***Зміст***

[§59. Будова атома](#_Toc505616649)

[§60. Атомне ядро](#_Toc505616650)

[§61. Радіоактивність](#_Toc505616651)

[§62. Ядерні реакції](#_Toc505616652)

[§63. Властивості йонізуючих випромінювань](#_Toc505616653)

[§64. Методи реєстрації йонізуючих випромінювань](#_Toc505616654)

[§65. Елементарні частинки](#_Toc505616655)

## [§59. Будова атома](" \l "Зміст)

### Електрон

До кінця XIX століття були здобуті докази слушності атомно-молекулярних уявлень про будову речовини. Про існування всередині нейтральних атомів дрібніших електрично заряджених частинок свідчили яви­ща електролізу, фотоефекту й термоелек­тронної емісії, електричний розряд у газах. Вивчення цих явищ привело до відкриття в 1887 році електрона. *Електрон* — частин­ка з масою, приблизно в 2000 разів меншою від маси атома Гідрогену й з негативним електричним зарядом. Електрони входять до складу атомів усіх хімічних елементів.

### Елементарний заряд

Усі електрони абсолютно однакові. Заряд одного електрона називають *елементарним зарядом,* оскільки вільних частинок з меншим зарядом у при» роді не виявлено.

Про існування складної внутрішньої струк­тури атомів свідчить періодичний закон Д. І. Менделєєва та існування специфічних для кожного хімічного елемента лінійчас­тих оптичних спектрів випромінювання.

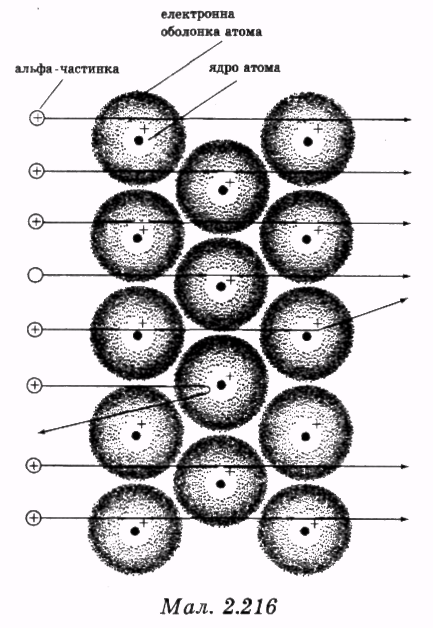
### Радіоактивність

1896 року Антуан-Анрі Беккерель відкрив явище *радіоактивності,* що дало змогу встановити факт: атоми не тільки мають складну внутрішню структуру, але й здатні до спонтанних перетворень. Під час спонтанних радіоактивних перетво­рень атомів виявили три види випроміню­вань. Їх назвали альфа-, бета- і гамма-випромінюваннями. Альфа-випромінювання виявилося потоком двозарядних йонів атомів Гелію, бета-випромінювання — по­током електронів, гамма-випромінювання — електромагнітним випромінюванням. У 1902 році англійські вчені Ернест Резер­форд і Фредерік Содді довели, що в процесі радіоактивного розпаду атом Урану пере­творюється на два атоми — атом Торію і атом Гелію. Це означало, що атоми не є незмінними, неподільними частинками. Досліджуючи проходження вузького пучка альфа-частинок через тонкі шари речови­ни, Резерфорд виявив, що більшість альфа-частинок проходить крізь металеву фольгу, що складається з багатьох тисяч шарів атомів, не відхиляючись від початкового напряму, не зазнаючи розсіяння, ніби на їхньому шляху не було ніяких перешкод.

Проте деякі частинки відхилялися на більші кути, зазнавши дії більших сил.

### Модель атома Резерфорда

На основі результатів спостереження за розсіянням альфа-частинок у речовині Ре­зерфорд запропонував *планетарну модель* будови атома. Згідно з цією моделлю будо­ва атома подібна до будови Сонячної систе­ми. У центрі кожного атома є позитивно за­ряджене ядро з радіусома навко­ло нього на відстаняхподібно до планет обертаються негативно заряджені електрони. Майже вся маса зосереджена в атомному ядрі. Альфа-частинки можуть без розсіяння проходити через тисячі шарів атомів, оскільки більша частина простору всередині атомів пуста, а зіткнення з лег­кими електронами майже не впливають на рух важкої альфа-частинки. Розсіяння аль­фа-частинок відбувається під час зіткнення з атомними ядрами (мал. 2.216).



Модель атома Резерфорда не змогла пояс­нити всі властивості атомів. Згідно з законами класичної фізики атом із позитивно зарядженого ядра й електронів, які обертаються по колових орбітах, пови­нен випромінювати електромагнітні хвилі.

Випромінювання електромагнітних хвиль має привести до зменшення запасу по­тенціальної енергії в системі ядро-електрон, до поступового зменшення радіуса орбіти електрона й падіння електрона на ядро. Проте атоми звичайно не випроміню­ють електромагнітні хвилі, електрони не падають на атомні ядра, тобто атоми стійкі. Щоб пояснити стійкість атомів Нільс Бор запропонував відмовитися від звичних кла­сичних уявлень і законів для пояснення властивостей атомів.

### Квантові постулати Бора. Стаціонарні або квантові стани

Основні властивості атомів мають послідов­не якісне пояснення на основі прийняття *квантових постулатів Бора.*

1. Атомна система може перебувати лише в певних стаціонарних або квантових ста­нах, кожному з яких відповідає певна енергія *Е.* Атом не випромінює енергію в стаціонарних станах.
2. Випромінювання або поглинання енергії відбувається тільки під час переходу ато­ма з одного стаціонарного стану в інший. Енергія кванта електромагнітного випромінювання під час переходу із стаціонарного стану з енергієюв стан з енергією дорівнює різниці енергій атома у двох квантових станах:

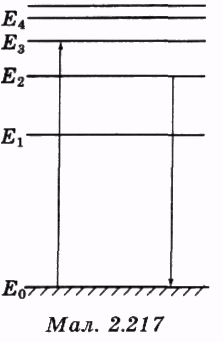


### Основний стан. Збуджені стани

Стаціонарний стан атома з мінімальним за­пасом енергії називають *основним станом,* усі інші стаціонарні стани називають *збу­дженими станами.* В основному стані атом може перебувати нескінченно довго, час життя атома в збудженому стані звичайно триваєсекунди.

### Енергетична діаграма

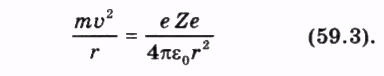
Для наочного уявлення енергетичних станів атомів і переходів між ними викори­стовують *енергетичні діаграми.* На енерге­тичній діаграмі кожний стаціонарний стан позначають горизонтальною лінією, яку називають *енергетичним рівнем.* Відстані між лініями пропорційні до різниць енер­гій між відповідними стаціонарними стана­ми. Перехід атома із стаціонарного стану *Е* з меншим запасом енергії в станз більшим запасом енергії, що супро­воджується поглинанням енергії, познача­ють напрямленою вгору вертикальною стрілкою між енергетичними рівнями; обернений перехід з виділенням енергії позначають стрілкою, напрямленою вниз (мал. 2.217).



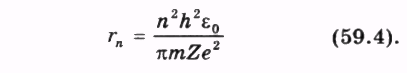
Згідно з теорією моделі атома за Бором стаціонарними в атомі є лише такі стани, у яких для рухомих по колових орбітах елек­тронів виконується умова:



де *т* — маса електрона, *v* — його швид­кість, *т* — радіус колової орбіти, *h* — стала Планка, *п* — ціле число. Рух електрона по коловій орбіті відбу­вається під дією кулонівської сили, тому для стаціонарних станів атома із зарядом ядра *Ze* також повинна виконуватися умова:



З умов (59.2) і (59.3) випливає, що радіуси  стаціонарних колових орбіт в атомі виз­начаються виразом:



Кожній дозволеній стаціонарній орбіті відповідає своє значення енергії атома. Набір можливих стаціонарних станів атома визначає заряд атомного ядра. Тому всі атоми одного хімічного елемента мають од­наковий набір можливих енергетичних ставів та однакові лінійчасті спектри ви­промінювання й поглинання.

