

Przez ostatnie trzy miesiące omawialiśmy eksperymenty, które doprowadziły fizyków do przekonania, że światło jest strumieniem cząstek zwanych fotonami. Szczególnie dobitnie było to widoczne w ostatnim omówionym doświadczeniu nad rozpraszaniem światła na swobodnych elektronach. Tam jak na dłoni ujawniły się cząsteczkowe własności światła – rozpedzone fotony rozpraszają się na elektronach niczym bile na stole bilardowym. Warto podkreślić jednak fakt, że te spektakularne eksperymenty oraz nie mniej ciekawe wyjaśnienia teoretyczne były przeprowadzane dopiero na początku XX wieku. Wcześniej naukowcy, po pierwsze, nie dysponowali możliwościami, aby przeprowadzać tak dokładne eksperymenty, a po drugie, i co chyba ważniejsze, nie było żadnych przesłanek, aby takie eksperymenty robić. Wszystko dawało się lepiej lub gorzej wytłumaczyć bez odpowiedzi na podstawowe pytanie – czym jest światło?



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 zamiłowaniem 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.

Czym jest światło?

Tomasz Sowiński

NEWTONA BADANIA NAD ŚWIATŁEM

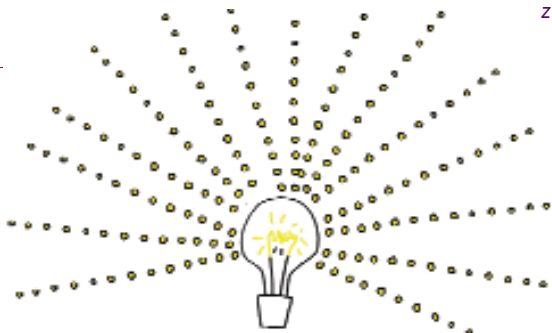
Jednym z pierwszych, który zdawał sobie sprawę z istoty tego pytania, był wielki angielski przyrodnik sir Isaac Newton, żyjący na przełomie XVII i XVIII wieku. Znamy go oczywiście najlepiej jako ojca zasad dynamiki i prawa powszechnego ciążenia. Jednak w dziedzinie badań nad światłem też mu wiele zawdzięczamy. Newton np. jako pierwszy zrozumiał, jak działa pryzmat. Do jego czasów uważano, że pryzmat jest czymś w rodzaju „magicznego przedmiotu”, który ma taką ciekawą własność, że jak się na niego odpowiednio patrzy, to widać różne kolory. Pojawianie się kolorowej tęczy na boku pryzmatu było uważane za własność pryzmatu jako przedmiotu. Dopiero Newton uświadomił sobie, że to dzięki wpadającemu z jednej strony światłu po drugiej stronie powstaje tęcza, tzn. że tęcza nie może powstać, gdy po drugiej stronie nie będą wpadały np. promienie słoneczne. To naprowadziło go na ślad, że światło słoneczne jest mieszaniną światła o różnych kolorach. Pryzmat po prostu ugina w różnym stopniu promienie światła o różnych kolorach i tym samym dochodzi do jego rozszczepienia. Newton szybko też przekonał się, że promień światła wychodzący z pryzmatu nie może już ulec dalszemu

rozszczepieniu w następnym pryzmacie. Nazwał on kolory promieni świetlnych wychodzących z pryzmatu kolorami podstawowymi. Światło o każdym kolorze składa się zatem albo z koloru podstawowego, albo jest mieszaniną promieni świetlnych o różnych kolorach podstawowych, w różnych proporcjach. W skrajnym przypadku światło białe jest mieszaniną wszystkich możliwych kolorów, mniej więcej w równych proporcjach.

