

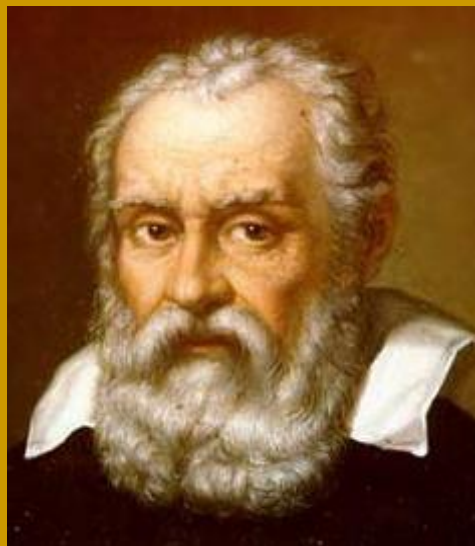
ОСНОВИ
КВАНТОВОЇ
МЕХАНІКИ



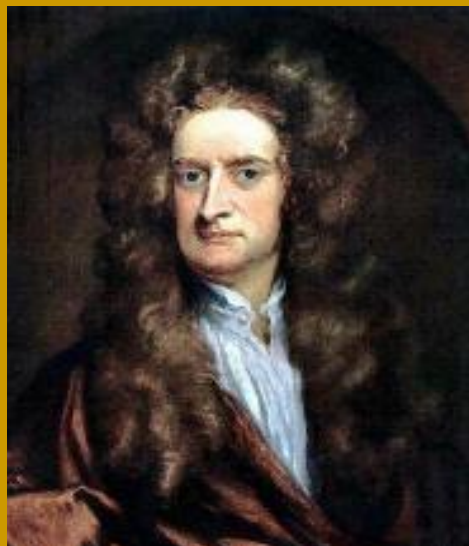
КЛАСИЧНА ФІЗИКА

Класична фізика створювалася впродовж декількох сторіч зусиллями цілого ряду видатних учених і до кінця XIX століття уявлялося, що вона остаточно сформувалася як цілісна і закінчена наука, що дозволяє пояснити механічні, теплові, електричні і оптичні явища, які можна було спостерігати. На основі розуміння цих явищ були сформульовані принципи і ідеї, які використовуються аж до теперішнього часу для створення величезної кількості різноманітних інженерно-технічних споруд і пристроїв. Таким чином класична фізика є і продовжуватиме бути однією з головних рушійних сил науково-технічного прогресу в багатьох областях людської діяльності.

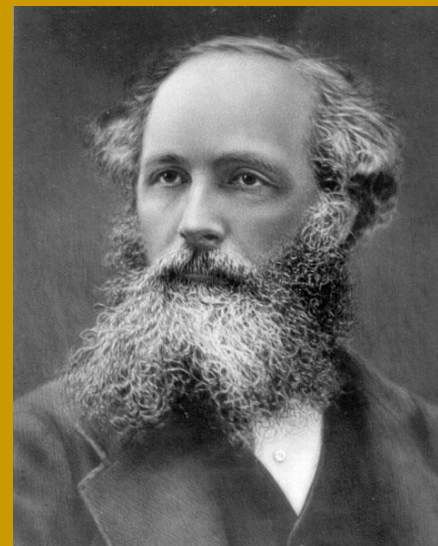
деякі головні творці класичної фізики



галілей



ньютон



максвелл



ампер

ПЕРЕДУМОВИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ

До початку ХХ століття в класичному природознавстві виникли нездолані труднощі з поясненням і інтерпретацією цілого ряду експериментально знайдених явищ. Як правило вказані явища так чи інакше були пов'язані з мікроскопічними об'єктами (молекули, атоми, ядра і т.д). Головними з них були:

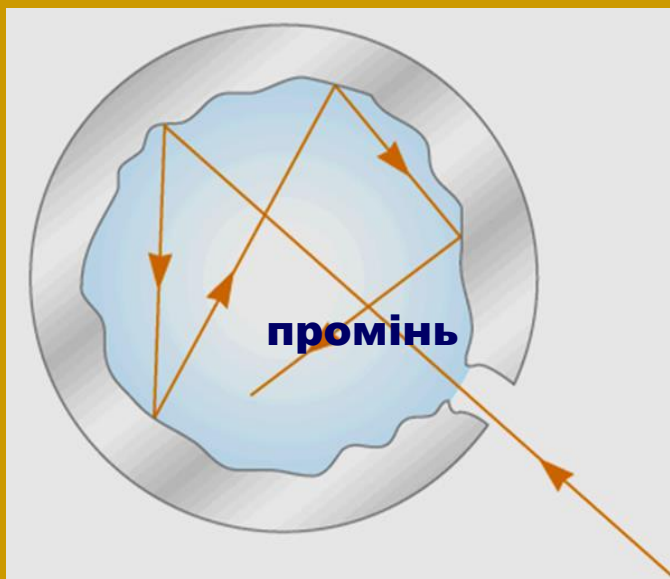
- спектр теплового випромінювання абсолютно чорного тіла;
- зовнішній фотоефект;
- ефект Комптона;
- лінійний характер атомних спектрів.

У результаті аналізу вказаних явищ кінець кінцем виникло розуміння того, що мікросвіт живе по особливим законам, які знаходяться за межами безпосереднього людського сприйняття.

Сукупність цих законів складає предмет квантової фізики, а класична фізика є лише її граничним випадком.

ВИПРОМІНЮВАННЯ АБСОЛЮТНО ЧОРНОГО ТІЛА

Абсолютно чорне тіло - фізична абстракція – тіло, яке повністю поглинає падаючий на нього потік електромагнітного випромінювання, незалежно від довжини хвилі, нічого при цьому не відбиваючи. Абсолютно чорне тіло саме може випускати електромагнітне випромінювання будь-якої частоти і візуально має колір, який визначається тільки його температурою.

