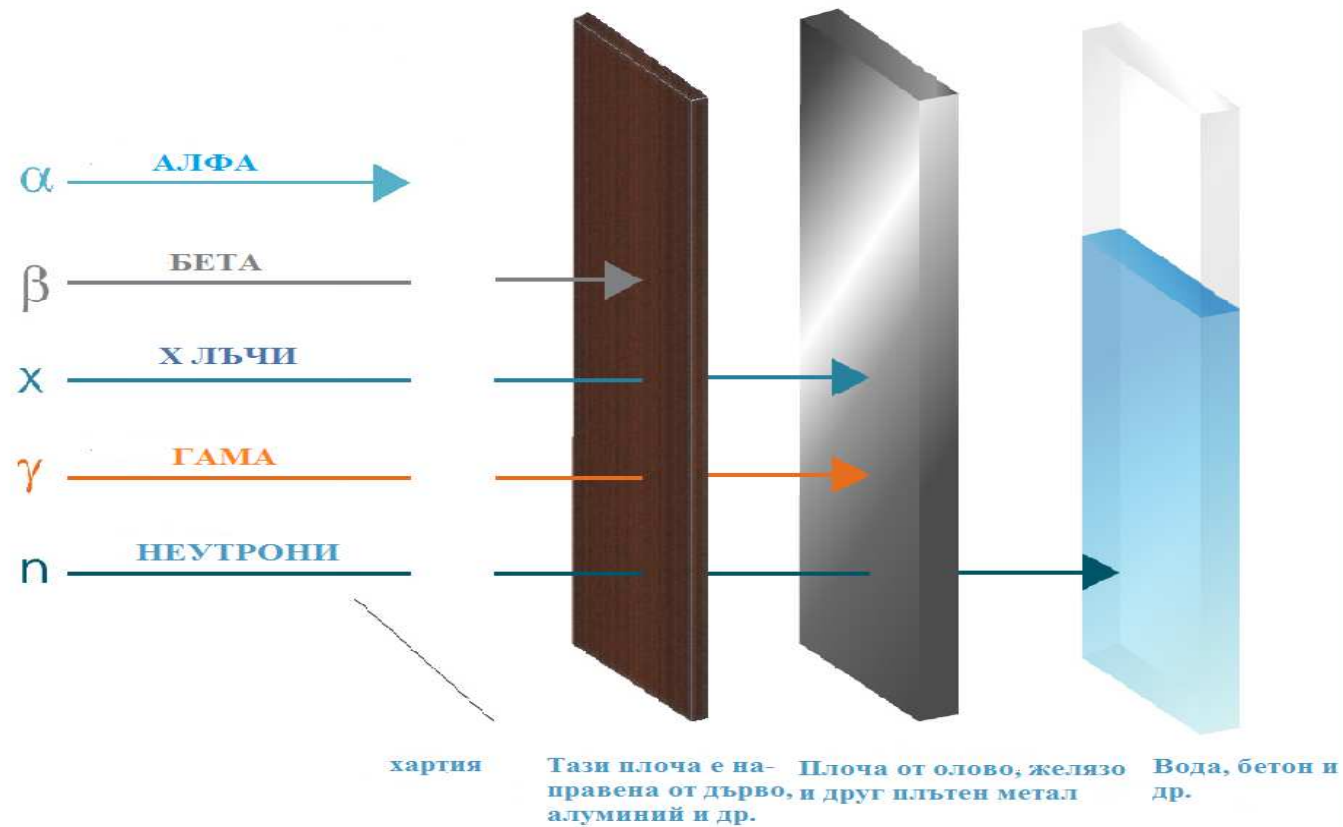
- γ -лъчения- (γ)
- Rö-лъчения

Видове йонизиращи лъчения



Видове йонизиращи лъчения и проникващата им способност

ВИДОВЕ ЛЪЧЕНИЯ И ПРОНИКВАЩАТА ИМ СПОСОБНОСТ



Физика на йонизиращите лъчения

Свойства на йонизиращите лъчения:

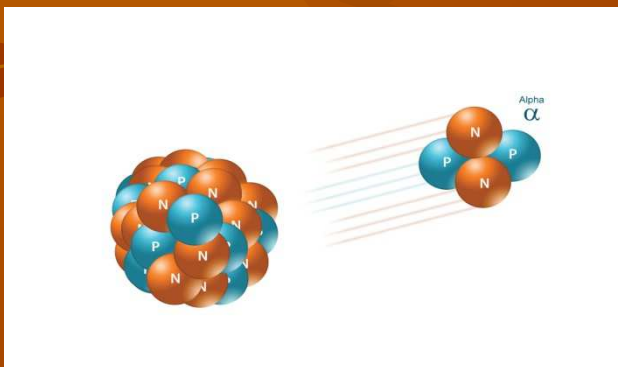
- Йонизационна способност
- Проникваща способност
- Биологично действие
- Предизвикват почерняване на фотоплака
- Предизвикват сцинтилация

