



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА
І АРХІТЕКТУРИ

Бурдейна Н. Б.

Глива В. А.

Краснянський Г. Ю.

Петруньок Т. Б.

Бірук Я. І.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ФІЗИКИ

Молекулярна фізика і термодинаміка
Коливальні та хвильові процеси. Оптика
Квантова фізика. Фізика атома і ядра

№2

Студент: _____

Викладач: _____

Київ 2024

Затверджено кафедрою фізики Київського національного університету будівництва і архітектури, протокол №1 від 25 березня 2024 року

Бурдейна Н. Б., Глива В. А., Краснянський Г. Ю., Петруньок Т. Б., Бірук Я. І. Конспект лекцій з фізики № 2. Молекулярна фізика і термодинаміка. Коливальні та хвильові процеси. Оптика. Квантова фізика. Фізика атома і ядра / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2024. – 188 с.

Навчально-методичний посібник розроблений з метою активізації навчально-пізнавальної діяльності студентів, оптимізації та інтенсифікації навчально-виховного процесу, формування у студентів вмінь, навичок та прагнень до самостійної роботи з інформацією, формування потреб творчої самореалізації у професійній галузі.

Посібник призначений для студентів спеціальностей: 015 «Професійна освіта», 101 «Екологія», 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 192 «Будівництво та цивільна інженерія» для всіх форм організації навчального процесу при вивченні фізики.

Видано в авторській редакції

© Н. Б. Бурдейна,
В. А. Глива,
Г. Ю. Краснянський,
Т. Б. Петруньок,
Я. І. Бірук,
2024

ЗМІСТ

Передмова	4
РОЗДІЛ III	
МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА	6
Лекція № 1. Молекулярно-кінетична теорія речовини.....	6
Лекція № 2. Елементи статистичної фізики.	13
Лекція № 3. Основи термодинаміки. Перше начало термодинаміки... ..	22
Лекція № 4. Друге і третє начало термодинаміки	32
Лекція № 5. Реальні гази. Рідини. Тверді тіла.	40
РОЗДІЛ IV	
КОЛИВАЛЬНІ ТА ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ. ОПТИКА	58
Лекція № 6. Механічні та електромагнітні коливальні процеси.....	58
Лекція № 7. Диференціальні рівняння коливальних процесів.	66
Лекція № 8. Хвильові процеси	75
Лекція № 9. Електромагнітні хвилі. Геометрична оптика	86
Лекція № 10. Хвильова оптика	96
Лекція № 11. Квантова оптика	111
РОЗДІЛ V	
КВАНТОВА ФІЗИКА. ФІЗИКА АТОМА І ЯДРА	122
Лекція № 12. Хвильові властивості матерії	122
Лекція № 13. Основи теорії твердого тіла	131
Лекція № 14. Будова атома	139
Лекція № 15. Ядерна фізика.	149
Сучасна фізична картина світу в історичному контексті	165
Витяг з навчального плану 2023-2024 н.р.	181
Перелік тем практичних занять	182
Перелік тем лабораторних робіт.....	183
Приклади тем рефератів	184
Перелік рекомендованих підручників.....	185
Шкала оцінювання: національна та ECTS.....	186

ПЕРЕДМОВА

Серед різноманітних форм організації навчальної роботи у вищому навчальному закладі важливе місце належить лекції. Навчальна лекція (від лат. *lectio* – читання) – логічно завершений, науково-обґрунтований, послідовний і систематичний виклад певного наукового або науково-методичного питання, теми чи розділу навчального предмета, ілюстрований за необхідності наочною демонстрацією дослідів. Вона тісно пов'язана з усіма іншими формами організації навчально-виховної роботи – практичними, індивідуальними та лабораторними заняттями.

Щоб якомога ефективніше використати відведений на лекційні заняття з фізики час у будівельних вищих навчальних закладах і не втратити методичний, дидактичний та науковий зміст лекцій, ми пропонуємо ввести лекційні зошити. Ідея розробки такого зошиту полягає у тому, що він представляє собою основу, на якій будується лекція. У лекційному зошиті кожної лекції є така друкована інформація:

- тема лекції;
- загальний перелік питань, які висвітлюються під час даної лекції;
- порядковий номер і назва кожного питання;
- ключові частини означень або формулювань (наприклад, «Хвильовим процесом називається ...», «Суцільним вважають середовище ...»); назви законів чи формул (формула швидкості поширення хвиль у рідинах: ..., ... – формула Лапласа);
- виведення формул, на які неефективно чи недоцільно витратити лекційний час;
- координатні площини чи вісі (бажано проградуєвані), на яких впродовж лекції студент будуватиме графіки;
- заготовки під рисунки та їх пояснення (наприклад, при поясненні механізму виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі студенти багато часу гають на малювання п'яти однакових коливальних контурів і через брак часу не встигають грамотно виконати рисунки, а тим більше записати пояснення);
- фотографії, схеми дослідів або демонстрацій;
- цікаві приклади та факти;
- приклади застосування фізичних знань у будівельній галузі;
- чітке формулювання завдань, які студент мусить виконати самостійно або питань для самостійного опрацювання;

- список рекомендованої літератури.

Студенту, який має такий дидактичний матеріал, простіше зрозуміти структуру розділу і теми взагалі та лекції зокрема. Крім того студент може самостійно опрацювати необхідну частину теоретичного матеріалу, навіть якщо пропустить лекційне заняття. Перевіряючи за лекційним зошитом відпрацьоване заняття, викладач буде мати можливість об'єктивно оцінити ступінь самостійності та якість опрацювання навчальної інформації.

Запропонований нами лекційний зошит – це основа, яка сама по собі не виконує жодної навчальної функції. Але використання його як допоміжного засобу під час лекційних занять забезпечує такі можливості:

- економія лекційного часу, що дозволяє вносити у лекцію додаткові пояснення чи наводити більше прикладів, фактів тощо;
- активізація розумової діяльності студентів, що спонукає їх до спільного пошуку істини, міркувань, дискусій;
- стимулювання внутрішньої мотивації при вивченні фізики;
- формування у студентів вмінь і навичок самостійного опрацювання навчального матеріалу;
- перетворення стенографічного конспекту на логічно викладену та певним чином структуровану навчальну інформацію.

Аудиторний час необхідно використовувати максимально ефективно. Витратити цей час на суто механічну роботу – це недозволена розкіш, особливо в умовах його значної обмеженості. На сьогоднішній день виникла необхідність створення допоміжних друкованих засобів навчання, які забезпечать звільнення студента від механічної праці і одночасно стимулюватимуть ефективну розумову діяльність.

РОЗДІЛ III. МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА І ТЕРМОДИНАМІКА

Лекція 1. Молекулярно-кінетична теорія речовини

1. Атомно-молекулярна будова речовини
2. Статистичний та термодинамічний методи дослідження
3. Рівняння стану ідеального газу
4. Кінетична енергія молекул, її розподіл по ступенях свободи
5. Абсолютна температура

1. Атомно-молекулярна будова речовини

Молекулярна фізика – _____

Теорію, яка пояснює _____,

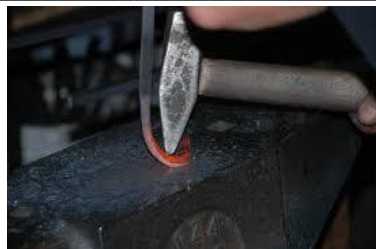
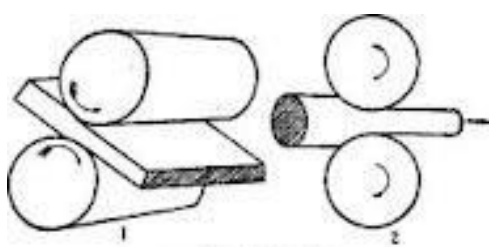
називають *молекулярно-кінетичною теорією*.

Значний внесок у створення МКТ зробили: Лавуаз'є, Ломоносов, Больцман (друга половина XIX ст).

Молекулярно-кінетична теорія (МКТ) речовини базується на чотирьох *положеннях*, що підтверджуються дослідами:

1) _____

підтвердженням дискретності є _____

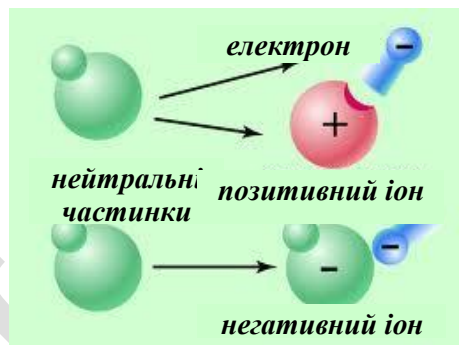


Молекула – _____



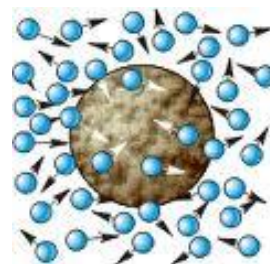
Атом (з давньогрецької ἄτομος – неподільний) – _____

Іон (з грец. ἰόν — «той, що йде») — _____



У природі є _____ хімічні елементи, разом із штучними наразі налічують _____ елементів (у 2010 році синтезовано Uus Унунсептій).

2) _____



Роберт Броун

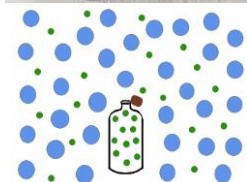


підтвердженням є _____

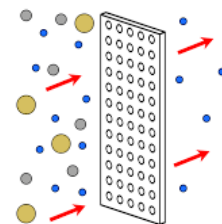
Під час нагрівання речовини швидкість теплового руху і кінетична енергія його частинок збільшуються, а під час охолодження зменшуються. Ступінь нагрятості тіла характеризує його температура, яка є мірою середньої кінетичної енергії хаотичного поступального руху молекул цього тіла.

Р. Броун 1827 року відкрив хаотичний рух спори плауна у воді. Рух завислих частинок відбувався внаслідок руху молекул. Такого ж руху зазнають частинки фарби у воді, пилинки у промені світла тощо. Молекули передають частинкам не скомпенсований імпульс, а отже, чинять на частинки тиск, тому частинка здійснює безладний рух в об'ємі рідини чи газу.

Прикладом дифузії в газах є поширення запаху, у рідинах – переміщування рідин різної густини. Молекули золота і свинцю внаслідок дифузії протягом 5 років утворюють шар завтовшки 1 см. З підвищенням



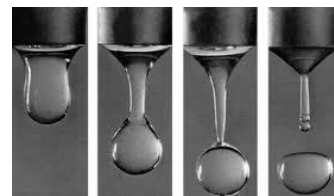
температури швидкість дифузії зростає. У природі дифузія сприяє живленню рослин з ґрунту. Без дифузії життя було б неможливим, адже насичення крові киснем і відведення шкідливих речовин – теж дифузія.



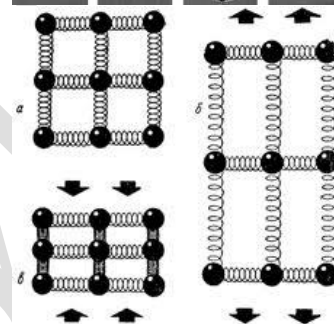
Дифузію, що відбувається через напівпроникні перегородки, називають *осмосом*.

3) _____

 підтвердженням є _____
 _____;

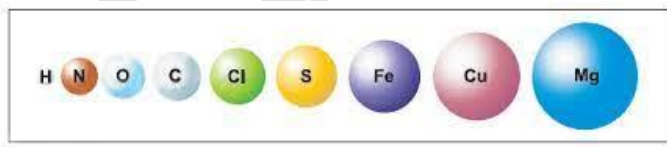


У рівноважному стані молекули або атоми речовини знаходяться на відстанях, на яких сили відштовхування і притягання переважно скомпенсовані. Якщо зовнішні сили прагнуть віддалити молекули, то переважаючими стають сили притягання (протидія розтягові тіл). Якщо, навпаки, зовнішні сили прагнуть наблизити молекули, то переважаючими стають сили відштовхування (протидія стисненню).



4) _____

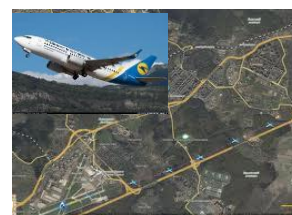
 _____.



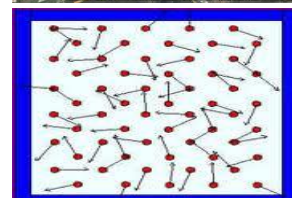
Підтвердженням цього є _____
 _____.

2. Статистичний та термодинамічний методи дослідження

Механічний або **динамічний метод**, що широко використовують у механіці, для дослідження поведінки систем з великою кількістю частинок _____



Оскільки неможливо визначити положення і швидкості усіх молекул у певний момент часу, а також розрахувати положення і швидкості молекул у попередній або наступний моменти часу за відомими з механіки законами їх руху та взаємодії, через малі розміри молекул і їх значну кількість у довільному макроскопічному тілі.



Для дослідження макроскопічних процесів, що протікають у тілах, які складаються з великої кількості структурних елементів, застосовують два якісно відмінні **методи**:

- 1) статистичний (молекулярно-кінетичний),
- 2) термодинамічний.

Молекулярно-кінетична теорія має на меті пояснити властивості тіл,

що безпосередньо спостерігаються на досліді (тиск, температуру тощо), як сумарний ефект дії молекул. Властивості величезного скупчення молекул, що утворюють тіло, підлягають особливим статистичним закономірностям і їх можна вивчити за допомогою **статистичного методу**, який ґрунтується на тому, що властивості макроскопічної системи визначаються властивостями частинок системи, особливостями їх руху і усередненими значеннями динамічних характеристик цих частинок (швидкості, енергії тощо).

Статистичний (молекулярно-кінетичний) метод _____

Термодинамічний метод _____

3. Рівняння стану ідеального газу

Термодинамічною системою називають _____

Рівнянням стану термодинамічної системи називають _____

=

Для пояснення властивостей речовини в газоподібному стані та спрощення встановлення законів МКТ газів вводять поняття ідеального газу.

Ідеальний газ – _____

У природі такого газу не існує, але близькими за властивостями можна вважати реальні гази за нормальних умов, а також при низьких тисках і високих температурах.

Основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газу (рівняння Клаузіуса) пов'язує мікропараметри (m_0 , n , \bar{v}) і макропараметри (p , V , T) ідеального газу:

де m_0 – маса молекули, n – концентрація молекул, \bar{v} – середня квадратична швидкість руху молекул, $\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\bar{v}^2}$.

Якщо середня кінетична енергія поступального руху молекули $\bar{E}_k = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$, то основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) можна записати у вигляді:

Оскільки для одноатомних молекул $E_k = \frac{3}{2} kT$, основне рівняння МКТ, яке виражає залежність тиску газу (p) від концентрації молекул (n) і температури (T):

Параметри p , V і T для ідеального газу поєднані співвідношенням, яке дозволяє описати перехід системи з одного стану в інший:

– **рівняння Менделєєва-Клапейрона**,

де p – _____,
 V – _____,
 T – _____,
 m – _____,
 μ – _____,
 R – _____
 $\left(R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right)$.

**Бенуа Поль
Еміль Клапейрон**



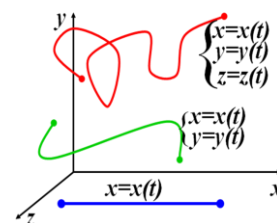
**Дмитро
Іванович**



4. Кінетична енергія молекул, її розподіл по ступенях свободи

Для того, щоб визначити енергію, яка припадає на всі рухи молекул, необхідно ввести поняття про число ступенів вільності.

Числом ступенів свободи називають _____



Матеріальна точка, що довільно рухається у просторі, має три ступені вільності (x, y, z). Якщо ця точка рухається по деякій поверхні або вздовж певної кривої, то вона відповідно має два або один ступені вільності.

Абсолютно тверде тіло має ___ ступенів вільності – ___ ступені вільності поступального руху і ___ ступені вільності обертального руху.

Якщо тіло не абсолютно тверде і його частини можуть зміщуватись одна відносно одної, то вводять ще додаткові ступені вільності коливального руху.

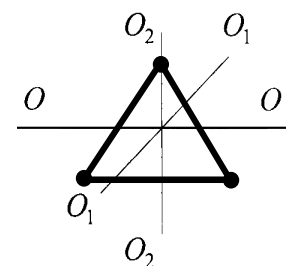
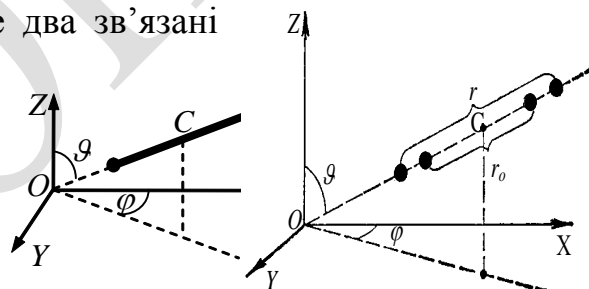
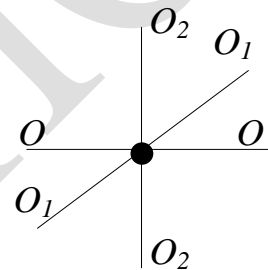
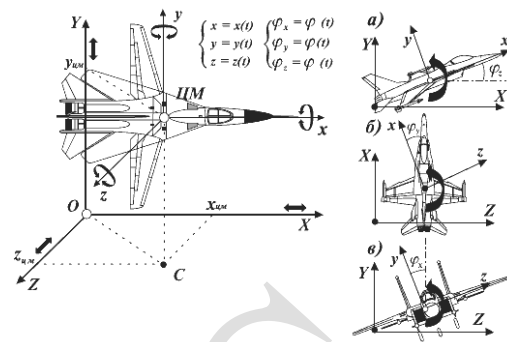
Маса молекули одноатомного газу зосереджена в ядрі, розміри якого дуже малі. Таку молекулу можна розглядати як матеріальну точку (див. рис.).

Молекула **одноатомного** газу має ___ ступені свободи **поступального** руху.

Молекула двоатомного газу – це два зв'язані атоми, що перебувають на деякій відстані один від одного.

Жорстка молекула **двоатомного** газу має ___ ступенів свободи ___ ступені свободи **поступального** руху і ___ ступені свободи **обертального** руху, якщо атоми в молекулі зв'язані не жорстким зв'язком, то ще ___ ступінь свободи **коливального** руху.

Триатомні і багатоатомні нелінійні молекули (див. рис.) мають ___ ступенів свободи – ___ **поступальних** і ___ **обертальних**. Жорсткого зв'язку між атомами не існує. Тому для реальних молекул необхідно враховувати також ступені вільності коливального руху.



Кількість ступенів свободи	Одноатомний газ		Двоатомний газ		Багатоатомний газ	
	Жорсткі молекули	Не жорсткі молекули	Жорсткі молекули	Не жорсткі молекули	Жорсткі молекули	Не жорсткі молекули
Поступ.						
Оберт.						
Колив.						

Усього						
--------	--	--	--	--	--	--

РУКОПИС

У класичній статистичній фізиці виводиться **закон Больцмана про рівномірний розподіл енергій за ступенями вільності молекул**:

- на кожний поступальний і обертальний ступінь вільності припадає в середньому кінетична енергія, що дорівнює $\frac{1}{2}kT$,
- на кожний коливальний ступінь вільності – в середньому енергія kT .

Таким чином, **середня енергія молекули**:

$$\bar{E}_{k0} = \langle \varepsilon_0 \rangle = \dots$$

де

$$i = \dots$$

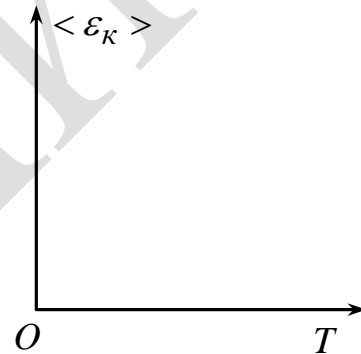
5. Абсолютна температура

Середня кінетична енергія поступального руху молекул ідеального газу залежить тільки від його абсолютної температури, $\langle \varepsilon_k \rangle$ прямо пропорційна до T :

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \dots$$

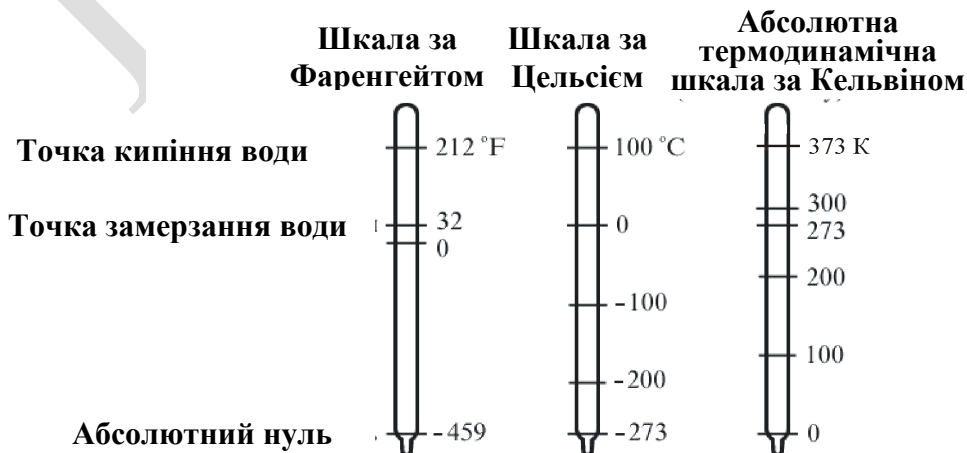
На рисунку зображено залежність $\langle \varepsilon_k \rangle$ від T . Якщо $T=0$, $\langle \varepsilon_0 \rangle=0$, тобто припиняється поступальний рух молекул газу, а отже, дорівнює нулю і його тиск.

Абсолютна температура _____



$$T(K) = \dots$$

Однак в області температур, близьких до абсолютного нуля, поведінка молекул описується не класичними законами, а законами квантової механіки.



Лекція 2. Елементи статистичної фізики

1. Розподіл молекул ідеального газу за їхніми швидкостями
2. Барометрична формула, розподіл Больцмана
3. Зіткнення молекул, середня довжина вільного пробігу молекул
4. Поведінка газів за умов низького тиску
5. Вакуумна техніка

1. Розподіл молекул ідеального газу за їхніми швидкостями

Через хаотичний рух молекул та їх взаємні зіткнення, швидкість кожної молекули постійно змінюється як за величиною, так і за напрямом. В газі будуть як швидкі, так і повільні молекули.

Хоча швидкості окремих молекул змінюються, властивості газу в цілому _____

Джеймс Клерк
Максвелл



Дж. Максвелл теоретично розв'язав задачу про

Джеймс Клерк Максвелл встановив закон,

$$f(v) =$$

– розподіл Максвелла,

де m_0 – _____,

k – _____ $\left(k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right)$,

v – _____,

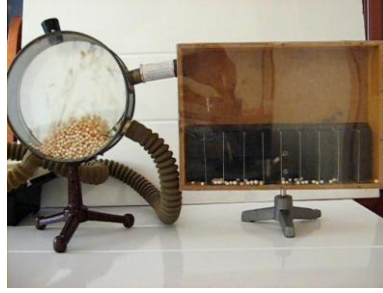
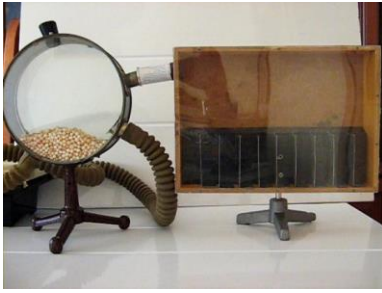
$f(v)$ – _____

$$dN =$$

Модель розподілу Максвелла

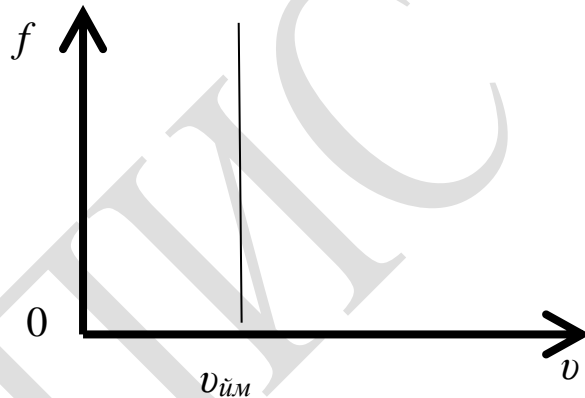
Модель розподілу Максвелла

Модель розподілу Максвелла



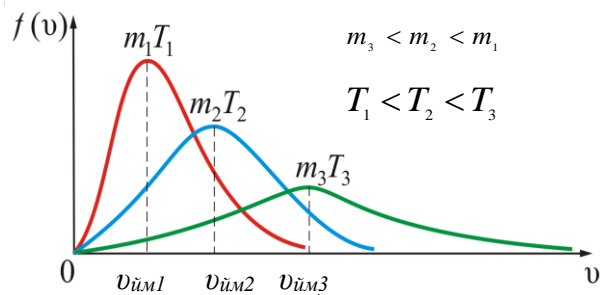
На рисунку наведено *графік функції розподілу молекул за швидкостями $f(v)$* .

Функція $f(v)$ _____



Максимум функції $f(v)$ залежить від температури T і роду газу m_0 . При збільшенні температури (або зменшенні маси молекул) максимум кривої $f(v)$ зміщується у бік більших швидкостей, а його абсолютна величина зменшується, причому площа, яка охоплена кривою $f(v)$ і віссю v , залишається незмінною.

Залежність функції розподілу Максвелла від маси молекул і температури газу



Є три швидкості, які характеризують стан газу:

Найбільш ймовірна швидкість $v_{ім}$	Середня арифметична швидкість $\langle v \rangle$	Середня квадратична швидкість $\langle v_{кв} \rangle$

Найбільш ймовірною швидкістю називають _____

2. Барометрична формула, розподіл Больцмана

Якщо б не було гравітаційного тяжіння, то молекули повітря земної атмосфери розсіялися по всьому Всесвіту. Але якщо молекули повітря земної атмосфери не перебували б у тепловому русі, то всі вони “впали” б на Землю.

Тяжіння і тепловий рух приводять до стаціонарного стану газу, при якому _____.

Тиск ідеального газу, що знаходиться в однорідному полі тяжіння за умови сталості температури газу змінюється з висотою за експоненціальним законом, який _____
(П. Лаплас, 1821 р.):

$$p = \dots$$

Із цієї формули можна зробити висновок, що _____

_____ (див. рис.).



Барометрична формула дозволяє знайти співвідношення між концентраціями газу на різній висоті.

Використаємо рівняння стану ідеального газу у вигляді $p = nkT$, де n – концентрація молекул газу. При $T = const$ отримуємо

$$nkT = n_0 kT e^{-\frac{\mu g}{RT} h},$$

де n_0 – концепція молекул на висоті $h = 0$, а скільки $\mu = m_0 N_A$, а $R = kN_A$, то

$$n = \dots \quad \text{або} \quad n = \dots \quad \text{– розподіл Больцмана,}$$

де n – _____ ($n = N/V$),

n_0 – _____,

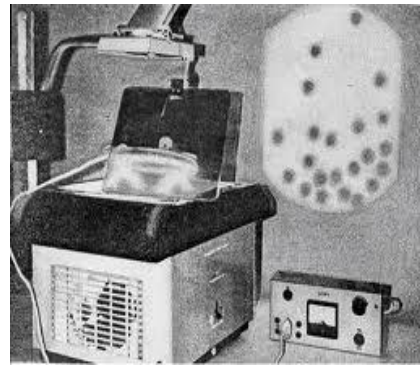
μ – _____,

h – _____,

E_n – _____.

Закон Больцмана описує

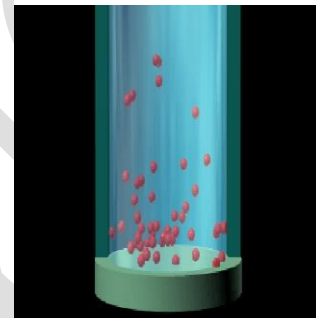
Людвиг
Больцман



Із закону Больцмана випливає, що у полі тяжіння Землі:

- 1) із збільшенням висоти концентрація молекул газу зменшується за експоненціальним законом,
- 2) при високих температурах концентрація молекул n незначно зменшується з висотою і при $T \rightarrow \infty$ $n \rightarrow n_0$, тобто підвищення температури викликає вирівнювання концентрації газу за висотою,
- 3) при $T \rightarrow 0K$ $n \rightarrow 0$, тобто всі молекули під дією сили тяжіння опускаються на дно посудини.

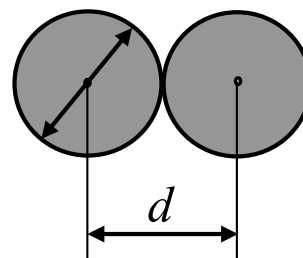
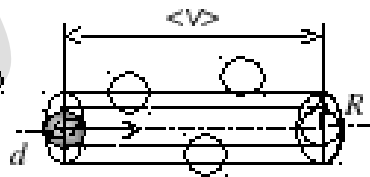
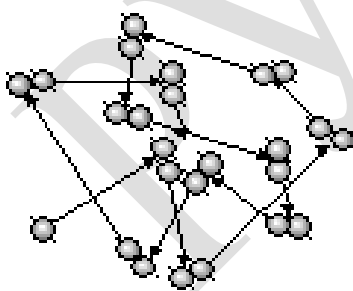
Розподіл Больцмана



3. Зіткнення молекул, середня довжина вільного пробігу молекул

Молекули газу, перебуваючи у стані хаотичного теплового руху, безперервно стикаються одна з одною.

Зіткненням молекул називають _____



_____, називають *ефективним діаметром d молекули*.

Ефективний діаметр молекул залежить від:

- _____
- _____

Середнє число зіткнень молекули за одиницю часу $\langle z \rangle$ становить:

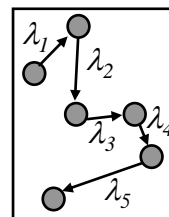
$$\langle z \rangle = \dots,$$

де n – _____,

$\langle v \rangle$ – _____.

Між двома послідовними зіткненнями молекули рухаються рівномірно і прямолінійно.

Довжиною вільного пробігу молекули називають _____



Ці відстані можуть бути різними. Тому в кінетичній теорії вводять поняття середньої довжини вільного пробігу молекул $\langle \lambda \rangle$:

$$\langle \lambda \rangle = \dots,$$

де n – _____.

Середня довжина вільного пробігу молекул визначається середнім шляхом, що проходить молекула за одиницю часу, тому чисельно дорівнює середній арифметичній швидкості $\langle v \rangle$ і якщо за одиницю часу молекула стикається з іншими молекулами $\langle z \rangle$ разів, то

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} =$$

Оскільки $p = nkT$, то

$$\langle \lambda \rangle = \dots$$

Середня довжина вільного пробігу є характеристикою всієї сукупності молекул газу при даних значеннях тиску p і температури T .

При сталій температурі середня довжина вільного пробігу є обернено пропорційною до тиску, тобто

Приведемо значення довжини вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$ молекул повітря при 0°C і різних тисках:

$p, \text{ мм.рт.ст}$				
$\langle \lambda \rangle, \text{ м}$				

4. Поведінка газів за умов низького тиску

Якщо з посудини відкачати газ, то із зниженням тиску кількість зіткнень взаємних зіткнень зменшується, що призводить до збільшення довжини їх вільного пробігу. При достатньо великому розрідженні зіткнення між молекулами досить рідкі, тому в основному відбуваються зіткнення молекул із стінками посудини.

Вакуумом називають _____

Скляна посудина з насосом для демонстрації отримання вакууму



В залежності від співвідношення $\langle l \rangle$ і d розрізняють:

- _____ вакуум ($\langle l \rangle \ll d$),
- _____ вакуум ($\langle l \rangle \leq d$),
- _____ вакуум ($\langle l \rangle > d$) – ультрарозріджений газ,
- _____ вакуум ($\langle l \rangle \gg d$).

В стані ультрарозрідженості молекули газу майже не взаємодіють, тому внутрішнє тертя практично відсутнє. Відсутність співударів між молекулами розрідженого газу впливає на механізм теплопровідності.

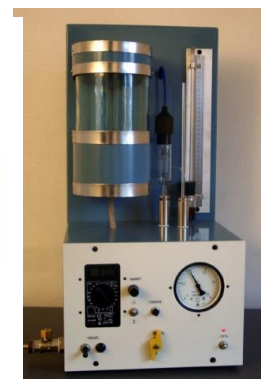
Якщо за нормальних тисків перенесення енергії здійснюється естафетно, то при ультрарозрідженні кожна молекула сама має перенести енергію від однієї стінки посудини до іншої.

Явище зменшення теплопровідності при розрідженні газів широко використовують на практиці для створення теплоізоляції.

5. Вакуумна техніка

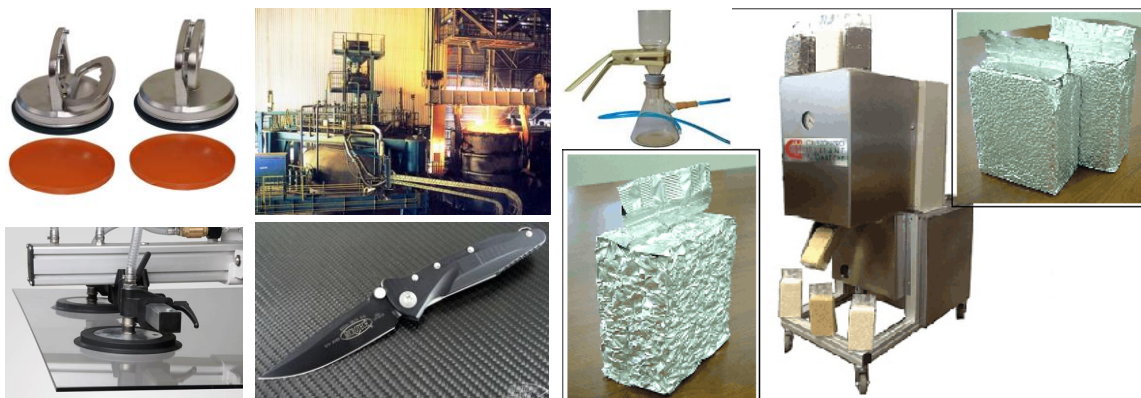
Вакуумна техніка – пристрої для отримання і збереження вакууму, а також для вимірювання його характеристик.

Для отримання різного ступеня розрідження застосовують вакуумні насоси, які дозволяють отримати попереднє розрідження газу (форвакуум) приблизно до $0,13 \text{ Па}$, а також вакуумні насоси і лабораторні пристрої, що дозволяють отримати розрідженні гази при тисках до $13,3 \text{ мкПа}$ – $1,33 \text{ нПа}$ ($10^{-7} \div 10^{-14} \text{ мм рт. ст.}$).



Вакуумна техніка і вакуумні технології мають досить широкий спектр використання:

- *при низькому вакуумі* – маніпуляція важкими та легкими предметами за допомогою присосок, механічна обробка твердих тіл, пакування під вакуумом, відбір газу, фільтрація та дегазація рідин, випарювання водних розчинів;



- *при середньому і високому вакуумі* здійснюють багато металургійних процесів – плавлення, відпал, утворення окалини, термообробка та пайка; проходять такі хімічні процеси як вакуумна дистиляція і сушіння методом сублімації, здійснюють заморожування тощо.



Вакуумні технології використовують у багатьох галузях науки і техніки.

1. В *електронній техніці* вакуум є необхідним конструктивним елементом і обов'язковою умовою функціонування електронно-вакуумних приладів – освітлювальних і газорозрядних приладах, електронно-променевих трубках, високочастотних приладах. Вакуумні технології широко використовують при виготовленні напівпровідникових приладів та електронних мікросхем, де процеси нанесення тонких плівок, іонного травлення, електронної літографії забезпечують отримання елементів нанометрового розміру.

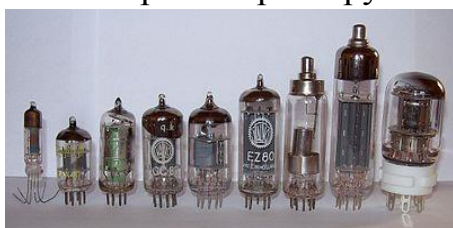
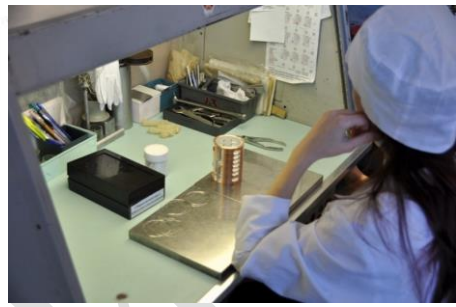


Рис. 4 Сканируючий електронний мікроскоп JEOL JSM-T220A



2. В енергетиці застосування вакуумних технологій пов'язане з проблемою керуваного термоядерного синтезу.
3. В металургії вакуумні технології використовують при дегазації сплавів для отримання надчистих металів, що характеризуються високою механічною міцністю, пластичністю та електропровідністю, для отримання штучних кристалів, для герметичних з'єднань різнорідних матеріалів з різними температурами плавлення – кераміки і металів, сталі з алюмінієм тощо.



4. та окулярів оптичних приладів.

5. У хімічній промисловості використовують вакуумні сушильні апарати при виготовленні синтетичних волокон, поліамідів, амінопластів, поліетилену, органічних розчинників. Вакуум-фільтри використовують при виробництві целюлози, паперу, мастил. У виробництві фарб і мінеральних добрив використовують вакуумні кристалізаційні апарати.



6. У фармацевтичній та харчовій промисловості використовують вакуумні кристалізаційні та дистильаційні установки при виробництві цукру, синтетичних гормонів, вітамінів, лікувальних сироваток, при виготовленні вакцин та антибіотиків, для зберігання плазми крові і шкіри. Консервування харчових продуктів із збереженням їх смакових і поживних властивостей, заморожування (головним чином для сушки кави).
7. Дуже велику роль відіграють вакуумні технології у наукових дослідженнях з ядерної фізики, фізики плазми, матеріалознавства, в космічних експериментах тощо.



8. У *будівництві* використовують вакуумне обладнання та вакуумні технології:

- для монтажу сендвіч-панелей та скла;
- при нанесенні декоративно-захисного наплення;
- в системах вакуумної каналізації;
- у вакуумних випаровувачах миттєвого скіпання;
- для вакуумної теплоізоляції;
- у вакуумних системах гідроізоляції;
- для вакуумування бетонних сумішей тощо.

Сонячний вакуумний колектор
Використовують в системах нагріву води для басейнів та часткового



Вакуумне обладнання для монтажу сендвіч-панелей та скла



Вакуумная теплоізоляція у будівництві



Нанесення декоративно-захисного наплення



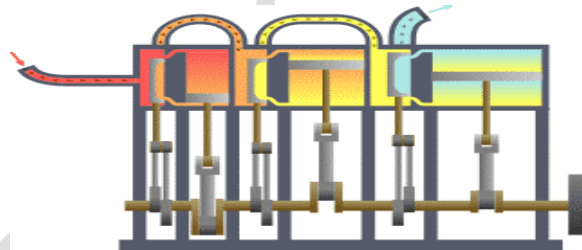
Технологія вакуумування бетонних сумішей



Лекція 3. Основи термодинаміки. Перше начало термодинаміки

1. Тепло та робота
2. Внутрішня енергія системи як функція стану
3. Перше начало термодинаміки
4. Термодинамічні діаграми
5. Ізопроцеси в газах
6. Адіабатний процес
7. Теплоємність газів

Термодинаміка – _____



Історія

Головною проблемою, яка стояла перед вченими та інженерами XIX і початку XX століття, було створення теорії роботи теплових машин, що дозволила б поставити на наукову основу розрахунок і проектування поршневих парових машин, парових турбін, двигунів внутрішнього згорання, холодильних машин тощо.

Основу термодинаміки як нової науки заклав французький фізик Саді Карно в опублікованому у 1824 році трактаті «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу». Основним змістом роботи Карно було дослідження умов найвигіднішої роботи теплових двигунів.

Бенджамін Томпсон в 1798 році спостерігаючи за процесом свердління гарматних стволів, помітив, що під час здійснення роботи тертя безперервно виділяється величезна кількість тепла, і при цьому ніякого охолодження докільля не відбувається. У 1799 році Г. Деві провів дослід по тертю між охолодженими нижче температури плавлення двома шматками льоду у безповітряному просторі, захищеному від сонячного і теплового випромінювання. При цьому спостерігалось плавлення льоду, що вимагає великих витрат тепла. Таким чином було доведено, що виділення тепла при терті відбувається не за рахунок запозичення його з докільля, а за рахунок витраченої роботи. Близько 1830 року Саді Карно уперше виразно сформулював принцип еквівалентності тепла і роботи, а також приблизно встановив величину теплового еквіваленту роботи. Проте, записки Карно залишилися непоміченими і були опубліковані тільки через сорок років після його смерті.

У період 1842-1850 років цілий ряд дослідників майже одночасно встановлює величину теплового еквіваленту роботи: Юліус Роберт фон Маєр в 1842 році – по різниці теплоємностей газів при постійному тиску і постійному об'ємі, на основі переконань про збереження сили (енергії); Д.П. Джоуль в 1841-1843 роках і Е. Ленц в 1844 році – по тепловиділенню в колі електричного струму;

А. Кольдинг і Д.П. Джоуль в період 1843-1850 років – по тепловиділенню при терті тощо. Встановлення принципу еквівалентності теплоти і роботи було останньою ланкою на шляху математичного оформлення першого закону термодинаміки як загального закону збереження енергії. Сучасне формулювання першого закону термодинаміки для оборотних процесів і подальші побудови принципів положень класичної термодинаміки виконані Вільямом Томсоном (лордом Кельвіном) і Рудольфом Клаузіусом у 1850-1865 роках.

У ХХ столітті важливим завданням стала розробка теорії течії і витікання пари і газів у зв'язку з тією роллю, яку почали грати парові і газові турбіни. Тут видатну роль мали праці Г. Лоренца і Л. Прандтля. Цей напрям розвитку науки здобув назву – технічна термодинаміка. Істотний внесок у розвиток технічної термодинаміки внесли В. Ранкін, Д.Стретт, Р. Мольє, і Л. Рамзін.

На межі ХІХ і ХХ віків почалася ревізія побудов класичної термодинаміки, яка стосується головним чином проблеми другого закону термодинаміки (М. Шиллер, 1900; К. Каратеодорі, 1909; Т. Афанасьєва-Еренфест, 1925; М. Планк).

ХХ століття характеризується активним проникненням термодинаміки в інші науки. Виникають нові напрями в термодинаміці, такі як фізична або загальна термодинаміка, хімічна термодинаміка, біологічна термодинаміка (теорія клітини), термодинаміка електричних і магнітних процесів, релятивістська, квантова, космічна термодинаміки і так далі. З розвитком кріогенної техніки на початку ХХ століття виникла можливість досліджувати властивості речовин при дуже низьких температурах. Це дозволило сформулювати третій закон термодинаміки— твердження про те, що ентропія однокомпонентних речовин прямує до нуля при зменшенні температури до абсолютного нуля.

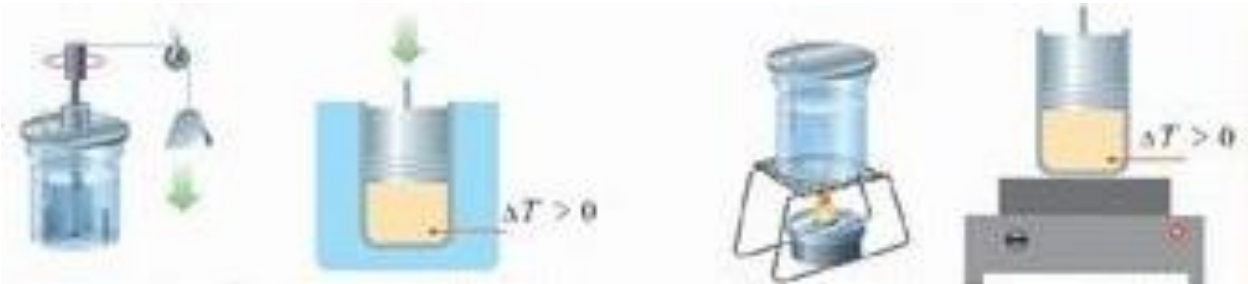
Рівноважна термодинаміка стала довершеною наукою на початку ХХ століття. Сучасні дослідження зосереджені в основному на властивостях нерівноважних та відкритих систем, вивченні процесів переносу, релаксації, самоорганізації.

Засновники термодинаміки

<u>École Polytechnique</u>	<u>Glasgow school</u>	<u>Berlin school</u>	<u>Edinburgh school</u>
			
<u>Sadi Carnot</u> (1796-1832)	<u>William Thomson</u> (1824-1907)	<u>Rudolf Clausius</u> (1822-1888)	<u>James Maxwell</u> (1831-1879)
<u>Vienna school</u>	<u>Gibbsian school</u>	<u>Dresden school</u>	<u>Dutch school</u>
			
<u>Ludwig Boltzmann</u> (1844-1906)	<u>Willard Gibbs</u> (1839-1903)	<u>Gustav Zeuner</u> (1828-1907)	<u>Johannes van der Waals</u> (1837-1923)

1. Тепло та робота

Термодинаміка розглядає системи, для яких _____



Перша з них зводиться до того, що енергія впорядкованого руху одного тіла переходить в енергію впорядкованого руху іншого тіла або його частин. Це може відбуватись під час взаємодії макроскопічних тіл, розміри яких у багато разів більші за розміри окремих атомів або молекул. Таку форму передавання енергії називають **роботою**.

Наприклад, газ, що розширюється в циліндрі двигуна внутрішнього згорання, переміщує при цьому поршень і передає йому енергію у формі роботи.

Робота – _____

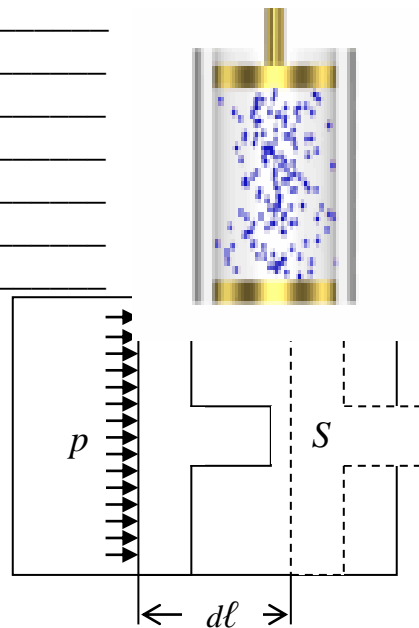
Якщо під дією сили тиску поршень переміститься на відстань $d\ell$, то _____

$$dA = \quad ,$$

де $S d\ell = dV$ – _____.

Тоді:

$$dA = \quad \text{або} \quad A_{12} = \int \quad .$$



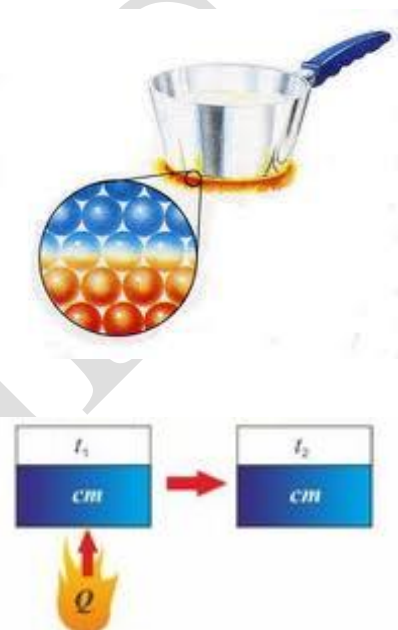
Друга форма передавання енергії здійснюється при безпосередньому обміні енергією між частинками взаємодіючих тіл, що рухаються хаотично. За рахунок переданої тілу енергії підсилюється невпорядкований рух його

частинок, тобто збільшується внутрішня енергія тіла. Таку форму передавання енергії в термодинаміці називають **теплотою**.

Так, наприклад, при дотику холодного тіла і гарячого молекули другого тіла, які швидко рухаються, стикаються з молекулами першого тіла, що рухається повільніше, і передають їм частину своєї кінетичної енергії. Внаслідок цього внутрішня енергія першого тіла збільшується, другого – зменшується, а їх температури вирівнюються.



Теплота – _____



Кількість теплоти при нагріванні або охолодженні ΔQ тіла визначають формулою:

$$\Delta Q = \quad ,$$

де c – _____,
 m – _____,
 $\Delta T = T_2 - T_1$ – _____.

Найбільшу теплоємність з будівельних матеріалів має дерево – 2,3 кДж/(кг·°С), найменшу сталь і мідь – 0,42 кДж/(кг·°С). Теплоємність повітря при температурі +20°С становить 1,005 кДж/(кг·°С), теплоємність води 4,183 кДж/(кг·°С).



Теплота і робота є формою передавання енергії, а зовсім не видом енергії.

Між теплотою і роботою існує глибока якісна відмінність. _____

Виконання роботи _____



Надання системі (або тілу) теплоти, _____



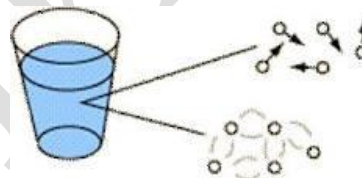
Для того, щоб при підведенні до системи теплоти зросла енергія інших видів, крім внутрішньої, необхідно хоч би частково перетворити хаотичний рух частинок в упорядкований або перетворити теплоту в роботу.

Теплота і робота тісно пов'язані між собою. Обидві ці форми передавання енергії переходять одна в одну і в реальних умовах супроводять одна одну. Так, наприклад, при нагріванні металевого стрижня не тільки збільшується його внутрішня енергія, а відбувається також розширення стрижня і, отже, виконується робота розширення. Досліди показали, що теплота перетворюється в роботу, або робота в теплоту завжди в точно відповідних кількостях, незалежно від способу перетворення.

2. Внутрішня енергія системи як функція стану

Однією з основних характеристик термодинамічної системи є внутрішня енергія.

Під **внутрішньою енергією системи** розуміють _____



Внутрішня енергія ідеального газу буде складатися лише з суми кінетичних енергій теплового руху молекул (атомів) газу:

$$U = \dots$$

Середня кінетична енергія руху однієї молекули:

$$\bar{\epsilon}_{k0} = \dots,$$

тоді для *одного моля газу*, який містить _____ молекул, *внутрішня енергія становитиме:*

$$U = \dots \text{ або } U = \dots,$$

оскільки $k \cdot N_A = \dots$.

