

Małe h , wielka teoria

Ciało doskonale czarne charakteryzuje się tym, że całkowicie pochłania padające na nie promieniowanie. Za model ciała doskonale czarnego często bierze się dużą wnękę z jednym małym otworem, ściany wnęki są nieprzepuszczalne i mają wszędzie taką samą temperaturę. We wnęce znajduje się promieniowanie elektromagnetyczne oddziałujące ze ściankami i pozostające z nimi w równowadze termodynamicznej. Interesuje nas widmo tego promieniowania (które wydostaje się na zewnątrz przez otwór w jednej ze ścianek).

We wzorze podanym przez Rayleigha był początkowo błąd rachunkowy, który został sprostowany później przez J. H. Jeansa, dlatego też nazywa się ten wzór prawem Rayleigha–Jeansa.

$$h = 6,62606876(52) \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Einstein twórcą teorii kwantów?

Ruchy Browna to chaotyczne drgania drobnych cząsteczek zawieszonych w cieczy lub w gazie. Ich wyjaśnienie przez Einsteina i Smoluchowskiego miało podstawowe znaczenie dla zrozumienia zakresu stosowalności teorii makroskopowych.

W fizyce przełomu XIX i XX wieku pojawiło się sporo faktów doświadczalnych będących w głębokiej sprzeczności z ówczesnymi teoriami. Jednym z takich faktów był kształt rozkładu promieniowania ciała doskonale czarnego. Ciało takie ogrzane do pewnej temperatury emituje promieniowanie elektromagnetyczne na wszystkich zakresach długości fali. Wzór Wiena na rozkład natężenia promieniowania $E(\lambda)$ jako funkcji długości fali promieniowania λ oparty na drugiej zasadzie termodynamiki, a w dokładniejszej jego wersji na sprawdzonym w termodynamice statystycznym rozkładzie prędkości cząsteczek w gazie, początkowo dobrze zgadzał się z wynikami doświadczalnymi. W 1900 roku pojawiły się nowe wyniki doświadczalne, które radykalnie zmieniły sytuację.

Interpretację tych nowych wyników podał już w tym samym roku J.W.S. Rayleigh. Biorąc za model ciała doskonale czarnego wnękę rezonansową, analizował on typy drgań pola elektromagnetycznego pozostającego w równowadze termodynamicznej ze ściankami wnęki. Zaproponowany przez niego wzór prowadził jednak do tzw. katastrofy w nadfiolecie – wynikało z niego, że całkowita wypromieniowywana energia liczona jako $\int_0^\infty E(\omega) d\omega$ jest nieskończona, co było oczywiście nieakceptowalne z fizycznego punktu widzenia. Wynik ten brał się z faktu, że dla dużych częstotliwości (stąd „nadfiolet”) coś dziwnego działo się we wzorze na $E(\omega)$.

Obserwowany kształt krzywej $E(\omega)$ wyjaśnił pod koniec 1900 r. Max Planck. Podobnie jak Rayleigh rozpatrywał on wnękę rezonansową i stosował wzór Boltzmanna (p. artykuł *Boltzmann i prawdopodobieństwo*, str. 6) na zależność entropii układu od liczby dopuszczalnych stanów. Planck wprowadził jednak jeszcze jeden dodatkowy element, który nijak się miał do obowiązujących czy nawet tylko hipotetycznie rozpatrywanych wtedy teorii fizycznych. Założył on, że część całkowitej wypromieniowywanej energii, przypadająca na jakiś jeden poszczególny atom drgający z częstotliwością ν , może być tylko wielokrotnością energii $h\nu$, którą Planck nazwał kwantem energii, a h enigmatycznie kwantem działania. Opierając się na tym postulatcie i rozważaniach statystycznych, otrzymał on ostateczny wzór na promieniowanie ciała doskonale czarnego. Przez porównanie tego wzoru na $E(\lambda)$ z danymi doświadczalnymi została wyznaczona wartość stałej h .

Stała Plancka h , razem z prędkością c światła w próżni, wartością ładunku elektrycznego elektronu e i stałą grawitacyjną G , jest uważana za podstawową i uniwersalną stałą przyrody. A dzień 14 grudnia 1900 roku, w którym Planck publicznie zaprezentował swoje rozważania, uważany jest za datę narodzin teorii kwantów.

E. Cz.

Albert Einstein, utożsamiany z niekwantową teorią względności i sporami o naturę mechaniki kwantowej, może być, obok Plancka, uważany także za twórcę teorii kwantów.

W 1905 roku Einstein opublikował trzy prace: jedna z nich jest wspomniana w artykule *Lorentz a przekształcenia Lorentza* (str. 5), są w niej zawarte podstawy szczególnej teorii względności. W pozostałych dwóch, równie przełomowych, Einstein analizował charakter ruchów Browna oraz zjawisko fotoelektryczne. Dla teorii kwantów fundamentalne znaczenie miało właśnie wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego.

Polega ono na tym, że światło padając na jakiś materiał, powoduje wybijanie z niego elektronów. Zaobserwowano, że dla każdej substancji istnieje pewna częstotliwość progowa ν_0 , taka że promieniowanie o częstotliwości mniejszej od ν_0 nie wywołuje emisji fotoelektronów, a dla częstotliwości wyższych od ν_0 maksymalna energia fotoelektronów zależy od różnicy $\nu - \nu_0$, a nie od natężenia padającego promieniowania. Wyniki te były sprzeczne z przewidywaniami opartymi na klasycznej falowej naturze światła. Ale są one dobrze wytłumaczone hipotezą, zgodnie z którą promieniowanie elektromagnetyczne jest strumieniem cząstek (nazwanych później fotonami), z których każda niesie energię $h\nu$.

