

Strugalski, Zbigniew

W 75-lecie wielkiego odkrycia Maxa Plancka : fundamentalna stała przyrody "h."

Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 21/3, 393-407

1976

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Zbigniew Strugalski
(Warszawa)

W 75-LECIE WIELKIEGO ODKRYCIA MAXA PLANCKA FUNDAMENTALNA STAŁA PRZYRODY h .

Minęło 75 lat od owej znamiennej daty, 14 grudnia 1900 roku, kiedy to Max Planck (1858—1947) na posiedzeniu Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w Berlinie zreferował treść swojej publikacji *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*¹. (W sprawie teorii prawa rozkładu energii w widmie normalnym). Rezultat uzyskany w pracy sprowadzał się do prostego stwierdzenia, że w pewnych układach fizycznych energia nie może przybierać dowolnych wartości; układy takie mogą wymieniać energię z otoczeniem tylko dyskretnymi porcjami — kwantami.

Odkrycie to, zupełnie nie mieszczące się w ramach fizyki klasycznej, dla której charakterystyczna była ciągłość różnych wielkości fizycznych, doprowadziło do rewolucji w nauce, stało się podstawą poznania struktury atomów, zbudowania teorii atomu i mechaniki kwantowej. Rezultatem jego jest rozwijająca się współczesna technika jądrowa, optyka, technologia tranzystorów i materiałów w ogóle, chemia, biologia, cybernetyka. Spowodowało ono dogłębną zmianę ówczesnego poglądu na Wszechświat.

Max Planck, który dokonał odkrycia był wówczas 42 letnim dystyngowanym panem, poważanym profesorem fizyki w Berlińskim Uniwersytecie, znanym w gronie fizyków dzięki licznym publikacjom z zakresu termodynamiki. Był człowiekiem wielkiej dyscypliny wewnętrznej, pracującym w samotności, oficjalnym i powściągliwym w stosunkach towarzyskich. Zazwyczaj na seminariach i posiedzeniach wyluszczał swoje myśli głosem cichym, spokojnym, starannie ważąc każde słowo. Cechowała go niezwykła pracowitość, energia i oddanie się teoretycznym badaniom naukowym. Jako przedmiot zainteresowań wybrał dział termodynamiki, którym, jak stwierdził jeden z jego

¹ M. Planck: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*. „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 2:1900 s. 237.

kolegów, „dosłownie nikt nigdy nie interesował się”². Drugą jego pasją była muzyka, nie zajął się nią jednak wyłącznie — sądził, że nie będzie mieć w tej dziedzinie nadzwyczajnych osiągnięć. A był on niezwykle ambitny i wymagający względem siebie. Stawiał sobie zawsze zadania trudne, czy to w fizyce, czy nawet we wspinaczce, kiedy, mając do wyboru różne drogi na szczyt górski, decydował się na trudniejszą. Z zamiłowaniem uczył się w gimnazjum języków starożytnych — łaciny i greki.



Max PLANCK (1858—1947). Foto Lotte Meitner Graf, reprodukcja z książki *Physiker über Physiker*. Akademie—Verlag—Berlin. 1975.

Макс ПЛАНК (1858—1947). Фото Лотте Майтнер Граф, репродукция из книги *Physiker über Physiker*. Akademie—Verlag—Berlin. 1975.

Max PLANCK (1858—1947). Foto Lotte Meitner Graf, Reproduction in: *Physiker über Physiker*. Akademie—Verlag—Berlin. 1975.

Ojciec jego był profesorem prawa w Uniwersytecie Monachijskim. Świat, w którym Max Planck przebywał od dzieciństwa w domu rodziców, w ciągu około 30 lat, był nacechowany ustalonymi zwyczajami

² B. Cline: *The Questioners: Physicists and the Quantum Theory*. New York 1966. Thomas Y. Crowell Comp.

i porządkami. Kilka pokoleń rodziny Plancków dało społeczeństwu uczonych — prawników i wybitnych sędziów. W domu panowała atmosfera głębokiego poszanowania władzy państwowej, ślepego podporządkowania się i wrodzone niemal poczucie praworządności. Nic więc dziwnego, że Max Planck uważał istniejące w gimnazjum porządki za świętość nienaruszalną, a ustalone prawa fizyki traktował jako prawdę absolutną. Wywołać kataklizmu w fizyce klasycznej za pewne nie pragnął.

Fundamentalne odkrycie Maxa Plancka nie weszło do fizyki ze zwykłym dla wszelkiej rewolucji rozgłosem, nie było ono także związane z dążeniem do poznania struktury atomów, chociaż przede wszystkim w tej właśnie dziedzinie spowodowało i przewrót, i decydujący postęp. Mówiąc obrazowo, było ono tylko rezultatem tworzenia teorii promieniowania z niewielkiego otworu w ścianie stygnącego pieca. Jednakże znajomość praw promieniowania w takich warunkach jest równoważna znajomości praw promieniowania wszystkich ciał, dla których znana jest zdolność pochłaniania promieniowania w zależności od jego długości fali i temperatury promieniujących ciał. Rezultaty eksperymentu — eksperymentalny rozkład natężenie promieniowania w zależności od długości fali można było wyjaśnić stosując założenia nie do przyjęcia w fizyce klasycznej. Stwierdzenie tego faktu, tak znamiennego w skutkach dla rozwoju fizyki i techniki, poprzedziły badania wielu fizyków. Okres tych badań stanowi pełną romantyzmu i dramatycznych zmagania kartę historii nauki.