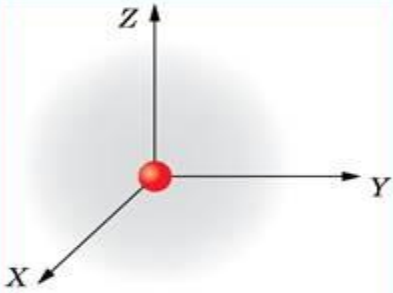
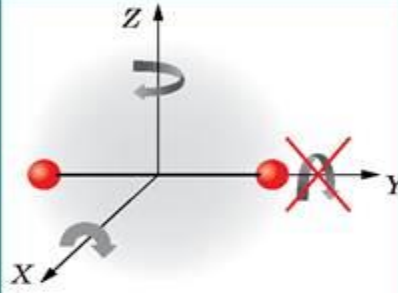
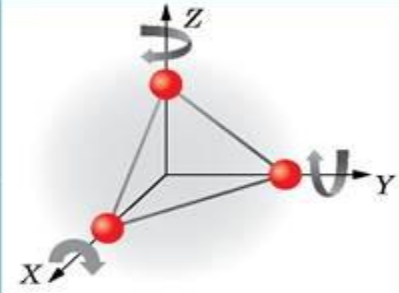
Внутрішня енергія довільної кількості газу:

$$U = \dots,$$

де m – _____;

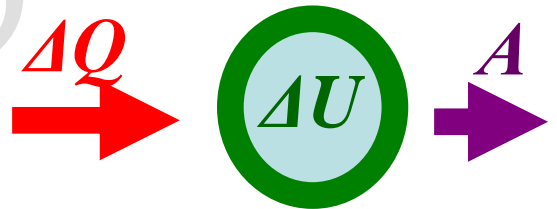
μ – _____, $[\mu] = \text{_____}$;

$\frac{m}{\mu} = \nu$ – _____, $[\nu] = \text{_____}$.

Одноатомний газ	Двохатомний газ	Багатоатомний газ (три і більше атомів)
Молекули рухаються тільки поступально	Молекули рухаються поступально й обертаються	
 <p>Одноатомна молекула має 3 ступені свободи поступального руху</p>	 <p>Двохатомна молекула має 5 ступенів свободи (3 поступального і 2 обертального рухів)</p>	 <p>Багатоатомна молекула має 6 ступенів свободи (3 поступального і 3 обертального), крім CO₂, який має 5 ступенів свободи</p>
<p>Внутрішня енергія визначається енергією поступального руху:</p> $U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT$	<p>Внутрішня енергія визначається сумою енергій поступального й обертального рухів:</p> $U = \frac{5}{2} \frac{m}{M} RT$	<p>Внутрішня енергія у два рази більша, ніж одноатомного газу за тієї ж температури:</p> $U = 3 \frac{m}{M} RT$

3. Перше начало термодинаміки

Дослід показує, що відповідно до закону збереження енергії при довільному способі переходу системи з першого стану у другий зміна внутрішньої енергії $\Delta U = U_2 - U_1$ дорівнюватиме різниці між кількістю теплоти Q , отриманою системою, і роботою A , яка виконана системою проти зовнішніх сил: $\Delta U = \Delta Q - A$, або $Q = \Delta U + A$



Перше начало термодинаміки: _____

$\Delta Q =$

або

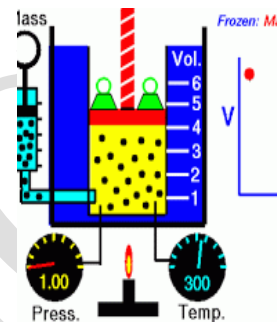
$\Delta Q =$



Важливим є випадок, у якому система – це періодично діюча машина, в якій газ, пара або інше “робоче тіло” внаслідок деякого процесу повертається у початковий стан, у цьому разі:

$$\Delta U = 0 \text{ і } A = Q.$$

Робота, яку виконує машиною за один цикл, дорівнює підведеній ззовні теплоті Q . Цей висновок дає змогу дати **друге формулювання першого закону термодинаміки**: _____

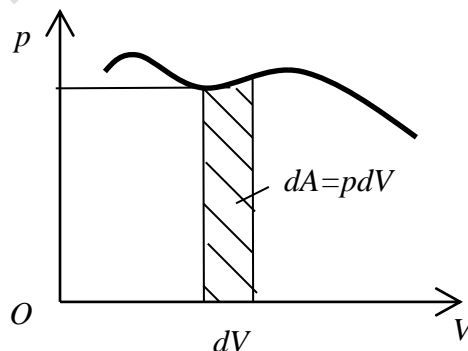


4. Термодинамічні діаграми

Термодинамічна діаграма – це _____

Будують термодинамічні діаграми у наступних координатах: _____, _____, _____.

Найбільш поширеною є pV – діаграма, оскільки площа під кривою цієї діаграми чисельно дорівнює _____



5. Ізопроееси в газах

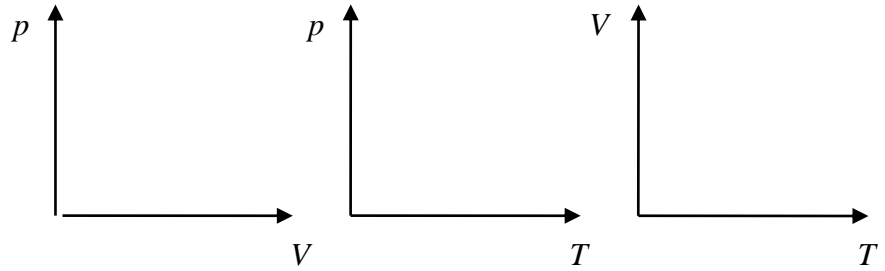
Розглянемо найбільш прості процеси, що відбуваються у термодинамічних системах.

Ізопроееси – це _____

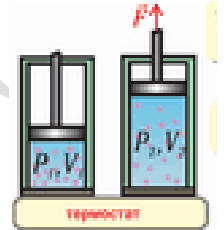
– **ізотермічний процес** – _____:

– закон Бойля-Маріотта.

Термодинамічна діаграма ізотермічного процесу називається _____, у координатах pV має вигляд гіперболи.



Оскільки при ізотермічному процесі $T = \text{_____}$, то $\Delta T = \text{_____}$, отже і $\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T = \text{_____}$. Це означає, що при ізотермічному процесі уся кількість теплоти надана газу йде на _____:

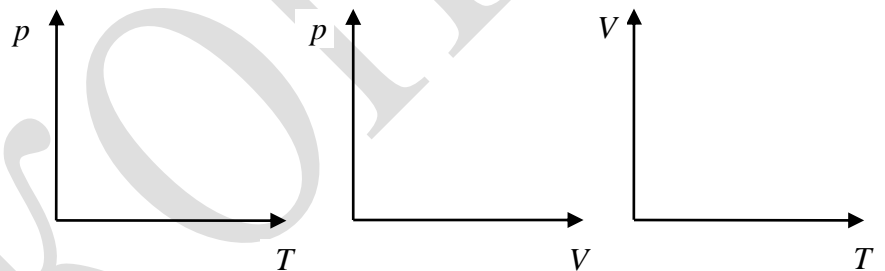


– I начало термодинаміки для ізотермічного процесу.

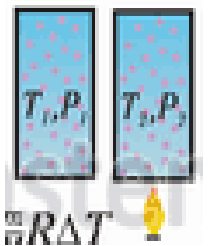
– **ізохорний процес** – _____:

– закон Шарля.

Термодинамічна діаграма ізохорного процесу називається _____.



Оскільки при ізохорному процесі $V = \text{_____}$, то $\Delta V = \text{_____}$, отже і $\Delta A = p \Delta V = \text{_____}$. Це означає, що при ізохорному процесі уся кількість теплоти надана газу йде на _____:

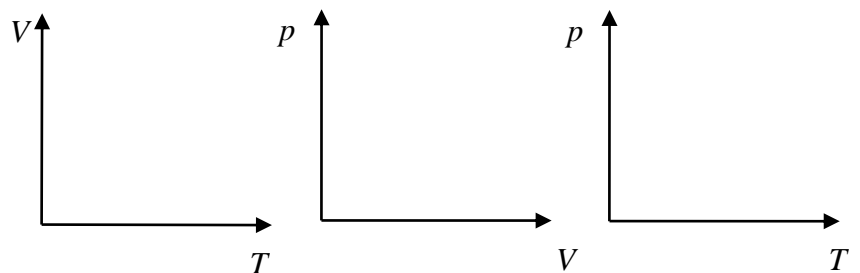


– I начало термодинаміки для ізохорного процесу.

– **ізобарний процес** – _____:

– закон Гей-Люссака.

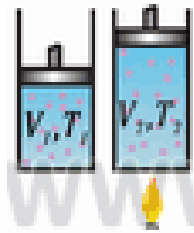
Термодинамічна діаграма ізобарного процесу називається _____ (рис.). При ізобарному процесі



$$\Delta U = \frac{i}{2} \mu R \Delta T = \dots \text{ і } \Delta A = p \Delta V = \dots$$

Це означає, що при ізобарному процесі кількість теплоти надана газу йде на

_____:



або

– I начало термодинаміки для ізобарного процесу.

Роберт Бойль

Едм Маріотт

Жак Алесандр Сезар Шарль

Жозеф Луи Гей-Люссак



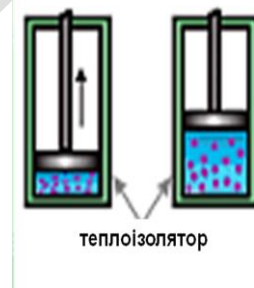
6. Адіабатний процес

Адіабатним процесом називають _____

_____:

$$\Delta Q = \dots$$

Оскільки $\Delta Q = \Delta U + \Delta A = 0$,



– I начало термодинаміки для адіабатного процесу,

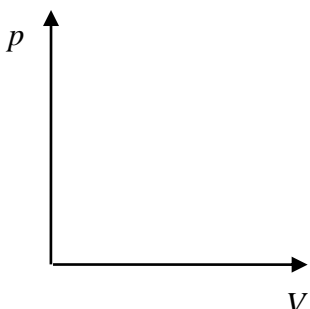
тобто при адіабатному процесі _____

При адіабатному процесі параметрами p , V і T мають такий зв'язок:

Симеон Дені Пуассон

– рівняння Пуассона (рівняння адіабати),

де $\gamma = \frac{\dots}{\dots}$



Термодинамічна діаграма адіабатного процесу називається _____. Графік адіабати завжди змінюється швидше, ніж графік ізотерми, тобто гіпербола адіабати має більш крутий нахил, ніж ізотерма.

7. Теплоємність газів

Теплоємністю називають _____

 _____:

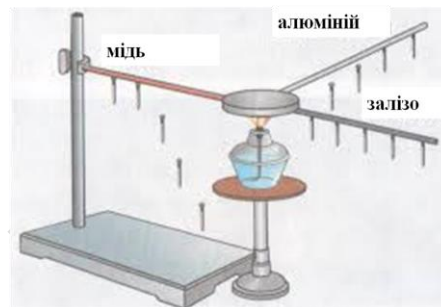
$$C = \frac{\quad}{\quad}, [C] = \frac{\quad}{\quad}.$$



Питома теплоємність – це _____

 _____:

$$c = \frac{\quad}{\quad}, [c] = \frac{\quad}{\quad}.$$



Молярна теплоємність – _____

 _____:

$$c_\mu = \frac{\quad}{\quad}, [c_\mu] = \frac{\quad}{\quad}.$$

Розрізняють два види молярної теплоємності:

- c_V – _____ – $c_V = \frac{i}{2} R$;
- c_p – _____ – $c_p = \frac{i+2}{2} R$.

Питома теплота плавлення (кристалізації) λ – це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідної для перетворення 1 кг кристалічної речовини за температури плавлення на рідину тієї самої температури:

$$\lambda = \frac{\quad}{\quad}.$$

При кристалізації тіла виділяється така сама кількість теплоти, яка була витрачена на його плавлення.

Питома теплота пароутворення (конденсації) L – це величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно витратити для перетворення 1 кг рідини на пару за незмінної температури:

$$L = \frac{\quad}{\quad}.$$

При конденсації пари у рідину виділяється така сама кількість теплоти, яка була витрачена на її випаровування.

Питома теплотою згоряння палива q називають величину, яка вимірюється кількістю теплоти, що виділяється при повному згорянні одного кілограма палива:

$$q = \frac{\quad}{\quad}.$$

Лекція 4. Друге і третє начало термодинаміки

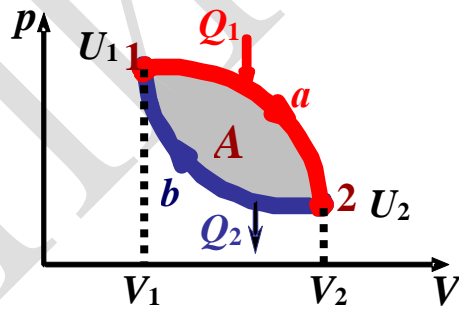
1. Термодинамічні цикли, робочі цикли теплових та холодильних машин
2. Оборотні та необоротні процеси. Цикл Карно
3. Ентропія. Друге начало термодинаміки та його статистичне розуміння. Теорема Нернста

1. Термодинамічні цикли, робочі цикли теплових та холодильних машин

Термодинамічним циклом (круговим процесом) називають _____

На діаграмі pV цикл, який виконує ідеальний газ, зображають замкненою кривою, де ділянка

- 1 – 2 відповідає _____
- 2 – 1 – _____



_____ , називають **робочим тілом**. Зазвичай таким тілом є газ.

Робота розширення A_{1-2} , _____

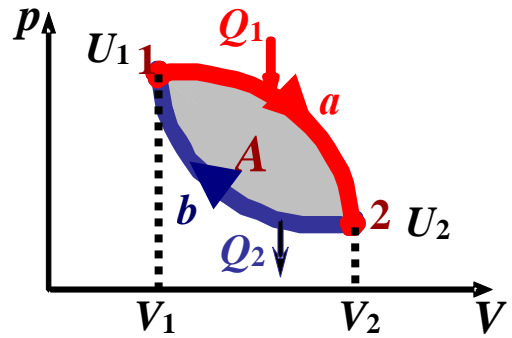
Робота стискання A_{2-1} , _____

Робота, що виконується газом за цикл

визначається площею фігури, обмеженою кривою $1a2b1$.

_____ , називають **прямим**.

При прямому циклі робочому тілу, надається кількість теплоти Q_1 і тіло виконує роботу розширення A_{1-2} . Внутрішня енергія змінюється на величину $\Delta U = U_2 - U_1$, де U_1 і U_2 – внутрішня енергія тіла в стані 1 і 2, відповідно. Потім тіло стискається, над ним виконується робота $A'_{2-1} = -A_{2-1}$, яка менша, ніж A_{1-2} , і від нього забирається кількість теплоти Q_2 , яка менша Q_1 .



Внутрішня енергія змінюється на величину $-\Delta U$. Робота стискування виконується за рахунок використання частини роботи, виконаної при розширенні робочого тіла, наприклад, за рахунок кінетичної енергії маховика, що почав обертатись при розширенні робочого тіла. За першим законом термодинаміки для процесу розширення $Q_1 = \Delta U + A_{1-2}$, для процесу стискування: $-Q_2 = -\Delta U - A_{2-1}$.

Якщо ці рівняння додати, то отримаємо

$$Q_1 - Q_2 = A_{1-2} - A_{2-1} = A.$$

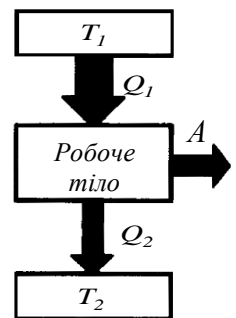
Після закінчення циклу тіло повертається у свій початковий стан, внутрішня енергія тіла не змінюється. Тому робота циклу може виконуватись лише за рахунок зовнішніх джерел, що підводять до тіла теплоту.

Прямий цикл використовують у **тепловому двигуні (машині)** – пристрої, в якому _____

Тепловий двигун складається з трьох частин:

- _____,
- _____,
- _____.

Від термостата з вищою температурою T_1 , який називають нагрівником, за цикл відбирається кількість теплоти Q_1 , а термостату з нижчою температурою T_2 , який називають холодильником, за цикл передається кількість теплоти Q_2 . При цьому виконується робота



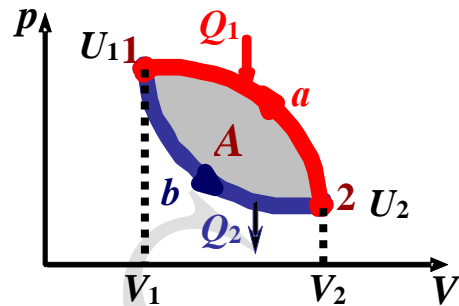
$$A = \dots$$

Коефіцієнт корисної дії теплового двигуна дорівнює відношенню роботи A , виконаної тілом за робочий цикл, до кількості теплоти Q_1 , яку отримало тіло від нагрівника:

$$\eta_{m.m.} = \dots$$

Температура газу при його стискуванні має бути нижча, ніж при розширенні. Тоді тиск газу у всіх проміжних станах при стисканні буде менший, ніж при розширенні, і буде виконуватися умова $A_{1-2} > A_{2-1}$, необхідна для виконання двигуном корисної роботи.

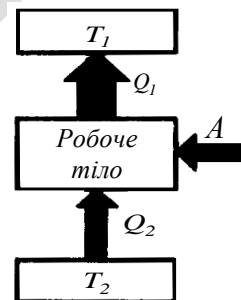
Цикл, упродовж якого виконується від'ємна робота $A > 0$ (цикл здійснюється проти годинникової стрілки), називають **зворотним**:



$$A_1 = \int_{(1b2)} pdV + \int_{(2a1)} pdV = - \left[\int_{(2b1)} pdV + \int_{(1a2)} pdV \right] = \dots$$

Зворотний цикл використовують у **холодильних машинах** – _____

Така машина забирає за цикл від тіла з температурою T_2 кількість теплоти Q_2 і віддає тілу при температурі T_1 кількість теплоти Q_1 . Над машиною за цикл має бути виконана робота A . Кількість відданої теплоти Q_1 дорівнює сумі отриманої кількості теплоти Q_2 і роботи, яку виконали зовнішні сили:



$$Q_1 = \dots$$

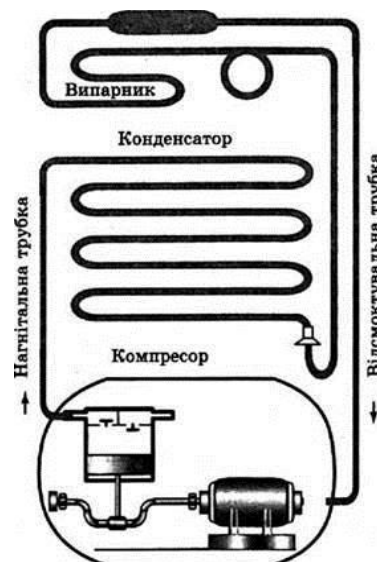
Таким чином, тіло з меншою температурою, від якого забирається певна кількість теплоти, охолоджується, а тіло з вищою температурою, якому віддається теплота, нагрівається.



Ефективність холодильної машини характеризується її **холодильним коефіцієнтом**, який дорівнює відношенню віднятої кількості теплоти Q_2 до роботи, яка затрачається на приведення машини в роботу:

$$\eta_{х.м.} = \dots$$

Робочим тілом в холодильній машині слугують пари рідин, які легко киплять: аміак, фреон і ін. Енергія підводиться до машини від електричної мережі. За рахунок цієї енергії відбувається перехід теплоти від холодильної камери до більш нагрітого тіла – до навколишнього середовища.



2. Оборотні та необоротні процеси. Цикл Карно

Оборотним термодинамічним процесом називають _____

_____, називають **необоротними**.
Оборотні процеси – це до деякої міри ідеалізація реальних процесів.
Всі реальні процеси є _____.

Вивчаючи проблеми можливого підвищення ККД теплових машин
Саді Карно довів **теорему**: _____

Саді Карно вивчав проблеми можливого підвищення
ККД теплових машин.

Цикл Карно – _____

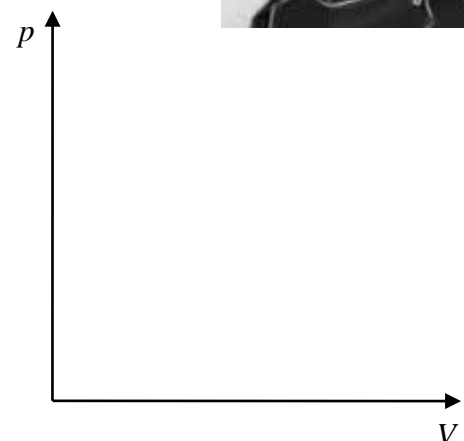
Нікола Леонар
Саді Карно



- 1→2 – _____
_____;
- 2→3 – _____

_____;
- 3→4 – _____

_____;

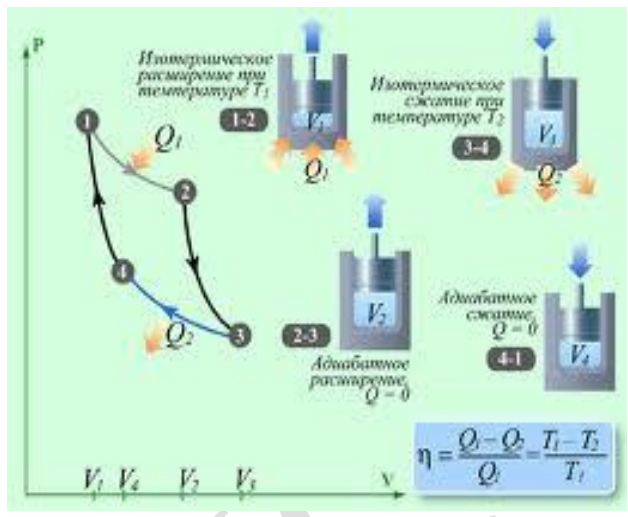


- 4→1 – _____

Розрахунки свідчать, що **ККД** **циклу Карно** визначають формулою:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

де T_1 – _____,
 T_2 – _____.



Отже, **ККД** **циклу Карно** визначається лише _____

Для підвищення ККД необхідно збільшити різницю температур нагрівача і холодильника. Наприклад, при $T_1=250\text{ K}$ і $T_2=200\text{ K}$, $\eta=0,2$. Якщо ж температура нагрівача зростає до $T_1=400\text{ K}$, тобто різниця температур збільшиться на 150 K , то $\eta=0,5$.

Цикл Карно



3. Ентропія. Друге начало термодинаміки та його статистичне розуміння. Теорема Нернста

_____ називають *зведеною кількістю теплоти*.

Найсуттєвіша відмінність теплового руху молекул від інших форм руху – його безладність, хаотичність. Тому для опису теплового руху вводять _____.

Під час виконання циклу Карно зведені кількості теплоти при процесах ізотермічного розширення і стиску _____.

Вираз $\frac{\delta Q}{T}$ є повним диференціалом деякої функції, яка визначається лише _____.

_____ називають *ентропією S*:

$$= dS.$$

Поняття ентропії було вперше введено у 1865 році Рудольфом Клаузіусом, утворивши її від грецького слова τροπή, «зміна» (зміна, перетворення).

Зміна ентропії при оборотному процесі

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

Ентропія системи, що здійснює необоротний процес, зростає

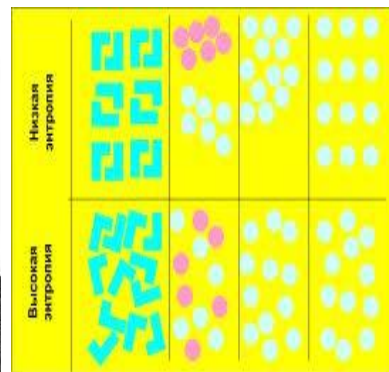
$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} > 0.$$

_____ :

– *нерівність Клаузіуса*.

Оскільки dS і dQ мають один і той же знак, то _____

Рудольф Клаузіус



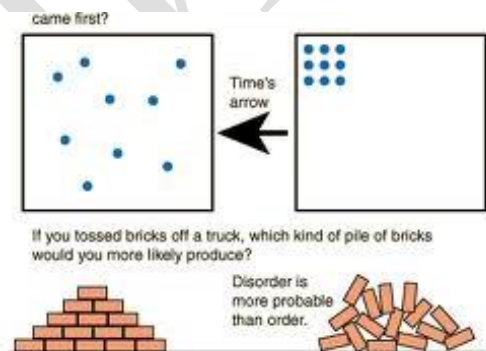
Термодинамічну ймовірність стану тіла або системи W _____

Статистичне тлумачення ентропії: _____

– формула Больцмана,

де k – _____.

Принцип зростання ентропії:

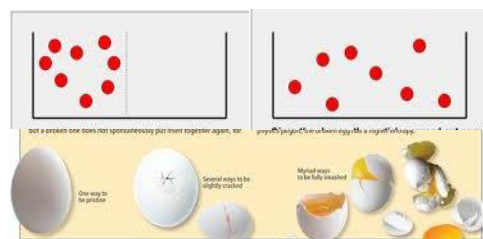


У замкненій системі процеси відбуваються у напрямі від менш ймовірних станів до більш ймовірних, до тих пір, доки ймовірність стану не стане максимальною. В стані рівноваги – найбільш ймовірному стані системи – кількість мікростанів максимальна, при цьому максимальна і ентропія.

Перше начало термодинаміки встановлює _____

Другий закон термодинаміки визначає _____

Друге начало термодинаміки: будь-який необоротний процес в замкненій системі протікає так, що ентропія системи при цьому зростає (закон зростання ентропії).



Існують й інші формулювання другого начала термодинаміки.

Карно довів неможливість повного перетворення тепловою машиною наданого їй тепла в роботу, оскільки частина тепла віддається холодильнику – **друге начало термодинаміки**.

Ломоносов давав таке формулювання **другого начала термодинаміки**: самовільно тепло переходить від нагрітого тіла до холодного, а не навпаки.

За **Клаузіусом**: неможливий коловий процес, єдиним результатом якого є перетворення теплоти, отриманої від нагрівника, в еквівалентну їй роботу.

За **Кельвіном і Планком** – неможливо створити такий замкнений цикл, єдиною дією якого є перетворення тепла в роботу (вічний двигун другого роду неможливий).

Як би такий двигун був можливий, то людство мало невичерпну енергію, наприклад, за рахунок охолодження океанів.

**Нікола Леонар
Саді Карно**



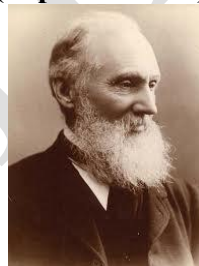
**Михайло
Ломоносов**



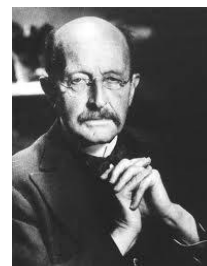
**Рудольф
Клаузіус**



**Сэр Уільям
Томсон
(лорд Кельвін)**



**Макс Карл Ернст
Людвіг Планк**



Третє начало термодинаміки – теорема Нернста-Планка – _____

**Вальтер
Нернст**



$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 .$$

Лекція 5. Реальні гази. Рідини. Тверді тіла

1. Сили та потенціальна енергія міжмолекулярної взаємодії
2. Агрегатні стани речовини
3. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса
4. Метастабільні стани
5. Насичена та ненасичена пара. Вологість повітря
6. Поверхневий натяг, капілярні явища
7. Властивості кристалів, будова їх кристалічних решіток
8. Дефекти кристалічних решіток
9. Рідкі кристали. Аморфні речовини. Будова полімерів
10. Уявлення про старіння та довговічність матеріалів
11. Фази та фазові перетворення

1. Сили та потенціальна енергія міжмолекулярної взаємодії

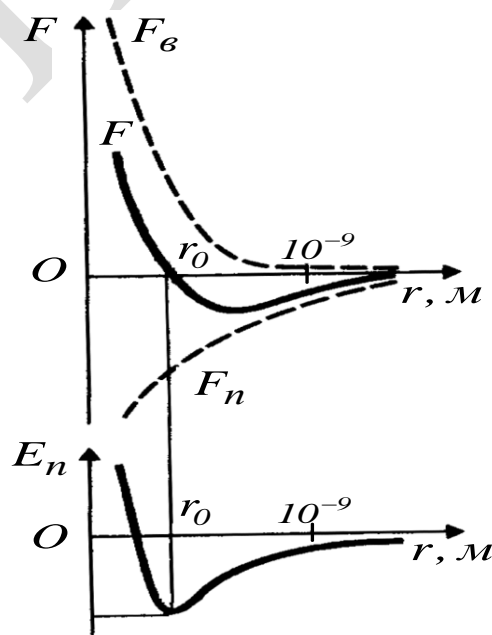
Властивості реальних газів залежать від _____

Між молекулами одночасно діють сили притягання і сили відштовхування. На відстані $r = r_0$ результуюча сила $F = 0$. Відстань r_0 відповідає рівноважній відстані між молекулами, на якій би вони знаходились за відсутності теплового руху. При $r < r_0$ переважають сили відштовхування ($F > 0$), при $r > r_0$ – сили притягання ($F < 0$) (див. рис.).

Елементарна робота dA сили F при збільшенні відстані між молекулами на dr виконується за рахунок зменшення взаємної потенціальної енергії молекул:

$$dA =$$

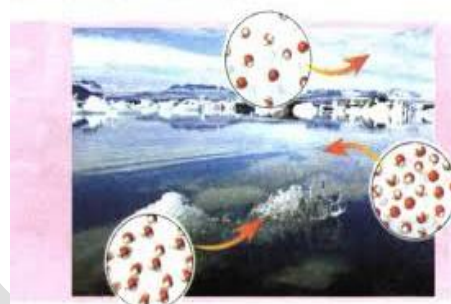
Якщо відстані між молекулами дуже великі ($r \rightarrow \infty$), тобто міжмолекулярні сили не діють, то потенціальна енергія взаємодії молекул $E_n = 0$. При зближенні молекул появляються сили притягання, які виконують додатну роботу. Потенціальна енергія взаємодії зменшується, досягаючи мінімуму при $r = r_0$.



Якщо відстань між молекулами $r < r_0$, то із зменшенням r сили відштовхування ($F > 0$) різко зростають і робота, яка виконується проти цих сил, від'ємна ($dA = (\vec{F}, d\vec{r}) < 0$). Потенціальна енергія також різко зростає і стає додатною. Отже, система із двох молекул, що взаємодіють між собою, у стані стійкої рівноваги ($r = r_0$) характеризується мінімальною потенціальною енергією.

2. Агрегатні стани речовини.

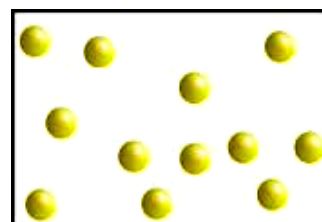
В залежності від характеру руху молекул, взаємодії між молекулами та відстані між ними розрізняють три агрегатних стани речовини:



1. _____,
2. _____,
3. _____,
4. _____.

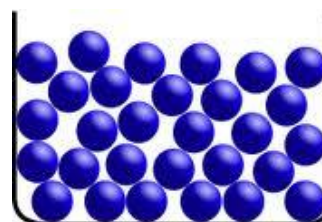
Основним критерієм різних агрегатних станів є співвідношення між

Якщо $E_{n_{min}} \ll kT$ речовина знаходиться у газоподібному стані, тобто _____



Для газів характерні великі міжмолекулярні відстані, малі сили притягання, тому гази можуть необмежено розширюватись. Молекули газу хаотично рухаються, співударяються одна з одною і зі стінками посудини. (див. рис.).

Якщо $E_{n_{min}} \approx kT$ речовина знаходиться у рідкому стані, тобто _____



У рідинах молекули розміщені тісно і коливаються навколо положення рівноваги, а також перескакують з одного рівноважного положення в інше (ближній порядок) (рис.).

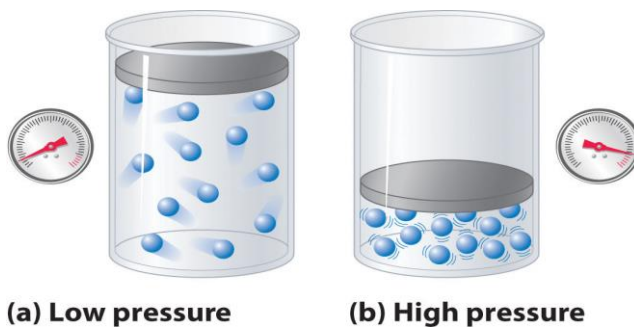
Якщо $E_{n_{min}} \gg kT$ речовина знаходиться у твердому стані, оскільки _____



У твердих тілах сили взаємодії кожної молекули із сусідніми настільки великі, що молекула здійснює малі коливання навколо деякого сталого положення рівноваги – вузла кристалічної ґратки – дальній порядок (рис.).

3. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса

Власний об'єм усіх молекул в 1 см^3 за нормальних умов $\sim 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$, займає $\sim 0,0001$ від об'єму, зайнятого газом, а при тиску 500 МПа об'єм молекул становить уже половину всього об'єму газу.



(a) Low pressure

(b) High pressure

Відхилення поведінки реальних газів від законів ідеального газу одним із перших проаналізував нідерландський фізик Ян Дідерік Ван-дер-Ваальс (1873 р.). Він врахував вплив молекулярних сил і вніс поправки до рівняння стану ідеального газу.

Ян Дідерік Ван-дер-Ваальс



Фактично вільний об'єм, в якому можуть рухатись молекули реального газу, буде не V_μ , а $V_\mu - b$, де b – об'єм, що займають самі молекули реального газу. Дія сил притягання між молекулами реального газу приводить до появи додаткового тиску на газ, що називають внутрішнім тиском $p' = \frac{a}{V_\mu^2}$.

Якщо в рівняння Клапейрона-Менделєєва ввести поправки на _____

де a – _____,

b – _____.

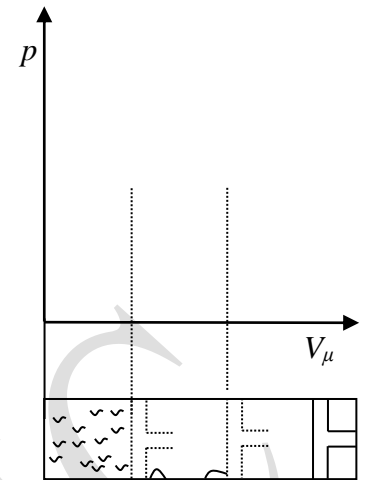
4. Метастабільні стани

Розглянемо процеси, що відбуваються при стисканні реального газу під поршнем (рис.), і побудуємо їх графіки – _____

При переході 1→2 відстань між молекулами значна, поведінка газу відповідає поведінці ідеальному газу, крива 1–2 є звичайною ізотермою Менделєєва-Клапейрона.

При переході 1→2 відстань між молекулами значна, поведінка газу відповідає поведінці ідеальному газу, крива 1–2 є звичайною ізотермою Менделєєва-Клапейрона.

У точці 2 починається процес конденсації пари, пара під поршнем стає насиченою (число молекул, які вилітають із рідини, дорівнює числу молекул, які повертаються назад у рідину). Процес 2–3 протікає при $p = const$, оскільки концентрація молекул в такому газі не залежить від об'єму. У точці 3 уся пара перетворилася у рідину, а рідина практично не стискається, тому крива 3–4 різко зростає вгору.



_____ критичної температури,
_____ – критичних тиску і об'єму.

Стан речовини при параметрах T_k , p_k і V_k називають **критичним станом** – _____

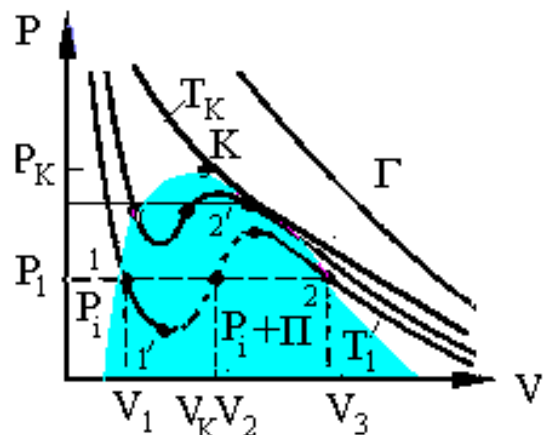
Газ, який знаходиться вище критичної ізотерми, неможливо методом стиснення перетворити у рідину. Для отримання рідини такого газу необхідно охолодити його до температури нижчої за критичну.

За деяких умов можуть бути реалізовані **метастабільні стани**:

- ділянка ізотерми 1–1' відповідає _____,
- 2–2' _____.

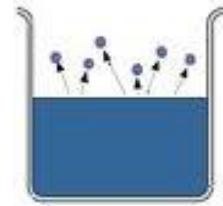
Відрізки, що з'єднують стани 1 та 2 відповідають _____

Таким чином проста модель реального газу Ван-дер-Ваальса є достатньо наближеною до експериментальних кривих, окрім ділянки ізотерм 1'–2', які у реальних ізотермах відсутні.



5. Насичена та ненасичена пара. Вологість повітря

Молекули рідини знаходяться в неперервному хаотичному русі. Якщо молекула рідини з'являється біля поверхні, то вона може набути швидкості, достатньої для подолання притягання з боку інших молекул і вийти в простір над рідиною.



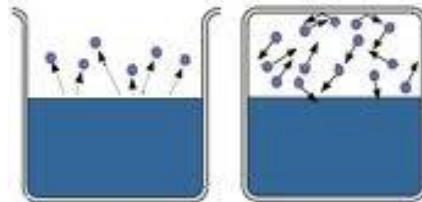
_____, називають **парою**, _____
_____ – **пароутворенням**.

_____ називають **випаровуванням**.
Молекули пари, рухаючись хаотично, можуть набути швидкості, напрямленої, наприклад, в бік рідини, і до неї повернутись.

_____ називають **конденсацією**.

Оскільки з рідини під час випаровування вилітають _____, то середня швидкість тих молекул, що залишились, _____, тому під час випаровування рідина _____ . Для підтримання температури такої рідини сталою необхідно _____. Внаслідок конденсації затрачене для випаровування тепло повертається.

У герметично закритій посудині через деякий час між рідиною та її парою наступить стан **теплової рівноваги**



_____, називають **насиченою**.

З поверхні водойм, вологого ґрунту, листків рослин, легенів і шкіри тварин та людини в атмосферу Землі випаровується величезна кількість водяної пари – приблизно 1014 тон на рік, тому атмосферне повітря завжди вологе. Вміст водяної пари в повітрі, тобто його вологість, можна охарактеризувати декількома величинами.

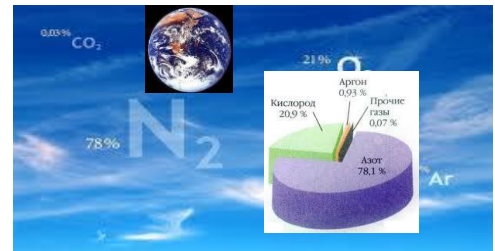


Вміст водяної пари в повітрі, тобто його вологість, можна охарактеризувати декількома величинами:

- абсолютною вологістю,
- відносною вологістю.

Абсолютна вологість – _____

Атмосферне повітря є сумішшю різних газів (N₂ = 78 %, O₂ = 21 %, інертні гази, водяна пара).



_____ , називають *парціальним тиском водяної пари*.

За парціальним тиском водяної пари не можна судити про те, наскільки водяна пара в цих умовах близька до насиченої. Величина, яка показує наскільки водяна пара за певної температури близька до насичення, називають *відносною вологістю повітря*.

Відносна вологість – це _____

_____ :

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \quad \text{або} \quad \varphi = \frac{p}{p_n},$$

де ρ – _____ ;

ρ_n – _____ .

Вологість повітря вимірюють _____

Психрометр складається з двох термометрів: резервуар одного з них, який показує температуру повітря, залишається сухим, резервуар другого оточений шматком тканини, зануреної у воду. Вода випаровується і завдяки цьому термометр охолоджується. Чим більша відносна вологість, тим менш інтенсивне випаровування і тим вищу температуру показує термометр, оточений вологою тканиною. За різницею температур термометрів і спеціальною таблицею можна визначити відносну вологість повітря.

Для людини сприятливим є повітря з відносною вологістю $\rho = 40 - 60\%$. Якщо температура ненасиченої пари знижується, то її відносна вологість буде зростати без додаткового випаровування води.

_____ , називають **точкою роси**.

Визначити точку роси можна за допомогою **гігрометра** – пристрою, що має дзеркальну поверхню. Цю поверхню охолоджують під час випаровування легкої рідини типу ефіру і приводять до конденсації пари в шарах повітря, що прилягають до дзеркальної поверхні. За вимірним термометром значенням точки роси знаходять густину пари, що відповідає абсолютній вологості ρ . Густину насиченої пари ρ_n при температурі досліду знаходять з таблиці.

Вимірюють вологість також за допомогою волосяного гігрометра, дія якого ґрунтується на властивості волосини людини змінювати свою довжину у вологому повітрі. Унаслідок збільшення вологості довжина волосини зростає, а зі зменшенням вологості волосина коротшає.



Значення вологості повітря



Прогноз погоди



Виробництво тканин, цукерок



Бібліотеки, музеї



Картинні галереї



Лікарні, поліклініки, аптеки



Для людини нормальною є вологість повітря 40-60%



Зберігання овочів, фруктів, продуктів харчування

Якщо _____, то таку трубку називають *капіляром*. Поведінка рідини у капілярах цікава тим, що при змочуванні рідиною трубки, за рахунок лапласового тиску, вона піднімається на деяку висоту h , а при незмочуванні навпаки опускається на деяку глибину h .

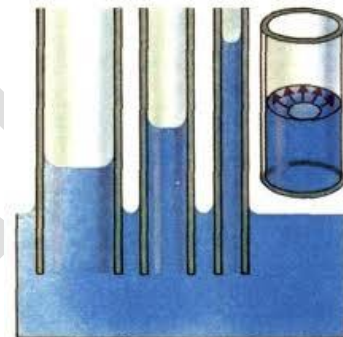
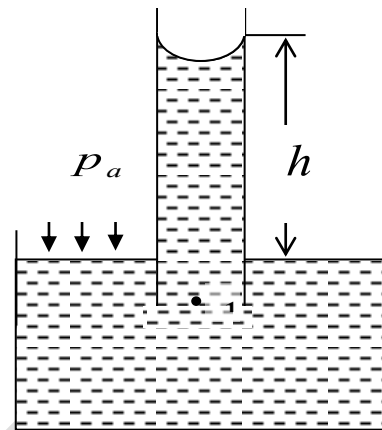
Висота підняття рідини у капілярі може бути визначена так: тиск у точці I (рис.) на початку занурення буде меншим атмосферного на Δp (тиск Лапласа), оскільки кривизна поверхні рідини направлена вгору. Щоб компенсувати цю різницю тисків, рідина має піднятися на висоту h , щоб гідростатичний тиск ρgh дорівнював лапласовому тиску Δp .

Нехай $R_1 = R_2 = r$ (трубка циліндричної форми), де r – радіус трубки. Тоді

$$\Delta p = \quad \text{або} \quad ,$$

тоді висота підняття (опускання) рідини у капілярі:

$$h = \frac{\quad}{\quad} .$$

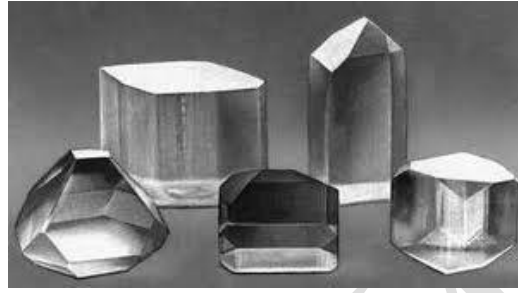


Капілярні явища відіграють значну роль у житті людини. Наприклад, вологообмін у ґрунті і в рослинах відбувається за рахунок підняття вологи по капілярах. Товщина таких капілярів мала. Капілярністю пояснюється поглинання вологи бетоном і рушником. Кровообіг у віддалених частинах тіла відбувається також за рахунок капілярів.



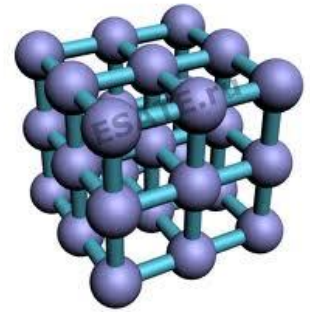
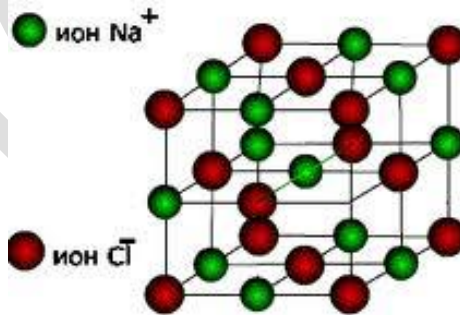
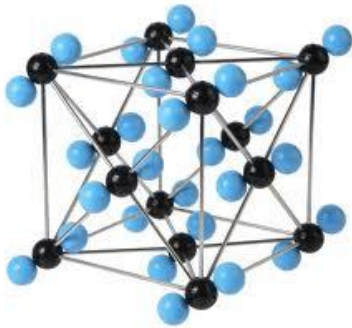
7. Властивості кристалів, будова їх кристалічних решіток

Тверді тіла або кристали характеризуються наявністю значних сил міжмолекулярної взаємодії і зберігають сталими не лише свій об'єм, але й форму. Кристали мають правильну геометричну форму, які є результатом впорядкованого розташування частинок (атомів, молекул, іонів), що складають кристали.



_____, називають *кристалічною решіткою*.

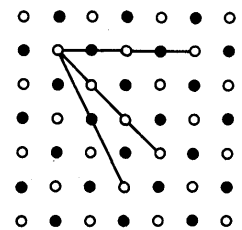
_____, називають *вузлами кристалічної решітки*.



Кристалічні тіла поділяють на дві групи:

1. *монокристали* – _____

_____.



Монокристалами є більшість мінералів. Однак крупні природні кристали зустрічаються доволі рідко (наприклад, лід, виварна сіль, ісландський шпат). Більшість монокристалів вирощують штучно, що є складним процесом, оскільки потребує точного дотримання не простих умов (чистого розчину, повільного охолодження, повної відсутності зовнішніх впливів).



Характерною особливістю монокристалів є їх *анізотропність* – _____

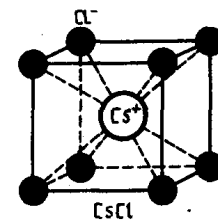
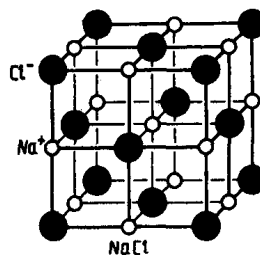
2. *полікристали* – тверді тіла, що складаються з великої кількості неупорядкованих дрібних кристалічних зерен (більшість гірських порід, метали, сплави).



Класифікацію кристалів здійснюють за двома ознаками:

1. *кристалографічною* – в її основі лежить просторова періодичність і симетрія у розташуванні частинок кристалів, не враховуючи внутрішньої їх структури.
2. *фізичною* – в залежності від роду частинок, розташованих у вузлах кристалічної решітки, і характеру сил взаємодії між ними кристали поділяють на чотири типи:

- *Іонні кристали.* У вузлах іонної решітки чергуються позитивні й негативні іони. Іонний (гетерополярний) зв'язок обумовлений силами притягання між різноіменно зарядженими іонами.

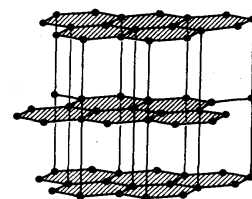
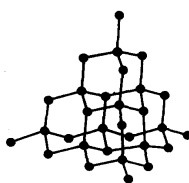


Переважає більшість кристалів має іонну решітку, наприклад, NaCl, CsCl, KBr, MgO, CaO і т.д. В іонній решітці не можна виділити окремі молекули, оскільки кристали являють собою якби одну гігантську молекулу.

- *Атомні кристали.* У вузлах кристалічної ґратки розташовані нейтральні атоми, що утримуються ковалентними або гомеополярними зв'язками квантово-механічного походження (валентні електрони сусідніх атомів є спільними для сусідніх атомів).

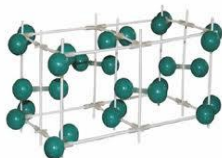


Атомними кристалами є алмаз і графіт (два стани вуглецю), деякі неорганічні сполуки (ZnS, BeO і т. д.), а також напівпровідники – германій Ge и кремній Si.



- Металічні кристали.

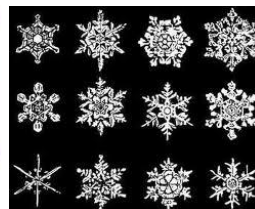
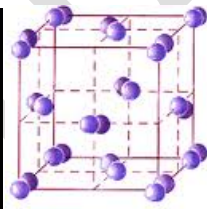
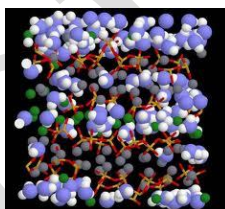
У вузлах кристалічної решітки розташовані позитивні іони металу. Валентні електрони, порівняно



слабко пов'язані з атомами, відділяються від атомів і колективізуються, тобто належать всьому кристалу в цілому, а не одному атому, як у випадку іонного зв'язку, не парі сусідніх атомів, ковалентного зв'язку. Тобто в металах між позитивними іонами рухаються вільні електрони, які забезпечують гарну провідність металів.

- Молекулярні кристали.

У вузлах кристалічної решітки розташовані нейтральні молекули речовини, сили взаємодії між якими



обумовлені незначним взаємним зміщенням електронів в електронних оболонках атомів. Наприклад, більшість органічних з'єднань (парафін, спирт, гума і т. д.), інертні гази (Ne, Ar, Kr, Xe) і гази CO₂, O₂, N₂ у твердому стані, лід, а також кристали брому Br₂, йоду I₂.

8. Дефекти кристалічних решіток

Ідеальні кристалічні структури існують лише в досить малих об'ємах реальних кристалів, в яких завжди є відхилення від упорядкованого розташування частинок у вузлах решітки.

_____ називають дефектами кристалічної решітки.

Дефекти поділяють на:

1. **макроскопічні,** _____

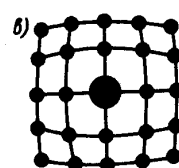
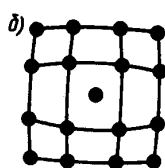
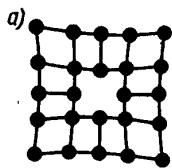
2. **мікроскопічні,** _____

Мікроефекти поділяють на **точкові** і **лінійні**.

Точкові дефекти бувають трьох типів:

1) **вакансії** – _____

_____ (рис. а);



2) **міжвузловий атом** – _____

_____ (рис. б);

3) **домішковий атом** – _____

Точкові дефекти порушують лише ближній порядок у кристалах, не чіпаючи дальнього порядку – їх характерна особливість.

Лінійні дефекти _____

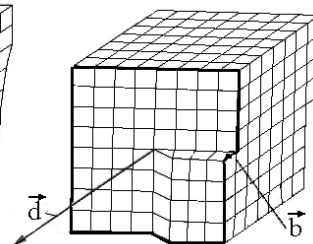
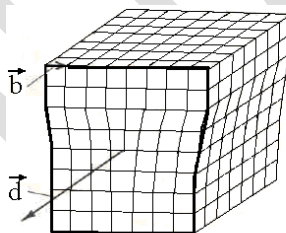
_____ називають **дислокаціями**.

