

TS: Dzień dobry Pani. Czy wie Pani, dlaczego rozgrzane przedmioty świecą?

MT: Dzień dobry. Słucham? Może rzeczywiście jest to ciekawe pytanie, ale przecież mieliśmy rozmawiać o narodzinach mechaniki kwantowej. O rozgrzanych przedmiotach porozmawiajmy kiedy indziej, dobrze? Bo ja bardzo chciałabym się dowiedzieć, co z tą mechaniką kwantową. To takie tajemnicze.

TS: Pewnie Panią to zdziwi, ale właśnie od tego pytania o rozgrzane przedmioty należy rozpocząć opowieść o mechanice kwantowej. Właśnie to pytanie stało się jednym z jej fundamentów.

MT: No to ja chyba znowu czegoś nie rozumiem. Zamieniam się zatem w słuch.

TS: Musimy wrócić do fizyki z końca XIX wieku. Jak już sobie tłumaczyliśmy (MT 4/06), mniej więcej wtedy Maxwell skompletował prawa elektromagnetyzmu, które były wielkim triumfem nauki. Okazało się bowiem, że oprócz uporządkowania wie-



O fizyce opowiada Tomasz Sowiński.

W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej. Obecnie jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN.

Z zamilowania zajmuje się popularyzacją nauki. W roku 2005 był nominowany do nagrody w konkursie Popularyzator Nauki organizowanym przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji oraz Polską Agencję Prasową.

Jak świecenie ciał doprowadziło do absurdu?

dzy na temat różnych zjawisk elektrycznych i magnetycznych, pozwoliły one również przewidzieć pewne zjawiska.

MT: Tak, pamiętam! Maxwell przewidział istnienie fal elektromagnetycznych.

TS: Fale elektromagnetyczne, czyli zaburzenia pola elektrycznego i magnetycznego, mogą rozchodzić się w przestrzeni. Jak wynika z równań Maxwella prędkość ich rozchodzenia jest równa znanej już w tamtych czasach prędkości rozchodzenia się światła. To sugerowało, że również światło jest falą elektromagnetyczną, tylko o odpowiedniej (dużej) częstotliwości.

MT: Z tego, co pamiętam, to ta obserwacja doprowadziła do doświadczenia Michelsona-Morleya, które stało się fundamentem teorii względności.

TS: Tak. Rzeczywiście zwrócenie uwagi na fakt, że światło jest falą elektromagnetyczną, doprowadziło najpierw do teoretycznego wprowadzenia koncepcji eteru (ośrodka, w którym miały się rozchodzić fale elektromagnetyczne). Następnie poprzez niespodziewany wynik doświadczenia Michelsona-Morleya doprowadziło do obalenia tej koncepcji i w konsekwencji do powstania teorii względności. Ale teraz nie tym kierunkiem badań będziemy się zajmować.

MT: To po co ten temat wspominamy?

TS: Zastanówmy się przez chwilę, jak wg teorii Maxwella mogą powstawać fale elektromagnetyczne. Skoro światło jest falą elektromagnetyczną, to odpowiedź na to pytanie również nam powie, skąd bierze się światło.

MT: Wiem, że są, ale nie wiem, skąd biorą się fale elektromagnetyczne.

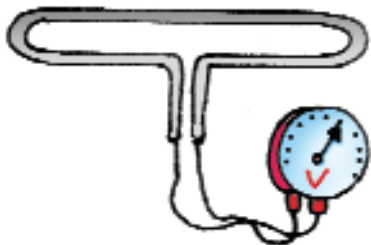
TS: Jak wynika z jednego z praw Maxwella, jedynym źródłem pola elektrycznego mogą być ładunki elektryczne. Gdy ładunki te spoczywają, to wytwarzają statyczne (czyli niezmiennające się w czasie) pole elektryczne. Jednak jeśli tylko taki ładunek zaczyna się poruszać ze zmienną prędkością, to natychmiast wytwarza zmienne pole elektryczne, które (jak wynika z innego prawa Maxwella) wytwarza zmienne pole magnetyczne. To z kolei wytwarza zmienne pole elektryczne. Tak powstaje fala elektromagnetyczna, która rozchodzi się w przestrzeni.

