

НАГРІВАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ

ВІДЧАЙДУШНИЙ ФОКУС ПЛАНКА

- Я спускаюся на кухню і ставлю кип'ятитися
- воду для чаю — але перед тим перевіряю,
- чи **світиться нагрівальний елемент**: раптом
- я спросоння знову поставив чайник не на
- ту конфорку.

Червоне світіння гарячого об'єкта є одним із найпростіших і найбільш універсальних явищ у фізиці. Якщо достатньо сильно нагріти шматок матеріалу — будь-якого — він почне світитися: спочатку червоним, потім жовтим, а потім білим. Колір випромінюваного світла залежить тільки від температури об'єкта. Який саме матеріал використовується — неважливо: стрижень з прозорого скла і стрижень із чорного заліза, нагріті до однакової температури, світитимуться однаковим кольором. Метод нагрівання теж не має значення: незалежно від того, чи ви пропускаєте електричний струм через металеву котушку, як це відбувається у моїй електричній плиті, чи поміщаєте цю котушку у вогненну піч, колір гарячого металу буде однаковим для кожної конкретної температури.

Така проста й універсальна поведінка приваблює фізиків, як валер'янка котів, оскільки вона свідчить, що тут працює якийсь простий і універсальний принцип. Наприкінці 1500-х років Галілео Галілей і Саймон Стевін емпірично продемонстрували, що об'єкти з різних матеріалів і різної ваги падають з однаковою швидкістю — Стевін зробив це, скинувши з церковної вежі дві свинцеві кульки, одна з яких була вдсятеро важчою за другу*. Це спостереження наштовхнуло Ісаака Ньютона на відкриття закону всесвітнього тяжіння в 1600-х роках, а через кілька сотень років потому інший погляд на ту саму просту й універсальну поведінку надихнув Альберта Ейнштейна на створення загальної теорії відносності, яка й зараз залишається найкращою теорією гравітації. Ейнштейн згадував, що ключовим моментом у розробці його теорії було післяобіднє відвідування патентного бюро в Берні 1907 року, коли його вразило усвідомлення того, що людина, яка падатиме з даху, відчуватиме невагомість під час падіння. Це прозріння дозволило

* Це працює за умови, що обидва предмети є достатньо щільними для того, щоб силою опору повітря можна було знехтувати. Якщо б ви кинули вниз скріпку для паперу й пташине перо, скріпка впала б швидко, а перо опускалося б на землю повільно. Однак сила тяжіння, що діє на них, є тією самою — у вакуумі вони б досягли землі одночасно, що яскраво продемонстрував командувач Дейв Скотт під час місії Аполло-15 на Місяць.

встановити зв'язок між прискоренням і гравітацією, що є основою загальної теорії відносності. Ейнштейн називав це «найщасливішою думкою свого життя». Математична розробка наслідків цієї щасливої думки зайняла добрячих вісім років, але завершилася створенням однієї з найбільших і найуспішніших теорій сучасної фізики.

Здавалося, що універсальна поведінка теплового випромінювання є таким самим перспективним джерелом для розуміння, явищем, за допомогою якого можна було б перевірити ідеї про розподіл енергії в гарячих об'єктах і способи взаємодії світла й речовини. На жаль, наприкінці 1800-х років найкращі зусилля фізиків спрогнозувати колір світла, що випромінюється гарячими об'єктами за різних температур, зазнали цілковитої невдачі.

Зрештою виявилось, що повне пояснення теплового випромінювання потребувало радикального прориву в сучасній фізиці. Відправну точку для всієї квантової теорії, наслідки якої фізики обговорюють і досі—більше, ніж через століття—можна знайти в червоному світінні нагрівальних елементів, які ми використовуємо для приготування сніданку.

Отже, у дуже реальному сенсі, сліди всіх химерних явищ, пов'язаних із квантовою фізикою—дуалізму «частинка-хвиля», кота Шредингера, «моторошної дії на відстані»—тягнуться до вашої кухні.

СВІТЛОВІ ХВИЛІ Й КОЛЬОРИ

Як це часто буває, найпростішим способом пояснити необхідність радикальної нової теорії є демонстрація того, що стара не працює. Перш ніж ми зрозуміємо, як квантова модель вирішила проблему теплового випромінювання, потрібно зрозуміти, чому класична фізика не могла цього зробити. Це, звичайно, вимагає трохи передісторії щодо того, що класична фізика говорила про світло, тепло й речовину.