Найпростішими видами дислокацій є **крайова** (_____

_____ (рис. а)

і **гвинтова дислокації** (_____

_____).



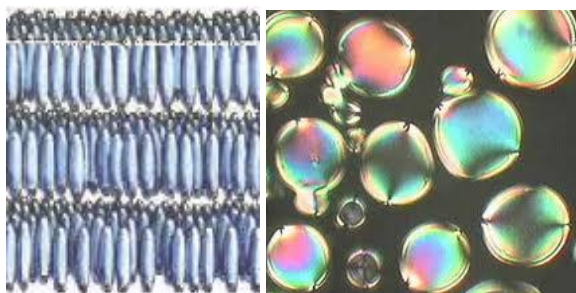
Будь-яка конкретна дислокація може бути представлена як поєднання крайової й гвинтової дислокацій.

Наявність дефектів у кристалічній структурі впливає на властивості кристалів.

9. Рідкі кристали. Аморфні речовини. Будова полімерів

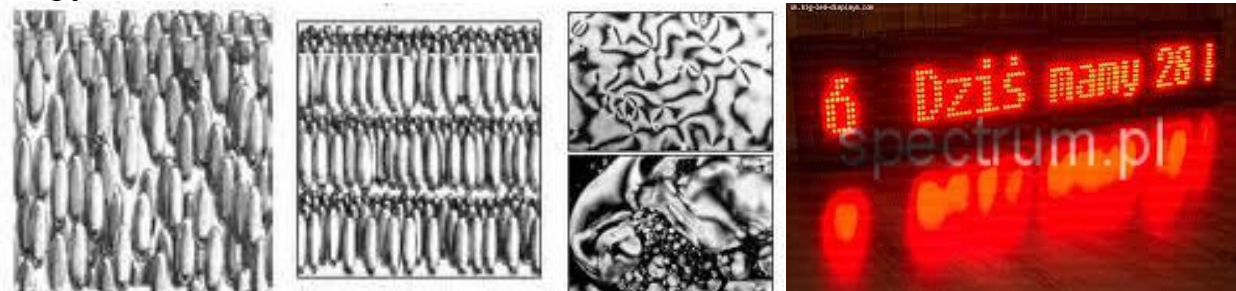
Рідкий кристал – _____

Рідкий кристал – проміжна фаза між ізотропною рідиною і кристалічним твердим тілом. Рідкі кристали це флюїди, молекули яких певним чином впорядковані, тобто існує певна симетрія. Як наслідок, існує анізотропія механічних, електричних, магнітних та оптичних властивостей речовин цього класу.



Поєднуючи властивості рідин та твердих тіл (текучість, анізотропія), рідкі кристали проявляють специфічні ефекти, багато з яких не спостерігаються у рідинах та твердих тілах.

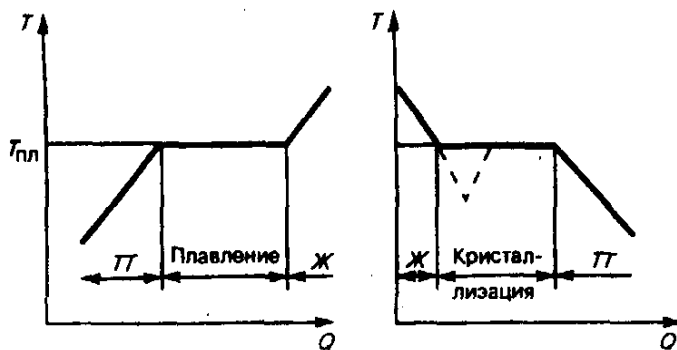
Зокрема, в рідких кристалах спостерігається подвійне променезаломлення, флексоелектричний ефект (виникнення електричного поля при деформації рідкого кристалу), перехід Фредерікса (переорієнтація молекул рідкого кристалу в комірці за наявності прикладеної до цієї комірки напруги).



Сфери застосування рідких кристалів: цифрова індикація; перетворення інфрачервоного випромінювання на видиме; виготовлення плоских екранів моніторів; термоіндикація; ультразвукова медична діагностика.



Якщо рідину охолоджувати (відбираючи певну кількість теплоти), то _____



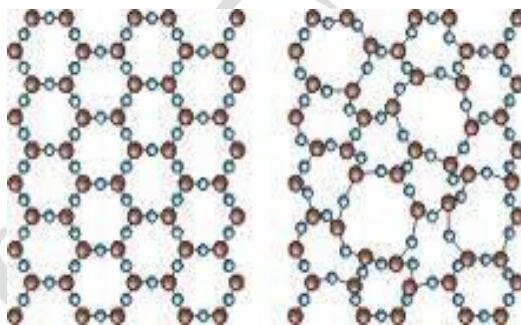
Для кристалізації речовини необхідним є наявність **центрів кристалізації** – _____



переохолоджена рідина.

При сильному переохолодженні починається спонтанна стрімка кристалізація речовини.

Зазвичай переохолодження розплаву відбувається протягом часток або десятків градусів, але для ряду речовин може досягати сотень градусів. Через значну в'язкість сильно переохолоджені рідини гублять текучість, але як і тверді тіла зберігають свою форму. Ці тіла називають **аморфними твердими тілами**. До них відносять смоли, сургуч, скло.



Аморфні тверді тіла – це _____

Аморфні тіла



скло



янтар



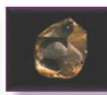
каніфоль



цукерки



кремнезем



смола



Полімери – _____



Полімерам властиві міцність і еластичність (деякі полімери витримують розтяг, що у 5-10 раз перевищує їх початкові розміри). Це пояснюється тим, що довгі молекулярні ланцюжки можуть при деформаціях або згортатися у щільні клубки, або витягуватися у пряму лінію.



Еластичність полімерів проявляється тільки в певному інтервалі температур, нижче якого вони стають твердими і крихкими, а вище – пластичними. Хоча синтетичних полімерних матеріалів створено дуже багато (штучні волокна, штучна шкіра, будівельні матеріали, замітники металів та ін.), але теорія полімерів до теперішнього часу повністю не розроблена. Її розвиток визначається запитами сучасної техніки, що вимагає синтезу полімерів з наперед заданими властивостями.

10. Уявлення про старіння та довговічність матеріалів.

Старінням матеріалів називають _____

Старіння характеризується зміною в часі структури та якості будівельних матеріалів (металів, бітумів, полімерних матеріалів тощо) під дією різних факторів у процесі експлуатації.

До фізичних (природних) факторів старіння відносять:

- зміну температури,
- дію ультрафіолетового випромінювання і озону (світлостійкістю і озоностійкістю мають володіти ізолятори на лініях електропередач для запобігання деструкції полімерів),
- вітрові навантаження (“пляска проводів” при поривах вітру, “парусність” опор і проводів призводять до їх деформацій і руйнацій),



Хімічні фактори старіння полягають у дії хімічних реагентів. Як то, гума, яку використовують для герметизації, набухає у більшості розчинниках, що призводить до розгерметизації. Дія вологи на будівельні матеріали зменшує механічну міцність і твердість, а періодичне зволоження і висушування призводить до короблення, розтріскування або розшарування. Корозією металу називають хімічні перетворення матеріалів (перед усім окислення), під дією факторів навколишнього середовища.

Біологічні фактори старіння – це перед усім дія грибків та мікроорганізмів на матеріали. Наприклад, грибки викликають гниття дерев'яних виробів.

Довговічність – _____

Довговічність характеризує властивість матеріалу (виробу) з необхідними перервами на ремонт зберігати робочу здатність до граничного стану, який характеризується ступенем руйнування виробу, вимогами безпеки й економічної доцільності. Довговічність оцінюють допустимим строком служби. Наприклад, нормативними документами для залізобетонних виробів установлені три ступені довговічності:

- 1 – не менш як 100 років,
- 2 – не менш як 50 років,
- 3 – не менш як 20 років.

11. Фази та фазові перетворення

Дайте самостійно відповіді на питання та опрацюйте наступний матеріал:

- ✓ що таке фаза, фазова рівновага та фазовий перехід;
- ✓ що таке фазові переходи I і II роду;
- ✓ зобразити діаграму фазових пехеходів I роду;
- ✓ назвати і описати фазові переходи I роду, записати формули кількості теплот, які надаються або виділяються при фазових переходах I роду.

РУКОПИС

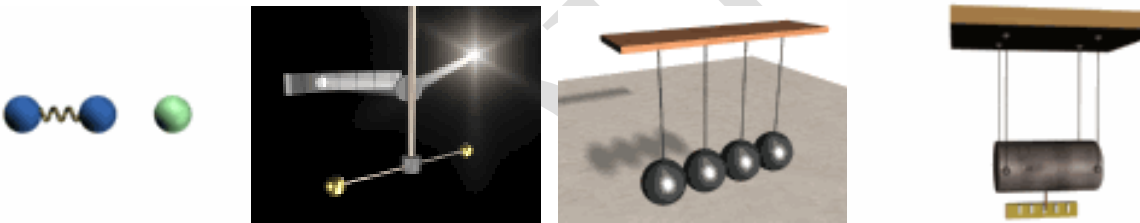
РОЗДІЛ IV. КОЛИВАЛЬНІ ТА ХВИЛЬОВІ ПРОЦЕСИ. ОПТИКА

Лекція 6. Механічні та електромагнітні коливальні процеси

1. Коливальні процеси та їх класифікація
2. Гармонічні коливання та їх характеристики
3. Перетворення енергії при гармонічних коливаннях
4. Механічні осцилятори
5. Електричний коливальний контур і процеси в ньому
6. Додавання коливань

1. Коливальні процеси та їх класифікація

Коливальним процесом або коливанням називають _____



Залежно від фізичної природи процесу, що повторюється, розрізняють:

- _____,
- _____,
- _____...

Залежно від характеру дії на систему, що коливається, розрізняють:

- вільні (або власні) коливання – _____

- вимушені коливання – _____

- аперіодичні процеси – _____

- параметричні коливання – _____

- автоколивання – _____

_____;
- релаксаційні коливання – _____

_____.

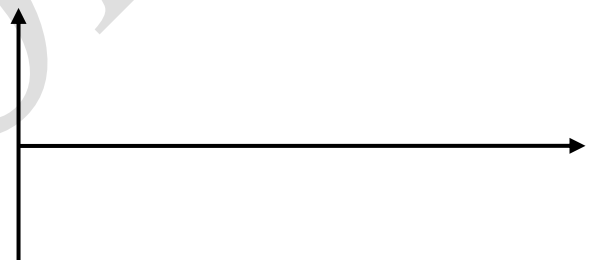
Прикладом механічної автоколивальної системи може бути годинник. Храповий механізм підштовхує маятник у такт до його коливань. Енергія, що передається при цьому маятнику, береться або за рахунок пружини, яка розкручується, або за рахунок вантажу, який опускається. Електромагнітними автоколивальними системами є двигуни внутрішнього згорання, парові турбіни, лампові генератори тощо.



Вільні коливання можуть бути незгасаючими або згасаючими, залежно від того чи діють на систему сили тертя і опору.

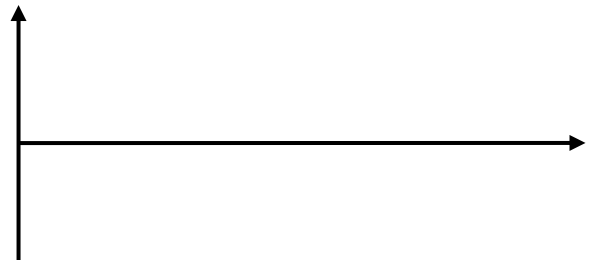
Незгасаючі коливання – _____

_____.



Згасаючі коливання – _____

_____.



2. Гармонічні коливання та їх характеристики.

Гармонічні коливання – _____

_____.

$$x = x(t) =$$

або

– рівняння гармонічних коливань

$$q = q(t) =$$

де A (q_0) – _____

ω_0 – _____

$$\omega_0 = 2\pi\nu, \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}, \quad \nu = \frac{1}{T},$$

ν – _____

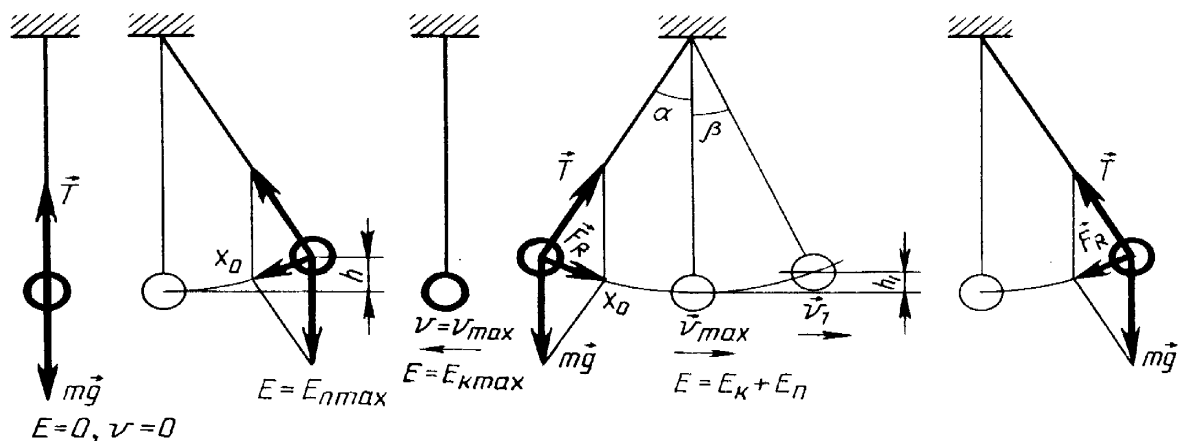
T – _____

$\omega_0 t + \varphi_0$ – _____

φ_0 – _____

Рівняння гармонічних коливань, як відомо з курсу вищої математики, є розв'язком диференціального рівняння:

3. Перетворення енергії при гармонічних коливаннях



Знайдемо швидкість і прискорення матеріальної точки, яка здійснює гармонічні коливання, для цього візьмемо похідні першого і другого порядків від рівняння гармонічних коливань:

$$x = x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \dots,$$

або

$$v = \dots,$$

де $\omega_0 A$ – _____;

$$a = \frac{dv}{dt} = \dots,$$

або

$$a = \dots,$$

де $\omega_0^2 A$ – _____.

Із виразів швидкості і прискорення видно, що матеріальної точки здійснюють гармонічні коливання з тією самою частотою ω_0 , що і коливання зміщення. Проте між коливаннями зміщення і коливаннями швидкості та прискорення існує різниця (або зсув) фаз. Коливання швидкості випереджають коливання зміщення за фазою на $\pi/2$, а коливання прискорення випереджають коливання зміщення за фазою на π .

Згідно II закону Ньютона, якщо тіло рухається з прискоренням, то на нього діє сила $\vec{F} = \dots$.

Враховуючи рівняння зміни прискорення з часом, визначимо **силу**, під дією якої здійснюються гармонічні коливання:

$$F = \dots$$

Кінетична енергія матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання, дорівнює:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \dots$$

Потенціальна енергія матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання під дією пружної сили F , дорівнює:

$$E_n = -\int_0^x F dx = \dots$$

Повна енергія матеріальної точки, що здійснює гармонічні коливання, дорівнює:

$$E_{пов} = E + E_n = \dots$$

тобто повна енергія системи, що здійснює гармонічні коливання _____

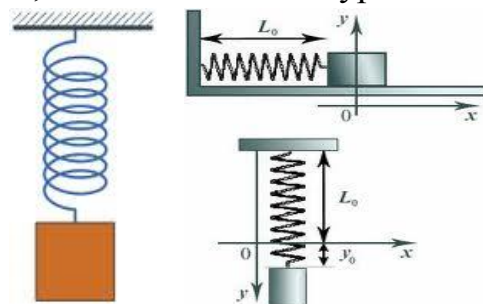
4. Механічні осцилятори

Гармонічним осцилятором називають _____

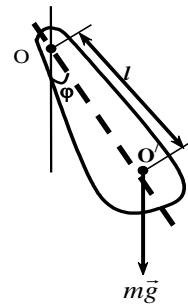
_____ :

Коливання гармонічного осцилятора є важливим прикладом періодичних рухів і слугують точною або наближеною моделлю багатьох задач класичної і квантової фізики. Прикладом гармонічного осцилятора є пружинний, фізичний і математичний маятники, коливальний контур.

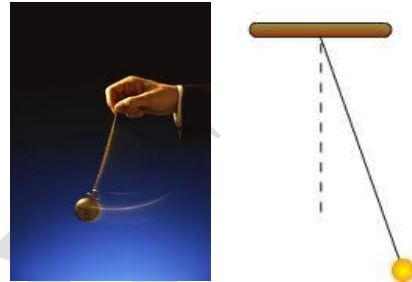
Пружинний маятник – _____



Фізичний маятник – _____

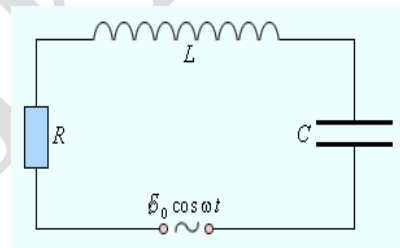


Математичний маятник – _____



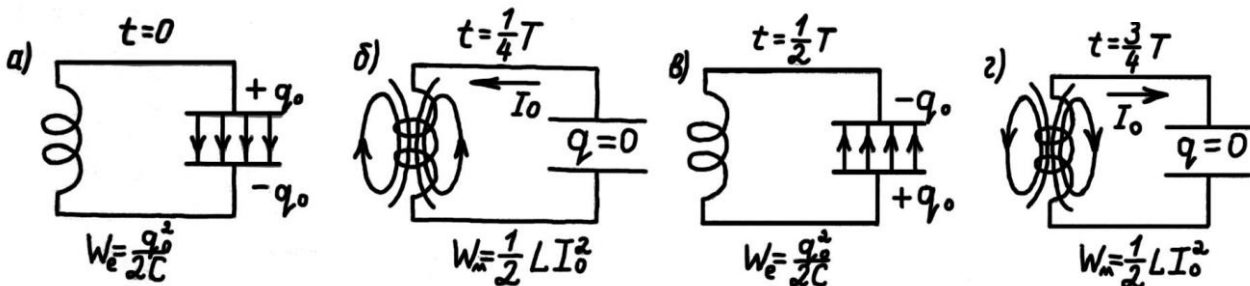
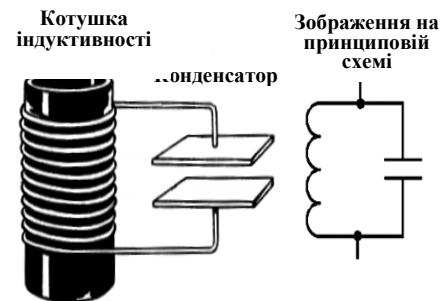
5. Електричний коливальний контур і процеси в ньому

Коливальним контуром називають _____



Розглянемо спочатку процеси, що відбуваються в ідеальному коливальному контурі.

Ідеальним коливальним контуром (або контуром Томсона) називають _____



Нехай у початковий момент часу $t=0$ від стороннього джерела на обкладках конденсатора зосереджено заряд $q=q_0$, тоді напруга і відповідно енергія електричного поля, зосередженого між обкладками конденсатора:

$$U = \frac{q_0}{C}, W_e = \frac{q_0^2}{2C}.$$

В наступний момент у колі почне виникати розрядний струм, який набуває максимального значення поступово, через струм самоіндукції, що виникає у котушці і за правилом Ленца напрямлений проти наростаючого розрядного струму. Через час $t = \frac{1}{4}T$ конденсатор розряджається повністю ($q=0$), а струм у котушці досягає максимального значення ($I=I_0$). У цей момент енергія електричного поля конденсатора повністю перетворюється в енергію магнітного поля котушки $W_m = \frac{1}{2}LI^2$, а сила струму самоіндукції дорівнює нулеві. У наступний момент струм у колі при тому самому напрямі починає спадати за значенням. Знову виникає струм самоіндукції, який тепер вже має той самий напрям, що й розрядний струм і спричиняє затримку спадання струму і перезаряджання конденсатора. У момент часу $t = \frac{1}{2}T$ сила струму у колі дорівнює нулеві $I=0$, магнітне поле котушки перетворюється в електричне поле конденсатора, напруженість якого має протилежний напрям порівняно з початковим станом $t=0$. Далі конденсатор знову розряджається, виникає розрядний струм протилежного напрямку.

Електромагнітними коливаннями називають _____

6. Додавання коливань.

Якщо система приймає участь одночасно у декількох коливаннях, то в залежності від їх частот і напрямку, розрізняють декілька типів результуючих коливань:

1. При додаванні гармонічних коливань одного напрямку і однакової частоти ω_0 :

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1),$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2),$$

результуючі коливання будуть відбуватися з тією ж частотою ω_0 за законом:

$$x = \quad ,$$

з амплітудою A , і початковою фазою φ , які задаються відповідними рівняннями:

$$A^2 = \quad ,$$

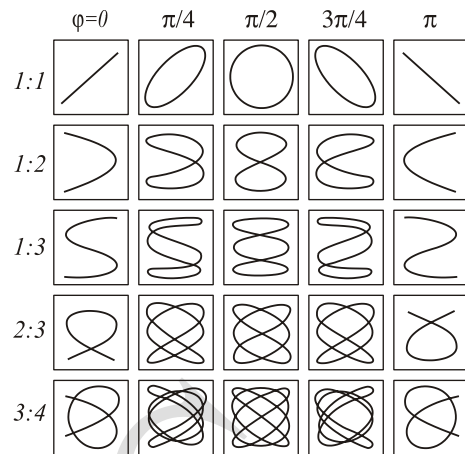
$$\operatorname{tg} \varphi = \quad .$$

II. При додаванні гармонічних взаємно перпендикулярних коливань однакової частоти:

$$x = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1),$$

$$y = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2).$$

вигляд результуючих коливань буде різним і досить складним, у залежності від співвідношення частот і різниці фаз двох взаємно перпендикулярних коливань.



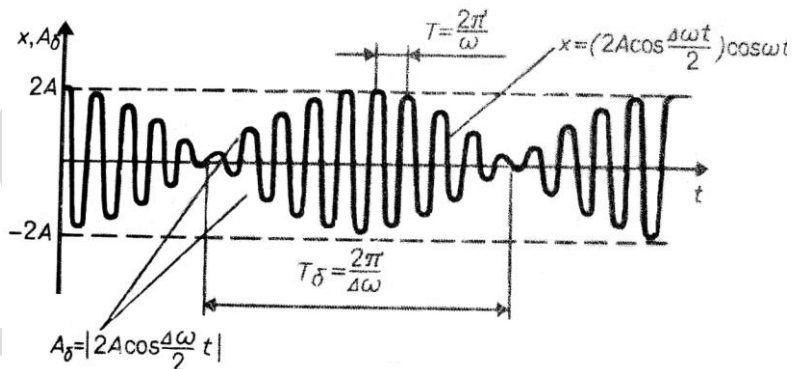
називають **фігурами Ліссажу** (рис.).

III. При додаванні гармонічних коливань одного напрямку і не однакої частоти для практики особливий інтерес має випадок, коли два гармонічні коливання одного напрямку, що додаються мало відрізняються за частотою:

$$x_1 = A \cos \omega_0 t,$$

$$x_2 = A \cos(\omega_0 + \Delta\omega)t.$$

У результаті накладання таких коливань отримують коливання з періодично змінною амплітудою.



називають **биттям** (рис.).

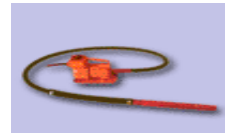
IV. Додамо гармонічні коливання одного напрямку і різних частот:

Будь-які негармонічні періодичні коливання можна представити сумою гармонічних коливань. Таке представлення здійснюється на основі теореми Фур'є, яка дає можливість математично розрахувати для будь-якої функції $f(t)$ з періодом T ряд гармонічних функцій з певними амплітудами і фазами, частоти яких кратні основній частоті:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + a_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots + a_n \cos(n\omega_0 + \varphi_n).$$

У будівництві широко використовують пристрої, які, створюючи механічні коливання, сприяють активному ущільненню рідких і сипучих матеріалів – **вібратори**:

- глибинні вібратори призначені для ущільнення бетонних сумішей при укладці їх у монолітні армовані конструкції, при виготовленні бетонних і залізобетонних виробів для збірного будівництва;
- площинні вібратори призначені для ущільнення бетонних сумішей і ґрунтів, транспортування, вивантаження і просіювання сипучих матеріалів;
- навісні глибинні вібратори використовуються при укладці бетону в неармованих масивах, використовуються для швидкісного будівництва автодоріг, злітних смуг аеродромів, блоках гідротехнічних споруд, проробці бетонних сумішей у будівельних конструкціях;
- вібратори з направленими коливаннями призначені для збудження направлених коливань в установках для ущільнення бетонних сумішей, у вібротранспортерах, при вивантаженні і просіюванні сипучих матеріалів тощо.



Колівальні процеси у будівництві відіграють і негативну роль, так звані вібрації, джерелами яких виступають інженерне і санітарно-технічне обладнання, промислові установки і транспортні засоби (метрополітен, вантажні автомобілі, трамвай, залізниця), які створюють значні динамічні навантаження, викликаючи поширення вібрацій у ґрунті та будівельних конструкціях. Захист будівельних конструкцій здійснюється через зниження динамічного навантаження від джерел вібрацій, перешкоджання поширенню цих навантажень шляхом віброізоляції чи застосування екрануючих пристроїв у ґрунті (траншей).

Окрім цього, при будівництві обов'язково необхідно враховувати природні коливання земної поверхні – сейсмічність (причину циклонів, тайфунів, повеней, цунамі, оповзнів та землетрусів).



Лекція 7. Диференціальні рівняння коливальних процесів

1. Диференціальне рівняння коливань та їх розв'язки
2. Характеристики згасаючих коливань
3. Вимушені коливання. Резонанс, його роль у техніці
4. Нелінійні коливальні системи

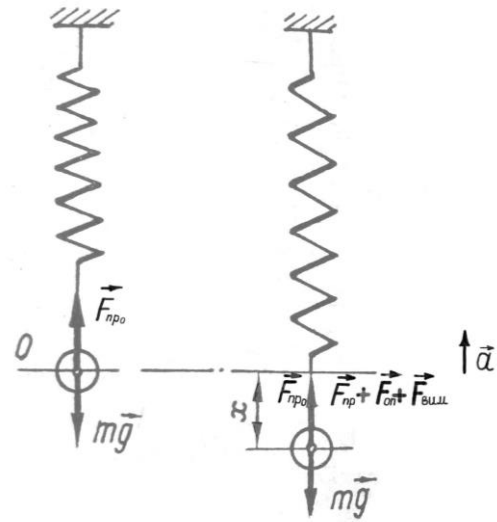
1. Диференціальне рівняння коливань та їх розв'язки

Розглянемо основні коливальні системи (гармонічні осцилятори) та виведемо для них диференціальні рівняння руху для вільних незгасаючих коливань, вільних згасаючих коливань та вимушених коливань.

Виведемо диференціальні рівняння коливань пружинного маятника.

Якщо пружинний маятник вивести з положення рівноваги (наприклад, розтягнувши пружину), то крім сили тяжіння $\vec{F}_{тяж}$ і сили пружності $\vec{F}_{лр0}$, векторна сума яких дорівнює нулю, на тіло масою m починають діяти сила пружності $\vec{F}_{лр}$, яка намагається повернути систему у початкове положення, сила опору повітря $\vec{F}_{оп}$ і вимушуючі сила $\vec{F}_{вим}$ під дією яких тіло починає рухатись з прискоренням \vec{a} .

Запишемо основне рівняння динаміки поступального руху:



спроjektуємо це рівняння на вісь Oy направлену для зручності вертикально вгору:

поділимо ліву і праву частини рівності на m :

введемо позначення:

$$\frac{r}{m} = \quad , \quad \frac{k}{m} = \quad , \quad \frac{F_0}{m} = \quad ,$$

де δ — _____,
 ω_0 — _____,
 f_0 — _____.

Тоді диференціальне рівняння вимушених коливань буде мати вигляд:

Диференціальне рівняння вільних згасаючих коливань ($\vec{F}_{вим} = 0$):

його розв'язок:

Диференціальне рівняння вільних незгасаючих коливань ($\vec{F}_{он} = 0$):

його розв'язок:

Електромагнітними коливаннями називають _____

Розглянемо реальний коливальний контур, який складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю С, котушки індуктивності L, омичного опору R і джерела змінної за гармонічним законом ЕРС.

Запишемо закон Ома для цього контуру:

враховуючи, що,

$$U_c = \quad , \quad \varepsilon_{si} = \quad , \quad \varepsilon_{306} = \quad ,$$

залишимо у правій сторони рівняння лише зовнішню ЕРС

враховуючи, що $I = \frac{dq}{dt}$,

Поділимо праву і ліву частини останнього рівняння на L :

Введемо позначення:

$\frac{R}{L} = \dots$, де $\delta = \dots$,

$\frac{1}{LC} = \dots$, де $\omega_0 = \dots$.

Матимемо:

Диференціальні рівняння вимушених електромагнітних коливань:

Якщо в коливальному контурі буде відсутнє джерело зовнішньої ЕРС ($\mathcal{E}_{зовн} = 0$), тоді в контурі будуть виникати вільні згасаючі коливання.

Диференціальне рівняння вільних згасаючих електромагнітних коливань:

Розв'язком диференціального рівняння вільних згасаючих коливань є:

Якщо ж у коливальному контурі буде відсутнім опір навантаження, тобто $R = 0$ ($\delta = 0$), то отримаємо ідеальний коливальний контур Томсона, в якому будуть виникати вільні незгасаючі коливання:

Диференціальне рівняння вільних незгасаючих електромагнітних коливань:

Розв'язком диференціального рівняння вільних незгасаючих коливань є:

де $\omega_0^2 =$, враховуючи, що період власних коливань пов'язаний з циклічною частотою рівнянням $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$:

Отримаємо **формулу Томсона**:

$$T =$$

2. Характеристики згасаючих коливань

Швидкість згасаючих коливань характеризується коефіцієнтом згасання δ . Для визначення коефіцієнта згасання залежність амплітуди від часу

подамо у вигляді логарифмічної функції:

звідки

$$\delta =$$

Якщо $\frac{A_0}{A} = e \approx 2,71828\dots$, то

$$\delta = \frac{1}{t_e}$$

Отже, **коефіцієнт згасання δ** – це _____

Якщо два моменти часу коливань відрізняються на період, то відношення їх амплітуд $\frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} =$ називають **декрементом**

згасання, а його логарифм

$$\chi = \ln \frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} =$$

називають **логарифмічним декрементом згасання χ** – _____

Для характеристики коливальної системи використовують її **добротність Q** , яка при малих значеннях логарифмічного декремент становить

$$Q =$$

(T приймається рівним T_0 , оскільки згасання малі ($\delta^2 \ll \omega_0^2$)).

Добротність Q – _____

3. Вимушені коливання. Резонанс, його роль у техніці

Повернемося до отриманого нами диференціального рівняння вимушених електромагнітних коливань:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \omega t.$$

Розв'язавши це рівняння, побачимо, що амплітуда зміни заряду вимушених коливань залежить від амплітуди змінної ЕРС ε_0 :

$$q_0 =$$

Зсув фаз φ між величиною заряду, що коливається, і зовнішньою періодичною електрорушійною силою

$$\varphi =$$

Тоді розв'язком диференційного рівняння другого порядку вимушених електромагнітних коливань

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \omega t.$$

буде сума загального розв'язку однорідного рівняння і частинного розв'язку неоднорідного рівняння:

$$q_1 = \dots,$$

$$q = \dots.$$

Резонансом називають _____

Амплітуда зміни заряду вимушених коливань матиме максимальне значення за умови: $\frac{dq_0}{d\omega} = 0$, тобто під час резонансу.

$$\begin{aligned} \frac{dq_0}{d\omega} &= \frac{d\left(\frac{\varepsilon_0}{L} [(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\delta^2 \omega^2]^{-\frac{1}{2}}\right)}{d\omega} = \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0}{L} [(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\delta^2 \omega^2]^{-\frac{1}{2}+1} [2(\omega_0^2 - \omega^2)(-2\omega) + 2 \cdot 4\delta^2 \omega] = 0 \\ \frac{dq_0}{d\omega} &= -\frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0}{L} [(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\delta^2 \omega^2]^{-\frac{1}{2}} [-4(\omega_0^2 - \omega^2)\omega + 8\delta^2 \omega] = 0. \end{aligned}$$

Так як підкореневий вираз нулеві дорівнювати не може, то

$$[-4(\omega_0^2 - \omega^2)\omega + 8\delta^2 \omega] = 0, \quad -4\omega(\omega_0^2 - \omega^2 - 2\delta^2) = 0,$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 - 2\delta^2,$$

тоді **циклічна частота зовнішньої ЕРС, при якій спостерігається явище резонансу:**

$$\omega_{рез} = \dots.$$

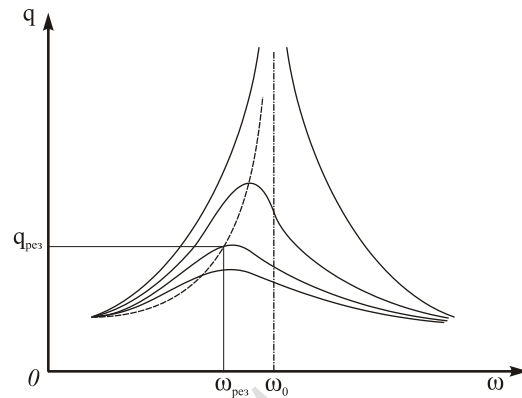
Підставивши $\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$ у $q_0 = \frac{\varepsilon_0}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}}$, визна-

чимо значення резонансної амплітуди заряду:

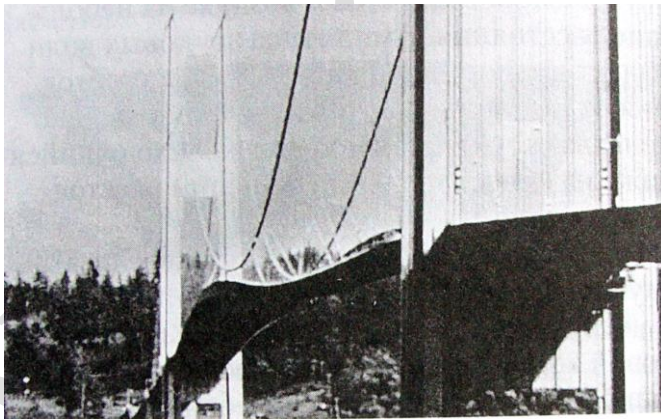
$$q_{0\max} =$$

Якщо $\delta^2 \ll \omega_0^2$, то $\omega_{\text{рез}} \rightarrow \omega_0$, тоді $q_{0\max} \rightarrow \infty$, що й видно з графіків, які називають **резонансними кривими**.

Аналогічний вигляд мають вирази амплітуди і зсуву фаз для вимушених механічних коливань (запишіть їх самостійно), а також резонансні криві.



У будівництві і техніці явище механічного резонансу зазвичай має негативну дію, яку слід враховувати під час конструювання різних машин і споруд, проектуванні житлових будинків та промислових будівель. Вимушені коливання здійснюють висотні будинки, телевізійні башти, маяки, заводські димарі,



довгі мости під дією змінних аеродинамічних та інших сил, корпуси і фундаменти машин при обертанні незрівноважених роторів, двигуни автомобілів внаслідок зворотно-поступального руху поршнів. Їхня власна частота повинна значно відрізнятися від частоти змушуючих сили, щоб запобігти руйнувань.

Так сталася катастрофа вантового моста у містечку Пьюджет-Саунд штат Вашингтон (США) через протоку Такому в 1940 р. Міст з трьох прольотів мав довжину 1662 м. У день катастрофи швидкість вітру становила 18 м/с. Частота коливань моста досягла 36 Гц, потім раптово зменшилася до 14 Гц, вертикальні коливання обох підвісних систем відбувалися у протифазі. Це призвело до закручування проїзної частини моста навколо осі, яка проходить вздовж моста, що й зумовило його руйнування.

Застосування явища резонансу електричних кіл лежить в основі принципу роботи радіо і телебачення, оскільки налаштування радіо і телевізійних каналів відбувається на частоту трансляючої станції. Необхідно враховувати резонансні явища в потужних електричних колах – явища різкого зростання сил струмів і напруг, які призводять до плавлення проводки і пробією ізоляції. В побутових мережах це може призвести до пожеж, а в промислових масштабах до знеструмлення цілих районів енергоспоживачів.

4. Нелінійні коливальні системи

Лінійні коливальні системи

До лінійних коливальних систем належать всі види суцільних середовищ (газ, рідина, тверде тіло, плазма) при поширенні в них хвильових збурень малої амплітуди, коли параметри, які характеризують ці середовища (густина, пружність, провідність і т. д.), можна вважати постійними, незалежними від амплітуд хвиль.

Нелінійні коливальні системи

До нелінійних механічних систем відносять системи, в яких:

- модулі пружності тіл залежать від деформацій останніх – приводять до нелінійності зв'язків між напругою і деформаціями, тобто відбувається порушення закону Гуку $F_{np} = kx$;
- коефіцієнт тертя між поверхнями тіл залежить від швидкості ковзання, тобто спостерігається порушення закону $F_{on} = rV$;
- маси тіл залежать від їх швидкостей та прискорень, тобто виявляється порушення II закону Ньютона $F = ma$.

До нелінійних електричних систем відносять системи, в яких:

- наявні сегнетоелектрики, діелектрична проникність яких залежить від напруженості електричного поля, тобто зв'язок між електричними зарядами і напруженістю створюваного ними поля є нелінійним;
- не лінійним є зв'язок між напругою на кінцях провідника і силоміць струму що протікає по ньому, тобто спостерігається порушення закону Ома;
- існує нелінійна залежність між силою струму і напруженістю створюваного ним магнітного поля в магнетик (магнітною індукцією) та ін.

Диференціальні рівняння, що описують поведінку нелінійних систем є нелінійними.

Нелінійний характер коливань мають більшість будівельних споруд, що являють собою складні системи в яких є наявними розходження дисипативних характеристик у конструктивних елементах, наявність у вузлах і стиках конструктивних елементів пружних і дисипативних зв'язків, наявність приєднаних пристроїв і т.д. До таких інженерно-будівельних споруд можна віднести споруди із гнучкими елементами – висячі та вантові конструкції, а також їхні комбінації – мости, повітряні лінії електропередач, щогли, трубопровідні переходи, покриття ангарів, складів, оскільки вони зазнають дії складних динамічних навантажень, таких як вітер; природна, промислова і транспортна сейсміка; робота технологічного устаткування; впливи від руху транспорту і пішоходів; аварійні навантаження, як часткове або повне руйнування окремих конструктивних елементів, вибухи тощо. Важливою проблемою для таких споруд стає не тільки оцінка напружень у конструкціях, але і створення комфортних умов роботи персоналу, стабільності роботи устаткування. Для цього створюють нелінійні статико-динамічні моделі та оцінюють значення допустимих динамічних напружень, переміщень, швидкостей, прискорень, власних частот – для порівняння з припустимими величинами (наприклад, для пішохідних та автомобільних мостів існують заборонені діапазони власних частот).

Лекція 8. Хвильові процеси

1. Закономірності хвильових процесів. Поздовжні та поперечні хвилі
2. Рівняння гармонічної хвилі, диференціальне хвильове рівняння
3. Швидкість механічних хвиль в газах, рідинах та твердих тілах
4. Інтерференція механічних хвиль
5. Ефект Доплера
6. Потік енергії хвилі
7. Звукові хвилі, їх основні характеристики. Ультра- та інфразвук. Акустика приміщень та споруд

1. Закономірності хвильових процесів. Поздовжні та поперечні хвилі

Хвилею, або *хвильовим процесом* називають _____

Суцільним вважають *середовище*, яке _____

При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а коливаються навколо своїх положень рівноваги. Разом з хвилею від частинки до частинки середовища передаються лише стан коливального руху і його енергія.

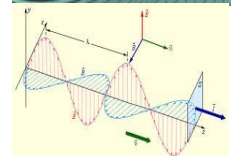
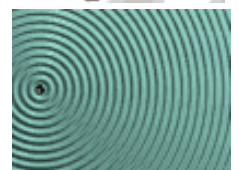
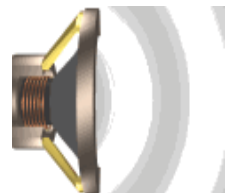
Основною властивістю всіх хвиль, не залежно від природи, є _____

Типи хвиль:

- 1) механічні (пружні) хвилі;
- 2) хвилі на поверхні рідини;
- 3) електромагнітні хвилі.

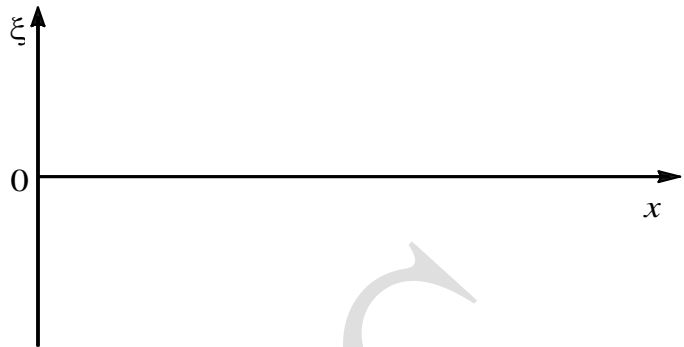
Пружними хвилями називають _____

Пружну хвилю називають *гармонічною*, якщо гармонічні коливання здійснюють частинки середовища.



Приведемо графік залежності зміщення частинок середовища ξ і відстані частинок, що коливаються, від джерела хвилі x та часу t $\xi = \xi(x, t)$ пружної хвилі:

Довжиною хвилі λ називають _____

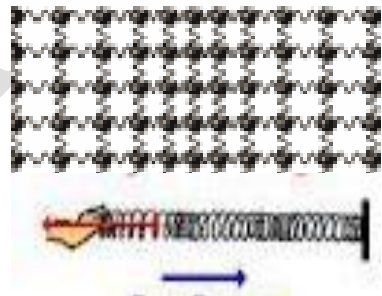


_:

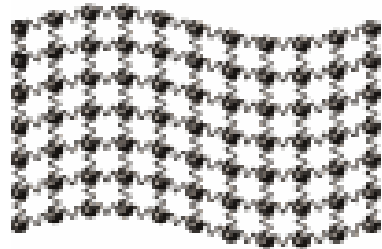
$$\lambda = \dots$$

Пружні хвилі бувають поздовжніми або поперечними.

Поздовжніми називають **хвилі**, в яких _____



Поперечними – **хвилі**, в яких _____



2. Рівняння гармонічної хвилі, диференціальне хвильове рівняння.

Розглянемо плоску хвилю, яка поширюється у напрямі осі Ox . За такої умови хвильові поверхні будуть перпендикулярними до осі Ox , а зміщення частинок буде визначатися рівнянням:

$$\xi = \dots$$

Коливання частинок середовища, які знаходяться на відстані x від джерела будуть запізнюватися на час $\tau = \frac{x}{v}$, де v — швидкість поширення хвилі:

де λ — _____ — відстань між найближчими точками, що коливаються в одній фазі або відстань, на яку поширюється хвиля за час рівний періоду: $\lambda = vT$, $\lambda = \frac{v}{\nu}$,

$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ — _____, яке показує кількість довжин хвиль, що вміщуються на відріжку 2π ;

а $\omega t - kx$ — _____.

Останні рівняння — це *рівняння монохроматичної біжучої хвилі*, вони є розв'язком *диференціального хвильового рівняння плоскої хвилі*:

$$\frac{d^2 \xi}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \xi}{dt^2}.$$

3. Швидкість механічних хвиль в газах, рідинах та твердих тілах

Хвильовий процес характеризується фазовою і груповою швидкостями.

Фазова швидкість — _____

 _____:

$$v = \dots$$

Групова швидкість — _____

 _____:

$$u = \dots$$

Фазова швидкість у вакуумі не залежить від частоти коливань або довжини хвилі. При поширенні хвиль різної частоти або довжини у тому чи іншому середовищі їх фазова швидкість виявляється різною.

називається **дисперсією**.

Групова швидкість пов'язана з фазовою виразом:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda},$$

величину називають **показником дисперсії**. При відсутності дисперсії у вакуумі, фазова і групова швидкості співпадають.

Дисперсію називають **нормальною** при \dots , тобто \dots .

Дисперсію називають **аномальною** при \dots , тобто \dots .

У загальному вигляді швидкість хвильового процесу залежить від:

$$v = \sqrt{\frac{\dots}{\dots}}$$

У **твердих тілах** можуть поширюватися поздовжні і поперечні хвилі. **Швидкість поширення хвиль у твердих тілах:**

$$v_{\text{повз}} = \dots,$$

$$v_{\text{попер}} = \dots,$$

де E – \dots ,

G – \dots .

У рідинах і газах можуть поширюватися тільки повздовжні хвилі.

Швидкість поширення хвиль у рідинах:

$$v = \dots,$$

де k – \dots ;

β – \dots .

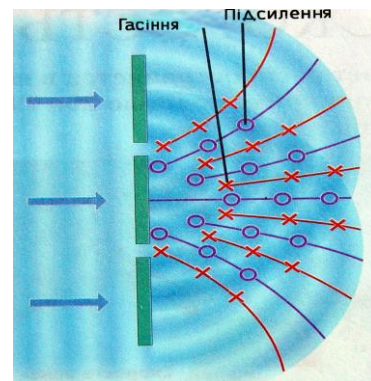
Швидкість поширення хвиль у газах:

$$v = \dots \text{ – формула } \dots,$$

де γ – \dots .

4. Інтерференція механічних хвиль

Інтерференцією хвиль називають _____



Умови виникнення інтерференційної картини:

- коливання частинок середовища, що збуджуються інтерферуючими хвилями, мають відбуватись в однакових напрямках;
- частоти їх коливань мають бути однаковими;
- зсув фаз між коливаннями частинки, зумовленими інтерферуючими хвилями, з часом не змінюється.

_____ називають *когерентними*.

5. Ефект Доплера

Досліди показують, що коли джерело і приймач звуку нерухомі відносно середовища, в якому поширюються звукові хвилі, то частота звуку, яку реєструє приймач, дорівнює частоті звуку, яку випромінює джерело. Якщо ж джерело і приймач звукових хвиль перебувають у русі відносно одне одного, то частота звуку, яку реєструє приймач, відрізняється від частоти звуку, яку генерує джерело.



_____, називається *ефектом* або *явищем Доплера*.

Ефект названий на честь австрійського фізика Крістіана Доплера, який у 1842 році теоретично обґрунтував залежність частоти коливань від напрямку руху і швидкості спостерігача. А у 1845 році нідерландський фізик Христофор Хенрік Дідерік Бейс-Баллот за допомогою експерименту з паровозом і музикантами, перевірів гіпотезу Доплера, в результаті чого ефект Доплера був доведений.

Якщо частота звуку, яку випромінює джерело ν_0 , то частота звуку, яку реєструє приймач ν :

де ν – _____.

Верхній знак береться при відносному зближенні джерела і приймача, нижній – при відносному віддаленні їх.

Ефект Доплера широко використовується у багатьох галузях науки і техніки, а також у повсякденному житті, де потрібно виміряти швидкість предметів, які можуть випромінювати або відбивати хвилі.

В залежності від типу хвиль розрізняють два види ефекту Доплера: при поширенні електромагнітних хвиль – оптичний ефект і при поширенні звукових хвиль – акустичний ефект. Акустичний ефект Доплера – це зміна висоти тону звуку, що має місце при відносному русі приймача і джерела. Оптичний ефект Доплера – це зміна частоти хвилі, що сприймаються приймачем.

Ефект Доплера використовують:

- 1) в радіолокації для:
 - розпізнавання рухомих об'єктів, наприклад, літаків, на фоні нерухомих (гір, хмар),
 - для вимірювання швидкостей літальних апаратів, кораблів, автомобілів, а також інших об'єктів, а також у деяких видах спорту,
- 2) в неінвазивному вимірюванні швидкості потоку – без безпосереднього розміщення датчиків у потоці, за рахунок розсіювання ультразвуку на неоднорідностях середовища, як частинках суспензії, бульбашках газу, для визначення швидкості гідрометеорів (наприклад, хмар), морських і річкових течій,
- 3) в космонавтиці та астрономії для визначення параметрів руху космічних апаратів, планет та зірок, за червоним зміщенням світла від астрономічних об'єктів, вимірюється їхня швидкість і розраховується відстань до них (результати цих досліджень дозволяють стверджувати, що Всесвіт розширюється). Зміна довжин хвиль світлових коливань призводить до того, що всі спектральні лінії в спектрі джерела зміщуються в бік довгих хвиль, якщо променева швидкість його спрямована від спостерігача (червоне зміщення), і в сторону коротких, якщо напрямок променевої швидкості – до спостерігача (фіолетове зміщення),
- 4) в датчиках руху в автосигналізаціях, системах охорони, автоматичному вмиканні освітлення, відоезйомки, системах «розумний будинок»,
- 5) для визначення координат у супутниковій системі Коспас-Сарсат – міжнародній супутниковій пошуково-рятувальній системі, розробленій задля сповіщення про аварії й місцеположення персональних радіобуїв та радіобуїв, встановлених на суднах і літаках на випадок аварійних ситуацій,
- 6) в електроніці для створення електромагнітних хвиль високої частоти, навіть рентгенівського діапазону, у лазерах на вільних електронах,
- 7) у медицині в комп'ютерних комплексах ультразвукової доплерографії: ультразвук, потрапляючи на еритроцити, які знаходяться у артерії або венах, посиляє з кожної ділянки судини відбитий звук різної частоти. Сигнал перетворюючись дає інформацію про параметри кровообігу.

6. Потік енергії хвилі

Повна енергія хвилі у виділеному об'ємі середовища:

$$E_{\text{пов}} = E_k + E_n =$$

Об'ємна густина енергії

$$\varpi = \frac{E_{\text{пов}}}{\Delta V} =$$

а враховуючи, що квадрат синуса за період має середнє значення $\frac{1}{2}$, то

середнє значення густини енергії $\langle \varpi \rangle$ за часом

$$\langle \varpi \rangle =$$

Потоком енергії називають _____

$$\Phi =$$

Густиною потоку енергії називають _____

$$\langle j \rangle = \quad \text{— вектор} \quad \text{_____}.$$

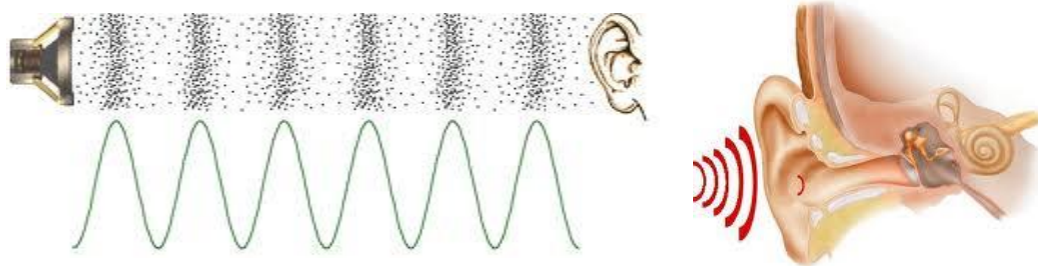
Вектор Умова характеризує _____

7. Звукові хвилі, їх основні характеристики. Ультра- та інфразвук. Акустика приміщень та споруд

_____, називають *механічною (пружною) хвилею*.

Деформація, що виникає у деякому місці, спричинює першопочаткове відхилення частинок середовища від положення рівноваги, а наявність між частинками середовища сил пружності зумовлює процес передачі коливального стану від одних частинок до інших. При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а лише коливаються навколо своїх положень рівноваги.

Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передається лише стан коливального руху і його енергія.



Джерелом звуку може бути будь яке тіло, що коливається у пружному середовищі з частотою звуку. Здійснюючи коливання, тіло викликає коливання частинок середовища, що прилягають до нього. Стан коливального руху послідовно передається до все більш віддалених від тіла частинок середовища, тобто у середовищі поширюється хвиля з частотою коливань її джерела.

Інфразвуком називають _____

Інфразвукові хвилі виникають внаслідок обдування вітром будівель, дерев; під час руху людини, тварин, транспорту; при роботі різних механізмів; при грозових розрядах, вибухах бомб, пострілах гармат. У земній корі спостерігають коливання і вібрації інфразвукових частот внаслідок обвалів, руху різних видів транспорту, вулканічних вивержень тощо.

Такі звуки людина скоріше відчуває, ніж чує. Річ у тому, що деякі внутрішні органи людини мають власну частоту коливань 6–8 Гц. При дії інфразвуку цієї частоти можливе виникнення резонансу коливань цих органів, що викликає неприємні відчуття, біль.

Властивість інфразвукових хвиль поширюватись на великі відстані лежить в основі таких наук, як сейсмологія і океанологія, які займаються вивченням і дослідженням внутрішньої будови Землі та передбаченням землетрусів, наближенням цунамі тощо.

Ультразвуком називають _____



Ультразвук широко застосовується у різних галузях знань. Різноманітність застосувань ультразвуку умовно поділяють на три напрямки:

1) Одержання інформації за допомогою ультразвукових методів застосовуються для вивчення властивостей і будови речовини, для з'ясування процесів, що в них відбуваються на макро- і мікрорівнях, допомагають з'ясувати особливості молекулярної структури речовини, перевірити

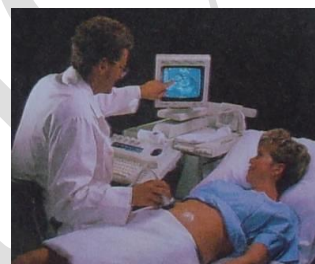
припущення про структурні моделі, дають інформацію про особливості будови кристалічної ґратки, визначають пружні характеристики та міцність металевих матеріалів, кераміки, полімерів, ступінь їхньої чистоти, наявність домішок; дають можливість здійснювати ультразвукову локацію:

- застосовують у гідроакустиці для сигналізації і локації під водою;
- застосовують в ультразвуковій дефектоскопії (за допомогою якої виявляють дефекти у матеріалах, виробках, конструкціях, будівлях);
- використовують для дослідження структури частин живих організмів, для діагностики деяких захворювань.

2) Оскільки ультразвукові пучки можуть мати значні інтенсивності, то їх вплив на речовину досить активний:

- дія ультразвукових коливань безпосередньо на розплави дає можливість одержати розплави більш однорідної і дрібнокристалічної структури;
- ультразвукова кавітація використовується для очищення від забруднень поверхонь деталей (годинникове виробництво, приладобудування, електронна техніка, ремонт машин, наприклад, явище кавітації використовують для очищення форсунок інжекторів);
- кавітаційні ударні хвилі можуть диспергувати тверді тіла і рідини, утворюючи емульсії і суспензії (використовується у хімічній і медичній промисловості, а також при пранні для видалення сильних забруднень);
- ультразвуковий капілярний ефект полягає у збільшенні у десятки разів швидкості і висоти підйому рідини у капілярах під дією ультразвукового випромінювання;
- ультразвукове випромінювання значно впливає на швидкість сушки будівельних матеріалів;
- при дії ультразвуку на біологічні об'єкти відбувається поглинання і перетворення енергії звуку в теплову енергію. Локальне нагрівання тканин на частки і одиниці градусів сприяє життєдіяльності біологічного об'єкта, підвищує інтенсивність обміну речовин, проте при більш інтенсивному опромінюванні ультразвуком біологічний об'єкт зазнаватиме руйнування. У медицині ультразвук використовується для діагностики, терапевтичного і хірургічного лікування.

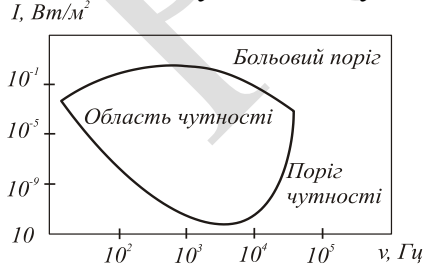
3) Обробка і передача сигналів за допомогою ультразвукових пристроїв застосовують у радіолокації, обчислювальній техніці та для керування світловими сигналами в оптиці й електроніці.



Фізичні параметри звуку	Психофізичні параметри звуку
1) частота звуку , що сприймає людське вухо $v = \frac{\lambda}{T} \text{ Гц}$	1) висота звуку – _____ _____ _____ _____ _____

2) інтенсивність звуку (або сила звуку) _____ _____ _____ _____ _____ _____ $I = \frac{P}{S}, [I] = \frac{Вт}{м^2}$	2) гучність звуку – _____ _____ _____ _____ $L = \lg \frac{I}{I_0}$ _____ _____ де I_0 – інтенсивність звуку на порозі чутності ($= 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$)
--	--

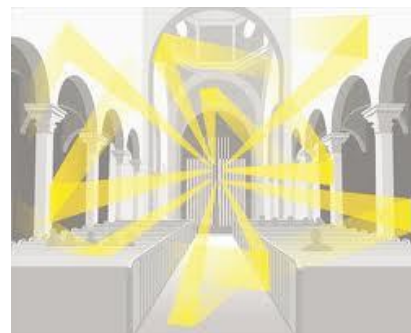
Чуттєвість людського вуха різна для різних частот. Для того, щоб викликати звукове відчуття, хвиля повинна мати якусь мінімальну інтенсивність. Але якщо ця інтенсивність переважає певну границю, то людина не чує звук, а відчуває лише больове відчуття. Для хвилі кожної частоти існує найменша (**порог чутності**) і найбільша (**больовий поріг**) інтенсивність звуку, здатна викликати звукове сприйняття. Область, що знаходиться між цими двома кривими, називається **областю чутності** (рис.).



3) реальний звук являє собою акустичний спектр – результат накладання гармонічних коливань з великим спектром частот.	3) тембр звуку – своєрідне звукове відчуття, яке характеризується акустичним спектром і розподілом енергії між певними частотами. <i>Так різні співаки, що беруть одну й ту ж ноту, мають різний акустичний спектр – різний тембр</i>
--	---

Для акустики приміщень велике значення має **реверберація звуку** – _____

Якщо приміщення пусті, то відбувається повільне згасання звуку і створюється «гучність» приміщення. Якщо звуки згасають швидко (при застосуванні звукопоглинаючих матеріалів), то вони сприймаються приглушеними. **Час реверберації** – _____



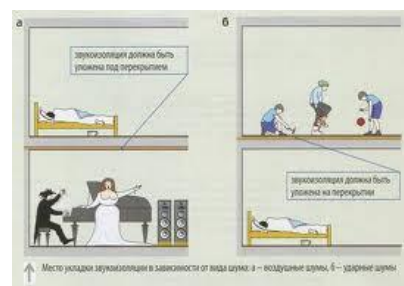
Час реверберації – важлива характеристика акустичних властивостей концертних залів, кінозалів, аудиторій та ін. Приміщення має гарну акустику, якщо час реверберації складає 0,5–1,5 с. При великому часі реверберації мова і музика звучать досить голосно, але не виразно, при малому – слабо і глухо. Тому в кожному конкретному випадку намагаються досягти оптимальних акустичних характеристик приміщення.

Прикладною галуззю акустики є **будівельна акустика** – _____

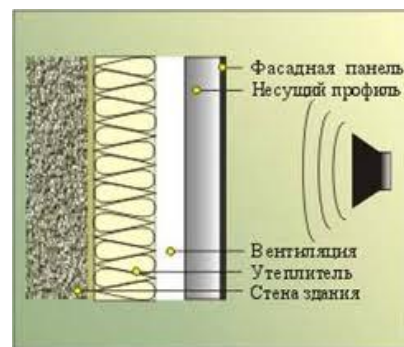
У результаті хаотичного і безладного змішування звуків утворюються шуми, які негативно впливають на нервову систему людини. Шуми розділяють на повітряні і структурні. Повітряні шуми утворюються в результаті вібрацій систем, які викликають звукові хвилі у вигляді коливань повітря. Структурні шуми утворюються в результаті вібрацій, які передаються через стіни, підлогу, стелі, труби центрального опалення від коливально-ударних процесів, що здійснюються у сусідніх приміщеннях.

Звуковий дискомфорт у приміщеннях виникає через:

1) неправильний вибір будівельно-оздоблювальних матеріалів;
2) неправильну форму приміщень, що може викликати такі небажані звукові ефекти, як «стояча хвиля» – явище підсилення або послаблення звуку в деяких місцях кімнати, що часто виникає у приміщеннях, які мають форму прямокутного «пеналу», «порхаюче відлуння» – явище, яке виникає між паралельними стінами, «звуковий відскок» – явище відбиття звуку від двох-трьох поверхонь, які сходяться в одному куті.



До архітектурно-планувальних методів захисту від шуму відносять раціональні об'ємно-планувальні рішення будівель і приміщень; віддалення джерел шуму від захисних об'єктів; оптимальне планування мікрорайонів, житлових районів, а також територій промислових підприємств. Будівельно-акустичні методи включають використання конструкцій і пристроїв, що забезпечують ефективне зниження шуму шляхом звукопоглинання і звукоізоляції. Задача звукопоглинання – прибирання шумів у тому приміщенні, в якому вони виникли, через оздоблювання матеріалами, що мають поглинати шуми, не відбиваючи їх назад у приміщення. Задача ж звукоізоляції – перешкоджання проходженню шумів через стіни будівель і приміщення.

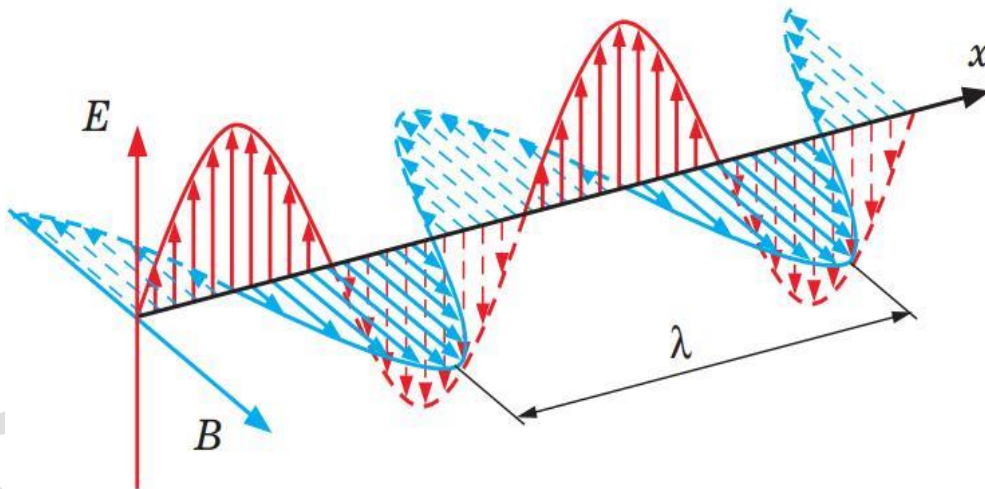


Лекція 9. Електромагнітні хвилі. Геометрична оптика

1. Електромагнітні хвилі
2. Світлові хвилі, елементи фотометрії
3. Поглинання світла
4. Закони геометричної оптики
5. Оптичні деталі та прилади

1. Електромагнітні хвилі

Електромагнітною хвилею називають _____



Рівняння електромагнітної хвилі (хвильові рівняння) мають вигляд:

,

.

Розв'язками отриманих хвильових рівнянь є функції

,

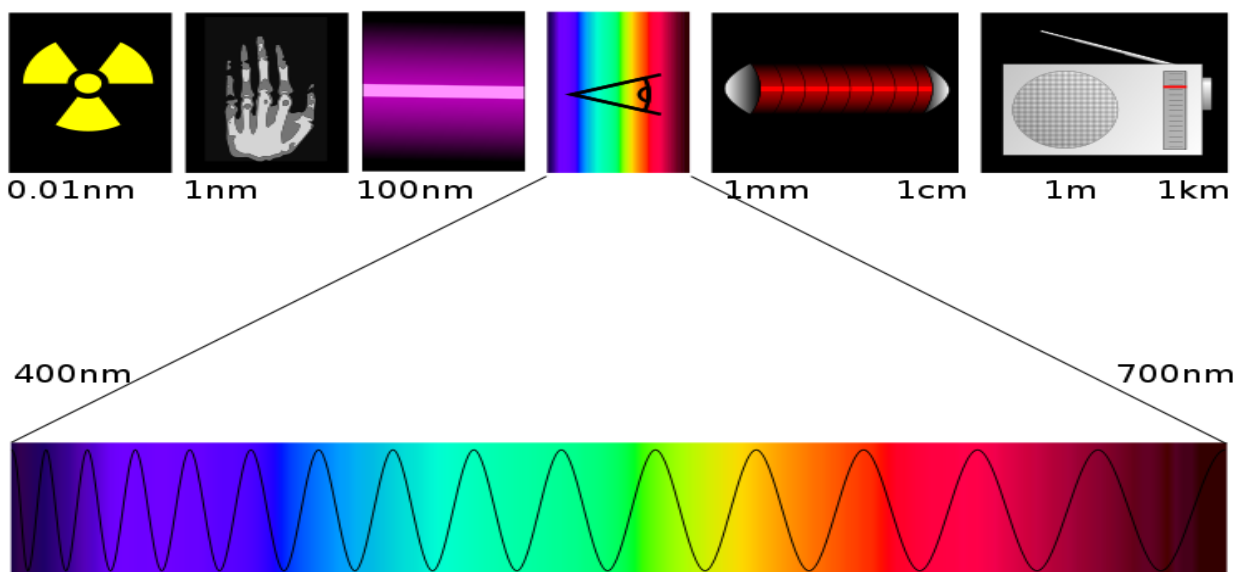
,

де ω – _____,

k – _____,

$\varphi_{01}, \varphi_{02}$ – _____.

Електромагнітні хвилі маючи широкий діапазон частот відрізняються способами генерації і реєстрації, а також своїми властивостями:



Вид випромінювання	Довжина хвилі, м	Частота хвилі, Гц	Джерело випромінювання
Радіохвилі	$10^3 - 10^4$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Коливальний контур Вібратор Герца Ламповий генератор
Світлові хвилі: інфрачервоні видимі ультрафіолетові	$5 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$ $8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{11} - 3,75 \cdot 10^{14}$ $3,75 \cdot 10^{11} - 7,5 \cdot 10^{14}$ $7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	Лампи Лазери
Рентгенівське випромінювання	$2 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$	Трубки Рентгена
γ -випромінювання	$< 6 \cdot 10^{-12}$	$> 5 \cdot 10^{19}$	Радіоактивний розпад Ядерні процеси Космічні процеси

Використання електромагнітної енергії в різних галузях людської діяльності призвело до того, що рівень штучного електромагнітного випромінювання значно перевищує фоновий рівень. Джерелами електромагнітного випромінювання є силова і освітлювальна електромережі, лінії електропередач, кабельні і трансформаторні підстанції, радіолокаційні і радіопередавальні системи, системи мобільного зв'язку, аудіо, відео, комп'ютерна, побутова і промислова техніка, електрифікований транспорт.



Шкідливий вплив електромагнітного випромінювання зменшують через комплексне планування розташування його джерел та використання у промисловому і цивільному будівництві матеріалів з екрануючими властивостями (залізобетон, цегла, деревина, шунгітні фарби).

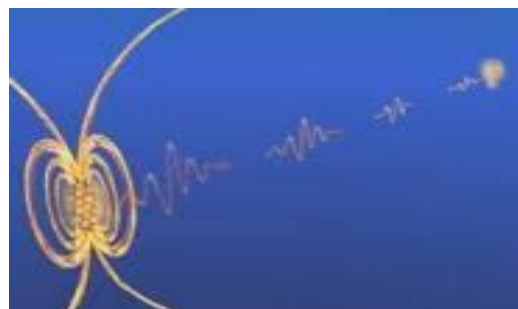
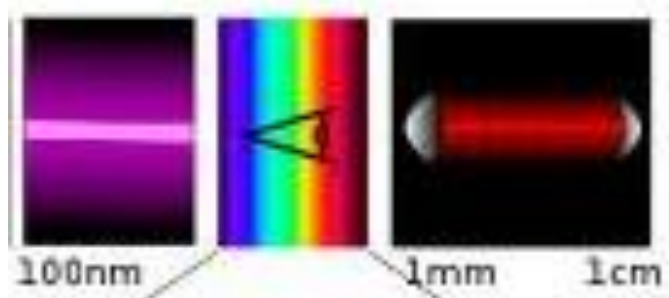


2. Світлові хвилі, елементи фотометрії

Оптика – _____

Світло – _____

Експеримент І. Ньютона



В залежності від кола явищ, що вивчають, оптику поділяють на геометричну (променевою), хвильову (фізичну) і квантову (корпускулярну).

Фотометрія – _____

<p align="center">Енергетичні величини</p> <p align="center">(характеризують енергетичні параметри оптичного випромінювання безвідносно до їх дії на приймач випромінювання)</p>	<p align="center">Світлові величини</p> <p align="center">(характеризують фізіологічну дію світла по відношенню до так званого середнього адаптованого ока, їх оцінюють по дії на приймач випромінювання)</p>
<p>Потік випромінювання – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$\Phi_e = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[\Phi_e] = \frac{\quad}{\quad}$</p>	<p>Світловий потік – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$\Phi = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[\Phi] = \frac{\quad}{\quad}$</p>
<p>Енергетична сила світла – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$I_e = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[I_e] = \frac{\quad}{\quad}$</p>	<p>Сила світла – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$I = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[I] = \frac{\quad}{\quad}$</p>
<p>Енергетична світність – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$R_e = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[R_e] = \frac{\quad}{\quad}$</p>	<p>Світність – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$R = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[R] = \frac{\quad}{\quad}$</p>
<p>Енергетична яскравість – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$B_e = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[B_e] = \frac{\quad}{\quad}$</p>	<p>Яскравість – _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p align="center">$B = \frac{\quad}{\quad},$</p> <p align="center">$[B] = \frac{\quad}{\quad}$</p>

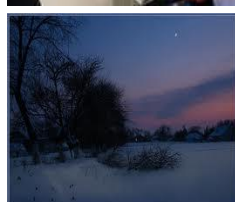
Енергетична освітленість — _____	Освітленість — _____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____
$E_e = \frac{\quad}{\quad},$	$E = \frac{\quad}{\quad},$
$[E_e] = \frac{\quad}{\quad}$	$[E] = \frac{\quad}{\quad}$

Для вимірювання світлових величин використовуються такі основні прилади:

1. **Люксеметри** – прилади для об’єктивного вимірювання освітленості поверхонь, яскравості і світності джерела світла. Являють собою поєднання фотоелемента з гальванометром і працюють на законах фотометрії – сила фотоструму насичення пропорційна падаючому світловому потоку.



Використовуються при фотометричних вимірюваннях, при фотографуванні для визначення часу експозиції, перевірці умов праці. Так нормальна освітленість на робочих місцях при читанні і писанні повинна складати 300-400 Лк; при виконанні графічних робіт біля 500 Лк, такою ж повинна бути освітленість аудиторної дошки. Під прямими променями Сонця в середніх широтах освітленість досягає 100000 Лк, а в похмурий день на відкритому місці – 1000 Лк. У приміщенні в похмурий день освітленість біля вікна дорівнює 50–60 Лк, мінімальна освітленість, при якій ще можна працювати з книгою або писати, – 10 Лк. Повний Місяць створює освітленість на відкритому місці 0,2 Лк, а зоряне небо (без Місяця) 0,0003 Лк.



2. **Фотометри** – прилади для визначення сили світла джерела через візуальне порівняння сили світла еталонних джерел з силою світла даного джерела.



Задачі раціонального освітлення вулиць, приміщень, робочих місць на виробництві, видовищ, історичних і архітектурних пам’яток тощо вирішують світлотехнікою на основі законів геометричної оптики та фотометрії.

3. Поглинання світла

Поглинанням світла називають _____



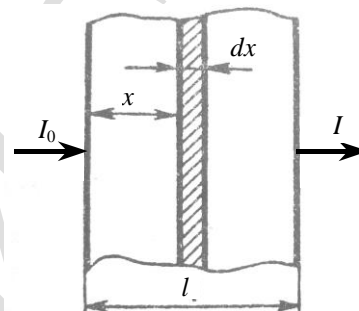
Закон залежності інтенсивності падаючого світла від товщини шару прозорого середовища визначають законом *Бугера-Ламберта*:

де I – _____

I_0 – _____

α – _____

x – _____



А. Бер встановив, що поглинання світла розчинами пропорційне молярній концентрації c_0 розчиненої речовини, тобто:

де α_0 – _____

Або ж для газів і розчинів малих концентрацій можна записати *закон Бугера-Ламберта-Бера*:

4. Закони геометричної оптики.

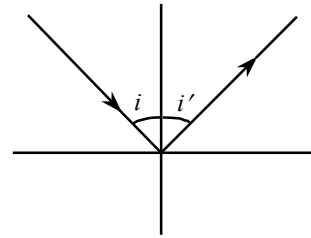
Геометрична оптика – _____

Світловий пучок – це сукупність світлових променів, обмежених кінечною поверхнею, в якій світло поширюється від точкового джерела, що знаходиться у вершині конуса. Розширення світлового пучка усувається лише за умови, коли довжина світлової хвилі $\lambda \rightarrow 0$. Тому світловий промінь є абстрактним поняттям, а геометрична оптика являє собою граничний випадок хвильової оптики.

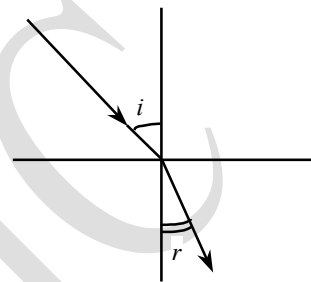
В основі *геометричної оптики* лежать такі закони:

1. Закон прямолінійного поширення світла – _____

2. Закон відбивання світла – _____



3. Закон заломлення світла – _____



де i – _____,
 r – _____,
 n_{21} – _____.

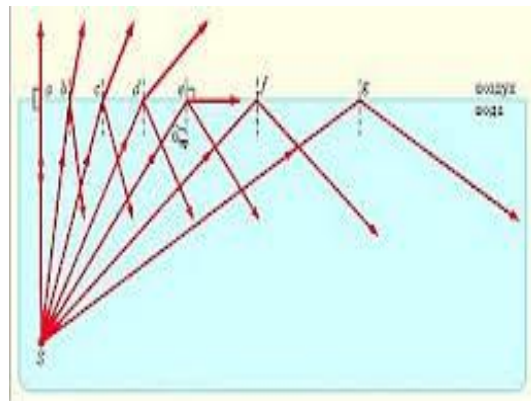
Фізичний зміст *відносного показника заломлення середовищ* – _____

$$n_{21} = \dots$$

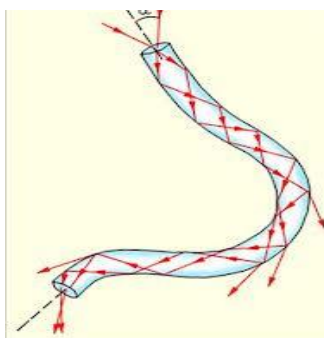
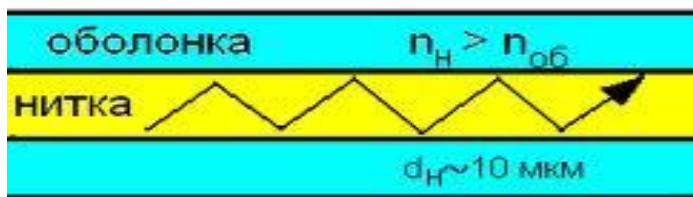
Фізичний зміст *абсолютного показника заломлення середовища* – _____

$$n = \dots$$

Закон заломлення світла дозволяє пояснити явище повного відбиття світла. Якщо світло переходить із більш оптично густого середовища в менш густе, то $i < r$. При досяганні граничного значення кута $i_{\text{вн}}$ (кута повного внутрішнього відбиття), $r = 90^\circ$. При цьому куті падіння i більших кутах $i \geq i_{\text{вн}}$ заломлений промінь вже не може проникнути в друге середовище, а повністю відбивається – відбувається явище *повного внутрішнього відбиття світла*. Явище повного внутрішнього відбиття використовують у волоконній оптиці.



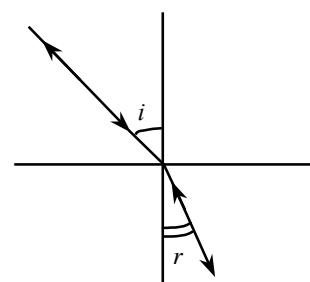
Волоконно-оптичні вимірювальні системи являються найбільш перспективними системами контролю різноманітних параметрів будівельних споруд, оскільки мають ряд переваг над традиційними вимірювальними приладами. Вони вибухобезпечні, хімічно інертні, стійкі до підвищень температури, механічним ударам, вібраціям, ефективні при безконтактних і дистанційних вимірах. Принцип їх дії полягає у реєстрації і обробці зміни інтенсивності світлового сигналу після взаємодії з об'єктом, що досліджується. Механізм зміни оптичної інтенсивності може мати різні причини: відбиття, поглинання, мікродеформації тощо.



Волоконно-оптичні датчики, незалежно від параметра, що вони контролюють, занурюють у монолітний залізобетон у заводських умовах або на будівельному майданчику, в кам'яну чи армокам'яну конструкцію (дають інформацію про розподіл напружень всередині конструкцій). Датчики також можуть кріпитись на поверхню конструкцій з бетону, цегли, каменя, металу, скла, деревини та інших матеріалів (інформують про інтегральну деформацію даної будівельної конструкції на досить великому лінійному відрізку).

4. Закон незалежності поширення світлових променів – _____

5. Закон оборотності ходу світлових променів – _____

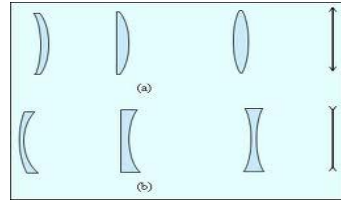


5. Оптичні деталі та прилади.

Оптичні деталі виготовляють зі скла або інших прозорих матеріалів, до них відносять дзеркала (плоскі або сферичні), пластини (плоско паралельні або клиноподібні), призми, лінзи.



Лінзи – _____

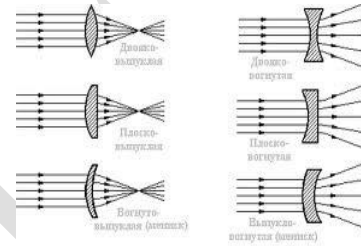


Лінзу називають *тонкою*, якщо _____

_____ . Сферичні тонкі лінзи бувають опуклі і вгнуті.

Опуклі лінзи мають властивість _____

(у них середина товста, а краї тонші). Вгнуті лінзи _____

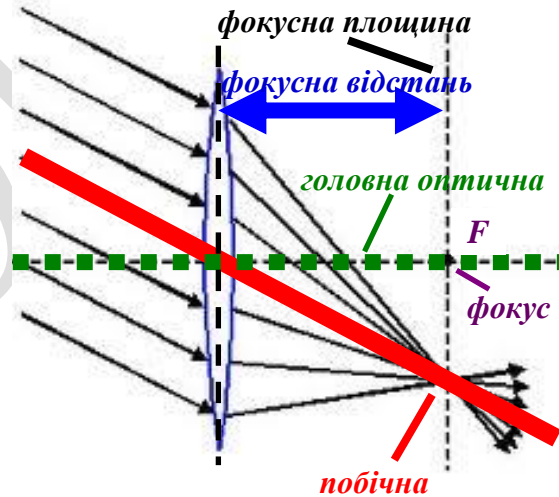


_____ (середина тонка, а краї товстіші).

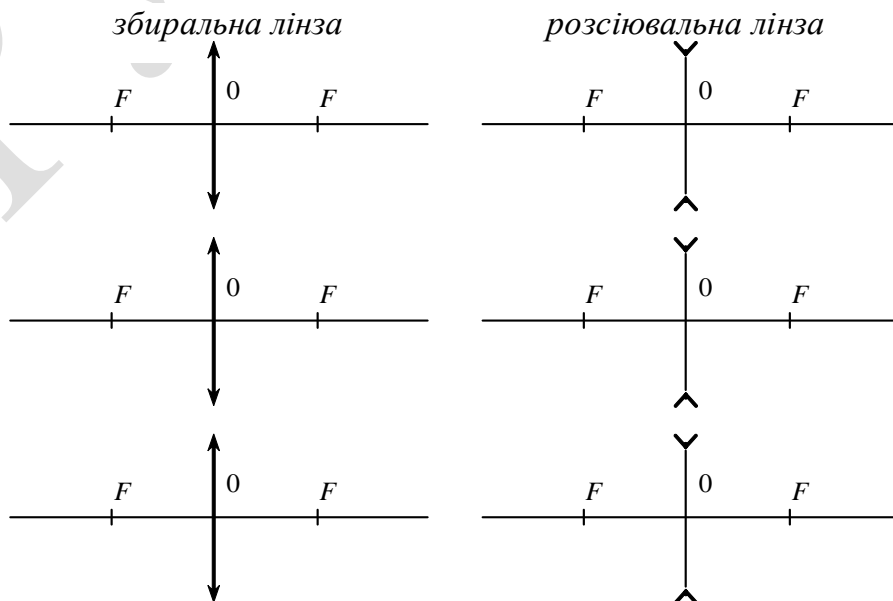
В залежності від того, сходяться чи розходяться паралельні пучки променів після проходження лінзи, лінзи поділяють на збірні й розсіювальні.

Основними параметрами лінзи є:

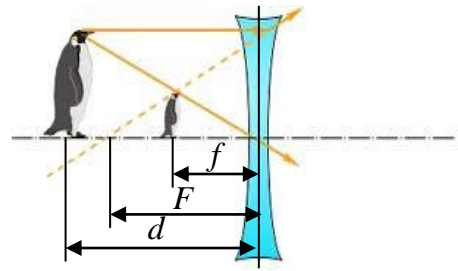
- **головна оптична вісь** – уявна пряма, що проходить через центр кривизни поверхонь лінзи;
- **фокус** – точка, в якій перетинаються всі промені, паралельні головній осі;
- **фокусна відстань** – відстань від центру лінзи до фокуса;
- **побічна вісь** – пряма, що проходить через оптичний центр лінзи.



Наведемо хід основних променів, що використовуються для побудови зображень у лінзах:



Якщо f – відстань від лінзи до зображення, а d – відстань від предмета до лінзи, то оптичну силу лінзи D можна визначити:



$D =$ _____ – формула тонкої лінзи

$[D] = \text{Дптр (діоптрія)}.$

Основні оптичні прилади:

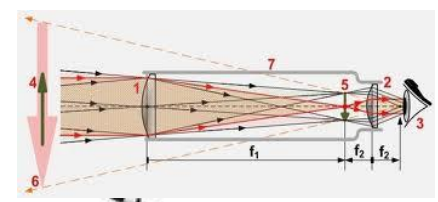
1. Луна – _____



2. Мікроскоп – _____



3. Зорова труба (телескопічна система) – _____



До геодезичних телескопічних систем відносять нівеліри, теодоліти, далекоміри, тахометри.



Лекція 10. Хвильова оптика

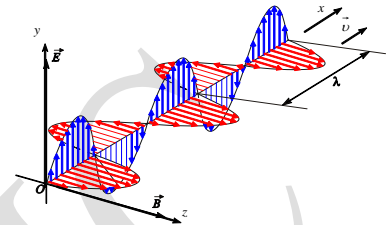
1. Інтерференція світлових хвиль
2. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракція Френеля. Дифракція Фраунгофера
3. Дифракція на кристалічній решітці. Голографія
4. Поляризація світла

1. Інтерференція світлових хвиль

Оптика – розділ фізики, який вивчає природу світла, світлові явища і взаємодію світла з речовиною.

Світло – це фізичний процес (явище), що виявляє єдність двох взаємовиключних властивостей – неперервних (хвильових) і дискретних (корпускулярних), які доповнюють одна одну. Хвильові властивості світла проявляються у закономірностях його поширення як електромагнітної хвилі довжиною від 380 до 760 нм (для видимої частини спектру), а корпускулярні властивості світла проявляються у процесах взаємодії світла з речовиною як потоку частинок (корпускул) – фотонів, які мають енергію, масу та імпульс.

В залежності від кола явищ, що вивчають, оптику поділяють на геометричну (променеву), хвильову (фізичну) і квантову (корпускулярну).



Хвильова оптика – _____

1. Інтерференція світлових хвиль

Нехай у деякій точці простору накладається дві хвилі однакової частоти, збурюючи у просторі коливання одного напрямку:

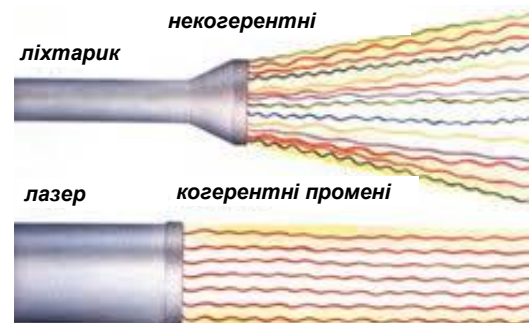
$$A_1 \cos(\omega t + \varphi_1); A_2 \cos(\omega t + \varphi_2).$$

Амплітуда результуючого коливання у даній точці простору визначається виразом:

$$A^2 = \dots,$$

де $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$ – _____

Хвилі називають **когерентними**, якщо _____



Хвилі

називають *монохроматичними*.

Якщо $\delta \neq const$, тобто хвилі, що накладаються, _____, то середнє за часом значення

$$\langle \cos \delta \rangle = 0, \text{ тоді } \langle A^2 \rangle = \langle A_1^2 \rangle + \langle A_2^2 \rangle.$$

Або ж якщо врахувати, що інтенсивність хвиль пропорційна амплітуді

$$I \sim A^2, \text{ то } I =$$

Якщо ж хвилі, що накладаються _____ $\delta = const$, то сумарна інтенсивність накладених хвиль:

$$I =$$

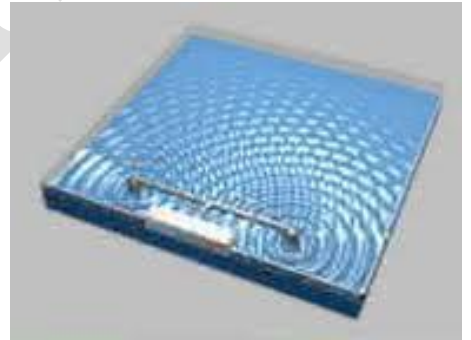
тоді в тих точках простору, для яких $\cos \delta > 0$, результуюча інтенсивність хвиль, що накладаються буде більшою за сумарну інтенсивність від двох джерел

$$I >$$

а в тих точках простору, для яких $\cos \delta < 0$,

$$I <$$

Таким чином, _____



_____, називають *інтерференцією світлових хвиль*.

Якщо $I_1 = I_2$, то в точках простору, де спостерігається *максимум інтерференційної картини* $I = 4I_1$, а в *мінімурах* – $I = 0$

Для *некогерентних хвиль* у всіх точках простору інтенсивність однакова $I = 2I_1$.



Механізм випромінювання світла тілом полягає у тому, що _____

Збуджуючись, через деякий довільний час цей же атом знову випромінює світлову хвилю, але відповідно вже з новою початковою фазою.

Через те, що різниця фаз між випромінюваннями різних атомів весь час буде різнитись, то хвилі, які спонтанно випромінюються атомами будь-якого джерела світла, некогерентні.

 _____, називають **хвильовим цугом**.

За час $\tau_{\text{ког}}$ хвиля у вакуумі поширюється на відстань $l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$, яку називають **довжиною когерентності** – _____
 _____.

Чим ближче хвиля до монохроматичної, тим менше ширина спектра її частот $\Delta\omega$, тобто тим більше її час когерентності $\tau_{\text{ког}}$, а відповідно, і довжина когерентності $l_{\text{ког}}$.



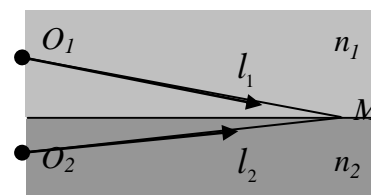
Часова когерентність – _____

 _____.

Просторова когерентність – _____

 _____.

 _____, називають **геометричною довжиною шляху променя**.



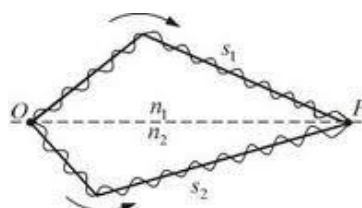
В оптичному середовищі з відносним показником заломлення n швидкість світла зменшується в n .

Добуток геометричної довжини l шляху світлової хвилі на показник n заломлення цього середовища називають _____
 _____.

$$L = \quad ,$$

а різницю оптичних довжин шляхів, що пройшли називають _____:

$$\Delta = \quad .$$



Максимум освітленості інтерференційної картини спостерігається, якщо різниця ходу променів дорівнює парній кількості довжин півхвиль:

$$\Delta = m\lambda, \text{ де } m = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

мінімум освітленості спостерігається, якщо різниця ходу променів дорівнює непарній кількості довжин півхвиль:

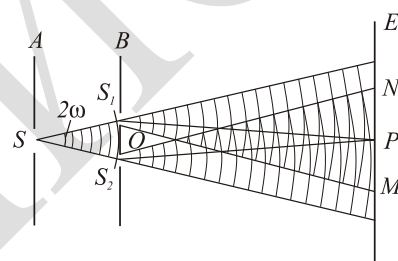
$$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \text{ де } m = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

Таким чином знаходження вигляду розташування максимумів і мінімумів освітленості інтерференційної картини у просторі зводиться до визначення оптичної різниці ходу променів.

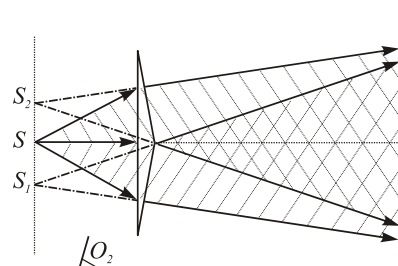
Методи отримання когерентних пучків світла.

1. **Поділом хвильового фронту**, тобто світловий пучок, що випромінюється джерелом, поділяється на два:

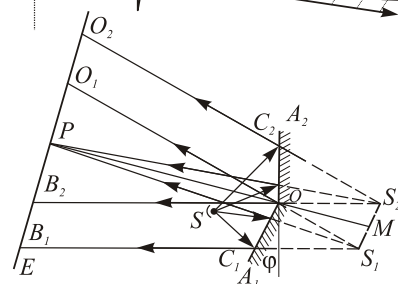
- **Ділення щілинами**: світло від точкового джерела S , проходячи через дві вузькі рівновіддалені щілини, утворюють два когерентні джерела S_1 і S_2 ;



- **Ділення біпризмою**: дві однакові, складені основами призми з малими заломлюючими кутами; світло від точкового джерела S заломлюється в обох призмах, у результаті чого промені, що виходять з біпризми, поширюються так, начебто вони виходять з двох джерел S_1 і S_2 , які будуть когерентними.



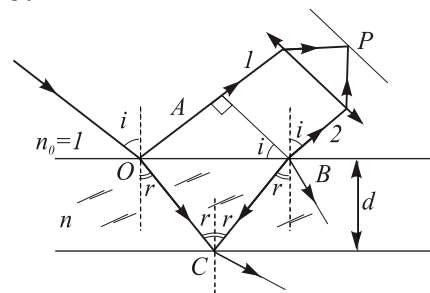
- **Ділення дзеркалами**: два плоских дзеркала, розташованих під кутом лише трохи меншим 180° ; світло від точкового джерела S , попадаючи на них відбивається і поширюється так, начебто світло йде від двох уявних джерел S_1 і S_2 , які будуть взаємно когерентними;

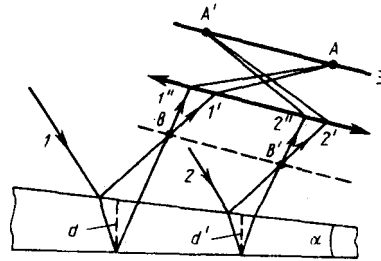
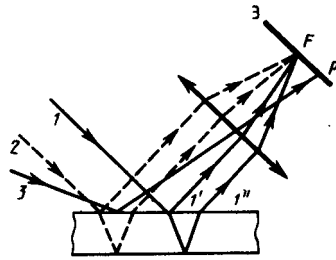
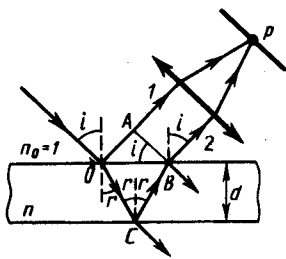


2. **Поділом амплітуди**, який полягає у поділі світлового пучка напівпрозорими поверхнями, які частково відбивають і частково пропускають світло.

Нехай на плоскопаралельну пластинку товщиною $d < 2l_{\text{ког}}$ і показником заломлення n під кутом i падає промінь плоскої монохроматичної світлової хвилі.

Інтерференційні смуги, які виникають внаслідок накладання хвиль, що падають на плоскопаралельну пластинку під однаковими кутами, називаються **смугами однакового нахилу**.





Падаючий на пластинку промінь частково відбивається, частково заломлюється, відбивається від нижньої грані і вдруге заломившись виходить з пластинки. Промені 1 і 2 паралельні один до одного, отже перетинаються лише в нескінченності, тому кажуть, що *смуги однакового нахилу локалізовані в нескінченності*. Для їх спостереження використовують збірну лінзу й екран, розміщений у фокальній площині лінзи. Оскільки промені 1 і 2 – когерентні, вони утворюють інтерференційну картину, яка визначається оптичною різницею ходу між інтерферуючими променями:

$$\Delta = n(OC + CB) - (OA \pm \frac{\lambda}{2}),$$

З рисунка видно, що $OC = CB = \frac{d}{\cos r}$, $OA = OB \sin i = 2d \tan r \sin i$, отже:

$$\Delta = 2dn \cos r \pm \frac{\lambda}{2} = 2dn \sqrt{1 - \sin^2 r} \pm \frac{\lambda}{2}.$$

враховуючи, що $\sin i = n \sin r$, отримаємо

вираз оптичної різниці ходу променів для плоско паралельної пластинки:

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda}{2},$$

де $\pm \frac{\lambda}{2}$ – доданок, обумовлений втратою півхвилі при відбиванні від межі розподілу двох середовищ (якщо $n > n_0$, то втрата півхвилі відбудеться у точці O і цей доданок береться зі знаком «-»), якщо ж $n < n_0$ то втрата півхвилі відбудеться у точці C і доданок $\frac{\lambda}{2}$ береться зі знаком «+»).

Для випадку, зображеного на рисунку ($n > n_0$),

$$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2}.$$

Так, наприклад, інтерференційна картина на плоскопаралельній пластинці у *відбитому світлі* буде спостерігатися за умов:

, де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – умова максимуму;

, де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – умова мінімуму.

У прохідному світлі на плоскопаралельній пластинці не буде відбуватися втрати півхвилі, тому:

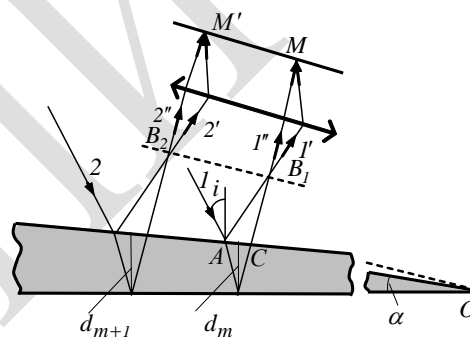
, де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – умова максимуму;

, де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – умова мінімуму.



Якщо товщина пластинки змінюється (наприклад, пластинка клиноподібна), то спостерігається чергування максимумів і мінімумів освітленості.

Інтерференційні смуги, що виникають внаслідок відбивання від ділянок клина з однаковою товщиною, називають **смугами однакової товщини**. Оскільки верхня та нижня грані клина не паралельні між собою, то промені I' і I'' та $2'$ і $2''$ перетинаються поблизу поверхні клина, тобто, **смуги однакової товщини локалізовані поблизу поверхні клина**.



Для даної товщини h_1 клиноподібної пластинки:

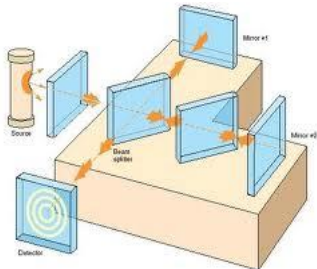
Ширина інтерференційної смуги:

Явище інтерференції світла використовують для створення різних оптичних приладів, які дозволяють вимірювати довжини світлової хвилі з великою точністю; вимірювати лінійні розміри тіл і коефіцієнти лінійного розширення тіл; визначати якість і точність шліфування різних поверхонь; вимірювати показники заломлення газоподібних, рідких і твердих тіл; вимірювати кутові розміри небесних тіл; вивчати і контролювати однорідність речовин; вивчати структури спектрів різних речовин та досліджувати ударні хвилі у газах.

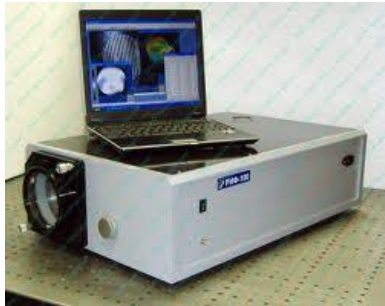
Вимірювальні прилади, дія яких ґрунтується на явищі інтерференції, називають **інтерферометрами**. Принцип дії інтерферометрів базується на просторовому розділенні світлових пучків, між якими створюється різниця ходу. Найбільш поширені двопроменеві інтерферометри, до яких належать інтерферометри Жамена, Гваймана, Релея, Лінніка, Майкельсона та ін.

Використовуючи закономірності явища інтерференції виготовляють інтерференційні світлофільтри, а також плівки, які значно зменшують відбивання світла від оптичних систем, що є суттєвим, наприклад, у війсьній галузі.

Принципова схема інтерферометра Майкельсона



Інтерферометр IT-200



Лазерний інтерферометр УТ 80



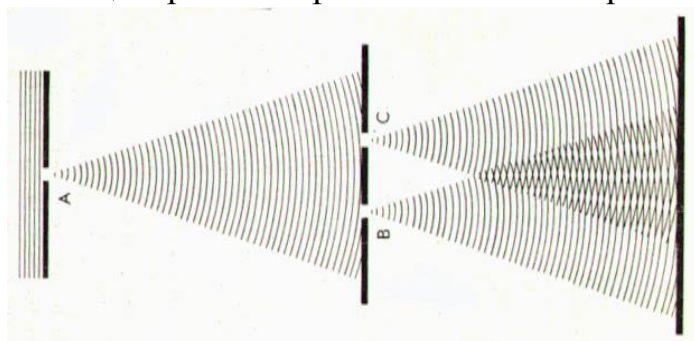
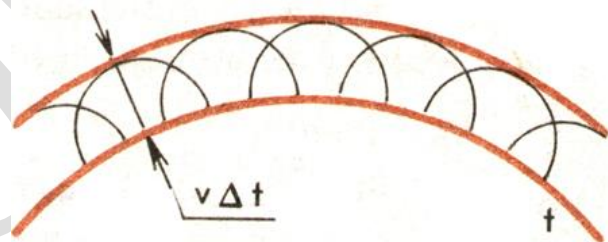
2. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракція Френеля. Дифракція Фраунгофера

Виникнення явища дифракції пояснює принцип Гюйгенса, оскільки саме вторинні хвилі огинають перешкоди на шляху поширення первинних хвиль.

Принцип Гюйгенса: кожному точці хвильового фронту можна вважати центром вторинних елементарних сферичних хвиль, і хвильовий фронт у будь-який наступний момент часу визначається огинаючою поверхнею цих елементарних фронтів хвиль.

Френель доповнив принцип Гюйгенса твердженням про те, що вторинні хвилі інтерферують між собою, тобто є когерентними.

Отже за об'єднанням **принципом Гюйгенса-Френеля:** кожному точці хвильового фронту можна вважати центром вторинних елементарних сферичних когерентних хвиль, які накладаються (інтерферуючи) у просторі або підсилюють одна одну – спостерігається максимум освітленості, або гасять одна одну – спостерігається мінімум освітленості.

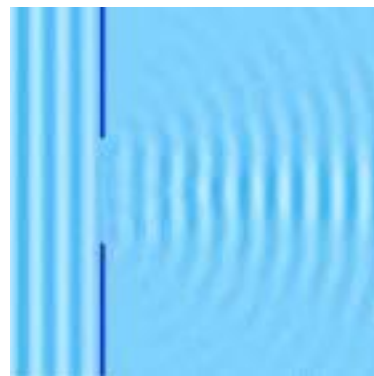


Дифракція світла – _____

Через дифракцію, хвилі можуть попадати в область геометричної тіні, огинаючи перешкоди, наприклад, звук гарно чути за рогом будинку — звукова хвиля його огинає.

Якщо ширина перешкоди b , відстань від неї до точки спостереження – l , а довжина хвилі – λ , то параметр

$$m =$$



визначає **умову спостереження дифракції**: явище дифракції можна спостерігати лише тоді, коли $m \ll 1$ (дифракція Фраунгофера) або при $m \sim 1$ (дифракція Френеля). Якщо $m \gg 1$, то реалізуються закони геометричної оптики.

Огюстен Жан Френель

Йозеф Фраунгофер

Дифракційні явища за їхніми характеристиками поділяють на два класи:

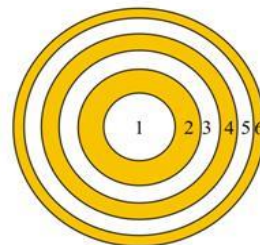
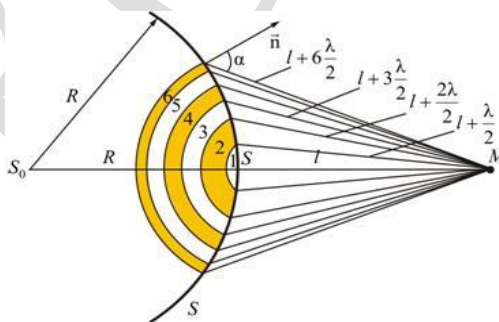
- дифракція Френеля (дифракція непаралельних променів);
- дифракція Фраунгофера (дифракція паралельних променів).