Dwa etapy można wydzielić na drodze do sformułowania pojęcia kwantu energii i odkrycia fundamentalnej stałej przyrody h . Pierwszy etap to badania teoretyczne zjawisk promieniowania stowarzyszone z ciągiem badań eksperymentalnych o charakterze poszukiwawczym. W tym okresie sformułowano szereg pojęć związanych z analizowanymi problemami i doprowadzono do określenia takiego eksperymentu, *experimentum crucis*, który mógłby być eksperymentem decydującym o przyjęciu lub odrzuceniu wytworzonych i reprezentowanych przez zbudowaną teorię obrazów badanego zjawiska i poglądów na nie. Drugi etap to przeprowadzenie decydującego eksperymentu, analizy jego rezultatów, skonfrontowanie ich z teorią i wprowadzenie do niej istotnych zmian i nowych pojęć, zwłaszcza pojęcia kwantu energii. Każdy z tych etapów charakteryzuje głęboka więź i wzajemne oddziaływanie badań eksperymentalnych i teoretycznych. Przedstawimy niżej krótką historię każdego z nich.

1. ROZWÓJ POJĘĆ I PRZEBIEG EKSPERYMENTÓW PODSTAWOWYCH W DZIEDZINIE BADAŃ PROMIENIOWANIA CIEPLNEGO

Wyobraźmy sobie że na jakiś obiekt o określonej objętości pada promieniowanie cieplne, na przykład światło. Zazwyczaj pewna część promieniowania odbija się od powierzchni obiektu, część przenika do jego wnętrza, ulegając tam częściowemu lub całkowitemu pochłanianiu. Mogą zdarzyć się trzy następujące, ekstremalne przypadki: wszystko promieniowanie padające na obiekt zostaje odbite od jego powierzchni; wszystko promieniowanie przenika przez obiekt; wszystko promieniowanie wnika do obiektu i zostaje w nim pochłonięte. W zakresie promieniowania widzialnego pierwszemu przypadkowi odpowia-

da obiekt doskonale nieprzezroczysty, bardzo dobrze widzialny. Drugiemu przypadkowi odpowiada obiekt doskonale przezroczysty, niewidzialny. Trzeciemu przypadkowi odpowiada obiekt nieprzezroczysty i nieoświetlony; widoczny on jest jedynie jako czarny kontur na tle innych obiektów, odpowiadających przypadkowi pierwszemu i drugiemu, w odosobnieniu jest niewidzialny.

Obiektów o tak skrajnych właściwościach w przyrodzie nie ma. Idealizacja taka, polegająca na założeniu istnienia obiektów o ekstremalnych właściwościach jest jednak niezwykle pożyteczna w rozważaniach i często stosowana. Dała ona podstawy do zrealizowania niezwykle trudnych eksperymentów w dziedzinie promieniowania cieplnego. Obiekt idealny mający taką właściwość, że padające na niego promieniowanie jest pochłonięte w nim całkowicie nazywamy obiektem absolutnie lub doskonale czarnym.

Pojęcie obiektu doskonale czarnego wprowadził do fizyki Gustaw Kirchhoff (1824—1887) w roku 1860³. Taki obiekt pozostający w stałej temperaturze winien nie tylko pochłaniać, lecz także emitować promieniowanie, na mocy zasady zachowania energii. Ponieważ temperatura obiektu pozostaje z założenia stała pomimo pochłaniania promieniowania, to musi istnieć mechanizm przekazywania energii do otoczenia. Mechanizm ten winien zapewnić przekazywanie energii nawet w próżni, gdzie nie ma ani przewodnictwa cieplnego, ani konwekcji. Ze znanych sposobów oddawania energii może wchodzić więc w rachubę tylko przekazywanie przez promieniowanie — występuje promieniowanie obiektu doskonale czarnego, tyle promieniowania on emituje ile pochłania. Stwierdzenie takie dotyczy każdego realnego obiektu pozostającego w stałej temperaturze.

Jedną z charakterystyk promieniowania według teorii elektromagnetycznej jest jego długość fali λ . Zbiór wartości energii promieniowania E_λ odpowiadających różnym długościom fali nazywamy widmem długości fal promieniowania lub po prostu widmem promieniowania. Próby ustalenia formuły teoretycznej dla widma doprowadziły do powstania pojęcia kwantu energii i wprowadzenia do fizyki przez Maxa Plancka fundamentalnej stałej przyrody h . W rozważaniach posługiwano się jeszcze pojęciem gęstości spektralnej lub widmowej energii promieniowania E_λ — ilości energii wysłanej w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni obiektu w jednostkowym zakresie długości fal, w otoczeniu λ . Z definicji obiektu doskonale czarnego wynika, że gęstość spektralna jego promieniowania nie zależy od właściwości materiału na jego powierzchni i ma charakter absolutny. Absolutność ta była właśnie powodem wszechstronnych badań takiego obiektu. Poznanie go jako tworu idealnego musi być oparte jednak na eksperymentalnych badaniach obiektów realnych, wykazujących w odpowiednim zakresie zjawisk właściwości zbliżone do właściwości obiektu idealnego. Udowodniono także, że znając zależność promieniowania obiektu doskonale czarnego od temperatury, a także znając zależność współczynnika pochłaniania promieniowania od długości fali dla dowolnego obiektu realnego, można określić promieniowanie tego obiektu realnego. W sposób oczywisty wynikał więc problem badania

³ G. Kirchhoff: *Ueber das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht.* „Ann. d. Phys. und Chem.” T. 109:1860 s. 275.

obiekty doskonale czarne. Następnym więc krokiem winno być skonstruowanie takich obiektów realnych, które dostatecznie dokładnie imitowałyby obiekt idealny i byłyby przydatne do przeprowadzania na nich eksperymentów.

Gustaw Kirchhoff, stosując w dowodzeniu zasady termodynamiki, pokazał, że otwór w ścianie z jakiegokolwiek materiału otaczającej pewien obszar przestrzeni — wnęka — wykazuje właściwości takie same jak obiekt doskonale czarny. Wnękę — model obiektu doskonale czarnego — można łatwo zrealizować w warunkach laboratoryjnych. W grubym przybliżeniu jest to po prostu niewielki otwór w ścianie nagrzanego pieca.

