



ННЦ «ІНСТИТУТ БІОЛОГІЇ»

Київського національного університету імені Тараса  
Шевченка

# РАДІОБІОЛОГІЯ

д.б.н., професор кафедри  
біофізики

Мартинюк Віктор Семенович



Київ  
2014

© В.С. Мартинюк



# РАДІОБІОЛОГІЯ



## ЛЕКЦІЯ 3.

**Фізична природа, фізичні механізми взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною.**

**Енергія випромінювання, щільність потоків частинок і енергії іонізуючого випромінювання.**

**Пружні і непружні взаємодії. Перетини взаємодії (зіткнення).**

**Лінійний перенос енергії іонізуючого випромінювання.**

## Фізична природа іонізуючого випромінювання

### ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### Електромагнітне (фотонне)

Гамма-  
випромінювання

$\gamma$

Рентгенівське  
випромінювання

$x$

#### Корпускулярне

Альфа-  
випромінювання  
(ядра гелію)

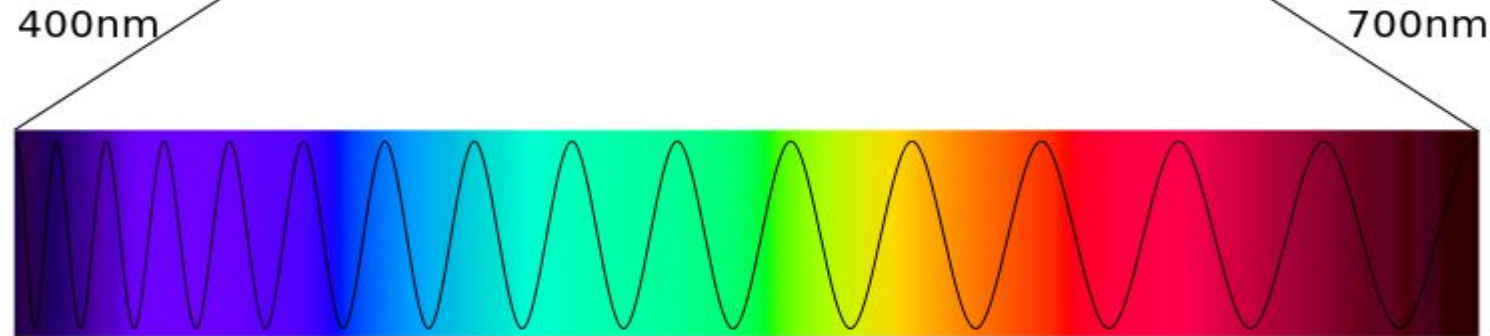
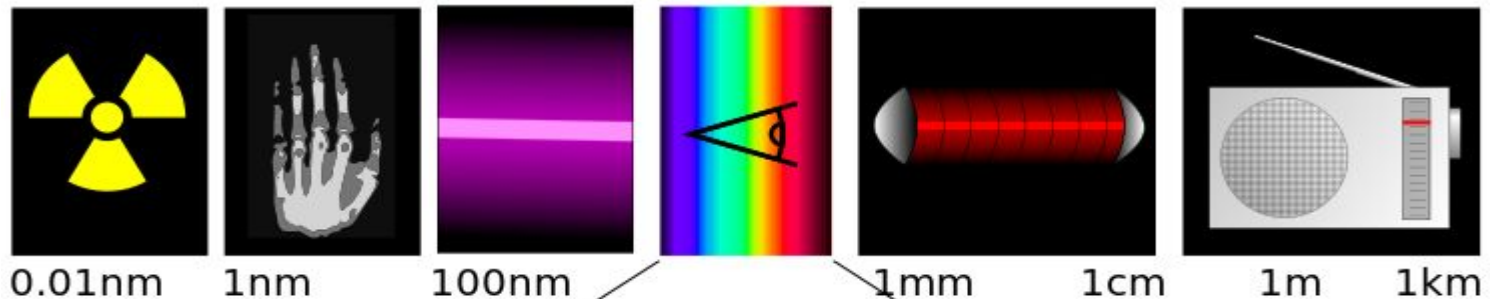
$\alpha$

Бета-  
випромінювання  
(електрони  
позитрони)

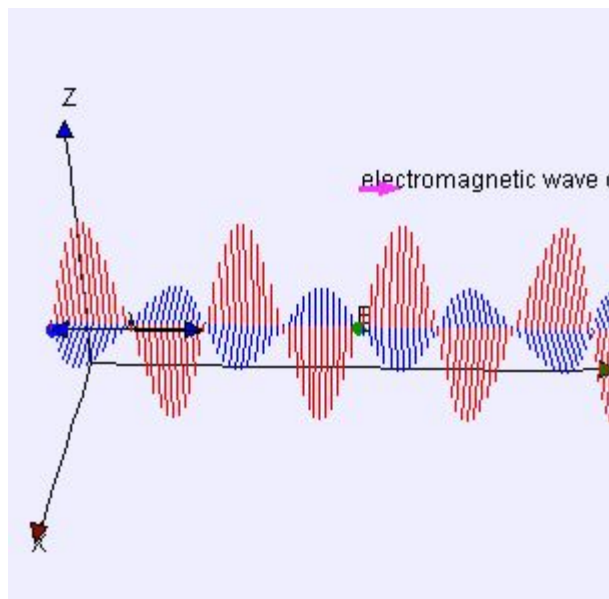
$\beta$

Потік  
елементарних  
частинок  
(нейтрони  
протони  
мезони  
та інші)

## Електромагнітне (фотонне) іонізуюче випромінювання



## Електромагнітне (фотонне) іонізуюче випромінювання



*Електромагнітна хвиля* - це процес розповсюдження електромагнітної взаємодії у просторі-часі.



Електромагнітні хвилі описуються суперпозицією рівнянь:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t - \varphi)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t - \varphi)$$

де  $\mathbf{k}$  - певний вектор, який називається хвильовим вектором,  $\omega$  - число, яке називається циклічною частотою,  $\varphi$  - фаза. Величини  $E_0$  та  $H_0$  є амплітудами електричної та магнітної компоненти електромагнітної хвилі. Вони взаємно перпендикулярні й рівні за абсолютною величиною.



# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Електромагнітне (фотонне) іонізуюче випромінювання

**Фотон** - елементарна частинка, квант електромагнітного випромінювання.

**Фотон** - це безмасова частинка, що здатна існувати у вакуумі тільки рухаючись зі швидкістю світла.

Електричний заряд фотона дорівнює нулю.

**Фотон** може знаходитися тільки в двох спінових станах з проекцією спина на напрямок руху (спіральністю)  $\pm 1$

З точки зору класичної квантової механіки, фотону як квантової частинці властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм, він проявляє одночасно властивості частинки і хвилі.



# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Електромагнітне (фотонне) іонізуюче випромінювання

**Фотони** випромінюються в багатьох природних процесах:

- при русі електричного заряду з прискоренням,
- при переході атома або ядра із збудженого стану в стан з меншою енергією,
- при анігіляції пари електрон-позитрон.

При зворотних процесах - збудження ядра чи атома, народження електрон -позитронної пари - відбувається поглинання фотонів.