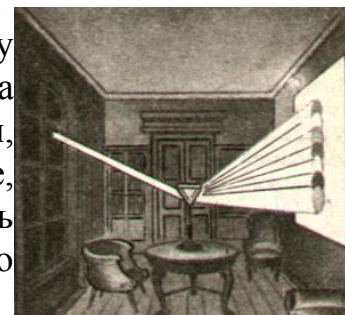
Дифракція Френеля – _____

Для спрощення обчислень дифракційної картини використовують **метод зон Френеля**: фронт хвилі розбивають не на окремі точкові джерела, а на певні ділянки – зони.

Ширина зон визначається тим, що відстані від межі сусідніх зон до точки спостереження відрізняються на половину довжини хвилі $\frac{\lambda}{2}$.



У зв'язку з цим коливання, що приходять у точку спостереження від аналогічних точок сусідніх зон, а водночас і результуючі коливання від цих зон, відрізнятимуться за фазою на величину π . Отже, внаслідок інтерференції ці коливання послаблятимуть одне одного. Тому амплітуда результуючого світлового коливання в точці спостереження:



$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \pm A_m, (*)$$

де A_1, A_2, \dots, A_m – амплітуди коливань, що збурюються відповідними зонами.

Площа m -ої зони Френеля:

$$\Delta\sigma = \frac{\pi ab\lambda}{a+b},$$

тобто не залежить від m , таким чином, побудова зон Френеля розбиває хвильову поверхню сферичної хвилі на рівні зони.

Приблизно можна вважати, що:

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2},$$

тоді рівняння (*) можна записати у вигляді:

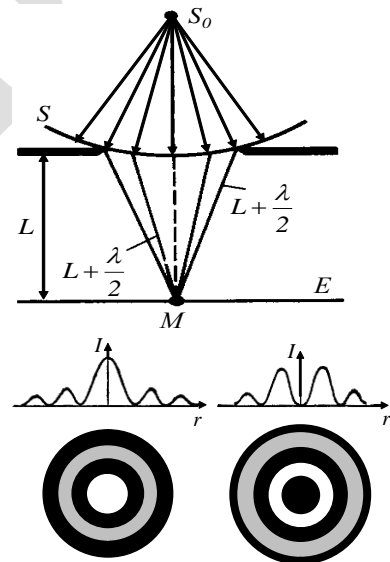
$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + \dots = \frac{A_1}{2},$$

таким чином, амплітуда, що створюється у довільній точці сферичною хвильовою поверхнею, дорівнює половині амплітуди однієї центральної зони звідси впливає, що принцип Гюйгенса-Френеля дозволяє пояснити прямолінійність поширення світла.

Прикладом дифракції Френеля є дифракція на круглому отворі і на диску.

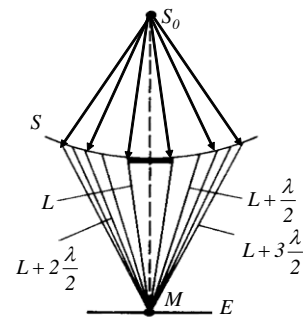
Дифракція Френеля на круглому отворі

Сферична хвиля, що поширюється з точкового джерела S_0 , зустрічає на своєму шляху екран з круглим отвором. Вигляд дифракційної картини залежить від кількості зон Френеля m , які укладаються в отворі. Дифракційна картина від круглого отвору має вигляд темних і світлих кілець, причому в центрі буде світлий круг, якщо m – непарне і темний, коли m – парне, причому інтенсивність $I = A^2$ максимумів зменшується з відстанню від центра картини. Якщо отвір освітлюється не монохроматичним, а білим світлом, то кільця будуть мати кольорове забарвлення.



Дифракція Френеля на диску

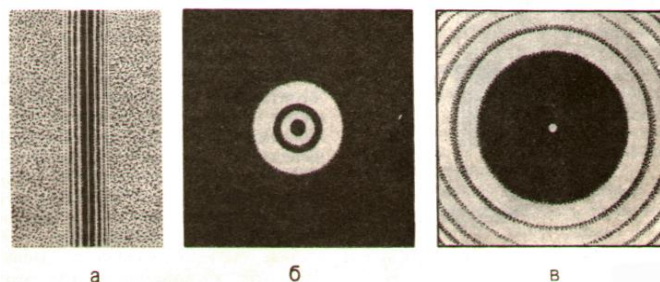
Сферична хвиля, що поширюється з точкового джерела S_0 , зустрічає на своєму шляху непрозорий диск. В точці M завжди буде інтерференційний максимум, оточений концентричними темними і світлими інтерференційними кільцями, що чергуються. При збільшенні розмірів диска інтенсивність центрального максимуму послаблюється. Якщо радіус диска набагато більший за радіус закритої ним центральної зони Френеля, то за диском буде звичайна тінь з дуже слабкою інтерференційною картиною в її межах.



На рисунку наведено фотографії дифракційних картин від різних перешкод: а) від тонкої дротини, б) від круглого отвору, в) від круглого диску.

На фотографіях видно, що:
а) замість тіні від дротини видно групу темних і світлих полос;

б) в центрі дифракційної картини від отвору з'являється темна пляма, оточена світлими і темними кільцями (змінюючи



діаметр отвору або відстань до екрану, в центрі дифракційної картини можна отримати і світлу пляму, оточену темними і світлими кільцями);

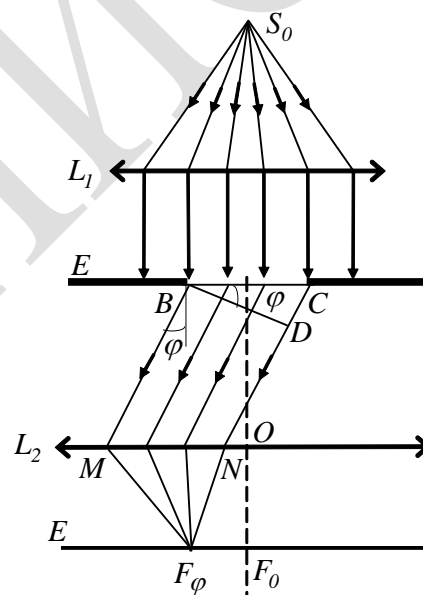
в) в центрі тіні від круглого диску видно світлу пляму (пляму Пуассона), а сама тінь оточена темними концентричними колами.

Дифракція Фраунгофера

Дифракція Фраунгофера на щілині.

Щілиною називають прямокутний отвір, шириною якого порівняно з довжиною можна знехтувати.

Нехай паралельний пучок монохроматичного світла падає нормально на непрозору плоску поверхню, в якій прорізано вузьку щілину, що має сталу ширину $a=BC$ і довжину $l \gg a$. Оптична різниця ходу між крайніми променями BM і CN , що йдуть від щілини шириною a в довільному напрямі:



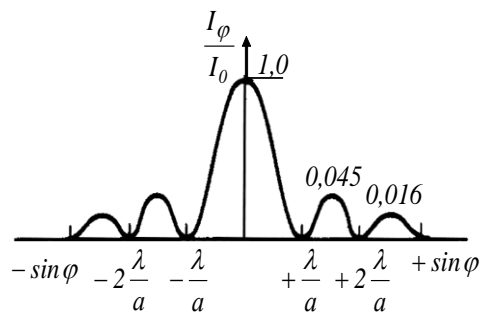
Тоді, якщо число зон Френеля, що вкладаються на ширині щілини, парне, то спостерігається **дифракційний мінімум**:

$$, \text{ де } m = 0, 1, 2, \dots,$$

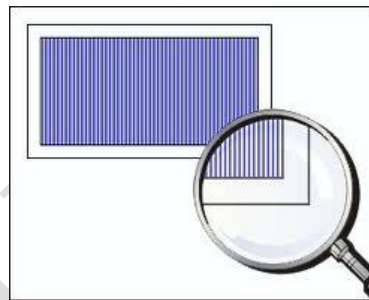
Якщо число зон Френеля, що вкладаються на ширині щілини, непарне, то спостерігається **дифракційний максимум**:

$$, \text{ де } m = 0, 1, 2, \dots,$$

На рисунку наведено зображення залежності відношення I_φ/I_0 від $\sin \varphi$ зображено. Розрахунок показує, що інтенсивності центрального і наступних максимумів співвідносяться як $I_0 : I_1 : I_2 : I_3 = 1 : 0,045 : 0,016 : 0,0083 : \dots$, тобто основна частина світлової енергії зосереджена в центральному максимумі.



Дифракційна решітка – _____



Параметри дифракційної решітки:

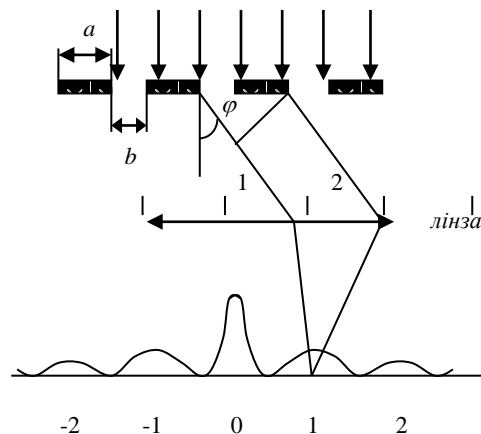
- *стала дифракційної решітки* – кількість штрихів (прозорих або непрозорих перешкод) на одиницю довжини дифракційної решітки:

$$n = \quad ;$$

- *період дифракційної решітки* – сума ширини щілини і перешкоди:

$$d = \quad .$$

Оптична різниця ходу променів, що йдуть від двох сусідніх щілин для даного напрямку φ (рис.):



Тоді умова дифракційного максимуму:

$$, \text{ де } m = 0, 1, 2, \dots$$

Тоді умова дифракційного мінімуму:

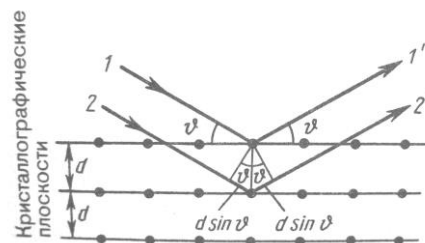
$$, \text{ де } m = 0, 1, 2, \dots,$$

Широкого поширення отримали дифракційні решітки як диспергуючі елементи у спектральних пристроях (монохроматорах, спектрографах, спектрофотометрах тощо) і як елементи резонаторів у лазерах з переналаштуванням частоти випромінювання. Вони використовуються також у якості розмежовувачів монохроматичного (лазерного) випромінювання, велика їх роль в інтегральних оптичних пристроях. Дифракція на ультразвуці у прозорих середовищах дозволяє визначити пружні константи середовища, а також створити акустооптичні модулятори світла, що застосовуються у дальномірах, оптичних локаторах і системах оптичного зв'язку.

3. Дифракція на кристалічній решітці. Голографія

Для спостереження дифракційної картини необхідно, щоб період дифракційної решітки був того ж порядку, що й довжина хвилі випромінювання. Кристали – це тримірна просторова решітка з $d=10^{-10}$ м, зрозуміло, що для спостереження дифракційної картини вони придатні лише для рентгенівського випромінювання ($\lambda \approx 10^{-12} - 10^{-8}$ м).

При попаданні паралельних монохроматичних рентгенівських променів (1 і 2) під кутом ковзання ϑ на кристал з відстанню між кристалографічними площинами d , атоми кристалічної решітки збуджуються і стають джерелами когерентних вторинних хвиль 1' і 2', які інтерферують між собою. При різниці ходу між двома променями, відбитими від сусідніх кристалографічних площин, кратній цілому числу хвиль, спостерігається дифракційний максимум:



$(m=0, 1, 2, \dots)$ – формула _____.

Зображення будь-якої світної точки в монохроматичному світлі являє собою не стигматичне зображення, а дифракційну картину, тобто точкове джерело відображається у вигляді центральної світної плями, обмеженої темними і світлими плямами, що чергуються.

Для того, щоб отримати візуальну інформацію про предмет, він має або випромінювати світлові хвилі, або їх відбивати. За амплітудою світлової хвилі, що потрапляє в око або на реєструючий прилад, можна судити про двомірний, тобто плоский вигляд предмета, без об'ємних параметрів. Таке зображення, наприклад, дає фотографія. Для отримання об'ємного зображення необхідно вміти реєструвати і відтворювати амплітуду і фазу хвилі, що йде від предмета.

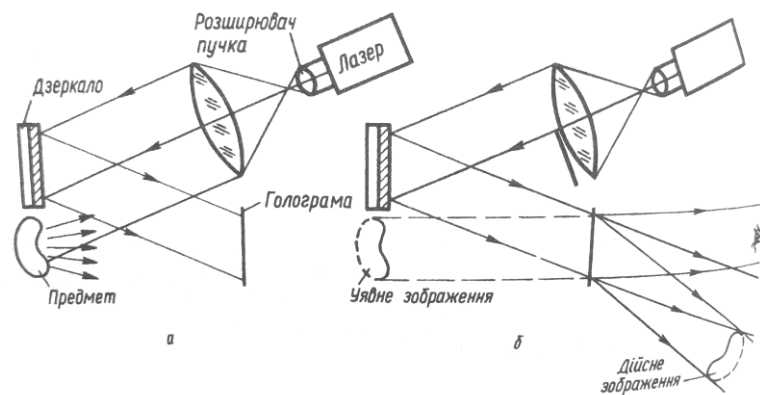
Голографія (з грец. «повний запис») – _____



Цей принципово новий спосіб фіксування і відтворення просторового зображення предметів був винайдений англ. фізиком Д. Габором у 1947 р. (Нобелівська премія, 1971 р.).

Експериментальне втілення і подальше розроблення цього способу було здійснене українським фізиком **Ю. М. Денисюком** у **1962 році** і американськими фізиками **Е. Лейтом** і **Ю. Упатніексом** у **1963 році** після винайдення джерел світла високого степеня когерентності – лазерів у **1960 році**.

Принцип реєстрації і відтворення голографічного зображення полягає у реєстрації і відтворенні амплітуди і фази хвилі, що йде від предмета. Тому для реєстрації як фазової, так і амплітудної інформації, окрім хвилі, що йде від предмету (так званої



предметної хвилі), використовують ще й когерентну їй хвилю, яка йде від джерела світла (так звану *опорну хвилю*). Ідея голографії полягає у тому, що фотографується розподіл інтенсивності в інтерференційній картині, яка виникає при накладанні хвильового поля об'єкта і когерентної йому опорної хвилі відомої фази. Наступна дифракція світла на зареєстрованому розподілі затемнень у фото шарі відтворює хвильове поле об'єкта і дозволяє випромінювання цього поля при відсутності об'єкта.

Поєднання 3D технологій і технологій голограмного запису і відтворення зображень широко використовуються сьогодні у різних сферах нашого життя. Як приклад можна навести виступ Мадонни в оточенні віртуальної групи Gorillas, на церемонії вручення премії Grammy Music Awards.

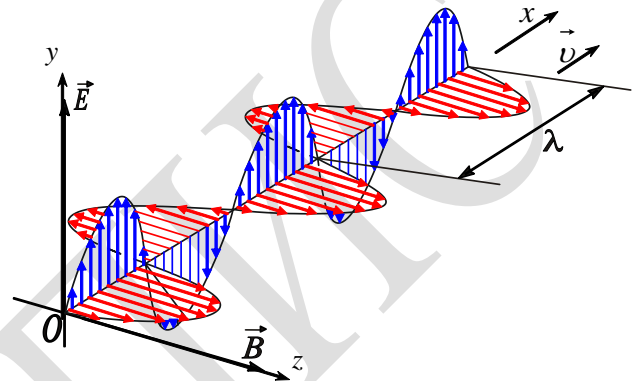


4. Поляризація світла

Світло – це _____

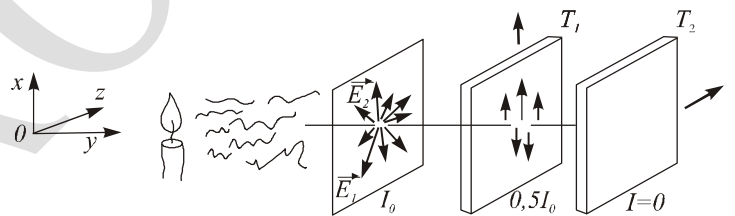
Електромагнітна хвиля – це _____

З теорії Максвелла електромагнітна хвиля поперечна, тобто вектори напруженості електричного і магнітного полів хвилі \vec{E} та \vec{B} коливаються у взаємно перпендикулярних площинах, перпендикулярно до напрямку поширення хвилі (рис.). Тому для описання закономірностей поляризації світла достатньо знати поведінку лише якогось одного з векторів.

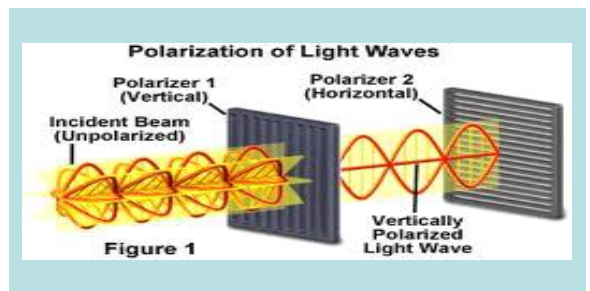


За *світловий вектор* прийнято _____

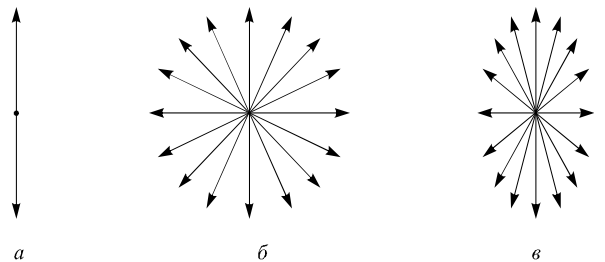
Кожен атом тіла випромінює світлові хвилі незалежно один від одного, тому потік світлових хвиль, який випромінюється тілом, характеризується усіма можливими рівномірними напрямками коливання світлового вектора \vec{E} .



Світло, що характеризується усіма можливими напрямками коливання світлового вектора \vec{E} , називають *неполяризованим (природнім)*.



Світло, у якого коливання світлового вектора здійснюються лише в одній площині (рис., а), називають *плоско поляризованим (лінійно поляризованим)*. *Світло*, у якого амплітудні значення вектора \vec{E} неоднакові для різних напрямків (рис., в).



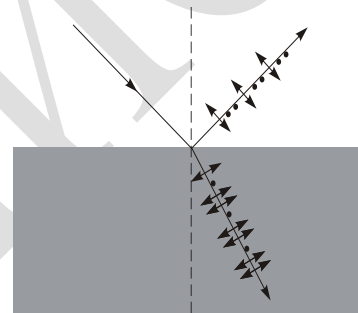
Поляризацією називають _____

Якщо поставити на шляху неполяризованого світла дві однакові пластинки турмаліну, вирізаних паралельно до їх оптичної осі. Перша пластинка буде перетворювати природне світло у плоскополяризоване – _____, а за допомогою другої можна визначити (проаналізувати) ступінь поляризації світла – цю пластинку називають _____.

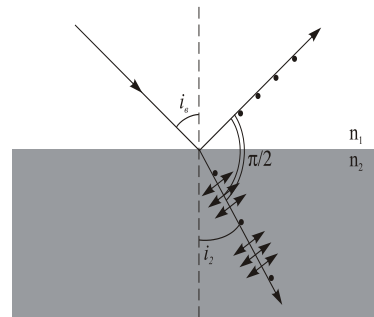
Якщо I_0 – інтенсивність світла, яке пройшло через поляризатор і попадає на аналізатор, I – інтенсивність світла, яке пройшло аналізатор, а α – кут між площинами поляризації поляризатора і аналізатора, то:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad \text{– закон Малюса,}$$

Досліди показують, що відбитий і заломлений промені неполяризованого світла на межі діелектрика стають частково поляризованими. У відбитому промені переважаючими є коливання, позначені точками (тобто перпендикулярні до площини рисунка), а в заломленому промені – коливання, позначені рисками (тобто паралельні площині рисунка).



У 1815 році Д. Брюстер експериментально встановив, що для будь-якого діелектрика з відносним показником заломлення n_2 існує такий кут падіння, при якому відбитий промінь повністю поляризований, а заломлений — максимально поляризований. Цей кут називають **кутом повної поляризації**, або **кутом Брюстера**, і визначають співвідношенням



– закон Брюстера.

При цьому кут між відбитим і заломленим променями становить 90° .

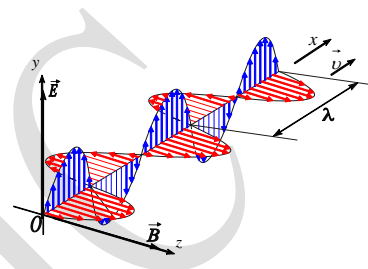
Поляризаційні пристрої широко використовуються в кристалографії для дослідження властивостей кристалів; в оптичній промисловості для визначення напружень у склі; в машинобудуванні і приборобудуванні для дослідження методом фотопружності напружень у деталях машин і спорудах; у медицині, в хімічній, харчовій, фармацевтичній промисловості для визначення концентрацій розчинів. Поляризаційні пристрої отримали поширення також при вивченні ряду явищ в електричному і магнітному полях.

Лекція 11. Квантова оптика

1. Теплове випромінювання та його закони
2. Утруднення класичної теорії теплового випромінювання. Квантова гіпотеза випромінювання
3. Явища фотоефекту та ефекту Комптона
4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання
5. Фотони, їх маса та імпульс

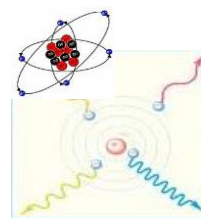
1. Теплове випромінювання та його закони

Електромагнітне випромінювання всіх довжин хвиль обумовлене коливаннями електричних зарядів, з яких складається речовина – іонів, вільних і зв'язаних електронів. Для пояснення закономірностей електромагнітного випромінювання тілами, уявленню про хвильову природу світла було не достатньо, тоді для пояснення цих явищ М. Планк висунув припущення, що атоми тіла випромінюють і поглинають енергію не неперервно, а певними дискретними порціями – квантами.



Квантова оптика – _____

Електромагнітне випромінювання всіх довжин хвиль обумовлюється коливаннями електричних зарядів, з яких складається речовина – іонів, вільних і зв'язаних електронів. При випромінюванні тілом електромагнітних хвиль його енергія зменшується. Для тривалого тілом випромінювання необхідно поповнювати його енергію.



Теплове випромінювання – _____

У будівництві поряд з традиційним конвекційним типом опалення широко використовують **систему променевого (інфрачервоного) опалення**. В обладнанні цього класу продукти зго-рання нагрівають тіло (металеву трубу, керамічну пластину або мармурову плиту), яке випромінює теплове інфрачервоне випромінювання.

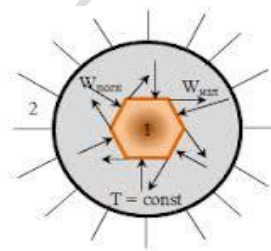


Нагрівачі розташовують у верхній частині приміщення, а теплове випромінювання, поглинаючись поверхнями (одежею і шкірою людини, меблями, стінами, підлогою тощо), створює тепловий комфорт без підвищення температури навколишнього повітря. Повітря нагрівається в основному від конструкцій і предметів.



Якщо тіло за одиницю часу випромінює енергії більше, ніж поглинає, то температура тіла знижується, і навпаки, якщо тіло за одиницю часу поглинає енергії більше, ніж випромінює, то температура тіла підвищується.

Рівноважним називається **випромінювання**,



Кількісною характеристикою теплового випромінювання є **спектральна густина енергетичної світності тіла** – _____

_____ :

$$R_{\nu,T} = \quad , \quad \left[R_{\nu,T} \right] = \quad ,$$

де $dW_{\nu,\nu+d\nu}^{eunp}$ – енергія електромагнітного випромінювання за одиницю часу (потужність випромінювання) з одиничної площі поверхні тіла в інтервалі частот від ν до $\nu+d\nu$.

Здатність тіл поглинати падаюче на них випромінювання характеризує **спектральна поглинаюча здатність**:

$$A_{\nu,T} = \quad ,$$

показує _____

_____.

$R_{\nu,T}$ і $A_{\nu,T}$ залежать від природи тіла, його термодинамічної температури і при цьому різняться для випромінювання різних частот.

Тіло, _____

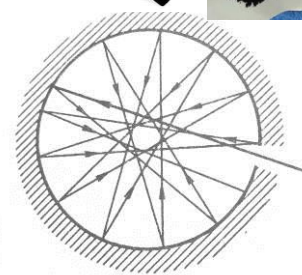
називають **абсолютно чорним**, тобто $A_{\nu,T}^{\text{чорн}} = \underline{\hspace{2cm}}$.

Абсолютно чорних тіл у природі не існує, хоча такі тіла, як Сонце, сажа, чорний бархат тощо, у певному інтервалі частот за своїми властивостями близькі до них.



Ідеальною моделлю чорного тіла є замкнута порожнина з невеликим отвором, внутрішня поверхня якої почорнена.

Промінь світла, що попадає всередину такої порожнини, зазнає багатократного відбивання від стінок, у результаті чого інтенсивність випромінювання, яке виходить, буде близька до нуля.



Це пояснює те явище, що відкриті вікна будинків з вулиці видаються темними, хоча в кімнаті досить світло.



Випромінювання абсолютно чорного тіла описується такими законами:

1. **Закон Кірхгофа:** _____

_____ :
_____ :

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T}.$$

Так як спектральна поглинаюча здатність абсолютно чорного тіла $A_{\nu,T}^{\text{чорн}} = 1$, то із закону Кірхгофа випливає, що $R_{\nu,T} = r_{\nu,T}$, отже **фізичний зміст універсальної функції Кірхгофа** $r_{\nu,T}$ полягає у тому, що вона є спектральною густиною енергетичної світності абсолютно чорного тіла.

Наслідок із закону Кірхгофа: для усіх тіл відношення спектральної густини енергетичної світності до спектральної поглинаючої здатності дорівнює густині енергетичної світності абсолютно чорного тіла при тій же температурі та частоті.

2. Для визначення **енергетичної світності абсолютно чорного тіла**, яка залежить лише від температури, необхідно проінтегрувати універсальну функцію Кірхгофа по усім частотам:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu,$$

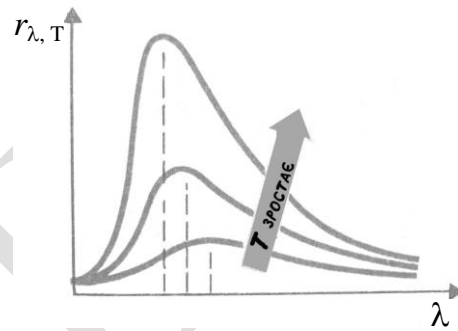
R_e – енергія, що випромінюється тілом з одиничної площі поверхні за одиницю часу.

Згідно закону **Стефана-Больцмана**, _____

$$R_e = \sigma T^4$$

де σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 K^4}$.

3. **Закон зміщення Віна** визначає



$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

де b – стала Віна, $b = 2,9 \cdot 10^{-3} м \cdot K$.

Закон Віна пояснює, чому при зниженні температури нагрітих тіл у їх спектрі все сильніше переважає довгохвильове випромінювання (наприклад, перехід кольору розжареного металу від білого до червоного при остиганні).



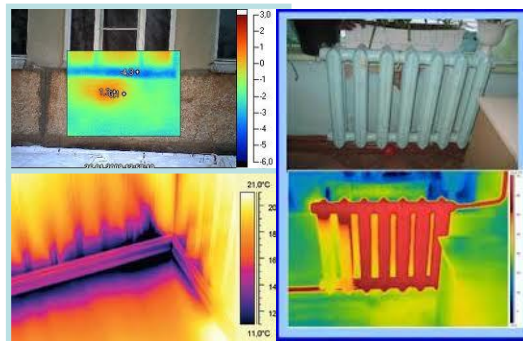
У будівництві для безконтактного знаходження ділянок з поганою теплоізоляцією, контролю якості будівництва нових споруд, знаходження комунікаційних пошкоджень застосовують метод інфрачервоної термографії. Він полягає у реєстрації на відстані теплового поля об'єкту. Температура поверхонь будівельних конструкцій – дуже важливий і наочний показник у діагностиці, оскільки залежить від теплофізичних властивостей матеріалів, наявності теплопровідних включень, як конструктивно обумовлених, так і технологічних або конструктивних дефектів тощо.



Тепловізор «переводить» у видиму область спектру власне теплове випромінювання людей, техніки та інших джерел. За кольоровим «відбитком» можна легко встановити місцезнаходження джерела втрат тепла. Кольорове зображення конструкції, зведеної без порушень, буде мати забарвлення в

холодній гамі (тобто використані матеріали мають необхідні теплоізоляційні властивості й не пропускають тепло назовні). Якщо на «фото» є яскраві кольорові плями – це попередження про втрату тепла в цих місцях унаслідок низьких якостей застосованих будівельних матеріалів або будівельний брак.

Розрізняють зовнішню і внутрішню термографічну зйомку. Внутрішній тепловий контроль будівель допомагає виявити не лише сліди протікань між перекриттями і дахом, але й ділянки порушень у системі опалення і гарячого водопостачання (так, повітряна пробка або засмічення у трубі будуть відображені на фото у вигляді темної плями на яскраво-теплому фоні). Діагностування економить час і кошти при пошуку дефектних і аварійних ділянок у конструкціях та комунікаціях, а після ремонтних робіт дозволить переконатися в якості їх проведення.



2. Утруднення класичної теорії теплового випромінювання. Квантова гіпотеза випромінювання

Англійські вчені Д. Релей і Д. Джинс спробували теоретично вивести універсальну функцію Кірхгофа $r_{\lambda,T}$, враховуючи, що за класичними законами статистичної фізики:

- 1) випромінювання відбувається неперервно;
- 2) розподіл енергії рівномірний ($\frac{1}{2}kT$ на кожен ступінь свободи).

За формулою Релея-Джинса:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15c^3 h^3} \lambda^{-4}$$

Ця формула дуже добре описує розподіл енергії у довгохвильовій частині спектра випромінювання, тобто для малих частот, проте в інтервалі малих довжин хвиль (великих частот) вона різко розходиться з експериментом: зі зменшенням довжини хвилі



випромінювальна здатність АЧТ не зменшується до нуля, як про це свідчить експеримент, а зростає до нескінченності. Отже, у короткохвильовому діапазоні формула Релея-Джинса дає абсурдний результат, який назвали «ультрафіолетовою катастрофою». Класична фізика не змогла пояснити закони розподілу енергії у спектрі АЧТ.

У 1900 році М. Планк запропонував принципово новий метод розрахунку виразу для розподілу спектральної густини енергетичної світності АЧТ.

М. Планк висунув припущення, що _____

Макс Планк



_____ :

$\varepsilon =$ _____ ,

де $h =$ _____ – _____ ,

$c =$ _____ – _____ ,

$\nu =$ _____ ,

$\lambda =$ _____ .

Враховуючи квантові уявлення про природу теплового випромінювання, М. Планк дістав вираз розподілу спектральної густини енергетичної світності АЧТ:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h c^2}{\nu^5} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

Формула Планка не лише добре погоджується з експериментальними даними, але й з неї легко виводяться всі часткові закони теплового випромінювання і обчислюються його сталі. Таким чином, формула Планка є повним розв'язком основної задачі теплового випромінювання.

Закони теплового випромінювання використовують для вимірювання температур розжарених тіл, що світяться.

Методи вимірювання високих температур, які ґрунтуються на законах рівноважного випромінювання, називають **оптичною пірометрією**. Вони не потребують безпосереднього контакту вимірювальних приладів із досліджуванним тілом, завдяки чому можна вимірювати високі температури, а також температури віддалених тіл (наприклад, зірок).

Залежно від закону, покладеного в основу методу вимірювання температур, розрізняють три умовні температури:

- 1) під *радіаційною* розуміють температуру АЧТ, при якій його енергетична світність R_e однакова з енергетичною світністю тіла R_T .
- 2) під *яскравісною* розуміють температуру АЧТ, при якій його спектральна випромінювальна здатність $r_{\lambda,T}$ дорівнює

спектральній випромінювальній здатності досліджуваного тіла для тієї самої довжини хвилі $R_{\lambda, T}$.

- 3) під *колірною* температурою розуміють температуру АЧТ, при якій спектральний склад його випромінювання однаковий із спектральним складом досліджуваного тіла.

3. Явища фотоефекту та ефекту Комптона

Фотоефектом (фотоелектричним ефектом) називають _____

Розрізняють три види фотоефекту:

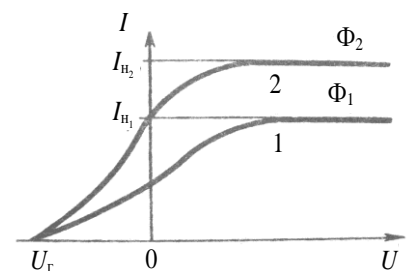
- 1) *зовнішній фотоефект* – _____

- 2) *внутрішній фотоефект* – _____

- 3) *вентильний фотоефект* – явище виникнення електрорушійної сили (фото-е.р.с.) при опроміненні електромагнітними хвилями контакту двох напівпровідників з різним типом провідності, або контакту напівпровідника з металом.

Узагальнюючи результати експериментальних даних, встановлено такі **закономірності зовнішнього фотоефекту:**

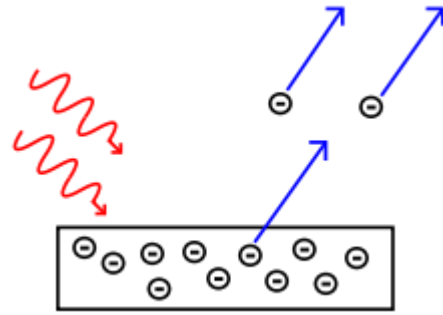
- 1) сила фотоструму насичення I прямо пропорційна світловому потоку Φ , що падає на катод (*фотострум насичення* I_n називається максимальна сила струму, яка досягається між катодом і анодом при збільшенні зовнішньої напруги для заданого освітлення) – ***I закон Столетова*** (рис.);



- 2) початкова кінетична енергія звільнених електронів лінійно залежить від частоти падаючого на катод світла і не залежить від його інтенсивності – ***II закон Столетова***;

- 3) гальмівна напруга лінійно залежить від частоти і не залежить від його інтенсивності (*гальмівною напругою* називають таку від'ємну напругу між катодом і анодом при якій фотострум відсутній) (рис. 58);

4) фотоефект не виникає, якщо частота світла менша від деякої характерної для металу величини ν_{min} (мінімальна частота ν_{min} або максимальна довжина λ_{max} світла при яких електрони ще вилітають з металу, але їхня швидкість дорівнює нулю, називається *червоною межею фотоефекту*);



5) фотоефект – явище безінерційне, тобто з припиненням освітлення воно припиняється.

А. Ейнштейн пояснив явище фотоефекту та його закономірності на основі квантової теорії Планка, припустивши, що світло не лише випромінюється, а й поширюється і поглинається певними порціями (квантами) електромагнітного випромінювання – _____.

Кожен квант, за Ейнштейном, поглинається тільки одним електроном.

За законом збереження енергії:

– *рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту,*

де $h\nu$ – _____,
 $A_{вих}$ – _____,
 $\frac{mv^2}{2}$ – _____.

На основі явища фотоефекту заснована дія фотоелектронних приладів.

Фотоелементи – _____

• фотоелементи, які працюють на явищі зовнішнього фотоефекту, називаються *вакуумними фотоелементами*, являють собою скляний балон з відкачаним повітрям, катодом виступає внутрішня поверхня вкрита фоточутливим шаром, у ролі анода використовують кільце або сітку, розташовану в центрі балона (якщо балон заповнений розрідженим газом, то такий фотоелемент називається *газонаповненим фотоелементом*);

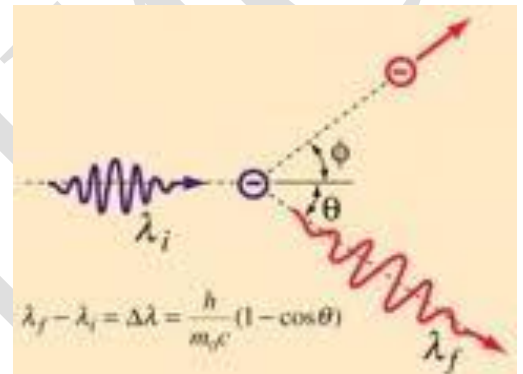


• фотоелементи, які працюють на явищі внутрішнього фотоефекту, називаються *напівпровідниковими фотоелементами*, на відміну від вакуумних мають більшу інтегральну чутливість, дозволяють виконувати виміри в далекому інфрачервоному спектрі, а також в областях рентгенівського і γ -випромінювання, малогабаритні, мають низьку напругу живлення, але помітно інерційні;

• фотоелементи, які працюють на явищі вентильного фотоефекту, називаються *вентильними фотоелементами*, на відміну від вакуумних мають більшу інтегральну чутливість, не потребують джерела живлення.

Сфера застосування фотоелектронних пристроїв (фотоелементів, фотоелектронних помножувачів, фотодіодів, фотоопорів, електронно-оптичних перетворювачів тощо) дуже широка. Їх використовують як датчики реєстрації випромінювання. В основі принципу фотографування лежить фотохімічна дія світла на речовину. При розробленнях нових систем запису і зберігання інформації, створенні захисних світлофільтрів використовується явище зміни оптичних властивостей речовини під дією світла (фотохромізм). У будівельній галузі фотоелементи використовуються для контролю, управління та автоматизації різних процесів (датчики освітленості, сигналізації, локації невидимого випромінювання та для перетворення променевої енергії Сонця в електричну – сонячні батареї).

Ефектом Комптона називають явище пружного розсіювання короткохвильового електромагнітного випромінювання (рентгенівського і γ -випромінювання) на вільних або слабкозв'язаних електронах речовини, яке супроводжується збільшенням довжини хвилі випромінювання



$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

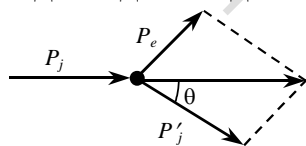
де λ – _____,
 λ' – _____,
 Λ – _____

(при розсіянні фотона на електроні $\Lambda = 2,426 \text{ нм}$),

θ – _____.

Зміна довжини хвилі $\Delta\lambda$ не залежить від довжина падаючого на речовину випромінювання і природи речовини, на яку падає хвиля, а визначається величиною кута розсіювання.

Пояснюють ефект Комптона на основі квантових уявлень. У процесі пружного зіткнення рентгенівських фотонів з вільними електронами речовини фотон передає електрону частину своєї енергії та імпульсу у відповідності до законів їх збереження:



$$m_e c^2 + h\nu = m_e c^2 + h\nu'$$

$$(m_e v)^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2} \nu\nu' \cos\theta.$$

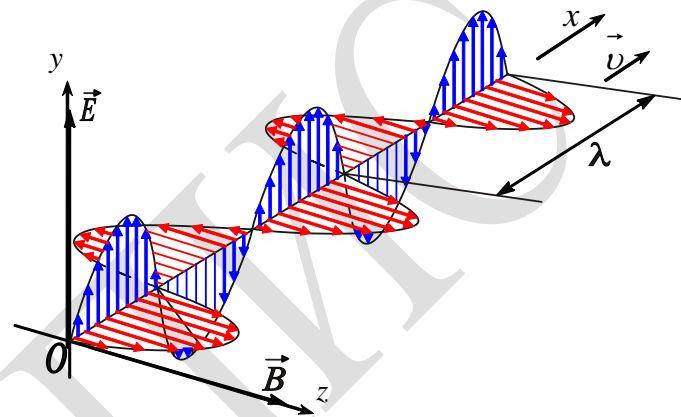
Розв'язавши цю систему рівнянь, матимемо:

$$\Delta\lambda = \frac{2h}{m_e c} \sin^2 \frac{\theta}{2}.$$

4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання

Пояснити такі явища, як інтерференція, дифракція і поляризація можна лише виходячи з уявлень про світло як електромагнітну хвилю; такі явища, як теплове випромінювання, фотоефект тощо, можна пояснити лише припустивши, що світло – це потік частинок (корпускул), які назвали фотонами; а такі явища, як світловий тиск і заломлення світла гарно пояснюються як хвильовою, так і корпускулярною (квантовою) теоріями про природу світла.

Таким чином, світло виявляє єдність двох взаємовиключних властивостей – неперервних (хвильових) і дискретних (корпускулярних), які доповнюють одна одну. Хвильові властивості світла проявляються у закономірностях його поширення, а корпускулярні – у процесах взаємодії світла з речовиною. Чим більша довжина хвилі, тим менша енергія та імпульс фотона і тим складніше виявляються квантові властивості світла, навпаки – чим менша довжина хвилі, тим більша енергія та імпульс фотона і тим складніше виявляються хвильові властивості світла.



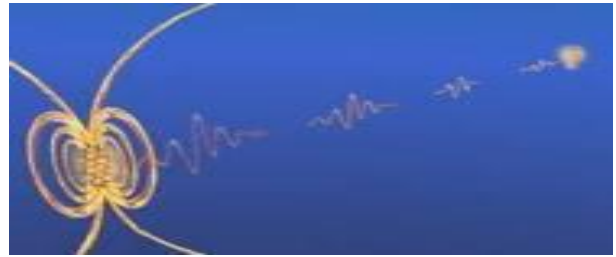
Основні рівняння, які пов'язують корпускулярні властивості електромагнітного випромінювання (енергію та імпульс фотона) з хвильовими властивостями (частотою і довжиною хвилі):

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

_____, називають **корпускулярно-хвильовим дуалізмом електромагнітного випромінювання**.

5. Фотони, їх маса та імпульс

 _____, які
 називаються **фотонами**.



Енергія фотона $\varepsilon = h\nu$, за законом взаємозв'язку маси і енергії $\varepsilon = mc^2$, з чого слідує, що маса фотона:

$$m_\phi =$$

(для найбільш чутливої для людського ока монохроматичної хвилі $\lambda = 555$ нм $m_\phi = 4 \cdot 10^{-36}$ кг).

Частинка, що рухається зі швидкістю v і має масу спокою m_0 , матиме масу

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Фотон не має маси спокою $m_0 = 0$ і може існувати тільки при русі зі швидкістю c .

Імпульс фотона

$$p_\phi =$$

Тиск світла на поверхню становить:

$$p =$$

де E_e – _____,

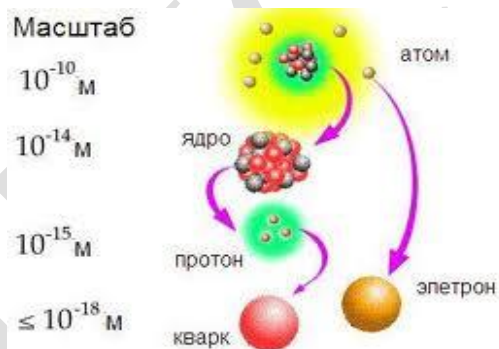
ρ – _____.

РОЗДІЛ V. КВАНТОВА ФІЗИКА. ФІЗИКА АТОМА І ЯДРА

Лекція 12. Хвильові властивості матерії

1. Хвильові властивості матерії
2. Корпускулярно-хвильовий дуалізм речовини. Границі застосовності класичної механіки
3. Хвильова функція, її фізичний зміст. Рівняння Шредінгера
4. Приклади розрахунку поведінки електрона в найпростіших полях. Квантування енергії електрона

Квантова фізика – це _____



1. Хвильові властивості матерії

Французький фізик Луї де Бройль у 1924 році, розвиваючи теорію про корпускулярно-хвильовий дуалізм світла, дійшов висновку, що _____

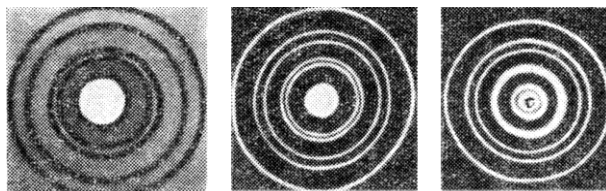
Де Бройль стверджував, що не тільки фотони, але й електрони та будь-які інші частинки матерії поряд з корпускулярними мають ще й хвильові властивості.

Довжину хвилі частинки, що рухається зі швидкістю v визначають за **формулою де Бройля**:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Ця гіпотеза знайшла чітке підтвердження у дослідах з дифракції та інтерференції електронних пучків, а згодом і окремих електронів на кристалічній решітці

В 1927 році К. Девіссон і Л. Джермер експериментально підтвердили гіпотезу де Бройля, спостерігаючи розсіювання електронів монокристалом нікелю. Дебай і



Шеррер пропускали вузький пучок рентгенівського випромінювання крізь дрібнокристалічний порошок або тонку металеву пластинку, в результаті чого на фотографічній пластинці отримували дифракційну картину у вигляді

концентричних світлих і темних кілець. Аналогічну картину у 1928 році спостерігали Д.Томсон і П.Тартаковський при пропусканні крізь металеві плівки (золота і міді) потоків електронів.

Протягом тривалого часу залишалось нез'ясованим, чи хвильові властивості є окремо у кожної мікрочастинки, чи їх має лише потік багатьох мікрочастинок. У 1949 році В. Фабрикант, М. Сушкін, Л. Біberman провели дослід з дифракції окремих електронів та отримували таку ж дифракційну картину, як і для інтенсивних пучків електронів. Цей дослід переконав, що хвильові властивості притаманні кожному електрону.

Відкриття хвильових властивостей електрона показало, що електрон не можна уявити у вигляді маленької кульки як матеріальної точки. Він має складну структуру з корпускулярними і хвильовими властивостями одночасно.

Явище дифракції електронних пучків, лежить в основі принципу роботи електронних мікроскопів. Електронні мікроскопи дозволяють протягом секунд отримувати зображення процесів, що відбуваються у поверхневих шарах металів при їх шліфуванні, гартуванні тощо. Дифракція нейтронів лежить в основі нейтронографії – методу дослідження структури речовини у різних агрегатних станах.

Електронний мікроскоп



2. Корпускулярно-хвильовий дуалізм речовини. Границі застосовності класичної механіки

М. Борн і В. Гейзенберг висловили думку про те, що _____

Макс Борн



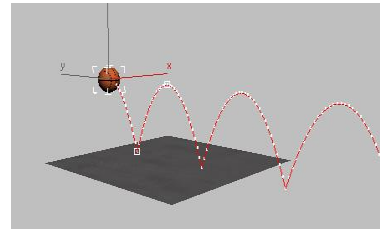
Вернер Гейзенберг



Частинки з великою масою мають настільки незначну довжину хвилі, що ці хвилі не можна фіксувати за допомогою сучасного обладнання і навпаки, масу мікрочастинок можна лише оцінити за допомогою математичних обчислень.

Наприклад, частинці масою 1 г , що рухається зі швидкістю 1 м/с , відповідає хвиля де Бройля з довжиною $\lambda = 6,62 \cdot 10^{-31} \text{ м}$, і навпаки, масу мікрочастинок можна лише оцінити за допомогою математичних обчислень.

У класичній механіці частинка рухається вздовж визначеної траєкторії, місцезнаходження її можна чітко визначити разом із іншими параметрами, такими як швидкість, імпульс.

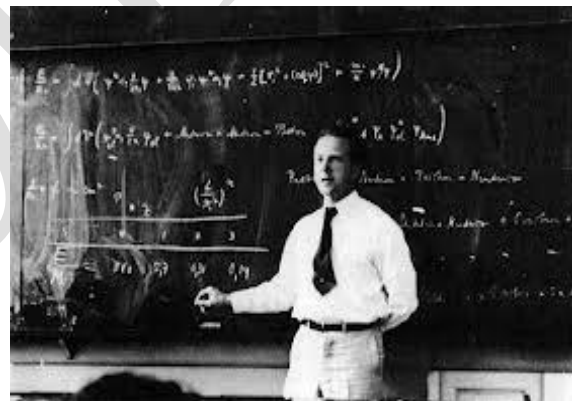


Для мікрочастинок визначення чіткого місцезнаходження, її швидкості та імпульсу стає неможливим, оскільки _____

Подвійна природа матерії (особливо мікрочастинок), змушує описувати частинки за допомогою як хвильових, так і корпускулярних уявлень. Це ставить питання про межу виконань законів класичної фізики і перехід до квантових уявлень.

Мікрочастинки, через наявність у них хвильових властивостей, не локалізовані у будь-якій точці простору у даний момент часу, тому неможливо говорити про траєкторію їхнього руху і неправомірно говорити одночасно про точні значення їх координат та імпульсу.

В. Гейзенберг, враховуючи корпускулярно-хвильовий дуалізм мікрочастинок, дійшов висновку про _____



$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h,$$

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \geq h, \text{ – невизначеності Гейзенберга}$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \geq h,$$

де h – _____.

Оскільки $\Delta p = m\Delta v$, то очевидно, що чим більше маса частинки, тим менше невизначеність її координати та швидкості і, відповідно, з тим більшою достовірністю можна застосовувати до цієї частинки поняття траєкторії.

Так, наприклад, для частинки масою $m = 1 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$ і лінійними розмірами $\Delta x = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, координата якої визначена з точністю 1% від її розмірів ($\Delta x = 10^{-8} \text{ м}$), невизначеність швидкості:

$$\Delta v_x = \frac{h}{m\Delta x} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{1 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-8}} = 6,62 \cdot 10^{-14} \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

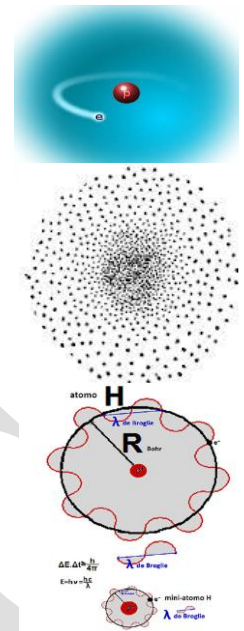
тобто не буде мати суттєвого впливу за всіх можливих для даної частинки швидкостей.



Навпаки ж, при русі електрона вздовж осі x зі швидкістю $v_x = 1 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$, що визначається з точністю до 0,01% ($\Delta v_x \approx 1 \cdot 10^4 \frac{M}{c}$), його місцезнаходження у просторі:

$$\Delta x_x = \frac{h}{m \Delta v} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1 \cdot 10^4} = 7,27 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

можне бути визначене з точністю тисячних часток міліметра.



квантове обмеження застосовності класичної механіки до мікрооб'єктів.