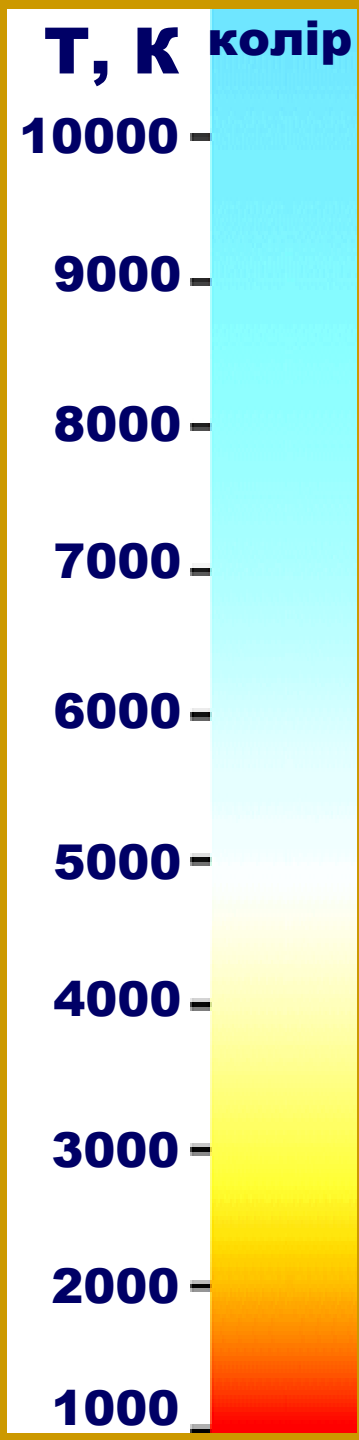
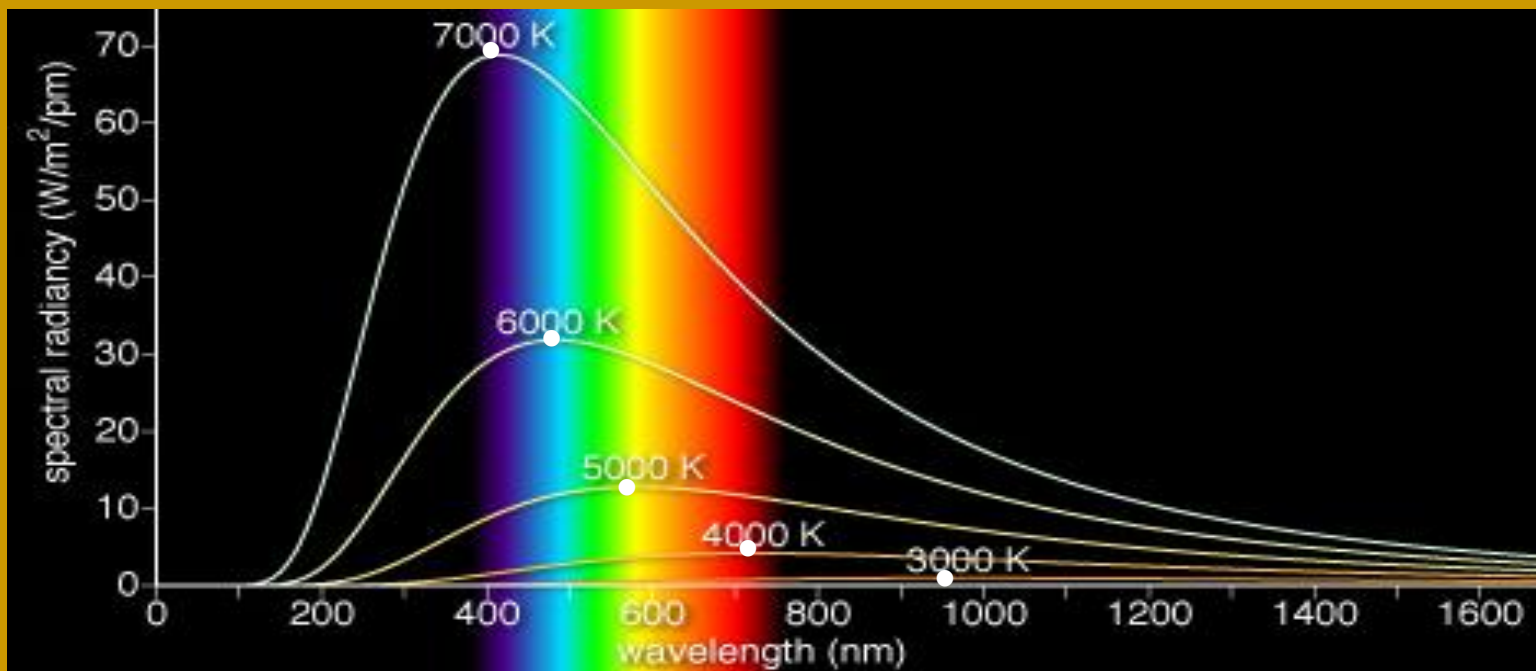


модель абсолютно чорного тіла – поле тіло з невеликим отвором

ЗАКОН ВІНА

Колір тіла визначається його температурою, оскільки при зміні температури спостерігається зсув максимуму спектру випромінювання щодо зони видимих людським оком довжин хвиль. Залежність довжини хвилі, яка відповідає максимуму спектру (білі крапки на малюнку) від температури тіла визначається законом Віна

$$\lambda_{\max} = 2898/T \text{ (мкм)}$$



ЗАКОН СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Повна (по всьому спектру) випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню його температури $\epsilon = \sigma T^4$ $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$

ГІПОТЕЗА ПЛАНКА

Експериментально спостережуваний спектр випромінювання абсолютно чорного тіла (червона лінія на малюнку) знаходиться в принциповій суперечності з побудованій на основі класичної фізики теорією Релея і Джінса, згідно якої на високих частотах (коротких хвилях) енергія випромінювання повинна зростати нескінченно (синя лінія). Це є наслідком того, що термодинамічна рівновага між випромінюванням і речовиною не може бути досягнута, оскільки вся енергія повинна перейти у випромінювання. Цей фізично абсурдний результат одержав назву «ультрафіолетової катастрофи». Насправді нічого подібного не відбувається. Як добре видно на високих частотах енергія випромінювання не зростає нескінченно, а прямує до нуля. Планк розв'язав цю суперечність і одержав результати, що чудово узгоджуються з експериментом, на основі надзвичайно сміливої гіпотези. В протилежність класичній теорії випромінювання, що розглядає генерацію електромагнітних хвиль як безперервний процес, він припустив, що світло випускається певними порціями енергії - квантами. Величина такого кванта енергії залежить від частоти світла ν і дорівнює **$E = h\nu$** .

Величина h називається постійною Планка і вона рівна **$h = 6,62 \times 10^{-34}$ Дж сек.** Це революційне припущення Планка дозволило пояснити спектр випромінювання абсолютно чорного тіла, що спостерігається і з'явилося основою квантової механіки.