Характеристика на йонизиращите лъчения

- **Алфа лъчение** - поток от (+) заредени частици с голяма маса (поток от ядра на ${}^4_2\text{He}$)
- Скорост-15000-25000 км/сек.
- Енергия-2-9 Мев
- Проникваща способност-малка (въздух-2-9 см, биологична среда-0.02-0-06мм.)
- Плътност на йонизация-много висока
- **Бета лъчение** - поток от електрони
- Скорост-280000-290000 км/сек.
- Енергия-няколко Кев-няколко Мев.
- Проникваща способност->от алфа(10-15 м във въздух, до 12 мм в биологична среда)
- Плътност на йонизация-пониска от алфа.

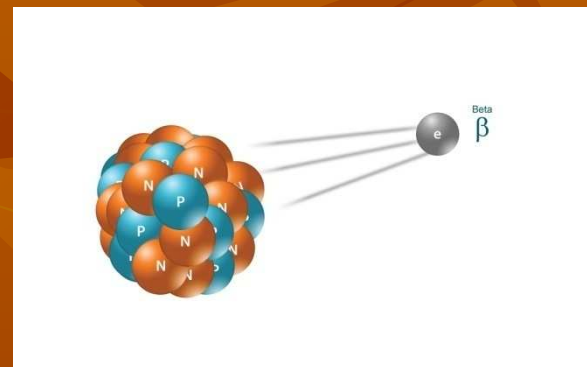
Видове йонизиращи лъчения

Емисия на алфа частица от ядрото на атом



Алфа радиацията се получава, когато атомът претърпи радиоактивно разпадане, като отдели частица (наречена алфа частица), състояща се от два протона и два неутрона (по същество ядрото на атом на хелий-4), променяйки произхождащия атом до един елемент с атомно число 2 по-малко и атомно тегло 4 по-малко от началото. Благодарение на заряда и масата си, алфа-частиците взаимодействат силно с материята и пътуват само няколко сантиметра във въздуха. Алфа-частиците не са в състояние да проникнат във външния слой на мъртвите кожни клетки, но са способни, ако алфа излъчващо вещество се поглъща в храна или въздух, да причини сериозни увреждания на клетките. Александър Литвиненко е известен пример. Той е бил отровен от полоний 210, алфа емитер, в чая си.

Емисия на бета частица от ядрото на атом



Бета лъчението има формата на електронен или позитрон (частица с размерът и масата на електрона, но с положителен заряд), излъчвана от един атом. Поради по-малката маса, той може да пътува по-навътре във въздуха до няколко метра и може да бъде спрял от плътна пластмаса или дори от куп хартия. Тя може да проникне в кожата на няколко сантиметра, което по някакъв начин представлява външен риск за здравето. Основната заплаха обаче все още е главно от вътрешната емисия на погълнат материал.

Характеристика на йонизиращите лъчения

Неутронно лъчение

- Елементарни частици, без заряд
- **Маса**- 1.67×10^{-24} г(протона)
- **Скорост**-290000км/сек
- **Енергия:**
 - Свръх бързи >20MeV
 - Бързи: 20KeV-20MeV
 - Междинни: 0.5eV-20MeV
 - Бавни <0.5eV

Проникваща способност-голяма

Плътност на йонизация-голяма

Гама лъчение

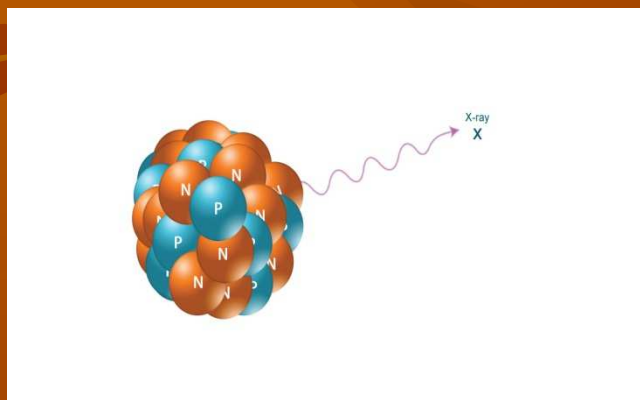
- Фотони, без заряд
- Скорост-300000 км/сек
- Енергия:
 - Твърди >1MeV
 - Меки <1MeV