В атомів різних хімічних елементів атомні ядра мають різні заряди, тому в них різні лінійчасті спектри.

### Дослід Франка і Герца

Відповідність постулатів Бора дійсним вла­стивостям атомів підтверджена численни­ми експериментами. Одним з перших екс­периментів, що підтвердив правдивість квантових постулатів Бора, був *дослід Франка і Герца.* Під час цього досліду встановлено, що передачу енергії від елек­тронів атомам Меркурію в процесі їхнього зіткнення можна спостерігати тільки тоді, коли кінетична енергія електронів не мен­ша за 4,9 еВ. Ця енергія відповідає перехо­ду атома Меркурію від основного в перший збуджений стан.

### Електронвольт

Енергію частинок і атомних ядер часто ви­ражають в *електрон-вольтах.* Енергію один електронвольт, 1 еВ, набуває під дією еле­ктричного поля частинка з елементарним електричним зарядом під час переміщення між точками поля з різницею потенціалів один вольт.

Знайдемо зв'язок між одиницями вимірю­вання енергії електронвольт і джоуль.

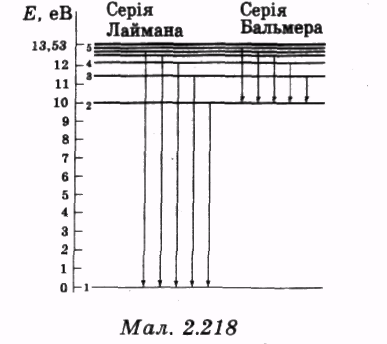
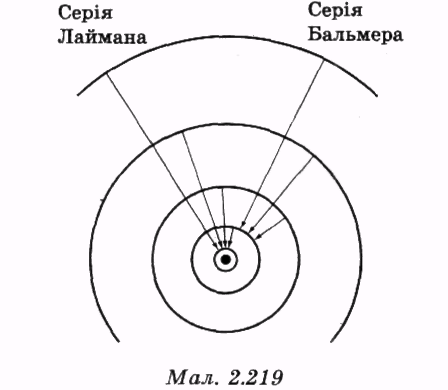


У ядерній фізиці найуживанішою є одини­ця енергії мегаелектронвольт, МеВ. Один мегаелектронвольт дорівнює мільйону електронвольт:



Розрахунок спектра атома Гідрогену на ос­нові використання моделі атома Бора дав значення довжин хвиль, які повністю уз­годжуються із спостережуваними в експе рименті. Це було ще одним успіхом теорії Бора.

На мал. 2.218 подано схему енергетичних рівнів атома Гідрогену з переходами між ними, а на мал. 2.219 — схему будови ато­ма Гідрогену за Бором з відповідними пере­ходами електрона між орбітами. Проте спроби розрахувати спектри складні­ших атомів на основі уявлень про рух елек­тронів по певних орбітах були невдалі.



Подальші дослідження будови й властивос­тей атомів привели до створення *квантової механіки.*

### Квантова механіка

Квантовою механікою називають теорію, яка описує явища у світі елементарних ча­стинок і систем, що складаються з них. Перша принципова відмінність квантової механіки від класичної механіки полягає в тому, що у квантовій механіці розв'язують завдання визначення ймовірності перебу­вання частинки в даному місці простору. Точні значення координат і швидкостей ча­стинок у будь-який момент часу, траєкто­рій руху частинок у квантовій механіці в принципі визначити не можна. Друга принципова відмінність квантової механіки від класичної фізики полягає у квантуванні фізичних величин, які опису­ють стан системи взаємодіючих частинок. У класичній фізиці будь-які величини мо­жуть змінюватися безперервно, набувати будь-яких значень. У квантовій фізиці основні фізичні величини — енергія, імпульс, момент імпульсу, електричний за­ряд, магнітне поле, що характеризують си­стеми взаємодіючих частинок, можуть змінюватися лише стрибками, квантовано під час переходів системи з одного кванто­вого стану в інший.

Квантова механіка успішно розв'язала зав­дання розрахунку спектрів атомів і моле­кул, пояснення властивостей твердих тіл, спектрів енергетичних станів атомних ядер та елементарних частинок.

## [§60. Атомне ядро](" \l "Зміст)

Після відкриття існування атомних ядер, виміряли їхні електричні заряди й маси. У 1913 році англійський фізик Генрі Мозлі встановив, що заряд атомних ядер різних хімічних елементів різний і пов'язаний з атомним номером *Z* хімічного елемента. Позитивний заряд *q* атомного ядра хімічно­го елемента з порядковим номером *Z* у таб­лиці Менделєєва дорівнює 

де е — елементарний електричний заряд. Оскільки атом в цілому нейтральний, то атом з порядковим номером *Z* у таблиці Менделєєва має електронну оболонку із *Z* електронів.

### Протон

На основі виявленої закономірності (60.1) залежності заряду *q* ядра від порядкового номера *Z* хімічного елемента можна було висловити припущення, що атомне ядро з порядковим номером *Z* побудоване з одна­кових заряджених частинок, що мають еле­ментарний заряд е*.* Такою частинкою міг бути *протон* — ядро атома Гідрогену. За­ряд протона дорівнює елементарному заря­дові еелектрона, маса протона дорівнює:

Проте ядроатома Гелію — другого елемен­та таблиці Менделєєва — має заряд, що дорівнює двом елементарним зарядам, а йо­го маса більша за масу протона приблизно в чотири рази.

Такі ж самі розходження можна зауважити й щодо атомних ядер решти хімічних еле­ментів. Отже, атомні ядра не можуть скла­датися лише з протонів.

### Нейтрон

У 1932 році англійський фізик Джеймс Чедвік відкрив нову елементарну частинку — *нейтрон.* Нейтрон не має електричного заряду, а його маса трохи більша за масу протона,



### Атомний номер

Подальші дослідження показали, що ядра атомів усіх хімічних елементів складають­ся з протонів і нейтронів. Число *Z* протонів називають *атомним номером* хімічного елемента, число нейтронів у ядрі познача­ють літерою *N.*

### Масове число

Суму числа протонів *Z* і числа нейтронів *N* називають масовим числом і позначають літерою А:

### Ізотопи

Точні вимірювання мас атомів показали, що всі хімічні елементи мають *ізотопи. Ізотопами* називають атоми з однаковим числом *Z* протонів, але з різним числом *N* нейтронів в атомному ядрі. При однаково­му числі протонів атоми ізотопів мають од­накову будову електронних оболонок. От­же, вони є атомами одного хімічного еле­мента й мають однакові хімічні власти­вості. Відмінність у кількості нейтронів у ядрах ізотопів приводить до відмінностей у масах ядер ізотопів і суттєвих різниць вла­стивостей атомних ядер ізотопів. Ізотоп X, що містить певну кількість *Z* про­тонів у ядрі й має певне масове число *А,* по­значаютьі називають нуклідом. Виявлення складної будови атомних ядер поставило проблему ядерних сил.