Te eksperymenty nad światłem przechodzącym przez pryzmaty miały jednak uboczny efekt – dowodziły, że promień światła podstawowego (tzn. takiego, które nie ulega rozszczepieniu w pryzmacie) rozchodzi się w przestrzeni po liniach prostych, a jedynie na granicach ośrodków zmienia swój kierunek – ugina się. Obciążony mechanicznym myśleniem o przyrodzie Newton szybko postawił hipotezę: światło jest strumieniem malutkich kuleczek, które lecą jedna za drugą. Można powiedzieć, że była to pierwsza próba udzielenia odpowiedzi na pytanie, czym jest światło. Oczywiście nie było wtedy żadnego sposobu, aby sprawdzić przeczucie Newtona. Dziś status naukowy newtonowskiej hipotezy jest dokładnie taki sam, jak status hipotezy atomistycznej Demokryta. Jest uważany raczej za koncepcję filozoficzną niż naukowy fakt. Niewątpliwym chichotem historii jest jednak to, że zarówno atomy, jak i fotony, choć są zupełnie czymś innym niż były w głowach Demokryta i Newtona, naprawdę istnieją.

Isaac Newton był wielkim autorytetem we współczesnym mu świecie naukowym. Nikt nie ośmielał się podważać hipotezy Newtona, choć nie miała ona żadnego uzasadnienia doświadczalnego. Można zaryzykować stwierdzenie, że jedynym argumentem przemawiającym za tym, że światło jest strumieniem kuleczek, było to, że taką koncepcję wyznawał New-





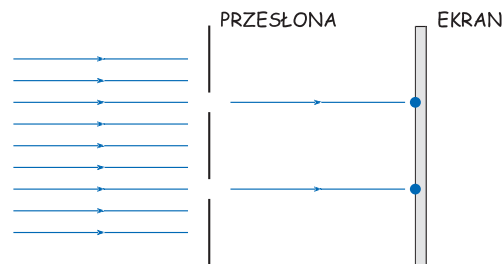
ton. Było to oczywiście bardzo dalekie od naukowych zasad dedukcji i pytanie, czym jest światło, nadal pozostawało bez odpowiedzi.

PIERWSZE EKSPERYMENTALNE ARGUMENTY

Pytanie: jak należy rozumieć naturę rozchodzenia się światła? – znalazło pierwsze doświadczalnie rozstrzygnięcie na samym początku XIX wieku. Wszystko za sprawą angielskiego fizyka Thomasa Younga – wszechstronnego naukowca, który miał osiągnięcia niemal w każdej dziedzinie wiedzy. Thomas Young nauczył się czytać mając dwa lata, a w wieku czterech lat już przeczytał całą Biblię. Biegłe znał czternaście języków. Zajmował się medycyną – jeszcze podczas studiów dokładnie wytłumaczył budowę i zasadę działania ludzkiego oka. Jako jeden z pierwszych dokonał częściowego roszyfrowania egipskich hieroglifów. Porównał zasady gramatyki i słownictwo około czterystu języków i w konsekwencji wprowadził pojęcie języków indoeuropejskich. Był jednym z autorów pierwszego wydania prestiżowej encyklopedii anglojęzycznej Encyclopaedia Britannica. Często o Thomasie Youngu mówi się, że była to „ostatnia osoba, która wiedziała wszystko”.

To ostatnia wielka postać historii, która była zaznajomiona z całą współczesną jej wiedzą cywilizacji Zachodu.

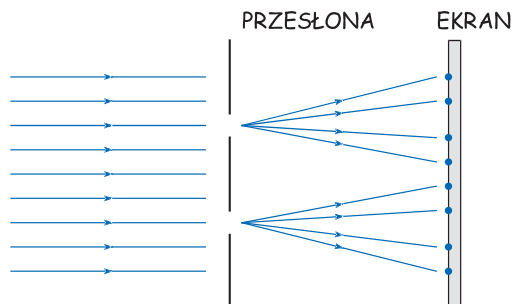
W roku 1803 Thomas Young przeprowadził serię eksperymentów, które pokazały ponad wszelką wątpliwość, że hipoteza Newtona o ziarnistej strukturze światła jest błędna. Eksperymenty polegały na przepuszczaniu światła przez dwie bardzo wąskie i dość blisko siebie położone szczeliny w przesłonie. Gdyby hipoteza Newtona była prawdziwa, to eksperyment powinien przebiegać mniej więcej tak, jak jest to pokazane na poniższym schematycznym rysunku



Światło jako strumień cząstek, które lecą po liniach prostych, powinno uderzać w przesłonę tam, gdzie stoi ona „na drodze” promienia, a przechodzić na drugą stronę dokładnie tam, gdzie jest szczelina.

