

В. В. Куліш
А. М. Соловійов
О. Я. Кузнецова

ФІЗИКА

для інженерних спеціальностей

КРЕДИТНО-МОДУЛЬНА СИСТЕМА

Модуль 4

Квантова та атомна фізика

У чотирьох частинах

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів



Київ
Книжкове видавництво
Національного авіаційного університету
2008

УДК 53:378.14 (078.5)
ББК В30я7
К 903

Тиражувати без офіційного дозволу НАУ забороняється

Рецензенти:

Ю. І. Горобець, д-р фіз.-мат. наук, чл.-кор. АПН України
(Національний технічний університет України «КПІ»),

Л. В. Поперенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.
(Національний університет ім. Тараса Шевченка),

О. Д. Альохін, д-р фіз.-мат. наук, проф.
(Національний університет ім. Тараса Шевченка)

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1.4/18-Г-366 від 04.07.2006)*

Куліш В.В., Соловійов А.М., Кузнєцова О.Я.

К 903

Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система.
Навч. посібник. — У 4 ч. — М. 4. Квантова та атомна фізика. — К.: Книжкове вид-во НАУ, 2008. — 232 с.

ISBN 966-598-269-9

ISBN 978-966-598-413-9 (Модуль 4)

Пропонований посібник — навчально-методичний комплекс робочих матеріалів, створений для забезпечення впровадження кредитно-модульної системи безпосередньо в студентську аудиторію. Увесь матеріал даного комплексу розбито на навчальні модулі. При цьому для кожного модуля подано мінімально необхідний лекційний матеріал (теоретичне ядро), де вказано, яку його частину призначено для аудиторного вивчення, а яку — для самостійної роботи, розміщено повноцінні задачі з текстами задач за темами кожного предметного елемента та з прикладами розв'язання, списки тестових запитань для поточного (предметно-елементного) і модульного контролю, описи реальних та віртуальних лабораторних робіт тощо.

Матеріал кожного модуля у даному комплексі подано у формі окремого тому. Тобто у випадку чотирьохмодульного, як у нашому базовому варіанті, курсу фізики, увесь указаний матеріал складає зміст чотирьох окремих томів. Однак за необхідності даний комплекс може бути використано також і в разі шести-модульного (трисеместрового) варіанта курсу.

Комплекс відповідає чинній навчальній програмі й рекомендований Міністерством освіти і науки України для студентів інженерних спеціальностей та викладачів.

УДК 53:378.14 (078.5)
ББК В30я7

ISBN 966-598-269-9
ISBN 978-966-598-413-9 (Модуль 4)

© В.В. Куліш, А.М. Соловійов,
О.Я. Кузнєцова, 2008
© НАУ, 2008

Навчальне видання

КУЛІШ Віктор Васильович
СОЛОВІЙОВ Андрій Миколайович
КУЗНЄЦОВА Олена Яківна

Фізика для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система

Навчальний посібник
У чотирьох частинах

Модуль 4. Квантова та атомна фізика Художник обкладинки *Т. Зяблицева*. Коректор *Л. Тютюнник*. Верстка *А. П'ятникової* Підп. до друку 7.12.07. Формат 60×84/8. Папір офсет. № 1. Гарнітура Тип Таймс. Друк офсет. Ум. друк. арк. 29,0. Обл.-вид. арк. 26,97. Наклад 1500 пр. Зам. № 07-215. Книжкове видавництво Національного авіаційного



ТЕОРЕТИЧНЕ ЯДРО

*Аудиторний лекційний матеріал
та матеріал для самостійного вивчення*

ВСТУП

До класичної фізики звичайно належать закони макросвіту. При цьому розглядають дуже велику кількість атомів і, як правило, абстрагуються від властивостей і поведінки самих атомів і частинок, з яких вони складаються. Природно, такі закони не враховують тонких деталей поведінки мікрочастинок, і тому закони класичної фізики мають наближений характер. Хоча в тій області, для якої такі закони виведено, вони доволі точні.

Можна тільки захоплюватися тим, що класичній фізиці вдалося сформулювати низку фундаментальних законів, які вирізняються високою точністю.

На початку ХХ століття з'ясувалося, що класична фізика не в змозі пояснити багато явищ. Було відомо, наприклад, що світло — це електромагнітна хвиля. Загальна теорія хвиль чудово пояснювала явища дифракції, інтерференції, дисперсії, але не змогла пояснити закономірності явища фотоелектру.