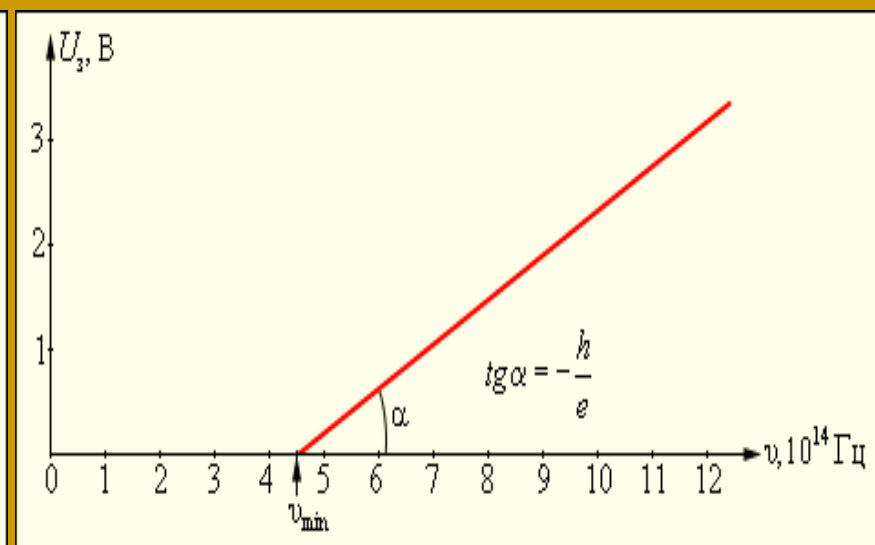
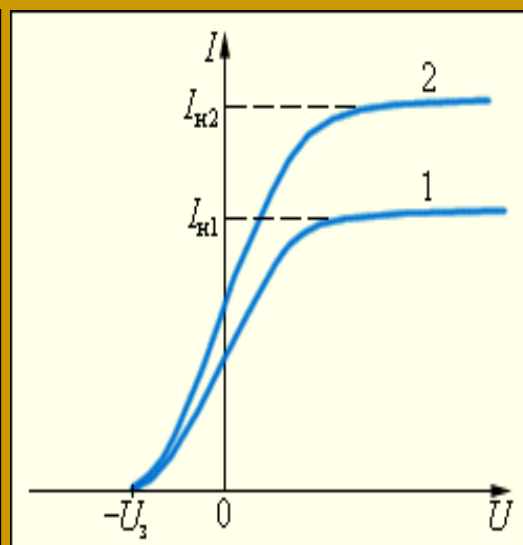
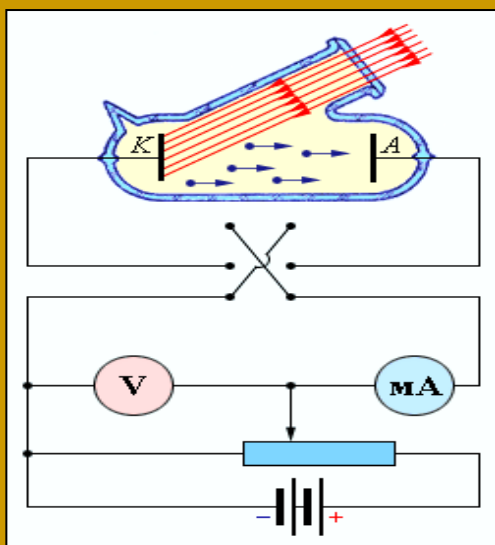
ЗОВНІШНІЙ ФОТОЕФЕКТ

Випуск (емісія) електронів речовиною під дією електромагнітного випромінювання називається **зовнішнім фотоелектричним ефектом** (або фотоефектом).

Фотоефект був відкритий російським фізиком Столетовим в 1888 році, який спостерігав появу електричного струму при освітленні катода вакуумованої двоелектродної лампи пучком ультрафіолетового проміння.

ЗАКОНИ ФОТОЕФЕКТА

1. Замикаюча напруга (напруга, яка припиняє фотострум) лінійно зростає із збільшенням частоти світла і не залежить від його інтенсивності.
2. Для кожної речовини існує так звана **червона межа фотоефекту**, тобто якнайменша частота ν_{\min} , при якій ще можливий фотоефект.
3. Струм насичення прямо пропорційний інтенсивності світла.



ЗАКОНИ ФОТОЕФЕКТА

1. Замикаюча напруга (напруга, яка припиняє фотострум) лінійно зростає із збільшенням частоти світла і не залежить від його інтенсивності.
2. Для кожної речовини існує **червона межа фотоелектричного ефекту**, тобто якнайменша частота ν_{\min} , при якій ще можливий фотоелектричний ефект.
3. Струм насичення прямо пропорційний інтенсивності світла.

ТЕОРІЯ ЕЙНШТЕЙНА

Теоретичне пояснення спостережуваних закономірностей фотоефекту було дано Ейнштейном в 1905 році на основі гіпотези Планка. Якщо світло не тільки випромінюється, але і поглинається квантами, то при взаємодії з речовиною квант цілком передає всю свою енергію $h\nu$ одному електрону, при цьому частина енергії кванта витрачається на подолання потенційного бар'єру на межі метал-вакуум (робота виходу A_v), а решта енергії йде на надання електрону кінетичної енергії. З рівняння Ейнштейна витікає лінійна

$$h\nu = A_v + m_e v^2 / 2$$

енергія
кванта

витрачається на:

1. виконання
роботи виходу

2. надання електрону
кінетичної енергії

залежність кінетичної енергії від частоти (а значить і замикаючої напруги від частоти), незалежність від інтенсивності світла, існування червоної межі фотоефекта. Оскільки число фотоелектронів, є пропорційним числу фотонів, що падають на поверхню (тобто інтенсивності), то струм насичення повинен бути прямо пропорційний інтенсивності світлового потоку. Тангенс кута нахилу прямий, яка відображає залежність замикаючої напруги від частоти, рівний відношенню постійної Планка до заряду електрона.

ЕФЕКТ КОМПТОНА

Згідно класичним хвильовим уявленням про випромінювання, при розсіянні світла на електронах довжини хвиль падаючого і розсіяного випромінювання повинні співпадати, тоді як експериментально спостерігається збільшення довжини хвилі (зменшення частоти) розсіяного випромінювання.

В 1922 році Комптон довів, що розсіяння світла електронами відбувається по законах пружного зіткнення двох частинок - фотона і електрона.

Кінематика такого зіткнення визначається законами збереження енергії і імпульсу, які аналогічні законам зіткнення двох тіл. Це з'явилося ще одним доказом корпускулярного характеру світла.

КОРПУСКУЛЯРНО – ХВИЛЬОВИЙ ДУАЛІЗМ

Таким чином, разом з явищами, які свідчили про хвильову природу електромагнітного випромінювання (наприклад, дифракція і інтерференція), існував ряд фактів, що суперечать цим уявленням і для свого пояснення вимагають корпускулярного (квантового) підходу до випромінювання. Ці результати привели до поняття корпускулярно-хвильового дуалізму у вченні про природу світла, з якого виходило, що світло поводиться одночасно і як хвиля і як потік частинок. При цьому хвильовий і квантовий підходи до випромінювання не виключають, а взаємно доповнюють один одного і дозволяють описати справжні закономірності розповсюдження світла і його взаємодію з речовиною. Кількісні співвідношення між корпускулярними характеристиками (масою m , енергією E і імпульсом p) і хвильовими (частотою ν або довжиною хвилі λ) для фотонів наступні