Prace wielu fizyków drugiej połowy XIX wieku były poświęcone właśnie określeniu gęstości widmowej E_λ obiektu doskonale czarnego. Podsumowanie rezultatów ważniejszych badań tego okresu, wraz z rezultatami własnych eksperymentów, opisał w roku 1897 Friedrich Paschen (1865—1947)⁴. Podał on również wyrażenie empiryczne na gęstości spektralne odnoszące się do różnych obiektów realnych:

$$E_\lambda = C \cdot \lambda^{-\alpha} \cdot e^{-c/\lambda T}, \quad (1)$$

gdzie C , α , c — stałe charakteryzujące materiał, z którego zbudowany jest badany obiekt; T — temperatura absolutna obiektu. W roku 1879 Joseph Stefan (1835—1893) ustalił empiryczną zależność energii wypromieniowanej przez jednostkę powierzchni dowolnego obiektu realnego w jednostce czasu od temperatury, w całym zakresie długości fal. Wkrótce po tym Ludwig Boltzmann (1844—1906) udowodnił, że zależność empiryczna Stefana słuszna jest także dla obiektu doskonale czarnego⁵. Od tego czasu zależność ta nosi nazwę prawa Stefana-Boltzmann.

$$E_T = \sigma T^4, \quad (2)$$

gdzie E_T — całkowita energia dla pełnego widma długości fal promieniowania wyemitowanego w jednostce czasu z jednostki powierzchni obiektu o temperaturze T , σ — stała Stefana-Boltzmann.

Ważne nowe rezultaty badań teoretycznych opublikował Wilhelm Wien (1846—1928) w latach 1894 i 1896⁶. Rozważając zmiany objętości obszaru zawierającego promieniowanie, dochodzi on do wniosku, że promieniowanie emitowane z wnęki można traktować jak gaz i zastosować do niego drugie prawo termodynamiki. Sformułował on wówczas swoje słynne prawo, nazwane później prawem Wiena: długość fali odpowiadająca wartości maksymalnej energii wypromieniowanej przez jednostkę powierzchni obiektu absolutnie czarnego w jednostce czasu jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury absolutnej⁷:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{const.} \quad (3)$$

⁴ P. Paschen: *Ueber Gesetzmässigkeit in der Spektren fester Körper*. 1 Mitt. „Ann. d. Phys.” T. 294:1896 s. 465; 2 Mitt. tamże T. 296:1897 s. 662.

⁵ L. Boltzmann: *Ableitung Stefan'schen Gesetzes, betreffend Abhängigkeit der Warmestrahlung von der Temperatur aus der elektromagnetischen Lichttheorie*. „Ann. d. Phys.” T. 22:1884 s. 291.

⁶ W. Wien: *Temperatur der Entropie der Strahlung*. „Ann. d. Phys.” T. 52:1894 s. 132; W. Wien: *Ueber die Energieverteilung im Emissionsspektrum eines schwarzen Körpers*. „Ann. d. Phys.” T. 58:1896 s. 662.

⁷ W. Wien: *Temperatur der Entropie...* jw.

Stała w równaniu (3) $\text{const} = b$ nazywa się stałą Wiena. Podał on także jawną postać wyrażenia gęstości spektralnej dla promieniowania obiektu doskonale czarnego⁸:

$$E_{\lambda} = C \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-c/\lambda T}, \quad (4)$$

gdzie C i c — stałe. Przy wyprowadzeniu tej, zwanej później wzorem Wiena, zależności korzystał z założeń dotyczących procesu promieniowania molekuly. Założenie to wychodziło poza ramy fizyki klasycznej, wzór (4) nie cieszył się więc powodzeniem u większości ówczesnych fizyków, chociaż miał identyczną postać jak wzór empiryczny Paschena.

W końcu drugiej połowy ostatniego dziesięciolecia XIX wieku istniała formuła empiryczna Paschena i kilka innych podobnych, wyrażających gęstość spektralną E_{λ} , a także — bardzo bliskie formuły empirycznych — wyrażenie teoretyczne Wiena. Wyjaśniona została możliwość realizacji modelu obiektu doskonale czarnego, a więc i odpowiedniego eksperymentu, który winien dać odpowiednie rezultaty do skonfrontowania ich z teorią. Uzyskane wyrażenia teoretyczne, bardzo bliskie empirycznych, wyprowadzone były z równań termodynamiki, co wskazywało, że dokładniejsze, bardziej konkretne badania teoretyczne należy prowadzić podążając tą właśnie drogą. W takiej sytuacji do prac nad stworzeniem teorii promieniowania przystąpili Max Planck i W. Rayleigh (1842—1919), a do przeprowadzenia decydującego eksperymentu O. Lummer (1860—1915) i E. Pringsheim (1859—1917).

Zarówno W. Rayleigh jak i M. Planck poczynili oryginalne założenia dotyczące teoretycznego modelu obiektu doskonale czarnego — wnęki.

W. Rayleigh, badając promieniowanie z wnęki, założył że nie może ono zawierać dowolnych częstości drgań. Analogicznie jak dla strun zamocowanych na dwu końcach, których częstości drgań określone są przez ich długość, tak dla wnęki określone są one przez właściwości geometryczne obszaru w ściankach którego jest otwór emitujący promieniowanie⁹. Promieniowanie z wnęki winno więc zawierać nakładające się na siebie fale stojące o częstościach drgań odpowiadających własnościom geometrycznym i rozmiarom obszaru. Można zatem obliczyć intensywność różnych częstości odpowiadających falom o długościach od pewnej wartości λ do innej $\lambda + \Delta\lambda$ przypadającej na jednostkę objętości obszaru. W obliczeniach należy stosować sposoby używane w klasycznej mechanice statystycznej, uwzględniając prawo równomiernego rozkładu energii według stopni swobody — prawo ekwipartycji energii. Na podstawie tych założeń, stosując klasyczną mechanikę statystyczną, wyprowadził Rayleigh wzór na gęstość spektralną promieniowania obiektu doskonale czarnego. Wzór ten stał się jednak jedynie powodem rozczarowań i początkiem katastrofy w fizyce klasycznej.

Nigdy przed tym żadna formuła wyprowadzona konsekwentnie na podstawie praw mechaniki klasycznej i klasycznej elektrodynamiki nie była tak rażąco sprzeczna z danymi eksperymentalnymi jak ta.