### Ядерні сили

Між однойменно зарядженими протонами в відштовхування. На відстані приблизно 10-15 м ці сили дуже великі, однак протони не розлітаються в протилежні боки. Отже, між протонами, окрім кулонівських сил відштовхування, діють сили іншої фізичної природи, сили притягання. Ці сили назва­ли *ядерними силами.* Дослідження природи ядерних сил показали, що ці сили на відстанях значно перевищують кулонівські сили відштовхування, але із збільшенням відстані дуже швидко спадають. На відста­нях, що приблизно дорівнюють радіусу ато­ма, дія ядерних сил мізерна. Ядерні сили притягання однаково діють між двома протонами, двома нейтронами або між протоном і нейтроном.

### Нуклон

Однакова здатність протонів і нейтронів до ядерної взаємодії є основою для розгляду їх як двох станів однієї частинки — *нуклона.*

### Енергія зв'язку ядра

Для звільнення нуклона з атомного ядра треба виконати роботу проти ядерних сил притягання. Енергію, необхідну для поділу атомного ядра на вільні протони та нейтро­ни, називають *енергією зв'язку ядра*

### Питома енергія зв'язку

Частку від ділення енергії зв'язку ядра  на масове число *А* нуклонів у ядрі на­зивають питомою енергією зв'язку f ядра:



Питома енергія зв'язку ядра показує се­реднє значення енергії, необхідної для звільнення з ядра одного нуклона. Енергія зв'язку атомного ядравизначається на основі використання взаємо­зв'язку дефекту масиі зміни повної енергіїсистеми (54.10):

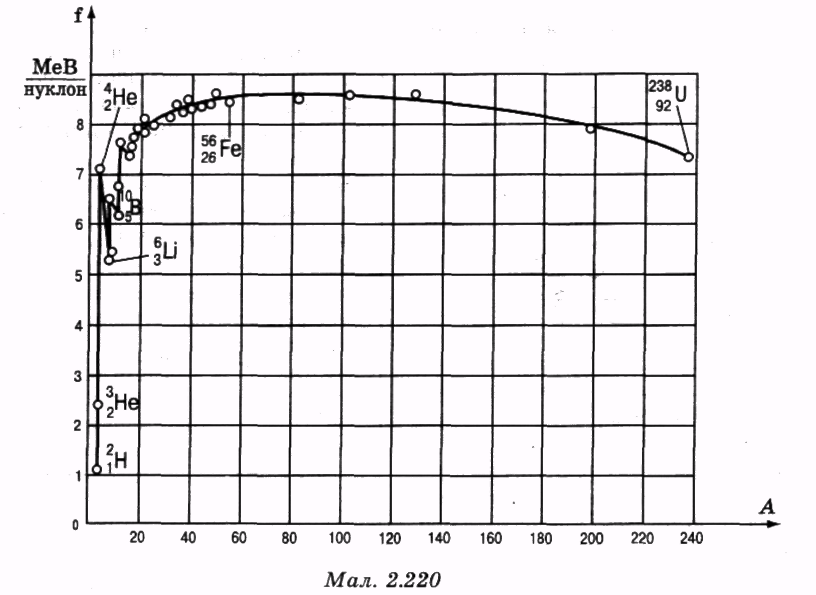


Дефект мас  атомного ядра дорівнює різниці мас вільних нейтронів  і протонів  і маси атомного ядра:



Знайдену в експериментах залежність пи­томої енергії зв'язку атомних ядер від їхнього масового числа *А* подано на графіку (мал. 2.220).

Цей графік показує, що питома енергія зв'язку нуклонів у різних ядрах лежить у межах від приблизно 1 МеВ на нуклон до 9 МеВ на нуклон. Ці значення в сотні, ти­сячі й сотні тисяч разів перевищують зна­чення енергії зв'язку електронів в атомах.



## [§61. Радіоактивність](" \l "Зміст)

*Радіоактивністю* називають явище спон­танного перетворення ядер одного хімічно­го елемента на ядра іншого хімічного еле­мента.

### Радіоактивні випромінювання

Радіоактивні перетворення ядер обов'язко­во супроводжуються *радіоактивним ви­промінюванням.*

### Альфа-розпад. Бета-розпад

У природі найчастіше трапляються два ти­пи радіоактивних перетворень — *альфа-розпад* і *бета-розпад.*

### Альфа-частинка

Під час альфа-розпаду з радіоактивного ядра викидається *альфа-частинка.* Альфа-частинкою називають ядро атома нукліду  Альфа-частинка складається з двох протонів і двох нейтронів, її заряд дорівнює двом елементарним зарядам. Під час вилітання з ядра альфа-частинки порядко­вий номер *Z* ядра-продукту зменшується на дві

одиниці, масове число *А* зменшується на чотири одиниці. Наприклад, у процесі альфа-розпаду ядра нукліду Урануодержують ядро нукліду Торію Так само як і атоми, ядра мають дискрет­ний спектр можливих стаціонарних енерге­тичних станів. В основному стані з міні­мальною енергією ядра можуть існувати впродовж тривалого часу або нескінченно довго. У збуджених станах атомні ядра існують протягом дуже короткого часу, а потім, так само як і збуджені атоми, спон­танно переходять до основного стану, ви­промінюючи квант електромагнітного ви­промінювання, який називають *гамма-квантом.* Гамма-випромінювання може су­проводжувати альфа-розпад, якщо атомне ядро після розпаду перебуває в збудженому стані. У цьому випадку, випромінюючи гамма-квант, ядро переходить в основний стан. Енергетичну діаграму альфа-розпаду ядра нукліду Урануподано на мал.

2.221.

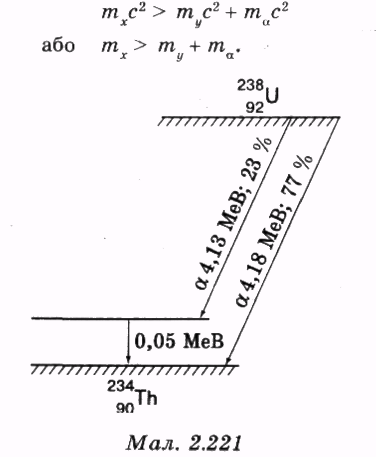


Схема показує, що 77 % ядер Урану-238 розпадається з випромінюванням альфа-ча­стинок з енергією 4,18 МеВ, 23 % розпадів відбувається з випромінюванням альфа-ча­стинок з енергією 4,13 МеВ і гамма-квантів з енергією 0,05 МеВ.

Альфа-розпад атомного ядраможливий у тому випадку, якщо власна енергія цього

ядра більша за суму власних енергій альфа-частинки



Усі атомні ядра одного ізотопу випроміню­ють альфа-частинки з однаковою кінетич­ною енергією, енергія альфа-частинок має значення в декілька мегаелектронвольт. Спектр гамма-випромінювання також лі­нійчастий, енергія гамма-квантів порядку мегаелектрон вольта.

### Бета-розпад. Електронний бета-розпад

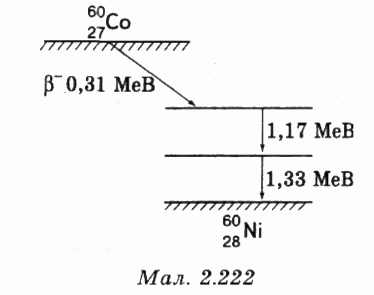
Під час *бета-розпаду* з атомного ядра вики­дається електрон або позитрон і нейтрино або антинейтрино. Бета-розпад з ви­промінюванням електрона називають *елек­тронним бета-розпадом.* Під час електрон­ного бета-розпаду всередині атомного ядра відбувається перетворення одного нейтрона *п* на протон *р* з випромінюванням електро­наі незарядженої елементарної частинки антинейтрино



У результаті бета-розпаду кількість про­тонів у ядрі збільшується на одиницю, а масове число залишається незмінним. Оскільки під час бета-розпаду енергія розпа­ду ділиться між трьома частинками — ядром-продуктом, електроном і антинейтрино, то в кожному окремому розпаді на частку електрона припадає більша чи менша част­ка енергії. Бета-випромінювання радіоак­тивного ізотопу характеризується макси­мальним значенням енергії бета-частинок.