3. Хвильова функція, її фізичний зміст. Рівняння Шредінгера

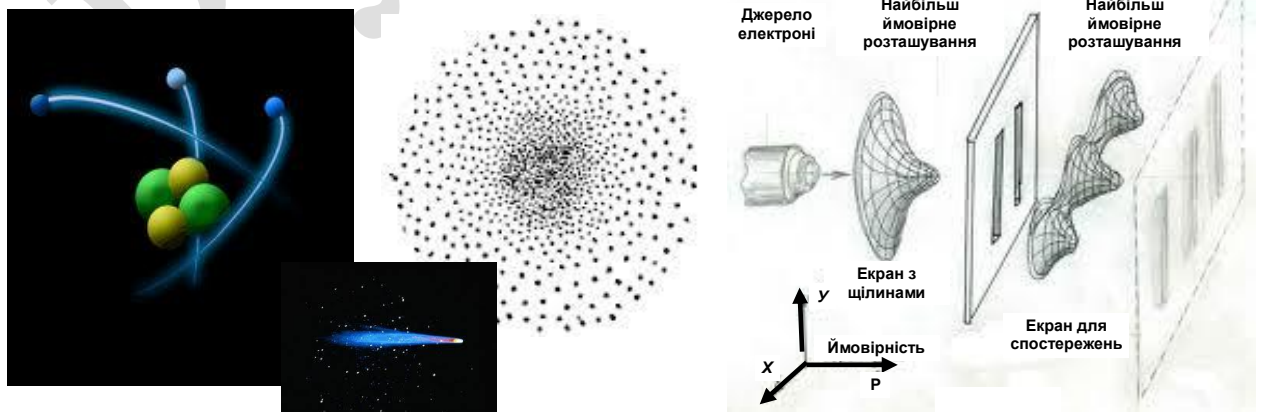
Для описання поведінки мікрочастинок принципово неможливо використати закони класичної механіки, оскільки

Досліди з дифракції мікрочастинок свідчать про аналогічність корпускулярних і хвильових властивостей мікрочастинок і фотонів.

Рух елементарних частинок характеризують хвилями де Бройля.

називають *хвильовою функцією* і позначають $\psi(\vec{r}, t)$ (пси-функція).

Фізичний зміст хвильової функції Ψ :



Квантова механіка базується на ймовірнісному підході до опису поведінки мікрочастинок.

Хвильова функція Ψ має синусоїдальний характер, тому вона не може описувати ймовірність визначення положення мікрочастинок, оскільки може набувати і від'ємних значень.

Ймовірність знаходження мікрочастинок у даній частині простору визначають квадратом модуля даної функції:

$$d\varpi = \quad ,$$

де $d\varpi$ – _____.

Квадрат модуля хвильової функції визначає густину ймовірності:

$$\int_0^{\infty} |\Psi_{(x,y,z,t)}|^2 \cdot dV = 1 \quad - \text{ умова нормування.}$$

На основі дослідних даних, Е. Шредінгер у 1926 році _____

_____.

Загальне рівняння нерелятивістської квантової механіки має вигляд:

де Δ – _____ $(\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2})$,

$i = \sqrt{-1}$ – _____,

m – _____,

$\hbar =$ _____,

$U(x, y, z, t)$ – _____

$\Psi(x, y, z, t)$ – _____.

Важливим частковим випадком загального рівняння Шредінгера є **рівняння Шредінгера для стаціонарного стану частинки** в якому _____

_____:

E – _____,

U – _____.

Стаціонарне рівняння Шредінгера є найважливішим співвідношенням нерелятивістської квантової механіки, оскільки містить повну енергію частинки. В теорії диференціальних рівнянь доводиться, що подібні рівняння мають розв'язок не при довільних значеннях параметра, а лише при певних значеннях енергії системи E – **власних значеннях енергії**. Власні значення енергій можуть утворювати як неперервний, так і дискретний ряд.

Рівняння Шредінгера дає змогу знайти не лише конкретний вигляд функції $\Psi(x, y, z, t)$ у заданому зовнішньому полі $U(x, y, z, t)$, а й визначити її зміну з часом $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$. Знання вигляду Ψ -функції дає змогу знайти всі можливі значення важливих фізичних параметрів фізичної системи у будь-який момент часу.

Рівняння Шредінгера є математичним виразом принципу причинності у квантовій механіці.

Але на відміну від класичної фізики, квантова механіка не дає чіткої відповіді на запитання про точні значення параметрів системи у даний момент часу. Ψ -функція, вказуючи цілий спектр можливих значень параметрів системи, дає змогу обчислити лише ймовірність появи кожного значення під час вимірювання.

4. Приклади розрахунку поведінки електрона в найпростіших полях. Квантування енергії електрона.

Розглянемо декілька порівняно простих прикладів застосування рівняння Шредінгера до руху частинки в конкретних умовах.

1. Рух вільної частинки

Під час руху вільної частинки ($U(x)=0$) її повна енергія збігається з її кінетичною енергією $E = E_k$, тому для вільної частинки, що рухається вздовж осі Ox , ($-\infty \leq x \leq \infty$), рівняння Шредінгера для стаціонарних станів набирає вигляду

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0.$$

Розв'язок рівняння Шредінгера для вільної частинки дозволяє отримати власні значення енергії частинки та її зв'язок із імпульсом:

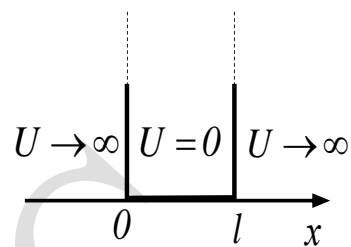
$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{P_x^2}{2m}.$$

Цей зв'язок є звичайним для нерелятивістської частинки.

*Енергія вільної частинки може набувати довільних значень, тобто її енергетичний спектр є **неперервним**.*

2. Частинка в одновірній прямокутній “потенціальній ямі” з нескінченно високими “стінками”

Нехай частинка може рухатися лише вздовж осі Ox і знаходиться всередині прямокутної потенціальної ями, яка обмежена нескінченно високими потенціальними бар'єрами. (див. рис). В цьому випадку потенціальна енергія частинки $U(x)$ набуватиме таких значень:

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0; \\ 0, & 0 \leq x \leq l; \\ \infty, & x > l. \end{cases}$$


де l – ширина ями, а енергія відраховується від дна ями.

Рівняння Шредінгера для стаціонарних станів у межах “ями” ($0 \leq x \leq l$) має вигляд

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0 \quad \text{або} \quad \frac{d^2 \psi}{dx^2} + k^2 \psi = 0,$$

де $k^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E$.

За границі “ями” частинка не проникає, тому імовірність її виявлення за границями ями (при $x=0$ і $x=l$) дорівнює нулю. На границях ями неперервна хвильова функція ψ перетворюється в нуль:

$$\psi(0) = \psi(l) = 0.$$

Розв'язок рівняння Шредінгера відносно енергії частинки дає змогу отримати **власні значення енергій** частинки, що знаходиться в одновірній прямокутній “потенціальній ямі” з нескінченно високими “стінками”

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2ml^2}, \quad (n=1, 2, 3\dots)$$

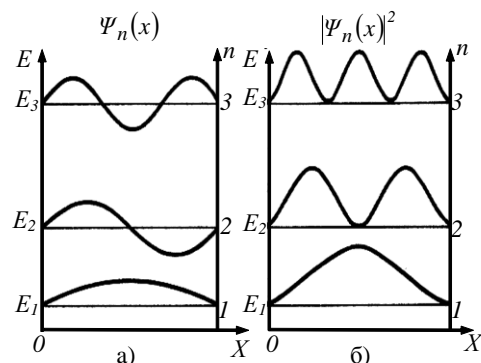
Енергія E_n частинки в потенціальній ямі з нескінченно високими стінками не може бути довільною, а набуває лише певних **дискретних значень, тобто квантується**.

Квантові значення енергії E_n називають **рівнями енергії**, а число n , яке визначає енергетичні рівні частинки, називають **квантовим числом**.

Власні хвильові функції мають вигляд:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi}{l} x, \quad n=1, 2, 3\dots$$

На рис. а наведені графіки функції $\psi_n(x)$ при $n=1, 2, 3$, на рисунку б – густини ймовірності знаходження частинки на різних відстанях від „стінок” ями для $n=1, 2, 3$.

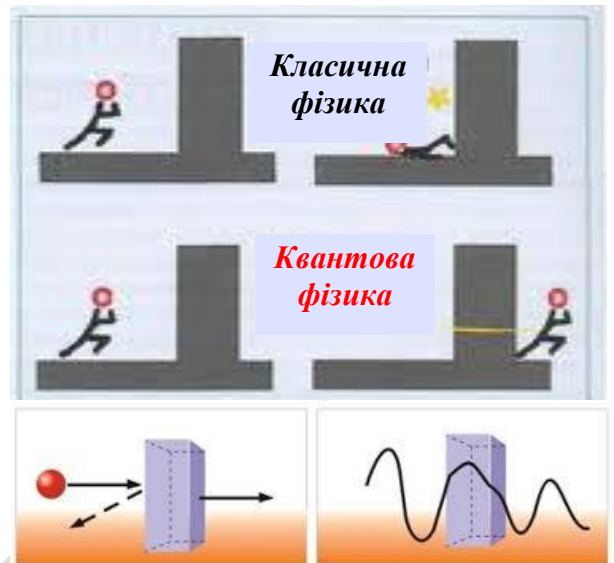


3. Тунельний ефект

Тунельним ефектом називають явище проходження мікрочастинки через потенціальний бар'єр у тому випадку, коли повна енергія частинки менше висоти бар'єру.

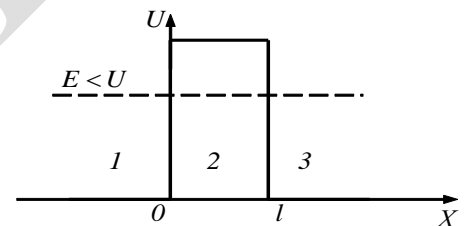
У класичній теорії таке явище неможливе. Так частинка ні коли не подолає вертикальну перешкоду, якщо її кінетична енергія менша за потенціальну енергію, якої вона набула б на вершині перешкоди.

Але на практиці тунельний ефект зустрічається дуже часто. Так, наприклад, електрони провідності долають діелектричний шар окису металу на поверхні вилки електроприладу, ввімкненої у розетку – струм виникає завдяки тунельному переходу електронів крізь окисну плівку.



Нехай частинка, яка рухається в додатному напрямку осі Ox зустрічає на своєму шляху прямокутний потенціальний бар'єр висотою U і шириною l (див. рис). Отже величина U вздовж осі Ox змінюється так:

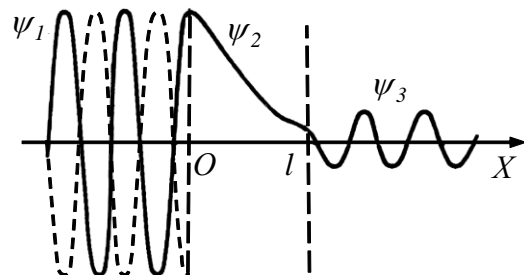
$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ U, & 0 \leq x \leq l; \\ 0, & x > l. \end{cases}$$



При даних умовах задачі класична частинка, маючи енергію E , або пройде над бар'єром при $E > U$, або відіб'ється від нього при $E < U$ і буде рухатися в зворотний бік.

Для квантової частинки навіть при $E > U$ є відмінна від нуля ймовірність того, що частинка відіб'ється від бар'єра і буде рухатися у зворотний бік. При $E < U$ є також відмінна від нуля ймовірність того, що частинка проникне через бар'єр і виявиться в області $x > l$.

Розв'язки рівнянь Шредінгера для кожної з виділених областей показують, що хвильова функція не дорівнює нулю і всередині бар'єра, а в області 3 буде мати вигляд хвиль де Бройля з тим самим імпульсом, але меншою амплітудою дивіться рисунок.



Для потенціального бар'єра довільної форми коефіцієнт пропускання або коефіцієнтом прозорості бар'єра:

$$D = D_0 \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U - E)} dx \right],$$

де $U = U(x)$.

Із виразів для D видно, що коефіцієнт прозорості залежить від маси мікрочастинки, ширини бар'єра і від різниці $(U - E)$.

Тунельний ефект є специфічним квантовим ефектом. Проходження мікрочастинки крізь область, в яку, згідно із законами класичної механіки, вона не може проникнути, можна пояснити співвідношенням невизначеностей.

Невизначеність імпульсу Δp на відрізку $\Delta x = l$ дорівнює $\Delta p > \frac{\hbar}{l}$. Зв'язана з

цим розкидом в значеннях імпульсу кінетична енергія $\frac{\Delta p^2}{2m}$ може виявитися

достатньою для того, щоб повна енергія мікрочастинки виявилася більшою за потенціальну.

Проходження частинок через потенціальний бар'єр експериментально підтверджено в явищі холодної емісії електронів з металу. Тунельний ефект відіграє основну роль у явищах радіоактивного α -розпаду, перебігу термоядерних реакцій.

Лекція 13. Основи теорії твердого тіла

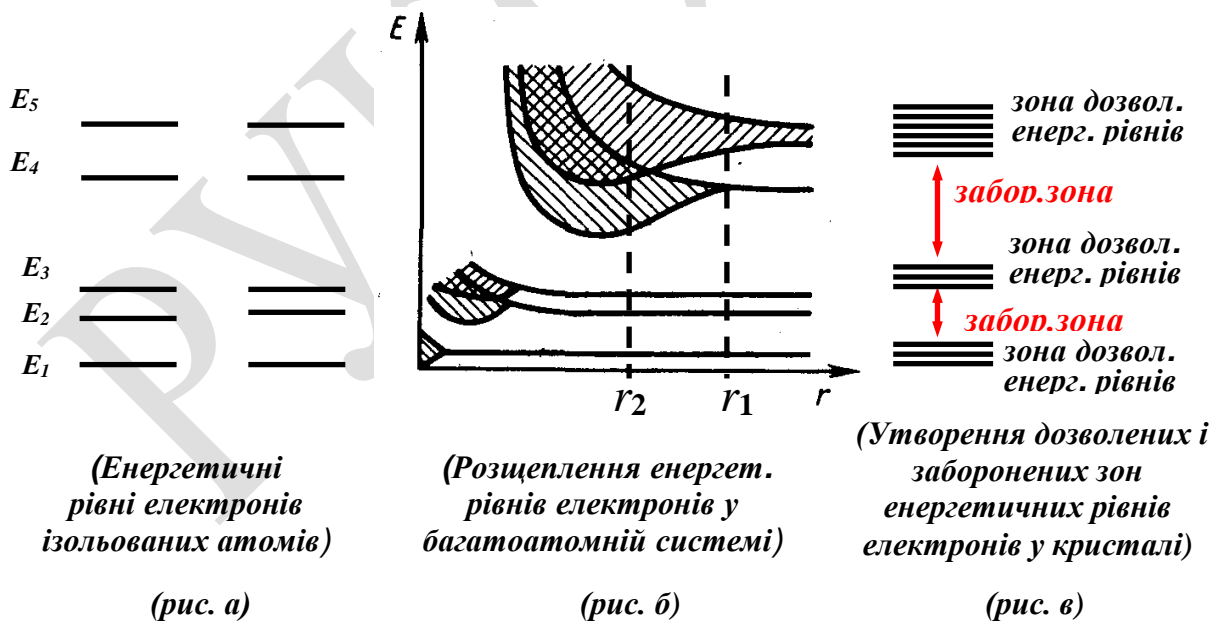
1. Елементи зонної теорії твердих тіл
2. Рівень Фермі
3. Заповнення енергетичних зон. Метали, діелектрики та напівпровідники з точки зору зонної теорії
4. Електропровідність напівпровідників
5. Донорні та акцепторні напівпровідники
6. Контакти напівпровідників різних типів та напівпровідників з металами

1. Елементи зонної теорії твердих тіл

Щоб зрозуміти походження зон, розглянемо уявний процес об'єднання окремих атомів у кристал. _____

Заповнення рівнів електронами здійснюється в кожному атомі _____

(рис. а).



При взаємному зближенні атомів кожний з них _____

Зі зближенням атомів і об'єднанням їх в одну квантову систему, між ними виникає взаємодія, що посилюється і приводить до зміни положення рівнів. Замість одного однакового для всіх атомів рівня виникають N дуже близьких рівнів, які не збігаються, оскільки N електронів не можуть мати в одній квантовій системі N однакових станів. Кожний рівень ізольованого атома розщеплюється в кристалі на N густо розміщених рівнів, які утворюють зону.

У кристалі, який складається із N атомів, кожний рівень ізольованого атома стає _____

Розщеплення різних рівнів не є однаковим. _____

На рис. показане розщеплення рівнів як функції відстані r між атомами.

Зі схеми видно, що виникає в кристалі розщеплення рівнів, які зайняті внутрішніми електронами, дуже мале. Помітно розщеплюються лише рівні, які зайняті валентними електронами. Таке саме розщеплення відбувається й з більш високими рівнями, які не зайняті електронами в основному стані атома.

Залежно від конкретних властивостей атомів рівноважна відстань між сусідніми атомами в кристалі може бути або типу r_1 , або типу r_2 . При відстані типу r_1 _____

_____ . При відстані типу r_2 _____

Розщеплення енергетичних рівнів призводить до _____

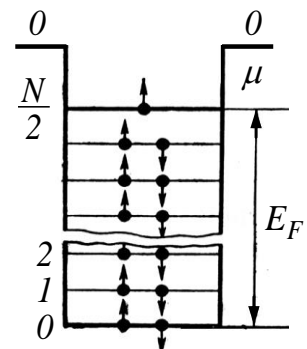
На кожному енергетичному рівні можуть знаходитися два електрони, які мають протилежно спрямовані спіни.

_____, називають *дозволеними енергетичними зонами*.

_____, називають *забороненими енергетичними зонами*.

2. Рівень Фермі.

Метал для вільних електронів є _____



На рис. наведена схема такої потенціальної ями. Горизонтальними лініями показані енергетичні рівні, які можуть займати електрони.

Розподіл електронів на різних енергетичних рівнях здійснюється за принципом Паулі, згідно з яким _____

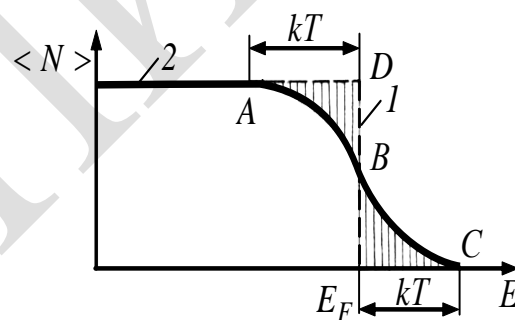
В електронному газі з N електронів, останнім зайнятим буде $\frac{N}{2}$ рівень.

_____ називають **рівнем Фермі** для виродженого електронного газу.

При підвищенні температури _____

_____, внаслідок чого змінюється характер їх розподілу за станами.

В результаті теплового збудження частина електронів, що мають енергію, меншу $\langle N \rangle$ від E_F , переходить на рівні з енергією, більшою від E_F , встановлюється новий їх розподіл за станами. На рис. показані криві розподілу електронів за станами при $T=0\text{ K}$ (крива 1) і при $T>0\text{ K}$ (крива 2).



3. Заповнення енергетичних зон. Метали, діелектрики та напівпровідники з точки зору зонної теорії

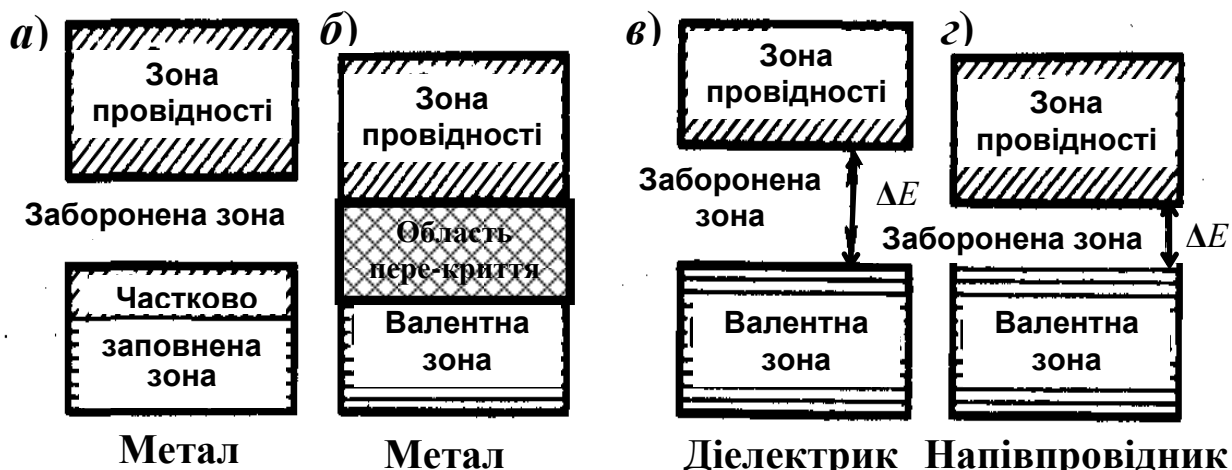
Останню повністю заповнену електронами енергетичну зону, називають валентною зоною. При абсолютному нулі валентні електрони заповнюють попарно нижні рівні валентної зони. Більш високі дозволені зони будуть вільними від електронів.

Валентна зона – _____

Наступна за валентною зоною йде зона провідності.

Зона провідності (вільна зона) – _____

Клас речовин з точки зору електропровідності визначають заповнення зони провідності електронами і ширина забороненої зони.



Провідником або металом є _____

Тверді тіла в яких валентна зона заповнена повністю, а зона провідності вільна від електронів, відносять до *діелектриків* або *напівпровідників* в залежності від ширини їх забороненої зони.

Для створення електропровідності у такій системі необхідно перевести електрон із валентної зони через заборонену зону у зону провідності. Для цього треба надати електрону певної енергії.

_____ відносять до *напівпровідників* (рис. в).

У таких твердих тілах електрони переходять із валентної зони у зону провідності, створюючи електропровідність, за рахунок _____

_____ відносять до *діелектриків* (рис. г).

Тобто, у діелектриках для переведення електронів із валентної зони у зону провідності, електронам необхідно надавати _____.

Явище проходження електричного струму у діелектрику називається _____.

4. Електропровідність напівпровідників.

У природі напівпровідники існують у вигляді хімічних елементів (елементи _____ груп таблиці Менделєєва – Si, Ge, As, Se, Te) та хімічних з'єднань (оксиди, сульфіди, селеніди, сплави елементів різних груп).

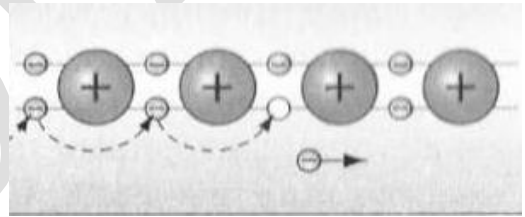
Власні напівпровідники – це _____ (Ge, Se, InSb, GaAs, CdS), а їх провідність називають _____ **провідністю**.

Домішкові напівпровідники утворюють в результаті _____, _____, таку **провідність** називають _____.

Електропровідність у власному напівпровіднику створюється при переході електрона з валентної зони у зону провідності за рахунок _____.

Перехід електрона із валентної зони у зону провідності призводить до утворення дірки у валентній зоні. **Дірка** – _____.

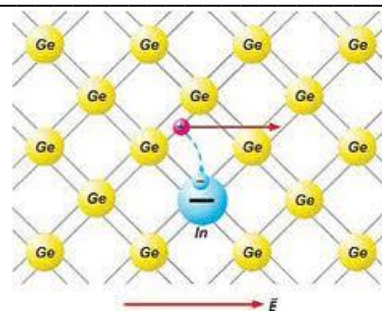
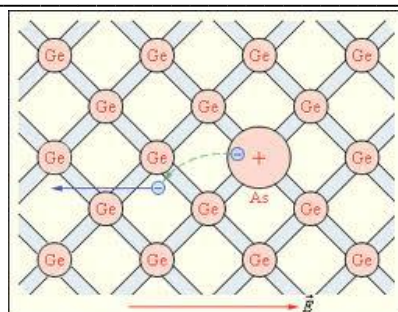
Електропровідність у даному випадку буде створюватися з одного боку рухом електрона у зоні провідності, а з іншого – рухом позитивно зарядженої дірки у валентній зоні. Струм у власному напівпровіднику $I = I_e + I_o$, де I_e – струм, створений рухом електронів, I_o – струм, створений рухом дірок, $I_e = I_o$.



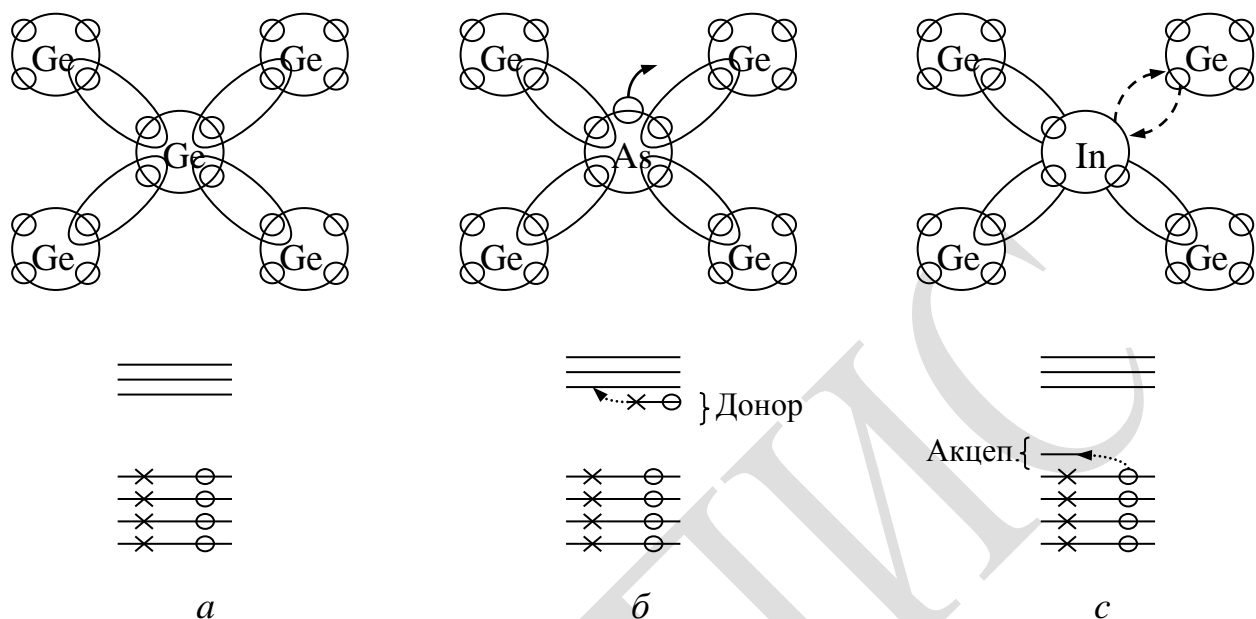
У **власних напівпровідниках** спостерігається **електронно-дірковий механізм провідності**.

5. Донорні та акцепторні напівпровідники.

Домішкові напівпровідники утворюються в результаті _____



Домішкову провідність напівпровідників *n*-типу (електронну або донорну провідність) отримують _____



Як приклад, розглянемо кристал германію – чистий напівпровідник з домішкою миш'яку. Між атомами кристалу германію існує ковалентний зв'язок. У чистому кристалі кожний атом оточений чотирма найближчими атомами, з якими виникає ковалентний зв'язок (рис. а). При заміні одного із атому Ge на атом As, для утворення ковалентного зв'язку достатньо лише чотирьох електронів миш'яку, а п'ятий електрон миш'яку стає вільним і може рухатися між вузлами кристалічної ґратки.

Це призводить до утворення енергетичного рівня при зоні провідності заповненого електронами – _____ (рис. б), він розташований на відстані $\Delta E_D = 0,013eV < kT$ від дна зони провідності, тому вже при звичайних температурах теплової енергії достатньо для перенесення електронів з домішкового рівня у зону провідності.

Назва даного типу провідності – донорна – пояснюється тим, що домішка виступає донором носіїв заряду, а оскільки носіями зарядів є електрони – негативно заряджені частинки, донорні напівпровідники отримали назву напівпровідників *n*-типу (*n-negative*).

У напівпровідниках *n*-типу спостерігається _____ механізм провідності.

Домішкову провідність напівпровідників *p*-типу (діркову або акцепторну провідність) отримують _____

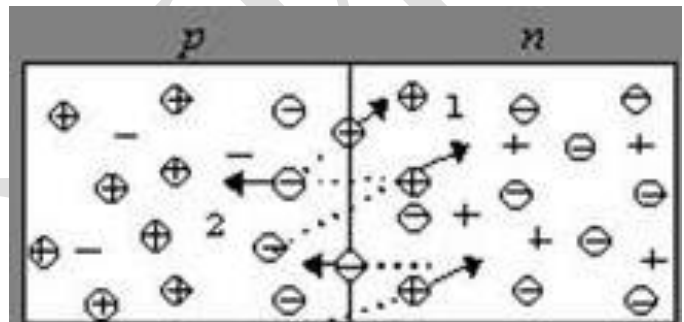
Як приклад, розглянемо кристал германію – чистий напівпровідник з домішкою індію. При заміні атома Ge на атом In, для утворення ковалентного зв'язку недостає одного електрона і атоми Ge і In обмінюються одним електроном.

Це призводить до утворення пусого (незаповненого) рівня біля валентної зони – _____ (рис. в), він розташований на відстані $\Delta E_A = 0,08 \text{ eV}$ від верхнього краю валентної зони провідності. Електрони з валентної зони можуть переходити на домішковий рівень, а утворені у валентній зоні дірки стають носіями струму.

В акцепторних напівпровідниках основними носіями будуть дірки, які утворюються за рахунок переходу електронів з валентної зони на акцепторні рівні. Оскільки електропровідність акцепторних напівпровідників зумовлена рухом позитивно заряджених дірок, то такий тип провідності напівпровідників отримав назву *діркової* або *p-типу* (*p-positive*).

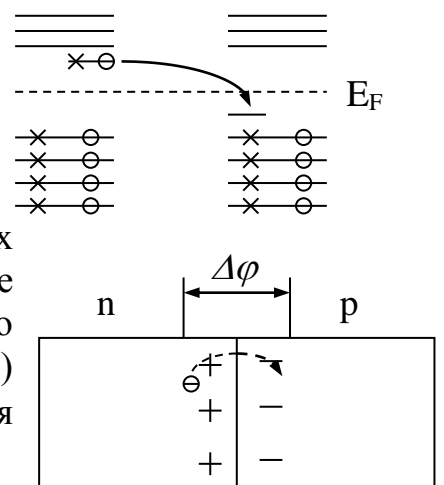
У напівпровідниках *p-типу* спостерігається _____ механізм провідності.

6. Контакти напівпровідників різних типів та напівпровідників з металами

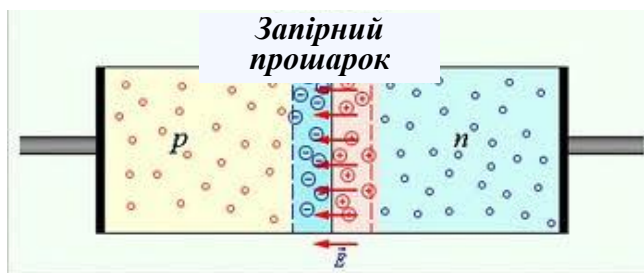


називають **електронно-дірковим переходом** або **n-p-переходом**.

Оскільки електрони донорного рівня напівпровідника *n*-типу знаходяться на більш високому енергетичному рівні, ніж електрони акцепторного рівня напівпровідника *p*-типу, то ці електрони будуть переходити з донорного рівня напівпровідника *n*-типу на акцепторний рівень напівпровідника *p*-типу (рис.). Процес переходу системи до стану рівноваги через дифузію електронів із напівпровідника *n*-типу, де їх концентрація вища, до напівпровідника *p*-типу, де концентрація електронів нижча призводить до виникнення подвійного електричного (запінного) шару товщиною $d \approx 10^{-6} - 10^{-7} \text{ м}$ і установаження контактної різниці потенціалів $\Delta\varphi \sim 10^{-1} \text{ В}$.

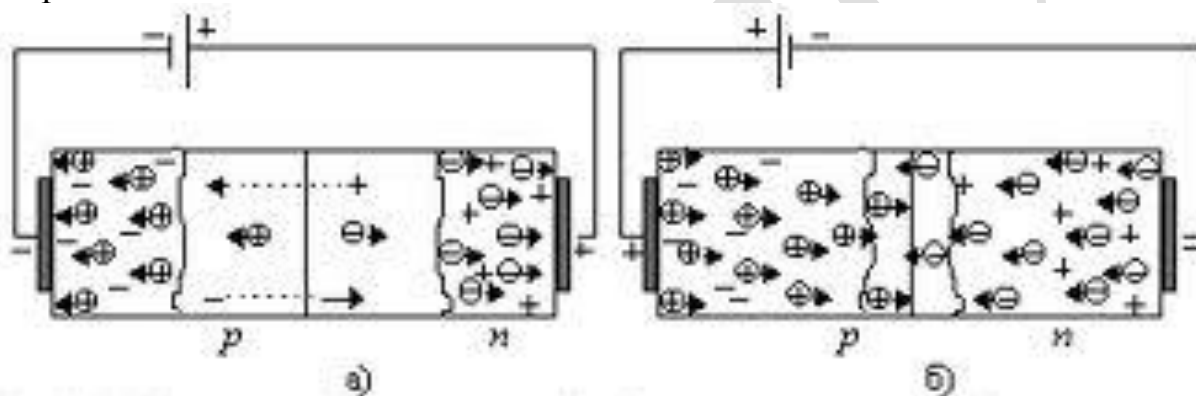


Якщо після встановлення динамічної рівноваги до n - p -переходу підключити батарею так, що полюс “+” буде співпадати з напівпровідником n -типу, а “-” – з напівпровідником p -типу, то це призведе до



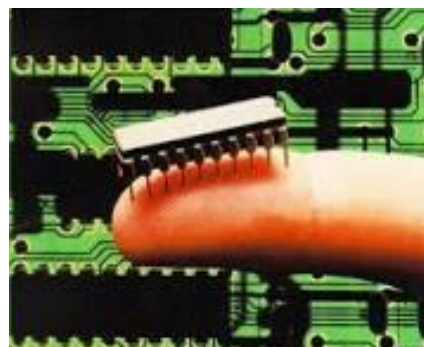
збільшення запiрного потенціалу $\Delta\varphi$ і перехід електронів від напівпровідника n -типу до напівпровідника p -типу стане майже нездійснимим. Провідність в такому напрямку буде практично неможливою.

Якщо змінити полюси і до напівпровідника n -типу включити “-”, а до напівпровідника p -типу – “+”, то це призведе до зменшення потенціалу $\Delta\varphi$ і електропровідність стане можливою.



Таким чином, n - p -перехід має *односторонню (вентильну) електропровідність*. Напівпровідниковий пристрій, який має n - p -перехід називають **напівпровідниковим (кристалічним) діодом**.

Напівпровідникові діоди знайшли широке застосування як випрямлячі змінного струму. До напівпровідникових приладів відносяться напівпровідникові діоди, тиристри і транзистори, що застосовуються у випрямлячах, підсилювачах, інверторах, згладжуючих фільтрах, електроприводах будівельних машин і механізмів, у різних пристроях автоматизації і контролю виробничих процесів.



Лекція 14. Будова атома

1. Теорія Бора
2. Рівняння Шредінгера для атома водню
3. Квантування енергії, механічного та магнітного моментів орбітального руху електрона. Спін електрона
4. Спектр атома водню та воднеподібних атомів
5. Принцип Паулі. Розподіл електронів в атомах за енергетичними станами
6. Періодична система елементів
7. Рентгенівські спектри атомів

1. Теорія Бора

Передумови створення сучасної моделі атома. Термін атом (атом з грецької – «неподільний») ввів Демокрит (давньогрецький вчений, 300 років до н.е.). Такі метафізичні уявлення щодо структури атома панували до кінця XIX ст., коли завдяки великій кількості видатних відкриттів, таких як: досліди Фарадея (XIX ст.), пропускання електричного струму через рідини, відкриття Круксом катодного флюоресцентного випромінювання у вакуумі, вивчення фотоефекту стало зрозуміло, що атом – це надзвичайно складна система.

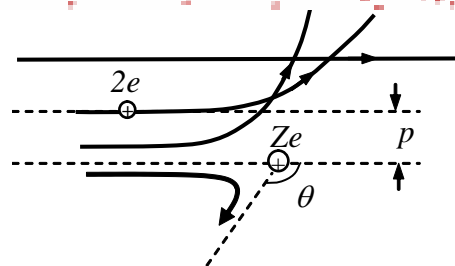
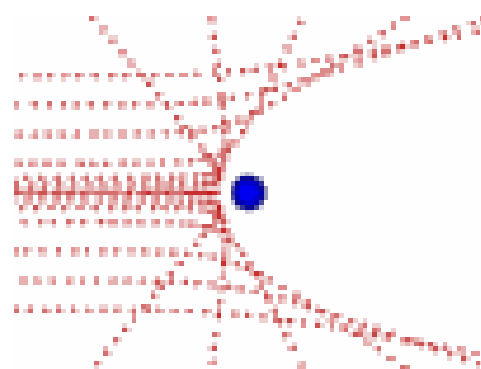
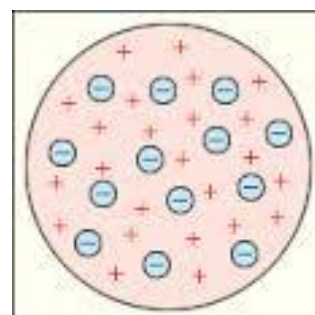
У 1901 році Дж. Томсон першим спробував створити модель атому узагальнюючи експериментальні дані.

Модель атому за Томсоном являє собою _____

Модель Томсона виявилась _____
неправильною.

У 1911 році Е. Резерфорд для експериментального підтвердження моделі атому Томсона здійснив досліди із розсіяння α -частинок тонкою металевою фольгою (α -частинка – ядро атому гелію ${}^4_2\text{He}$ – позитивно заряджена частинка зарядом $2e$ і масою приблизно в чотири рази більшою за масу атому водню).

Резерфорд з'ясував, що потік α -частинок, пройшовши крізь фольгу, майже не відхиляється від прямолінійного напрямку і лише деякі частинки змінюють напрямок руху, відхиляючись на дуже великі кути, близько $135 - 150^\circ$ (див. рис.). Оскільки α -частинка у 7300 разів важча за електрон, то причиною такого розсіяння не могло бути її розсіяння на електронах. Резерфорд припустив, що розсіяння α -частинки



$$L_n = m v_n r_n, \quad (n=1, 2, \dots), \quad \hbar = \frac{h}{2\pi},$$

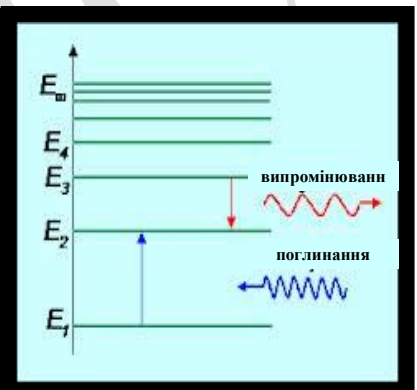
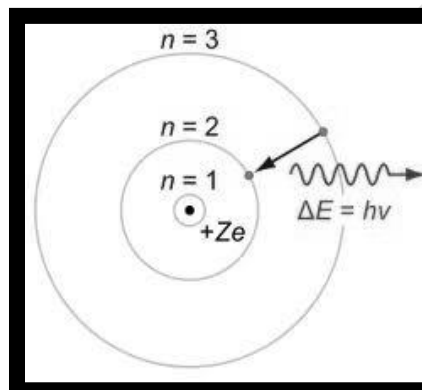
де m – _____,

v_n – _____,

r_n – _____.

Третій постулат Бора (правило частот): _____

Випромінювання фотона відбувається при переході атома зі стану з більшою енергією E_k у стан з меншою енергією E_n , тобто при переході електрона з орбіти більш віддаленої від



ядра на ближчу до ядра орбіту. Поглинання енергії супроводжується переходом атома у стан з більшою енергією, і електрон переходить на віддаленішу від ядра орбіту. Набір можливих частот $\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h}$ квантових переходів і визначає лінійчатий спектр атома.

Постулати, висунуті Бором, дозволили _____

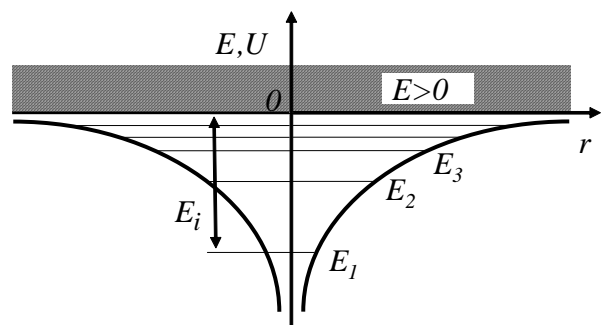
2. Рівняння Шредінгера для атома водню

Розглянемо основи систематики квантових станів атомів на прикладі воднеподібних атомів – найпростіших атомів, які містять єдиний зовнішній електрон.

Потенціальна енергія взаємодії електрона з атомним ядром, заряд якого Ze

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

де r – _____



На графіку наведено вигляд функція $U(r)$.

Стан електрона в атомі водню описується хвильовою функцією ψ , яка є розв'язком стаціонарного рівняння Шредінгера:

де E – повна енергія електрона в атомі,
 m – маса електрона.

Рівняння Шредінгера має розв'язки, що задовольняють вимоги однозначності, скінченності і неперервності хвильової функції ψ , лише при власних значеннях енергії:

$$(n = 1, 2, 3, \dots),$$

Розв'язок рівняння Шредінгера для атома водню приводить до появи дискретних енергетичних рівнів. Нижній рівень E_1 – основний, відповідає мінімально можливій енергії електрона в атомі водню, всі інші енергетичні рівні ($E_n > E_1$) – збуджені.

Якщо $E < 0$ рух електрона є зв'язаним, а при $E > 0$ рух електрона – вільний, тобто електрон може покинути межі атома.

Енергія іонізації атома водню дорівнює:

3. Квантування енергії, механічного та магнітного моментів орбітального руху електрона. Спін електрона

Рівняння Шредінгера задовольняють власні функції Ψ_{n,l,m_l} , які визначаються квантовими числами n, l, m :

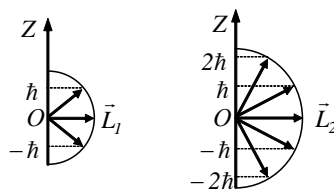
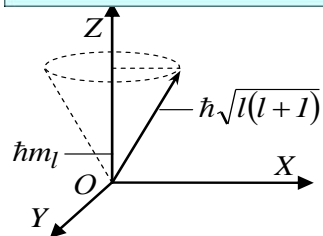
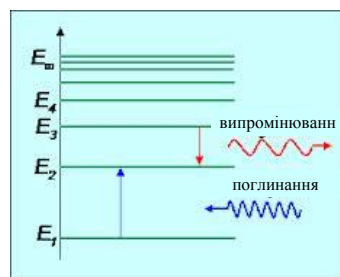
n – головне квантове число – _____
 _____;
 $n=1, 2, 3, \dots$,

l – азимутальне квантове число – _____
 _____ $l=0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$;
 і визначає _____
 _____;
 _____;

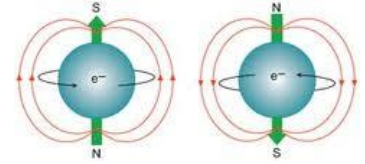
$$L_l = \quad ,$$

m_l – магнітне квантове число – _____
 _____ $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$;
 і визначає _____
 _____;
 _____;

$$L_{l_z} = \quad ,$$



m_s – магнітне спінове квантове число – _____

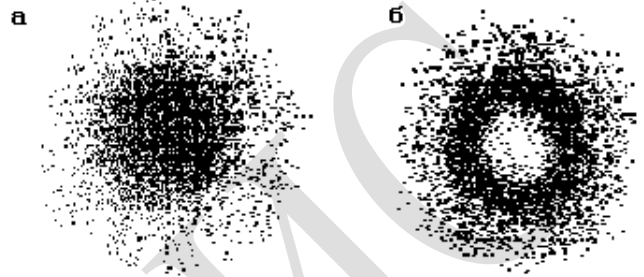


$m_s =$ _____

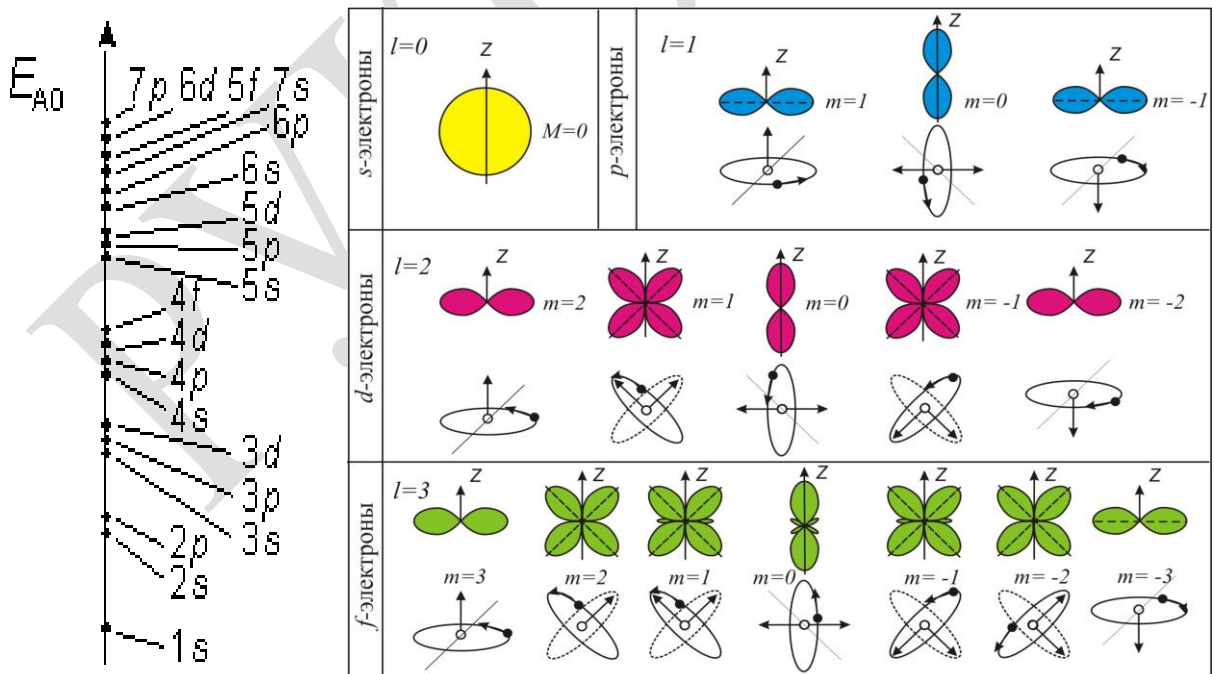
і визначає _____
_____ :

$L_{sz} =$ _____

Ймовірність знаходження електрона у різних частинах атому різна. Електрон при своєму русі ніби “розмазаний” по всьому об’єму, утворюючи електронну хмаринку, густина якого характеризує ймовірність знаходження електрона у різних точках об’єму атома. На рисунку наведено вигляд електронної хмаринки як набору миттєвих “фотографій” електрона: а – вигляд з боку, б – вигляд у перерізі.



Квантові числа n і l характеризують розмір і форму електронної хмаринки, а квантове число m характеризує орієнтацію електронної хмаринки у просторі.



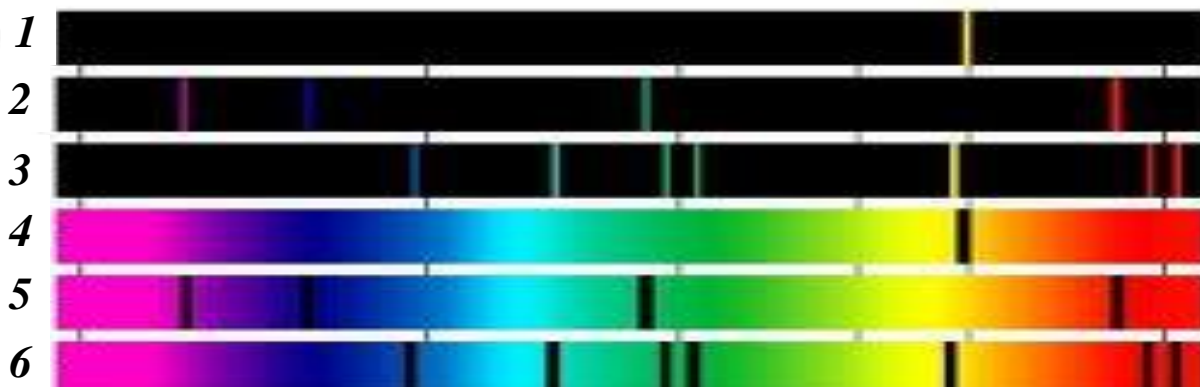
В оболонці електрони підрозділяються на підоболонки s, p, d, f, \dots . Якщо для електрона $l=0$, то його стан називають s -станом; $l=1$ – p -станом; $l=2$ – d -станом; $l=3$ – f -станом; $l=4$ – g -станом.

Для значень головного квантового числа $n=1, 2, 3, 4, 5, \dots$ відповідно можливі такі стани: $1s; 2s2p; 3s3p3d; 4s4p4d4f; 5s5p5d5f5g; \dots$

На рисунку показано форму і просторова орієнтацію $1s$ -, $2p$ -, $3d$ -орбіталей: s -орбіталь має вигляд сфери, p -орбіталь – гантелі, d -орбіталь має складну форму, f -орбіталь – ще більш складну форму.

4. Спектр атома водню та воднеподібних атомів

Експериментальне дослідження спектрів випромінювання розріджених газів (окремих атомів), показали, що кожному газу властивий певний _____, який являє собою _____.



Спектри випромінювання: 1 – натрію, 2 – водню, 3 – гелію.

Спектри поглинання: 1 – натрію, 2 – водню, 3 – гелію.

Найбільш вивченим є спектр атома водню.

Всі серії у спектрі водню можуть бути описані однією формулою, яка називається **узагальненою формулою Бальмера**:

$$\nu = \dots$$

де $m = \dots$ і визначає _____,
а $n = \dots$ і визначає _____.

Довжини (частоти) хвиль ліній спектра атома водню у видимій області спектру називають **серією Бальмера** і обчислюють формулами:

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

або оскільки $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

де $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$, $R = R'c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ R' і R – сталі Рідберга.

Пізніше в ультрафіолетовій області була винайдена

серія Лаймана: $\nu = \dots$, ($n = 2, 3, 4, \dots$);

в інфрачервоній області

серія *Пашена*: $\nu =$ _____, ($n =$ _____);

серія *Брекета*: $\nu =$ _____, ($n =$ _____);

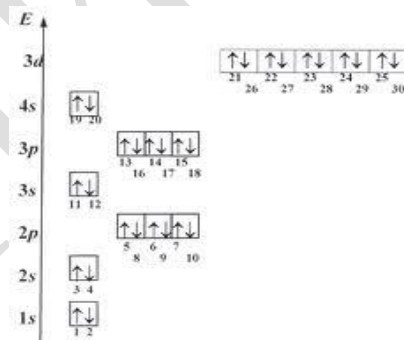
серія *Пфунда*: $\nu =$ _____, ($n =$ _____);

серія *Хемфрі*: $\nu =$ _____, ($n =$ _____);

5. Принцип Паулі. Розподіл електронів в атомах за енергетичними станами

Багатоелектронні атоми можна утворити заповнюванням енергетичних рівнів атома електронами. Ці заповнення підкоряються двом правилам, які сформулював Паулі:

- _____;
- _____;



Повне число станів, що відповідає головному квантовому числу n визначають формулою:

$$Z = \dots$$

Сукупність електронів з однаковим числом n утворюють *електронні оболонки*

$n=1 \rightarrow$ _____,

$n=2 \rightarrow$ _____,

$n=3 \rightarrow$ _____,

$n=4 \rightarrow$ _____,

$n=5 \rightarrow$ _____.