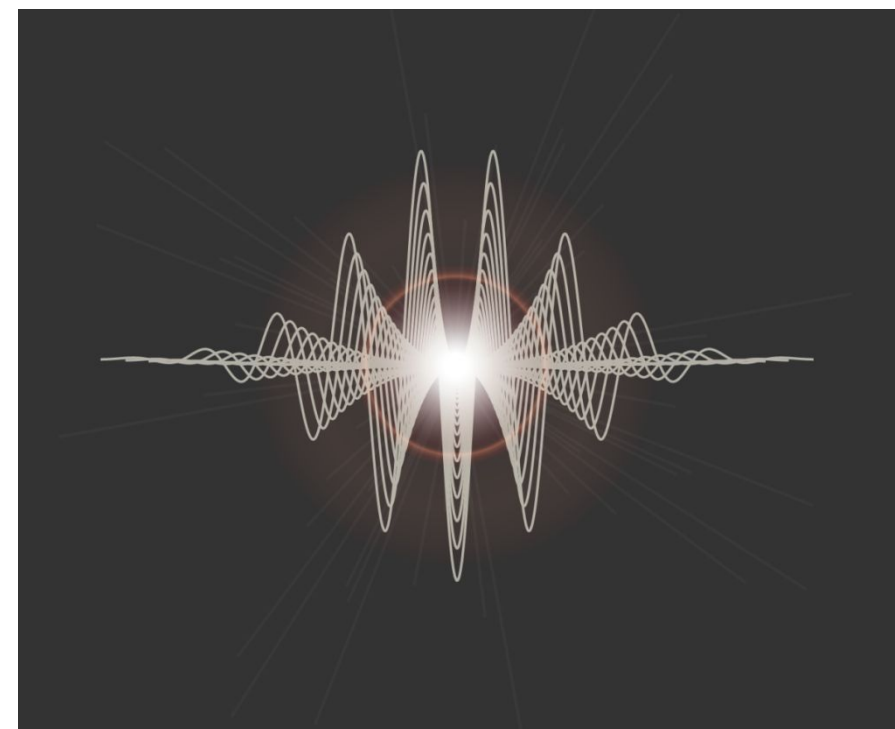
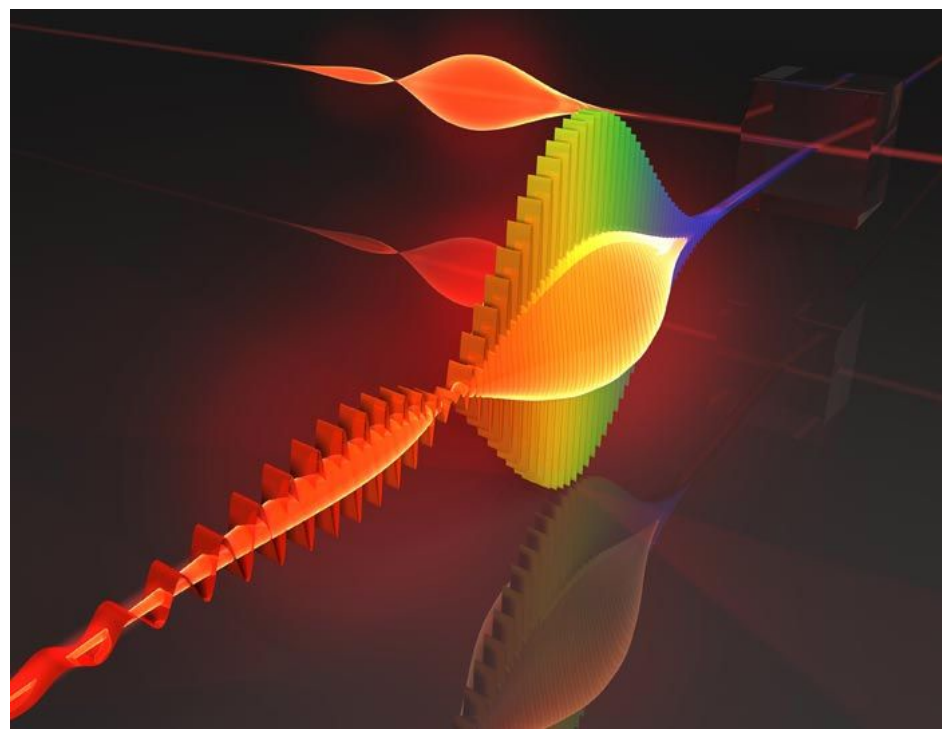
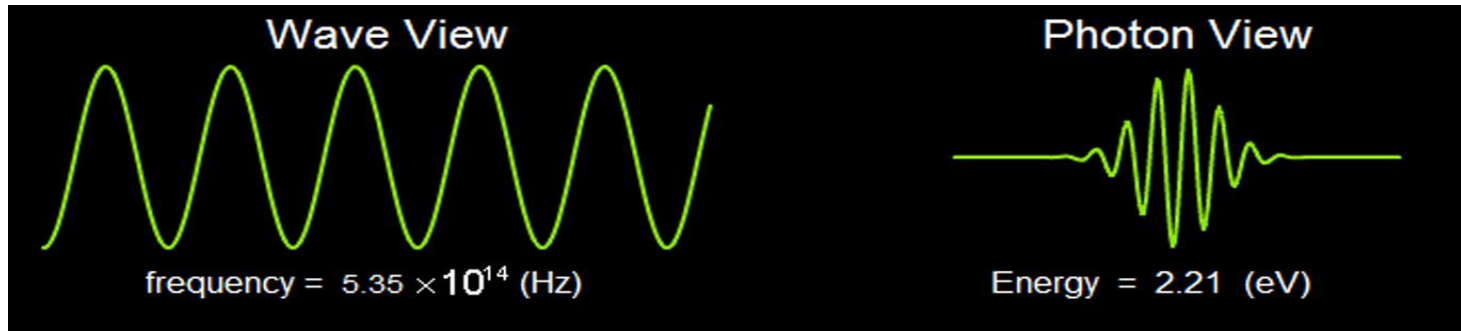




# РАДІОБІОЛОГІЯ



**Фотон** - елементарна частинка-хвиля, квант електромагнітного випромінювання.







# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Фотон в системі елементарних частинок згідно Стандартної моделі

	<p>mass → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>mass → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>mass → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>	<p>mass → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>g</b></p> <p>gluon</p>	<p>mass → <math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 0</p> <p><b>H</b></p> <p>Higgs boson</p>
<b>QUARKS</b>	<p>mass → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>mass → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>mass → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>	<p>mass → 0</p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b><math>\gamma</math></b></p> <p>photon</p>	
	<p>mass → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → -1</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>e</b></p> <p>electron</p>	<p>mass → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → -1</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p>	<p>mass → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → -1</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p>	<p>mass → <math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → 1</p> <p><b>Z</b></p> <p>Z boson</p>	
<b>LEPTONS</b>	<p>mass → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>electron neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>muon neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → 0</p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>tau neutrino</p>	<p>mass → <math>80.4 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>\pm 1</math></p> <p>spin → 1</p> <p><b>W</b></p> <p>W boson</p>	<b>GAUGE BOSONS</b>