Якщо виходити з класичних уявлень, не можна зрозуміти, чому взагалі існують, причому достатньо довго, самі атоми. Адже електрон, обертаючись навколо ядра, має випромінювати електромагнітну хвилю. Власної енергії йому мало б вистачити на це марнотратство лише на 10^{-8} с. Не вдалося також пояснити оптичні спектри атомів і багато іншого.

Для розв'язування проблем, що виникли, довелося глибше вивчити закони мікросвіту. Цим і займається **квантова фізика**.

Вона народилася 14 грудня 1900 року, і за 30 років (з 1900-го року по 1930 рік було закладено міцний фундамент квантової фізики) бурхливого розвитку перетворилася на струнку несуперечливу систему поглядів. Знадобилася низка зовсім нових ідей і понять, довелося розробити адекватний математичний апарат.

Успіхи квантової фізики важко переоцінити. Її закони — це фундамент учення про будову речовини. Вони дали змогу з'ясувати будову атомів і ядер, дослідити поведінку та властивості еле-

ментарних частинок, розкрити природу хімічного зв'язку.

Вдалося зрозуміти багато макроскопічних явищ, які, звісно, визначають поведінку частинок у мікросвіті. Учені не тільки проникли в природу різних речовин: металів, діелектриків, напівпровідників, але й послідовно пояснили такі явища, як феромагнетизм, надпровідність, надтекучість. **По суті, квантова фізика — це фундамент класичної.**

Квантова фізика уможливила створення принципово нових технологій, таких, наприклад, як квантова електроніка, ядерна і термоядерна технології.

Вивчення квантової фізики потребує не тільки додаткових математичних знань, а й усвідомлення зовсім нових понять і створення цілком незвичних уявлень. Може здатися неймовірним, що *електрон може виявляти водночас властивості частинки і хвилі, важко погодитися з таким твердженням: «Не має сенсу саме поняття траєкторії руху мікрочастинки»*. Однак це і є та частина реальності, яка виявляється в світі мікрочастинок. Саме тому доводиться використовувати абстрактну термінологію під час опису сутності частинок.

Квантовий стан являє собою новий вид стану речовини: частинки об'єднуються в певні групи, утворюють квантові орбіти в ядрах, квантові орбіти в атомах та молекулах. Наші спадкові ознаки — це не що інше, як квантові стани окремих частин ланцюга ДНК. Те, що кожної весни розквітають квіти тієї чи іншої форми, підтверджує в деякому сенсі існування певних квантових орбіт у молекулі ДНК.

1. КВАНТОВА ОПТИКА

1.1. ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1.1. Характеристика теплового випромінювання

Поставимо кілька дослідів. Перший дослід: два вгнуті дзеркала розміщуємо одне проти одного на відстані кількох метрів. У фокусі першого дзеркала поставимо термоелемент, який вимірює теплову енергію. У фокусі другого дзеркала спочатку потримаємо палець, а потім — ємність із сумішшю води і льоду. У першому випадку термоелемент зафіксує нагрівання, а в другому — охолодження. Висновок: усі тіла обмінюються енергією випромінювання. Теплі тіла охолоджуються, а холодні тіла — нагріваються. Другий дослід: електричний чайник із закріпленим термометром поставимо на відстані 0,5 м від термоелемента й увімкнемо його. З підвищенням температури чайника термоелемент зафіксує збільшення теплової енергії. Висновок: інтенсивність випромінювання енергії зростає з підвищенням температури тіла. Третій дослід: візьмемо металевий дріт і підімкнемо його до джерела електричного струму. Спочатку відчуємо тепло, що його віддає дріт, а потім побачимо, що колір дроту змінюється від червоного до жовтого і білого. Висновок: з підвищенням температури тіла змінюється довжина хвилі випромінювання. Ці та багато інших дослідів дають підстави говорити про випромінювання енергії нагрітими тілами.

ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ — це випромінювання електромагнітних хвиль твердими або рідкими нагрітими тілами, яке є наслідком хаотичного теплового руху частинок тіла і відбувається за рахунок його внутрішньої енергії.

Теплове випромінювання існує при будь-якій температурі. При низьких температурах випромінюються інфрачервоні хвилі, а з підвищенням температури тіла випромінюють видиме біле світло. Спектр випромінювання нагрітих тіл називається **суцільним**. Дослід показує, що теплове випромінювання **рівноважне**.