Як і під час альфа-розпаду, ядро-продукт бета-розпаду може перебувати в збуджено­му стані й потім випромінювати гамма-кванти. У цьому випадку бета-розпад су­проводжується випромінюванням гамма-променів.

Наприклад, бета-розпад ядер Кобальту-60 супроводжує випромінювання двох гамма-квантів з енергією 1,17 МеВ і 1,33 МеВ (мал. 2.222).



### Позитрон

Під час позитронного бета-розпаду всере­дині атомного ядра відбувається перетво­рення одного протона *р* на нейтрон *п* з ви­промінюванням позитронаі нейтрино



Позитрон — елементарна частинка з ма­сою, що дорівнює масі електрона, і з пози­тивним елементарним зарядом. У резуль­таті позитронного бета-розпаду кількість протонів у ядрі зменшується на одиницю, кількість нейтронів збільшується на одини­цю, а масове число залишається незмін­ним. Приклад позитронного бета-розпаду схематично зображено на мал. 2.223.

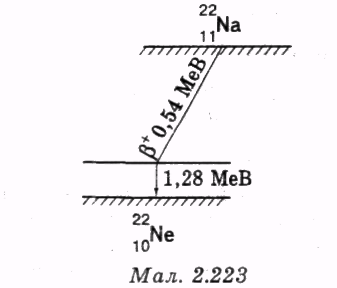


Схема показує, що ядра нукліду Натрію-22 перетворюються на ядра нукліду Неону-22 з випромінюванням позитронів з максимальною енергією 0,54 МеВ і гамма-квантів з енергією 1,28 МеВ.

Можливість спонтанного перетворення ней­трона на протон і електрон не викликає сумніву, оскільки маса нейтронабільша за суму мас протонаі електрона

Можливість перетворенняпротона на ней­трон потребує пояснення. Насправді вільні протони ніколи спонтанно, без одержання енергії ззовні, на нейтрон не перетворюють­ся, оскільки таке перетворення суперечить законові збереження й перетворення енер­гії. Проте всередині атомних ядер, які міс­тять велику кількість протонів, надлишко­ва енергія їхньої кулонівської взаємодії мо­же бути використана для здійснення пере­творення протона на нейтрон і позитрон.

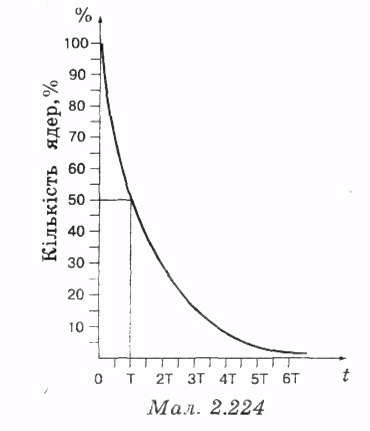
### Закон радіоактивного розпаду. Період піврозпаду

Радіоактивний розпад будь-якого типу від­бувається за одним законом — *законом радіоактивного розпаду.* Цей закон має та­кий математичний вираз:



де— кількість радіоактивних ядер у мо­мент часу— кількість ядер у мо­мент часу *t, T* — стала для даного ізотопу величина, яку називають *періодом півроз­паду.*

Як випливає із (61.3), за час *t,* що дорівнює періодові піврозпаду, кількість радіоактив­них ядер у результаті розпаду зменшується у два рази (мал. 2.224).



Закон радіоактивного розпаду у формулі (61.3) з високою точністю описує процес розпаду в тому разі, якщодосить знач­наі час спостереження сумірний зі значенням періоду піврозпаду.

## [§62. Ядерні реакції](" \l "Зміст)

*Ядерною реакцією* називають взаємодію частинки або атомного ядра з атомним яд­ром, яка спричинюється до перетворення цього ядра на нове ядро. Таке перетворен­ня може супроводжуватися випромінюван­ням вторинних частинок або гамма-квантів. Першу ядерну реакцію експери­ментально здійснив Резерфорд у 1919 році під час опромінення ядер атомів Нітрогену альфа-частинками. Під час зіткнення аль­фа-частинки (ядра атома Гелію) з яд­ром Нітрогену відбувалося перетворення ядра атома Нітрогенуна ядро атома

Оксигенуз викиданням одного протона — ядра атома Гідрогену



### Енергетичний вихід ядерної реакції

Якщо сума мас спокою частинок, що всту­пають у ядерну реакцію, більша за суму мас спокою частинок продуктів реакції, то така ядерна реакція відбувається з виді­ленням енергії. Енергію, яка виділяється під час ядерної реакції, називають *енерге­тичним виходом ядерної реакції.* Енерге­тичний вихід ядерної реакціїобчислю­ють за різницеюмас частинок, що всту­пають у реакцію, і продуктів реакції:



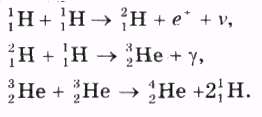
### Ядерна реакція синтезу. Реакція поділу атомних ядер

Розгляд кривої питомої енергії зв'язку (мал. 2.220) показує, що збільшення пито­мої енергії зв'язку можливе під час з'єднання легких ядер у важчі — *ядерні ре­акції синтезу,* або під час поділу найваж­чих ядер на два або три легші — *реакції поділу атомних ядер.*

Під час збільшення питомої енергії зв'язку ядер-продуктів їхня маса зменшується, от­же, такі ядерні реакції будуть відбуватися з виділенням енергії.

### Прискорювачі заряджених частинок

Здійснення ядерних реакцій під дією заря­джених частинок можливе тільки при ви­соких значеннях енергії частинок, оскіль­ки кулонівські сили відштовхування пере­шкоджають проникненню заряджених час­тинок в атомне ядро. У лабораторіях для здійснення ядерних реакцій заряджені час­тинки розганяють до високих енергій у *прискорювачах заряджених частинок.* У природі ядерні реакції відбуваються в надрах зірок і є основними джерелами їхньої енергії. У надрах Сонця температура досягає близько 15 мільйонів кельвінів. При такій температурі протони мають ви­сокі значення кінетичної енергії, але й цієї енергії для більшості протонів мало, щоб подолати кулонівський бар'єр та здійснити ядерну реакцію. Тому Сонце не вибухнуло, як гігантська воднева бомба. Проте зовсім невелика частка найшвидших протонів зрідка вступає в ядерні реакції, у резуль­таті яких із чотирьох протонів синте­зується одне ядро атома Гелію:



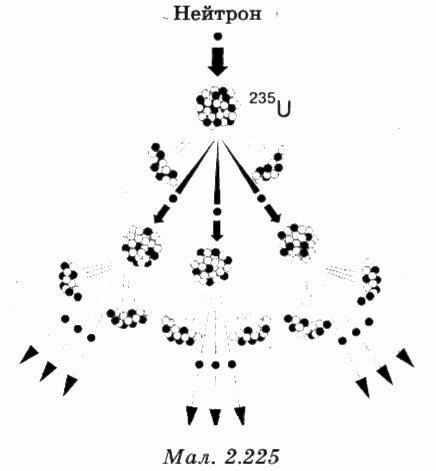
### Термоядерні реакції

Ядерні реакції, у яких високих значень енер­гії частинок для здійснення реакції дося­гають за рахунок високої температури речо­вини, *називають термоядерними реакціями.* Під час синтезу одного кілограма Гелію з атомів Гідрогену виділяється Сонце виділяє за секундуотже, в ньому за одну секунду здійснюється синтез приблизно Гелію з Гідрогену.