В оболонці електрони підрозділяються на підоболонки s, p, d, f, \dots . Якщо для електрона $l=0$, то його стан називають s -станом;

$l=1$ – _____-станом;

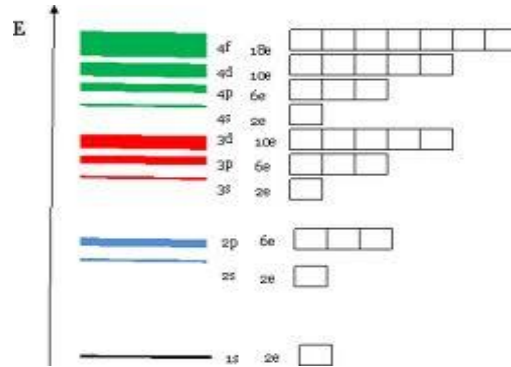
$l=2$ – _____-станом;

$l=3$ – _____-станом;

$l=4$ – _____-станом.

Для значень головного квантового числа $n=1, 2, 3, 4, 5, \dots$ відповідно можливі такі стани:

- $n=1 - 1s;$
- $n=2 - 2s2p;$
- $n=3 - 3s3p3d;$
- $n=4 - 4s4p4d4f;$
- $n=5 - 5s5p5d5f5g; \dots$



6. Періодична система елементів

Періодична система елементів – _____

Заряд ядра Z дорівнює атомному (порядковому) номеру елемента в системі. Елементи, розташовані за зростанням Z і утворюють 7 періодів.

Період – _____

Вертикальні стовпці – *групи елементів* _____

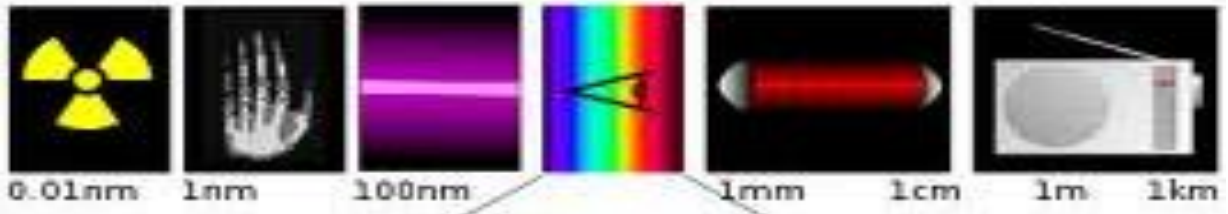
Періодичність властивостей елементів зумовлена періодичним повторенням конфігурації зовнішніх електронних оболонок атомів.

ПЕРІОДИЧНА СИСТЕМА ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ Д. І. МЕНДЕЛЄЄВА

ПЕРІОД РЯД	ГРУПИ ЕЛЕМЕНТІВ																		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII											
1	H 1 Водень Гідроген															He 2 Гелій	Порядковий номер Символ Відносна атомна маса Назва простого речовини Назва елемента систематична		
2	Li 3 Літій	Be 4 Берилій	B 5 Бор	C 6 Вуглець Карбон	N 7 Азот Нітроген	O 8 Кисень Оксиген	F 9 Фтор Флуор	Ne 10 Неон	Na 11 Натрій	Mg 12 Магній	Al 13 Алюміній	Si 14 Силіцій	P 15 Фосфор	S 16 Сірка Сулфур	Cl 17 Хлор	Ar 18 Аргон	Fe 26 Залізо Ферум	Co 27 Кобальт	Ni 28 Нікель
3	K 19 Калій	Ca 20 Кальцій	Sc 21 Скандій	Ti 22 Титан	V 23 Ванадій	Cr 24 Хром	Mn 25 Манган	Kr 36 Криптон	Rb 37 Рубідій	Sr 38 Стронцій	Y 39 Ітрій	Zr 40 Цирконій	Nb 41 Ніобій	Mo 42 Молибден	Tc 43 Технецій	Ru 44 Рутеній	Rh 45 Родій	Pd 46 Паладій	
4	Cu 29 Мідь Купрум	Zn 30 Цинк	Ga 31 Галій	Ge 32 Германій	As 33 Арсен	Se 34 Селен	Br 35 Бром	Kr 36 Криптон	Rb 37 Рубідій	Sr 38 Стронцій	Y 39 Ітрій	Zr 40 Цирконій	Nb 41 Ніобій	Mo 42 Молибден	Tc 43 Технецій	Ru 44 Рутеній	Rh 45 Родій	Pd 46 Паладій	
5	Rb 37 Рубідій	Sr 38 Стронцій	Y 39 Ітрій	Zr 40 Цирконій	Nb 41 Ніобій	Mo 42 Молибден	Tc 43 Технецій	Kr 36 Криптон	Rb 37 Рубідій	Sr 38 Стронцій	Y 39 Ітрій	Zr 40 Цирконій	Nb 41 Ніобій	Mo 42 Молибден	Tc 43 Технецій	Ru 44 Рутеній	Rh 45 Родій	Pd 46 Паладій	
6	Cs 55 Цезій	Ba 56 Барій	La 57 Лантан	Hf 72 Гафній	Ta 73 Тантал	W 74 Вольфрам	Re 75 Реній	Xe 54 Ксенон	Cs 55 Цезій	Ba 56 Барій	La 57 Лантан	Hf 72 Гафній	Ta 73 Тантал	W 74 Вольфрам	Re 75 Реній	Os 76 Осмій	Ir 77 Іридій	Pt 78 Платина	
7	Fr 87 Францій	Ra 88 Радій	Ac 89 Актиній	Rf 104 Резерфордій	Db 105 Дубній	Sg 106 Сиборгій	Bh 107 Борій	Xe 54 Ксенон	Fr 87 Францій	Ra 88 Радій	Ac 89 Актиній	Rf 104 Резерфордій	Db 105 Дубній	Sg 106 Сиборгій	Bh 107 Борій	Hs 108 Гасій	Mt 109 Майтнерій	Ds 110 Дармштадтій	
8	Rg 111 Рентгеній	Cn 112 Коперніцій	Uut 113 Унунтрицій	Fl 114 Флеровій	Uup 115 Унунпентій	Lv 116 Ліверморій	Uus 117 Унунсептій	Og 118 Оганесій	Rg 111 Рентгеній	Cn 112 Коперніцій	Uut 113 Унунтрицій	Fl 114 Флеровій	Uup 115 Унунпентій	Lv 116 Ліверморій	Uus 117 Унунсептій	Og 118 Оганесій			
Винні оксиди Лантаноїди Актиноїди		RO		RO ₂		RO ₃		RO ₄		RO ₇									
* Лантаноїди	58 Ce 140,12	59 Pr 140,91	60 Nd 144,24	61 Pm (147)	62 Sm 150,36	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,93	66 Dy 162,5	67 Ho 164,93	68 Er 167,26	69 Tm 168,93	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97					
** Актиноїди	90 Th 232,04	91 Pa (231)	92 U 238,03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (258)	101 Md (259)	102 No (259)	103 Lr (260)					

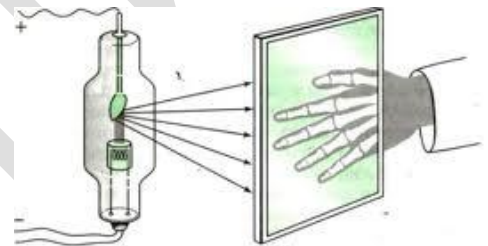
7. Рентгенівські спектри атомів

„Ікс-промені” або *рентгенівські хвилі*



Рентгенівське випромінювання виникає

Джерелом рентгенівського випромінювання є



Першовідкривачем випромінювання є *Іван Павлович Пулюй*.

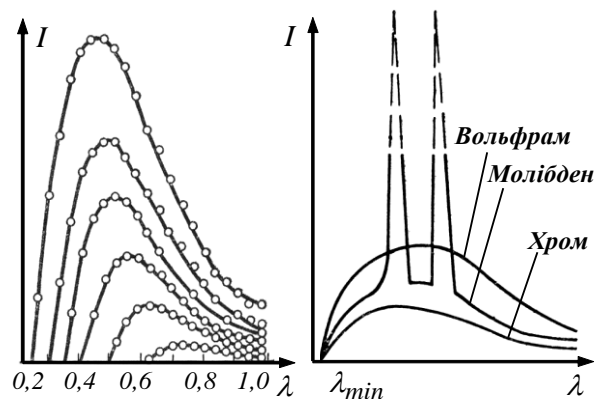
Його працями користався пізніше і Вільям Рентген, котрому було особисто Пулюєм презентовані свої праці. Рентген назвав ці промені невідомої природи X-променями.



Один з перших (1895 р.) пулюєвих знімків. Рука доньки дослідника Наталі.

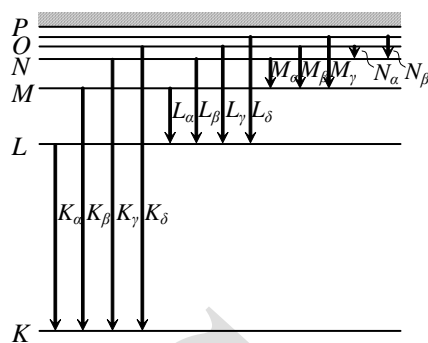
Рентгенівське випромінювання, яке виникає в результаті гальмування електронів, називають *гальмівним*. Гальмівне випромінювання має *суцільний спектр*.

Характерною особливістю суцільних рентгенівських спектрів є наявність чіткої короткохвильової межі λ_{min} та її незалежність від речовини анода. При підвищенні напруги інтенсивність випромінювання збільшується, а короткохвильова межа зміщується у бік коротких хвиль.



Оскільки лінійчатий спектр визначається природою речовини, з якої виготовлено анод, то його називають *характеристичним*.

Механізм виникнення лінійчатих спектрів: якщо під впливом падаючих електронів високих енергій на атоми анода вибивається один із двох електронів $1s$ -стану K -оболонки, то звільнене місце може зайняти електрон з якої-небудь зовнішньої оболонки (L, M, N , і т.д.) і т.д.



Серія K обов'язково супроводжується іншими серіями, оскільки при випромінюванні її ліній звільнюються рівні в оболонках L, M , і т.д., які будуть заповнюватися електронами із більш віддалених оболонок.

У 1913 році Г. Мозлі встановив залежність між хвильовим числом спектральної лінії $\nu_0 = \frac{1}{\lambda}$ і атомним номером Z елемента, який випромінює ці:

$$\nu_0 = R \cdot Z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

- де $m=1, n=2, 3, 4, \dots$ для ліній K -серії,
- $m=2, n=2, 3, 4, \dots$ для ліній L -серії,
- $m=3, n=2, 3, 4, \dots$ для ліній M -серії.

σ – стала екранування, яка має певне значення в межах однієї серії (для K -серії $\sigma = 1$, для L -серії $\sigma = 7,5$).

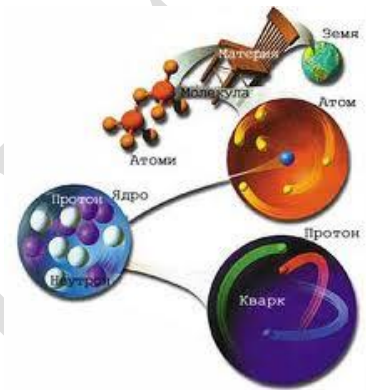
Закон Мозлі дозволяє за виміряною довжиною хвилі рентгенівських ліній точно встановити атомний номер даного елемента. Цей закон відіграв велику роль при розміщенні елементів в періодичній системі. На основі цього закону вперше було показано, що не атомна маса, а атомний номер, який дорівнює заряду ядра, визначає хімічні властивості атомів.



Лекція 15. Ядерна фізика

1. **Склад, будова та характеристики атомних ядер**
2. **Ядерні сили. Моделі ядер**
3. **Ядерні реакції. Радіоактивність**
4. **Закон поглинання. Доза та потужність дози опромінення. Радіаційна стійкість будівельних матеріалів**
5. **Дефект маси та енергія зв'язку атомних ядер**
6. **Шляхи одержання внутрішньоядерної енергії. Ядерні реактори**

Ядерна фізика – _____



1. Склад, будова та характеристики атомних ядер

Згідно нуклонної теорії, атомне ядро складається із елементарних частинок – _____ – протонів і нейтронів.

Для позначення атомних ядер використовують символ:



	де X – _____;
	A – _____ – визначає число _____,
	Z – _____ – вказує _____

	Ze – _____
	$A-Z$ – _____

Електрон ${}_{-1}^0e$ – негативно заряджена частинка,

$$e = \text{Кл},$$

$$m_e = \text{кг}.$$

Протон 1_1p – позитивно заряджена частинка,

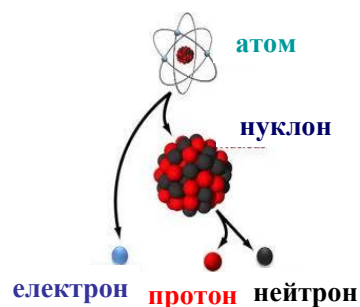
$$q_p = |e| = \text{Кл},$$

$$m_p = 1,0072764 \text{ а.о.м.} = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1836 m_e$$

де $1 \text{ а.о.м.} = 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Нейтрон 1_0n – нейтральна частинка,

$$m_n = 1,009665 \text{ а.о.м.} = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1839 m_e$$



Частинки 1_1p і 1_0n – нестабільні, реакції їх розпаду мають вигляд:

$${}^1_1p \rightarrow$$

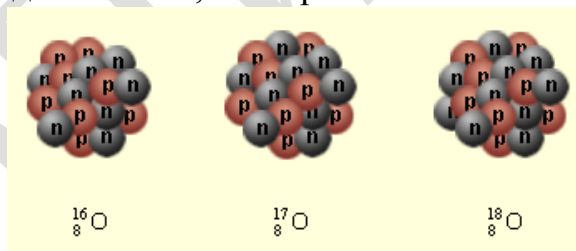
$${}^1_0n \rightarrow$$

де ${}^0_{+1}e$ – позитрон, ν – нейтрино, $\bar{\nu}$ – антинейтрино.

Ядра, які мають однакові зарядові числа, але різні масові числа, називають _____.

Наприклад, водень 1_1H має два ізотопи 2_1D і 3_1T (дейтерій і тритій).

Ці ізотопи відрізняються кількістю нейтронів у ядрі.



2. Ядерні сили. Моделі ядер

До складу атомного ядра входить Z протонів і $A-Z$ нейтронів. Незважаючи на те, що між протонами діють сили кулонівського відштовхування, атомні ядра є досить стійкими системами. Це вказує на те, що в ядрах атомів діють специфічні сили притягання, які називають _____.

Ядерні сили не можуть бути зведені ні до кулонівських, ні до молекулярних, ні до магнітних, ні до гравітаційних сил.

Основні властивості ядерних сил:

1. Ядерні сили є _____.
2. Ядерні сили _____, тому таку взаємодію називають **сильною**. Енергія зв'язку, що припадає на один нуклон у ядрі, досягає 7-8,5 MeV.

Сили взаємодії ядра з електронами атома забезпечують енергію зв'язку від десятків до тисяч електрон-вольт, а сили зв'язку між атомами в молекулах забезпечують енергію зв'язку в кілька електрон-вольт.

3. Ядерні сили є _____.

На відміну від електромагнітних і гравітаційних сил, радіус дії ядерних сил приблизно дорівнює розміру нуклона (10^{-15} м). При $r > 10^{-14} \text{ м}$ ядерні сили

практично дорівнюють нулю.

4. Ядерні сили мають _____, тобто величина ядерних сил не залежить від електричного заряду взаємодіючих нуклонів.

Ядерні взаємодії між двома протонами або між двома нейтронами, або між протоном і нейтроном однакові.

5. Ядерні сили мають _____, тобто кожен нуклон в ядрі взаємодіє лише з обмеженою кількістю найближчих до нього нуклонів.

Насичення проявляється в тому, що питома енергія зв'язку нуклонів у ядрі при збільшенні числа нуклонів не зростає, а залишається приблизно сталою (якщо не враховувати легкі ядра).

Властивості насичення ядерних сил приводять до такого важливого висновку: взаємодія між нуклонами не зводиться тільки до сил притягання. На відстанях між нуклонами $r < 0,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ притягання між ними переходить у відштовхування. За відсутності у ядрі сили відштовхування між нуклонами ядра повинні б колапсувати, тобто стискатись у точку.

6. Ядерні сили залежать від _____, які взаємодіють.

Система з протона і нейтрона утворює ядро-дейтрон лише у випадку, коли спіни протона і нейтрона паралельні. Якщо ж спіни протилежно напрямлені, то нейтрон і протон ядра не утворюють.

7. Величина ядерних сил також _____.

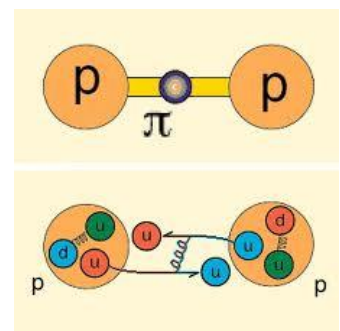
8. Ядерні сили _____.

Ядерні сили не є силами, які можна уявити такими, що діють вздовж лінії, яка з'єднує центри взаємодіючих нуклонів.

Для пояснення властивостей ядерних сил – насичення і короткодії – В. Гейзенберг висунув гіпотезу про те, що ядерні сили є „обмінними силами” забезпечуються між двома нуклонами третьою частинкою, маса якої у 300 разів має перевищувати масу електрона.

У 1935 році японський фізик Х.Юкава висунув гіпотезу про те, що ядерні сили мезонами („мезос” - грецьке слово – середній), які були виявлені у 1947 році в космічному випромінюванні.

Виявилось, що існує три типи π -мезонів: π^+ , π^- , π^0 . Заряди π^+ і π^- за абсолютною величиною дорівнюють заряду електрона, маса зарядженого мезона $m_{\pi^+} = 273 m_e$, маса π^0 -мезона $m_{\pi^0} = 264 m_e$. Спін π -мезонів дорівнює нулю.



Ядерну взаємодію двох нуклонів, що знаходяться на відстані радіуса дії ядерних сил, можна представити у такий спосіб: _____

Частинки, _____, називаються **віртуальними**.

Процес взаємодії між нуклонами значно складніший і наведені схеми є не що інше, як намагання унаочнити дії обмінних сил. Обмінні сили – це суто квантово-механічні поняття.

Донині не створена єдина послідовна теорія атомного ядра. Тому сьогодні користуються наближеними ядерними моделями, кожна з яких описує лише певні властивості ядра.

Краплинна модель ядра. (1936 рік, Н. Бор, Я. Френкель) є першою моделлю. Вона ґрунтується на аналогії між поведінкою нуклонів у ядрі та молекул в краплині рідини. В обох випадках сили, що діють між складовими частинами короткодійчі та мають властивість насичення. Рідина має сталу густину, ядерна речовина також характеризується сталою густиною, незалежною від числа нуклонів у ядрі. Об'єм краплини, як і об'єм ядра, пропорційний до числа частинок, що в них знаходяться.

При отриманні певної енергії краплина ядерної рідини переходить у збуджений стан. Отримана енергія в результаті зіткнень нуклонів швидко перерозподіляється між ними. Проте можуть виникнути такі умови, коли отримана енергія концентрується на поверхневому нуклоні або групі нуклонів. Якщо ця енергія більша від енергії зв'язку частинки в ядрі, частинка може подолати поверхневі сили ядерного притягання і вийти з ядра. Такий процес аналогічний випаровуванню молекули з поверхні краплини рідини.

Істотна відмінність ядра від краплини рідини в цій моделі в тому, що вона трактує ядро як краплину електрично зарядженої нестискуваної рідини (з такою самою густиною, як ядерна), яка підлягає законам квантової механіки. Краплинна модель ядра дозволила отримати напівемпіричну формулу для енергії зв'язку нуклонів у ядрі, пояснила механізм реакцій поділу ядер. Однак не змогла пояснити, наприклад, підвищену стійкість ядер, які містять магічні числа протонів і нейтронів.

Оболонкова модель ядра. (1949-50 роки, німецький фізик Х. Йенсен, американський фізик М. Гепперт-Майер) базується на припущенні, що нуклони в ядрі розташовуються на дискретних рівнях (оболонках), заповнюючи їх згідно з принципом Паулі. Стійкість ядер залежить від ступеня заповнення таких оболонок. Вважається, що ядра з повністю заповненими оболонками найбільш стійкі. Дослідами підтверджено існування найбільш стійких (магічних) ядер. Оболонкова модель ядра дозволила пояснити спіни і магнітні моменти ядер, різну стійкість атомних ядер, періодичність зміни їх властивостей.

Нові експериментальні дані про властивості атомних ядер, які появились в результаті подальших досліджень, виходили за рамки обох теорій. Так виникла узагальнена модель (синтез краплинної і оболонкової) – **оптична модель ядра** (пояснює взаємодію ядер з елементарними частинками та ін.).

3. Ядерні реакції. Радіоактивність

Ядерні реакції – _____

Ядерні реакції записують у вигляді рівняння

,

,

де C^* - _____.

Тип ядерної реакції визначають видом взаємодіючої і виділеної частинок (a, b):

- якщо вони збігаються (a, a), реакцію називають _____, при цьому склад ядер не змінюється;
- якщо в ядерній реакції частинка a зникає (поглинається ядром), а замість неї появляється нова частинка b, склад ядра змінюється – відбувається _____.

За механізмом взаємодії ядерні реакції можна поділити на два види:

- _____ (відбуваються при дуже високих енергіях частинок і за дуже короткий час, необхідний для того, щоб частинка пролетіла через ядро ($10^{-23} - 10^{-21} c$), наприклад, швидкий протон може вибити з поверхні ядра один з нуклонів і полетіти разом з ним;
- _____ (відбувається у два етапи: на першому етапі відбувається захоплення частинки ядром і виникнення проміжного ядра, яке знаходиться у збудженому стані, на другому – викидання нуклона з ядра).

Під час ядерної реакції зберігається _____, а відбувається лише перерозподіл нуклонів і заряду між ядрами та частинками.

Ядерні реакції класифікуються за такими ознаками:

1) за родом частинок, що беруть в них участь:

- _____;
- _____;
- _____;

2) за енергією частинок, що їх викликають:

- _____;
- _____;
- _____;
- _____;

3) за родом ядер, що беруть участь в реакції:

- _____;
- _____;
- _____;

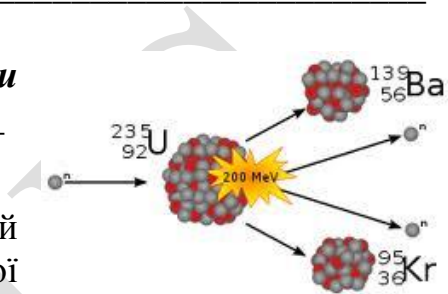
4) за характером ядерних перетворень, що відбуваються:

- _____;
- _____;
- _____.

Для ядерних реакцій виконуються закони

_____.

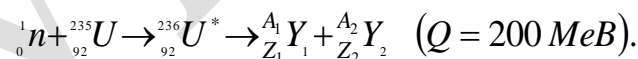
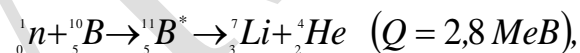
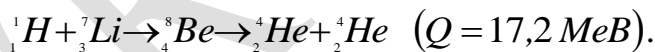
Енергію ядерної реакції або її тепловий ефект Q можна визначити як зміну кінетичної енергії в процесі реакції:



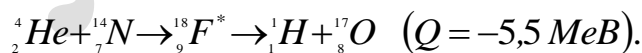
Якщо масу вимірювати в а.о.м., то

Залежно від зміни маси ядер і частинок, що беруть участь в реакції, Q може набувати значення $Q > 0$, $Q < 0$.

Якщо $Q > 0$, реакції називають _____, наприклад:



Якщо $Q < 0$ — _____, наприклад:



Явище радіоактивного розпаду у 1896 році відкрив фр. фізик А. Беккерель.

Радіоактивністю називають _____

- _____
- _____
- _____
- _____
- _____



Розрізняють природну і штучну радіоактивність.

Радіоактивність, яка спостерігається в ядрах, що існують у природних умовах, називають _____. Радіоактивність ядер, які отримані за допомогою ядерних реакцій, називають _____. Між природною та штучною радіоактивністю немає принципової різниці.

Природні радіоактивні перетворення ядер, які відбуваються самочинно, називають _____. Ядро, що виникло внаслідок розпаду, називають _____ ядром, а ядро, яке розпалось, – _____.

Закон радіоактивного розпаду має вигляд:

де N_0 – _____,
 N – _____,
 λ – _____.

Інтенсивність процесу радіоактивного розпаду характеризує дві величини:

- *період піврозпаду* $T_{1/2}$ – _____

_____:

$$T_{1/2} = \quad ;$$

- *середній час життя* τ ядер радіоактивної речовини:

$$\tau = \quad .$$

Періоди піврозпаду різних природних ізотопів різняться, так, для урану ${}_{92}^{238}\text{U}$ – $T = 4,51 \cdot 10^9$ років і для полонію ${}_{84}^{212}\text{Po}$ – $T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-7}$ с.

Активністю елемента називають _____

_____:

$$A = \quad .$$

Отже, активність обернено пропорційна до періоду піврозпаду і зменшується з часом за експоненціальним законом.

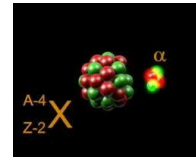
За одиницю активності препарату беруть один розпад за секунду – *беккерель* (Бк), але часто користуються позасистемною одиницею, яку називають *кюри* (Ки):

$$1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк} .$$

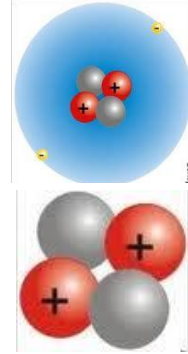
До радіоактивних процесів відносять:

- α -розпад – _____

_____:



Досить масивні ядра гелію вилітають з ядра, що розпалося з великими швидкостями ($\sim 10^7 m/s$), тому мають велику енергію порядку декількох MeV . Через це α -частинки мають велику іонізуючу, але малу проникаючу здатність. Так, у повітрі α -частинка на своєму шляху в декілька сантиметрів може іонізувати приблизно 10^5 пар іонів;



- β -розпад – радіоактивний розпад, що супроводжується
1) випромінюванням β^- -променів – швидких електронів ${}^0_{-1}e$,

2) β^+ -променів – позитронів ${}^0_{+1}e$

або відбувається

3) електронний захват – поглинання ядром електрона, в результаті чого один з протонів ядра перетворюється на нейтрон:

β -частинки мають значну довжину вільного пробігу (декілька метрів), але іонізуюча здатність їх мала;

- γ -випромінювання ядер – _____

_____.

γ -випромінювання не є самостійним видом випромінювання, а лише супроводжує α - і β -розпади, ядерні реакції, виникає при гальмуванні та розпаді заряджених частинок тощо, не відхиляється електричним і магнітним полями, має відносно слабку іонізуючу здатність і значну проникаючу здатність (наприклад, проходить через шар свинцю товщиною 5 см);

- спонтанне ділення важких ядер – _____
_____;
- протонна радіоактивність – _____
_____.

4. Закон поглинання. Доза та потужність дози опромінення. Радіаційна стійкість будівельних матеріалів

При проходженні через речовину γ -промені поглинаються нею за законом Бугера:

де I – інтенсивність γ -променів, які пройшли через речовину товщиною x ,
 I_0 – початкова інтенсивність γ -променів,
 μ – лінійний коефіцієнт поглинання.

Радіаційною стійкістю будівельних матеріалів називають здатність будівельних матеріалів протистояти руйнівній дії інтенсивного радіоактивного випромінювання, яке змінює їхні структуру і властивості. Залежить від виду і стану матеріалів, а також умов експлуатації. Оцінюється ступенем об'ємного або поверхневого пошкодження матеріалу, зміною його властивостей, кількістю окремих дефектів у його атомно-електронній структурі (вакансій, міжвузловинних і домішкових атомів, пошкоджених хім. зв'язків), що виникли під дією випромінювання, кількістю їхніх комплексів і спричинених ними структурних перетворень. Найбільша радіаційна стійкість у металів, керамічних матеріалів, деяких бетонів (зокрема, баритобетонів), менша – у напівпровідників, молекулярних кристалів та органічних матеріалів. Радіаційну стійкість підвищують легуванням, механічною і термічною обробкою із створенням дрібнозернистої та ізотропної структури, додаванням нейтралізаторів радіаційних дефектів. Вона має особливе значення для матеріалів активної зони ядерних реакторів, прискорювачів заряджених частинок, космічної техніки.

Дію радіоактивного випромінювання на речовину характеризують дозою іонізуючого випромінювання. Розрізняють такі види доз випромінювання:

- *поглинута доза опромінювання* – _____

- *експозиційна доза опромінювання* – _____

- *біологічна доза опромінювання* – _____

- *Потужність дози випромінювання* – _____

Розроблено багато пристроїв і методів реєстрації радіоактивного випромінювання:

1. **Лічильник Гейгера-Мюллера.** Це металева чи скляна труба, вкрита з середини металом, яку заповнюють аргоном для зниження тиску. У центрі трубки натягнуто металеву нитку. Між трубкою і ниткою прикладають напругу в декілька сотень вольтів. Послідовно з трубкою вмикають опір навантаження R . Коли в трубку влітає уламок ядра, він на своєму шляху іонізує газ і в трубці створює газовий розряд, внаслідок чого на опорі навантаження виникають короточасні імпульси напруги, які реєструються приладами. Лічильники Гейгера-Мюллера використовують переважно для реєстрації електронів, а також фотонів великих енергій γ -квантів.

2. **Камера Вільсона** – це прозора циліндрична камера, заповнена насиченою парою води і спирту. Спочатку тиск в камері трохи підвищують, а потім різко знижують, від чого пара стає перенасиченою. Якщо в цю хвилину в камеру влітає заряджений уламок ядра, то за ним можна спостерігати видимий слід – трек. Якщо камеру Вільсона помістити в сильне магнітне поле, то трек буде вигнутим. За кривизною треку визначають відношення заряду до маси цього уламка (q/m). Ця величину строго визначено для кожного уламка, що дозволяє розпізнати його.

3. **Бульбашкова камера** або **камера Гледзера.** Це прозора камера, заповнена зрідженим газом під тиском. У разі різкого зниження тиску зріджений газ переходить в стан перегрітій. Якщо в цей час у камеру влітає уламок, то за ним утворюється шлейф бульбашок пари – трек. Бульбашкову камеру, як і камеру Вільсона, можна помістити в магнітне поле. Основна перевага бульбашкової камери полягає у великій гальмівній здатності робочої рідини (бензолу, фреону, пропану, тощо), що дозволяє отримувати треки дуже швидких частинок.

4. **Метод товстошарових фотоемульсій.** На поверхню плівки наносять товстий шар бромистого срібла $AgBr$ і цей матеріал підставляють під потік заряджених частинок. Уламки ядер на своєму шляху розбивають молекули бромистого срібла або експонують матеріал. Після обробки плівки проявником і закріпленні її під мікроскопом можна побачити чіткі треки частинок. За формою треку, його довжиною, почервонінням зерек емульсій та за іншими ознаками можна встановити вигляд частинки, її енергію, швидкість, напрям руху тощо. Цей метод дозволяє одержувати сліди частинок, що не зникають та виявляти треки усіх високоенергетичних заряджених частинок, що пролетіли за час експозицій крізь фотопластинку. Треки частинок більш чіткі, ніж в камері Вільсона або бульбашковій камері.

5. **Метод сцинтиляцій.** Цей метод метод застосували першим. Наразі він не має широкого застосування. Сцинтиляційний лічильник реєструють частинки, які потрапляють на люмінісцювальний екран і викликають спалахи. Ці спалахи сприймаються фотопомножувачем і через підсилювач сигнали подаються на лічильник імпульсів. Такі лічильники можуть фіксувати на тільки кількість частинок, а й їх розподіл за енергіями.

Випромінювання радіоактивних речовин справляє дуже активний вплив на живі організми. Рухаючись у живому організмі, уламок ядра руйнує частинки живих клітин, в результаті клітина гине чи порушується її генетичний код. Найбільш чутливими до випромінювання частинок є ядра клітин, особливо тих, які швидко поділяються. Тому, в першу чергу, випромінювання вражають кістковий мозок, через що порушується кровообіг. Далі вражаються клітини шлункового тракту та інших органів. Сильний вплив чинить випромінювання на спадковість, вражаючи гени в хромосомах. Інколи випромінювання може бути корисним: пригнічувати γ -випромінюванням ракових пухлин.

5. Дефект маси та енергія зв'язку атомних ядер

Якщо порівняти масу ядра $m_{\text{я}}$ і масу частинок, з яких складається ядро – нуклонів, то виявляється, що $m_{\text{я}} \neq z \cdot m_p + (A - z)m_n$, де m_p – маса протона, m_n – маса нейтрона.

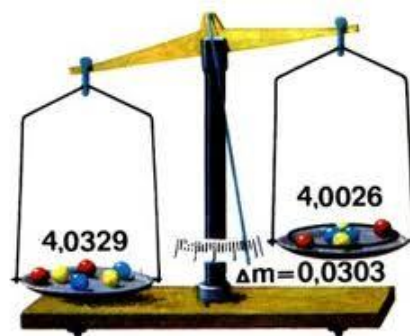
Різниця цих мас називається **дефектом мас**:

$$\Delta m =$$

Тоді, з формули А. Ейнштейна $\Delta E = \Delta m c^2$ випливає, що:

$$\Delta E = \quad \text{– енергія зв'язку ядра.}$$

Енергія зв'язку ядра – енергія, яку необхідно затратити, щоб розкласти ядро на окремі нуклони.



6. Шляхи одержання внутрішньоядерної енергії. Ядерні реактори

Науці відомі два способи отримання внутрішньоядерної енергії:

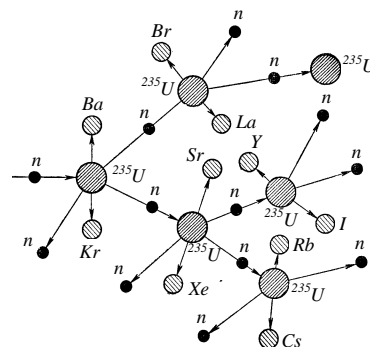
- виділення енергії методом поділу важких ядер;
- виділення енергії методом синтезу легких ядер.

При бомбардуванні ядер урану (${}_{92}\text{U}^{235}$ або ${}_{92}\text{U}^{233}$) повільними нейтронами, відбувається їх поділ на два ядра-осколки, випромінюються вторинні нейтрони (2 або 3) і виділяється енергія (на один нейтрон припадає приблизно 2 MeV). Вторинні нейтрони, що випромінюються при поділі ядер можуть викликати новий поділ.

називають

ланцюговою реакцією поділу.

Схематично ланцюгова реакція поділу ядер зображена на рис.



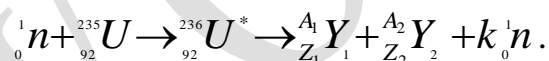
Мінімальну масу речовини, необхідну для здійснення ланцюгової реакції, називають *критичною масою*.

Ланцюгові реакції діляться на *керовані* і *некеровані*. Якщо керувати числом нейтронів, що викликають реакцію поділу, то отримують *керовану реакцію поділу*.

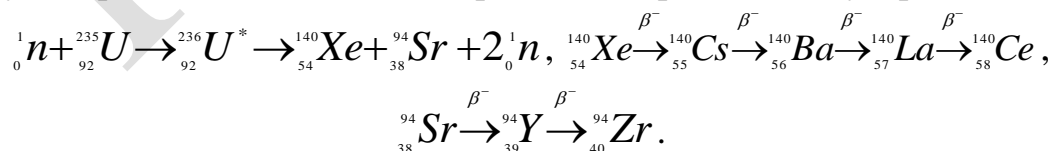
Керовані ланцюгові реакції здійснюються в ядерних реакторах. Вибух атомної бомби є некерованою реакцією.



До початку 40-х років ХХ століття роботами багатьох учених було доведено, що під час опромінення урану нейтронами утворюються елементи із середини періодичної системи – лантан і барій. Цей результат поклав початок дослідженню ядерних реакцій нового типу – реакцій поділу ядра, суть яких в тому, що важке ядро під дією нейтронів, а також інших частинок ділиться на декілька більш легких ядер, найчастіше на два близькі за масою ядра:



Продукти поділу є радіоактивними. Це зв'язано з тим, що в ядрах-осколках, які утворилися, є надлишок нейтронів у порівнянні з протон-нейтронним співвідношенням, при якому ядра стабільні. Так, у стійких середніх ядер $N \approx 1,3Z$, а у тяжких ядрах $N \approx 1,6Z$. Осколки поділу зазнають тому ряд β^- – розпадів, які супроводжуються випромінюванням γ – квантів і перетворенням нейтрона в протон. В результаті співвідношення між нейтронами і протонами в осколку досягає стану, що відповідає стабільному ізотопу, наприклад, одна з типових реакцій ядерного поділу є реакція



Кінцеві продукти – цезій і цирконій – є стабільними.

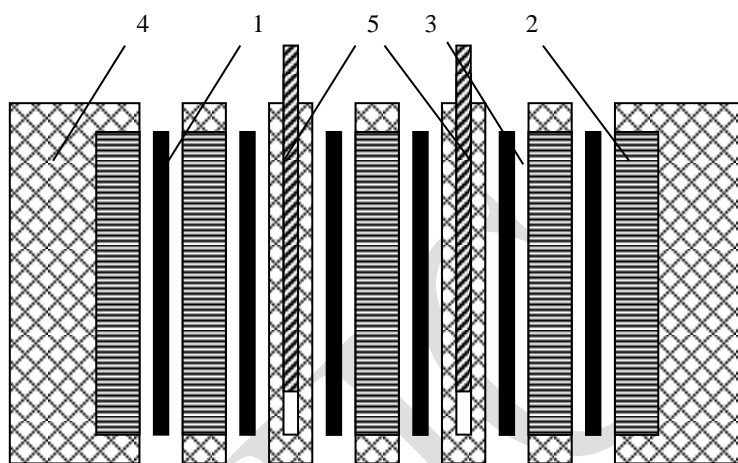
Реакція поділу ядра ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ на ${}_{58}^{148}\text{Ce}$, ${}_{40}^{94}\text{Zr}$ супроводжується виділенням великої кількості енергії: $E = 208 \text{ MeV}$.

Теорію поділу важких ядер запропонували Н. Бор і Я. Френкель, в основу її покладено краплинну модель ядра.

Пристрої, в яких здійснюється і підтримується керована ланцюгова реакція поділу, називають *ядерними реакторами*.

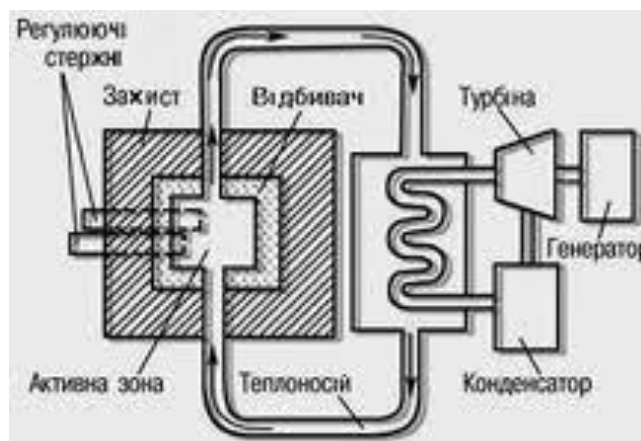
Принцип роботи реактора доцільно розглянути на принципі дії реактора на теплових нейтронах (див. рис.). Основними елементами

активної зони реактора є тепловиділяючі елементи 1 і сповільнювач 2, у якому нейтрони сповільнюються до теплових швидкостей. Тепловиділяючі елементи (твели) виготовлені із збагаченої уранової руди (до 2 % ядер урану ${}_{92}\text{U}^{235}$), поміщені у герметичну оболонку, що слабо поглинає нейтрони. За рахунок енергії, що виділяється при поділі



ядер, твели розігріваються, а тому для охолодження їх занурюють у потік теплоносія (3 – канал для протікання теплоносія). Активна зона захищена матеріалом, який запобігає втраті нейтронів 4. Керування ланцюговою реакцією здійснюється спеціальними керованими стержнями 5 з матеріалів, здатних гарно поглинати нейтрони (наприклад, В, Cd). Параметри реактора розраховуються так, щоб при повному зануренні стержнів реакція поділу була неможливою. При піднятті стержнів виникають умови для протікання реакції поділу. Висотою підняття стержнів можна регулювати інтенсивність реакції.

Ядерні реактори використовують для отримання енергії. Наприклад, робота атомної електростанції на водоядерному реакторі працює на принципі перетворення ядерної енергії в теплову, а згодом в електричну. Енергію поділу важких ядер отримують в ядерних котлах. Ядерний котел омивається водою. Вода є носієм тепла, що виділяється під час реакції поділу. Гаряча вода (вона знаходиться під тиском і нагрівається до 300 °C) нагріває другий змійовик з водою, утворюючи пару, яка поступає на турбіну електрогенератора. Недоліком такої системи є утворення радіоактивних відходів, які потребують спеціальних умов і місць зберігання.



Чорнобильська катастрофа – техногенна екологічно-гуманітарна катастрофа, спричинена двома тепловими вибухами і подальшим руйнуванням четвертого енергоблока Чорнобильської атомної електростанції, розташованої на території України, в ніч на 26 квітня 1986 року.

Приблизно о 01:23:47 26 квітня 1986 року на четвертому енергоблоці Чорнобильської АЕС сталися два теплових вибухи, які цілком зруйнували реактор. Будівля енергоблоку частково обвалилася, при цьому, як вважається, загинула одна людина – Валерій Ходемчук. На даху почалася пожежа. Згодом залишки активної зони 4-го реактора розплавилися. Суміш з розплавленого металу, піску, бетону і частинок палива розтікалася під реакторними приміщеннями. Внаслідок аварії стався викид радіоактивних речовин, зокрема ізоотопів урану, плутонію, йоду-131 (період напіврозпаду 8 днів), цезію-134 (період напіврозпаду 2 роки), цезію-137 (період напіврозпаду 30 років), стронцію-90 (період напіврозпаду 29 років). Становище

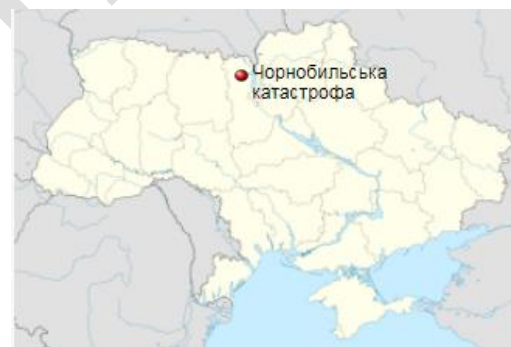
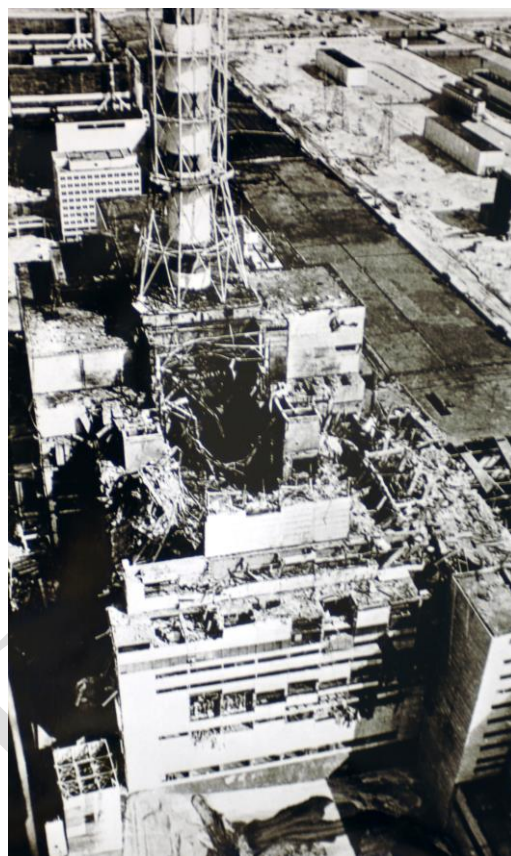
погіршувалося через те, що в зруйнованому реакторі тривали неконтрольовані ядерні і хімічні реакції з виділенням тепла (від горіння запасів графіту), з виверженням з розлому протягом багатьох днів продуктів горіння радіоактивних елементів і зараження ними великих територій. Зупинити активне виверження радіоактивних речовин зі зруйнованого реактора вдалося лише наприкінці травня 1986 року шляхом залучення ресурсів усього колишнього СРСР і ціною масового опромінення тисяч ліквідаторів.

Причини аварії на АЕС. Існує принаймні два різні підходи до пояснення причини чорнобильської аварії, які можна назвати загальноприйнятими, а також декілька додаткових тлумачень різної міри ймовірності.

Спочатку провину за катастрофу покладали винятково, або майже винятково лише на персонал. Таке ставлення мали Державна комісія, створена в СРСР для розслідування причин катастрофи, суд, а також КДБ СРСР, що проводив окреме провадження. Міжнародне агентство з атомної енергії у власному звіті 1986 року також, в цілому підтримало цю точку зору. Значна частина публікацій у ЗМІ, зокрема і недавніх, спирається саме на цю версію. На неї ж посилаються різні художні й документальні твори.

Грубі порушення правил експлуатації АЕС, скоєні персоналом ЧАЕС, за цією версією, полягали в наступному:

– проведення експерименту за будь-яку ціну, попри зміну стану реактора;



- вивід з роботи справного технологічного захисту, який просто зупинив би реактор ще до того як він потрапив би в небезпечний режим;
- замовчання масштабу аварії в перші дні керівництвом ЧАЕС.

Проте, в подальші роки пояснення причин аварії були переглянуті, зокрема і в МАГАТЕ. Консультативний комітет з питань ядерної безпеки (INSAG) 1993 року оприлюднив новий звіт[20], що приділяв більшу увагу серйозним проблемам в будові реактора. У цьому звіті, багато висновків зроблених 1986 року, визнано помилковими.

У сучасному викладі (2000-і роки), причини аварії такі:

- реактор був неправильно спроектований і небезпечний;
- персонал не був проінформований про безпеки;
- робітники АЕС припустилися низки помилок і ненавмисно порушили затвержені настанови, частково через відсутність знань про безпеки реактора;
- вимкнення захисту або не вплинуло на розвиток аварії, або не суперечило нормативним документам.

Руйнування мало вибухову природу, реактор було частково зруйновано і в довкілля викинуто велику кількість радіоактивних речовин. Відбулося вивергання потужністю 300 Хіросім. Ця надзвичайна подія, яку називають найстрашнішим цивільним ядерним інцидентом у світі, є однією з двох аварій атомної енергетики, оцінених як 7 (найбільший ступінь тяжкості) за Міжнародною шкалою ядерних подій, іншою є ядерна катастрофа на Фукусімі в Японії 2011 року.

Катастрофа вважається найбільшою за всю історію ядерної енергетики. Початкове реагування на надзвичайну ситуацію разом із подальшою дезактивацією навколишнього середовища, залучило понад 500 000 осіб і коштувало приблизно 68 мільярдів доларів США 2019 року.

Радіоактивна хмара від аварії пройшла над європейською частиною СРСР, більшою частиною Європи, східною частиною США. Приблизно 60 % радіоактивних речовин осіло на території Білорусі. Близько 300 000 осіб евакуйовано із зон забруднення.

Захисний бетонний саркофаг Чорнобильської АЕС було споруджено до грудня 1986 року. Він зменшив поширення радіоактивного забруднення від уламків і захистив їх від атмосферних впливів. Укриття також забезпечувало радіологічний захист для робітників непошкоджених реакторів на майданчику, які були перезапущені і приєднані до об'єднаної енергетичної системи України, наприкінці 1986 і 1987 років. 2017 року, «Укриття» суттєво доповнили новою безпечною оболонкою Чорнобильської АЕС, яка була зведена навколо першого саркофагу. Очищення передбачається завершити до 2065 року.



Панорама спорудження нового накриття над 4-м блоком

Навколо ЧАЕС створено 30-кілометрову зону відчуження. 2016 року, у зоні відчуження Чорнобильської АЕС, було створено найбільшу на теренах України, природоохоронну одиницю – Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник

Іншим джерелом енергії може служити **реакція синтезу атомних ядер (термоядерна реакція)** – реакція утворення з легких ядер більш важких, особливістю яких є більш великі значення енергії, що виділяється, у порівнянні з реакціями поділу важких ядер.

Прикладом реакції синтезу може бути реакція синтезу ізотопів ядер гелію:



в результаті якої виділяється енергія порядку 3,3 MeV за акт утворення ядра ${}_2^3He$. Недоліком такого способу є значність температур протікання реакцій синтезу ($\sim 10^6 K$), оскільки ядра дейтерію необхідно зблизити на відстань захвату. Таку температуру можна отримати внаслідок вибуху атомної бомби, отримавши некеровану реакцію синтезу. В даний час промислово отримати таку температуру не можливо. Але термоядерним реакціям синтезу належить майбутнє в області забезпечення людства енергією.

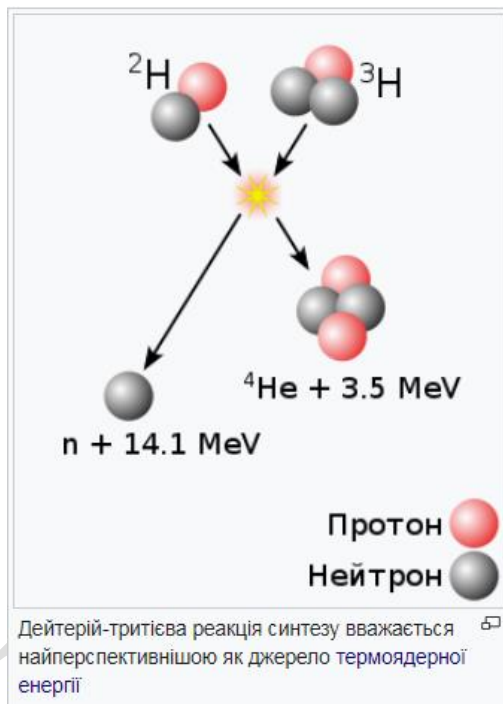
Реакції синтезу атомних ядер мають ту особливість, що в них енергія, яка виділяється на один нуклон, значно більша, ніж в реакціях поділу важких ядер.

Термоядерні реакції є одним з джерел енергії Сонця і зірок.