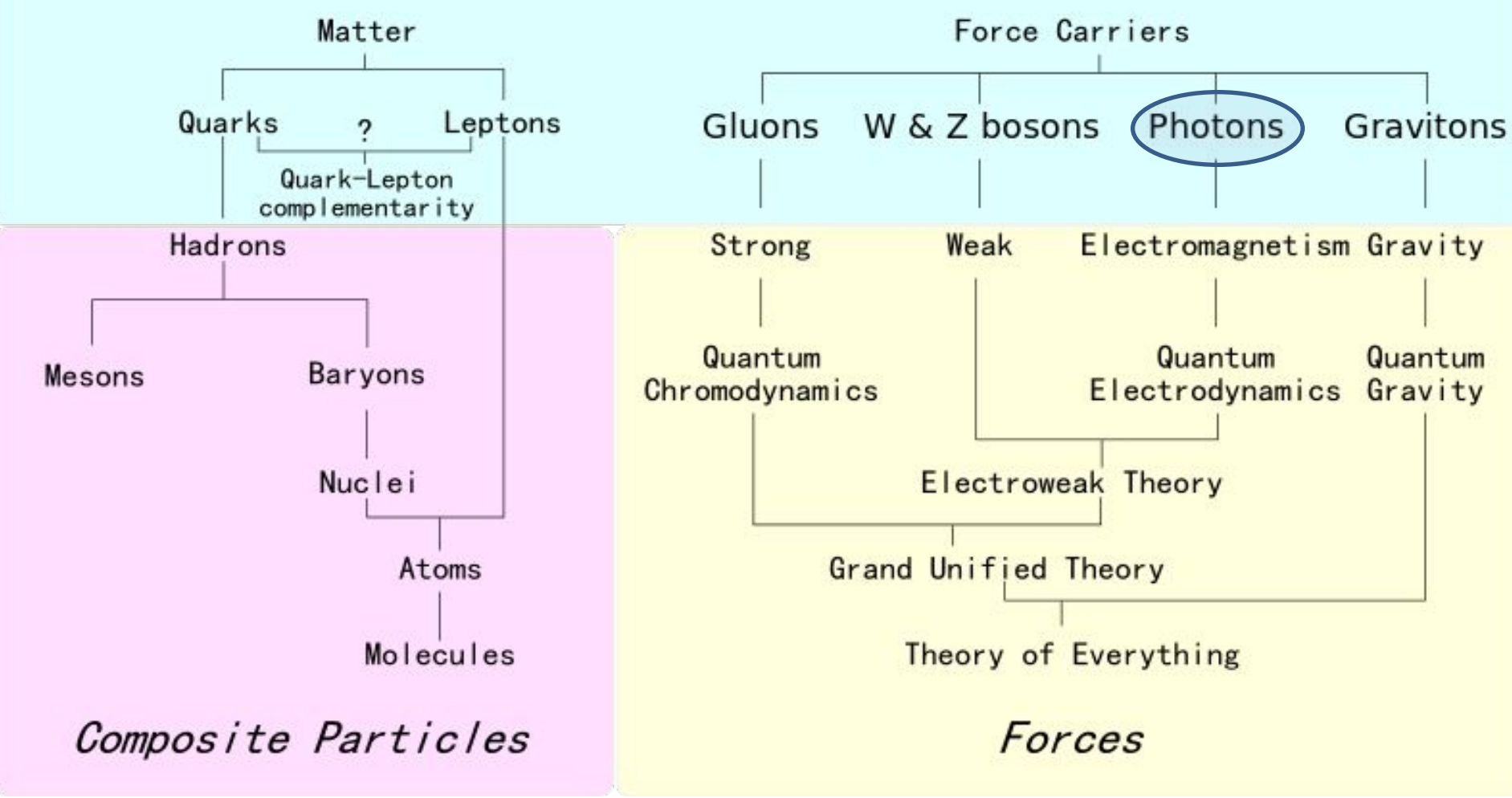


# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Фотон в системі елементарних частинок згідно Стандартної моделі

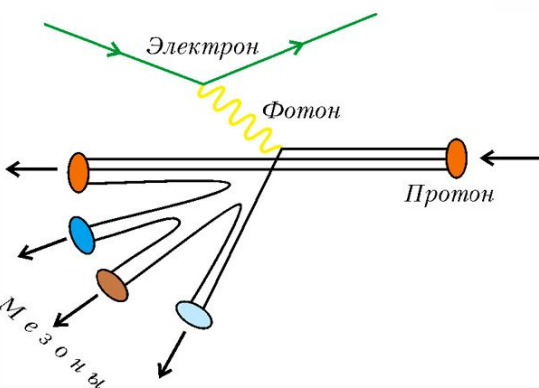
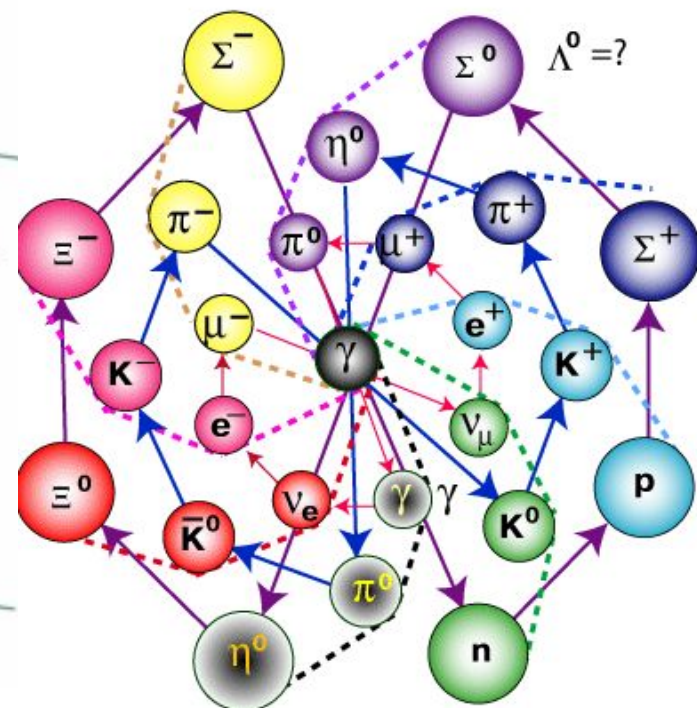
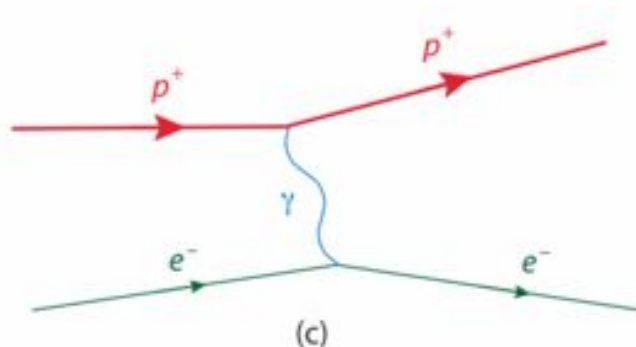
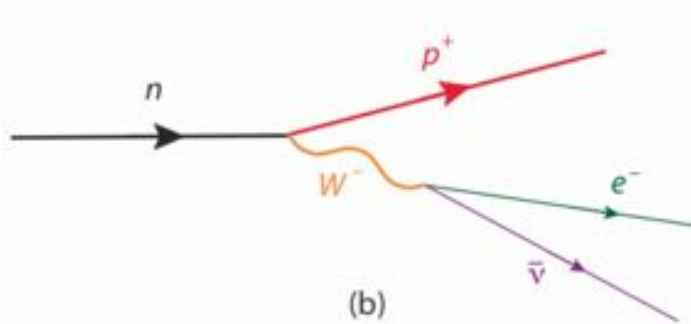
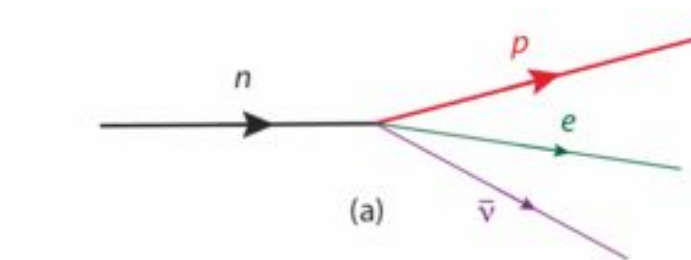
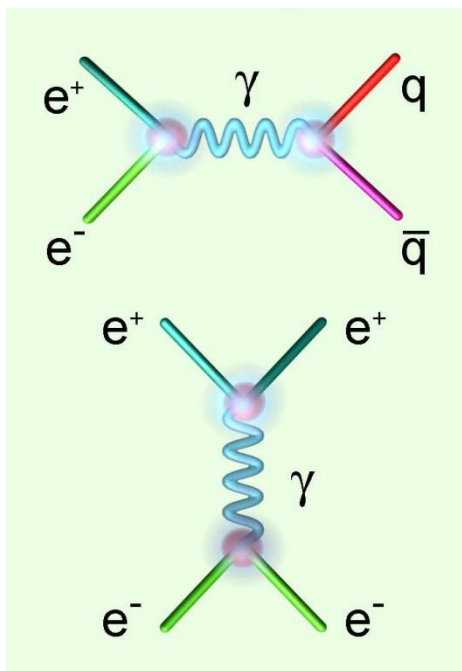
### Elementary Particles