$$E = mc^2 = h\nu \quad p = h\nu/c = h/\lambda = mv$$



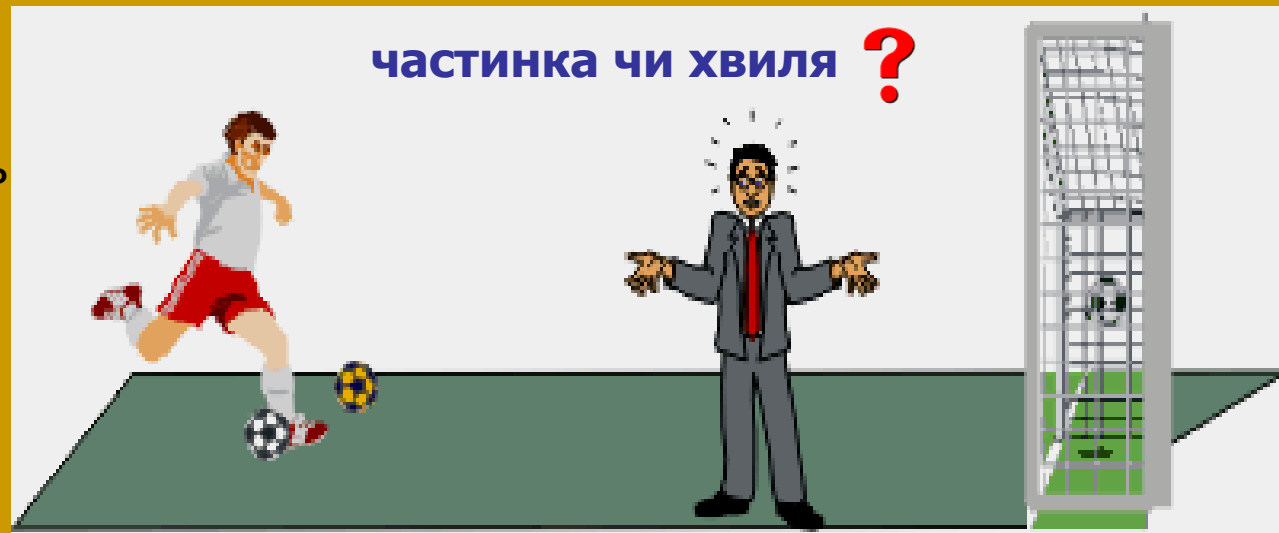
ГІПОТЕЗА ДЕ БРОЙЛЯ

У 1924 р. Луї де Бройль висунув гіпотезу про те, що корпускулярно-хвильовий дуалізм не є особливістю тільки одних світлових частинок (фотонів), а є універсальним і властивий також частинкам речовини. По гіпотезі де Бройля, частинка речовини теж має подвійний характер і може поводитися як хвиля з певною довжиною. При цьому кількісні співвідношення між корпускулярними і хвильовими характеристиками частинок ті ж, що і для фотонів. Згідно де Бройлю, матеріальній частинці з масою m , що рухається із швидкістю v , тобто має імпульс $p = mv$, відповідає монохроматична хвиля, звана хвилею де Бройля, з довжиною λ , яка обчислюється по формулі:

$$\lambda = h/mv$$

Наприклад м'яч, що летить із швидкістю 15 м/с масою 0,2 кг має довжину хвилі близько 10^{-34} м. Це настільки мала величина, що ніякими способами її виявити не є можливим. На-

віть якщо б м'яч летів із швидкістю 1 см в сторіччя довжина хвилі була б порядку 10^{23} м, що в мільйон раз менше розмірів елементарних частинок. У зв'язку з тим, що типова хвильова властивість світла – дифракція - виявляється тоді, коли розмір перешкоди або щілини є зіставимим з довжиною хвилі, може здатися, що приведені міркування неможливо перевірити на практиці.

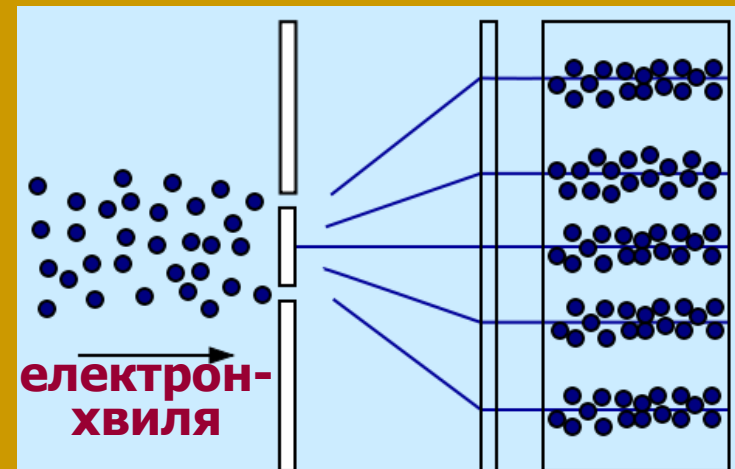
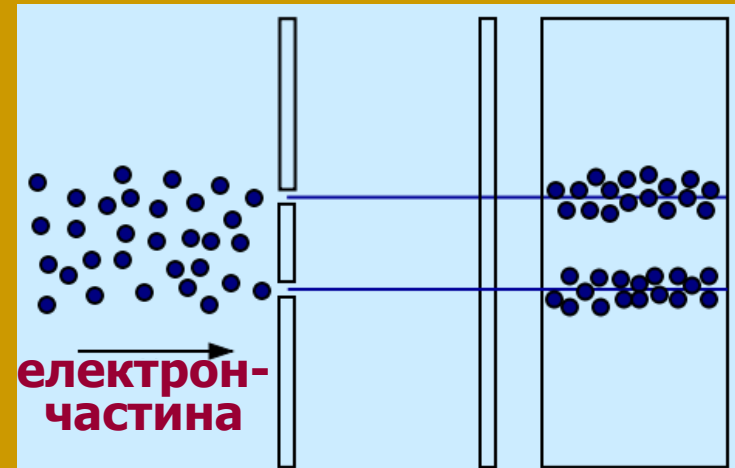
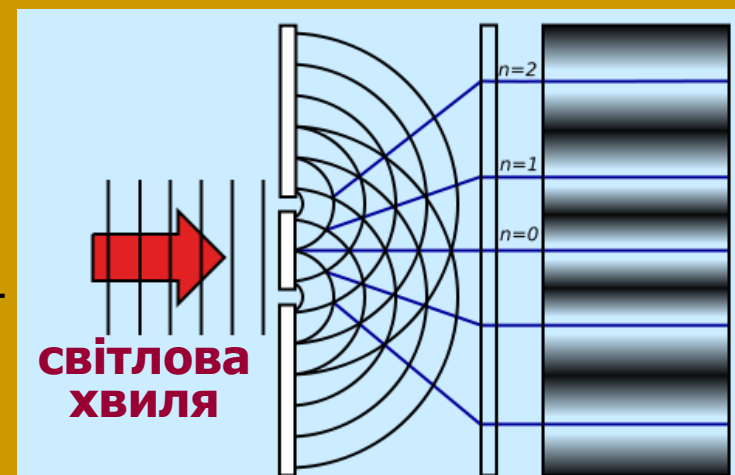


ДИФРАКЦІЯ ЕЛЕКТРОНІВ

Дифракцію частинок все ж таки вдалося спостерігати – першими це зробили Девіссон і Джермер в 1927 р.