⁸ W. Wien: *Ueber die Energieverteilung...* jw.

⁹ W. Rayleigh: *Remarks upon the Law of Complete Radiation*. "Phil. Mag." T. 49:1900 s. 539.

Dla małych częstości drgań, odpowiadających podczerwonemu krańcowi widma, wzór dostatecznie dobrze opisywał eksperymentalne rezultaty. W miarę jednak jak częstość wzrastała, wzrastała sprzeczność wzoru z danymi eksperymentu. Zgodnie z wzorem Rayleigha względna intensywność promieniowania winna wzrastać ze wzrostem częstości drgań. W rzeczywistości zaś krzywa ma inny kształt — kształt zbliżony do kształtu krzywej przekroju dzwonu. Z wzoru Rayleigha wynika jeszcze jedna niedorzeczność. Wyobraźmy sobie, że w pewnym obszarze zamkniętym znajduje się — zgodnie z ówczesną teorią klasyczną — materia i eter kosmiczny. Równowaga termodynamiczna założona w rozważaniach wymaga aby energia między eterem i materią rozmieszczała się proporcjonalnie do liczby stopni swobody. Materia jest zbudowana z atomów, jest dyskretna i ma skończoną liczbę stopni swobody, eter zaś jako ośrodek ciągły ma nieskończoną liczbę stopni swobody, niezależnie od wielkości obszaru. Wynika stąd, że według wzoru Rayleigha wszystka energia przejdzie do eteru kosmicznego, a w nim rozłoży się według największych częstości drgań. Prowadzi to do tak zwanej „katastrofy ultrafioletowej”. Krótkie fale kojarzono ze znanym wówczas ultrafioletem w widmie promieniowania. Dalsze ważne badania w tej dziedzinie prowadził nieco później James Jeans (1877—1946), stosując metody klasycznej mechaniki statystycznej do zbioru fal stojących. Doszedł znowu do wzoru Rayleigha¹⁰. Następnie wzór ten w literaturze naukowej nazwano wzorem Rayleigha-Jeansa:

$$E_{\lambda} = 8\pi kT\lambda^{-4}, \quad (5)$$

gdzie k — stała Boltzmanna,

M. Planck jako model teoretyczny wnętrza przyjął obszar o ściankach zbudowanych ze zbioru oscylatorów harmoniczych — ansambla oscylatorów. Postulował przy tym zachodzenie emisji i pochłanianie promieniowania przez ścianki, to jest zdolność realizowania wymiany energii między materiałem z którego są wykonane i ośrodkiem otaczającym je. W czasach Plancka ośrodkiem tym miał być eter kosmiczny. Z otworu w ściance emitowane było promieniowanie równoważne promieniowaniu obiektu doskonale czarnego. Taki model teoretyczny był możliwy do przyjęcia z tego względu, że promieniowanie z wnętrza zależy od rodzaju materiału, z którego wykonano ścianki ograniczające obszar. Rozważania swoje oparł M. Planck na tym modelu i na termodynamice ansambla oscylatorów. Według drugiej zasady termodynamiki zmiany w układzie odosobnionym zachodzą w taki sposób, że entropia układu rośnie, a więc stanem równowagi będzie taki stan, przy którym entropia jest maksymalna. Dla wnętrza stanem równowagi będzie taki stan w którym emituje ona i pochłania promieniowanie obiektu doskonale czarnego a określenie tego stanu będzie polegać na obliczeniu entropii zbioru oscylatorów.

Zagadnieniom emisji i absorpcji promieniowania elektromagnetycznego przez oscylator poświęcił M. Planck wiele prac w latach wcześniejszych swojej twórczości¹¹. O celu tych badań mówi sam na po-

¹⁰ J. Jeans: *On the Partition of Energy between Matter and Aether*. „Phil. Mag.” T. 10:1905 s. 91.

¹¹ M. Planck: *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge*. „Ann. d. Phys.” T. 1:1900 s. 69; M. Planck: *Ueber elektrische Schwingungen, welche durch Resonanz erregt und durch Strahlung gedämpft werden*. „Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. zu Berlin” 1896 s. 165; „Ann. d. Phys.” T. 60:1897 s. 593.

czątku zbiorczej publikacji z roku 1900¹²: „Praca niniejsza zawiera wyluszczenie głównych rezultatów moich badań ogłoszonych pod wyżej wskazanym tytułem (*O procesach nieodwracalnych w zjawiskach promieniowania — Z. S.*) o znaczeniu drugiej zasady termodynamiki dla zjawisk promieniowania cieplnego z punktu widzenia teorii elektromagnetycznej światła”. Pierwszą pracę dotyczącą rozkładu energii w widmie promieniowania opublikował on w roku 1899¹³. Nad problemem tym pracował od wielu lat. W ramach klasycznej termodynamiki i elektrodynamiki, nie wprowadzając żadnych dodatkowych założeń, obliczył średnią gęstość energii promieniowania E_ν w przedziale wartości częstości drgań oscylatora od ν do $\nu + d\nu$ ¹⁴.

$$E_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U d\nu, \quad (6)$$

gdzie U oznacza średnią energię oscylatora. Dalej, wykorzystując drugą zasadę termodynamiki, dowodzi, że jeśli entropia S układu oscylatorów jest dana jako funkcja ich energii U , to prawo rozkładu energii w widmie promieniowania według długości fal lub częstości drgań można wyprowadzić. Istotną rolę w wyprowadzeniu gra badanie krzywizny krzywej zależności $S = f(U)$. W rezultacie Planck otrzymał rozkład¹⁵:

$$E_\lambda = \text{const.} \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-c/\lambda T}, \quad (7)$$

identyczny jak rozkład Wienera¹⁶ i także istotnie odbiegający od rezultatu eksperymentalnego.