MT: Źródłem fali elektromagnetycznej jest zatem poruszający się ładunek elektryczny?

TS: Dokładnie tak. Tak właśnie dzieje się np. w nadajnikach radiowo-telewizyjnych. Taki nadajnik to nic innego jak długi przewód, w którym ze względu na przyłożone zmienne napięcie elektryczne przemieszczają się ładunki z jednego końca na drugi. Te poruszające się ładunki wytwarzają falę elektromagnetyczną, która rozchodzi się w przestrzeni. Gdy fala ta trafi na antenę odbiorczą, powoduje przemieszczanie się w niej swobodnych ładunków. Na końcach anteny pojawia się zmienne napięcie – sygnał został odczytany. W ten sposób Hertz odkrył istnienie fal elektromagnetycznych.

MT: Rozumiem, ale jaki to ma związek ze świeceniem ciał?





TS: Za chwilę do tego dojdziemy. Zastanówmy się jednak jeszcze przez chwilę, czy można w ten sposób wytworzyć światło!

MT: A można? Skoro światło to też fala elektromagnetyczna, to nie powinno być żadnych przeciwwskazań.

TS: Tak, rzeczywiście. Ale problem nie jest w tym, że teoretycznie nie jest to możliwe, ale w tym, że w praktyce jest to bardzo trudne.

MT: Dlaczego?

TS: Światło to fale elektromagnetyczne, które mają bardzo małą długość w porównaniu np. z falami radiowymi. Fala radiowa może mieć długość na przykład od jednego metra aż do kilku kilometrów. Światło to fala elektromagnetyczna, której długość jest rzędu kilkuset nanometrów, tzn. kilku dziesięciotysięcznych części milimetra! Jeśli dodamy do tego, że aby efektywnie wytwarzać fale elektromagnetyczne o danej długości, antena nadawcza musi być mniej więcej takiej wielkości jak długość wytwarzanej fali, to już widzimy, na czym polega problem. Musielibyśmy zbudować antenę, która jest dużo mniejsza niż średnica ludzkiego włosa.

MT: To rzeczywiście wydaje się niewykonalne. Ale jednak światło istnieje. No przecież je widzimy.

TS: No właśnie. Trzeba oczywiście zdać sobie sprawę, że większość światła, które widzimy, jest światłem dobitym od różnych obiektów. Dzięki temu właśnie widzimy różne przedmioty. Jednak gdzieś to światło musi powstawać. Jacyś kandydaci?

MT: W dzień oczywiście Słońce. A w nocy np. żarówka albo świeczka.

TS: Brawo. To teraz pozostaje wytłumaczyć, dlaczego te rzeczy świecą. Czy ma Pani jakiś pomysł?

MT: No, żarówka świeci, bo płynie przez nią prąd.

TS: No tak, to prawda. Ale to jest tylko przyczyna pośrednia. Natomiast przyczyną bezpośrednią świecenia przedmiotów jest to, że są one nagrzane do odpowiednio wysokiej temperatury. Np. na skutek przepływu prądu włókno żarówki, które najczęściej jest zrobione z wolframu, nagrzewa się do bardzo wysokiej temperatury. Słońce nagrzewa się natomiast, tak jak to sobie wytłumaczyliśmy w poprzednim numerze, dzięki reakcjom termojądrowym zachodzącym w jego jądrze.

MT: Krótko mówiąc, przedmioty świecą, bo są gorące?

TS: Dokładnie tak! Dodatkowo zdumiewającym faktem jest to, że przedmioty o tej samej temperaturze, choćby były wykonane z zupełnie różnych materiałów, świecą prawie identycznie. To oznacza, że świecenie ciała pod wpływem temperatury ma charakter uniwersalny.

MT: Słucham? Chce Pan powiedzieć, że żelazo o pewnej temperaturze świeci tak samo jak zupa, która ma tę samą temperaturę? To chyba jakiś żart.