Обмеженість запасів нафти й газу на Землі змушує шукати альтернативні джерела енергії. Одним із можливих джерел є енер­гія термоядерного синтезу. Нині випробу­ють установки для здійснення термоядер­них реакцій синтезу Гелію з Гідрогену.

### Ланцюгова ядерна реакція

Особливий вид ядерних реакцій може бути здійснений під час поділу важких ядер. У 1939 році експериментально виявили, що під час попадання нейтрона в ядро атома нукліду Урану-235 відбувається поділ ядра на два чи три осколки, процес поділу су­проводжує випромінювання 6-9 нових ней­тронів і т.д. Процес може сам по собі про­довжуватися, захоплюючи все більшу кіль­кість нових ядер. Такий процес називають' *ланцюговою ядерною реакцією* (мал. 2.225).



Під час поділу одного ядра Урану виділен­ня енергії становить приблизно 200 МеВ. Під час поділу 1 кг ядер урану виділяється приблизноЦе в 2,5 мільйона

разів більше за виділення енергії під час спалювання 1 кг кам'яного вугілля. Ланцюгова реакція поділу ядра Урану не відбувається в природному урані, оскільки природний уран на 99,3% складається з нукліду Урану-238,і тільки на 0,7% з

нукліду Урану-235,  Здатність до

поділу під дією випромінених у процесі поділу нейтронів виявляють тільки ядра Урану-235.

### Критична маса

Перший шлях до здійснення ланцюгової реакції поділу — поділ ізотопів Урану. Проте й після поділу ізотопів ланцюгова реакція відбувається не в будь-якій кількості Урану-235. У малій кількості — більшість нейтронів покидають зразок, не натрапивши на своєму шляху на жодне ядро Урану, оскільки розміри ядер дуже малі та ймовірність попадання в кожне з них невелика. Ланцюгова реакція може розвиватися в тому разі, якщо кількість

урану більша за певне мінімальне значення — *критичну масу.* При цьому важлива й форма зразка.

### Атомна бомба. Атомний вибух

Енергію ланцюгових реакцій поділу ядер Урану й Плутонію використовують під час вибухів *атомних бомб,* у яких для здійснення *атомного вибуху* декілька час­тин бомби з Ураном-235 з масами, менши­ми за критичну, з'єднуються в одне тіло з масою, більшою за критичну масу.

### Ядерний реактор

Для використання ланцюгових ядерних ре­акцій у мирних цілях застосовують *ядерні реактори.* У реакторах ланцюгова реакція здійснюється в керованому режимі.

### Уповільнювач

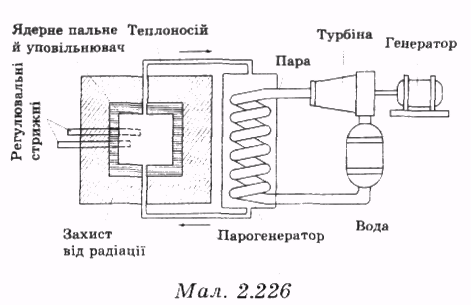
У ядерному реакторі використовують як ядерне пальне суміш нуклідів Урану-235 і Урану-238. Для того, щоб нейтрони, які звільнюються в процесі поділу ядер, не по­глиналися марно ядрами Урану-238, у ре­акторах застосовують *уповільнювачі.* Призначення уповільнювача полягає в зменшенні швидкості руху нейтронів до значень швидкості теплового руху. Уповільнювання нейтронів відбувається в результаті втрати енергії нейтронами під час зіткнень із ядрами атомів речовини-уповільнювача. Повільні нейтрони дуже слабко взаємодіють з ядрами нукліду Урану-238 та ефективно взаємодіють з яд­рами Урану-235. Як речовину-уповільнювач нейтронів у реакторах використовують воду або графіт.

### Регулювальні стрижні

Для керування ходом ланцюгової реакції в ядерному реакторі використовують *регулю­вальні стрижні,* що містять ізотопи Бору або Кадмію, які ефективно поглинають теп­лові нейтрони.

### Теплоносій. Атомна електростанція

Енергію, яка виділяється в процесі ланцю­гової реакції поділу, виводить з активної зони реактора *теплоносій.* На атомних електростанціях теплоносій в активній зоні нагрівається до високої температури, потім передає енергію воді, перетворюючи її на пару. Пара пускає в хід парову турбіну, турбіна обертає ротор електрогенератора (мал. 2.226).



Нині атомні електростанції виробляють значну частку електроенергії, яку спожи­ває людство. Проте програми дальшого роз­витку ядерної енергетики в багатьох країнах світу переглядають у напрямі ско­рочення будівництва нових станцій та по­ступового закриття діючих станцій. Основ­ною причиною зміни планів розвитку ядер­ної енергетики стали наслідки аварій на де­яких атомних станціях. Найбільшої шкоди людям і довкіллю завдала аварія на Чорно­бильській АЕС у 1986 році.

## [§63. Властивості йонізуючих випромінювань](" \l "Зміст)

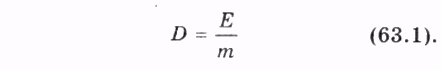
### Йонізуючі випромінювання

Усі частинки й гамма-кванти, що випромі­нюються в процесі радіоактивних перетво­рень атомних ядер і в процесі здійснення ядерних реакцій, мають великі значення енергії, приблизно мільйон електронвольт. Заряджені частинки й кванти електромаг­нітного випромінювання з такими енер­гіями мають властивість йонізувати й збу­джувати атоми речовини, які трапляються на їхньому шляху. Тому всі види радіоак­тивних випромінювань і випромінювань, що супроводжують ядерні реакції, назива­ють *йонізутчими випромінюваннями.* Взаємодія різних видів йонізуючих випро­мінювань з речовиною, коли енергія ви­промінювань однакова, має суттєві відмін­ності. Альфа-частинки та інші атомні ядра під час руху в речовині йонізують або збуджу­ють майже кожен атом на своєму шляху. Тому вони витрачають усю енергію на ко­роткому шляху. Довжина пробігу альфа-частинок у повітрі, коли атмосферний тиск нормальний, становить декілька санти­метрів, у рідинах або твердих тілах — соті частки міліметра.

Бета-частинки значно менш ефективно взаємодіють з атомами речовини. Тому їхній пробіг у повітрі може досягати декілька метрів, а в рідинах і твердих тілах — декілька міліметрів. Гамма-кванти мають найбільшу проникну здатність. Для захисту від гамма-ви­промінювання необхідні захисні стіни або оболонки завтовшки декілька десятків сан­тиметрів або навіть декілька метрів. Нейтрони, які не мають електричного заря­ду, безпосередньо не йонізують і не збуджу­ють атомів. Проте в результаті взаємодії нейтронів з атомними ядрами виникають швидкі заряджені частинки й гамма-кван­ти, які є йонізуючими частинками.

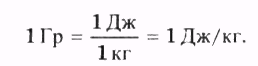
### Поглинута доза випромінювання

Під час перебування людини в зоні дії йонізуючого випромінювання або під час потрапляння радіоактивних ізотопів усере­дину організму людини відбувається йонізація й збудження різноманітних атомів і молекул речовини, що входять до складу клітин організму. Хімічні власти­вості йонів і збуджених молекул суттєво відрізняються від властивостей нейтраль­них і незбуджених молекул. У клітинах ор­ганізму вони вступають у нові хімічні реак­ції й утворюють нові хімічні речовини, які порушують нормальне функціонування ор­ганізму. Мірою дії йонізуючих випроміню­вань на речовину є *поглинута доза вип­ромінювання D,* що дорівнює відношенню енергії *Е,* переданої йонізуючим випроміню­ванням речовині, до маси *т* речовини:



### Грей

*Одиницю вимірювання поглинутої дози в Міжнародній системі одиниць називають грей (Гр).* 1 грей дорівнює поглинутій дозі випромінювання, під час якої опроміненій ре­човині масою 1 кілограм передається енер­гія йонізуючого випромінювання 1 джоуль:



### Потужність дози випромінювання

Відношення поглинутої дози випроміню­вання *D* до часу *t* опромінення називають *потужністю дози випромінювання.* Одини­ця потужності дози випромінювання грей за секунду (Гр/с).