Promienie światła, którym udało się przejść przez szczeliny w przesłonie, utworzą w miejscach oświetlanych dwa jasne punkty

Rzeczywiście, jeśli wykonuje się ten eksperyment dla odpowiednio dużych szczelin, to przebiega on zgodnie z wnioskami, jakie płyną z hipotezy Newtona. Jednak gdy zrobimy w przesłonie odpowiednio małe szczeliny, to obraz uzyskiwany na ekranie radykalnie się zmieni. Oto pojawi się znacznie więcej miejsc, do których dociera światło. Jeśli kurczowo trzymać się hipotezy Newtona, to sytuacja powinna przebiegać mniej więcej, tak jak ilustruje to poniższy schemat



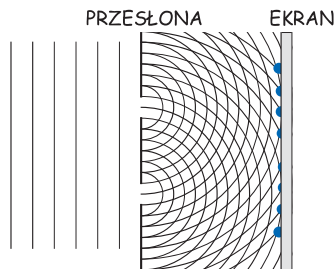
Oznaczałoby to, że w szczelinie, w jakiś dziwny sposób drobina światła zmienia swój kierunek i leci w inną stronę, niż powinna. Co gorsza, różne cząstki muszą lecieć w różnych kierunkach – inaczej nie moglibyśmy przecież uzyskać więcej niż dwóch jasnych punktów na ekranie. Najciekawszym spostrzeżeniem jest jednak to, że jeśli zasłonimy jedną ze szczelin, natychmiast całkowicie przestaje zachodzić to zdumiewające zjawisko, tzn. jasne punkty (wszystkie!) niespodziewanie znikają.

To przekonuje nas, że newtonowski obrazek przenoszenia światła za pomocą małych kuleczek ma się nijak do wyników eksperymentów Thomasa Younga. A tak jak już kiedyś o tym mówiliśmy (MT 6/2006), dla fizyka rozstrzygający zawsze jest wynik eksperymentu. To ni mniej, ni więcej musi oznaczać, że newtonowska hipoteza łąduje w koszu i znów stajemy przed pytaniem: czym zatem jest światło?

WYTŁUMACZENIE JEST PROSTE

Okazuje się, że wyniki doświadczenia Younga, które notabene zostało w Światowym Roku Fizyki 2005 zaliczone do jednego z dziesięciu najważniejszych doświadczeń fizycznych wszech czasów, można łatwo wytłumaczyć, przyjmując dość przewrotną koncepcję, że światło rozchodzi się w przestrzeni jako fala. Dzięki temu, że Young „wiedział wszystko”, bardzo szybko mógł wpaść na ten kuriozalny, wydawałoby się, pomysł. Podobne bowiem zjawisko można zaobserwować na powierzchni wody, gdy płynąca fala próbuje się przedrzeć pomiędzy przeszkodami, które z niej wystają. Na każdej takiej przeszkodzie fala zaczyna się rozprasać i rozchodzić we wszystkich kierunkach w postaci fali kulistej. Jeśli przenieść ten obrazek na realia doświadczenia Younga ze światłem,

oznacza to po prostu, że „fala świetlna” docierająca do przesłony zaczyna rozpraszać się na szczelinach, które się w niej znajdują. Tym samym szczeliny stają się jakby źródłami fal kulistych, które rozchodzą się za przesłoną i docierają do ekranu. Schemat tej sytuacji przedstawia rysunek



Jak łatwo zauważyć, takie postawienie sprawy dramatycznie różni się w skutkach od newtonowskiej koncepcji lecących kuleczek. Po pierwsze, widzimy, że światło pochodzące z każdej ze szczelin może dotrzeć do każdego punktu ekranu. Tym samym może spotkać się tam z falą kulistą, która została wysłana z sąsiedniej szczeliny. Wynik spotkania zależy od tego, w którym miejscu ekranu zachodzi. Są takie punkty, gdzie maksimum jednej fali spotka się z minimum drugiej i obie się wzajemnie wykasują. Taki punkt ekranu nie będzie w ogóle oświetlony. Ale są również takie miejsca, gdzie spotkają się oba maksima. Tam nastąpi wzajemne wzmocnienie się fal, tzn. miejsce to będzie dobrze oświetlone. Punkty te oznaczone są na powyższym rysunku niebieskimi kropkami. Są one właśnie tymi miejscami, do których z niewiadomych przyczyn dolatywałyby newtonowskie drobiniki światła, gdyby jego koncepcja była prawdziwa.