Проникваща способност-
голяма

Плътност на йонизация-
малка

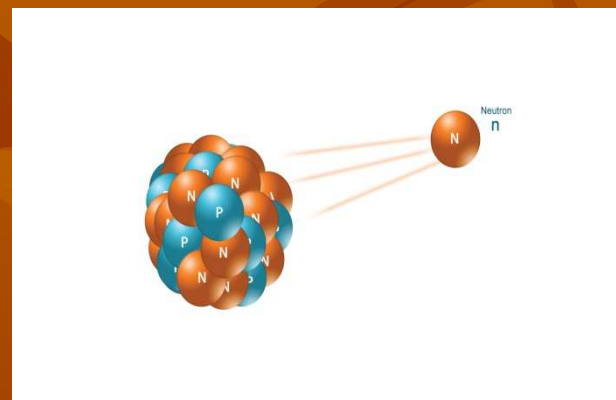
Видове йонизиращи лъчения

Емисия на високоенергийна вълна от ядрото на атом



Гама-лъчението, за разлика от алфа или бета, не се състои от частици, а се състои от фотон енергия, излъчвана от нестабилно ядро. Нямайки маса или заряд, гама-лъчението може да пътува много по-далече през въздуха, отколкото алфа или бета, губи (средно) половината си енергия на всеки 500 фута (около 152 м). Гама вълните могат да бъдат спрени от достатъчно плътен слой материал, като най-ефективната форма на екраниране са материали с високо атомно число като олово или обеднен уран.

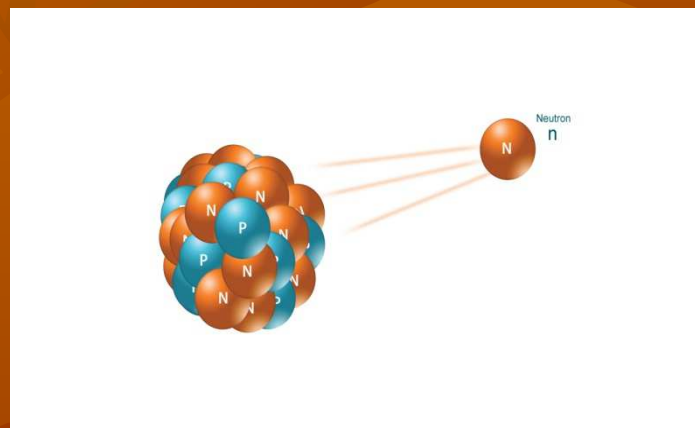
Емисия на високоенергийна вълна от електронен облак на атом



Рентгеновите лъчи са подобни на гама-лъчението, като основната разлика е, че те произхождат от електронния облак. Това обикновено се дължи на енергийни промени в електрона, като например преминаване от по-високо ниво на енергия към по-ниско, което води до освобождаване на излишната енергия. Х-лъчите имат по-дълга дължина на вълната и (обикновено) по-ниска енергия от гама-лъчението

Видове йонизиращи лъчения

Емисия на неутрон от ядрото на атом



- На последно място, неутронното лъчение се състои от свободен неутрон, обикновено излъчван в резултат на спонтанно или индуцирано ядрено делене. Способни са да пътуват стотици или дори хиляди метри във въздуха, но могат да бъдат ефективно спирани, ако бъдат блокирани от богат на водород материал, като бетон или вода. Обикновено не могат да йонизират атома директно поради липсата на заряд, най-често неутроните косвено йонизират, тъй като те се абсорбират от стабилен атом, което го прави нестабилен и е по-вероятно да излъчва йонизиращо лъчение от друг тип. Неутроните всъщност са единственият вид радиация, която може да превърне други материали в радиоактивни вещества.

Основни понятия, величини, единици

- **Погълнатата доза** е величина, която характеризира количеството енергия, погълната от облъчения обект. Измерва се с енергията, погълната от единица маса от облъчената среда по формулата:

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

- Единици за погълнатата доза: **Gy (Грей)** = $\frac{J}{kg}$, нова единица по Си

- **Rd (рад)** = $\frac{100 \text{ ерга}}{\text{грам}}$, стара единица 1 rd е 100 пъти < Gy

- **1 Gy = 100 рада**

Основни понятия, величини, единици

- **Експозиция** е величина, която характеризира йонизиращата способност на рентгеновите и гама лъчите във въздушната среда. Тя дава само косвена информация за реално абсорбираната енергия от тъканите. Експозицията се измерва с *отношението на сумарния електрически заряд на всички йони с еднакъв знак, образувани в определен обем въздух (m)*:

$$X = \frac{\triangle Q}{\triangle m}$$

Единици: C / kg, нова единица, по СИ

Рентген - стара единица $1R = 2,58 \cdot 10^4 \text{ C/kg}$

Основни понятия, величини, единици

- **Еквивалентна доза (H)** е величина, използвана при радиобиологичната защита. Тя отчита факта, че биологичният ефект на йонизиращата радиация зависи от вида и енергията на лъченията.