### Відносна біологічна ефективність

Різні види випромінювання, коли погли­нута доза випромінювання однакова, зумовлюють різний біологічний вплив. Різницю біологічних впливів різних видів випромінювань характеризують коефіцієн­том *k відносної біологічної ефективності* (ВБЕ).

Відносну біологічну ефективність рент­генівського або гамма-випромінювання бе­руть за одиницю, *k* = 1. Найбільше значен­ня коефіцієнта *k,* що дорівнює *k =* 20, має альфа-випромінювання. Це означає, якщо поглинута доза 1 Гр, то альфа-випроміню­вання справляє біологічний вплив, який дорівнює дії 20 Гр гамма-випромінювання.

### Еквівалентна доза

Величину, яка дорівнює добуткові погли­нутої дози *D* на коефіцієнт *k* відносної біологічної ефективності, називають *еквіва­лентною дозою Н:*



### Зіверт

*Одиницю еквівалентної дози називають зіверт (Зв).* 1 зіверт дорівнює еквіва­лентній дозі, одержаній при поглинутій дозі 1 грей від випромінювання з відносною біологічною ефективністю, яка дорівнює одиниці.

### Рентген

Досліджуючи рентгенівське й гамма-ви­промінювання, звичайно вимірюють кіль­кість йонів, створюваних йонізуючою радіацією в повітрі. Йонізуючий вплив на повітря вимірюють у *рентгенах* (Р).

Якщо доза 1 рентген, у 1 кубічному санти­метрі повітря утворюється близько 2-Ю9 пар йонів.

Дозі в 1 рентген гамма-випромінювання відповідає еквівалентна доза 8,8 мЗв.

### Променева хвороба

Якщо еквівалентна доза опромінення всього організму людини 3-5 Зв, близько 50 % оп­ромінених помирає від *променевої хвороби* протягом 1-2 місяців після опромінення. Основною причиною смерті людей під час променевої хвороби є враження кісткового мозку, який виробляє лейкоцити крові. Різке зниження кількості лейкоцитів у крові робить організм людини беззахисним проти будь-яких хвороботворних мікро­організмів.

Якщо еквівалентна доза опромінення менша за 0,5 Зв, ознак променевої хвороби не вияв­ляють, проте тривалі спостереження за ста­ном здоров'я людей, які одержали невеликі дози опромінення, показали, що будь-які до­зи опромінення збільшують імовірність та­ких захворювань, як лейкоз, ракові захворю­вання різних органів. Опромінення йонізуючою радіацією збільшує ймовірність генетич­них дефектів у дітей опромінених батьків.

### Природний фон опромінення

Загальне правило роботи з будь-якими дже­релами йонізуючої радіації — зменшення рівня радіації до можливого мінімального значення. Проте зниження рівня опро­мінення може відбуватися тільки до певної межі — *природного фону опромінення.* Природний фон опромінення створюють: гамма-випромінювання природних радіоак­тивних ізотопів, які є в земній корі та в земній атмосфері; альфа- і бетавипроміню-вання природних радіоактивних ізотопів, що є в організмі людини; космічне ви­промінювання, яке приходить на Землю із міжпланетного простору. Загальна еквівалентна доза від природного радіаційного фону становить близько 2 мЗв на рік. Від різних штучних джерел йонізу­ючої радіації в промислово розвинених країнах людина в середньому одержує на рік еквівалентну дозу близько 1 мЗв. Природний рівень радіації в різних місцях на Землі відрізняється в кілька разів.

### Гранично допустима доза

Дослідження впливу змін рівня природного радіаційного фону на здоров'я і тривалість життя не виявили ніяких негативних впливів йонізуючої радіації на рівні природ­ного радіаційного фону. На цій основі вста­новлено *гранично допустиму дозу оп­ромінення* для людей, чия професійна діяльність пов'язана з використанням дже­рел йонізуючої радіації. Ця доза дорівнює 50 мЗв за рік. Для населення встановлено допустиму еквівалентну дозу 5 мЗв за рік.

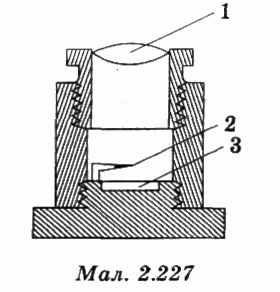
## [§64. Методи реєстрації йонізуючих випромінювань](" \l "Зміст)

### Фотографічні емульсії

Йонізуючі випромінювання можна реєстру­вати за допомогою різних методів. Анрі Беккерель виявив явище радіоактивності за здатністю впливу йонізуючої радіації на *фо­тографічні емульсії.* Під час руху у фото­емульсії швидкі заряджені частинки в ре­зультаті йонізації атомів створюють прихо­вані зображення сліду руху. Під час прояв­лення фотоемульсії цей слід стає видимим.

### Сцинтиляційний метод. Спінтарископ

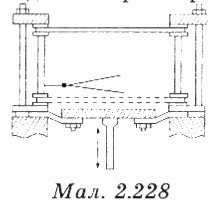
Резерфорд, досліджуючи розсіювання аль­фа-частинок, використав *сцинтиляційний метод.* У сцинтиляційному методі для реєстрації використовують кристали, здат­ні випромінювати світло під дією швидких заряджених частинок. Спалахи світла, що виникають під час ударів альфа-частинок, випромінюваних радіоактивним джере­лом 2, Резерфорд спостерігав у кристалах сірчистого цинку 3 оком через лупу 1 в приладі, який називають *спінтарископом* (мал. 2.227).



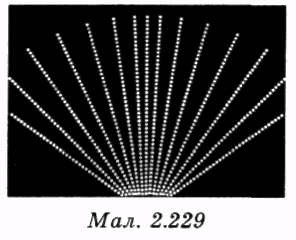
У сучасних сцинтиляційних лічильниках спалахи світла в кристалах реєструють фо­тоелектронні прилади, які використовують явище фотоефекту.

### Камера Вільсона

Видимі неозброєним оком сліди руху заря­джених частинок у повітрі можна спос­терігати за допомогою *камери Вільсона.* Ка­мера Вільсона являє собою циліндричну ка­меру зі скляною кришкою, з'єднану з при­ладом, здатним швидко знижувати тиск повітря в камері. Усередині камери є повітря з насиченою водяною парою. Під час швидкого руху поршня вниз (мал. 2.228) відбуваєтьсяадіабатне розширення повітря.

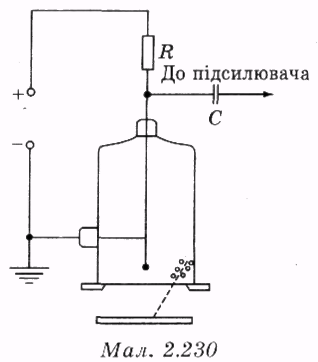


Адіабатне розширення газу супрово­джується зниженням його температури. Під час зниження температури водяна пара в камері стає перенасиченою й починається її конденсація, у камері утворюється ту­ман. Утворення крапель води із перенаси­ченої пари легше відбувається навколо якого-небудь центру конденсації. Центром конденсації можуть бути йони. Під час розміщення в камері Вільсона радіоактив­ного джерела вздовж шляху руху зарядже­ної частинки в результаті йонізації моле­кул у повітрі утворюється слід із позитив­них і негативних йонів. Під час швидкого збільшення об'єму камери перенасичена водяна пара конденсується на йонах уздовж траєкторії руху частинки і її слід, що складається з крапельок туману, стає видимим неозброєним оком (мал. 2.229).