### Composite Particles

### Forces

## Фотони - переносники взаємодій





# РАДІОБІОЛОГІЯ



Кафедра Біофізики

## Електромагнітне (фотонне) іонізуюче випромінювання

Фотони випромінюються в багатьох природних процесах:

- при русі електричного заряду з прискоренням;
- при переході атома або ядра із збудженого стану в стан з меншою енергією;
- або при анігіляції пари електрон-позитрон.

При зворотних процесах відбувається поглинання фотонів.

В вакуумі енергія та імпульс фотону дорівнює:

$$E = h\nu, \quad p = h\nu/c = h/\lambda$$

де  $h$  – постійна Планка,  $c$  – швидкість світла,  $\nu$  – частота,  $\lambda$  – довжина хвилі.



# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Корпускулярне іонізуюче випромінювання

**Електр<sup>о</sup>н** - стабільна, негативно заряджена елементарна частинка, що входить до складу всіх атомів, має властивості частинки і хвилі.

Має електричний заряд  $e = -1,6021892(46) \times 10^{-19}$  Кл

Має масу  $9,109554(906) \times 10^{-31}$  кг.

Згідно сучасних уявлень фізики елементарних частинок, електрон неподільний і немає внутрішньої структури (як мінімум до відстаней  $10^{-19}$  м)

Бета-частинки, які є високоенергетичними електронами, що утворюються при бета-розпаді атомних ядер.

Електрон належить до родини лептонів, має електричний заряд  $-e$ , спин  $1/2$ .

Електрон є лептоном, бере участь в електромагнітній, слабкій та гравітаційній взаємодіях.

Античастинкою для електрона є позитрон.





# РАДІОБІОЛОГІЯ



## **Протон** в системі елементарних частинок згідно Стандартної моделі

Протон – стабільна частинка ферміон з зарядом  $+e$  зі спіном  $1/2$ .

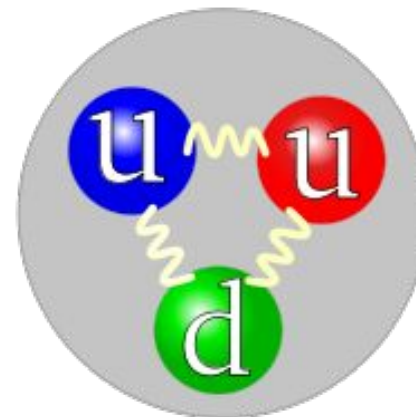
Його спін дорівнює  $1/2$

Маса протона становить  $1,00727663$  а.о.м. або  $938,2723$  MeV.

Крім електричного заряду протон має також магнітний момент, що дорівнює  $2,792847351(28)$  ядерного магнетона.

Античастинкою для протона є антипротон, характеристики якого схожі на протон за винятком від'ємного заряду.

Протони беруть участь у всіх типах взаємодії: сильній, електромагнітній, слабкій та гравітаційній.





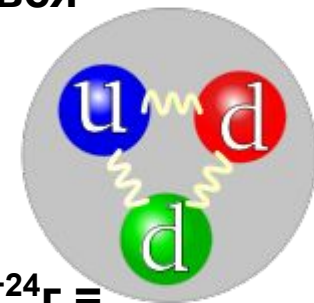


# РАДІОБІОЛОГІЯ



## **Нейтрон** в системі елементарних частинок згідно Стандартної моделі

Нейтрон — електрично нейтральна частинка, що входить до групи частинок під назвою баріони, які у свою чергу входять до складу групи адронів. Електрична нейтральність нейтрона зумовлюється тим, що заряд u-кварка, який входить до складу нейтрона, компенсується зарядами двох d-кварків. У нейтрона є античастинка, яка називається антинейтроном.



Маса нейтрона приблизно дорівнює масі протона  $1,6749543 \cdot 10^{-24} \text{г} = 1838,5$  мас електрона.

3 нейтронів і протонів складаються ядра атомів, в яких нейтрон стабільний.

У вільному стані нейтрон нестабільний і радіоактивний. Середній період існування 12,5 хв. Перетворюється на **протон+електрон+антинейтрино**.

Внаслідок відсутності заряду має велику проникність, оскільки під час руху в речовині нейтрон не витрачає енергії на іонізацію і випромінювання.



# РАДІОБІОЛОГІЯ



Кафедра Біофізики

## Фізичні механізми взаємодії іонізуючого випромінювання з речовиною

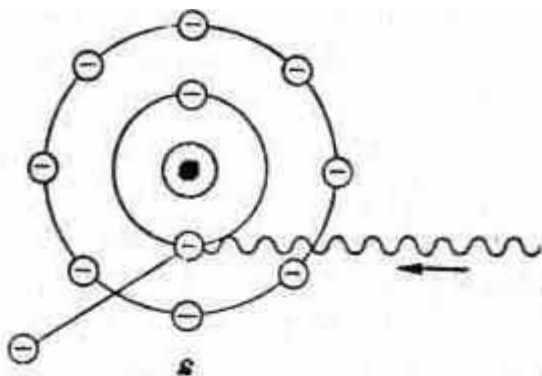
Заряджені частинки і  $\gamma$ -фотони, розповсюджуючись в речовині, взаємодіють з електронами і ядрами, внаслідок чого змінюється стан як речовини, так і частинок.