Fizyka klasyczna końca XIX wieku oferowała więc dwie formuły wyrażające gęstość spektralną promieniowania obiektu doskonale czarnego: formułę Rayleigha-Jeansa (5) i formułę Wienera-Plancka (4) lub (7). Obok tych formuł teoretycznych istniał empiryczny wzór Paschena (1), o postaci bliskiej do formuły Wienera-Plancka. Nie można było jednak początkowo stwierdzić, czy formuła Wienera poprawnie opisuje część długofalową widma, należało przeprowadzić dokładne pomiary spektralne promieniowania odpowiedniego modelu obiektu doskonale czarnego w szerokim zakresie długości fal.

Do przeprowadzenia dokładnych pomiarów przystąpili O. Lummer i E. Pringsheim. Do momentu rozpoczęcia przez nich badań większość istniejących rezultatów eksperymentalnych była otrzymana w badaniach promieniowania obiektów realnych.

Przystępując do nowych dokładnych eksperymentów i systematycznych pomiarów widma promieniowania wybrali oni jako obiekt badań ciało doskonale czarne. Należało jednak przed tym stworzyć dogodny do eksperymentowania model obiektu doskonale czarnego — ekwiwalentu abstrakcyjnego obiektu, o charakterystykach dostatecznie bliskich charakterystyk obiektu idealnego. Poprzez analizę właściwości różnych przybliżonych modeli, doszli do wniosku, że najbliższym idealnego, dogodnym w praktyce laboratoryjnej modelem będzie

¹² M. Planck: *Ueber irreversible...* 1900 jw.

¹³ M. Planck: *Ueber irreversible Strahlungsvorgänge*. Fünfte Mitt. „Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. zu Berlin” 1899 s. 440.

¹⁴ M. Planck, *Ueber irreversible...* 1900 jw.

¹⁵ tamże.

¹⁶ W. Wien: *Temperatur der Entropie...* jw.

otwór w ścianie ograniczonego obszaru przestrzeni małym w porównaniu z polem powierzchni ograniczającej cały obszar. W takim modelu-wnęce — promieniowanie wychodzące z otworu jest identyczne jak promieniowanie obiektu doskonale czarnego i chcąc zbadać promieniowanie takiego obiektu wystarczy zbadać promieniowanie wychodzące z wnętrza.

Badania promieniowania z wnętrza prowadzili Lummer i Pringsheim w ciągu wielu lat. O rezultatach pierwszego etapu badań zakomunikowali w roku 1897¹⁷. W eksperymentach posługiwali się dwiema wnękami — jedną ze ściankami miedzianymi, drugą ze ściankami z żelaza. Nagrzewano je do różnych temperatur — miedzianą do 877°K, żelazną od 799°K do 1561°K. W pierwszym etapie badań sprawdzono prawo Stefana-Boltzmana prowadząc pomiary w szerokim zakresie wartości temperatur. Stwierdzono, że prawidłowości takie zachodzą rzeczywiście.

Rezultaty następnego etapu badań autorzy ci opublikowali w pracach z lat 1899—1900¹⁸. Na tym etapie badań zadanie było następujące: określić zmiany zdolności promieniowania obiektu doskonale czarnego zależne od zmian długości fali przy ustalonej temperaturze wnętrza. Pracowano w obszarze temperatur odpowiadających obszarowi długości fal w widmie promieniowania od dalekiej podczerwieni do podczerwieni bliskiej czerwonego obszaru części optycznej widma. Obszar ten obejmował długości fal od około 1 do 18 μm . Obszar promieniowania widzialnego obejmuje długości fal od około 0,4 μm do około 0,7 μm ; 0,4 μm odpowiada fioletowi w widmie optycznym.

Rezultaty eksperymentów przedstawili za pomocą wykresów zależności intensywności promieniowania I od długości jego fali λ przy różnych temperaturach. Są to powszechnie znane ciągłe krzywe z wyrażeniami szerokimi maksimami, przedstawione na str. 217 w cytowanej pracy¹⁹. Dane eksperymentalne porównano z rezultatami obliczeń według wzoru Wiena. Na pierwszy rzut oka zgodność rezultatów obliczeń i eksperymentu była dostateczna, tym niemniej autorzy poszukiwali dodatkowych argumentów na rzecz prawidłowości wzoru teoretycznego.

Należy przy tym dodać, że podobnie jak to zdarza się jeszcze dziś, eksperymentatorzy ci odnosili się do samej teorii, zwłaszcza w pierwszej fazie badań, z dużą ufnością. Zdarzało się, że serię pomiarów odrzucali, ponieważ wynikała z nich zależność zmian położenia maksimów gęstości spektralnej w widmie nie proporcjonalnie do 5 potęgi temperatury, jak przewiduje teoria, lecz do potęgi 5,2. Późniejsze wielokrotne dokładne porównanie rezultatów pomiarów i teorii doprowadziły jednak do wyjawienia rozbieżności, które można scharakteryzować w sposób następujący: Jeszcze przy ustalaniu empirycznego wzoru Paschena c i C były stałymi, zależnymi od rodzaju materiału, z którego wykonany jest obiekt promieniujący. Przy wyprowadzaniu

¹⁷ O. Lummer, E. Pringsheim: *Die Strahlung eines „schwarzen“ Körpers zwischen 100 und 1300°C.* „Ann. d. Phys.” T. 63:1897 s. 395.

¹⁸ O. Lummer, E. Pringsheim: *Die Verteilung der Energie im Spektrum des schwarzen Körpers.* „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 1:1899 s. 23, 215; O. Lummer, E. Pringsheim. „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 2:1900 s. 163.