Рівноважний стан характеризується тим, що кожному мікропроцесу, який відбувається в системі, з тією самою імовірністю відповідає мікропроцес, який відбувається в зворотному напрямі. Рівноважний характер теплового випромінювання можна продемонструвати на такому прикладі. Нехай маємо порожнину з непрозорими стінками, температура яких підтримується сталою. Частинки стінок порожнини випускають випромінювання, яке її заповнює. Під час падіння на стінки порожнини випромінювання частково відбивається, частково поглинається. Із часом унаслідок цих процесів у порожнині встановиться такий стан випромінювання, при якому в довільному проміжку часу кількість **випромінюваної** енергії для кожної довжини хвилі **дорівнює** кількості **поглинутої** енергії.

Можна сказати коротше: скільки енергії тіло випромінює, стільки й поглинає.

До **енергетичних характеристик** теплового випромінювання належать потік випромінювання, енергетична світлимість, випромінювальна і поглинальна здатність.

Потік випромінювання Φ — це відношення кількості енергії dW , випромінюваної поверхнею тіла з площею S за одиницю часу, до тривалості цього проміжку часу dt , Вт:

$$\Phi = \frac{dW}{dt}.$$

Енергетична світлимість R_e — це повна енергія, випромінювана поверхнею тіла в усьому інтервалі довжин хвиль від 0 до ∞ , Вт/м²:

$$R_e = \frac{dW}{dSdt}.$$

Випромінювальна здатність тіла $r_{\lambda T}$ — це електромагнітна енергія, випромінювана тілом за одиницю часу з одиниці площі поверхні тіла в інтервалі довжин хвиль від λ до $d\lambda$, Вт/м³:

$$r_{\lambda T} = \frac{dW_{\text{вип}}}{d\lambda}.$$

Енергетична світимість пов'язана з випромінювальною здатністю тіла співвідношенням:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda T} d\lambda.$$

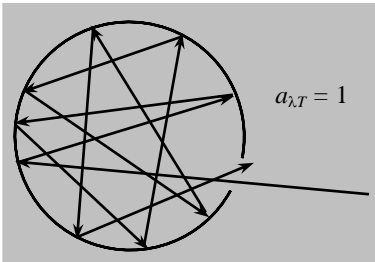
Нехай на елементарну площинку поверхні тіла падає потік електромагнітного випромінювання $d\Phi_{\lambda}$, довжина хвилі якого міститься в інтервалі $d\lambda$. Частину цього потоку $d\Phi'_{\lambda}$ тіло поглинає. **Поглиняльна здатність $a_{\lambda T}$** тіла подається так:

$$a_{\lambda T} = \frac{d\Phi'_{\lambda}}{d\Phi_{\lambda}}.$$

Енергетична світимість, випромінювальна здатність і поглиняльна здатність тіла залежать від довжини хвилі випромінювання і температури тіла.

Тіло, яке повністю поглинає електромагнітне випромінювання усіх довжин хвиль, що падає на його поверхню, називається АБСОЛЮТНО ЧОРНИМ ТІЛОМ (АЧТ).

Поглиняльна здатність АЧТ дорівнює одиниці: $a_{\lambda T} = 1$. Для всіх інших тіл $a_{\lambda T} < 1$, і їх називають **сіримими**. Тіло називається сірим, якщо його поглиняльна здатність однакова для всіх довжин хвиль і залежить тільки від температури, матеріалу і стану поверхні. Коефіцієнт сірості α тіла визначається як відношення енергетичної світимості сірого тіла до енергетичної світимості АЧТ:





$$\alpha = \frac{R_e^c}{R_e^{\text{АЧТ}}}.$$

Коефіцієнт сірості тіла не може бути меншим від нуля і більшим від одиниці.

Для АЧТ $\alpha = 1$. Непрозорі тіла, в яких $\alpha = 0$, не випромінюють і не поглинають електромагнітні хвилі: вони повністю відбивають випромінювання, що падає на них. Якщо при цьому відбивання підпорядковане законам геометричної оптики, то тіло називається **дзеркальним**.