Основними процесами, що відбуваються при проходженні **фотонного** (рентгенівського та гамма-) випромінювання через речовину є:

1. *фотоефект;*
2. *Комптон-ефект;*
3. *Ефект утворення пар;*
4. *Ядерний фотоефект.*

## Фотоефект

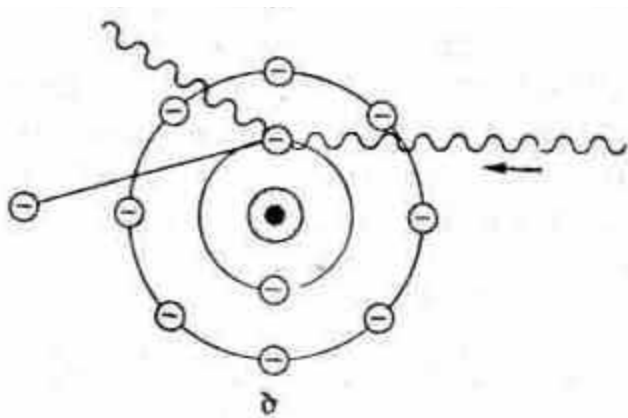
**Фотоефект, фотоелектричний ефект** – це випускання електронів речовиною під дією фотонів. У конденсованих (твердих і рідких) речовинах виділяють зовнішній і внутрішній фотоефект.



**Закони фотоефекту:**

1. Сила фотоструму прямо пропорційна щільності світлового потоку.
2. Максимальна кінетична енергія вибитих світлом електронів лінійно зростає з частотою (енергією) світла і не залежить від його інтенсивності.
3. Для кожної речовини існує мінімальна частота (енергія) світла, при якій ще можливий фотоефект.

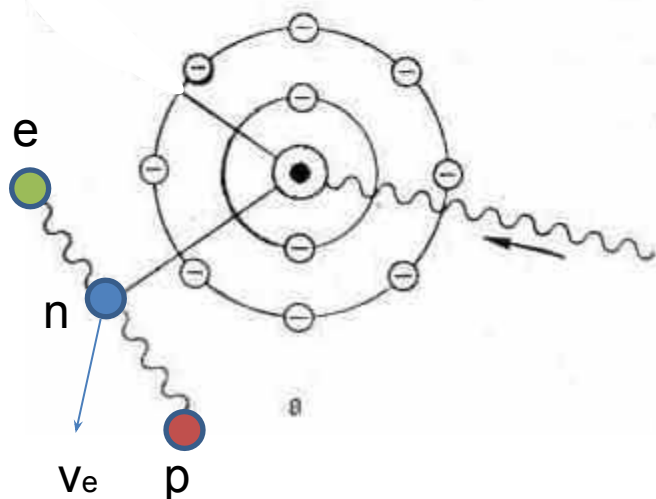
## Комптон-ефект



*Ефект Комптона (Комптон-ефект, комптонівське розсіювання)* – це некогерентне розсіювання фотонів на вільних електронах.

Ефект супроводжується зміною частоти фотонів, частина енергії яких після розсіювання передається електронам.

## Ядерний фотоефект

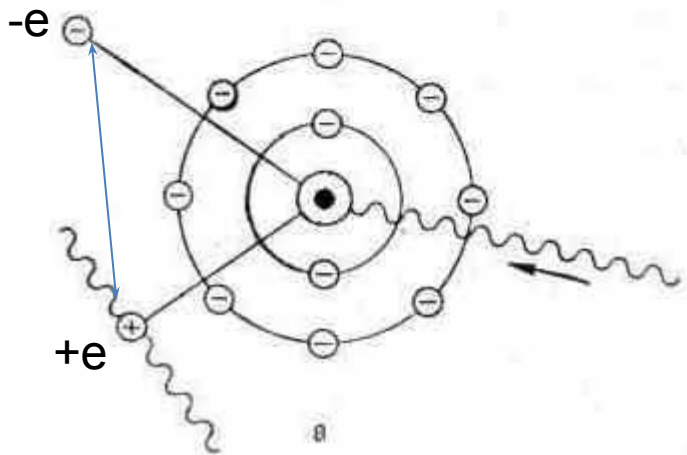


**Фотоядерні реакції** - ядерні реакції, що відбуваються при поглинанні гамма-квантів ядрами атомів.

Явище випускання ядрами нуклонів при цій реакції називається **ядерним фотоефектом**.

При поглинанні гамма-кванта ядро отримує надлишок енергії без зміни свого нуклонного складу, а ядро з надлишком енергії є складовим ядром. Але якщо передана ядру енергія перевищує енергію зв'язку нуклона в ядрі, то розпад складеного ядра відбувається найчастіше з випусканням нуклонів, в основному нейтронів. Такий розпад веде до ядерних реакцій, які називаються **фотоядерними**, а явище випускання нуклонів в цих реакціях - **ядерним фотоефектом**.

## Утворення електрон-позитронних пар



Гамма-кванти з енергією понад 1.022 MeV потрапляють в сильне електричне поле ядра і перетворюються на пару «електрон-позитрон», яка анігілює з утворенням вторинного гамма-випромінювання, що викликає фотоефект і Комптон-ефект.





**Відносна вірогідність % поглинання фотонів різної енергії для трьох видів взаємодії фотонного випромінювання з речовиною:**

**1 – фотоефект; 2 – Комптон-ефект; 3 – утворення пар.**

(Ярмоненко, 2004)



# РАДІОБІОЛОГІЯ



Кафедра Біофізики

Поглинання потоку монохроматичних фотонів описується як:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

де  $I(x)$  – інтенсивність потоку, що пройшов через речовину;

$I_0$  – інтенсивність потоку, що падає на речовину;

$\mu$  – лінійний коефіцієнт поглинання, що характеризує поглинання випромінювання речовиною товщиною 1 см;

$x$  – товщина зразку.

Лінійний коефіцієнт поглинання гамма-випромінювання в різних речовинах (Ярмоненко, 2004)

Енергія $\gamma$ -випромінювання, МэВ	В повітрі ( $\times 10$ )	В воді	В залізі	В свинці
0,1	1,98	0,172	2,81	59,9
0,25	1,46	0,126	0,82	6,3
0,5	1,11	0,096	0,65	1,67
1,0	0,81	0,070	0,45	0,75
2,0	0,57	0,050	0,33	0,51
3,0	0,46	0,039	0,28	0,46
3,0	0,36	0,030	0,24	0,48
10,0	0,26	0,022	0,23	0,62



# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

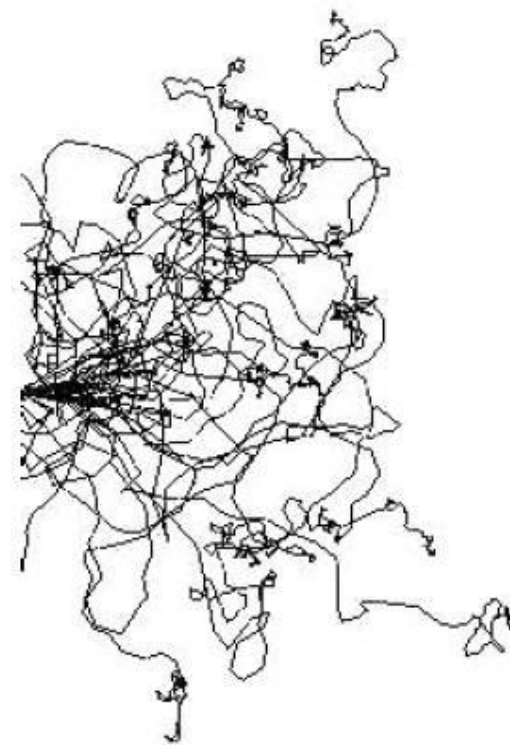
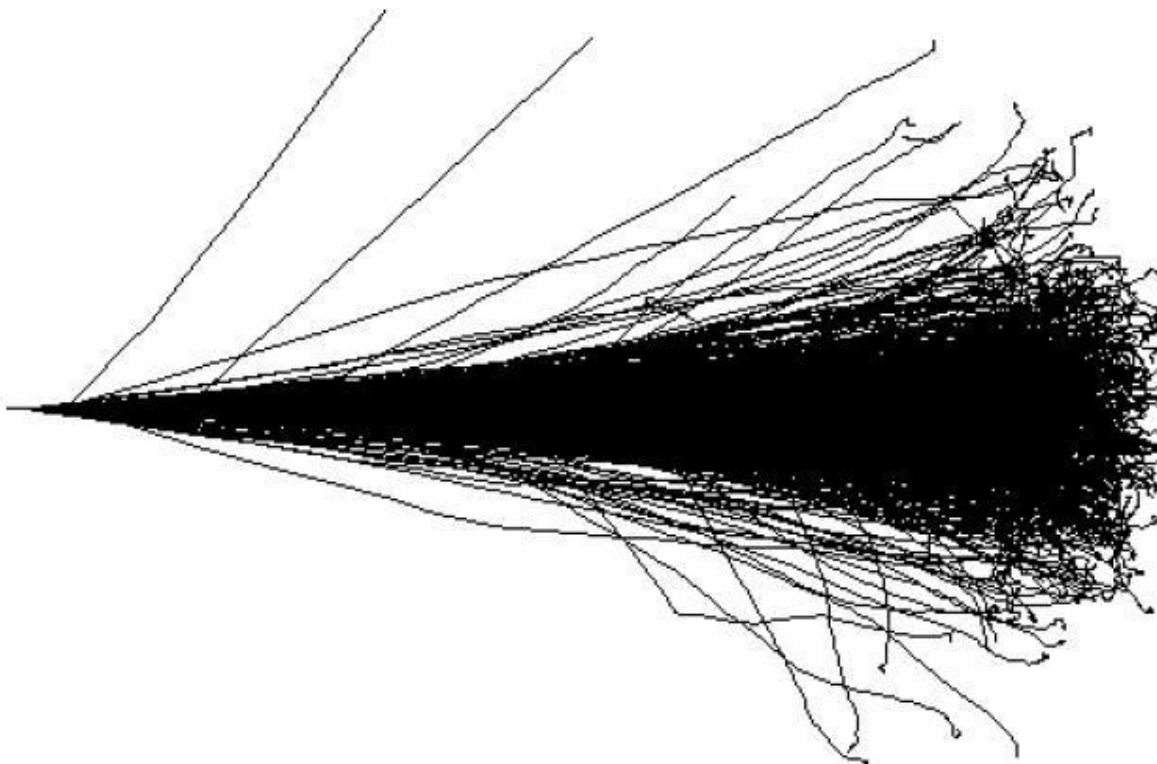
При проходженні через речовину **заряджена частинка** викликає іонізацію і збудження атомів, втрачаючи поступово енергію.

Взаємодія електронів (або інших частинок) з атомами, що не призводить до втрати енергії називають **пружним розсіюванням** електронів.

Взаємодія електрону (або інших частинок), що супроводжується обміном енергії, називають **непружним розсіюванням**. Наприклад в Рентгенівських трубках, коли при гальмуванні електрону частина енергії випромінюється у вигляді рентгенівського кванту електромагнітного випромінювання.

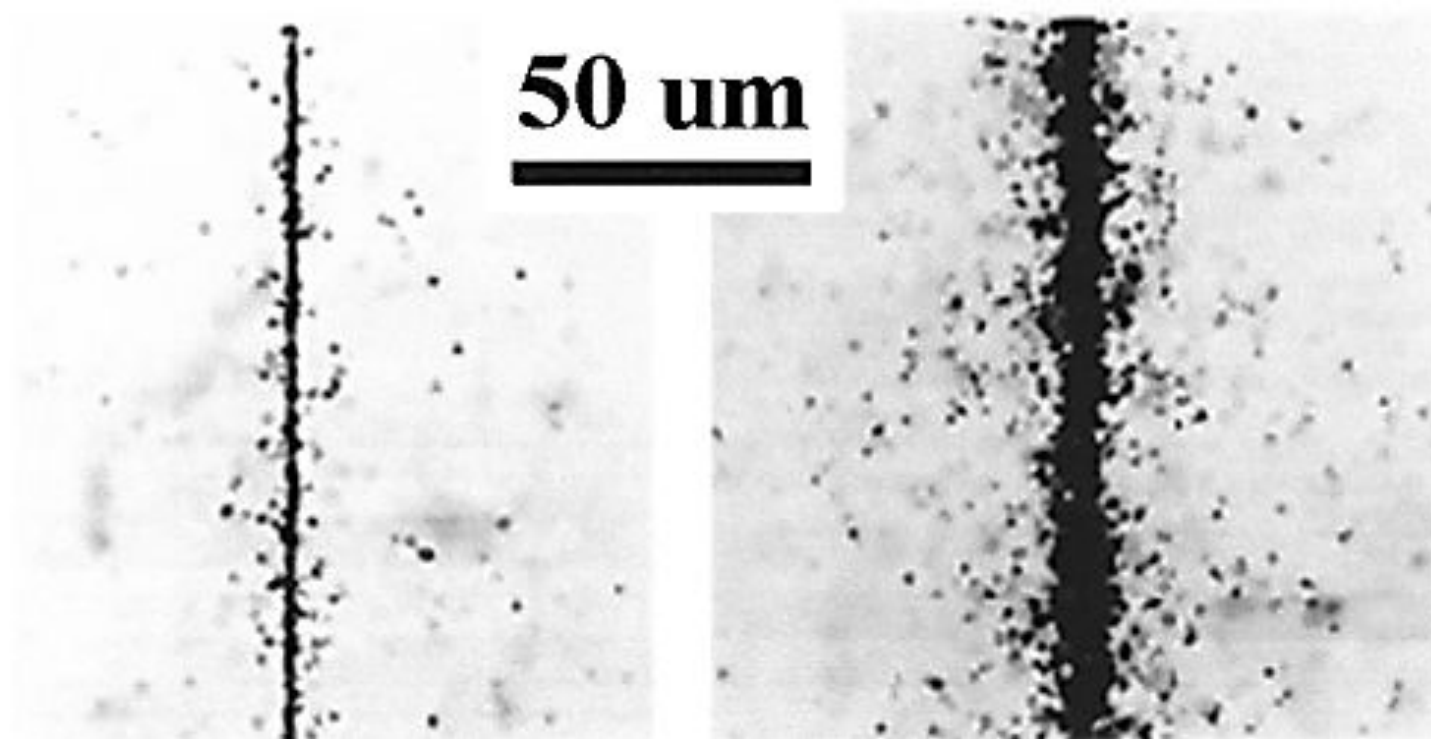
Чим більше маса частинки, тим менше вона відхиляється від свого напрямку. У зв'язку з цим траєкторії протонів є довгими і майже лінійними, а електронів – короткими і зламаними.

## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною



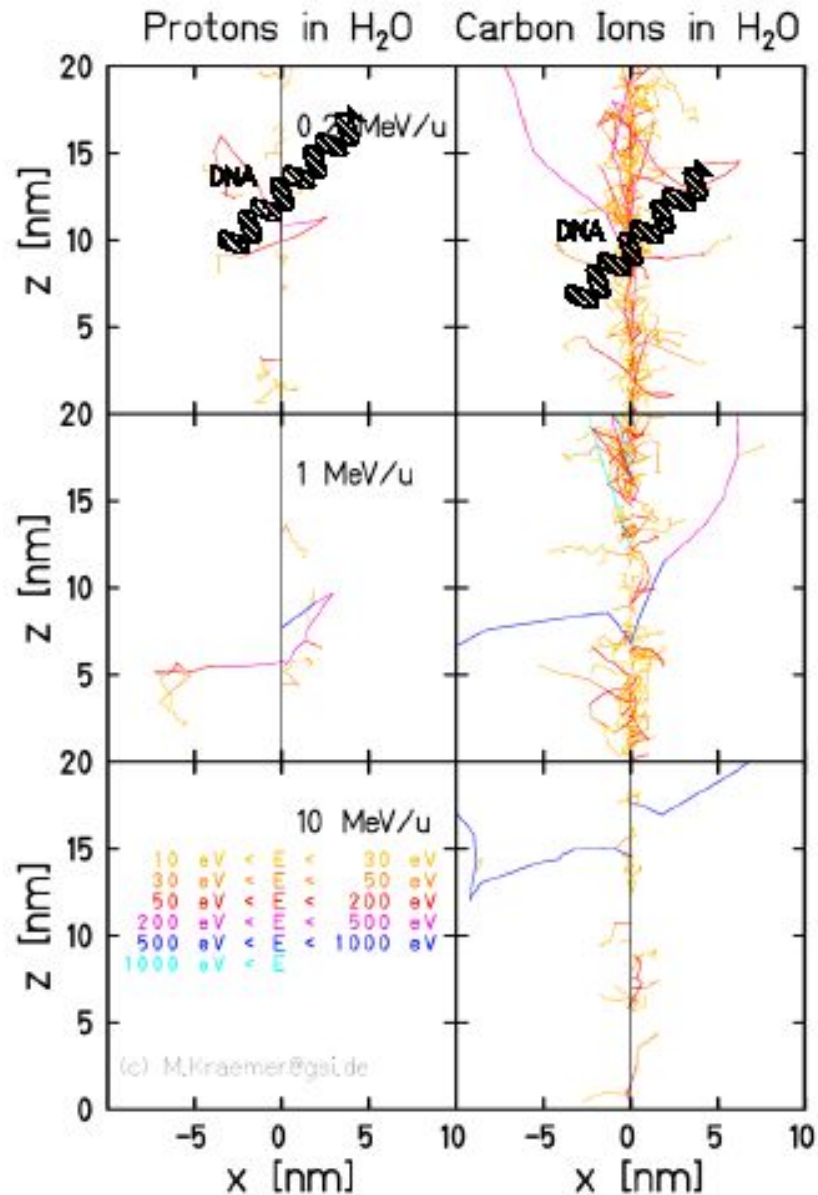
Треки протонів (А) і електронів (Б) з енергією 1 МеВ в пластинці свинцю

## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною



Треки іонізації на фотоемульсії від проходження частинок з зарядом 4-6 (А) і іонів заліза з зарядом 26 (Б) (*Schaefer and Sullivan, 1976*)





Треки іонізації від протонів та іонів карбону у воді .

Для порівняння розмірів треків наводиться структура ДНК.





# РАДІОБІОЛОГІЯ



Кафедра Біофізики

## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

Важливою характеристикою корпускулярного випромінювання є *лінійна передача енергії (ЛПЕ)*

*ЛПЕ* - це енергія, що передається частинкою речовині при проходженні одиниці довжини.

*Лінійної гальмівної здатності речовини S* називають відношення енергії  $dE$ , що втрачається зарядженої іонізуючої часткою при проходженні елементарного шляху  $dl$  в речовині, до довжини цього шляху :  $S = dE / dl$ .

Розмірність  $S$  - Дж / м.

В залежності від величини ЛПЕ випромінювання ділять на:

- слабоіонізуючі;
- щільноіонізуючі.

*ЛПЕ* – залежить як від природи частинки (маси, заряду), так і її початкової енергії.

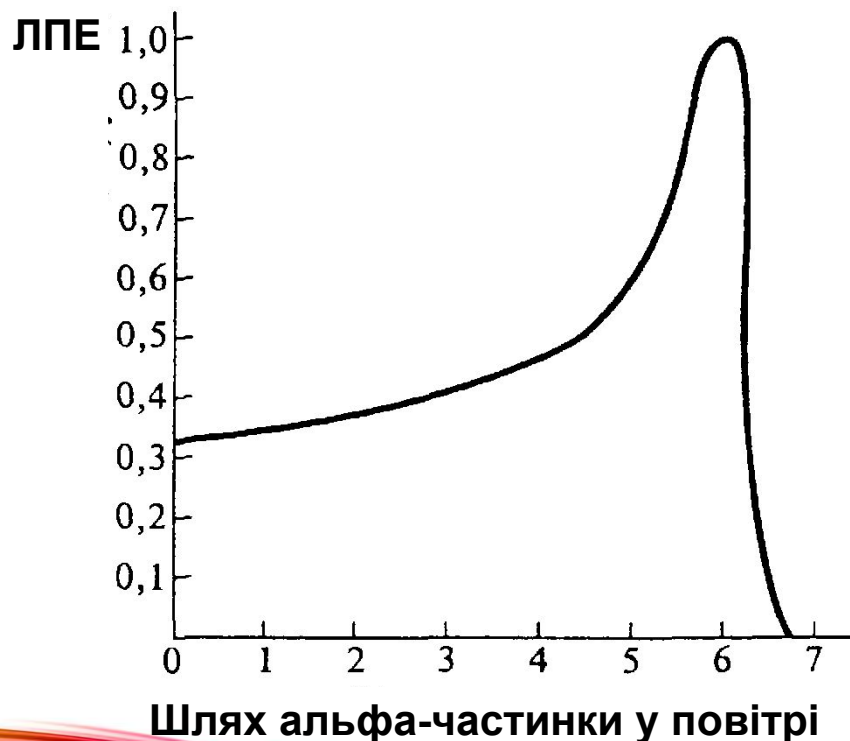


# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

**ЛПЕ** зростає зі зменшенням швидкості руху частинки, тому наприкінці треку в речовині втрачання енергії є максимальною.





# РАДІОБІОЛОГІЯ



Кафедра Біофізики

## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

Під *лінійної щільності іонізації* розуміють відношення числа  $dn$  пар іонів, що утворюються зарядженою іонізуючої частинкою на елементарному шляху  $dl$ , до цього шляху :  
 $i = dn / dl$  .

Розмірність  $i$  - пар іонів / м .