Першим істотним поняттям, що лежить в основі експериментів, які призвели до розпаду класичної фізики, є ідея світла як хвилі. Хвильова природа світла була відома за півстоліття до появи рівнянь Максвелла, багато в чому завдяки експериментам, проведеним близько 1800 року англійським ерудитом Томасом Янгом. Фізики ще з часів Ньютона сперечалися про те, як краще розглядати світло — як потік частинок чи як хвилю, що проходить через певне середовище, але Янг переконливо продемонстрував хвильову природу світла своїм геніально простим експериментом «подвійної щілини».

Як впливає з назви, в експерименті з подвійною щілиною світло проходить через два вузькі отвори, прорізані в картці. Янг виявив, що світло, спроектоване через дві щільно розташовані щілини на екран позаду картки, не створює двох світлих смуг, як можна було б очікувати (кожна смуга відповідала б проходженню світла через

окрему щілину). Натомість, на екрані з'являється низка світлих і темних плям*.

Ці плями з'являються внаслідок процесу, відомого як «інтерференція», який виникає при поєднанні хвиль від двох різних джерел. Якщо дві хвилі досягають певної точки «у фазі», тобто піки однієї хвилі збігаються з піками іншої, то ці хвилі об'єднуються, утворюючи хвилю з піком, вищим, ніж у кожної з них. З іншого боку, якщо хвилі зустрічаються «у протифазі», коли одна з них на піку, а друга — у нижній точці, вони взаємно компенсуються: піки першої припадають на нижні точки другої, результатом чого стає відсутність хвилі як такої. Цей механізм працює за будь-якого джерела хвиль — саме завдяки йому стають можливими складні структури хвиль у хвильових басейнах у парках розваг, а деструктивна інтерференція звукових хвиль є основою для навушників з ефектом «шумопоглинання».

Інтерференція в експерименті Янга з подвійною щілиною відбувається тому, що світлові хвилі з кожної щілини потребують різного часу, щоб дістатися певної точки на екрані. До точки, розташованої точно посередині між двома щілинами,

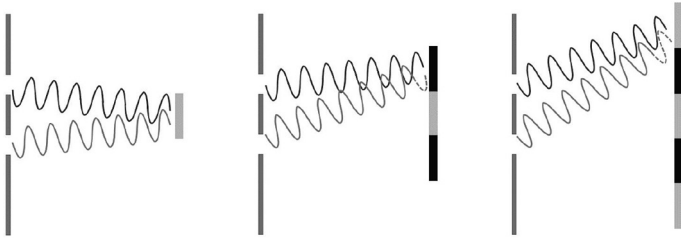
* Якщо ви хочете відтворити цей експеримент самостійно, то можете зробити дві вузькі щілини в шматку алюмінієвої фольги й освітити їх світлом від лазерного вказівника. Іще легше побачити інше тісно пов'язане з цим явище: якщо помістити в промінь лазерного вказівника пасмо волосся, то внаслідок взаємодії світлових хвиль, що проходять з різних боків волосся, виникне малюнок з декількох плям.

обидві хвилі долають однакову відстань, і, таким чином, потрапляють туди у фазі, утворюючи світлу пляму. У точці, розташованій трохи ліворуч від центру, хвилі з лівої щілини долають коротший шлях до екрану, ніж хвилі з правої. Ця додаткова відстань означає, що хвилі з правої щілини мають трохи більше часу для коливань, і, якщо відстань буде точно такою, як потрібно, то піки хвиль з правої щілини припадуть на найнижчі точки хвиль з лівої щілини, утворюючи темну пляму. Трохи далі, однак, додаткова відстань дозволяє зробити ще одне повне коливання, так що вершини хвилі з правої щілини припадають на вершини хвилі з лівої щілини, і виникає ще одна світла пляма.

Так повторюється багато разів, у результаті чого виникає низка світлих і темних плям. Відстань між світлими плямами простим чином залежить від довжини хвилі, що дозволяє зручно вимірювати довжину хвилі видимого світла — у сучасних пристроях цей показник коливається від близько 400 нанометрів для фіолетового світла до близько 700 нанометрів для темно-червоного*. Додавання більшої кількості щілин робить світлі плями вужчими та чіткішими, і вже у 1820-ті роки Джозеф Фраунгофер використовував «дифракційні решітки», побудовані на принципі інтерференції світла, для здійснення перших досить точних вимірювань довжини хвиль світла, випромінюваного Сонцем та іншими зірками.