¹⁹ O. Lummer, E. Pringsheim: „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 1:1899 s. 215.

wzoru Wiena stosowano pojęcia z zakresu elektromagnetycznej teorii promieniowania i termodynamiki z których wynikało, że c winna być stałą uniwersalną, a C może zmieniać się od jednej serii pomiarów do drugiej, dla danej długości fali promieniowania, mając stałą wartość dla całej danej serii²⁰. W odpowiednich zależnościach uzyskanych eksperymentalnie występowała zmiana zarówno c jak i C wraz ze zmianą długości fali²¹. Było to niezgodne z prawem Wiena dla rozkładu energii promieniowania w widmie. Należało więc wątpić o prawidłowości wzoru Wiena, jeśli dane eksperymentalne były poprawne. Ze względu jednak na trudności w realizacji eksperymentu można było wątpić także i o prawidłowości tych danych. Należało więc, przede wszystkim, ulepszyć metodę badawczą i powtórzyć eksperymenty. Tą drogą poszli O. Lummer i E. Pringsheim, dążąc przy tym do rozszerzenia zakresu długości fal badanego widma promieniowania.

W roku 1900 zakończyli wreszcie badania i podali do publicznej wiadomości ich rezultaty²². Porównanie nowych wyników z danymi z wzoru Wiena dało wyraźną rozbieżność rezultatów eksperymentalnych z rezultatami teorii. Identyczne stwierdzenie podali inni autorzy, H. Rubens i F. Kurlbaum, którzy rozpoczęli nieco później analogiczne badania²³.

Powstała więc sytuacja, w której prawo Rayleigha-Jeansa jawnie nie zgadzało się z rezultatami eksperymentu, a wzór Wiena nieco zmieniony przez M. Plancka, wzór Wiena-Plancka²⁴, w zasadzie opisujący z dość dużym jakościowym podobieństwem dane eksperymentu, nie dawał dokładnego ich opisu. Ujawniła się wyraźna sprzeczność, do usunięcia której zabrał się M. Planck.

2. FORMUŁA M. PLANCKA NA ROZKŁAD ENERGII W WIDMIE PROMIENIOWANIA

Max Planck przystąpił do modyfikacji wyrażenia na gęstość widmową promieniowania obiektu doskonale czarnego. Początkowo modyfikacja ta miała charakter zupełnie empiryczny, o czym pisze on²⁵: „Podczas posiedzenia Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w dniu 19 października 1900 roku Kurlbaum zakomunikował mi o rezultatach wykonanych przez niego, razem z Rubensem, pomiarów energii, z których wynika, że ze wzrostem temperatury intensywność promieniowania obiektu doskonale czarnego jest zawsze proporcjonalna do temperatury T , co jest jawnie sprzeczne z prawem rozkładu Wiena, według którego intensywność winna być stała. Rezultat ten autorzy przekazali mi ustnie na kilka dni przed posiedzeniem. Miałem więc jeszcze czas do posiedzenia przeanalizować wynikające z tego rezultatu wnio-

²⁰ W. Wien: *Ueber die Energieverteilung...* jw.; M. Planck, *Ueber irreversible...* 1900 jw.

²¹ O. Lummer, E. Pringsheim: *Die Verteilung...* T. 1 s. 23.

²² Tamże T. 2 s. 163.

²³ H. Rubens, F. Kurlbaum: *Anwendung der Methode der Reststrahlen zur Prüfung des Strahlungsgesetzes.* „Ann. d. Phys.” T. 4:1901 s. 649.

²⁴ W. Wien: *Ueber die Energieverteilung...* jw.; M. Planck: *Ueber irreversible...* 1900 jw.

²⁵ M. Planck: *Zur Geschichte der Auffindung der physikalischen Wirkungsquantum.* W: *Vorträge und Erinnerungen.* Stuttgart 1949. Springer Vlg. s. 22–23; „Naturwiss. T. 31:1943 s. 153.

ski, stosując swoją metodę, a następnie wykorzystać je do obliczenia entropii zbioru oscylatorów”.

Po zastosowaniu prostej procedury rachunkowej otrzymał on następującą formułę na gęstość widmową promieniowania:

$$E_{\lambda} \approx \lambda^{-5} \left(e^{\frac{b}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}. \quad (8)$$

w formule tej b jest pewną stałą nieokreśloną.

O rezultacie tym Planck zakomunikował na posiedzeniu Niemieckiego Towarzystwa Fizycznego w dniu 19 października 1900 roku²⁶, komunikat nosił tytuł *Ueber eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung. (O udoskonaleniu równania spektralnego Wiena)*. W wykładzie zaczyna on od analizy rezultatów prac eksperymentalnych Lummera i Pringsheima, Kurlbauma i Rubensa i Paschena. Dochodzi do wniosku, że formuła Wiena określająca rozkład energii w widmie ma charakter empiryczny i nie stanowi prawa ogólnego. W pracy natomiast z marca 1900 roku²⁷ *Entropie und Temperatur strahlender Wärme (Entropia i Temperatura ciepła promieniującego)*, powołując się na najnowsze dane Paschena, Lummera i Pringsheima z eksperymentów przeprowadzonych w zakresie widma w rozszerzonym na obszar fal dłuższych²⁸ i stwierdzając rozbieżność wzoru Wiena z danymi eksperymentów, stwierdza, przypominając także wypowiedź M. Thiesena²⁹: „Podczas gdy prawo Wiena w istocie swojej zostało potwierdzone rezultatami obserwacji Paschena³⁰, O Lummer i E. Pringsheim³¹ w swoich pomiarach rozszerzonych na większe długości fal stwierdzili rozbieżność tak ważnej natury, że M. Thiesen³² z tego powodu napisał — wzór Wiena dla intensywności promieniowania o pewnej określonej długości fali winien być zastąpiony przez inny wzór, który z jednej strony będzie dostatecznie odpowiadał prawu Stefana-Boltzmanna promieniowania całkowitego i ugruntowanemu przez termodynamikę tak zwanemu prawu przesunięć, z drugiej zaś będzie opisywał z większą dokładnością rezultaty pomiarów Lummera i Pringsheima”³³.

W cytacie tym zawarty jest program dalszego działania w kierunku ustalenia prawa promieniowania obiektu doskonale czarnego. Praca ta poprzedziła komunikat o empirycznym wzorze Plancka³⁴. Można znaleźć w niej fizyczne podstawy teorii, na gruncie której M. Planck uzasadnił następnie wzór uzyskany przez zastosowanie pewnego rodzaju interpolacji.