Teraz powinno być już dla nas również jasne, dlaczego w eksperymencie Younga działo się tak, że po zastąpieniu jednej szczeliny cały efekt zniknął. Dlatego, że wtedy udział w doświadczeniu brała tylko jedna fala kulista i tym samym nie było mechanizmu, który mógłby ją w jednym miejscu wygasić, a w innym wzmocnić.

Cała ta historia przekonała fizyków, że światło rzeczywiście jest falą, a nie strumieniem cząstek. Nadal nie było oczywiście wiadomo, czym tak naprawdę jest ta dziwna fala – co takiego drga w niej i jaki jest mechanizm przenoszenia tego drgania. Wszystkie dotychczas znane fale miały ośrodek, w którym się rozchodziły (dźwięk rozchodzi się w powietrzu i jest zaburzeniem ciśnienia, fala na wodzie jest zaburzeniem wysokości słupa wody itd.). O ośrodku, w którym rozchodzi się światło, nic nie było wiadomo.

ŚWIATŁO JAKO FALA ELEKTROMAGNETYCZNA

Jak zapewne uważni Czytelnicy pamiętają (patrz MT 4/2006), odpowiedzi na te konkretne pytania pojawiły się pod koniec XIX wieku. Wtedy to James C. Maxwell na podstawie sformułowanych przez siebie praw elektrodynamiki przewidział (a Hertz odkrył), że istnieją w przyrodzie fale elektromagnetyczne – zaburzenia pól elektrycznego i magnetycznego, któ-



re mogą rozchodzić się w przestrzeni. Wyznaczył on teoretyczną wartość prędkości, z jaką zaburzenia te powinny się rozchodzić i nieoczekiwanie prędkość ta okazała się równa znanej już wówczas prędkości rozchodzenia się światła. Szybko okazało się, że światło jest niczym innym jak szczególnym przypadkiem fali elektromagnetycznej o częstotliwości z odpowiedniego przedziału. Ten właśnie moment w historii fizyki uznałbym za wielki triumf i podsumowanie wyników, jakie otrzymał Young w swoim doświadczeniu. Po niespełna 100 latach uzyskano ostateczny (teoretyczny i doświadczalny) dowód, że to Young miał rację, a Newton się mylił. Od tej pory nikt nie miał już żadnych wątpliwości, że „bajki” o tym, jak to światło jest strumieniem kuleczek, należy na zawsze odłożyć do lamusa. **Światło okazało się falą!**

DROBNE PROBLEMY – WIELKIE ZMIANY

Pozostało jedynie kilka małych problemów teoretycznych z opisem światła jako fali, które wtedy uważane były za nieistotne. Przypomnijmy (MT 12/2006), że chodziło głównie o wytłumaczenie widm promieniowania termicznego ciał. Choć był to rzeczywisty problem, nie przywiązywano do niego zbyt dużej wagi i nikt nie spodziewał się żadnych rewolucji. Falowa natura światła była tak dobrze sprawdzona, że jeśli czegoś można było być pewnym w tamtych czasach, to tego, że światło rozchodzi się jako fala elektromagnetyczna. A jeśli promieniowanie ciał nie daje się w ten sposób wytłumaczyć, to tym gorzej dla tego promieniowania.

Jeszcze w ostatnim roku XIX wieku, czyli niespełna kilka lat po ostatecznym dowodzie na falową naturę światła, pojawił się Max Planck, szaleniec, który chciał wszystko wywrócić do góry nogami. Pokazał dość prostym rachunkiem, że gdyby tak wrócić do starej, nieudolnej hipotezy Newtona o ziarnistości światła i dodać do niej to wszystko na temat światła, o czym przez sto lat ludzkość się dowiedziała, to udało by się skonstruować dość dobry model teoretyczny, który przy okazji pozwalałby wytłumaczyć widmo promieniowania ciała doskonale czarnego. Choć sam Planck wcale przy swojej teorii, jak pogardliwie wtedy o niej mówiono, się nie upierał, to słowo raz powiedziane nie mogło zostać odwołane. Puszka Pandory została otwarta. Ziarna światła Newtona, zwane nowoczesnie **FOTONAMI**, wróciły zza grobu i uderzyły ze zdwojoną siłą. Jakby tego było mało, za chwilę pojawił się inny śmiałek – Albert Einstein, który pokazał, że przyjmując hipotezę Plancka, można jeszcze przy okazji wytłumaczyć inne ciekawe zjawisko (efekt fotoelektryczny), z którym optyka falowa również nie mogła dać sobie rady (MT 01/2006). Tym sposobem znów powróciło stare pytanie!