* Один нанометр складає 10^{-9} м, або 0,000000001 м.

Експеримент Янг'а, опублікований 1807 року, викликав певну сенсацію у фізичних колах, але багато вчених і далі були не схильні відкидати теорію світла як частинок. Коли французький фізик Огюстін-Жан Фрезнель подав статтю з хвильової теорії на фізичний конкурс, один із засновників, Симеон Деніс Пуассон, зазначив, що інтерференція хвиль, яка використовувалася для пояснення експерименту Янг'а, передбачала, що в центрі тіні



Інтерференція світлових хвиль в експерименті з подвійною щілиною. На однаковій відстані між щілинами хвилі потрапляють на екран у фазі й, об'єднуючись, створюють світлу пляму. Трохи вище центру хвилі з нижньої щілини проходять більшу відстань і, таким чином, встигають зробити на пів-коливання більше (пунктирна лінія), так що піки нижньої хвилі припадають на найнижчі точки верхньої, у результаті чого виникає темна пляма. Іще трохи далі хвилі з нижньої щілини встигають зробити ще одне повне коливання (пунктирна лінія), і хвилі знову опиняються у фазі, створюючи ще одну світлу пляму.

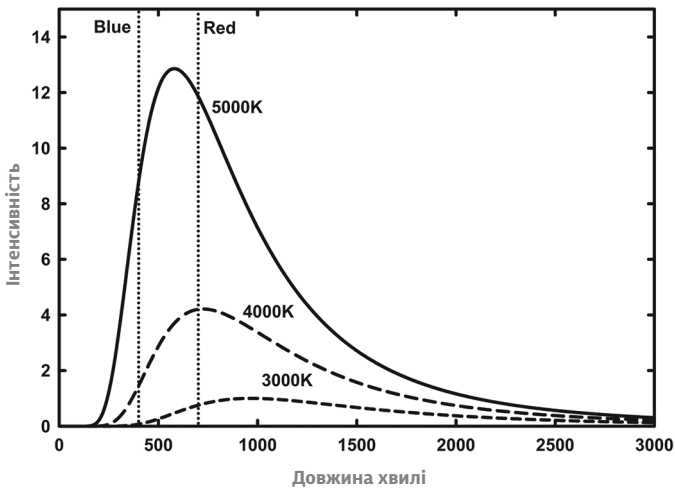
круглого об'єкта має бути світла пляма. Світла пляма посеред тіні здавалася явним абсурдом, і Пуассон через це відкинув хвильову модель світла.

Франсуа Араґо, один із суддів конкурсу, зацікавився ідеєю Пуассона і почав здійснювати виважені експерименти з пошуку світлих плям у центрі тіней. Щоб побачити плями, потрібна була виняткова ретельність в експерименті, але Араґо впорався із цим завданням й чітко продемонстрував, що світло, яке проходить через круглу перешкоду, дійсно може зазнавати інтерференції й утворювати світлу пляму в центрі тіні. Ця «пляма Араґо» або «пляма Фрезнеля» стала останнім доказом, необхідним для переконання більшості фізиків, що світло справді є хвилею.

Експеримент Араґо забезпечив успіх хвильової моделі, але що саме поширювалося, як хвиля, залишалось таємницею до 1860-х років, коли завдяки рівнянням Максвелла світло було описане як електромагнітна хвиля. Зрештою, в останні десятиліття 1800-х років хвильова теорія вже стала загальноновизнаною, і фізики прагнули пояснити всі взаємодії між світлом і речовиною в термінах електромагнітних хвиль.

Досліджуючи хвилі, ми стикаємося з двома властивостями, які можна легко виміряти: довжиною хвилі й частотою. Довжина хвилі — це відстань між піками хвилі, якщо розглядати знімок повної картини над певною областю. Частота — це кількість піків за одиницю часу, виміряна з однієї точки при проходженні хвилі.

Оскільки світло рухається з фіксованою швидкістю, частота й довжина хвилі тісно пов'язані: хвиля просувається вперед на одну довжину хвилі для кожного коливання. Хвилі меншої довжини повторюються частіше за той самий період часу, тому вони мають вищі частоти. Фізики говорять про світло то в термінах частоти, то в термінах довжини хвилі, залежно від того, який підхід є зручнішим для конкретної проблеми — в іншій частині цього розділу ми кілька разів застосовуватимемо то один підхід, то інший.