Formułę M. Plancka sprawdzono natychmiast przez porównanie z danymi z eksperymentów. M. Planck pisze o tym³⁵: „W dniu

²⁶ M. Planck: *Ueber eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung*. „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 2:1900 s. 202.

²⁷ M. Planck: *Entropie und Temperatur strahlender Wärme* „Ann. d. Phys.” T. 1:1900 s. 719.

²⁸ O. Lummer, E. Pringsheim, „Verh. d. Deutsch Phys. Ges.” T. 1:1899 s. 215.

²⁹ M. Thiesen, „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 2:1900 s. 37.

³⁰ P. Paschen, dz. cyt.

³¹ O. Lummer, E. Pringsheim, „Verh. d. Deutsch Phys. Ges.” T. 1:1899 s. 215.

³² M. Thiesen, dz. cyt.

³³ M. Planck, *Entropie und Temperatur...* jw.

³⁴ M. Planck, *Ueber eine Verbesserung...* jw.

³⁵ M. Planck, *Zur Geschichte...* jw.

następnym, rankiem, odszukał mnie kolega Rubens i opowiedział mi, że po zakończeniu posiedzenia, późną nocą, porównał mój wzór z rezultatami swoich pomiarów i w całym zakresie stwierdził pocieszającą zgodność. Tak samo Lummer i Pringsheim, którzy pierwotnie myśleli, że ustalili odchylenia, wkrótce odwołali swoje sprzeciwy, ponieważ jak przekazał mi ustnie Pringsheim, znalezione odchylenia wynikły z błędów w obliczeniach.

Wzór podany przez M. Plancka³⁶ chociaż dobrze opisywał rezultaty eksperymentu, nie był głęboko uzasadniony fizycznie, był po prostu, jak później wyraził się Planck, „szczęśliwie znalezionym wzorem interpolacyjnym”³⁷. Wynikł problem znalezienia prawdziwego sensu fizycznego wzoru.

M. Planck niezwłocznie przystąpił do rozwiązania zadania, rozpatrując związek między entropią i prawdopodobieństwem termodynamicznym³⁸. Zagadnienie takiego związku rozpatrywał już wcześniej L. Boltzmann³⁹. M. Planck kontynuował tę ideę. Boltzmann otrzymał wzór dla związku entropii S z prawdopodobieństwem termodynamicznym W w postaci $S = \text{const.} \cdot W$. Planck znalazł wyrażenie $S = k \ln W$. L. Boltzmann pokazał, że entropia pewnego stanu jest miarą prawdopodobieństwa zrealizowania tego stanu. Z drugiej strony prawdopodobieństwo to można łatwo określić obliczając liczbę różnych kombinacji mikroobiektów będących w równowadze ze stanem całego ich zbioru i przy założeniu, że różne mikrokombinacje są jednakowo prawdopodobne. W interesującym nas przypadku mikroobiektami są oscylatory harmoniczne. Okazało się jednak, że zrealizować taki sposób podliczania można tylko wówczas, jeśli energia oscylatorów może mieć wartości nie ciągle lecz dyskretne, krotne pewnej podstawowej porcji energii E . Tak więc, winno być $U = n \cdot E$, gdzie n — dowolna liczba naturalna. Gdy M. Planck przyjął takie założenie, to okazało się, że entropia S zależy od U przez stosunek U/E , nie zaś bezpośrednio od U . Jeżeli więc wziąć pod uwagę wzór Wiena $U = A \nu^{-B \nu/T}$ i zależność między entropią i energią oscylatora, przy stałej objętości obszaru,

$S = U/T$, to otrzymuje się $S = -U/B \nu \cdot \ln U/A \nu = f\left(\frac{U}{\nu}\right)$, gdzie ν ozna-

cza częstość drgań oscylatora. Tak więc, należy założyć $nE/\nu = \text{const}$ i $E = \nu \cdot \text{const}$. Stałą oznaczamy przez h i otrzymujemy

$$E = h\nu, U = nh \cdot \nu, n = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

Należy zatem przyjąć, że energia oscylatora winna być całkowitą krotnością pewnej podstawowej porcji energii, proporcjonalnej do częstości drgań oscylatora. Po zastosowaniu takiego założenia prawo promieniowania obiektu doskonale czarnego przybiera postać

³⁶ M. Planck, *Ueber eine Verbesserung...* jw.

³⁷ M. Planck, *Zur Geschichte...* jw.

³⁸ L. Boltzmann: *Ueber eine von Herrn Bartoli entdeckte Beziehung der Wärmestrahlung zum zweiten Hauptsatze.* „Ann. d. Phys.” T. 22:1884 s. 31.

³⁹ L. Boltzmann: *Ueber das Arbeitsquantum, welches bei chemischen Verbindungen gewonnen werden kann.* „Ann. d. Phys.” T. 22: 1884 s. 39; L. Boltzmann: *Ableitung des Stefan'schen Gesetzes.* „Ann. d. Phys.” T. 22: 1884 s. 291.; L. Boltzmann: *Vorlesungen über Gastheorie.* Barth. Leipzig 1896. I Teil 1896, II Teil 1898, 1923 3 Aufl. (I u. II Teil); L. Boltzmann, „Wien. Berichte” T. 76:1877 s. 373.

$$E_{\lambda} = \frac{8\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad (10)$$

gdzie h — tak zwana stała Plancka, k — stała Boltzmann, a c — prędkość światła.

Wyrażenie (10) w zadziwiająco dokładny sposób opisuje dane eksperymentalne. Przy małych wartościach temperatur lub długościach fal przechodzi ono w znany wzór Wiena, przy dużych zaś wartościach we wzór Rayleigha-Jeansa. Zgodność tę osiągnięto jednak kosztem wprowadzenia założenia zupełnie obcego duchowi fizyki klasycznej: w pewnych układach energia nie może mieć dowolnych wartości ciągłych. Układy takie, innymi słowy, nie mogą wymieniać między sobą energii w sposób dowolny. Mogą one natomiast wymieniać między sobą i z otoczeniem energię tylko dyskretnymi porcjami — kwantami⁴⁰. Obliczona przez M. Plancka wartość stałej wynosiła $h = 6,55 \cdot 10^{-27}$ erg.sek. Wartość ta bliska jest dziś nam znanej. Miano stałej — erg.sek. — jest takie samo jak miano działania.