Абсолютно чорних тіл у природі не існує. Найкращою моделлю АЧТ є замкнена порожнина, у стінці якої зроблено маленький отвір. Через цей отвір промінь світла потрапляє всередину порожнини. Він багато разів відбивається від стінок порожнини. Під час кожного відбивання частина електромагнітної енергії поглинається. Після багатьох відбивань промінь або зовсім не вийде назовні через отвір, або вийде лише маленька частинка енергії, яка потрапила всередину порожнини (рис. 1.1).

Зауваження.  Ця модель дає змогу зрозуміти, чому вузький вхід у печеру або відчинені вікна будинків зовні здаються зовсім чорними, хоча всередині печери або кімнати достатньо світла завдяки відбиванню денного світла від стін. 



В області довжин хвиль видимого світла поглинальна здатність сажі, платинової черні і чорного оксамиту дуже мало відрізняється від одиниці. Тому ці тіла в зазначеному діапазоні довжин хвиль можна вважати абсолютно чорними.

1.1.2. Закони теплового випромінювання

У 1859 році Г. Кірхгоф експериментально встановив закон: відношення випромінювальної і поглинальної здатностей не залежить від природи тіла, а є для всіх тіл **універсальною функцією** довжини хвилі і температури тіла:

$$\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = f(\lambda, T).$$

Цей закон визначає, що чим сильніше тіло поглинає певне випромінювання, тим сильніше це випромінювання й випускатиме. Для АЧТ $a_{\lambda T} = 1$, а тому закон Кірхгофа можна записати так:

$$r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} = f(\lambda, T).$$

Отже,

універсальна функція Кірхгофа є випромінювальною здатністю АЧТ.

Тоді закон Кірхгофа для не чорного тіла має вигляд:

$$\frac{r_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}.$$

Із закону Кірхгофа випливає, що найважливішим завданням теорії теплового випромінювання є визначення універсальної функції Кірхгофа $f(\lambda, T)$. Проте спочатку вдалося на підставі експериментів дістати графічну залежність випромінювальної здатності АЧТ від довжини хвилі випромінювання при різних температурах тіла (рис. 1.2). Проаналізуємо здобуті залежності $r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}$ від λ і T . По-перше, для різних довжин хвиль кількість випромінюваної електромагнітної енергії різна. Абсолютно чорне тіло майже не випромінює енергію в області дуже малих і дуже великих довжин хвиль. По-друге, графіки мають точку перегину, тобто існує довжина хвилі, якій відповідає максимальне значення випромінюваної енергії. По-третє, площа, обмежена кривою і віссю абсцис, визначає енергетичну світимість АЧТ: $R_e = S$.

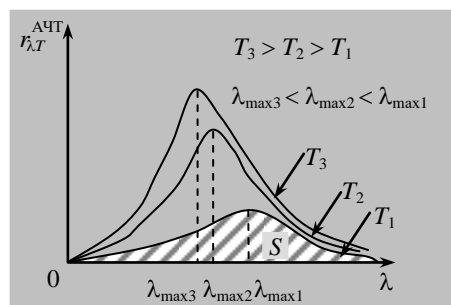


Рис. 1.2

Експериментально встановлено такі закони теплового випромінювання.

Закон Стефана—Больцмана: енергетична світимість АЧТ пропорційна до четвертого степеня його абсолютної температури T :

$$R_e = \sigma T^4,$$

де σ — стала Стефана—Больцмана. Для визначення випромінювальної здатності сірого тіла праву частину рівності треба помножити на коефіцієнт сірості цього тіла.

Перший закон Віна: максимальна довжина хвилі, на яку припадає максимальне значення випромінювальної здатності АЧТ, обернено пропорційна до його абсолютної температури T :

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T},$$

де b_1 — перша стала Віна.

Другий закон Віна: максимальна випромінювальна здатність АЧТ пропорційна до п'ятого степеня його абсолютної температури T :

$$r_{\lambda T}^{\max} = b_2 T^5,$$

де b_2 — друга стала Віна.

Перший закон Віна у такому формулюванні, називається законом **зміщення Віна**: з підвищенням абсолютної температури АЧТ довжина хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності, зміщується в область коротких довжин хвиль.