Еквивалентната доза е равна на *произведението от погълнатата доза (D), коефициент качество на лъчението (Q) и коефициент (N)*, който включва всички други параметри на лъчението, включително скоростта на облъчването.

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

Основни понятия, величини, единици

- **Коефициентът качество на лъчението Q** отчита главно линейната плътност на йонизацията. Измерва се в броя двойки йони, образувани при преминаване на елементарна частица (или фотон) във водна среда.

Сиверт (Sv) нова единица, по СИ

Бер (rem) стара единица. 1 Сиверт = 100 бера

Един сиверт е такава доза радиация, която предизвиква същия биологичен ефект като 1 Грей гама лъчение.

Еквивалентната доза се прилага главно при облъчване на организма с йонизиращи лъчения, с различна биологична активност и цели да се оцени общият биологичен ефект. Така очакваният биологичен ефект може да бъде измерен като сума от еквивалентните дози на приложените видове йонизиращи лъчения.

Радиоактивни изотопи

- **Естествена радиоактивност** е явление, при което атомите на някои химически елементи самопроизволно, без външно въздействие променят атомния си номер.
- **Естествено радиоактивни елементи** са всички химически елементи, чиито ядра самопроизволно се разпадат, като изпускат елементарни частици и фотони (йонизиращи лъчения).

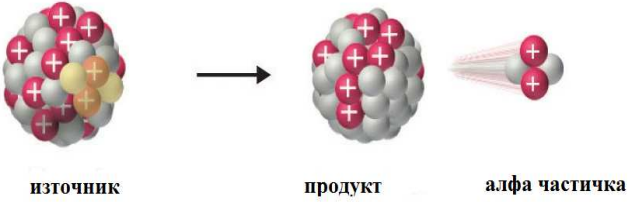
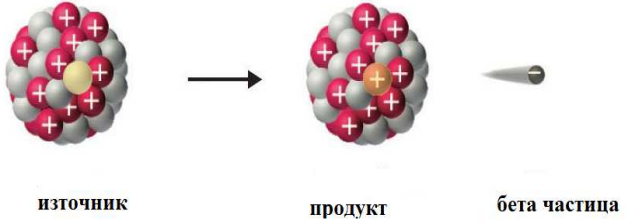
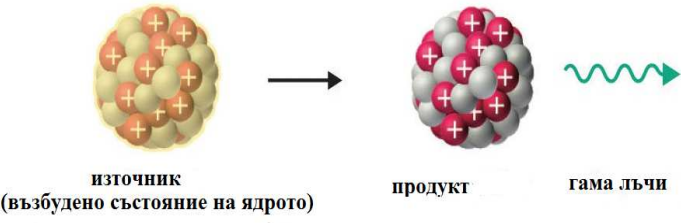
Радиоактивни семейства

- ✓ I-во с родоначалник ^{238}U , краен продукт Pb,
 $A=4n+2$
- ✓ II-ро с родоначалник ^{232}Th , краен продукт Pb,
 $A=4n$
- ✓ III-то с родоначалник ^{235}U , краен продукт Pb,
 $A=4n+3$
- ✓ IV-то с родоначалник ^{237}Np , краен продукт Bi,
 $A=4n+1$

$T_{\text{ф}}^{237}\text{Np}=2,3 \times 10^6$ години, т.е. $2000 <$ възрастта на
Земята

$n=53-58$

Радиоактивен разпад

Тип разпад	Радиационно излъчване	Общо уравнение	Модел
Алфа разпад	${}^4_2\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + {}^4_2\alpha$	 <p>източник → продукт алфа частичка</p>
Бета разпад	${}^0_{-1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}X' + {}^0_{-1}\beta$	 <p>източник → продукт бета частица</p>
Гама излъчване	${}^0_0\gamma$	${}^A_ZX^* \xrightarrow{\text{релаксация}} {}^A_ZX' + {}^0_0\gamma$	 <p>източник (възбудено състояние на ядрото) → продукт гама лъчи</p>

Видове радиоактивен разпад

- Алфа разпад- ядра на тежки елементи



Видове радиоактивен разпад

- Бета разпад-ядра на леки и среднотежки елементи
 - Бета отрицателен (електронен) разпад