3. EFEKTY KWANTOWE W RÓŻNYCH ZJAWISKACH FIZYCZNYCH

W ciągu lat około pięciu od wprowadzenia przez M. Plancka do fizyki pojęcia „kwant energii” nie pojawiły się żadne idee, które pojęcie to rozszerzałyby lub nadawałyby mu sens szerszy. Jak później opisał Planck⁴¹, wrażenie jakie wywołała jego praca było równe „zeru”. Nie doczekał się on pozytywnych opinii o swoim dziele od uczonych, których idee naprowadziły go na drogę rozwiązania problemu. G. Kirchhoff znalazł tylko błąd w pracy, Helmholtz milczał, Klausius nie odpowiadał na listy i nie znalazł czasu na spotkanie⁴².

Pojęcie kwantu energii wprowadzone w celu opisania jednego z możliwych zachowań się oscylatora jako modelu źródła promieniowania w ciągu lat pięciu nie było przez nikogo wzbogacone. Nie był także przez nikogo podważany fakt doskonałej zgodności wzoru Plancka z eksperymentem. Nie było jednak jawnie stwierdzone, że kwanty energii są istotnie nowym elementem w fizyce, nie mieszczącym się w ramach pojęć fizyki klasycznej. Dopiero w latach 1905—1906 pojawiły się w druku rezultaty badań A. Einsteina (1875—1955)⁴³ i P. Ehrenfesta (1880—1933)⁴⁴, dotyczące teorii M. Plancka. W tych właśnie pracach jasno stwierdzono, że pojęcie „kwant energii” nie mieści się w ramach fizyki klasycznej.

W pierwszej swojej pracy dotyczącej problemu kwantu energii⁴⁵, A. Einstein pokazał, że z elektrodynamiki klasycznej wynika tylko

⁴⁰ M. Planck: *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*. „Ann. d. Phys.” T. 4:1901 s. 553; M. Planck: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*. „Verh. d. Deutsch. Phys. Ges.” T. 2:1900 s. 237.

⁴¹ M. Planck, *Zur Geschichte...*

⁴² B. Cline, dz. cyt.

⁴³ A. Einstein: *Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. „Ann. d. Phys.” T. 17: 1905 s. 139; A. Einstein: *Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption*. „Ann. d. Phys.” T. 20:1906 s. 199.

⁴⁴ P. Ehrenfest: *Zur Planckschen Strahlungstheorie*. „Phys. Zs.” T. 7: 1906 s. 528.

⁴⁵ A. Einstein: *Ueber einen die Erzeugung... jw.*

wzór Rayleigha-Jeansa i wywnioskował, że dlatego elektrodynamika nie zgadza się z danymi eksperymentalnymi dotyczącymi promienienia obiektu doskonale czarnego. W pracy tej Einstein wyprowadza pojęcie kwantu energii światła, niezależnie od kwantu energii M. Plancka, niezależnie od problemu obiektu doskonale czarnego. Pojęcie kwantu świetlnego wprowadził dla objaśnienia zjawiska fotoelektrycznego.

Następnie hipoteza o kwantach energii znalazła potwierdzenie w różnych obserwowalnych procesach — w zjawisku Comptona, w procesach zderzenia elektronów z atomami.

Odkrycie kwantu energii było odkryciem na miarę odkryć Kopernika, Newtona i Einsteina. Bez tego odkrycia nie do pomyślenia byłby rozwój dzisiejszej elektroniki, energetyki i techniki jądrowej, technologii materiałów, chemii, nie byłoby zatem ani szybkiej komunikacji lotniczej, ani lotów kosmicznych.

Tak, 75 lat temu, w sposób cichy, bez rozgłosu weszła do fizyki nowa fundamentalna stała przyrody — stała h — której odkrycie spowodowało radykalne zmiany w naszych poglądach na otaczający nas świat i zapoczątkowało erę burzliwego rozwoju współczesnego przemysłu.

3. Стругальски

НА 75-ЛЕТИЕ ВЕЛИКОГО ОТКРЫТИЯ МАКСА ПЛАНКА ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ПОСТОЯННАЯ ПРИРОДЫ h

В статье представлена история открытия Максом Планком фундаментальной постоянной природы h .

На основании просмотра и анализа соответствующей оригинальной научной литературы показано развитие науки о изучении абсолютно черного тела — первоначально основных теоретических исследований, а следовательно и экспериментальных работ.

Описано развитие теории изучения абсолютно черного тела, базирующей на основе классической электродинамики и термодинамики, показано принципиальное разногласие между результатами этой теории и соответствующих экспериментов.

Начерчен путь решения Максом Планком этого несогласия и дано обоснование необходимости выйти при решении вопроса за рамки классической физики, и введения фундаментальной постоянной природы h .

Кратко представлено влияние открытия на развитие науки и техники. По случаю 75 летия открытия приведена краткая характеристика личности Макса Планка.

Z. Strugalski

75-TH ANNIVERSARY OF THE BIG DISCOVERY BY MAX PLANCK THE FUNDAMENTAL CONSTANT OF NATURE h .

In this paper the history of the discovery by Max Planck the fundamental constant of Nature h is presented.

The development of the idea of the black body radiation has been presented on the basis of survey and analysis of the original experimental and theoretical scientific works.

The evolution of the black body theory is described in its version based on classical electrodynamics and thermodynamics. The contradiction between theoretical and experimental results in the frame of classical theory is shown.

The way of elimination of this contradiction applied in the Max Planck papers is sketched, and the necessity to go outside of the classical physics frame, involving the new constant h , is presented in attempts to solve this problem.

Shortly, the consequences of this discovery for future development of science and technics is shown. A short biography of Max Planck is written.