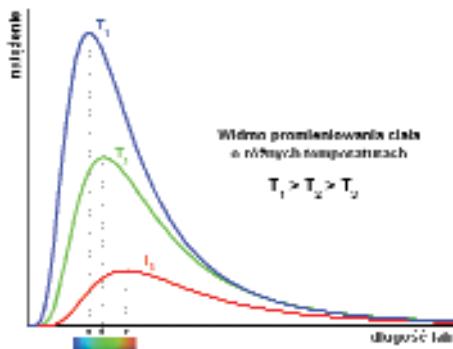
TS: To rzeczywiście wygląda bardzo dziwnie. Ale tak jest w rzeczywistości. Oczywiście troszkę charakter tego promieniowania jest inny, ale można powiedzieć z dużą dokładnością, że oba ciała będą promieniowały tak samo.

MT: Czy może Pan to dokładniej wytłumaczyć?

TS: Spróbujmy. Gdy patrzymy na rozgrzany przedmiot, to widzimy światło, które on wysyła. Okazuje się jednak, że takie rozgrzane ciało nie świeci tylko i wyłącznie w promieniowaniu widzialnym, ale we wszystkich możliwych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Tzn. gdybyśmy umieli obserwować promieniowanie elektromagnetyczne o różnych długościach fali, to zauważylibyśmy, że każde ciało wysyła promieniowanie o każdej możliwej długości fali. Oczywiście jest tak, że w różnych długościach promieniowania ciało świeci z różnym natężeniem. Jednego promieniowania jest więcej, a innego mniej.

MT: Hm... bardzo ciekawe. A którego promieniowania jest najwięcej?

TS: A to już nie jest takie oczywiste. To właśnie zależy od tego, jaką temperaturę ma ciało, które świeci. Najlepiej zobaczyć to na schematycznym wykresie poniżej.



Wykres ten przedstawia schematycznie natężenie promieniowania wysyłanego przez rozgrzane ciała, o trzech różnych temperaturach, w zależności od długości fali. Widzimy, że każdy z tych wykresów ma charakterystyczny kształt i osiąga maksimum dla pewnej konkretnej długości fali. To właśnie promieniowania o takiej długości ciało wysyła najwięcej. Pod wykresem zaznaczone jest widmo promieniowania widzialnego, które jest po prostu pewnym niewielkim zakresem promieniowania elektromagnetycznego o różnych długościach. Z wykresu ewidentnie widać, że gdy temperatura ciała wzrasta, to maksimum krzywej opisującej natę-



WYRÓB MAŁYCH ANTEN



żenie promieniowania o danej długości fali przesuwają się w kierunku fal krótszych (tzn. ku fioletowi). To oznacza, że im ciało ma większą temperaturę, tym będzie świeciło w kolorze bardziej niebieskim.

MT: No dobrze, ale przecież ciała o niskich temperaturach nie świecą. Trzeba je rozgrzać, aby tak było.

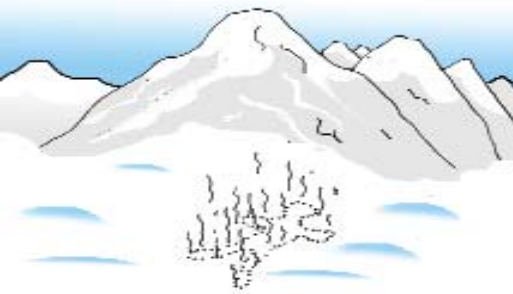
TS: Nie jest to do końca prawda. Każde ciało, które ma ustaloną temperaturę, wysyła promieniowanie elektromagnetyczne. Jednak gdy jego temperatura nie jest za wysoka, to po prostu maksimum tego promieniowania występuje dla fal, które są dłuższe niż światło widzialne. Ciało świeci wtedy po prostu w promieniowaniu podczerwonym. Np. człowiek, którego temperatura to ok. 37°C, wysyła najwięcej promieniowania w podczerwieni – promieniowaniu elektromagnetycznym, którego długość jest troszkę większa niż długość widzialnego światła czerwonego.