1.1.3. Теорія теплового випромінювання

Багато вчених теоретично досліджували функцію Кірхгофа методами класичної фізики, намагаючись вивести теоретичну формулу, яка б описувала експериментальну криву $r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} = f(\lambda, T)$. Серед них Д. Релей і Д. Джінс. Вони виходили з уявлень класичної фізики про те, що енергія будь-якої системи може змінюватися неперервно, набуваючи як завгодно близьких значень. Ці дослідники припускали, що на кожне електромагнітне коливання припадає в середньому енергія, яка дорівнює двом половинам kT — одна відповідає електричній, друга — магнітній енергії хвилі.

Формула Релея—Джінса має вигляд:

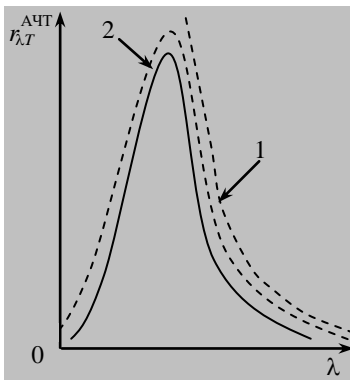


Рис. 1.3

$$f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT,$$

де ω — циклічна частота; c — швидкість світла у вакуумі; k — стала Больцмана; T — абсолютна температура тіла.

Результати, здобуті за цією формулою, збігаються з експериментальними даними лише при великих довжинах хвиль і різко розходяться з дослідом для малих довжин хвиль (рис. 1.3, крива 1). Визначимо енергетичну світимість АЧТ за формулою Релея—Джінса, обчисливши інтеграл від $f(\omega, T)$ за ω у межах від 0 до ∞ , який при всіх значеннях температури прямує у нескінченність:

$$R_e = \int_0^{\infty} \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^2} kT d\omega = \infty.$$

За законом Стефана—Больцмана енергетична світимість АЧТ має бути скінченною величиною. Функція $f(\omega, T)$ монотонно зростає і не має максимуму, що не відповідає законам Віна.

Отже, методами теоретичної класичної фізики не вдалося знайти таку формулу для визначення функції Кірхгофа $f(\omega, T)$, за якою здобуті результати збігалися б з експериментальними даними в усьому діапазоні частот або довжин хвиль.

Цей випадок дістав назву «фіолетової катастрофи».

Уперше знайшов правильний вираз для функції Кірхгофа $f(\lambda, T)$ і теоретично обґрунтував спектральні закономірності теплового випромінювання видатний німецький учений Макс Планк. Для цього йому довелося ввести **квантову гіпотезу**, зовсім чужу класичній фізиці. Згідно з цією гіпотезою енергія осцилятора ε може мати тільки певні **дискретні значення**, які дорівнюють **цілій кількості елементарних порцій** — **квантів енергії ε_0** :

$$\varepsilon = n \varepsilon_0,$$

де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Елементарний квант енергії пропорційний до частоти ν випромінювання:

$$\varepsilon_0 = h\nu,$$

де h — універсальна стала, яку згодом було названо сталою Планка.

Тоді формула Планка для випромінювальної здатності АЧТ, тобто функція Кірхгофа $f(\lambda, T)$, має вигляд:

$$r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}.$$

Ця формула повністю збігається з експериментальними даними (рис. 1.3, крива 2). З формули Планка випливають усі закони теплового випромінювання.

Закон Стефана—Больцмана можна дістати, узявши інтеграл за λ від 0 до ∞ від $r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}$:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4,$$

де $\sigma = \frac{2\pi^5 2k^4}{15c^2 h^3}$ — стала Стефана—Больцмана.

Для доведення закону зміщення Віна продиференціюємо формулу Планка за λ і обчислимо екстремум:

$$\frac{\partial r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}}{\partial \lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^6 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \left[\frac{\frac{hc}{\lambda kT} e^{hc/\lambda kT}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} - 5 \right].$$

Максимальне значення довжини хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності АЧТ, відповідає умові:

$$\frac{\partial r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}}}{\partial \lambda} = 0.$$

Тоді

$$\lambda_{\text{max}} T = \frac{hc}{4,965k} = b_1,$$

де b_1 — перша стала Віна.

Таким чином, формула Планка повністю описує рівноважне теплове випромінювання.

На засіданні Німецького фізичного товариства 14 грудня 1900 року Макс Планк зробив доповідь, подавши теоретичне доведення формули $r_{\lambda T}^{\text{АЧТ}} = f(\lambda, T)$, яке ґрунтується на квантовій гіпотезі. Ця обережно сформульована Планком ідея згодом розвинулася в глибоку теорію.