Видове радиоактивен разпад

- Бета положителен (позитронен) разпад



- Електронен захват



Закон за радиоактивния разпад

- $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$

N-количество активни атоми

λ -постоянна на разпада

t-времето

Дефиниция: **Количеството на атомите, които се разпадат за една секунда, е пропорционално на количеството на наличните атоми.**

Активност – броят на трансформациите (разпадите) за 1 секунда

$$A = \lambda \cdot N \quad A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad A = \Delta N / \Delta t$$

Единици: **Бекерел (Bq). 1 Bq = sec⁻¹** нова единица, по Си

Стара единица-**Кюри (Ci) 1 Ci = 3,7 x 10¹⁰ разпада/сек**



**БИОЛОГИЧНО ДЕЙСТВИЕ
НА ЙОНИЗИРАЩАТА
РАДИАЦИЯ**

Въздействието с йонизираща радиация върху живите организми предизвиква специфичен биологичен ефект, който е обект на проучване от научната дисциплина **радиобиология**.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

■ 1. Вид на йонизиращите лъчения.

□ Биологичният ефект на йонизиращата радиация

зависи в значителна степен от линейната и обемна плътност на йонизацията, която е различна за различните видове лъчения.

Например: Относителната биологична активност на алфа лъчите и бързи неутрони е 10, на бавните неутрони – 5, а на гама лъчите – 1.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма **при външно облъчване**

Биологичният ефект **при външно облъчване** с йонизираща радиация зависи от **прониквателната способност на лъчението.**

Например: Локални поражения при α и β лъчения и увреждане на тъканите и органите в дълбочина при γ и неутронно лъчение.

І. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно

облъчване

■ 2. Доза и мощност на дозата.

- Радиобиологичният ефект зависи от количеството на погълната от тъканите енергия, т.е. от погълнатата доза.

За оценка на биологичния ефект на йонизиращите лъчения се използва величината летална доза.

За тази цел най-често се прилага ЛД_{50/30} – средна доза и ЛД_{100/30} – абсолютна смъртна доза, чийто ефект се отчита на 30-ия ден след облъчването.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

■ 3. Фракционированост на дозата.

- Разпределението на дозата в няколко фракции с интервали между тях, **понижава степента на увреждане на организма** в сравнение с еднократно приложение на същата доза.
- Този ефект се обяснява с протичане на **възстановителни процеси** в интервалите между облъчванията.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма **при външно облъчване**

■ 4. Размер на локализацията на облъчването.

- Например: 10 Gy при целотелесно облъчване е абсолютно летална доза, но приложена на ограничена площ не предизвиква летален изход.
- **Локализацията на облъчването** има важно значение, поради различната радиочувствителност на различните органи и тъкани.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

5. Реактивност на организма.

- Значение за биологичния ефект, неговото протичане и крайния изход на лъчевите увреждания имат: **видовата, възрастовата, половата и индивидуалната радиочувствителност**

- Например: ЛД 50/30 за:

ЖИВОТНО	ДОЗА
М.свинче	250 рада
плъх	600 рада
заек	800 рада
кокошка	1200 рада

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Две основни теории:

- Теория за прякото действие
- Теория за непрякото действие

1. Теория за прякото действие, известна като мишенна теория. Предложена е от **Dessaur, 1922**, по-късно е доразвита от **Lea**. →

- Обяснява лъчевото увреждане с директен сблъсък на йонизиращите частици (фотони) с жизнено важни структури на клетката.
- Лъчечувствителният участък в клетката (критичен обем, мишена) е с малки размери в сравнение с клетката

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

- Засягането на критичния обем (мишена) само от една йонизираща частица или гама квант, предизвиква необратимо увреждане и гибел на цялата клетка.
- Ако критичният обем не е засегнат от радиацията, клетката не се уврежда.
- Доказателство в подкрепа на мишенната теория е, че при разделно облъчване на ядрото, клетката загива, докато облъчването на цитоплазмата не води до летален изход.
- Мишенната теория е изградена въз основа на експерименти с нисши, предимно едноклетъчни организми и някои биохимични системи.

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Мултитаргентна теория – наличие на няколко лъчечувствителни участъци в клетката (няколко мишени).