MT: Chce Pan powiedzieć, że człowiek świeci?

TS: Oczywiście, że człowiek świeci. Dzieje się to jednak głównie w takim zakresie promieniowania, którego nie rejestruje ludzkie oko. Ale istnieją urządzenia, które mogą to zrobić. Wykorzystuje się je np. w kamerach termowizyjnych. Dzięki nim można np. odnaleźć w nocy człowieka, który zasnął w lesie albo którego przysypał śnieg w górach.

MT: Niesamowicie. A jaką temperaturę musi mieć cało, aby np. świecić na zielono?

TS: Aby maksimum promieniowania przypadało na kolor zielony, ciało powinno mieć temperaturę ok. 6000°C. Taką temperaturę ma np. powierzchnia naszej gwiazdy, Słońca.



MT: Co??? Słońce świeci na zielono? To jakiś absurd.

TS: Tak. Maksimum natężenia promieniowania dochodzącego do nas ze Słońca przypada w okolicach koloru zielonego. Nie należy jednak zapominać, że Słońce świeci również we wszystkich innych kolorach. Nasze oko jest zbudowane tak, że na kolory bliższe czerwonego reaguje bardziej niż na kolory bliższe niebieskiego. To dlatego wydaje nam się, że Słońce ma pomarańczowożółty kolor. Naprawdę świeci głównie w kolorze zielonym. To zresztą chyba nie przypadek, że wszystkie rośliny są zielone. Po prostu ewolucyjnie został wybrany taki barwnik, który odbija najwięcej promieniowania w kolorze, w którym Słońce najintensywniej świeci.

MT: Bardzo ciekawe. To rzeczywiście niesamowite. Ale właściwie jaki to ma związek z mechaniką kwantową?

TS: Tu właśnie czas najwyższy wrócić do praw Maxwella. Otóż cała sprawa polega na tym, że pod ko-



niec XIX wieku ludzie nie wiedzieli, jak wytłumaczyć to fenomenalne zjawisko, że ciała właśnie tak świecą.

MT: Jak to? Przecież już mi Pan powiedział, że fale elektromagnetyczne powstają w wyniku ruchu ładunków elektrycznych w antenie.

TS: Tak, ale przypominam, że aby wytwarzanie fal było efektywne, to antena musi mieć rozmiary porównywalne z długością fali. Zatem nie ma mowy, że ciała mają wbudowane jakieś mikroskopowo małe antenki. To zresztą brzmi już całkiem śmiesznie, prawda?

MT: Tak. To rzeczywiście troszkę śmieszne.

Ale czy nie można tego jakoś inaczej wytłumaczyć?

TS: W ramach teorii Maxwella jest jeszcze tylko jedna możliwość. Właściwie jakościowo nie różni się ona niczym od promieniowania anteny. Jedyna różnica jest taka, że anteny nie ma.

MT: Zamieniam się w słuch.

TS: Ludzie już dość dawno zdawali sobie sprawę, że wraz ze wzrostem temperatury ciał rośnie chaotyczny ruch cząsteczek, z których one się składają. Temperatura okazała się niczym innym jak pewną miarą tego, jak bardzo chaotycznie poruszają się drobiniki materii w danym ciele. W ten sposób było można np. wytłumaczyć dlaczego ciepło przepływa z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej. Po prostu ruchliwe cząsteczki ciała gorętszego przekazywały część swojego ruchu wolnym cząsteczkom ciała zimniejszego. Wiele jeszcze innych zjawisk dawało się tak właśnie uzasadnić. Był to też naturalny kandydat do powodu, dla którego promieniają ciała.

MT: Zatem jak można wytłumaczyć problem promieniowania?