Спектр теплового випромінювання для декількох різних температур. Вертикальні лінії позначають межі видимого спектра, показуючи, як з підвищенням температури пік зміщується від інфрачервоної області до видимої.

Визначення «кольору» світла, що випромінюється гарячим об'єктом, є питанням вимірювання його спектра: інтенсивності світла, що випромінюється на кожній частоті в широкому діапазоні. Вимірюючи цей спектр для світла при певній температурі, ми знаходимо просту характерну форму — розподіл, в якому на нижчих частотах кількість світла є меншою, потім вона збільшується до піку, а потім стрімко падає на високочастотному кінці. «Колір» світла визначається розташуванням цього піку — точною частотою, при якій інтенсивність випромінювання є найбільшою, і дуже простим чином залежить тільки від температури. Зі збільшенням температури частота, за якої кількість світла, що випромінюється, досягає максимуму, зростає: за кімнатної температурі найбільша інтенсивність піків припадає на далеку інфрачервону ділянку спектра, рухаючись в напрямку червоної частини видимого спектра при збільшенні температури до «гарячо-червоної», і синьої частини при подальшому зростанні температури. «Гарячо-білий» об'єкт має пік свого спектра в області, що відповідає зеленому світлу*, але

* Встановлення зв'язку між довжиною хвилі або частотою світла й кольором, що сприймається людським зором, є не простою справою, особливо коли йдеться про світло на декількох частотах. Прикладом цього є додавання кольору, яке діти вивчають у початковій школі — суміш червоного (довжина хвилі близько 650 нм) і синього світла (близько 490 нм) створює таке саме враження у ваших очах і мозку, як і фіолетове світло (близько 405 нм), незважаючи на те, що жодного фіолетового світла в цій суміші немає.

він випромінює значну кількість світла по всьому видимому діапазону спектра й, таким чином, виглядає білим. Якщо подвоїти температуру (виміряну за шкалою Кельвіна, яка починається з абсолютного нуля), пікова частота також подвоюється.

Спектр світла від Сонця дуже нагадує цей універсальний спектр світла від гарячого об'єкта, що відповідає температурі близько 5600 К, досягаючи максимуму на частоті близько 600 ТГц — насправді, саме так ми вимірюємо температуру Сонця й інших зірок. На іншому полюсі температури є космічний мікрохвильовий фон, реліктове випромінювання, що залишилося від часу невдовзі по Великому вибуху, що пронизує Всесвіт зі спектром, який відповідає об'єкту за температури 2,7 К, досягаючи максимуму на частоті близько 290 ГГц.

ТЕПЛО ТА ЕНЕРГІЯ

Упродовж дев'ятнадцятого століття паралельно з розвитком теорії електромагнетизму та хвильової моделі світла були здійснені великі досягнення у такому розділі фізики, як термодинаміка. Подібно до дискусії на початку століття щодо двох моделей світла — хвильової й частинкової — у перші десятиліття 1800-х років також тривала дискусія щодо двох альтернативних моделей тепла. Одна наукова школа розглядала тепло як фізичну річ у собі — «тонку рідину», яку називали «теплецем», що перетікала з одного об'єкта в інший. Згідно

з іншою моделлю, «кінетичною теорією», тепло вважалося таким, що виникає в результаті випадкового руху мікроскопічних компонентів, які складають макроскопічну матерію.

Протягом кількох десятиліть експерименти Бенджаміна Томпсона (також відомого як граф Румфорд) і Джеймса Джоуля продемонстрували такий зв'язок між механічною роботою й генеруванням тепла, який було важко узгодити з теорією «теплець». Томпсон показав, що тертя при свердлінні отвору в гарматному жерлі може бути, здавалося, невичерпним джерелом тепла, що було б неможливим, якби «теплець» був справжньою рідиною. Джоуль підкріпив цей зв'язок, визначивши точну величину «механічного еквівалента тепла» — тобто, скільки потрібно роботи для підвищення температури фіксованої кількості води на один градус шляхом її перемішування.

З більш теоретичного боку Рудольф Клаузіус та Джеймс Клерк Максвелл* у своїй роботі встановили математичні закономірності, які пов'язують потік тепла між об'єктами з кінетичною енергією атомів і молекул, з яких вони складаються. Австрійський фізик Людвіг Больцман, спираючись на роботу Максвелла, розробив основну частину статистичної моделі теплової енергії, яку ми використовуємо й сьогодні.