### Газорозрядний лічильник Гейгера — Мюллера

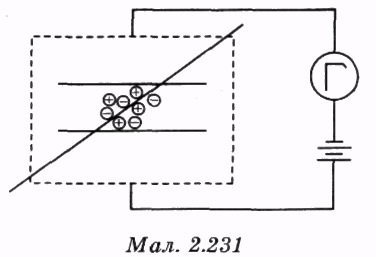
Реєстрація всіх видів йонізуючих ви­промінювань можлива за допомогою *газо­розрядних лічильників Гейгера* — *Мюллера.* У газорозрядному лічильнику є катод у вигляді циліндра й анод у вигляді тонкого дроту по осі циліндра (мал. 2.230).



Простір між анодом і катодом заповнюють спеціальною сумішшю газів з тиском близько 0,1 атмосферного. Між катодом і анодом прикладають напругу трохи меншу, ніж необхідно для початку самостійного розряду в газі. Якщо в лічильник проникає частинка та йонізує газ у просторі між ка­тодом і анодом, то під дією електричного поля звільнені електрони рухаються до анода, позитивні йони — до катода. Набли­жаючись до анода, електрони потрапляють в область електричного поля з високою напруженістю й починають процес йоніза­ції електронним ударом. У результаті цьо­го процесу утворюються лавини з елект­ронів і позитивних йонів. Цей процес завер­шується за мільйонні частки секунди, у ре­зультаті на проходження через робочий об'єм однієї йонізуючої частинки газороз­рядний лічильник відповідає коротко­часним імпульсом електричного струму, який можна легко реєструвати.

### Йонізаційна камера

Для вимірювання доз випромінювання ви­користовують *йонізаційні камери.* У йонізаційній камері між двома електродами є повітря, що має атмосферний тиск. Між електродами подається постійна напруга (мал. 2.231).



За відсутності йонізуючої радіації сила струму в колі йонізуючої камери дорівнює нулю, оскільки повітря є гарним ізолято­ром. Якщо йонізаційна камера зазнає оп­ромінення рентгенівськими або гамма-про­менями, у повітрі між її електродами утво­рюються позитивні й негативні йони. У ре­зультаті руху цих йонів у колі камери ви­никає електричний струм. Сила струму в йонізаційній камері пропорційна до кіль­кості йонів, які утворюються під дією йонізуючої радіації за одну секунду, і, от­же, пропорційна до потужності дози вип­ромінювання.

## [§65. Елементарні частинки](" \l "Зміст)

Після відкриття 1897 року електрона як складової частини атомів будь-якої речови­ни і явища радіоактивності стало зро­зуміло, що атоми мають складну внутріш­ню будову і не є найпростішими неподіль­ними й незмінними частинками. Тому ви­никла проблема знаходження справді най­простіших частинок, з яких побудовані всі атоми, усе, що є у Всесвіті. Такі частинки назвали *елементарними частинками.*

### Електрон. Елементарний заряд

Першою знайденою елементарною частин­кою був електрон. Його маса *тг* дорівнює:

що приблизнов 2000 разів менша за масу атома Гідрогену, а негативний електричний заряд едорівнює:

Заряд електронаназивають *елементарним зарядом.*

### Протон

Другою відкритою елементарною частин­кою був *протон* — ядро атома найменшого нукліду Гідрогену. Протон має позитивний елементарний заряд *+е,* його маса дорівнює:  або приблизно 1836 мас електрона.

### Нейтрон

1932 року відкрили третю елементарну час­тинку *нейтрон,* що не має електричного за­ряду й має масу приблизно 1839 мас елек­трона.

Деякий час здавалося, що цих трьох еле­ментарних частинок вистачить для того, щоб пояснити будову атомів і всіх властиво­стей речовини. Але для пояснення існуван­ня ядерних сил взаємодії між нуклонами в ядрі (протонами і нейтронами) треба було знайти матеріальні носії ядерної взаємодії. Взаємодію електричних зарядів у кван­товій фізиці пояснюють тим, що електрич­но заряджені частинки випромінюють і по­глинають особливого виду кванти електро­магнітного випромінювання — віртуальні фотони. Обмін віртуальними фотонами, які в принципі не можна виявити експеримен­тально, забезпечує існування сил кулонівської взаємодії.

### Мезони

Для пояснення існування ядерних сил взаємодії між нуклонами квантова теорія вимагала існування особливих елементар­них частинок з масою, більшою за масу електрона, але меншою за масу протона. Ці передбачені квантовою теорією частинки назвали *мезонами.*

### Пі-мезон

Мезони виявили експериментально. Їх роз­глядають як цілий ряд. Усі вони виявили­ся короткоіснуючими нестабільними час­тинками, які існують у вільному стані міліардні частки секунди. Наприклад, за­ряджений *пі-мезон* (або *піон),* має масу спо­кою 273 електронних маси й час існування 

### Гіперон

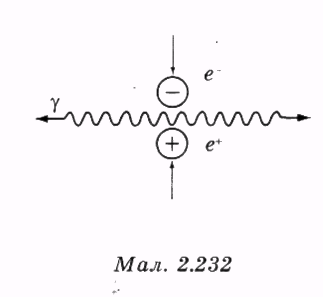
Далі під час досліджень на прискорювачах заряджених частинок виявили частинки з масами, які більші за масу протона. Ці ча­стинки назвали *гіперонами.*

### Античастинки. Позитрон

1928 року англійський фізик Поль Дірак теоретично передбачив можливість існуван­ня *античастинок.* Антиелектрон повинен мати таку саму масу, як електрон, але ма­ти позитивний заряд. Цю гіпотетичну час­тинку назвали позитроном. 1932 року пози­трон виявили експериментально. Пізніше встановили, що кожна елементарна частин­ка має свою античастинку. Експеримен­тально виявили антипротон і антинейтрон.

### Анігіляція

Античастинки виявилися здатними до особливих видів взаємних перетворень:  
будь-які дві античастинки, зустрічаючись, *анігілюють,* тобто зникають, перетворюю­чись на кванти електромагнітного ви­ промінювання (мал. 2.232).



### Народження пари електрон-позитрон

Можливий і зворотний процес: квант елек­тромагнітного випромінювання може пере­творитися на пару частинка-античастинка, якщо його енергія більша за енергію спо­кою цих двох частинок. Наприклад, для *на­родження пари електрон-позитрон* енергія гамма-кванта повинна перевищувати зна­чення подвоєної енергії спокою електрона:



Досліди показали, що гамма-кванти з енергією більшою за **1 МеВ** під час прохо­дження через речовину справді можуть по­роджувати пари електрон-позитрон (мал. 2.233).

Кількість відкритих досі елементарних час­тинок обчислюють сотнями, більшість із них виявилися нестабільними. Тому ви­никли проблеми класифікації елементар­них частинок, з'ясування їхньої внутрішньої структури, пошуку «справжніх» еле­ментарних частинок.



### Фундаментальні взаємодії

Елементарні частинки поділяють на групи за їхньою здатністю до різних видів *фунда­ментальних взаємодій.*

У природі виявлено чотири типи фунда­ментальних взаємодій, або чотири типи сил. Решта сил, або взаємодій, зводиться до фундаментальних взаємодій, є їхніми виявами. Фундаментальними є гравіта­ційна, електромагнітна, слабка і сильна взаємодії.