14 грудня 1900 р. вважається днем народження нової — квантової — фізики.

За великий внесок М. Планка в розвиток квантової фізики А. Ейнштейн назвав універсальну сталу h — найважливішу константу квантової фізики сталою Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

1.1.4. Застосування законів теплового випромінювання

Закони теплового випромінювання застосовуються для вимірювання температури розжарених тіл і тіл, які світяться, віддалених від спостерігача (зірки), якщо не можна використовувати звичайні термометри розширення, терморезистори або термопары. Сукупність методів вимірювання високих температур, які ґрунтуються на використанні залежності випромінювальної здатності досліджуваного тіла або його енергетичної світимості від температури, називається **оптичною пірометрією**. Прилади, які застосовуються для цих цілей, називаються **пірометрами**.

Світіння розжарених тіл широко використовується для виготовлення джерел світла. Перші лампи розжарювання зробив О. М. Лодигін ще в 1873 році, а перші дугові лампи — П. М. Яблочков у 1876 році. Нині використовують лампи розжарювання з вольфрамовою ниткою, яка має велику тугоплавкість і стійкість до розпилювання при високих температурах нагрівання. Частина енергії, яка припадає на випромінювання видимого світла, у вольфраму значно більша, ніж у абсолютно чорного тіла, нагрітого до тієї самої температури. Лампи розжарювання ще заповнюють інертним газом, щоб зменшити швидкість розпилювання вольфраму. Температура розігрівання вольфрамової нитки при випромінюванні в області довжин хвиль, які відповідають денному світлу $\lambda_{\max} = 5500$ нм, дорівнює 2500—3000 К. Енергетичний коефіцієнт сучасних ламп розжарювання не перевищує 5 %, тобто не більш як 5 % енергії, витраченої в лампі, випромінюється нею у вигляді видимого світла.

1.2. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ

1.2.1. Закони фотоелектричного ефекту

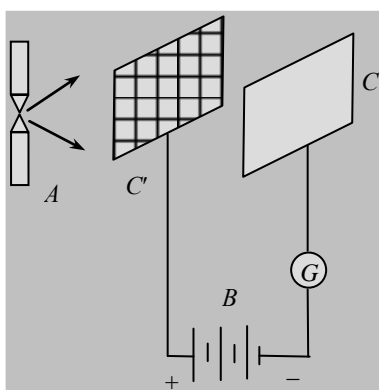


Рис. 1.4

У 1887 році Г. Герц установив, що при опромінуванні негативного електрода ультрафіолетовими променями розряд відбувається при меншій напрузі між електродами, ніж за відсутності такої дії. У 1888 році В. Гальвакс пояснив причину цього явища: під час опромінування катода розрядника з'являються від'ємні заряди. Протягом 1888—1890 років О. Г. Столетов докладно вивчає дію світла на заряджені тіла. Схему дослідів Столетова наведено на рис. 1.4.

Одна обкладка плоского конденсатора являє собою мідну сітку C' , а друга — цинкову пластину C . Конденсатор через гальванометр G увімкнено в коло батареї B . Під час опромінування негативно зарядженої пластини C дугою A в колі виникає електричний струм, який вимірюється гальванометром G . Цей струм дістав назву **фотоструму**. Освітлення позитивно зарядженої обкладки C' не викликає появи фотоструму.

Цим було експериментально доведено, що під дією світла метал втрачає **від'ємно** заряджені частинки. За відхиленням цих частинок у магнітному полі було виміряно їхній питомий заряд, що дорівнював

$$\frac{e}{m} = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ К/кг} .$$

Таким чином, установлено, що це **електрони**.

Явище виривання електронів із твердих і рідких речовин під дією світла називається зовнішнім фотоелектричним ефектом.

4. КОНДЕНСОВАНИЙ СТАН РЕЧОВИНИ

ВСТУП

Речовина може перебувати в газоподібному, рідкому або твердому стані. Фазовий перехід газ — рідина, газ — тверде тіло називають **КОНДЕНСАЦІЄЮ**. Тому рідкий і твердий стани речовини називають її **КОНДЕНСОВАНИМ СТАНОМ**.

Властивості речовини в газовій фазі істотно відрізняються від властивостей речовини в конденсованому стані.

Основна причина відмінності властивостей — це різні відстані між молекулами в газі, у рідині та у твердому тілі.