* Так, це той самий Максвелл, який працював над електромагнетизмом. Фізикою в Європі в 1800-х роках займалась зовсім невелика спільнота вчених, а Максвелл був справді розумним чоловіком.

Окремі атоми й молекули в газі або твердому тілі рухаються з різними швидкостями, але, оскільки їхня кількість є досить великою, для точного прогнозування ймовірності існування атомів з певною кінетичною енергією в речовині за заданої температури ми можемо використувати статистичні методи. (Кінцева формула для цих обрахунків була названа «розподілом Максвелла-Больцмана» на честь їхньої новаторської роботи). Найважливішою частиною цієї кінетичної моделі є поняття «рівнорозподілу», введене Максвеллом і уточнене Больцманом, згідно з яким енергія розподіляється порівну між усіма типами руху, доступними для частинки. Уся кінетична енергія газу, що складається з окремих атомів, походить від лінійного руху цих атомів, тоді як енергія газу, що складається з простих молекул, ділиться порівну між лінійним рухом молекул в цілому, вібрацією атомів у молекулах, і обертанням кожної молекули відносно її центру мас. Кінетична теорія і цей статистичний підхід успішно пояснювали теплові властивості багатьох матеріалів*, і до кінця 1800-х років теорія теплецю була відкинута.

Оскільки випромінювання світла вимагає теплової енергії, і світло відіграє важливу роль

* Принаймні, за високих температур; за дуже низьких температур, а також для деяких дуже твердих матеріалів кінетична теорія Максвелла-Больцмана не працює. Ці аномалії стали ще одним свідченням необхідності нової фізики; згодом вони відіграють певну роль у становленні на початку 1900-х років квантової механіки.

у передачі тепла — саме тому кухарі загортають деякі страви у фольгу, блокуючи доступ світла й зменшуючи нагрівання — фізики, природно, почали досліджувати зв'язок між електромагнітними хвилями і тепловою енергією. Для цього проекту були потрібні емпіричні дані, тому наприкінці 1800-х років в Німеччині спектроскопісти проводили експерименти з вимірювання спектра світла, що випромінюється гарячими об'єктами, в широкому діапазоні температур і довжин хвиль. Результати експериментів були високоякісними, але пояснити ці результати з точки зору кінетичної моделі теплофізики не вдавалося.

У 1890-х роках Вільгельм Він у Німеччині й лорд Релей у Великій Британії в рамках двох конкурентних моделей зробили емпіричні прогнози щодо кількості світла, яка випромінюється за заданої довжини хвилі для заданої температури — їхні формули базувалися на загальних принципах й експериментальних даних з одного діапазону довжин хвиль, які вони сподівалися поширити на інші діапазони. Прогнози Віна збіглися з даними на високих частотах, але виявилися хибними на нижчих, тоді як прогнози Релея справдилися тільки на низьких частотах. 1900 року Макс Планк знайшов математичну функцію, яка об'єднувала ці два підходи й нарешті відповідала експериментальним даним. Планк вивів цю функцію після вечірки у своєму домі, на якій спектроскопіст Генріх Рубенс розповів

йому про прогнози Релея й останні експериментальні результати. Коли гості пішли, Планк рушив до свого кабінету, і за деякий час вийшов звідти з правильною формулою, яку надіслав Рубенсові на листівці того самого вечора. Але, хоча формула Планка мала великий емпіричний успіх, ніхто не міг пояснити, чому вона працювала, принаймні за допомогою тих фундаментальних принципів фізики, що були усталеними на той час.

УЛЬТРАФІОЛЕТОВА КАТАСТРОФА

Отже, якою має бути модель, що базується на цих принципах? Загальний підхід найбільш наочно ілюструється методом, до якого вдалися британські фізики лорд Релей та Джеймс Джинс (це було, фактично, невдовзі після того, як Планк запропонував свою успішну квантову модель). Модель Релея-Джинса виявилася хибною, але при цьому стало зрозуміло, у чому саме полягає помилка, і виявилось, що кінцеве рішення можна пояснити з використанням тих самих основних понять.

Ідея, що лежить в основі підходу Релея-Джинса до проблеми теплового випромінювання, є дуже простою й спирається на поняття рівномірності, яке Максвелл і Больцман використовували для опису теплових властивостей газів: просто береться енергія, отримана від тепла, і розподіляється рівномірно серед можливих частот світла. Утім, вираз «розподіляється рівномірно» передбачає