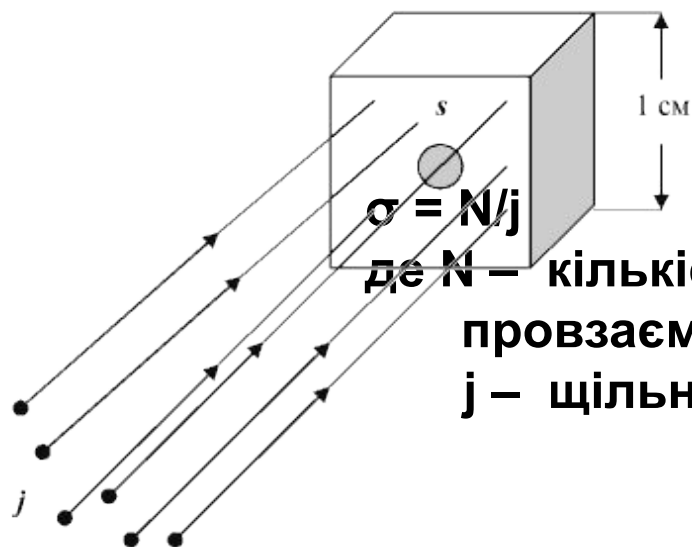
*Середнім лінійним пробігом зарядженої іонізуючої частки  $R$*  є середнє значення відстані, яку проходить частинка в даній речовині до моменту повної втрати іонізуючої здатності.



## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

Тип излучения	Источник	Глубина в ткани
Альфа	$^{210}\text{Po}$ <b>5.3 MeV</b>	Глубина 0.037 мм
Бета	$^{14}\text{C}$ <b>0.154 MeV</b> максимальная энергия	Максимальная глубина 0.29 мм (обычно меньше)
Бета	$^{32}\text{P}$ <b>1.71 MeV</b> максимальная энергия	Максимальная глубина 8 мм (обычно меньше)
Гамма	$^{125}\text{I}$ <b>0.035 MeV</b>	Среднее расстояние до столкновения 33 мм
Гамма	$^{60}\text{Co}$ <b>1.33 MeV</b>	Среднее расстояние до столкновения 164 мм

**Ефективний перетин** (ефективний перетин ядра, ядерний перетин реакції, мікроскопічний перетин реакції) – це величина, що характеризує ймовірність взаємодії частинки з атомним ядром або інший елементарною частинкою.



де  $N$  – кількість частинок, що провзаємодіяли;  
 $j$  – щільність потоку частинок.

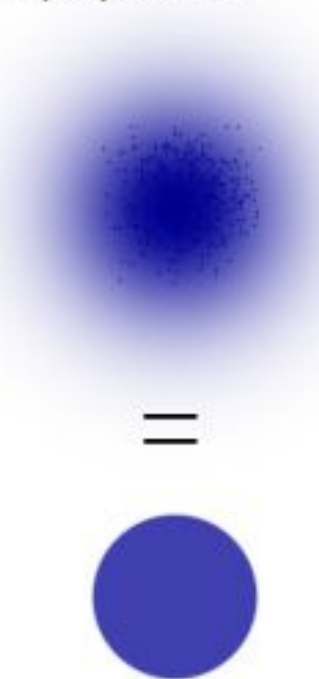
Одиниця виміру ефективного перерізу - барн ( $1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$ ).

За допомогою відомих ефективних перерізів розраховують швидкості ядерних реакцій або кількості частинок, що прореагували.

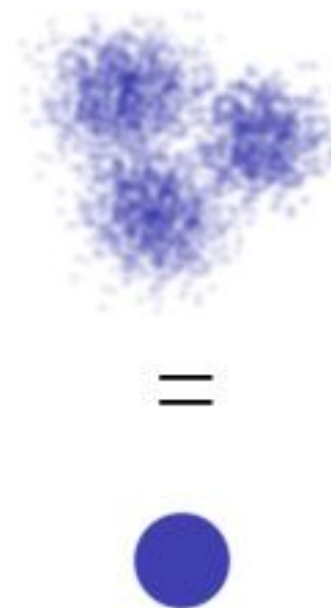


Протон с точки зрения

а) протона



б) фотона



в) нейтрино



эффeктивное сечение



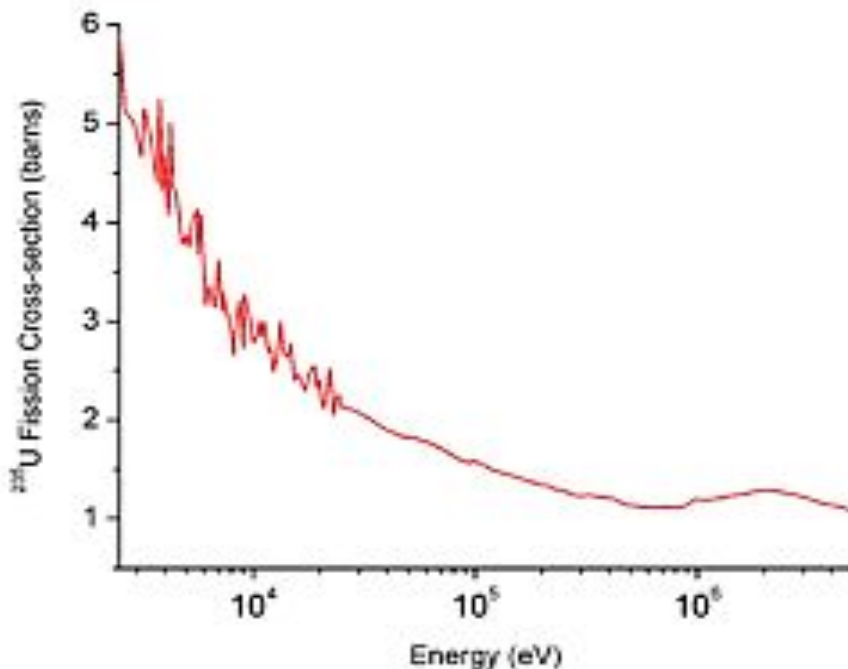
# РАДІОБІОЛОГІЯ



Кафедра Біофізики

**Ефективний перетин визначається не тільки геометричними розмірами мікрочастинок або радіусами дії сил, але і хвильовими властивостями частинок.**

**Тобто, ефективний перетин має резонансний характер залежності від енергії.**





# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

**Нейтрони** – незаряджені частинки, що дозволяє їм проникати в атоми і досягати ядер.

Атоми, що поглинають нейтрони, стають нестійкими і розпадаються на продукти, одними з яких є альфа-частинки, протони і гамма-фотони.

В залежності від енергії нейтронів, їх умовно розділяють на:

- швидкі нейтрони (енергія понад 100 кеВ);
- проміжні нейтрони (енергія 1 – 100 кеВ);
- теплові нейтрони (енергія порядку 0,025 кеВ)



# РАДІОБІОЛОГІЯ



## Взаємодія корпускулярного випромінювання з речовиною

Мезони - бозони сильної взаємодії.

У Стандартній моделі мезони - це не-елементарні частинки, що складаються з парного числа кварків і антикварков.

Основна частина маси мезона утворюється з енергії зв'язку, а не з суми мас частинок, що його складають.

***$\pi$ -мезони*** – негативно заряджені частинки, що легко поглинаються ядрами атомів.

Поглинання  ***$\pi$ -мезону*** призводить до руйнування ядра з випромінюванням нейтронів, протонів і альфа-частинок, іонів *Li* і *Be* та інших іонів.

A silhouette of a person stands in the center of the frame, facing forward. Behind them, numerous bright green laser beams radiate outwards in all directions, creating a starburst effect against a dark background. The beams are sharp and vibrant, contrasting sharply with the dark surroundings.

**Дякую за увагу**