На сьогодні жодного термоядерного електрогенератора не існує, хоча інтенсивні експерименти тривають. З ряду причин енергія синтезу розглядається багатьма дослідниками як «природне» джерело енергії у довготривалій перспективі спираючись на такі аргументи, як практично невичерпні запаси пального (водень); пальне можна видобувати із морської води будь-де на узбережжі у світі, що робить неможливим монополізацію пального однією чи групою країн; неможливість некерованої реакції синтезу; відсутність продуктів згоряння; немає необхідності використовувати матеріали, що можуть бути використанні для виробництва ядерної зброї, таким чином виключається випадки саботажу та тероризму; у порівнянні з ядерними реакторами, незначна кількість радіоактивного сміття із коротшим періодом напіврозпаду.

Оцінюють, що наперсток, наповнений дейтерієм, продукує енергію, еквівалентну 20 тоннам вугілля. Озеро середнього розміру в змозі забезпечити країну енергією на сотні років.

У 2006 році країни Євросоюзу, Росія, США, Японія та Південна Корея узгодили будівництво експериментального міжнародного термоядерного реактора (ITER) на півдні Франції із повним закінченням робіт до 2037-2040 років. У грудні 2022 року вчені із Ліверморської національної лабораторії імені Лоуренса у Каліфорнії, США, оголосили про важливий науковий прорив, який полягає у досягненні термоядерного синтезу, який виробляє більше енергії, ніж споживає.



Сучасна фізична картина світу в історичному контексті

Фізика (від грец. φυσικός природний, φύσις природа) – природнича наука, яка досліджує загальні властивості матерії та явищ у ній, а також виявляє загальні закони, які керують цими явищами. Це наука про закономірності природи в широкому сенсі цього слова. Фізики вивчають поведінку та властивості матерії в широких межах її проявів, від субмікроскопічних елементарних частинок, з яких побудоване все матеріальне (фізика елементарних частинок), до поведінки всього Всесвіту як єдиної системи (космологія).

Деякі з закономірностей, які встановлені фізикою, є загальними для всіх матеріальних систем. До таких можна віднести, наприклад, закон збереження енергії. Такі закономірності називають законами фізики. Фізикою вважають фундаментальною наукою, тому що всі інші природничі науки (хімія, геологія, біологія тощо) мають справу з певними різновидами матеріальних систем, які підкоряються законам фізики. Наприклад, властивості хімічних речовин визначаються властивостями молекул та атомів, які їх складають, а ці властивості досліджують в таких галузях фізики, як квантова механіка, термодинаміка та/або електрика (електромагнетизм).

Фізика тісно пов'язана з математикою. Фізичні теорії, як правило, побудовані на основі певного математичного апарату, і цей апарат часто набагато складніший в порівнянні з іншими природничими науками. Але відмінність фізики від математики в тому, що фізика принципово зосереджена на описі матеріального світу, тоді як математика має справу з абстрактними ідеями та формулюваннями, які не обов'язково описують певну об'єктивну реальність. Позаяк чіткого поділу не існує, на перетині цих двох наук постала спеціальна дисципліна – математична фізика, яка вибудовує математичні структури фізичних теорій.

Загальний огляд фізичної науки

Науковий метод. Фізика – природнича наука. В її основі лежить експериментальне дослідження явищ природи, а її задача – формулювання законів, якими пояснюються ці явища. Фізика зосереджується на вивченні найфундаментальніших та найпростіших явищ і на відповідях на найпростіші запитання: з чого складається матерія, яким чином частинки матерії взаємодіють між собою, за якими правилами й законами здійснюється рух частинок тощо. В основі фізичних досліджень лежать спостереження. Узагальнення спостережень дозволяє фізикам формулювати гіпотези щодо спільних загальних рис тих явищ, за якими велися спостереження. Гіпотези перевіряються за допомогою продуманого експерименту, в якому явище проявлялося б у якомога чистішому вигляді й не ускладнювалося б іншими явищами. Аналіз даних сукупності експериментів дозволяє сформулювати закономірність. На перших етапах досліджень закономірності мають здебільшого емпіричний, феноменологічний характер, тобто явище описується кількісно за допомогою певних параметрів, характерних для досліджуваних тіл та речовин. Аналізуючи закономірності та параметри, фізики будують фізичні теорії, які дозволяють пояснити досліджувані явища на основі уявлень про будову тіл та речовин і взаємодію між їхніми складовими частинами. Фізичні теорії, в свою чергу, створюють передумови для постановки точніших експериментів, в ході яких здебільшого визначаються рамки їхнього застосування.

Найзагальніші фізичні теорії дозволяють формулювання фізичних законів, які вважаються загальними істинами, доки накопичення нових експериментальних результатів не вимагатиме їхнього уточнення.

Наприклад, Стівен Грей помітив, що електрику можна передавати на доволі значну віддаля за допомогою зволжених ниток, і почав досліджувати це явище. Георг Ом зумів знайти для нього кількісну закономірність – струм у провіднику пропорційний напрузі (закон Ома). При цьому, звісно, експерименти Ома опиралися на нові джерела живлення та на нові способи вимірювати дію електричного струму, що дозволило кількісно охарактеризувати його. За результатами подальших досліджень вдалося абстрагуватися від форми та довжини провідників і ввести такі феноменологічні характеристики, як питомий опір провідника та внутрішній опір джерела живлення. Закон Ома й понині залишається основою електротехніки, однак дослідження встановили також рамки його застосування – відкрили елементи електричного кола з нелінійними вольт-амперними характеристиками і навіть речовини, які не мають електричного опору – надпровідники. Після відкриття заряджених мікроскопічних частинок – електронів, була сформульована мікроскопічна теорія електропровідності, яка пояснила залежності опору від температури розсіянням електронів на коливаннях кристалічної ґратки, домішках тощо.

Теоретичний та експериментальний метод у фізиці. Принципи фізичних пошуків дещо відрізняються від досліджень в інших науках тому, що тут існує чітко визначений розподіл на теорію та експеримент, і з ХХ століття більшість фізиків спеціалізується або на теоретичній фізиці, або на експериментальній, і дуже мало таких, які б досягли успіхів в обох напрямках.

Теоретики займаються пошуком теорій, які могли б пояснити відомі експериментальні результати та передбачити нові, тоді як експериментатори організують свої практичні дослідження для перевірки результатів теорій. Тобто, незважаючи на існування двох чітких напрямів, вони тісно пов'язані один з одним. Тому прориви в фізиці часто відбуваються саме тоді, коли експериментатори виявляють, що наявні теорії не можуть пояснити їхніх результатів, і це потребує побудови нових фізичних теорій.

Поділ фізиків на теоретиків та експериментаторів пов'язаний із особливою складністю математичного апарату сучасної фізики з одного боку та складністю сучасного експериментального устаткування – з іншого. З появою потужної комп'ютерної техніки виділився новий клас фізиків, які займаються комп'ютерним моделюванням фізичних процесів та розробкою програмного забезпечення для складних фізичних розрахунків. Частково таке моделювання проводиться *ab initio*, тобто виходячи з основних принципів фізичної теорії, частково, ґрунтуючись на феноменологічних теоріях та використовуючи бази даних фізичних параметрів частинок, атомів чи речовин.

Кількісний характер фізики

Фізика – кількісна наука. Фізичний експеримент опирається на вимірювання, тобто порівняння значення величини з одиницею вимірювання з використанням спеціальних технічних засобів. З цією метою фізика розвинула сукупність фізичних одиниць та засобів вимірювальної техніки. Окремі фізичні одиниці об'єднуються в системи фізичних одиниць. Так, на сучасному етапі розвитку науки стандартом є Міжнародна система одиниць (SI).

Отримані експериментально кількісні залежності дозволяють використовувати для своєї обробки математичні методи і будувати теоретичні, тобто, математичні моделі досліджуваних явищ. Зі зміною уявлень про природу тих чи інших явищ змінюються також фізичні одиниці, в яких вимірюються фізичні величини. Наприклад, для вимірювання температури спочатку були запропоновані довільні температурні шкали, які ділили проміжок температур між характерними явищами (наприклад, замерзанням і кипінням води) на певну кількість менших проміжків, що отримали назву градусів температури. Для вимірювання кількості теплоти була запроваджена одиниця – калорія, яка визначала кількість теплоти, необхідної для нагрівання граму води на один градус. Проте з часом фізики встановили відповідність між механічною і тепловою формою енергії. Виявилось, що запропонована раніше одиниця кількості теплоти, калорія, є зайвою, як і одиниця вимірювання температури – градус. І кількість теплоти й температуру можна вимірювати в одиницях механічної енергії. В сучасну епоху калорія та градус не вийшли з практичного вжитку, але між цими одиницями і одиницею енергії Джоулем існує точне числове співвідношення.

Базові фізичні теорії

Фізики мають справу з неймовірно широким спектром різних об'єктів та систем, але існує декілька теорій, які використовуються фізиками майже завжди та незалежно від конкретної галузі. Кожна з цих теорій вважається здебільшого вірною, хоча має певні межі застосування.

Теорія	Основні розділи	Концепції
Класична механіка	Закони Ньютона, Механіка Лагранжа, Механіка Гамільтона, Теорія хаосу, Гідродинаміка, Механіка суцільних середовищ	Вимірювання, Простір, Час, Рух, Швидкість, Прискорення, Маса, Імпульс, Сила, Енергія, Момент імпульсу, Закони збереження, Гармонічний осцилятор, Хвиля, Робота, Потужність
Електромагнетизм	Електростатика, Електрика, Магнетизм, Рівняння Максвелла	Електричний заряд, Електричний струм, Електричне поле, Магнітне поле, Електромагнітне поле, Електромагнітне випромінювання, Магнітний монополь
Термодинаміка, Статистична механіка	Кінетична теорія	Стала Больцмана, Ентропія, Вільна енергія, Теплота, Температура
Квантова механіка	Інтеграл вздовж траєкторій, Рівняння Шредінгера	Гамільтоніан, Ідентичні частинки, Стала Планка, Квантове зчеплення, Квантовий гармонічний осцилятор, Хвильова функція, Квантове число, Спін
Теорія відносності	Спеціальна теорія відносності, Загальна теорія відносності	Принцип еквівалентності, 4-імпульс, Система відліку, Простір-час, Швидкість світла
Квантова теорія поля	Квантова електродинаміка, Квантова хромодинаміка, Стандартна модель	Регуляризація, Перенормування, Ренормгрупа, Фізичний вакуум, Фундаментальна частинка, Кварк

Основні галузі фізики

Сучасні фізичні дослідження можна розподілити на окремі галузі, які вивчають різні аспекти матеріального світу. Фізика конденсованих середовищ, напевно одна з найбільших окремих галузей досліджень, сконцентрована на вивченні властивостей звичних проявів матерії, таких як тверді тіла та рідини. Їхні властивості впливають з властивостей та особливостей взаємодії атомів цих речовин. Атомна, молекулярна фізика та оптика мають справу саме з індивідуальними атомами та молекулами. Галузь фізики елементарних частинок, також znana під назвою фізики високих енергій, вивчає властивості субмікроскопічних, набагато менших ніж атоми, частинок, із яких побудована вся матерія. Нарешті, астрофізика застосовує фізичні закони до пояснення астрономічних феноменів, починаючи від Сонця та інших об'єктів Сонячної системи, і закінчуючи Всесвітом як таким.

Галузь	Напрямок	Основні теорії	Поняття
Астрофізика	Космологія, Планетологія, Фізика плазми	Великий вибух, Розширення Всесвіту, Загальна теорія відносності, Закон всесвітнього тяжіння	Чорна діра, Реліктове випромінювання, Галактика, Гравітація, Гравітаційна хвиля, Планета, Сонячна система, Зоря
Атомна, молекулярна фізика та оптика	Атомна фізика, Молекулярна фізика, Оптика,	Квантова оптика	Дифракція, Електромагнітне випромінювання, Лазер, По ляризація, Спектр
Фізика елементарних частинок	Фізика прискорювачів, Ядерна фізика	Стандартна модель, теорії великого об'єднання, Теорія струн	Фундаментальні взаємодії (гравітація, електромагнетизм, слабка взаємодія, сильна взаємодія), Елементарна частинка, Антиматерія, Спін, Теорія всього, Енергія вакууму
Фізика конденсованих середовищ	Фізика твердого тіла, Фізика гірських порід, Фізика полімерів, Гідродинаміка, Фізика плазми	Хвиля Блоха, Фермі-газ, Фермі-рідина	Основні агрегатні стани (газ, рідина, тверде тіло, плазма, конденсація Бозе-Ейнштейна), Електропровідність, Магнетизм, Самоорганізація, Спін

Прикладна фізика

Від свого зародження фізика завжди мала велике прикладне значення й розвивалася разом із машинами й механізмами, які людство використовувало для своїх потреб. Фізика широко використовується в інженерних науках, чимало фізиків було водночас винахідниками і навпаки. Механіка, як частина фізики, тісно пов'язана з теоретичною механікою та опором матеріалів, як інженерними науками. Термодинаміка зв'язана з теплотехнікою та конструюванням теплових двигунів. Електрика пов'язана з електротехнікою та електронікою, для становлення і

розвитку якої дуже важливі дослідження в області фізики твердого тіла. Досягнення ядерної фізики зумовили появу ядерної енергетики тощо.

Фізика також має широкі міждисциплінарні зв'язки. На межі фізики, хімії та інженерних наук виникла і швидко розвивається така галузь науки як матеріалознавство. Фізичні методи та інструменти використовуються хімією, що призвело до становлення двох напрямків досліджень: фізичної хімії та хімічної фізики. Дедалі потужнішою стає біофізика – область досліджень на межі між біологією та фізикою, в якій біологічні процеси вивчаються виходячи з атомарної структури органічних речовин. Геофізика вивчає фізичну природу геологічних явищ. Медицина використовує фізичні методи, такі як рентгенівські та ультразвукові дослідження, ядерний магнітний резонанс – для діагностики, лазери – для лікування хвороб очей, ядерне опромінювання – в онкології тощо.

Теоретична фізика

Теоретична фізика охоплює теоретичні дослідження, які дають нові результати (передбачають нові фізичні явища), розробку та застосування нових фізичних теорій і методів теоретичної фізики для виявлення і опису фізичних законів і конкретних фізичних явищ.

Основною задачею теоретичної фізики є формулювання законів природи на основі даних, отриманих в експериментальних дослідженнях. Поділ фізики на теоретичну й експериментальну стався в 20 столітті внаслідок ускладнення математичного апарату фізики, з одного боку, й експериментального устаткування з іншого. Формулювання законів природи спирається на емпіричні дані й використовує метод індукції. Задачею теоретичної фізики є формулювання гіпотез, моделей, теорій, які б адекватно описували фізичні системи. Верифікація або спростування гіпотез і теорій відбувається при порівнянні з експериментом.

Інша задача теоретичної фізики дедуктивна – передбачення результатів експерименту й нових фізичних явищ на основі відомих загальних фізичних законів.

Теоретичні дослідження у таких напрямках:

- теорія прямої зворотності;
- класичної та квантової теорії поля;
- статистичної фізики (математичні основи, статистична теорія квантових систем, нерівноважна статистична фізика);
- теорії багаточастинкових систем;
- теорії гравітації;
- фізики елементарних частинок;
- релятивістської астрофізики та космології;
- теорія ядра та ядерних реакцій;
- квантової теорії розсіяння;
- теорії твердого тіла;
- фізики конденсованих середовищ;
- теорії низькорозмірних систем;
- теорії класичних і квантових рідин;
- фізики поверхонь;
- теорії фазових переходів та критичних явищ;
- теорії неупорядкованих систем;
- класичних та квантових систем;
- теорії рідких кристалів;
- теорії магнетизму та сегнетоелектрики;
- фізики пластичності та міцності;
- теорії надпровідності;
- спектроскопії атомів, молекул та кристалів;
- теорії плазми та плазмоподібних середовищ;
- теорії нелінійних процесів в активних середовищах;
- математичних методів у теоретичній фізиці;
- математичного моделювання процесів природи.

Історія фізики

З найдавніших часів люди намагалися зрозуміти навколишній світ: чому тіла падають на землю, чому різні речовини мають різні властивості тощо. Цікавили людей також питання про будову світу, про природу Сонця і Місяця. Спочатку відповіді на ці запитання намагалися шукати в філософії. Здебільшого філософські теорії, які намагалися дати відповіді на такі запитання, не перевірялися на практиці. Однак, попри те, що нерідко філософські теорії неправильно описували спостереження, ще в давні часи людство досягло значних успіхів в астрономії, а грецький мудрець Архімед навіть зумів дати точні кількісні формулювання багатьох законів механіки й гідростатики.

Деякі теорії давніх мислителів, як, наприклад, ідеї про атом, які були сформульовані у стародавніх Греції та Індії, випереджали час.

Поступово від загальної філософії почало відокремлюватися природознавство, як та її частина, яка описує навколишній світ. Одна з основних книг Аристотеля називається «Фізика». Незважаючи на деякі неправильні твердження, фізика Аристотеля впродовж віків залишалася основною наукою про природу.

Період до наукової революції

Властивість людства сумніватися й переглядати положення, які раніше вважалися єдино істинними, в пошуках відповідей на нові запитання зрештою привела до доби великих наукових відкриттів, яку сьогодні називають науковою революцією, що розпочалася приблизно з другої половини 16-го століття. Передумови до цієї докорінної зміни склалися завдяки надбанням, які можна прослідкувати до Індії та Персії. Сюди входять еліптичні моделі планетарних орбіт, що спиралися на геліоцентричну модель Сонячної системи, яку розробив індійський математик і астроном Аріабхата I, базові положення атомізму, запропоновані індуськими та джайністськими філософами, теорія про те, що світло еквівалентне енергетичним частинкам буддистських мислителів Дігнаги й Дхармакірти, оптична теорія арабського вченого Альхазена, винайдена персом Могаммадом аль Фазарі астролябія. Перський учений Насир аль Дін ат Тусі вказав на значні недоліки птолемеївської системи.

Середньовічна Європа на певний час втратила знання античних часів, але під впливом Арабського халіфату збережені арабами твори Аристотеля повернулися. В 12-13 століттях знайшли свій шлях у Європу також твори індійських і перських учених.

В Середні віки почав складатися науковий метод, у якому основна роль відводилася експерименту й математичному опису. Ібн аль-Хайсам (Альхазен) вважається основоположником наукового методу. У своїй «Книзі про оптику», написаній у 1021 році, він описував експерименти, поставлені для того, щоб доказати справедливість своєї теорії зору, яка стверджувала, що око сприймає світло, випромінене іншими об'єктами, а не випромінює саме, як вважали раніше Евклід і Птолемеї. В експериментах Альхазена використовувалася камера-обскура. За допомогою цього приладу він перевіряв свої гіпотези щодо властивостей світла: чи світло розповсюджується по прямій, чи змішуються в повітрі різні промені світла.

Наукова революція

Період наукової революції характеризується утвердженням наукового методу досліджень, вичленовуванням фізики із загалу натурфілософії в окрему область і розвитком окремих розділів фізики: механіки, оптики, термодинаміки тощо.

Більшість істориків притримуються думки про те, що наукова революція розпочалася в 1543 році, коли Копернику привезли з Нюрнберга вперше надрукований примірник його книги «Про обертання небесних сфер».

Механіка

Впродовж століття відтоді знання людства збагатилося працями таких дослідників, як Галілео Галілей, Христіан Гюйгенс, Йоган Кеплер і Блез Паскаль. Галілей першим почав послідовно застосовувати науковий метод, проводячи експерименти, щоб підтвердити свої припущення і теорії. Він сформулював деякі закони динаміки і кінематики, зокрема закон інерції, і перевірів їх дослідним шляхом. В 1687 році Ньютон опублікував книгу «Principia», в якій в подробицях описав дві основоположні фізичні теорії: закони руху тіл, відомі під назвою закони Ньютона, і закони тяжіння. Обидві теорії чудово узгоджувалися з експериментом. Книга також наводила теорії руху рідин. Згодом класична механіка була переформульована і розширена Леонардом Ейлером, Жозефом-Луї Лагранжем, Вільямом Гамільтоном та іншими. Закони гравітації заклали основу тому, що пізніше стало астрофізикою, яка використовує фізичні теорії для опису й пояснення астрономічних спостережень.

Електрика і магнетизм

Після встановлення законів механіки Ньютоном, наступним дослідним полем стала електрика. Основи створення теорії електрики заклали спостереження й досліди таких вчених 17-го століття, як Роберт Бойль, Стівен Грей, Бенджамін Франклін. Склалися основні поняття – електричний заряд та електричний струм.

1785 року Шарль Кулон опублікував закон взаємодії заряджених тіл, відомий як закон Кулона. 1820 року Андре-Марі Ампер встановив закон взаємодії провідників зі струмом – закон Ампера.

Ганс Крістіан Ерстед уперше помітив дію електричного струму на магнітну стрілку. 1831 року англійський фізик Майкл Фарадей об'єднав електрику й магнетизм, продемонструвавши, що рухомий магніт індукує в електричному колі струм. Спираючись на цю концепцію, Джеймс Клерк Максвелл побудував теорію електромагнітного поля. Крім електромагнітних явищ рівняння Максвела описують світло. Підтвердження цьому знайшов Генріх Герц, відкривши радіохвилі.

Оптика

Із побудовою теорії електромагнітного поля та електромагнітних хвиль перемогою хвильової теорії світла, започаткованої Гюйгенсом, над корпускулярною теорією Ньютона, завершилася побудова класичної оптики. На цьому шляху оптика збагатилася розумінням дифракції та інтерференції світла, досягнутим завдяки працям Френеля і Юнга.

Важливими віхами в становленні оптики були відкриття закону заломлення світла, принципу Ферма та принципу Гюйгенса. Винаходи таких оптичних

приладів як телескоп та мікроскоп сприяли розвитку не тільки фізики, а й суміжних областей науки.

У 19 столітті зародилася спектроскопія – вивчення властивостей речовин оптичними методами. Спектральний аналіз допоміг ідентифікації нових хімічних елементів, таких як гелій.

Термодинаміка і статистична механіка

У 18-му і на початку 19-го століття були відкриті основні закони поведінки газів, а з добою теплових машин сформувалася наука термодинаміка. У середині 19-го століття Джоуль встановив еквівалентність механічної та теплової енергій, що призвело до формулювання закону збереження енергії. Завдяки Клаузіусу був сформульований другий закон термодинаміки. Гібс заклав основи статистичної фізики, Людвіг Больцман запропонував статистичну інтерпретацію поняття ентропії.

Під кінець 19 століття фізики підійшли до значного відкриття – експериментального підтвердження існування атома.

Наприкінці 19 століття змінилася роль фізики в суспільстві. Виникнення нової техніки: електрики, радіо, автомобіля тощо, вимагало великого обсягу прикладних досліджень. Заняття наукою стало професією. Фірма General Electric першою відкрила власні дослідницькі лабораторії. Такі ж лабораторії стали з'являтися в інших фірмах.

Зміна парадигм

Кінець 19, початок 20 століття був часом, коли під тиском нових експериментальних даних фізикам довелося переглянути старі теорії й замінити їх новими, заглядаючи дедалі глибше в будову матерії. Експеримент Майкельсона-Морлі вибив основу з-під ніг електромагнетизму, поставивши під сумнів існування ефіру. Були відкриті нові явища, такі як рентгенівські промені та радіоактивність. Не встигли фізики довести існування атома, як з'явилися докази існування електрона, експерименти з фотоефекту та вимірювання спектру теплового випромінювання давали результати, які неможливо було пояснити, виходячи із засад класичної фізики. У пресі цей період називався кризою фізики, але водночас він став періодом тріумфу фізики, яка зуміла виробити нові революційні теорії, які не тільки пояснили незрозумілі явища, а й багато інших, відкривши шлях до нового розуміння природи.

Теорія відносності

У 1905 році Альберт Ейнштейн побудував спеціальну теорію відносності, яка продемонструвала, що поняття ефіру зайве при поясненні електромагнітних явищ. При цьому довелося змінити класичну механіку Ньютона, давши їй нове формулювання, справедливе при великих швидкостях. Докорінно змінилися також уявлення про природу простору й часу. Ейнштейн розвинув свою теорію у загальну теорію відносності, опубліковану в 1916 році. Нова теорія включала в себе опис гравітаційних явищ і відкрила шлях до становлення космології – науки про еволюцію Всесвіту.

Квантова механіка

Розглядаючи задачу про теплове випромінювання абсолютно чорного тіла Макс Планк у 1900 році запропонував неймовірну ідею, що електромагнітні хвилі випромінюються порціями, енергія яких пропорційна частоті. Ці порції отримали назву квантів, а сама ідея розпочала побудову нової фізичної теорії – квантової механіки, яка ще більше змінила класичну Ньютонівську механіку, цього разу при дуже малих розмірах фізичної системи. В тому ж 1905-му році Альберт Ейнштейн застосував ідею Планка для успішного пояснення експериментів із фотоефекту, припустивши, що електромагнітні хвилі не тільки випромінюються, а й поглинаються квантами. Корпускулярна теорія світла, яка, здавалося, зазнала нищівної поразки в боротьбі з хвильовою теорією, знову отримала підтримку.

Суперечка між корпускулярною і хвильовою теорією знайшла своє вирішення в корпускулярно-хвильовому дуалізмі, гіпотезі, сформульованій Луї де Бройлем. За цією гіпотезою не тільки квант світла, а будь-яка інша частинка проявляє водночас властивості, притаманні як корпускулі, так і хвилі. Гіпотеза Луї де Бройля підтвердилася в експериментах з дифракції електронів.

У 1911 році Ернест Резерфорд запропонував планетарну теорію атома, а в 1913 році Нільс Бор побудував модель атома, в якій постулював квантовий характер руху електронів. Завдяки роботам Вернера Гайзенберга, Ервіна Шредингера, Вольфганга Паулі, Поля Дірака та багатьох інших квантова механіка знайшла своє точне математичне формулювання, підтверджуючись численними експериментами. В 1927 році була вироблена копенгагенська інтерпретація, яка відкривала шлях для розуміння законів квантового руху на якісному рівні.

Фізика сучасності

Із відкриттям радіоактивності Анрі Бекерелем почався розвиток ядерної фізики, яка привела до появи нових джерел енергії: атомної енергії та енергії ядерного синтезу. Відкриті при дослідженнях ядерних реакції нові частинки: нейтрон, протон, нейтрино започаткували фізику елементарних частинок. Ці нові відкриття на субатомному рівні виявилися дуже важливими для фізики на рівні Всесвіту і дозволили сформулювати теорію його еволюції – теорію Великого Вибуху.

Склався остаточний розподіл праці між фізиками-теоретиками й фізиками-експериментаторами, Енріко Фермі був, мабуть, останнім визначним фізиком, успішним як у теорії так і експериментальній роботі.

Передній край фізики перемістився в область дослідження найфундаментальніших законів, ставлячи перед собою мету створити теорію, яка пояснювала б Всесвіт, об'єднавши теорії фундаментальних взаємодій. На цьому шляху фізика здобула часткові успіхи у вигляді квантової електродинаміки, теорії електрослабкої взаємодії та теорії кварків – квантовій хромодинаміці. Усі ці теорії неформально об'єднує так звана стандартна модель. 2012 року експерименти, проведені на Великому адронному колайдері в ЦЕРНі, підтвердили існування останньої до того ще невідкритої частинки стандартної моделі бозона Гігса. Однак, квантова теорія гравітації досі не побудована. Певні надії пов'язуються з теорією струн.

Водночас, починаючи зі створення квантової механіки швидкими темпами розвивається фізика твердого тіла, відкриття якої привели до виникнення та

розвитку електроніки, а з нею й інформатики, які внесли докорінні зміни в культуру людського суспільства.

Фізичні інструменти й фізичні теорії поширилися в інші галузі науки: хімію, біологію, медицину, в сторону яких, загалом, змістився інтерес суспільства.

Історія фізики в Україні

Природознавство, і фізика, як його складова частина, почало складатися в Україні з виникненням перших університетів, серед яких провідне місце займала Могилянська академія. Із середини 19-го століття почали закладатися університетські фізичні факультети, як в межах царської Росії, так і на теренах Австро-Угорської імперії. Початок двадцятого століття став свідком розвитку значного числа науково-дослідних інститутів, серед яких слід особливо відзначити Харківський фізико-технічний інститут, Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики. В Україні працювали такі визначні фізики, як Микола Миколайович Боголюбов, Олександр Сергійович Давидов, Лев Давидович Ландау, Євген Михайлович Ліфшиць та багато інших.

До 18 століття слово «фізика» у його первинному значенні окреслювало все знання чи уявлення про природу. Ще у 19 столітті в Західній Європі слово фізика було синонімом загального терміну «природознавство» (англ. natural philosophy, нім. Naturphilosophie). Сучасний поділ природознавства на біологію, хімію, фізику, астрономію тощо відбувся внаслідок поширення і поглиблення знання в усіх цих ділянках

Ранній період

В Україні за раннього періоду історії слід мати на увазі первинне значення слова фізика, тобто загальне природознавство. Про зацікавлення природознавством (і фізикою) в Україні за давніх часів відомостей дуже мало. Одним з перших джерел є «Ізборник» Святослава (1073), в якому є кілька відомостей з медицини і натурфілософії.

Середньовіччя

За середньовіччя взагалі розвиток фізичних знань в Україні був зв'язаний з прикладною математикою, що її застосовувано у ремеслі й торгівлі.

Певною знаковою фігурою у точних науках дотичних до фізики цього періоду є Юрій Дрогобич (народився бл. 1450 у Дрогобичі; помер 4 липня 1494 у Кракові) – український філософ, астроном, астролог, перший відомий український доктор медицини.

Києво-Могилянська Академія, яка з'явилася у 1632 році, не поступалася рівнем філософської і натурфілософської науки тодішнім університетам Європи. Після Переяславського договору вона стала головним культурно-освітнім центром Російської Імперії і була ним аж до заснування Московського Університету в 1755 році.

Найвизначнішим викладачем фізики (натурфілософії) у Києво-Могилянській Академії слід вважати Теофана Прокоповича. В 1734 році в Київській Академії навчався видатний російський природознавець Михайло Ломоносов. Від 30-их років 18 століття природознавство (фізику) на вищому рівні викладали в заснованому в 1727 році Харківському Колегіумі; по об'єднанні його з Харківським

Головним Народним Училищем (1793) фізика викладалася вже як окремий предмет.

Фізика в XIX-XX століттях

У Харкові. Одним з перших фізиків Харківського Університету був Т. Осиповський, який досліджував природу світла та цікавився проблемами часу і простору. Першим українцем, який зробив внесок у фізику у всесвітньому масштабі, був народжений на Полтавщині учень Т. Осиповського – М.В. Остроградський. Доведена ним теорема про перетворення кратних інтегралів (теорема Остроградського-Гауса) лягла в основу сучасної теоретичної механіки й електродинаміки. Він також зробив значний внесок в інші ділянки фізики: розв'язав задачу поширення хвиль на поверхні рідини, розвинув теорію поширення тепла у рідинах, і значно спричинився до застосування варіаційних принципів для розв'язання задач з механіки консервативних систем.

М. Пальчиків, професор того ж університету, спостерігав в 1882 році за поляризацію світла, розсіяного атмосферою; тоді ж він експериментально спростував тогочасне уявлення про те, що небо є блакитним через флюоресценцію повітря; він теж проробив перші в Україні дослідження радіоактивності (1900 в Одесі).

У 1911–1921 роках у Харківському Університеті почала швидким темпом розвиватися радіофізика (Д. Рожанський). У цю галузь вчені України вносять безперервно вагомий внесок і тепер.

У відкритому 1928 в Харкові Українському Фізико-Технологічному Інституті (ФТІ) розвинулися широкі дослідження з теоретичної та ядерної фізики, фізики низьких температур, фізики твердого тіла та радіофізики. Харківський ФТІ швидко став одним з головних фізичних центрів України, навіть всього СРСР; у ньому працювали:

- Л.Ландау (Нобелівська премія 1962, головним чином за його теорію плинного гелію);
- Є. Ліфшиць (співавтор з Л.Ландау багатотомового посібника «Курс теоретической Физики», який є одним з найкращих у світовій фізичній літературі);
- І.Ліфшиць Автор фундаментальних праць з теорії твердого тіла, зокрема із загальної теорії конденсованого стану речовини;
- О.Ахієзер і О.Ситенко розвинули теорію електромагнітних флуктуацій у плазмі;
- І.Померанчук вивів теорему про сильну ядерну взаємодію при гранично високих енергіях, відому в світовій фіз. літературі як «теорема Померанчука»;
- О.Лейпунський (1934 у відрядженні до Англії в лабораторії Е.Резерфорда вперше експериментально підтвердив гіпотезу нейтрино, зробив значний внесок у розвиток ядерної фізики в Україні).

Дослідницька праця Харківського ФТІ високо оцінюється в світі, особливо у галузі фізики плазми, магнітної гідродинаміки та удосконалення магнітних пасток для закріплення плазми у керованому термоядерному синтезі.

У Києві. Чималу дослідну працю розвинув у 1865–1891 роках засновник першої фізичної школи в Україні, професор Київського Університету М. Авенаріус. Він виявив і кількісно оформив залежність електрорушійної сили термоелементів від температури (закон Авенаріуса), як також започаткував систематичні дослідження критичних параметрів низки рідин та виявив залежність між

критичною температурою, об'ємом і дійсною температурою рідини. Авенаріус був одним з засновників Київського Фізико-Математичного Товариства (1889), яке відіграло значну роль у розвитку і популяризації фізики в Україні.

В 1884 році створено у Київському Університеті першу в Україні кафедру теоретичної фізики, яку очолив Микола Шіллер. Він зробив значний внесок у термодинаміку, описав пружність насиченої пари (закон Томпсона–Шіллера) та довів, що у диференційне рівняння другого закону термодинаміки входить інтегруючий дільник, який мусить бути універсальною функцією температури.

Одним з перших центрів фізичних досліджень в Україні була організована в 1923 році О. Гольдманом у Київському Політехнічному Інституті науково-дослідницька кафедра фізики, яка розпочала перші в Україні дослідження напівпровідників. 1927 Гольдман заснував перший в Україні фізичний журнал «Фізичні записки», який у значній мірі допоміг розвитку української фізичної термінології. 1929 Київську науково-дослідницьку кафедру перетворено на Науково-Дослідницький Інститут Фізики.

В Інституті механіки (заснованому 1919) досліджують теорію пружності, теорію стійкості, хвильову динаміку деформованих тіл, нелінійну теорію просторових коливань. Інститут Гідромеханіки (заснований 1926) дає вагомий вклад у аеродинаміку і гідродинаміку турбулентних і кавітаційних течій, у динаміку в'язких рідин. Головну роль у розвитку фізичних досліджень відіграв і відіграє Інститут Фізики, заснований у Києві 1929. На 1982 він веде працю у тринадцятьох відділах: фізики кристалів, фотоактивності, нелінійної оптики, фізичної електроніки, оптичної квантової електроніки, резонансних та адсорбційних явищ, газової електроніки, електроніки твердого тіла, теоретичної фізики, математичних проблем фізики, приймачів випромінювання, фізики радіаційних процесів.

На світову арену вийшли з Києва імена таких фізиків, як:

- М. Крилов, який у 1930-х рр. разом з своїм учнем і співр. М. Боголюбовим заклав основи сучасної нелінійної механіки, що застосовується у багатьох галузях Ф. і техніки. Боголюбов всесвітньо відомий і за свій фундаментальний вклад у статистичну Ф., квантову теорію поля та теорію елементарних частинок.
- С. Пекар відомий як творець теорії поляронів, що стала самостійною ділянкою Ф. твердого тіла.
- О. Давидов з своїми співробітниками розвинув теорію екситонів та пояснив прикмети несферичних ядер. Його посібник «Квантовая механика» широко вживався в СРСР і в перекладах за кордоном. Важливі результати з оптичних властивостей твердих тіл здобув А. Лубченко.

У Сімферополі. З ініціативи групи професорів Київського Університету 1918 відкрито у Сімферополі Таврійський (згодом Кримський) Університет. За недовгий час його існування (до 1929) його фізико-математичний факультет розвинув жваву діяльність. Тут працював Я. Френкель, який написав ряд ґрунтовних підручників теоретичної фізики. Інші визначні фізики в Кримському Університеті: М. Крилов, А. Йоффе та І. Тамм (Нобелівська премія 1958). Цей університет в 1923 закінчили І. Курчатов (пізніше в Москві), основоположник розвитку ядерної енергії в СРСР, і К. Синельников, визначний український конструктор прискорювачів заряджених частин і плідний дослідник ядерної фізики та фізики плазми у Харківському Фізико-Технічному Інституті. Поряд з працею фізичних кафедр університетів та технічних вищих шкіл, широка науково-дослідна діяльність розвинулася у фізико-

дослідницьких інститутах. Від 1925 до 1932 в Сімферополі існував Кримський Науково-Дослідницький Інститут, в якому під керівництвом І. Тихоновського велися атмосферично-оптичні дослідження.

В Одесі. 1926 відкрито в Одесі Науково-Дослідний Інститут Фізики (1933 цей інститут увійшов до складу Одеського Університету), в якому група фізиків під керівництвом Є.А. Кирилова здобула важливі результати у дослідженнях фотоефекту у напівпровідниках, люмінесценції фарб і кристалів та фотохімічних і фотоелектричних процесів у фотографічному зображенні.

У Полтаві. 1926 засновано Полтавську гравіметричну обсерваторію, в якій досліджується обертальний і гравітаційний рух землі. Значних успіхів домоглася Полтавська обсерваторія у вивченні земних припливів і їхньої залежності від розривних порушень земної кори.

У Дніпрі. У металургії значних успіхів домогся заснований 1932 у Дніпропетровську Фізико-Технологічний Інститут, який став вогнищем прикладних дослідів, що були потрібні для розбудови металургії в Україні та у всьому СРСР. Крім значних досягнень у металографії і теплофізиці, Дніпропетровський ФТІ набув визнання за розвиток фізики і хімії повільного та вибухового горіння.

Розвиток фізики в Україні після Другої Світової Війни

Після другої світової війни наявні науково-дослідні інститути розбудовано, створено ряд філіалів та засновано низку нових, спеціалізованих інститутів. Відділ Фізики АН УРСР нараховує десять установ:

- Інститут фізики;
- Інститут теоретичної фізики;
- Інститут металофізики;
- Інститут ядерних досліджень;
- Інститут фізики напівпровідників;
- Інститут радіофізики й електроніки;
- Фізико-технічний інститут;
- Фізико-технічний інститут низьких температур;
- Донецький фізико-технічний інститут;
- Головна астрономічна обсерваторія.

Серед інститутів і філіалів, створених після другої світової війни, які розгорнули значні фізичні дослідження, можна назвати такі:

- Головна астрономічна обсерваторія (1944, Київ, фізика сонця, фізика особливості атмосфер планет, астрофізика, астрономія).
- Інститут електродинаміки (заснований 1947 у Києві, до 1963 Інститут електротехніки) досліджує електровимірювальні прилади, джерела електроживлення, перетворювачі частоти напруги і струму;
- Фізико-механічний інститут (1951, Львів, до 1964 Інститут машинознавства та автоматики; ділянки досліджень: взаємодія поверхнево-активних середовищ, магнітометрія, гідроакустика);
- Інститут радіофізики й електроніки (заснований 1956, Харків; ділянки: розсіяння і поглинання радіохвиль, високочастотні властивості напівпровідників);
- Інститут металофізики (1955, Київ, електронна структура металів та стопів, фізика міцності);

- Інститут геофізики (1955, Київ, пружні властивості земної кори, сейсмічні хвилі, динаміка сейсморозвідки);
- Інститут фізики напівпровідників (1960, Київ, взаємодія сильних потоків електромагнітних випромінювань з напівпровідниками, лазери, поверхневі ефекти);
- Фізико-технічний інститут низьких температур (1960, Харків, квантові рідини ^3He , ^4He , квазічастинкові збудження макромолекул);
- Морський гідрофізичний інститут (1963, Київ, теплофізика, кріофізика, нові джерела енергії);
- Донецький фізико-технічний інститут (1965, Донецьк, фізика високих тисків, магнітні матеріали);
- Інститут теоретичної фізики (1966, Київ, квантова теорія поля, астрофізика, квантова біофізика, теорія ядра, теорія твердого тіла);
- Інститут геохімії та фізики мінералів (1969, Київ, з 2001 року відділився Інститут геохімії навколишнього середовища; фізико-хімія геологічних процесів, фізика мінералів);
- Інститут ядерних досліджень (1970, Київ, квантові характеристики ядерних рівнів, механізми ядерних реакцій, взаємодія важких ядер, фізики ядерних реакторів);
- Львівський відділ Інституту теоретичної фізики (статистична теорія конденсованих станів);
- Ужгородський відділ Інституту теоретичної фізики (теорія адронів).

Інститути устатковано відповідними дослідними спорудами і приладдям, які допомогли здобути значних досягнень і міжнародного визнання. Тут можна назвати комплекс прискорювачів, токамаків і стелараторів у Харкові; півтора кілометровий радіотелескоп, також у Харкові; дослідний реактор, ізохронний циклотрон та головну астрономічну обсерваторію у Києві. Всесвітньою славою користується Кримська астрофізична обсерваторія.

Українські фізики

Фізики України вносили і вносять вагомий вклад, як у теоретичну, так і в експериментальну фізику на світовому рівні. Сотні фізиків України цитовано у іноземній науковій літературі. Між інших знаходимо там, крім вищеназваних, такі імена:

- В. Бар'яхтар (магнето-акустика),
- В. Гуменюк (біофізика),
- Е. Завадський (фізика твердого тіла),
- І. О. Кулик (фізика низьких температур),
- В. Немошкालенко (фізика твердого тіла),
- В. Ольховський (ядерна фізика),
- С. Пелетминський (фізика твердого тіла),
- В. Семиноженко (фізика твердого тіла),
- В. Струтинський (теорія ядра),
- І. Фішук (фізика твердого тіла),
- Я. Файнберг (фізика плазми),

- А. Хоткевич (фізика низьких температур),
- В. Хоткевич (фізика низьких температур),
- І. Юхновський (фізика конденсованих станів).

Значних успіхів і міжнародного визнання досягли науковці-фізики українського походження, які працювали або працюють поза межами України. Серед них відомі:

- І. Пулюй, винахідник низки електричних і електротехнічних приладів, дослідник електричних розрядів у газах при допомозі так званої «трубки Пулюя»,
- С. Тимошенко, всесвітньо відомий своїми науковими працями з теорії міцності, стійкості й коливань пружних тіл,
- Ю. Кістяковський, який зробив значний внесок у фізико-хімію вибухових процесів.
- Стасів Остап, кристалофізик
- Нік Голоняк, «батько світлодіодів»
- Смакула Олександр Теодорович, винахідник антирефлексійного покриття лінз.
- Раєвський Борис, директор біофізичного Інституту Макса Планка у Франкфурті-на-Майні

ВИТЯГ З НАВЧАЛЬНОГО ПЛАНУ 2023-2024 Н.Р.

Студентів навчання спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» спеціалізацій Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів (ТБКВМ), Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів (ТБКВМ) скор., Промислове та цивільне будівництво (ПЦБ), Промислове та цивільне будівництво (ПЦБ), Промислове та цивільне будівництво (ПЦБ) скор., Міське будівництво та господарство (МБГ) скор., Міське будівництво та господарство (МБГ), Теплогазопостачання та вентиляція (ТВ), Теплогазопостачання та вентиляція (ТВ) скор., Водопостачання та водовідведення (ВВ), Водопостачання та водовідведення (ВВ) скор., Гідротехнічне будівництво (ГБ), Теплоенергетика (ТЕ) та інші

денної форми

Семестр	Кількість кредитів на семестр	Обсяг годин					Кількість індивідуальних робіт	Форма контролю
		Всього	аудиторних			РГР		
			Разом	Л	Пз		Лр	
1	4,0	120	60	30	10	20	2	екзамен
2	4,0	120	70	30	10	30	2	залік

заочної форми

Семестр	Кількість кредитів на семестр	Обсяг годин					Кількість індивідуальних робіт	Форма контролю
		Всього	аудиторних			РГР		
			Разом	Л	Пз		Лр	
1	4,0	120	32	6	6	20	2	екзамен
2	4,0	120	42	6	6	30	2	залік

ПЕРЕЛІК ТЕМ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

№	Назва теми	Кількість годин	
		денна	заочна
1	Молекулярно-кінетична теорія речовини	2	2
2	Основи термодинаміки	2	2
3	Коливальні та хвильові процеси	2	2
4	Геометрична та хвильова оптика. Квантова оптика	2	2
5	Хвильові властивості матерії. Фізика атома та ядра	2	2
	Разом	10	10

ПЕРЕЛІК ТЕМ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

МОДУЛЬ 3. Молекулярна фізика

Лабораторна робота № 2.2 «Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом регулярного режиму»

Лабораторна робота № 14 «Визначення абсолютної та відносної вологості повітря»

Лабораторна робота № 16 «Дослідне вивчення залежності атмосферного тиску від висоти над Землею»

МОДУЛЬ 4. Коливальні та хвильові процеси. Оптика

Лабораторна робота № 4.1 «Визначення параметрів згасання коливань фізичного маятника»

Лабораторна робота № 4.3 «Визначення швидкості звуку в повітрі методом стоячих хвиль»

Лабораторна робота № 5.2 «Визначення довжини світлової хвилі за допомогою дифракційної решітки»

Лабораторна робота № 5.6 «Визначення роботи виходу електрона з металів методом гальмування фотоелектронів в електричному полі»

МОДУЛЬ 5. Квантова та ядерна фізика

Лабораторна робота № 6.1 «Визначення енергетичної ширини забороненої зони напівпровідника»

Лабораторна робота № 7.2 «Визначення коефіцієнта поглинання радіоактивного випромінювання різними матеріалами»

ПРИКЛАДИ ТЕМ РЕФЕРАТІВ

1. Вакуумні технології у будівництві.
2. Теплоємність будівельних матеріалів.
3. Теплові та холодильні будівельні машини.
4. Вологість будівельних матеріалів.
5. Полімерні будівельні матеріали.
6. Капілярні явища у будівництві.
7. Поверхневий натяг рідких будівельних сумішей.
8. Використання резонансу та його шкідлива дія у будівництві.
9. Елементи будівельної акустики.
10. Використання інфра- та ультразвуку у будівництві.
11. Оптичні будівельні прилади.
12. Використання різних видів теплопередачі у будівельній галузі
13. Квантові явища при низьких температурах. Надпровідність і надплинність.
14. Люмінесценція твердих тіл
15. Напівпровідникові прилади. Напівпровідникові діоди і транзистори.
16. Принцип дії лазерів, їхні типи та практичне використання.
17. Методи спостереження і реєстрації радіоактивного випромінювання
18. Проблеми керованого термоядерного синтезу.
19. Переваги та недоліки ядерної енергетики.
20. Енергія зірок.
21. Великий андронний колайдер.
22. Темна матерія.
23. Темна енергія.
24. Стандартна модель фізики елементарних частинок.
25. Квантова теорія гравітації.
26. Теорія струн.
27. Бозон Хіггса.
28. Чорні діри.
29. Теорія Великого вибуху.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ПІДРУЧНИКІВ

Навчальні посібники:

1. Загальний курс фізики: Навч. посібник для студ. вищих техн. і пед. закладів освіти. В 3 т. /За ред. І.М.Кучерука. – К.: Техніка, 1999.
2. Фізика в будівництві: навчальний посібник/ В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян, Н.Б. Бурдейна та ін.. – К.: КНУБА, 2012. – 252 с.
3. Фізика. Лабораторний практикум: Базовий цикл. Навчальний посібник. – 3-тє вид., випр. і доп. /В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян та ін. /За ред. В.І. Клапченка. – К.: КНУБА, 2012. - 228 с.
4. Фізика. Збірник задач: навчальний посібник для студентів усіх спеціальностей/ В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян та ін.; за заг. ред. В.І. Клапченка. – К.: КНУБА, 2009. – 252 с.
5. Чолпан П.П. Фізика: Підручник. – К.: Вища шк., 2003.
6. Азнаурян І.О. Фізика та фізичні методи дослідження: Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2008. – 250 с.
7. Фізика. Практичний курс: Навчальний посібник для студентів заочної форми навчання всіх спеціальностей /Автори: В.І. Клапченко, Г.Д. Потапенко, І.О. Азнаурян та ін. – К.: КНУБА, 2005, - 256 с.
8. Бурдейна Н.Б., Глива В.А, Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Фізика. Протоколи лабораторних робіт. Частина І: Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2022. – 100 с.
9. Бурдейна Н.Б. Фізика. Лабораторний зошит. Ч II. Молекулярна фізика і термодинаміка. Коливальні та хвильові процеси. Оптика. Квантова фізика. Фізика атома і ядра / Навчально-методичний посібник для студентів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія» – К.: КНУБА, 2023. – 88 с. – Видання 2-ге, перероблене та доповнене.

Конспекти лекцій:

1. Бурдейна Н.Б., Панова О.В., Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Фізика. Конспект лекцій студента: Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2022. – 144 с.
2. Бурдейна Н.Б., Панова О.В., Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Фізика. Конспект лекцій студента: Молекулярна фізика і термодинаміка. Коливальні та хвильові процеси. Оптика. Квантова фізика. Фізика атома і ядра / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2023. – 168 с.

Посилання на сторінки електронного навчально-методичного комплексу дисципліни:

- 1) <https://org2.knuba.edu.ua/course/view.php?id=48>
- 2) <https://org2.knuba.edu.ua/course/view.php?id=3894>

Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

ББК 22.3я7
УДК 53(075)
Ф 50

РУКОПИС

Підписано до друку. Формат 60×84/16. Папір офсет. № 1.
Гарнітура Тип Таймс. Друк офсет. 8,1 ум. друк. арк.
Обл.-вид. арк. Наклад 100 пр.



Бурдейна Наталія Борисівна – кандидат педагогічних наук, доцент, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури.

Автор більше 100 навчальних та навчально-методичних посібників, патентів та наукових праць з теорії та методики навчання фізики, а також моніторингу та нормалізації рівнів фізичних факторів, технологій створення будівельних матеріалів для захисту від небезпечних природних і техногенних впливів.



Глива Валентин Анатолійович – завідувач кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури; доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики.

Автор більше 300 наукових публікацій, навчальних посібників і патентів з безпеки фізичних факторів, моніторингу та дослідження фізичних факторів виробничих середовищ, технологій створення будівельних матеріалів для захисту від небезпечних природних і техногенних впливів.



Краснянський Григорій Юхимович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури.

Автор більше 100 наукових публікацій, навчальних посібників і патентів з фізики твердого тіла, будівельного матеріалознавства, технологій будівельних матеріалів для захисту від небезпечних техногенних впливів.



Петруньок Тетяна Броніславівна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики, завідувач відділення довузівської підготовки Київського національного університету будівництва і архітектури

Автор більше 30 навчальних та навчально-методичних посібників, наукових праць з теорії та методики навчання фізики.



Бірук Яна Ігорівна – асистент кафедри фізики, завідувач сектору профорієнтаційної роботи, фахівець відділення довузівської підготовки Київського національного університету будівництва і архітектури

Автор біля 30 навчальних та навчально-методичних посібників, наукових праць та патентів з методики навчання фізики та технологій створення будівельних матеріалів для екранування техногенних полів.