CZYM, DO DIASKA, JEST ŚWIATŁO?

Odpowiedź na tak postawione pytanie nie jest prosta. Mamy bowiem dwa zbiory doświadczeń, które wydają się całkowicie sprzeczne ze sobą. Z jednej strony stoją doświadczenia Younga i Hertza, podparte całym formalizmem elektrodynamiki – teorii doskonale sprawdzonej w doświadczeniach nad ładunkami i magnesami, w spoczynku i w ruchu. Ta strona przekonuje nas ponad wszelką wątpliwość, że **ŚWIATŁO TO FALA**.

Po drugiej stronie znajduje się hipoteza Maksa Plancka, która pozwala wytłumaczyć promieniowanie ciała doskonale czarnego (Nagroda Nobla w 1918 r.), zjawisko fotoelektryczne (Nagroda Nobla w 1921 r.) czy wreszcie efekt Comptona, w którym fotony grają w bilard z elektronami (Nagroda Nobla w 1927 r.). Ta grupa przekonuje nas, że **ŚWIATŁO TO** bez wątpienia **STRUMIEN CZĄSTEK**.

CZYM ZATEM JEST ŚWIATŁO?!?!?

Skoro istnieją doświadczenia, w których światło raz zachowuje się jak fala (i na pewno nie jak cząstka), a innym razem jak strumień cząstek (i na pewno nie jak fala), to problem wydaje się być nie do pokonania. Natura jest jakby sama w sobie wewnętrznie sprzeczna. Bo czy coś może być równocześnie i rowe-rem, i samochodem? To wydaje się bez sensu!

ODPOWIADAĆ MOŻNA TYLKO NA ROZSĄDNE PYTANIA!

A może po prostu nasze pytanie nie do końca ma sens? Może świat jest tak skonstruowany, że odpowiedź na to pytanie zależy od tego, podczas jakiego eksperymentu je zadajemy. Bo w jaki sposób fizyk może zadawać pytania? Fizyk może tylko przeprowadzać eksperymenty i sprawdzać, jaki jest ich wynik. Można przewrotnie powiedzieć, że to właśnie doświadczenie i pomiar jest pytaniem, a rezultat i wynik są odpowiedziami. Zatem jeśli pytaniem jest: „Jak zachowuje się światło w doświadczeniu Younga?” – to odpowiedzią jest: „Światło jest falą”. Ale gdy zmieniamy doświadczenie np. na badanie efektu fotoelektrycznego, to tak, jakbyśmy zmienili samo pytanie. Wtedy odpowiedzią jest: „Światło jest strumieniem cząstek”.

Ten nierozzerwalny związek pytań z pomiarami, które wykonujemy w laboratoriach, jest ideą, która przyświeca fizykom w mechanice kwantowej – spójnej teorii zjawisk zachodzących w mikroświecie. W najbliższym czasie będziemy o niej sporo mówić i odkrywać kolejne jej tajniki. Trzeba się jednak przygotować, że będzie to droga pełna niespodzianek i bezsensownych, wydawałoby się, stwierdzeń. Ale musi nam ciągle przyświecać jedna myśl: rozstrzygające, niezależnie od tego, czy coś nam wydaje się głupie, czy mądre, musi być doświadczenie. Tylko doświadczenie może ocalić lub obalić jakąkolwiek teorię fizyczną. Na zachętę dodam, że na razie nam, fizykom, nie udało się jeszcze zrobić żadnego eksperymentu, który byłby sprzeczny z mechaniką kwantową, choć czasami prowadzi to do kuriozalnych wniosków. ●