TS: Jeśli przyjmijemy, że w każdym ciele są jakieś swobodne ładunki elektryczne (a wszystkie doświadczenia wskazywały, że tak właśnie jest) to, ze względu na niezerową temperaturę ciała, ładunki te będą się poruszały w sposób chaotyczny. A skoro ładunki się poruszają, to wytwarzają promieniowanie elektromagnetyczne. Z praw Maxwella można dokładnie przewidzieć, jak będzie zależało natężenie tego promieniowania od długości fali przy danej temperaturze ciała.

MT: Co zatem mówi teoria Maxwella?

TS: Oczywiście problem jest bardzo skomplikowany, bo każde ciało jest inne i będzie troszkę inaczej świecić. Fizycy stworzyli jednak pewien model ciał, który potrafili dokładnie opisać w teorii Maxwella. Model ten nazywa się modelem CIAŁA DOSKONAŁE CZARNEGO. Otóż okazuje się, że gdyby istniało ciało, które pochłania 100% każdego promieniowania, jakie na nie pada, to wtedy potrafimy wyliczyć z teorii Maxwella, jak będzie wyglądała zależność natężenia od długości fali promieniowania wysyłanego przez takie ciało. Okazuje się bowiem, że świecenie termiczne ciał jest bardzo blisko związane z efektem dokładnie odwrot-

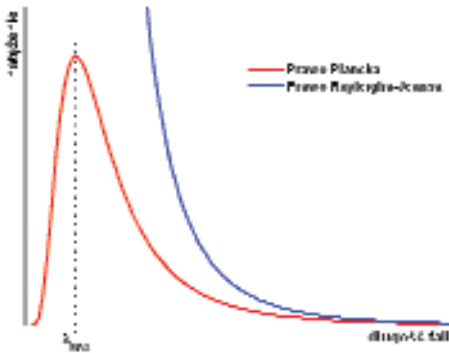
MODEL CIAŁA CZARNEGO



nym, tzn. pochłanianiem światła. Ciała rzeczywiste oczywiście nie są doskonale czarne i dlatego będą miały trochę zmodyfikowaną tę zależność. Generalnie jednak jej charakter będzie taki sam.

MT: No dobrze. Czyli zatem teoria Maxwella potrafi opisać zjawisko świecenia ciał. Gdzie zatem problem?

TS: Problem jest w tym, że przewidywanie teorii Maxwella ma się nijak do tego, co obserwujemy w rzeczywistości. Sposób, w jaki świeci ciało doskonale czarne wg teorii Maxwella znane jest jako prawo Rayleigha–Jeansa. Zależność natężenia promieniowania od długości fali wg tego prawa przedstawiona jest na poniższym wykresie kolorem niebieskim.



Ewidencją z tego wykresu widać, że prawo że opisuje promieniowanie ciał. Nie ma nawet charakterystycznego maksimum, które (jak sobie powiedzieliśmy wcześniej) jest odpowiedzialne za kolor, jaki widzimy, promieniującego ciała. Ale okazuje się, że jest jeszcze gorzej. Jak widać na wykresie, gdy zbliżamy się do fal bardzo krótkich, to krzywa wynikająca z prawa Rayleigha–Jeansa dąży do nieskończoności bardzo szybko. To znaczy po prostu, że natężenie promieniowania wysyłane w falach bardzo krótkich zawsze powinno dominować nad innymi. Z doświadczenia wiemy, że jest inaczej. Np. w promieniowaniu człowieka dominuje przecież promieniowanie podczerwone! Jakby tego wszystkiego było mało, okazuje się, że gdy policzymy całą moc promieniowania, jakie wysyła ciało wg prawa R–J, to jest ona nieskończona. Krótko mówiąc, z teorii Maxwella wynika, że ciało doskonale czarne wysyła nieskończoną ilość energii w każdej jednostce czasu. Jest to w oczywisty sposób nonsens.

MT: Może zatem ten model ciała czarnego jest bezsensowny.

TS: W pewnym momencie ludzie też tak myśleli. Ale z doświadczenia wiemy, że istnieją w przyrodzie ciała prawie doskonale czarne. Ich widmo właściwie niczym nie różni się od widm innych ciał. Jest zatem bardzo wątpliwe, aby ciało doskonale czarne promieniowało w sposób zupełnie inny. Tym bardziej, że prawa Maxwella są uniwersalne i nie zależą od tego, czy ciało jest czarne, czy białe.