- Увреждането на клетката настъпва след няколко независими едно от друго попадения на частици или кванти
- Изградена е въз основа на експериментални данни с *многоклетъчни организми*.
- **Сигмоиден характер на кривата доза – летален ефект**

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Съвременна интерпретация на мишенната теория:

- Биологичният ефект на йонизиращата радиация се дължи на увреждане на жизненоважни макромолекули (главно ДНК), таргентни молекули.
- Следователно увреждането на биологичните молекули от йонизиращата радиация се дължи на „директно действие” или „директен ефект”
- „директно действие” е водещ механизъм на увреждане от йонизиращите лъчения с висока енергия и висока плътност на йонизация

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Теория на *Sparrow* – изградена е на базата на мишенната теория:

- ❑ Радиочувствителността на клетките при растенията е в пропорционална зависимост от обема на хромозомите в интерфазата.
- ❑ Тази теория обяснява добре различията в радиочувствителността на някои клетки *от растителен произход*.
- ❑ Неподходяща е за обяснение на лъчевите увреждания при бозайниците

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

2. Теория за непрякото действие

- Пораженията на организма от йонизиращата радиация се дължат на образувани в клетката силно активни химични вещества, радиолизни продукти на водата, които усилват първичното поражение на клетките.

- Лъчевото увреждане протича в 3 фази:

а) Физична фаза:

- Продължава от 10^{-16} до 10^{-13} сек.
- През тази фаза водните молекули се йонизират – образуват се положително и отрицателно заредени йони – водни молекули.



II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

б) Физико-химична фаза

- Продължава от 10^{-13} до 10^{-5} сек.
- Образуваните в първата фаза йонизирани водни молекули са нетрайни и бързо се разпадат на йони и свободни радикали:



- в резултат на реакциите на рекомбинация между H^\bullet , OH^\bullet и e^- се образуват вода, молекулярен водород, водороден прекис и хидроксилни радикали

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

в) Биохимична фаза

- През тази фаза протичат реакции между радиолизните продукти на водата с важни макромолекули – белтъци, масти, въглехидрати, хормони и т.н.

- Странични групи (метилова, карбоксилна, сулфхидрилна, аминогрупа, фосфатна, водородна и т.н.) в биологичните макромолекули във взаимодействие с радиолизните продукти на водата.

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

По-често срещани реакции са:

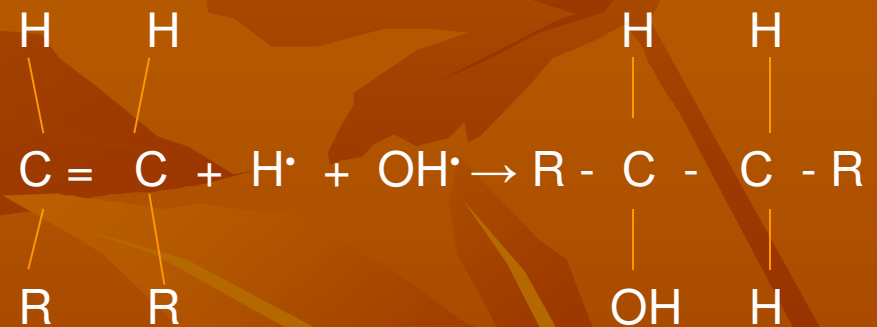
1. Откъсване на водороден атом:



2. Реакции на дисоциация:

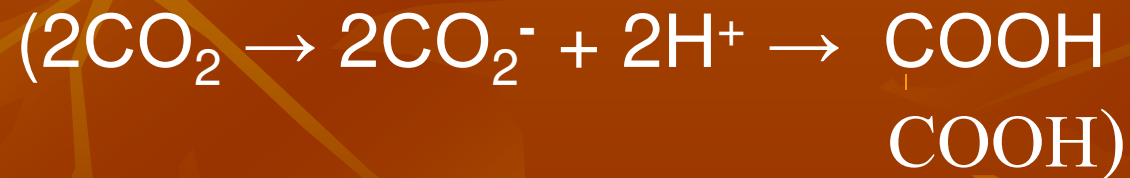


3. Реакции на присъединяване:



II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

4. Реакции на образуване на стабилни съединения



оксалова
киселина

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

5. Реакции с участието на кислород



II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Верижни реакции с участието на кислород:



- **Хидропрекисите и прекисите** са токсични вещества, които се натрупват в тъканите в резултат на йонизиращата радиация
- **Пероксидацията на ненаситените мастни киселини** води до **функционални и структурни промени в клетъчните мембрани**

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

А) Кислороден ефект


- Облъчване на живи организми с йонизираща радиация в присъствие на кислород **предизвиква образуването на токсични радикали, водороден перекис, супероксидни аниони и др.**

Б) Температурен ефект

- Облъчване с йонизираща радиация при ниска температура **предизвиква по-леки увреждания**, поради забавяне на реакциите с участие на радиолизни продукти на водата и кислорода.