### Гравітаційна взаємодія

У *гравітаційну взаємодію,* яку описує за­кон всесвітнього тяжіння, вступають між собою всі без винятку елементарні частин­ки. Таким чином, сили гравітаційної взає­модії є найуніверсальнішими силами в при­роді, які діють між будь-якими тілами у Всесвіті. Сили гравітаційної взаємодії відіграють основну роль у взаємодіях макроскопічних тіл, що перебувають на ве­ликих відстанях одне від одного. Вони ке­рують рухом планет, зірок і галактик. Але на малих відстанях між елементарними частинками значно більшу роль відіграють сили трьох інших видів фундаментальних взаємодій, а дія гравітаційних сил звичай­но надто мала через їхню малу масу.

### Електромагнітна взаємодія

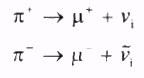
В *електромагнітній взаємодії* беруть участь усі частинки, які мають електричні заряди. Електромагнітні сили зумовлюють будову атомів і різні типи їхніх зв'язків у молекулах, рідинах і кристалах. Електро­магнітні сили відштовхування між одно­йменно зарядженими частинами атомних ядер є джерелом енергії радіоактивного альфа-розпаду, енергії ланцюгових реакцій поділу важких ядер.

### Сильна взаємодія

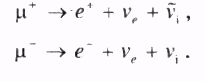
*Сильною взаємодією* називають взаємодію між протонами, нейтронами та іншими важкими частинками, яка виявляється на дуже малих відстанях приблизно Прикладом сильної взаємодії є взаємодія протонів і нейтронів в атомних ядрах, яку називають також *взаємодією ядерними си­лами.*

### Слабка взаємодія

У *слабкій взаємодії* беруть участь будь-які елементарні частинки, крім фотонів. Сили слабкої взаємодії виявляють свою дію лише на відстанях приблизно Прикладом вияву дії сил слабкої взаємодії є процеси бета-розпаду з перетвореннями нейтронів на протони і протонів на нейтро­ни, розпаду пі-мезонів і мю-мезонів. Заря­джений пі-мезон розпадається на мю-мезон і нейтрино:



Мю-мезон існує у вільному стані близько двох мікросекунд і у свою чергу розпа­дається на електрон і два нейтрино:



### Лептони. Адрони

Частинки, здатні до гравітаційної, електро­магнітної і слабкої взаємодій, але не здатні до сильних взаємодій, називають *лептона­ми.* Частинки, які виявляють здатність до всіх чотирьох фундаментальних взаємодій, називають *адронами.*

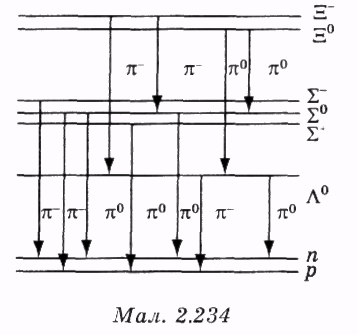
### Спін

Кожна елементарна частинка, окрім маси, електричного заряду й часу існування, ха­рактеризується ще й моментом кількості руху, або *спіном.* Момент кількості руху характеризує обертальний рух тіла. Тіло з масою *т,* яке рухається по колу радіуса rзі швидкістю *v* має момент кількості руху, що дорівнює добуткові *тvr.* Дослідження властивостей елементарних частинок показало, що кожна частинка характеризується моментом кількості руху — спіном, тобто має якийсь внутрішній обертальний рух. Спін у всіх частинок одного виду однако­вий. Звичайно спіни частинок вимірюють в одиницях сталої Планка:



У цих одиницях у більшості елементарних частинок спін дорівнює 0,1/2 або 1. З усіх виявлених на сьогодні елементарних частинок необмежено довго без взаємодії з іншими частинками існують тільки фотон, три види нейтрино, електрон і протон. Решта частинок за дуже короткий час спонтанно розпадається до перетворення на стабільні частинки.

Це дозволяє розглядати всі частинки з ма­сою, більшою за масу протона, як збуджені стани протона. Як і атом, протон, одержав­ши енергію від взаємодіючих з ним части­нок, може переходити з основного стану в один із можливих стаціонарних збуджених квантових станів. Під час переходу із збу­дженого стану в основний випромінюються пі-мезони так само, як кванти електро­магнітного випромінювання (мал. 2.234).

**•**

Можливість існування в протона збудже­них станів вимагає існування в нього якоїсь внутрішньої структури та існування «справжніх» елементарних частинок, з яких побудовані протони, нейтрони та інші адрони.

На можливість існування таких частинок указують досліди з розсіювання електронів високих енергій на протонах і нейтронах. Ці досліди дали результати, схожі на ре­зультати дослідів Резерфорда з вивчення розсіювання альфа-частинок. Більшість швидких електронів проходить крізь про­тони й нейтрони так, ніби ці частинки пусті, і лише деякі з електронів відчувають розсіювання, начебто натрапляючи на заря­джені частинки дуже малих розмірів.

### Кварки

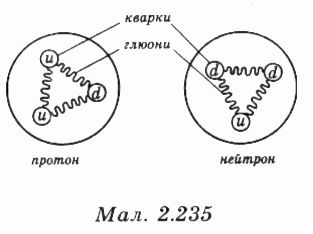
Передбачені теорією частинки, з яких по­будовані адрони, назвали *кварками.* Для пояснення властивостей адронів потрібно було передбачити існування лише шести кварків і такої ж самої кількості анти-кварків. Щоправда, кожний кварк і анти-кварк може мати ще один з трьох видів особливого заряду, який називають *кольо­ром* кварка. Таким чином, загальна кількість різних кварків та антикварків дорівнює 36.

Кварки позначають літерами латинської абетки *и, d,* s, *с, t, b.*

Передбачені теорією властивості кварків з певного погляду виявилися зовсім незвич­ними: електричні заряди кварків *и, с, t* по­винні дорівнювати +2/Зе позитивного еле­ментарного заряду, а заряди кварків *d,s,b* -1/Зе негативного елементарного заряду.

### Глюони

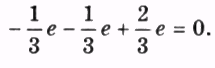
Досі кварки й антикварки у вільному стані не спостерігали. Проте сумнівів у реаль­ності їхнього існування практично не зали­шилося. Крім того, проводяться пошуки наступних за кварками «справжніх», еле­ментарних частинок *глюонів,* які по­винні бути носіями сил взаємодії між квар­ками.



Схему будови протона й нейтрона із кварків з глюонами, які здійснюють зв'язок між кварками, подано на мал. 2.235. Схема по­казує, що протон складається з двох u-кварків і одного d-кварка, нейтрон скла­дається з двох d-кварків та одного u-квар-ка. Оскільки заряд u-кварка дорівнює +2/Зе, а d-кварка -1/Зє, сумарний заряд протона дорівнює:



а заряд нейтрона дорівнює:



З'ясування питання, з яких частинок складається яка частинка й на які вона може перетворитися, не дає повної картини складної природи елементарних частинок. Так само, як світло виявляє і корпуску­лярні, і хвильові властивості, у кожної час­тинки, крім корпускулярних властивостей, . виявляють і хвильові властивості.

### Хвилі де Бройля

Гіпотезу про існування хвильових властивос­тей у будь-яких матеріальних об'єктів висло­вив 1924 року французький фізик Луї де Бройль. Згідно з гіпотезою де Бройля кожна частинка з масою *т,* що рухається зі швидкістю *v,* повинна мати довжину хвилі яку називають довжиною хвилі де Бройля:



де *h -* стала Планка.

Гіпотеза де Бройля повністю підтверджена в експериментах з різними типами части­нок. Усі частинки й навіть атоми виявля­ють здатність до інтерференції, дифракції та поляризації, причому вимірювана під час дослідів довжина хвилі частинки збіга­ється з довжиною хвилі де Бройля. Таким чином, поділ матеріальних об'єктів на час­тинки й хвилі є дуже умовний.