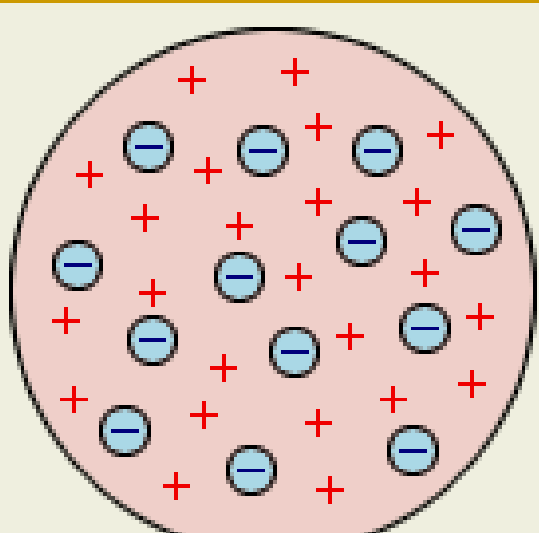
Вони знайшли, що пучок електронів, що розсіюється на кристалі нікелю, дає виразну дифракційну картину, подібну тій, яка виникає при розсіянні на кристалі рентгенівського випромінювання.

В цих експериментах кристал грав роль природної дифракційної ґратки. По положенню дифракційних максимумів була визначена довжина хвилі електронів, яка опинилася в повній відповідності з формулою де Бройля.



БУДОВА АТОМА

До ряду нерозв'язних в рамках класичної фізики задач належить і побудова теорії атома. Уявлення про атоми як неподільні найдрібніші частинки речовини виникло ще з античних часів, але тільки в XVIII столітті працями Лавуазьє, Ломоносова та інших учених була доведена реальність існування атомів. Але питання про їх внутрішню будову навіть не виникало, і атоми як і раніше вважалися неподільними частинками. На підставі досліджень електролізу Фарадеєм в 1833 р. був зроблений висновок про існування усередині атомів електричних зарядів. В 1897р. Томсон відкрив електрон і показав, що електрони входять до складу атомів. Таким чином, на підставі всіх відомих до початку XX століття експериментальних фактів можна було зробити висновок про те, що атоми речовини мають складну внутрішню будову. Вони є електронейтральними системами, причому носіями негативного заряду атомів є легкі



модель томсона

електрони маса яких складає лише малу частку маси атомів. Основна частина маси атомів пов'язана з позитивним зарядом. Перша спроба створення моделі атома на основі накопичених експериментальних даних належить Томсону (1903 р.). Він вважав, що атом є електронейтральною системою кульовидної форми радіусом приблизно рівним 10^{-10} м, причому позитивний заряд атома рівномірно розподілений по всьому об'єму кулі, а негативно заряджені електрони знаходяться усередині нього.

ДОСЛІД РЕЗЕРФОРДА

Через декілька років в дослідях великого англійського фізика Резерфорда було доведено, що модель Томсона невірна.

Резерфорд бомбардував пучком α -частинок золоту фольгу і спостерігав їх розсіяння.

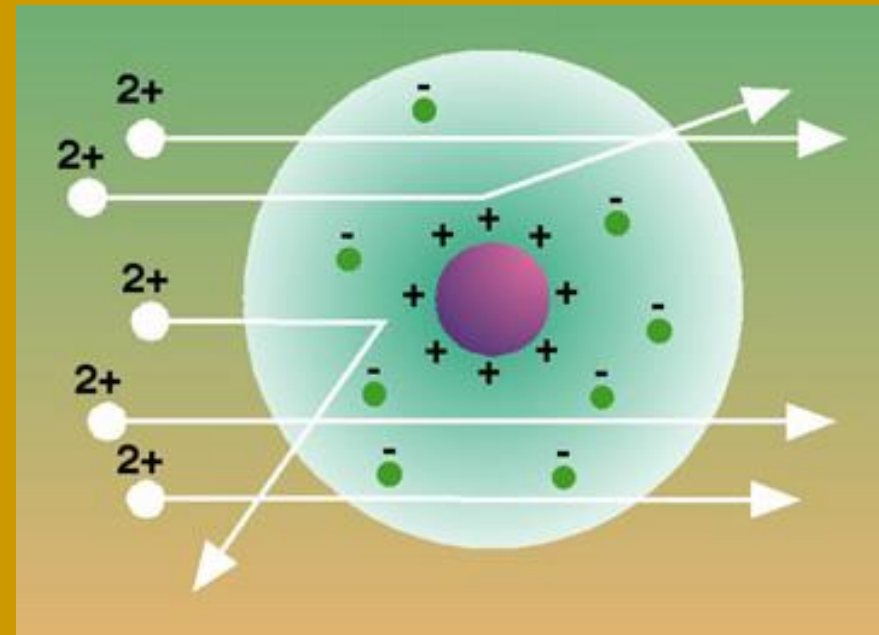
Було знайдено, що більшість α -частинок проходить через тонкий шар металу, практично не зазнаючи відхилення.

Проте невелика частина частинок відхиляється на значні кути, близькі до 180° .

Це можливо лише за умови, що атом майже порожній, і весь його позитивний заряд зосереджений в малому об'ємі.

Цю частину атома Резерфорд назвав атомним ядром.

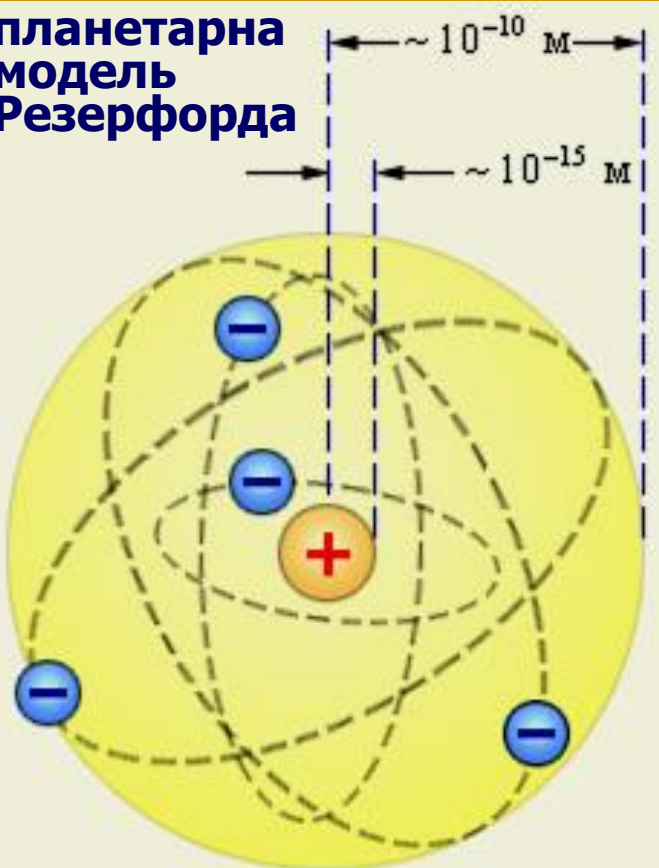
Так виникла ядерна модель атома.