Ця відстань пропорційна до кореня кубічного з густини.

Розглянемо звичайну воду. Густина фаз у потрійній точці така:

газ — $\rho_g = 0,05 \text{ кг/м}^3$;

рідина — $\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3$;

тверде тіло (лід) — $\rho_t = 918 \text{ кг/м}^3$.

Отже, відстані між молекулами газу приблизно в 20 разів більші, ніж відстані між молекулами рідини чи твердого тіла. Згадаймо, що сили взаємодії між молекулами зменшуються зі зростанням відстані r між ними. Так, сили притягання зменшуються обернено пропорційно до сьомого степеня зазначеної відстані:

$$F = \frac{a}{r^7}.$$

Тому сили взаємодії між молекулами газу дуже малі порівняно із силами в конденсованому стані.

Молекули газу практично вільні. Кожна молекула може незалежно від інших молекул виконувати поступальний, обертальний і коливальний рухи. Інакше кажучи, молекули газу мають **поступальні, обертальні та коливальні** ступені вільності.

У конденсованому стані між молекулами діють величезні сили, і вони обмежують вільність руху. Молекули не можуть ні обертатися, ні рухатися поступально. Відстані між ними можуть змінюватися дуже мало. Молекули можуть виконувати лише коливання навколо деяких положень рівноваги, тобто в молекул конденсованої фази є тільки **коливальні ступені вільності**. Великі сили взаємодії приводять до того, що на відміну від газу речовина в конденсованому стані

зберігає свій об'єм. Малі відстані між молекулами конденсованої фази і великі сили взаємодії неминуче приводять до того, що молекули в просторі розміщені впорядковано. Ідеальний порядок спостерігається в **ІДЕАЛЬНОМУ КРИСТАЛІ**. Говорять, що там існує **ДАЛЕКИЙ ПОРЯДОК**. Це означає, що коли ми рухатимемося від деякого іона (чи молекули) у певному напрямі, то через однакові відстані неодмінно виявлятимемо інші іони. Такий ідеальний стан і називають **ДАЛЕКИМ ПОРЯДКОМ**.

Молекули в рідинах уже мають деяку змогу зсуватися одна відносно одної, тому певний порядок існує тільки в розміщенні найближчих сусідів. Такий стан називають **БЛИЗЬКИМ ПОРЯДКОМ**. Нагадаємо, що в газі молекули рухаються цілком хаотично. На відміну від суто індивідуального поведіння молекул газу в конденсованому стані спостерігаються елементи колективного поведіння молекул.

Зазначені особливості конденсованого стану вкрай ускладнюють вивчення твердих тіл і рідин. Проте головні труднощі зумовлюються тим, що атоми й молекули підпорядковані квантовим законам іррегулярності. З огляду на це нам доведеться не тільки замислитися над формулюванням і розв'язуванням відповідних багаточастинкових задач, а й розглянути зовсім нові **КВАНТОВІ СТАТИСТИЧНІ РОЗПОДІЛИ**.