В) Ефект на обезводняването

- Облъчването на биосубстрата в **сух вид** (в сравнение с нормално водно съдържание) **предизвиква по-слаби увреждания от йонизиращата радиация**, поради намаляване количеството на токсични радиолизни продукти на водата.



**ВЛИЯНИЕ НА
ЙОНИЗИРАЩАТА
РАДИАЦИЯ НА
МОЛЕКУЛЯРНО НИВО**

Информацията за промените в организма на молекулярно ниво е получена главно в резултат на експериментални изследвания върху опитни животни, в опити *in vitro* и с тъканни култури.

В голям брой експериментални изследвания са прилагани високи дози йонизиращи лъчения, често несъвместими с живота.

Диапазон на изследваните дози:

ниски - до 20 рада

средни - 20 - 150 рада

високи - над 150 рада

I. Влияние на радиацията върху белтъците

1. Груби, структурни промени в белтъците възникват след много високи дози, несъвместими с живота, например: денатурация на албумините настъпва над 720 Грей;

2. При високи дози протичат процеси на:

2.1. дезаминиране

2.2. декарбоксилиране

2.3. окисление

2.4. разкъсване на водородни връзки

2.5. превръщане на някои циклични аминокиселини (тирозин, триптофан, хистидин и др.) в биологично активни вещества - тирамин, триптамин, хистамин и др., т.н. радиотоксини;

2.6. увеличено образуване и отделяне с урината на нискомолекулярни азотни съединения, главно урея и възникване на отрицателен азотен баланс;

2.7. активиране на протеолитични ензими и усилване на автолизните процеси;

2.8. инактивиране на сулфхидрилните групи, главно в белтъците и клетъчните ядра, което потиска клетъчната митоза

○ **3. В кръвната плазма:**

3.1. Намалява количеството на албумините поради:

намален синтез в черния дроб

увеличено отделяне през червата

3.2. Намалява съдържанието на гама глобулини

3.3. Увеличава се съдържанието на алфа и бета глобулини

3.4. Намалява албумино-глобулиновия коефициент

Влияние на радиацията върху нуклеиновите киселини

1. При високи **дозы нуклеопротеидните комплекси се разпадат**, поради разкъсване връзката между белтъка и ДНК.
2. **Образува се свободна ДНК** (без протеинова компонента), която става по-достъпна за въздействие на радиолизните продукти и радиотоксините.
3. **Активират се ензимите**, разграждащи ДНК (дезоксирибонуклеаза).
4. Облъчване с над 130 рада **потиска синтеза на ДНК**, главно в костния мозък.
5. Облъчване с летални и сублетални дози усилва **разпада на нуклеиновите киселини и увеличава количеството на ксантин, хипоксантин** и др. разпадни продукти в урината.
6. **Молекулата на ДНК** е най-вероятната таргетна молекула в клетката.

Влияние на радиацията върху нуклеиновите киселини

7. **Йонизиращата радиация може** да предизвика следните увреждания на ДНК в резултат на директно въздействие:

7.1. **Увреждане на базите в ДНК:**

- **загуба на база**
- **промяна в подреждането на базите**, които съхраняват и предават информацията (може да доведе до мутация)

7.2. **Разкъсване в едната верига в ДНК** - възстановява се най-лесно без съществени дългосрочни увреждания на клетката.

Влияние на радиацията върху нуклеиновите киселини

7.3. Разкъсване на двете вериги на ДНК:

- възстановяват се трудно
- имат съществено влияние върху клетката, особено разположените проксимално;
- ако не се възстанови веригата на ДНК, тя може да се разкъса (фрагментира);

7.4. Крослинк

- Радиацията може да предизвика ковалентни връзки:
- крослинк между две части на една и съща верига ДНК;
- крослинк между две странични вериги на ДНК;
- крослинк между две различни молекули ДНК;
- крослинк между ДНК и белтъчна молекула;

III. Влияние на радиацията върху въглехидратите

1. Облъчване в диапазон *5 - 50 Грей* **увеличава съдържанието на гликоген в черния дроб:**
 - поради **увеличен синтез**, с участието на хипофизата и надбъбреците;
 - **липсват данни** за участие на **ензимите**;
2. **Количеството на глюкозата в кръвта се повишава** - кривата на хипергликемията е с два върха, подобна на кривата при обременяване със захар.
3. **Ускорява се цитратният цикъл**, което води до **намалено образуване на лактат**.