ПЛАНЕТАРНА МОДЕЛЬ

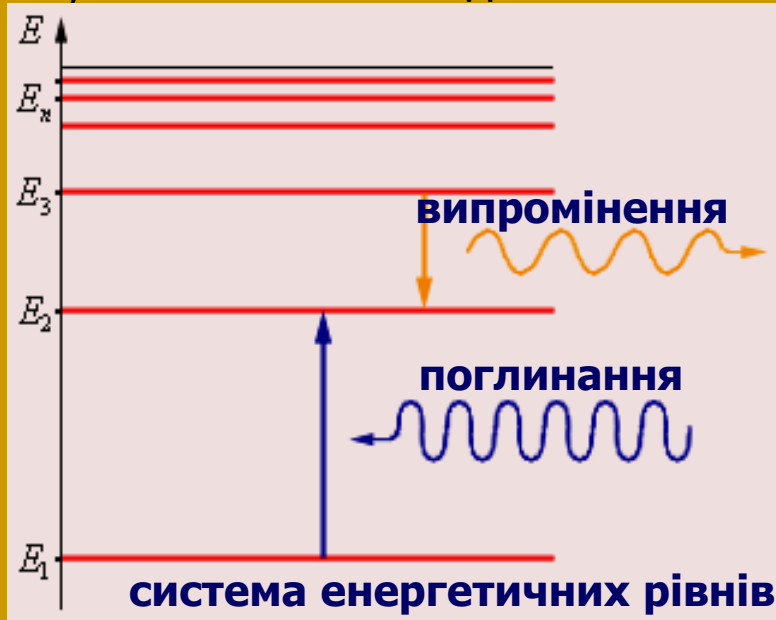
Надалі Резерфорд запропонував планетарну модель атома. Згідно ній в центрі атома розташовується позитивно заряджене ядро, в якому зосереджена майже вся маса атома. Навкруги ядра, подібно планетам, обертаються електрони. Проте ця модель нездатна пояснити стійкість атома. По законах електродинаміки, заряд, що рухається з прискоренням повинен випромінювати електромагнітні хвилі, що приведе до втрат енергії. За короткий час всі електрони в атомі повинні розтратити всю свою енергію і впасти на ядро. Те, що цього не відбувається, показує, що внутрішні процеси в атомі не підкоряються класичним законам.

**планетарна
модель
Резерфорда**



ПОСТУЛАТИ БОРА

Наступний крок в розвитку уявлень про будову атома зробив в 1913 році датський фізик Бор. Проаналізувавши всі експериментальні факти, він сформулював постулати, яким повинна задовольняти нова теорія будови атомів.



Перший постулат Бора: атом може знаходитися тільки в особливих стаціонарних або квантових станах, кожному з яких відповідає певна енергія E_n . В стаціонарних станах атом не випромінює. Згідно першому постулату, атом характеризується системою енергетичних рівнів, кожен з яких відповідає певному стаціонарному стану.

Другий постулат Бора: при переході атома з одного стаціонарного стану з енергією E_n в інший стаціонарний стан з енергією E_m випромінюється або поглинається квант, енергія якого рівна різниці енергій цих станів:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

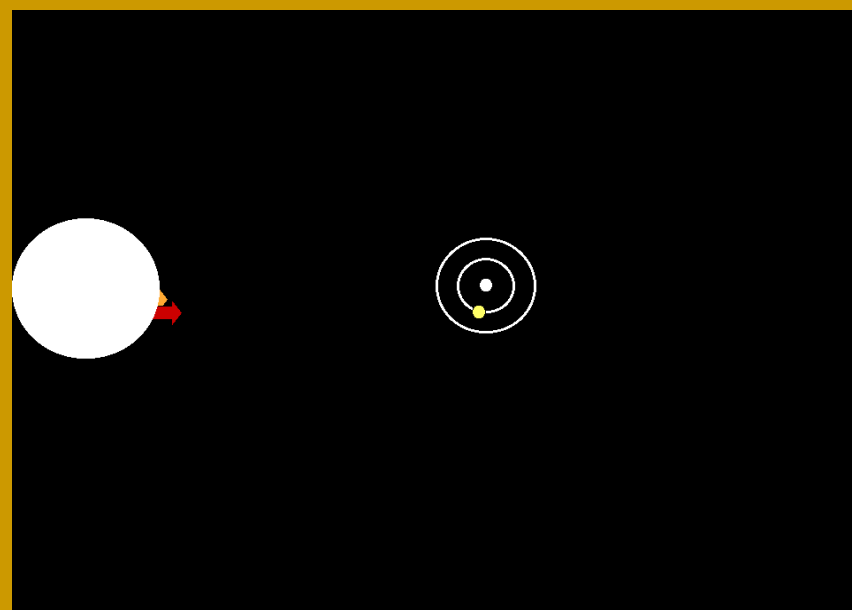
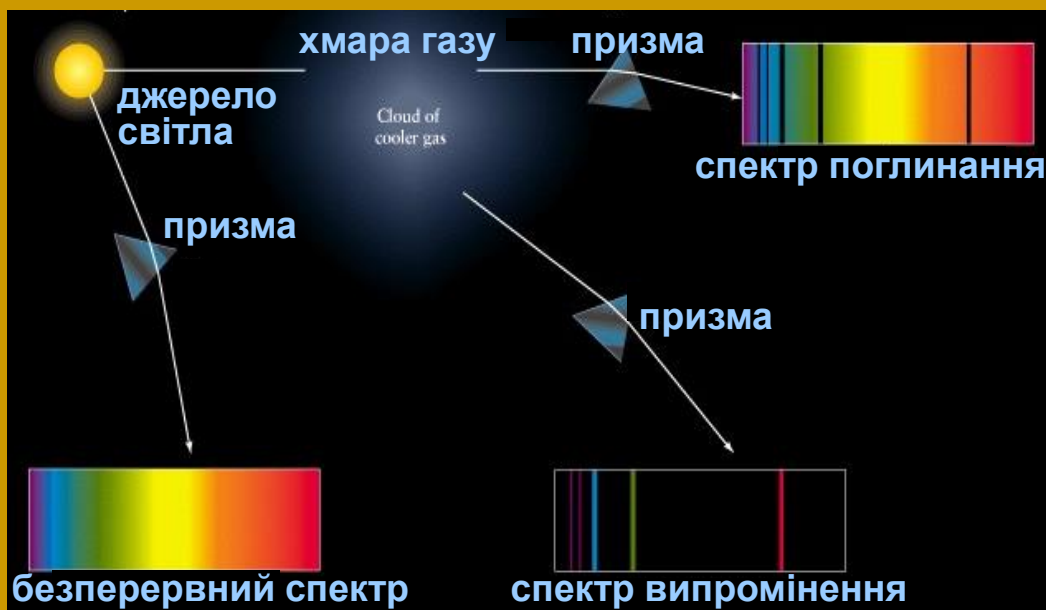
ТЕОРІЯ ДЕ БРОЙЛЯ

Прекрасна згода борівської теорії атома гідрогену з експериментом служила вагомим аргументом на користь її справедливості. Проте спроби застосувати цю теорію до складніших атомів не увінчалися успіхом. Бір не зміг дати фізичну інтерпретацію правилу квантування. Це було зроблено десятиріччям пізніше де Бройлем на основі уявлень про хвильові властивості електронів. Де Бройль запропонував, що кожна орбіта в атомі гідрогену відповідає хвилі, що розповсюджується по колу біля ядра атома.