MT: Zatem mamy problem. Jak on został rozwiązany?

TS: Rzeczywiście sprawa wydaje się beznadziejna. Bo wydaje się, że jedynym sposobem usunięcia

problemu jest zmiana praw Maxwella, które, jak wiemy, doskonale opisują wszystkie zjawiska elektromagnetyczne.

W roku 1900 mało znany wówczas fizyk Max Planck znalazł jednak furtkę wiodącą do rozwiązania tego problemu. Furtka ta była bardzo przewrotną konstrukcją myślową.

Max Planck zauważył, że promieniowanie ciała doskonale czarnego można wytłumaczyć w ramach teorii Maxwella, jeśli się dokona jednego, wydawałoby się, mało znaczącego, założenia. Jeśli założymy bowiem, że promieniowanie, które jest emitowane przez rozgrzane ciało, nie jest wysyłane w sposób ciągły, ale małymi porcjami, to wszystko będzie się zgadzać.

MT: Słucham? Czy może Pan to jaśniej wytłumaczyć?

TS: Otóż ciągle zakładaliśmy, że ciało wysyła fale elektromagnetyczne o różnych długościach. Jeśli założymy, że ciało nie wysyła fal, ale małe porcje energii, to wszystko się będzie zgadzać. Wystarczy założyć, że energia takiej pojedynczej porcji jest odwrotnie proporcjonalna do długości emitowanego promieniowania, a wszystko będzie się zgadzało.

MT: No chwileczkę. Co to w ogóle za pomysł? Mówi Pan, że ciało wysyła fale elektromagnetyczne, ale jak chce Pan wytłumaczyć dlaczego, to mówi Pan, że to nie fale, tylko małe porcje energii. To tak, jakby chcieć wytłumaczyć, że jedzie samochód, bo ciągną go niewidzialne konie.

TS: Rzeczywiście to tak wygląda na pierwszy rzut oka. Sam Planck myślał, że to tylko taka sztuczka, która dobrze tłumaczy to zjawisko, a przyczyna musi być zupełnie inna. Faktem jest jednak, że jak się przyjęło założenie Plancka, to zgodność z obserwacjami jest zdumiewająca. Zależność, którą Planck otrzymał, wykorzystując swoje założenie, przedstawiona jest na wykresie kolorem czerwonym. Jest to dokładnie taka zależność, jakiej oczekujemy od charakterystyki promieniowania ciała czarnego.

MT: Chce mi Pan powiedzieć, że promieniowanie elektromagnetyczne to fala, która nie jest falą, tylko zbiorem małych porcji energii?

TS: No, można tak powiedzieć. Fizycy nazywają to DUALIZMEM KORPUSKULARNO-FALOWYM. Okazuje się po prostu, że w niektórych eksperymentach promieniowanie elektromagnetyczne zachowuje się jak fala, a w niektórych (tak jak promieniowanie ciała czarnego) zachowuje się jak zbiór małych cząstek.

MT: No dobrze, ale jedno doświadczenie, które odbiega od normy, jeszcze o niczym nie świadczy. Może z tym ciałem czarnym jest zupełnie inaczej?

TS: Można tak oczywiście pomyśleć w pierwszej chwili. Ale okazuje się, że założenie Plancka pozwala wytłumaczyć jeszcze inne zjawiska, które wcześniej nie były poprawnie opisywane przez teorię falową Maxwella. O kolejnym fenomenalnym zjawisku, które daje się wytłumaczyć przy przyjęciu tego absurdalnego założenia, opowiemy sobie następnym razem. Pomysł Plancka miał bowiem zagorzałego zwolennika w osobie, która uwielała nieintuicyjnej konstrukcje myślowe.

MT: Czy chodzi może o Alberta Einsteina?

TS: Nie potwierdzam i nie zaprzeczam! Zapraszam za miesiąc. ●