IV. Влияние на радиацията върху мастния обмен

1. Ненаситените мастни киселини се окисляват до липопрекиси, които са силно реактивоспособни и взаимодействат с други биохимични вещества главно със сулфхидрилните групи;
2. При висока доза настъпва декарбоксилиране на висшите мастни киселини;
3. Понижава се всмукването на масти в червата;
4. Активността на липазата намалява;
5. Мобилизират се мастите от мастните депа, като се депонират в черния дроб (до 50%);
6. Ефектът на радиацията върху мастите е по-слабо изразен *in vivo*, поради присъствие на естествени антиоксиданти в тъканите (алфатокоферол, аскорбинова киселина);

V. Влияние на радиацията върху ензимите

1. Облъчване с дози *над 15 Грей*, **ускорява отделянето на ензимите от клетките.**
2. При *по-ниски дози* се **променя функционалната активност на много ензими.**
 - **увеличена ензимна активност** - дезоксирибонуклеаза, рибонуклеаза, аденозинтрифосфатаза, хидролитични ензими.
3. Облъчване с дози в диапазон *10 - 50 Грей* **променя водния баланс на организма.**
 - **масивна загуба на течности**, поради увреждане на чревната бариера;



**ВЛИЯНИЕ НА
ЙОНИЗИРАЩАТА
РАДИАЦИЯ НА КЛЕТЪЧНО
НИВО**

Цитоморфологичните изменения, предизвикани от облъчване с йонизираща радиация нямат специфичен характер.

Радиочувствителността на различните видове клетки варира в широк диапазон – от 5 до 8000 рад.

Радиочувствителността на клетките и тъканите се определя по закона на Бергониé и Трибондó, според който:

Радиочувствителността на клетките и тъканите е право пропорционална на тяхната репродуктивна способност и обратно пропорционална на тяхната диференцираност.

Изключения от закона са лимфоцитите и ооцитите, които са силно радиочувствителни, макар че са диференцирани и че не се делят.

Уврежданията на клетките от йонизиращата радиация са 2 вида:

I. Интерфазни (дифузни):

1. Възникват при облъчване до започване на митоза.
2. Появяват се веднага или след няколко минути след облъчване.
3. Изразяват се в:
 - поява на грануляции в цитоплазмата
 - повишение на пермеабилитета на клетъчната мембрана
 - вгъвания на ядрената мембрана
 - задържане на митозата
4. Интерфазните изменения имат временен характер.
5. При много високи дози може да настъпи интерфазна смърт.
6. Клетките в интерфазен покой са по-радиорезистентни.

Уврежданията на клетките от йонизиращата радиация са 2 вида:

II. Увреждания на клетката по време на митозата:

1. Увреждат се предимно хромозомите.
2. По-чести структурни промени в хромозомите, предизвикани от йонизиращата радиация са:
 - Единично разкъсване на една хромозома
 - Единични разкъсвания в отделни хромозоми
 - Две или повече разкъсвания в една и съща хромозома
 - Слипване на хромозомите

3. **Последствия за клетката** от структурните промени в хромозомите могат да бъдат:

Разкъсаните краища могат да се свържат без видими изменения (**възстановяване**).

Загуба на част от хромозома в следващата митоза може да е причина за поява на **аберация**. В този случай се образуват **ацентрични фрагменти**.

Разместване на фрагментите, което води до **груби нарушения** в структурата на хромозомите и образуване на: ринг форми, дицентрични хромозоми, анафазни мостове.

Подреждане на фрагментите **без видими хромозомни изменения**. В тези случаи има преподреждане на генетичен материал, но хромозомата изглежда непроменена (транслокации, инверсии).

Този вид хромозомни увреждания предизвикват разместване на гените в хромозомите и появата на мутации.

4. Освен цитоморфологичните промени в клетките, йонизиращата радиация предизвиква 3 специфични ефекта:

4.1. Потискане на митозата

наблюдава се във всички годни за деление клетки ефектът настъпва и при много ниски дози (1 рад) най-силно е изразено в първото пострадиационно деление по-късно може да се наблюдава усилване на митотичната активност увеличението на дозата не увеличава броя на засегнатите клетки, а удължава времето на потискащия ефект

4.2. Интерфазна смърт

ВЪЗНИКВА само в летално облъчени клетки не е дегенеративен процес, подобен на некрозата клетката се разкъсва на малки фрагменти, но цитоплазмените органели остават интактни клетъчните фрагменти са фагоцитирани от други клетки

4.3. Поява на мутации

наследствените промени не се отличават от възникналите при спонтанни мутации йонизиращата радиация увеличава само броя на мутацията, т.е. тяхната честота дозата, удвояваща мутациите е 50 – 250 бера – в зависимост от вида на клетките