Стаціонарна орбіта виникає у тому випадку, коли хвиля безперервно повторює себе після кожного обороту навкруги ядра. Іншими словами, стаціонарна орбіта відповідає круговій стоячій хвилі де Бройля на довжині орбіти. Це явище схоже на стаціонарну картину стоячих хвиль в струні із закріпленими кінцями.

ЛІНІЙЧАТИЙ СПЕКТР

Істотним досягненням теорії атома з'явилось пояснення лінійчатого характеру атомних спектрів. Річ у тому, що енергетичні рівні ізольованого атома (наприклад, в розрідженому газі) визначаються тільки його електронами. В зв'язку з цим, якщо на хмару розрідженого газу спрямувати електромагнітне випромінювання, яке має суцільний спектр (містить фотони будь-якої частоти, або будь-якої енергії), то електрони поглинуть тільки ті фотони, які по своїй енергії відповідають різниці енергій стаціонарних станів атома. Якщо світло, що пройшло через хмару газу розкласти на складові за допомогою призми, то можна спостерігати **спектр поглинання** – тонкі чорні лінії на фоні суцільного спектру. Місцеположення цих ліній визначає ті величини енергії, які були поглинені атомом. При поверненні електронів на більш низькі енергетичні рівні спостерігається **спектр випромінювання** – тонкі кольорові лінії на тих же місцях, оскільки випромінюються фотони, тих же енергій, що були поглинені.



РОЗКЛАДАННЯ СВІТЛА ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИЗМИ

Принцип дії призми заснований на тому, що показник заломлення обернено пропорційний довжині хвилі:

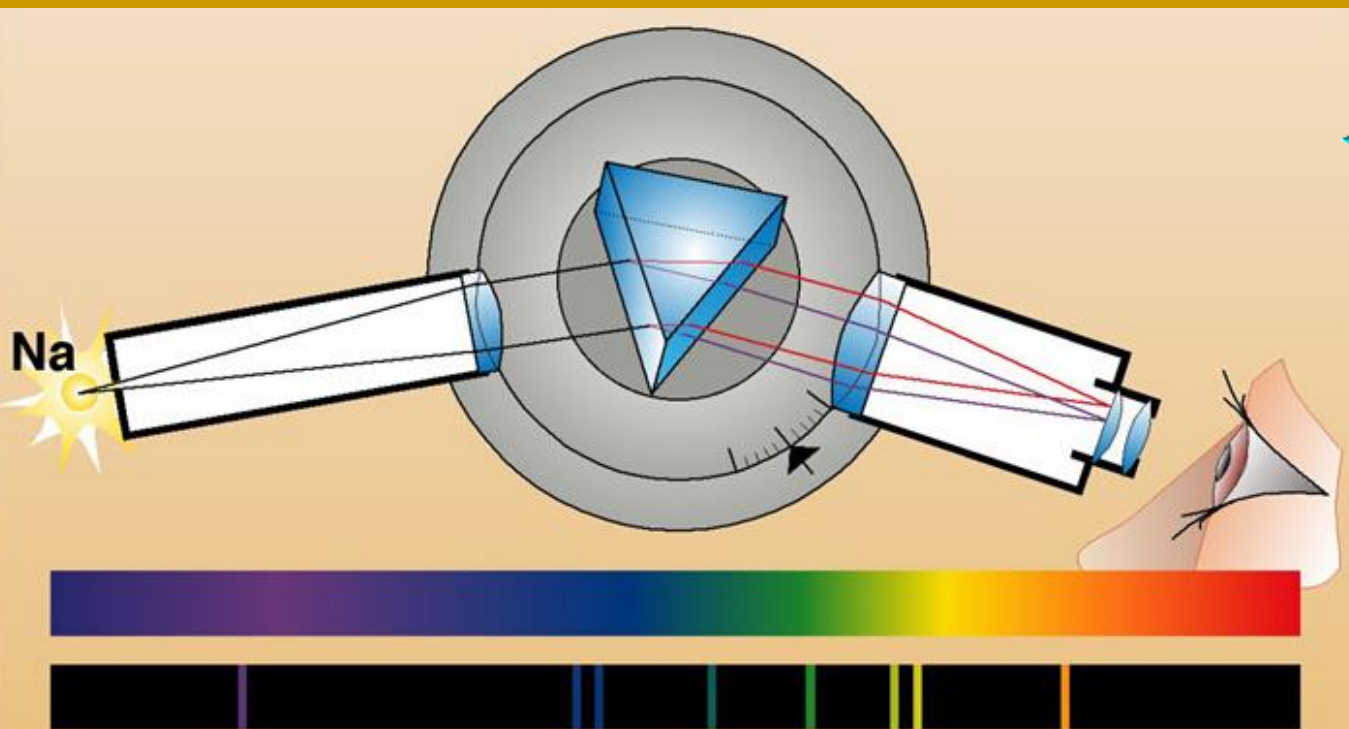
чим коротше хвиля, тим вище коефіцієнт заломлення

– фіолетові промені заломлюються сильніше за всіх,
а червоні — слабкіше за всіх.

В результаті білий промінь виявляється розщепленим на його складові кольори.

СПЕКТРОСКОПІЯ

У атомах різних хімічних елементів енергії квантових стрибків між дозволеними енергетичними рівнями відрізняються, і вони випромінюватимуть світло з різними довжинами хвиль. Таким чином, знайшовши серію спектральних ліній (або набір випромінюваних частот) тіла або речовини (наприклад, при розжарюванні матеріалу невідомого нам хімічного складу в полум'ї) що вивчається, ми можемо отримати інформацію про присутність або відсутність відповідних хімічних елементів в його складі. Чутливість такого аналізу 10^{-9} г. Порівнюючи інтенсивність спектральних ліній, характерних для різних елементів, можна розрахувати їх кількісне співвідношення в речовині і визначити її хімічний склад.