ЗМІСТ

Модуль 4. Квантова та атомна фізика	3
План організації навчального процесу з курсу фізики	4
Основні позначення фізичних величин	7
Теоретичне ядро (Аудиторний лекційний матеріал та матеріал для самостійного вивчення)	8
1. Квантова оптика	9
1.1. Теплове випромінювання	9
1.1.1. Характеристика теплового випромінювання	9
1.1.2. Закони теплового випромінювання	11
1.1.3. Теорія теплового випромінювання	12
1.1.4. Застосування законів теплового випромінювання	14
1.2. Фотоелектричний ефект	14
1.2.1. Закони фотоелектричного ефекту	14
1.2.2. Теорія фотоелектричного ефекту	16
1.2.3. Дослідна перевірка рівняння Ейнштейна	17
1.2.4. Характеристики фотона	18
1.2.5. Практичне застосування фотоефекту	19
1.3. Інші докази квантових властивостей світла	19
1.3.1. Суцільне рентгенівське випромінювання (для самостійного вивчення)	19
1.3.2. Тиск світла (для самостійного вивчення)	20
1.3.3. Ефект Комптона	21
2. Корпускулярно-хвильовий дуалізм речовини	23
2.1. Гіпотеза де Бройля	23
2.2. Хвильова функція	27
2.3. Рівняння Шредінгера	27
3. Теорія випромінювання	36
3.1. Спектр атома водню	36
3.2. Теорія Бора для атома водню	37
3.3. Атом водню в квантовій механіці (для самостійного вивчення)	42
3.4. Просторове квантування. Спін електрона	45
3.5. Принцип Паулі	49
3.6. Ефект Засмана	51
3.7. Періодична система елементів Д. І. Менделєєва (для самостійного вивчення)	53
3.8. Характеристичні рентгенівські спектри багатоелектронних атомів	55
3.9. Спонтанне і вимушене випромінювання. Квантові генератори	56
3.10. Енергія і спектри молекул (для самостійного вивчення)	59
4. Конденсований стан речовини	62
4.1. Кристали	62
4.1.1. Класифікація кристалів	63
4.1.2. Структурні особливості кристалів	65
4.2. Реальні кристали (для самостійного вивчення)	65
4.3. Рідкі кристали (для самостійного вивчення)	67
4.4. Елементи квантової фізики кристалів	68
4.5. Елементи квантової статистики	68
4.5.1. Виродження системи квантових частинок	70
4.6. Деякі властивості металів	71
4.6.1. Спектр електронів у металі	71
4.6.2. Теплоємність	72
4.6.3. Електропровідність металів (для самостійного вивчення)	74
4.6.4. Надпровідність	77
4.6.5. Теплопровідність (для самостійного вивчення)	78

4.7. Елементи зонної теорії кристалів	80
4.7.1. Утворення енергетичних зон у кристалах	80
4.7.2. Види енергетичних спектрів (для самостійного вивчення)	81
4.8. Напівпровідники	83
4.8.1. Власні напівпровідники (для самостійного вивчення)	83
4.8.2. Домішкові напівпровідники	86
4.8.3. Ефект Холла	88
4.8.4. Контактні явища.	91
4.9. Магнітні властивості твердих тіл	96
4.9.1. Магнітний момент атома.	98
4.9.2. Природа діамagnetизму	100
4.9.3. Природа парамагнетизму	101
4.9.4. Феромагнетика	104
5. Ядро атома. Елементарні частинки	109
5.1. Характеристики ядра	109
5.2. Ядерні сили.	110
5.3. Енергія зв'язку.	111
5.4. Будова ядра.	112
5.5. Ядерні реакції (для самостійного вивчення).	113
5.6. Радіоактивний розпад.	116
5.7. Елементарні частинки	120
5.8. Будова елементарних частинок. Кварки	122
5.9. Характеристики і взаємодія кварків	123
Практичні заняття	127
1. Приклади розв'язування задач	127
2. Задачі для самостійного та індивідуального розв'язування	144
Лабораторні роботи	158
1. Експериментальні лабораторні роботи	158
Лабораторна робота «Вивчення законів теплового випромінювання абсолютно чорного тіла. Визначення сталої Стефана—Больцмана».	158
Лабораторна робота «Визначення температури нитки лампи розжарювання за допомогою оптичного пірометра із зникаючою ниткою».	161
Лабораторна робота «Вивчення законів зовнішнього фотоелектричного ефекту та визначення сталої Планка методом затримувального потенціалу».	166
Лабораторна робота «Вивчення спектра атома водню. Визначення сталої Рідберга»	169
Лабораторна робота «Вивчення принципу дії лазера і визначення характеристик лазерного випромінювання».	171
Лабораторна робота «Вивчення магнітних властивостей феромагнетика».	176
Лабораторна робота «Вивчення ефекту Холла в напівпровіднику»	181
Лабораторна робота «Вивчення залежності електричного опору металів і напівпровідників від температури»	184
Лабораторна робота «Дослідження напівпровідникового діода»	188
Лабораторна робота «Вивчення явища радіоактивності і визначення коефіцієнта поглинання γ -променів речовиною»	192
2. Віртуальні лабораторні роботи	198
Лабораторна робота 1В «Вивчення законів зовнішнього фотоелектричного ефекту»	198
Лабораторна робота 2В «Вивчення ефекту Комптона»	200
Лабораторна робота 3В «Вивчення спектра атома водню і визначення сталої Рідберга».	203
Модульний контроль	205
1. Питання для поточного і модульного контролю (теоретичний матеріал)	205
2. Питання для поточного комп'ютерного тестування	206
Довідковий матеріал.	222
Предметний покажчик	229
Використана література	230