W pracy Einsteina najpierw pojawia się hipoteza o istnieniu fotonów, oparta na obserwacji, że entropię promieniowania ciała doskonale czarnego, w zakresie częstości opisywanych wzorem Wiena, można wyrazić takim samym wzorem jak entropię gazu doskonałego złożonego z cząsteczek o energii $h\nu$ każda. Dopiero w dalszej części pracy Einstein zastanawiał się, co wynika z jego hipotezy zastosowanej dla niektórych zjawisk rozchodzenia się i powstawania światła, takich jak np. zjawisko fotoelektryczne. Słuszność wzoru Einsteina na maksymalną energię wybitego elektronu $E = h(\nu - \nu_0)$ została potwierdzona doświadczalnie w 1917 roku przez R.A. Millikana.

Sformułowanie i zastosowanie teorii istnienia fotonów nie było jedynym wkładem Einsteina w budowę teorii kwantów, ale miało najbardziej fundamentalne znaczenie w budowaniu jej podstaw.

Fale materii de Broglie'a

W 1924 roku L.V. de Broglie w swojej pracy doktorskiej wysunął hipotezę, że nie tylko światło może mieć dwoistą – falową i korpuskularną – naturę, lecz także cząstkom materii można przypisać pewne „fale fazowe” (traktowane przez de Broglie'a jeszcze jako konstrukcje czysto matematyczne).

W swojej hipotezie de Broglie oparł się na postulacie Plancka (p. artykuł *Małe h, wielka teoria*) oraz na szczególnej teorii względności Einsteina wiążącej energię oraz pęd cząstki w jedną wielkość – czteropęd. Sama zaś hipoteza była następująca: każdej cząstce o energii E i pędzie \mathbf{p} odpowiada fala o częstotliwości ν i wektorze falowym \mathbf{k} określonymi następująco:

$$\nu = \frac{E}{h}, \quad \mathbf{k} = \frac{2\pi}{h}\mathbf{p}.$$

Pomysł ten mógł się wydawać początkowo absurdalny, a w dodatku nie poparty żadnymi przesłankami doświadczalnymi. Jednak już wkrótce – w 1925 roku – zaobserwowano dyfrakcję (a więc zjawisko czysto falowe) wiązki elektronów przechodzącej przez kryształ.

Hipoteza de Broglie'a została potwierdzona. Brakujące elementy, tzn. fizyczną interpretację „fal fazowych” oraz równanie opisujące ich propagację, podał w 1926 roku E. Schrödinger, formułując podstawy mechaniki kwantowej.

E. Cz.

Rozkład Maxwella

W połowie XIX wieku teoria molekularnej budowy materii była już dobrze rozwinięta. Ciągłe jeszcze pozostawało nierozwiązane zagadnienie, jak znane fenomenologiczne prawa termodynamiki mają się do cząsteczkowej struktury gazu. W 1821 roku J. Herapath zaczął rozważać hipotezę, mówiącą że ciśnienie gazu wynika z nieustannego bombardowania powierzchni przez cząstki. Analizując ruch n nieoddziałujących cząstek o prędkości v i masie m poruszających się w naczyniu o objętości V oraz zakładając, że zderzenia cząstek ze ściankami naczynia są doskonale sprężyste, otrzymał on, że $pV = \frac{1}{3}nmv^2$. A więc jeśli prędkość cząsteczek jest stała, iloczyn pV ma stałą wartość. Zgodnie z fenomenologicznym prawem Boyle'a–Mariotte'a fakt ten zachodzi dla gazu o stałej temperaturze. Stąd przesłanka, że temperaturę można w jakiś sposób powiązać z prędkością, np. z energią kinetyczną cząsteczki $\frac{1}{2}mv^2$. Herapath przyjął jednak, że temperatura wiąże się z pędem cząsteczki. W 1846 r. J.W. Waterson dokonał analogicznych obliczeń jak Herapath, przyjmując jednak, że temperatura wiąże się z energią kinetyczną. Praca Watersona została uznana początkowo za „czysty nonsens”. W 1848 r. Joule wykorzystał teorię Herapatha do wyznaczenia prędkości cząsteczek

gazu. Jego rozważania kontynuował Clausius, wprowadzając dodatkowo zderzenia między cząsteczkami. Wprowadził on też pojęcie średniej i średniej kwadratowej prędkości, ale wciąż przyjmował upraszczające założenie, że prędkości wszystkich molekuł są jednakowe. Dopiero Maxwell, w latach 1858–1860, wprowadził element różnicowania prędkości molekuł; uważał on, że zderzenia między cząsteczkami prowadzą nie do wyrównywania się ich prędkości, ale do pewnego określonego rozkładu prędkości. W odróżnieniu od swoich poprzedników skupił się on na odstępstwach prędkości cząsteczek od prędkości średniej, zamiast zakładać, że cząsteczki poruszają się mniej więcej z tymi samymi prędkościami. Wyprowadził on rozkład prędkości cząsteczek, zwany obecnie rozkładem Maxwella, rozważając prawdopodobieństwa zderzeń między cząsteczkami.

Ze swojego rozkładu prędkości Maxwell wyprowadził znane termodynamiczne prawa zachowania się gazów: równanie dyfuzji i przewodnictwa cieplnego, oraz przeanalizował zjawisko lepkości gazów. Prace Maxwella kontynuował Boltzmann (p. artykuł *Boltzmann i prawdopodobieństwo*, str. 6), tworząc podstawy mechaniki statystycznej.

E. Cz.