**ПРИНЦИП
ДІЇ
СПЕКТРОСКОПА**

ПОЛОСАТИЙ СПЕКТР МОЛЕКУЛИ

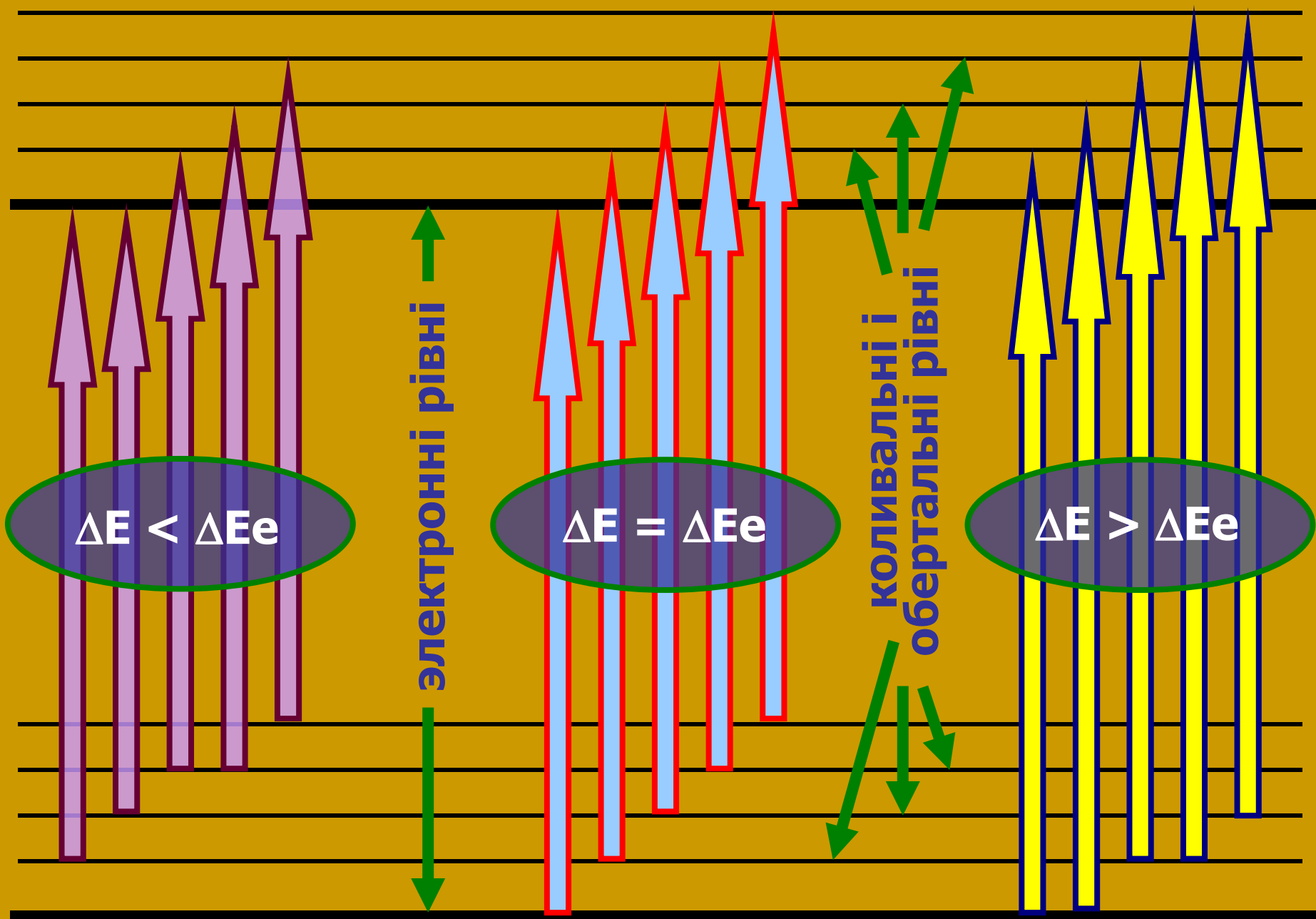
На відміну від атома у молекули є набагато більше можливостей поглинати енергію: її атоми можуть вібрувати біля їх точки рівноваги, а молекула може обертатися навкруги деякої осі.

І вібрації і обертання квантуються.

Переходи між послідовними вібраційними станами звичайно випромінюють фотони в інфра-червоній області, тоді як переходи між ротаційними станами дають фотони в мікрохвильовій області.

Комбінуючись з переходами електронів, ці переходи створюють спектр, характерний для молекул. Спектр має декілька смуг, складених з великого числа ліній.

ФОРМУВАННЯ СПЕКТРА МОЛЕКУЛИ

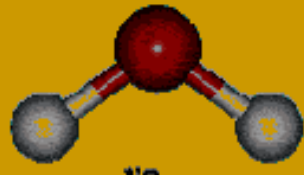


ПОЛОСАТИЙ СПЕКТР



ν_1

symmetric stretch



ν_3

asymmetric stretch

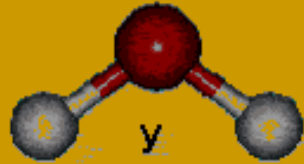


ν_2

bend



x



y

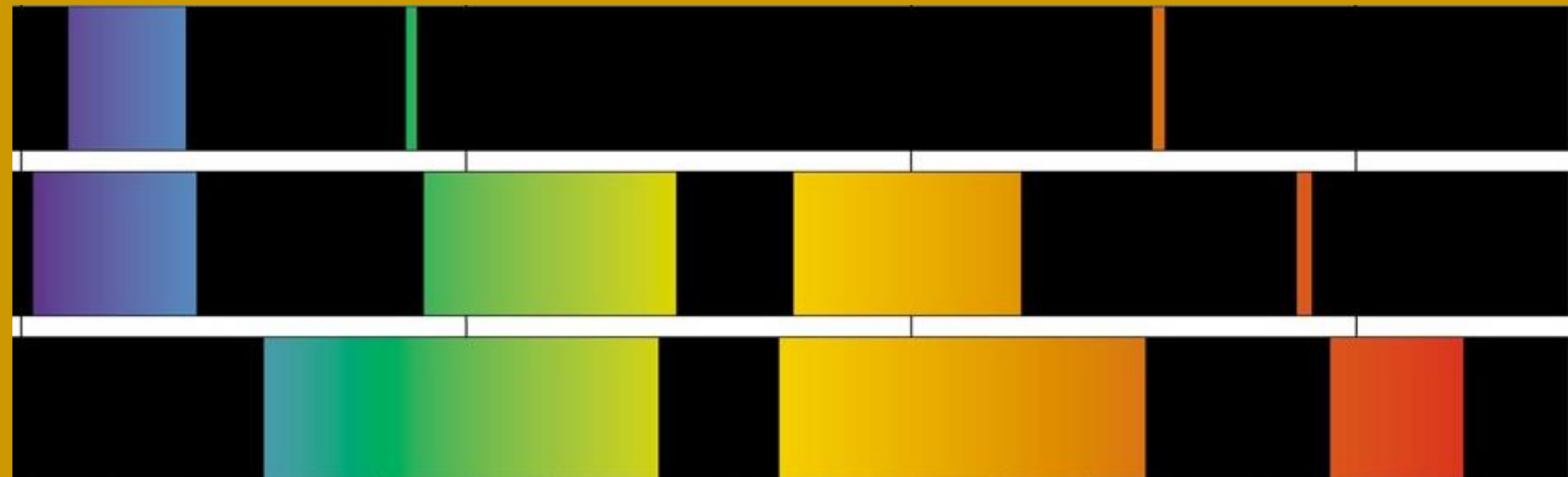


z

librations



**МОЖЛИВІ КОЛИВАННЯ
МОЛЕКУЛИ ВОДИ**



СУЦІЛЬНИЙ СПЕКТР

У рідких і твердих тілах атоми упаковані більш щільно, ніж в газоподібній матерії.

Їх взаємні впливи один на другого розширюють енергетичні рівні, в результаті чого створюються безперервний спектр.

